

**CARACTERIZACIÓN METALGRÁFICA, EVALUACIÓN DE LAS
PROPIEDADES MECÁNICAS DE TRACCIÓN E IMPACTO Y ESTUDIO DE LA
SOLDABILIDAD BAJO CÓDIGO AWS D1.1 DEL ACERO A 572 GRADO 50
COMERCIALIZADO POR LA EMPRESA STECKERL ACEROS**

DIEGO MAURICIO SUÁREZ AVELLANEDA

LUZ DARY VANEGAS SÁNCHEZ

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS

ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES

BUCARAMANGA

2015

**CARACTERIZACIÓN METALOGRAFICA, EVALUACIÓN DE LAS
PROPIEDADES MECÁNICAS DE TRACCIÓN E IMPACTO Y ESTUDIO DE LA
SOLDABILIDAD BAJO CÓDIGO AWS D1.1 DEL ACERO A 572 GRADO 50
COMERCIALIZADO POR LA EMPRESA STECKERL ACEROS**

**DIEGO MAURICIO SUÁREZ AVELLANEDA
LUZ DARY VANEGAS SÁNCHEZ**

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título De Ingeniero
Metalúrgico**

DIRECTOR

**JORGE IVÁN BÁEZ LARROTA
Ingeniero metalúrgico**

CODIRECTORES

**ORLANDO JOSÉ GÓMEZ MORENO
Ingeniero metalúrgico, Ph.D**

**JAIME ALBERTO GONZÁLEZ GONZÁLEZ
Ingeniero metalúrgico**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES
BUCARAMANGA**

2015

DEDICATORIA

A Dios por permitirnos culminar con éxito esta etapa tan importante en nuestras vidas, a nuestros padres porque gracias a ellos hemos podido salir adelante y ser profesionales y a nuestros amigos por habernos acompañado en el recorrido por la universidad durante estos años.

Diego Mauricio Suárez Avellaneda

Luz Dary Vanegas Sanchez

AGRADECIMIENTOS

Queremos dar gracias en especial a todos nuestros profesores de la carrera por haber aportado un poco de su conocimiento en nuestra formación tanto personal como profesional. Especialmente agradecemos a los profesores Orlando Gómez y Jaime González por haber sido parte fundamental en la realización de nuestro proyecto de grado y habernos guiado en todo momento.

Gracias al ingeniero Jorge Iván Báez por habernos permitido trabajar con la empresa STECKERL ACEROS.

Y finalmente agradecemos a la Universidad Industrial de Santander por habernos dado la gran oportunidad de formarnos en una de las mejores universidades del país y permitir que hoy en día podamos decir con orgullo que somos egresados UIS.

Diego Mauricio Suárez Avellaneda

Luz Dary Vanegas Sanchez

CONTENIDO

	Página
INTRODUCCIÓN	18
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	19
2. OBJETIVOS.....	20
2.1 OBJETIVO GENERAL	20
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	20
3. MARCO TEÓRICO	21
3.1 ACEROS HSLA	21
3.1.1 Categorías y especificaciones de los aceros HSLA.....	21
3.2 ACERO A572.....	22
3.2.1 Composición química del acero A572.....	23
3.2.2 Prueba de espectrometría de emisión óptica.....	24
3.2.3 Propiedades mecánicas del acero A572.....	24

3.2.4 Tamaño de grano.....	26
3.3 ENSAYOS MECÁNICOS	27
3.3.2 Ensayo de microdureza	28
3.3.3 Ensayo de tracción	28
3.3.4 Ensayo de impacto o ensayo Charpy	29
3.4 SOLDADURA.....	30
3.4.1 Proceso MIG (Metal Inert Gas)	31
3.5 SOLDABILIDAD.....	31
3.5.1 Carbono equivalente.....	31
3.6 DOCUMENTOS REQUERIDOS EN EL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA	32
3.6.1 Especificación del procedimiento de soldadura (WPS).....	32
3.6.2 Registro de calificación del procedimiento (PQR).....	33
3.7 ENSAYOS DE CALIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA ...	33

3.7.1 Radiografía	33
3.7.2 Prueba de dobléz.....	34
3.7.3 Ensayo de tracción	34
4. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	35
4.1 METODOLOGÍA	35
4.2 CARACTERIZACIÓN METALOGRAFICA, MECÁNICA Y QUÍMICA DEL METAL BASE	36
4.2.1 Corte de las probetas.....	36
4.2.2 Preparación superficial.....	36
4.2.3 Prueba de chispa.....	37
4.2.4 Análisis metalográfico	38
4.2.5 Ensayo de dureza	38
4.2.6 Ensayo de tracción	38
4.2.7 Ensayo de impacto	39

4.3 ESPECIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA (WPS).....	39
4.3.2 Radiografía al cordón de soldadura	41
4.4 CARACTERIZACIÓN METALOGRÁFICA Y MECÁNICA DEL METAL	
SOLDADO	41
4.4.2 Ensayo de microdureza	42
4.4.3 Ensayo de tracción y de dobléz	42
4.5 REGISTRO DE CALIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO (PQR)	42
5. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.....	43
5.1 METAL BASE	43
5.1.1 Composición química.....	43
5.1.2 Carbono equivalente.....	44
5.1.3 Metalografía	45
5.1.4 Ensayo de impacto (prueba Charpy)	48
5.1.5 Ensayo de dureza	50

5.1.6 Ensayo de tensión	51
5.2 ESPEFICICACION Y CALIFICACION DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA.....	56
5.2.1 Especificación del procedimiento de soldadura bajo código AWS D1.1	56
5.2.2 Registro de calificación del procedimiento de soldadura	57
5.3 METAL SOLDADO	58
5.3.1 Prueba de radiografía	58
5.3.3 Prueba de dobléz.....	63
5.3.4 Prueba de tensión.....	64
5.3.5 Prueba de microdureza.....	66
6. CONCLUSIONES	68
7. RECOMENDACIONES.....	70
CITAS	71
8. BIBLIOGRAFÍA.....	73

9. ANEXOS74

LISTA DE TABLAS

	Página
Tabla 1. Especificaciones para el acero A-572	22
Tabla 2. Composición química del acero A572 según la norma ASTM A-572	23
Tabla 3. Propiedades de tensión y de elongación del acero A 572 para distintos grados.....	25
Tabla 4. Indicaciones de uso para el electrodo ER70S-6.....	40
Tabla 5. Comparación de la composición química según la norma ASTM A572, el fabricante y la prueba de espectrometría.....	43
Tabla 6. Descripción de las inclusiones de sulfuro encontradas según la norma ASTM E-45	46
Tabla 7. Valores de energía absorbida en la prueba de impacto	49
Tabla 8. Resultados de la prueba de dureza.....	50
Tabla 9. Datos obtenidos de la curva de carga vs deformación del metal base....	52
Tabla 10. Datos de elongación obtenidos para el metal base	53
Tabla 11. Comparación de las propiedades mecánicas del metal base según la norma, el fabricante y el ensayo de tensión aplicado	53
Tabla 12. Comparación de los esfuerzos representativos del metal base y del metal soldado.....	65

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Esquema de la metodología aplicada.	35
Figura 2. Micrografía de inclusiones no metálicas	45
Figura 3. Microestructura del metal base	47
Figura 4. Probetas Charpy ensayadas a temperatura ambiente.....	50
Figura 5. Gráfica de tensión del metal base.....	51
Figura 6. Probetas de tracción del metal base luego de la fractura	54
Figura 7. Superficie de fractura de las probetas de tracción del metal base.....	54
Figura 8. Ficha del WPS aplicado	56
Figura 9. Ficha del PQR aplicado	57
Figura 10. Radiografía del cordón de soldadura	58
Figura 11. Zonas de análisis metalográfico del metal soldado.....	59
Figura 12. Transición metal base - zona de recocido.....	60
Figura 13. Zona de recalentamiento	61
Figura 14. Región superior.....	61
Figura 15. Región central.....	63
Figura 16. Probetas de dobléz del metal soldado luego del ensayo	63
Figura 17. Probetas de tracción del metal soldado luego de la falla	64
Figura 18. Labio de corte en los extremos de la fractura	64
Figura 19. Probeta del metal soldado con macroataque.....	66
Figura 20. Perfil de dureza del metal soldado.....	66

LISTA DE ANEXOS

	Página
ANEXO A. Instrumentos usados para el proceso de soldadura	71
ANEXO B. Maquinaria usada para los ensayos mecanicos y el analisis metalografico	73
ANEXO C. Curvas carga-deformacion del metal base y del metal soldado	77
ANEXO D. Certificados de calidad del acero y de los ensayos para la calificacion del proceso de soldadura	80

RESUMEN

TITULO: CARACTERIZACIÓN METALOGRÁFICA, EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE TRACCIÓN E IMPACTO Y ESTUDIO DE LA SOLDABILIDAD BAJO CÓDIGO AWS D1.1 DEL ACERO ESTRUCTURAL A 572 GRADO 50 COMERCIALIZADO POR LA EMPRESA STECKERL ACEROS *

AUTORES: SUÁREZ AVELLANEDA DIEGO MAURICIO, VANEGAS SÁNCHEZ LUZ DARY **

PALABRAS CLAVE: Aceros de alta resistencia y baja aleación (HSLA), microestructura, prueba de tensión, fluencia, prueba de resistencia al impacto, tenacidad, soldabilidad.

RESUMEN: En este trabajo se lleva a cabo un estudio riguroso de la composición química y de algunas de las propiedades mecánicas del acero estructural A572 Gr 50 que comercializa la empresa STECKERL ACEROS, tomando como requisitos de cumplimiento los parámetros establecidos en la norma ASTM A572 para laminas grado 50. Para esto, inicialmente se hizo una prueba de espectrometría de emisión óptica al acero, obteniéndose como resultado que esta se encontraba dentro de los rangos permitidos. Posteriormente, se hizo la metalografía del metal base para observar la microestructura que se presentaba y la influencia que esta tendría en las propiedades mecánicas del material. Seguidamente fue llevada a cabo la prueba de tracción e impacto, en donde los resultados mostraron que el material cumplía con las exigencias en cuanto a resistencia mecánica y elongación, estando por encima de las especificadas en la norma.

Para el estudio de la soldabilidad, según el código AWS D1.1, como primera medida se elaboró el respectivo WPS y PQR, a continuación, fue llevado a cabo el procedimiento de soldadura en láminas del material en estudio. Una vez terminado, se tomó una radiografía al cordón de la soldadura para verificar que en él no se presentaban irregularidades. A partir de las láminas soldadas se cortaron probetas para realizar el estudio metalográfico y la calificación del procedimiento de soldadura por medio de una prueba de tracción y de doblez (de cara y de raíz). Las micrografías mostraron una buena penetración del material de aporte y una microestructura de granos equiaxiales en la ZAT. En los ensayos de calificación se obtuvo como resultado que las probetas fallaban en el metal base en el caso de la prueba de tracción y un cordón libre de defectos en el caso de la prueba de doblez.

* Modalidad: Practica empresarial

** Facultad de ingenierías fisicoquímicas- Escuela de ingeniería metalúrgica y ciencia de materiales. Director: Jorge Iván Báez Larrota. Codirectores: Orlando José Gómez Moreno, Jaime Alberto González González.

ABSTRACT

TITLE: METALLOGRAPHIC CHARACTERIZATION, EVALUATION OF MECHANICAL PROPERTIES OF TENSILE AND IMPACT AND WELDABILITY STUDY UNDER AWS D1.1 CODE OF A 572 GRADE 50 STRUCTURAL STEEL TRADED FOR STECKERL ACEROS COMPANY *

AUTHORS: SUÁREZ AVELLANEDA DIEGO MAURICIO, VANEGAS SANCHEZ LUZ DARY **

KEYWORDS: High strength low alloy steels (HSLA), microstructure, tensile test, creep, charpy test, tenacity, weldability.

ABSTRACT: This paper conducts a rigorous study of the chemical composition and some of the mechanical properties of ASTM A572 Gr 50 structural steel which markets the company STECKERL ACEROS, taking as compliance requirements the parameters set forth in ASTM A572 standard for Grade 50 sheets. For this, initially conducted an optical emission spectrometry test for steel, obtained as results that this was within the allowable ranges. Subsequently, the base metal metallography was made to observe the microstructure appeared and the influence this would have on the mechanical properties of the material. Next, it was carried out the tensile test, where results showed that the material meets the requirements in terms of mechanical strength and elongation, being above the specified in the standard. Impact test was also carried out at room temperature (25 °C), deformed specimens obtained at the end without breaking completely, thus it found that the steel has good toughness.

For study the weldability, it was applied AWS D1.1 code in the welding procedure qualification. As a first step the respective WPS and PQR was developed. Coming up next, It was carried out welding procedure on study material sheets. Once finished, an X-ray was taken to the welded joint to verify that it had no irregularities. From the welded sheets were cut samples to perform metallographic study and the welding procedure qualification by means of a tensile test and bending (face and root). The micrographs showed good penetration of the filler material and a microstructure of equiaxed grains in the HAZ. In qualification tests was obtained as a result that the specimens failed in the base metal in the case of the tensile test and defect-free welded joint in the case of the bend test.

*Degree project

** Faculty of physiochemical engineering- School of metallurgical engineering and science of materials.

Director: Jorge Iván Báez Larrota. Codirectors: Orlando José Gómez Moreno, Jaime Alberto González González.

INTRODUCCIÓN

La empresa STECKERL aceros de Colombia es una empresa dedicada a la importación y distribución de aceros y hierros fundidos tanto a nivel nacional como a ciertos lugares en el exterior. Dentro de la amplia gama de productos que STECKERL maneja, se encuentra el acero A 572 Gr 50, fabricado por la empresa china MINMETALS YINGKOU MEDIUM PLATE LTDA. Este acero microaleado es de tipo estructural y viene en forma de láminas o chapas.

Con el fin de dar a conocer la calidad de su producto, mostrando que este cumple con las exigencias de resistencia mecánica y composición química que la norma ASTM A572 impone para láminas de grado 50, STECKERL ha solicitado a la escuela de ingeniería metalúrgica que con la ayuda de los estudiantes que deseen poner en práctica los conocimientos adquiridos a través de su carrera, se lleve a cabo un estudio del metal en su estado base y después de haber sido soldado (cordón de soldadura), observándose su composición química, su microestructura, algunas de sus propiedades mecánicas (resistencia a la fluencia, resistencia a la tracción, porcentaje de elongación y resistencia al impacto) y su aptitud a la soldadura (soldabilidad). De esta manera se podrá evidenciar a partir de los resultados obtenidos el cumplimiento de los estándares impuestos por la ASTM para este tipo de material.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la actualidad, una alta competencia se está presentando en cuanto a la fabricación y comercialización de aceros para uso industrial a nivel mundial. Esto ha provocado que quienes los fabrican se tengan que esforzar cada vez más por hacer que sus productos sobresalgan entre otros por su calidad o por su costo. Además, quienes compran dichos productos siempre se deben asegurar de adquirir materiales certificados, que cumplan con los estándares establecidos por las diferentes normas que rigen las propiedades mecánicas y químicas que estos deben tener. De este modo, se descartarán antes de ser usados, posibles inconvenientes que se pudieran llegar a presentar en caso que el producto que se obtuvo no mostrara las características esperadas.

La empresa STECKERL ACEROS, dedicada a la comercialización de aceros y hierros fundidos de diferentes países de procedencia se ha visto afectada por el aumento en la competencia de este mercado, razón por la cual se hace necesario llevar a cabo la certificación de los productos con los que STECKERL cuenta. En este trabajo se realiza un estudio detallado de uno de los aceros que la empresa distribuye, en el cual se comparara su composición química y su resistencia mecánica antes y después de ser soldado con los parámetros que establece la norma ASTM A572 para láminas grado 50 verificando que en él se cumplan dichas exigencias.

Una vez finalizado este análisis, se espera que este sirva para que la empresa pueda contar con un respaldo del material en estudio que le permita adquirir una mayor competitividad en el mercado y como soporte de calidad para sus clientes con el cual se pueda demostrar que el acero A572 grado 50 que STECKERL ACEROS distribuye cumple a plenitud con las exigencias impuestas por la ASTM.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

- Demostrar que el acero estructural comercializado por la empresa STECKERL ACEROS cumple con los requerimientos de resistencia mecánica (tanto en estado base como después de ser soldado) y composición química exigidos por la norma ASTM A 572 para laminas grado 50.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Obtener la composición química del acero en estudio por medio de una prueba de espectrometría de emisión óptica bajo norma ASTM E415.
- Identificar las fases y microconstituyentes presentes en la microestructura del metal en su estado base y posteriormente hacer un análisis cualitativo de estos mediante un estudio metalográfico.
- Obtener el esfuerzo de fluencia, el esfuerzo máximo, el esfuerzo de rotura y el porcentaje de elongación del material a partir de un ensayo de tracción llevado a cabo conforme a la norma ASTM E8,
- Calcular la resistencia al impacto del acero a temperatura ambiente (25 °C) aplicando el ensayo Charpy, tomando como referencia la norma ASTM E23.
- Realizar un estudio de la soldabilidad del acero bajo los parámetros que impone el código AWS D 1.1.

3. MARCO TEÓRICO

3.1 ACEROS HSLA

A fin de mejorar la relación resistencia - peso de los aceros, se han desarrollado los aceros de baja aleación y alta resistencia (HSLA, por sus siglas en inglés: High Strength Low Alloy). Estos se encuentran en el grupo de los aceros de bajo carbono (con contenidos normalmente menores al 0.30%) y están compuestos con pequeñas cantidades de elementos de aleación los cuales les permiten alcanzar límites elásticos superiores a 275 MPa (40 Ksi), en condiciones de laminado o normalizado. [1]

Estos aceros tienen mejores propiedades mecánicas y en algunos casos mejor resistencia a la corrosión que los aceros al carbono laminados. Por otra parte, debido a que la mayor resistencia de los aceros HSLA se puede obtener con bajos contenidos de carbono, la soldabilidad de muchos aceros de este tipo es comparable o inclusive superior que la del acero dulce (cuyo contenido de carbono es de 0.25% aproximadamente). Estos aceros son más económicos que los aceros aleados convencionales por su bajo contenido de elementos aleantes que son los que directamente afectan su costo.

3.1.1 Categorías y especificaciones de los aceros HSLA. Este tipo de materiales no se consideran de aleación a pesar de que sus propiedades se consiguen mediante el uso de pequeñas adiciones de aleantes. De acuerdo al porcentaje de elementos aleantes que este tipo de aceros presentan en su composición química son considerados microaleados.

Aunque los aceros HSLA están disponibles en numerosas normas y grados, estos pueden dividirse en siete categorías: [2]

- Aceros resistentes a la intemperie
- Aceros microaleados ferríticos-perlíticos
- Aceros perlíticos laminados
- Aceros bainíticos
- Aceros fase dual
- Aceros controlados por la forma de las inclusiones
- Aceros resistentes al agrietamiento inducido con hidrogeno

3.2 ACERO A572

Este acero pertenece a la familia de aceros HSLA, presenta una microestructura ferrítico-perlítica y tiene contenidos de niobio y vanadio en pequeñas cantidades que mejoran sus propiedades mecánicas. En las especificaciones dadas por la ASTM, se describen las características y usos previstos para este tipo de acero.

Tabla 1. Especificaciones para el acero A-572.

ASTM Especificación	A-572
Título	- Acero de alta resistencia y baja aleación al niobio-vanadio. - Acero de tipo estructural.
Formas Disponibles	- Placas, varillas. - Espesores ≤200 mm (8 in.)
Características Especiales	-Resistencia a la corrosión atmosférica cuatro veces mayor a la de los aceros al carbono.
Usos Previstos	- Soldado, atornillado o remachado de estructuras. - Remachado con pernos de puentes y edificios.

Fuente: American society for metals handbook (ASTM A-572).

3.2.1 Composición química del acero A572. La composición química de los aceros HSLA, se encuentra especificada por las normas ASTM. La función principal de los elementos de aleación en estos aceros aparte de la resistencia a la corrosión, es el endurecimiento de la ferrita por: refinamiento de grano, endurecimiento por precipitación y endurecimiento por solución sólida. La tabla 2 muestra los rangos de composición química permitidos por la ASTM para el acero A572.

Tabla 2. Composición química del acero A572 según la norma ASTM A-572.

C%	Mn %	P %	S %	Si %	Nb y V %	Cu %	Ni %	Cr %	Mo%
Max.	Max	Max	Max	Max	Max	Max	Max	Max	Max
0.23	1.35	0.04	0.05	0.4	0.15	0.6	0.45	0.35	0.15

Fuente: American society for metals handbook (ASTM A-572).

El alto rendimiento ante la aplicación de esfuerzos se consigue mediante los efectos combinados de: tamaño de grano fino desarrollado durante la laminación controlada en caliente y el fortalecimiento por precipitación que se debe a la presencia de vanadio, niobio y/o titanio. A continuación se mencionan algunas de los efectos producidos por el niobio y el vanadio en el acero A572.

- **Vanadio:** El vanadio contribuye al mejoramiento de las propiedades mecánicas del acero mediante la formación de finas partículas de precipitados en la ferrita durante el enfriamiento después del laminado en caliente. Estos precipitados de vanadio, que no son tan estables como los precipitados de niobio, están en solución a todas las temperaturas de laminación normales y por lo tanto son muy dependientes de la velocidad de enfriamiento para su formación.

- **Niobio:** El niobio hace que aumente el esfuerzo en el cual el material empieza a deformarse plásticamente (límite elástico), esto como producto de un endurecimiento por precipitación, en donde la magnitud del aumento depende del tamaño y la cantidad de carburos de niobio que se encuentren precipitados. Sin embargo, el niobio es también un refinador de grano más eficaz que el vanadio.

- **Niobio-Vanadio:** El efecto sinérgico de ambos elementos (niobio y vanadio) proporciona un mayor límite elástico en la laminación en caliente convencional del que se pudiera conseguir con solo un elemento.

Es muy importante controlar las cantidades de los elementos aleantes que componen el acero debido a que un pequeño cambio en ellas puede generar alteraciones significativas en el rendimiento del material, por lo tanto es necesario verificar los porcentajes de composición por medio de alguna técnica o proceso, que, en el caso de muestras metálicas, la técnica de espectrometría de emisión óptica es la más adecuada.

3.2.2 Prueba de espectrometría de emisión óptica. Es una técnica que permite identificar los elementos que componen una muestra y el porcentaje o la cantidad en la que se encuentran presentes. Este método analiza la longitud de onda de los fotones emitidos por los átomos de cada elemento al momento en el que sus electrones se llevan a un estado de excitación por medio de la aplicación de una chispa. Cada elemento emite una longitud de onda característica la cual está determinada por la distribución de sus electrones. Observando estas longitudes de onda se puede determinar la composición química de la muestra con gran exactitud.

3.2.3 Propiedades mecánicas del acero A572. En la tabla 3 se observan los valores de resistencia mecánica del acero A572 para distintos grados.

Tabla 3. Propiedades de tensión y de elongación del acero A 572 para distintos grados.

Especificación ASTM	Grado	Espesor D del producto		Resistencia mínima a la tracción		Limite Elástico Mínimo		Alargamiento mínimo, %	
		mm	in	Mpa	Ksi	Mpa	Ksi	En 200 mm	En 50 mm
A-572	Grado 42	150	6	415	60	290	42	20	24
	Grado 50	100	4	450	65	345	50	18	21
	Grado 60	32	$1\frac{1}{4}$	520	75	415	60	16	18
	Grado 65	32	$1\frac{1}{4}$	550	80	450	65	15	17

Fuente: American society for metals handbook (ASTM A-572).

La resistencia requerida en este acero se obtiene mediante un efecto combinado de: [2]

- **Afinación del tamaño de grano** que se desarrolla durante la laminación en caliente controlada. Esto se mejora por medio de elementos de aleación (especialmente el niobio).
- **Endurecimiento por precipitación** causado por la presencia de vanadio, niobio y titanio en la composición química del acero.

Las propiedades mecánicas son directamente afectadas tanto por la composición química como por la microestructura que esté presente en el acero. Uno de los factores que afecta principalmente a la resistencia mecánica de un material es el tamaño de grano.

En el caso del acero A572 los contenidos de niobio y vanadio permiten la afinación del grano provocando un mejoramiento en sus propiedades mecánicas.

3.2.4 Tamaño de grano El tamaño de grano influye de manera significativa en las propiedades mecánicas de los metales. Los metales de grano fino por lo general tienen:

- Mayor resistencia a la tracción
- Mayor dureza
- Se distorsionan menos durante el temple
- Son menos susceptibles al agrietamiento

• **Métodos para la medición del tamaño de grano** Existe una gran variedad de técnicas mediante las cuales es posible distinguir un tamaño de grano promedio en un metal. En la norma ASTM E112 se establecen las diferentes formas que se pueden aplicar para la medición del tamaño de grano. Algunas de ellas son:

- Método de comparación
- Método planimétrico o de Jeffries
- Método de intercepto general
- Método de intercepto lineal de Heyn
- Método de intercepto circular

En el caso del método de comparación, que es el usado habitualmente, involucra la comparación de la estructura de grano con una serie de imágenes graduadas. Cuando el grano se encuentra fuera de la serie de la rejilla, se utilizan otros aumentos y se corrige el valor, mediante la suma del factor de corrección Q.

El valor del factor Q se halla usando la siguiente relación:

$$Q = 2 \log_2 \frac{M}{M_b}$$

Ecuación 1. Factor de corrección de tamaño de grano

En donde:

Q : Factor de corrección de medida

M : Aumentos a los que se hizo la observación.

M_b : Aumentos estándar a los que se realiza la observación según la norma (100X).

Este factor se añade a la medida aparente que tienen los granos según los aumentos a los que se hace la observación, de esta manera:

$$\# \text{ grano observado} + \text{Factor de corrección } Q = \# \text{ de grano verdadero}$$

3.3 ENSAYOS MECÁNICOS

Permiten conocer la resistencia que un material posee ante la deformación plástica como también su ductilidad. A continuación se mencionan algunos de ellos.

3.3.1 Ensayo de dureza Rockwell. Este ensayo consiste en forzar un indentador en la superficie de una probeta en dos etapas, a unas condiciones específicas. De acuerdo a la profundidad de la huella resultante por la aplicación de la carga y dependiendo del tipo de indentador utilizado, se da una medida de la dureza del material. Además, según la carga que se aplique para deformar la probeta, se utiliza una escala de dureza determinada. [5]

3.3.2 Ensayo de microdureza. Es un ensayo de precisión que consiste en generar una huella muy pequeña para medir la dureza de zonas con un tamaño muy reducido. Se utiliza en metalurgia, para evaluar la dureza entre fases diferentes o para analizar la dureza de un recubrimiento (como los galvanizados). El principal inconveniente es que se necesita una gran preparación superficial, llegando al pulido metalográfico.

3.3.3 Ensayo de tracción. El ensayo de tracción en materiales metálicos se rige por la norma ASTM E8. Consiste en someter una probeta normalizada a un esfuerzo axial de tracción creciente hasta que se produce la rotura de la probeta. Este ensayo mide la resistencia de un material a una fuerza estática o aplicada lentamente. [4] Las probetas usadas en tracción constan de una sección reducida en el centro para inducir a que la fractura se lleve a cabo en esta sección de la probeta, además sus extremos de mayor sección se usa para facilitar la fijación de la probeta a la máquina. Posee un ángulo suave para que no actúe como concentrador de cargas. Específicamente se determina la resistencia a la fluencia, la resistencia a la tracción, el alargamiento y la reducción de área.

Para calcular los esfuerzos ingenieriles se asume un área constante mediante la relación:

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

Ecuación 2. Relación de esfuerzo

Para conocer el porcentaje de elongación que sufre el material se aplica la relación:

$$\% \text{ elongacion} = \frac{L_f - L_o}{L_o} * 100$$

Ecuación 3. Porcentaje de elongación

3.3.4 Ensayo de impacto o ensayo Charpy. La norma ASTM E23 especifica el método para determinar la resistencia al impacto de un metal. El ensayo Charpy consiste en romper de un solo golpe, con un martillo pendular y bajo condiciones definidas, una pieza de ensayo que tiene en medio de ella una entalla (normalmente en forma de V) y que se encuentra apoyada en dos soportes con el fin de conocer la tendencia que el material tiene a fracturarse de forma frágil. La entalla actúa como concentrador de esfuerzos provocando que en ella se inicie el rompimiento de la probeta. A partir de este procedimiento se determina la energía que el metal absorbe antes de romper. [3]

El cálculo de la energía necesaria para romper la probeta se realiza usando la ecuación:

$$E_r = E_i - E_f - E_k$$

Ecuación 4. Energía absorbida en el ensayo Charpy [11]

En la cual:

E_r : Energía requerida para romper la probeta

E_i : Energía registrada por la maquina en el ensayo

E_f : Energía registrada por la maquina en caída libre del péndulo

E_k : Energía cinética necesaria para el desplazamiento de las fracciones de probeta luego de la rotura.

La energía cinética necesaria para el desplazamiento de las fracciones de probeta luego de la rotura puede ser calculada como:

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2$$

Ecuación 5. Energía cinética [11]

Donde m es la masa de la probeta y v es la velocidad de las fracciones, que se asume igual al velocidad del péndulo en el momento del impacto ($v = 5,6$ m/s).

- **Tipos de fractura en metales.** La fractura es la separación o fragmentación de un cuerpo solido en dos o más partes bajo la acción de una tensión. Las fracturas se pueden clasificar en dos categorías generales: fractura dúctil y fractura frágil.

- La fractura frágil de los metales se caracteriza por una rápida velocidad de propagación de grietas sin deformación macroscópica y muy poca micro deformación.

- Las fracturas dúctiles se caracterizan por una deformación plástica apreciable antes y durante la propagación de grietas. En las superficies fracturadas se observa normalmente un grado perceptible de deformación macroscópica. [4]

3.4 SOLDADURA

La American Welding Society (AWS) establece que la soldadura es un proceso de unión de piezas, de materiales ya sean metálicos o no metálicos, llevándolas a temperaturas específicas (temperaturas de soldadura), aplicando o no presión y/o material de aporte. En general, se puede decir que la soldadura es el proceso mediante el cual se unen entre si piezas separadas aplicándoles calor hasta el punto en el que estas comiencen a fluir (se fundan) y así obtener como resultado una sola pieza. Las fuentes que se usan para aportar la energía que requieren las piezas para que se fundan son variables, pasando por llamas de gas, arcos eléctricos, pequeñas explosiones localizadas, etc.

3.4.1 Proceso MIG (Metal Inert Gas). En el proceso MIG (una variante del proceso GMAW), un sistema de alimentación impulsa en forma automática y a velocidad predeterminada el alambre-electrodo hacia el trabajo o baño de fusión, mientras la pistola de soldadura se posiciona a un ángulo adecuado y se mantiene una distancia tobera-pieza, generalmente de 10 mm. El área de soldadura y arco están debidamente protegidas por una atmósfera gaseosa suministrada externamente, que evita la contaminación. Gases inertes y activos se emplean en el sistema MIG. En la soldadura de metales ferrosos se pueden emplear gases inertes o activos. Gases activos como: Dióxido de carbono, mezclas de dióxido de carbono, o gases protectores que contienen algún porcentaje de oxígeno. Estos gases no son químicamente inertes y pueden formar compuestos con los metales. [8]

3.5 SOLDABILIDAD

Este término describe la aptitud que tiene cualquier material de dejarse soldar y presentar uniones de calidad que cumplan con los requerimientos prescritos por los diferentes códigos que son aplicados para calificar procedimientos de soldadura. Existen muchos factores que pueden afectar la soldabilidad de un material, por lo cual no se puede generalizar al hablar de esta propiedad.

Se habla que un material tiene buena soldabilidad cuando se pueda soldar por cualquiera de los métodos que existen (SMAW, GMAW, FCAW, etc.) y no requiera de procedimientos complementarios. Es preciso conocer la composición química de un acero para calcular el carbono equivalente que este presenta y a la vez predecir su aptitud al soldeo.

3.5.1 Carbono equivalente. Es una expresión desarrollada para estimar la susceptibilidad de craqueo de un acero durante la soldadura y para determinar si el acero necesita un tratamiento de calor antes y/o después de la soldadura para así evitar el agrietamiento.

Generalmente, conociéndose el rango en el que se encuentra el carbono equivalente se pueden dar ciertas especificaciones para tener una buena soldadura.

Para el cálculo del carbono equivalente, en el caso específico del acero ASTM A572 se usa la relación:

$$C_{eq} = C + \frac{Mn + Si}{6} + \frac{(Cu + Ni)}{15} + \frac{(Cr + Mo + V + Nb)}{5}$$

Ecuación 6. Porcentaje de carbono equivalente para el acero A 572 [10]

3.6 DOCUMENTOS REQUERIDOS EN EL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA

3.6.1 Especificación del procedimiento de soldadura (WPS) Es un documento diseñado por personal calificado en el cual se anexan las instrucciones que debe seguir el soldador al momento de operar, relacionando todas las variables que deben considerarse (esenciales, no esenciales y suplementarias) y los ensayos de calificación que se deben aplicar. Todo esto basándose en un código específico.

Dependiendo del código que se utilice como guía para la elaboración del WPS se tendrá un formato diferente. Sin embargo, la información que en este se registra generalmente es la siguiente: [7]

- ✓ Metal base
- ✓ Metal de aporte
- ✓ Espesor de las piezas
- ✓ Diseño de junta
- ✓ Tipo de soldadura
- ✓ Posición de soldadura
- ✓ Gas de protección
- ✓ Características eléctricas (voltaje y corriente)

3.6.2 Registro de calificación del procedimiento (PQR) Es un documento anexo al WPS cuyos propósitos son en primera instancia calificar el procedimiento de soldadura y posteriormente ratificar si la soldadura aplicada cumple los requerimientos exigidos en cuanto a su resistencia mecánica. Aquí se anexan los valores específicos de las variables aplicados en el proceso. Un inspector verifica que en el cordón no se presenten imperfecciones y que los parámetros aplicados por el soldador estén dentro de los establecidos por el WPS. Una vez terminada la inspección visual, y quede avalado el procedimiento se envían las placas para realizar las pruebas mecánicas de calificación.

En el PQR se debe detallar además el nombre del soldador, su estampa y su número de identificación, el inspector responsable de realizar las pruebas con su respectiva firma, el inspector responsable de diseñar el WPS, la fecha y el código bajo el cual se calificó el procedimiento. [9]

3.7 ENSAYOS DE CALIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA

Según el código AWS D1.1 para láminas con espesor de 9 mm los ensayos de calificación del procedimiento de soldadura que se deben aplicar son los siguientes:

3.7.1 Radiografía. Para una calificación aceptable, la soldadura según lo revelado por el ensayo radiográfico o el ultrasónico, deberán estar en conformidad con los requerimientos del código que se esté aplicando para la calificación del procedimiento de soldadura. Las soldaduras probadas mediante la prueba radiográfica que no cumplan con los requerimientos o con los criterios de aceptación, deberán ser reparadas. Las irregularidades que no sean grietas, deberán evaluarse sobre la base de ser alargadas o redondeadas.

3.7.2 Prueba de doblez. Cada probeta deberá doblarse en una plantilla de prueba que cumpla con los requerimientos siempre que el radio máximo de dobladura no sea excedido. Cualquier medio conveniente puede usarse para mover (trasladar) el pistón tubular con relación al punzón embutidor. La probeta deberá estar colocada en el punzón embutidor de la plantilla con la soldadura en la mitad del radio de acción. Las probetas de doblado de cara deberán colocarse con la cara de la soldadura dirigida hacia la abertura, igualmente para el doblado de raíz deberán colocarse con la raíz de la soldadura hacia la abertura. [6]

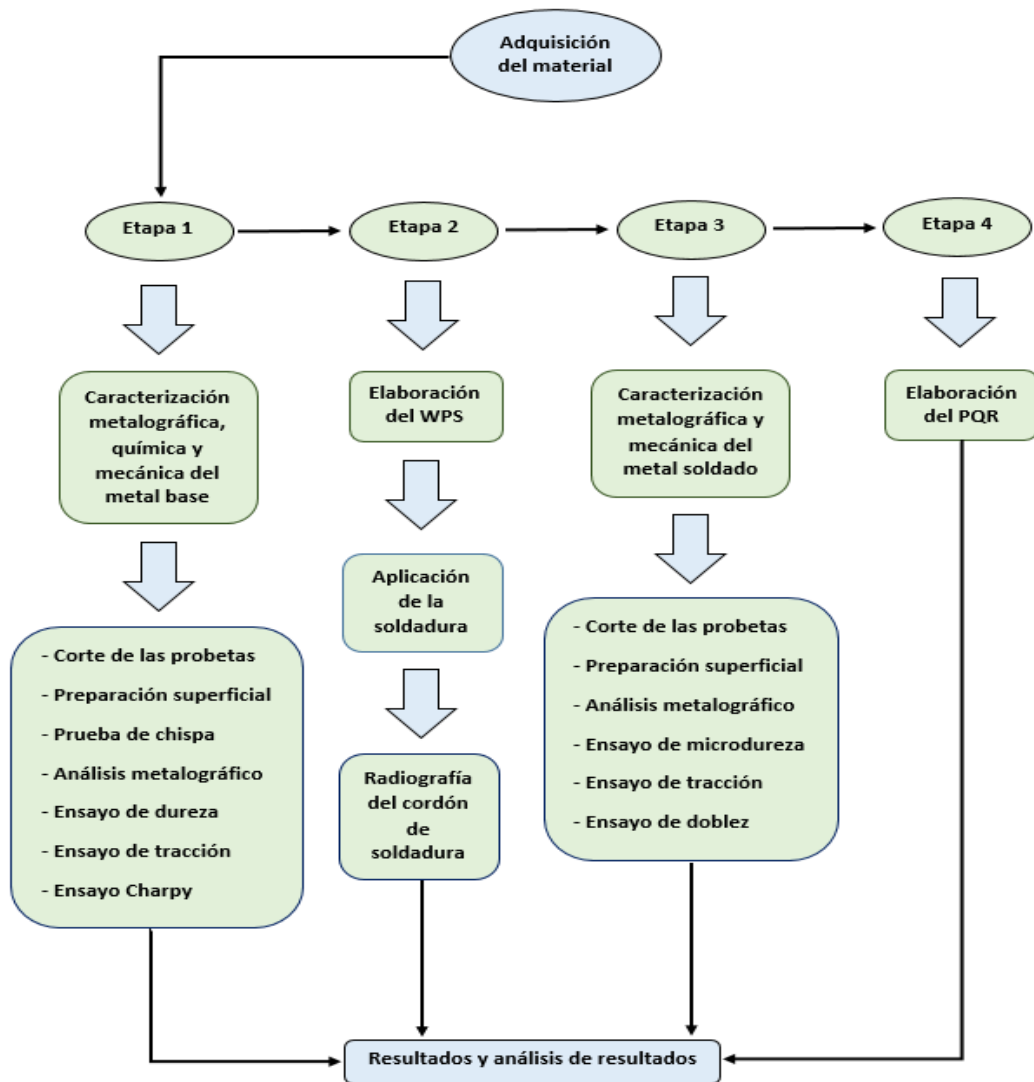
3.7.3 Ensayo de tracción. En este ensayo el objetivo es ver la resistencia mecánica de la unión soldada. Se toma como referencia los valores de resistencia del metal base, para luego del procedimiento, como primera medida observar la zona en la que se produce la rotura de las probetas y posteriormente analizar el esfuerzo de fluencia y el esfuerzo máximo soportado por las probetas, que deben resultar iguales o superiores a los mostrados por el metal base

4. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

4.1 METODOLOGÍA

La manera en la que se llevó a cabo todo el procedimiento para el respectivo análisis del acero se muestra en la figura 1, indicando posteriormente la norma bajo la cual se realizó cada uno de los ensayos.

Figura 1. Esquema de la metodología aplicada.



4.2 CARACTERIZACIÓN METALOGRAFICA, MECÁNICA Y QUÍMICA DEL METAL BASE

4.2.1 Corte de las probetas. El acero en estudio fue proporcionado por la empresa STECKERL ACEROS en forma de láminas. Posteriormente se tomaron mediante el uso de una cortadora de disco abrasivo diferentes muestras para su respectivo análisis metalográfico. También fueron enviadas a mecanizar las probetas requeridas para la realización de los ensayos de tracción e impacto, manteniendo las dimensiones estipuladas por las normas: ASTM E8 para probetas de sección rectangular en el caso del ensayo de tracción y ASTM E23 para probetas con entalla en V en el caso del ensayo Charpy.

4.2.2 Preparación superficial. En las probetas para estudio metalográfico del metal base, se procedió a eliminar todas las rebabas y rayas producidas al momento del corte hasta obtener una superficie prolija (especular). Esto se logró mediante el siguiente procedimiento:

✓ **Corte de las muestras.** Las cuales fueron obtenidas con el uso de una cortadora de disco. En el caso del metal base se hicieron cortes de la sección transversal y longitudinal del material, mientras que en el metal soldado solo se hicieron cortes transversales.

✓ **Montaje en baquelita.** Se hizo únicamente a las muestras del metal base, debido a que estas tenían un tamaño menor que el de las muestras de metal soldado. El uso de la baquelita permite una mejor manipulación de la muestra. El montaje se realizó mediante una prensa para montaje en baquelita (ver anexo B8).

✓ **Desbaste.** Es el proceso en el cual se hace pasar el material por diferentes lijas con el fin de obtener una superficie totalmente lisa, libre de rebabas o filos y también eliminar la mayor cantidad de rayas posible. Inicialmente se hizo un desbaste con papel de lija N° 80, pasando luego por 120, 240, 320, 400, 600, 1200 y 1500 que fue el más fino que se utilizó.

✓ **Pulido.** Consiste en eliminar las rayas residuales que quedan luego del proceso de desbaste mediante el uso de abrasivos sobre paños, permitiendo así la remoción de material superficial para la obtención de una pieza libre de rayas e imperfecciones. En este caso se usó pasta de diamante como abrasivo.

✓ **Ataque.** Para poder revelar los bordes de los granos en la microestructura interna del material (esto con el fin de poder ser vista en el microscopio) se usan diferentes reactivos químicos. Para el ataque se utilizó una solución de nital (ácido nítrico y alcohol) al 2%.

4.2.3 Prueba de chispa. A partir de los resultados obtenidos de la prueba de espectrometría de emisión óptica (prueba de chispa) aplicada a una muestra del material conforme a la norma ASTM E415, se procedió a compararlos con los datos de composición suministrados por el fabricante y por la norma ASTM A 572 con el fin de comprobar si el acero cumplía químicamente con los requerimientos. Posteriormente se hizo una comparación entre el carbono equivalente de la composición real y la del fabricante para analizar por medio de estos valores el posible comportamiento que tendría el material al momento de ser soldado. El ensayo de espectrometría fue llevado a cabo por la empresa WEST ARCO en la ciudad de Bogotá (ver anexo D3).

4.2.4 Análisis metalográfico Aquí se hizo un estudio de las inclusiones no metálicas del acero y del tamaño de grano presente bajo normas ASTM E45 Y ASTM E112 respectivamente, además de un análisis cualitativo del tipo de microestructura presente en el material.

La observación de las inclusiones se hizo a 100 aumentos en el microscopio, en la sección longitudinal del material y sin atacar que es como lo describe la norma. El tamaño de grano y la microestructura del metal base fueron observados a distintos aumentos en la sección transversal del material y utilizando como reactivo de ataque nital al 2%. El estudio metalográfico se realizó usando un microscopio óptico invertido (ver anexo B2).

4.2.5 Ensayo de dureza El fin de esta prueba fue determinar si existían variaciones significativas en la dureza del material, y por ende analizar si había homogeneidad en su estructura y en sus propiedades mecánicas para descartar posibles zonas de elevadas dureza que actuaran como concentradores de esfuerzos y pudieran llevar al metal a una falla a corto plazo. Los ensayos se llevaron a cabo usando un durómetro Rockwell (ver anexo B3) bajo la norma ASTM E18.

4.2.6 Ensayo de tracción Esta prueba permitió conocer la resistencia mecánica que tiene el material ante la aplicación de un esfuerzo, mostrando las condiciones a las que empieza a deformarse y finalmente falla. Además se pudieron calcular los esfuerzos de fluencia, de rotura, el esfuerzo máximo soportado por el acero y el porcentaje de elongación que este presenta. Las pruebas fueron llevadas a cabo en una maquina universal de ensayos (ver anexo B4).

4.2.7 Ensayo de impacto. Este ensayo mostro la resistencia al impacto que tiene el material a temperatura ambiente (aprox. 25° C) y el comportamiento que presenta la fractura a estas condiciones.

Para realizarlo se utilizó una máquina para ensayo de impacto (ver anexo B5).

4.3 ESPECIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA (WPS)

El proceso de soldadura de las láminas fue llevado a cabo en la empresa QUALITY WELDING en la ciudad de Bogotá en donde basándose en el tipo de material a soldar, en la forma en la que se encuentra, en sus dimensiones y en las especificaciones del electrodo a utilizar se completó el formato de especificaciones del proceso de soldadura según lo estipulado por el código AWS D1.1 de la siguiente manera:

- **Tipo de junta:** La unión de las láminas se hizo en forma de canal de penetración completa (CJP). Ya que ambas tenían el mismo espesor, se optó por hacer una junta a tope con bisel en v que es el tipo de unión más sencilla y comúnmente usado en estos casos, permitiendo así una buena penetración del material de aporte. La separación que debe existir en la raíz, el ángulo de separación del canal y la altura de la v se tomaron de acuerdo a lo que se indica en el código.

- **Método de soldadura:** Los procesos de soldadura aplicados al acero ASTM A572 grado 50 son SMAW, SAW, GMAW y FCAW. De las técnicas que se nombran, se optó por usar el GMAW (soldadura de arco metálico con protección gaseosa), específicamente el proceso MAG (protección del metal con gas activo), con el fin de obtener una soldadura limpia. Se trabajó con polaridad invertida (electrodo positivo) que es la más usada para este tipo de soldadura.

- **Electrodo:** Teniendo en cuenta que se trabajó con proceso MAG, que el material a soldar era un acero al carbono de baja aleación y que la resistencia a la tracción de este era de 350 Mpa [aprox. 70 Ksi] según el fabricante, fue elegido como electrodo de trabajo el alambre ER70S-6 de diámetro 0.045” según el código AWS A.5.18 que especifica los materiales de aporte que se deben usar.

Tabla 4. Indicaciones de uso para el electrodo ER70S-6.

Electrodo	ER 70S-6
Diámetro	0,045”
Gas de protección	Mezcla Ar (75%) / CO2 (25%)
Resistencia a la tracción	72-86 Ksi
Amperaje recomendado	100-340 Amperios
Posición de trabajo	Todas las posiciones (en corto circuito)
Aplicaciones	Soldadura de lámina delgada

Fuente: Catalogo de electrodos de la empresa WEST ARCO.

- **Posición de trabajo:** Puesto que en el proceso GMAW se puede trabajar en todas las posiciones, se optó por trabajar en posición horizontal (2G: Placas verticales con eje de soldadura horizontal) para evitar que la fuerza gravitatoria actuara sobre las gotas de metal fundido al momento de su deposición.

4.3.1 Procedimiento de soldadura El procedimiento de soldadura fue llevado a cabo por un soldador calificado luego de contar con el respectivo WPS. Una vez terminado, se realizó una inspección visual al cordón de soldadura para verificar que no se presentaran defectos en su superficie. Posteriormente, las láminas soldadas (también denominadas cupón) fueron enviadas a la empresa TECNIRAD LTDA de la ciudad de Bogotá para que se realizara un estudio por medio de radiografía a la junta soldada.

Las pruebas mecánicas de calificación de la soldadura, que en este caso fueron doblez de cara y de raíz y ensayo tracción fueron realizadas en la empresa CONTROL CALIDAD Y MONTAJES LTDA de la ciudad de Bogotá para la calificación del procedimiento aplicado.

En los anexos D4, D5 y D6 se pueden ver los reportes de los resultados obtenidos en las pruebas.

4.3.2 Radiografía al cordón de soldadura Mediante el uso de una radiografía tomada al cordón de soldadura aplicado en la unión de las láminas del metal base se verificó si se presentaba algún tipo de discontinuidad o imperfección que pudiera perjudicar la calidad de este al momento de ser sometido a pruebas mecánicas. En el análisis de calificación se usó como fundamento el código AWS D1.1 respecto a las dimensiones permisibles que podían tener las imperfecciones que se llegaron a presentar.

4.4 CARACTERIZACIÓN METALGRÁFICA Y MECÁNICA DEL METAL SOLDADO

Una vez llevada a cabo la unión de las láminas de acero por medio de soldadura, y verificado por medio del ensayo de radiografía que en la junta soldada no se presentaran defectos con los cuales no quedara calificado el procedimiento de soldadura aplicado, se cortaron del cupón muestras para realizar el análisis metalográfico de la unión soldada. Para la preparación superficial de las probetas del metal soldado se siguió el mismo procedimiento que en el caso del metal base.

4.4.1 Análisis metalográfico En el metal soldado se analizó la estructura presente en las 3 zonas de interés del proceso de soldadura (metal base, zona afectada térmicamente y metal de aporte) y el tipo de transición de una estructura a otra en la sección transversal de las probetas usadas. Una vez recopilados los

datos, se observó la influencia que estos tenían en las propiedades mecánicas que podría presentar el material.

4.4.2 Ensayo de microdureza Con este ensayo se quiso observar las variaciones de dureza que se presentan en el material a medida que se produce el cambio en su microestructura, percatándose que no exista un cambio significativo entre la dureza del metal base y el material de aporte, con el fin de garantizar la inexistencia de concentradores de esfuerzos por gradientes de dureza. La prueba de microdureza se realizó bajo norma ASTM E384 y se utilizó un microdurómetro marca Innova test (ver anexo B3).

4.4.3 Ensayo de tracción y de dobléz Con estos ensayos lo que se busco fue observar el comportamiento que tendría la unión de la soldadura ante la aplicación de esfuerzos de flexión (tanto en la cara como en la raíz de la soldadura) y de tensión con el fin de asegurar que su resistencia mecánica fuera igual o superior a la del metal base.

4.5 REGISTRO DE CALIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO (PQR)

Para la calificación del procedimiento de soldadura se aplicaron las respectivas pruebas en el laboratorio de ensayos mecánicos CONTROL CALIDAD Y MONTAJES LTDA en la ciudad de Bogotá. Tomando como base lo mencionado por el código, fueron llevadas a cabo las pruebas de tracción del metal con sección reducida, de dobléz de cara y de raíz y la radiografía industrial. Una vez se comprobó que la soldadura aplicada cumplía con los requisitos para ser aprobado o calificado, se procedió a completar el formato de especificaciones registrando las variables reales con las que se trabajó al momento de realizarlo además de los resultados vistos en los ensayos de calificación.

5. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

5.1 METAL BASE

5.1.1 Composición química Una vez obtenidos los datos de la prueba de espectrometría se compararon con los datos de composición brindados por el fabricante y los estipulados en la norma ASTM A572. En la tabla 5 se muestran los resultados:

Tabla 5. Comparación de la composición química según la norma ASTM A572, el fabricante y la prueba de espectrometría.

Composición química			
Elemento	Norma	Fabricante	Espectrometría
C	0,23 Máx.	0.17	0,14441
Mn	1,35 Máx.	1.51	1,27721
Si	0,4 Máx.	0.31	0,19903
P	0,04 Máx.	0.023	0,0106
S	0,05 Máx.	0.008	0,01215
N	0,015 Máx.	0.004	0,00561
Nb	0,005 – 0,05	0.012	0,001
V	0,01 – 0,15	0.002	0,001
Cu	-	0.012	0,00581
Ni	-	0.007	0,01602
Cr	-	0.008	0,02229
Mo	-	0.005	0,01375
B	-	0.0018	0,00167

Fuente: Norma ASTM A572, fabricante e informe de la WEST ARCO.

De acuerdo a los resultados mostrados en la tabla 5, se puede apreciar que las cantidades de niobio y vanadio reales están por debajo del rango permitido por la norma. Sin embargo, el resto de los elementos presentes se encuentran dentro de los valores aceptados. Debido a que el mejoramiento de las propiedades mecánicas del acero A572 se obtiene por un efecto combinado de reducción del tamaño de grano durante el proceso de conformado del material (laminación controlada) y de precipitación de partículas finas dentro de la microestructura, el hecho de que se presenten bajos contenidos de los elementos que actúan como reductores del tamaño de grano que son el niobio y el vanadio no es un criterio suficiente para descartar el buen rendimiento del acero. Para poder afirmar que el material en estudio cumple con la norma ASTM A572 es necesario observar sus propiedades mecánicas a partir de los ensayos de tracción y de impacto. Acorde con los resultados obtenidos en la tabla 5, el acero según su contenido de carbono puede ser clasificado como acero de bajo carbono y respecto a la cantidad de aleantes presentes como acero microaleado, características que presentan los aceros de tipo estructural.

5.1.2 Carbono equivalente Para conocer el comportamiento aparente que tendrá el material en el proceso de soldadura se procedió a calcular el carbono equivalente presente. Usando la composición química según la prueba de espectrometría como referencia y reemplazando los valores en la ecuación 6 se obtuvo:

$$C_{eq} = 0.3996\%$$

Para aceros estructurales con contenidos de carbono mayores a 0.12%, es recomendable que el carbono equivalente presente no sea mayor a 0.45% para que no se presenten problemas de soldabilidad. [12]

Luego de acuerdo al resultado que se obtuvo se puede ver que en cuanto al criterio de la cantidad de carbono equivalente presente, el acero en estudio debe presentar una buena aptitud a la soldadura.

5.1.3 Metalografía

- **Inclusiones no metálicas:** El estudio de las inclusiones en el material se llevó a cabo con el fin de determinar el tipo de impurezas presentes en su microestructura, debido que estas afectan de manera negativa las propiedades del acero. Para este análisis se aplicó la norma ASTM E45. La figura 2 muestra los resultados que se obtuvieron:

Figura 2. Micrografía de inclusiones no metálicas. (Sección longitudinal, 100X, sin ataque).



Según los resultados obtenidos, la observación a 100 aumentos mostró que había presencia de poros y silicatos dentro de la microestructura, esto se comprobó haciendo la posterior observación a mayores aumentos y analizando el contorno de las inclusiones verificando en el caso de los silicatos, que no se trataran de rayas producidas en el desbaste de la probeta y en el caso de los poros, que no fueran óxidos globulares.

Esto se verifica debido a que la manera en como interactúa la luz en los poros es diferente que en las inclusiones, mostrando en los bordes una especie de sombra característica. Estas porosidades son producto de pequeñas cantidades de gas o de aire que queda atrapado en el metal fundido. En la tabla 6 se muestra la clasificación de los silicatos observados según la norma ASTM E45:

Tabla 6. Descripción de las inclusiones de silicatos encontradas según la norma ASTM E-45.

CARACTERIZACION	DESCRIPCION
Morfología	Silicatos
Forma	Gruesos, alargados
Tamaño	Aproximadamente 43.6 micras
Severidad	2

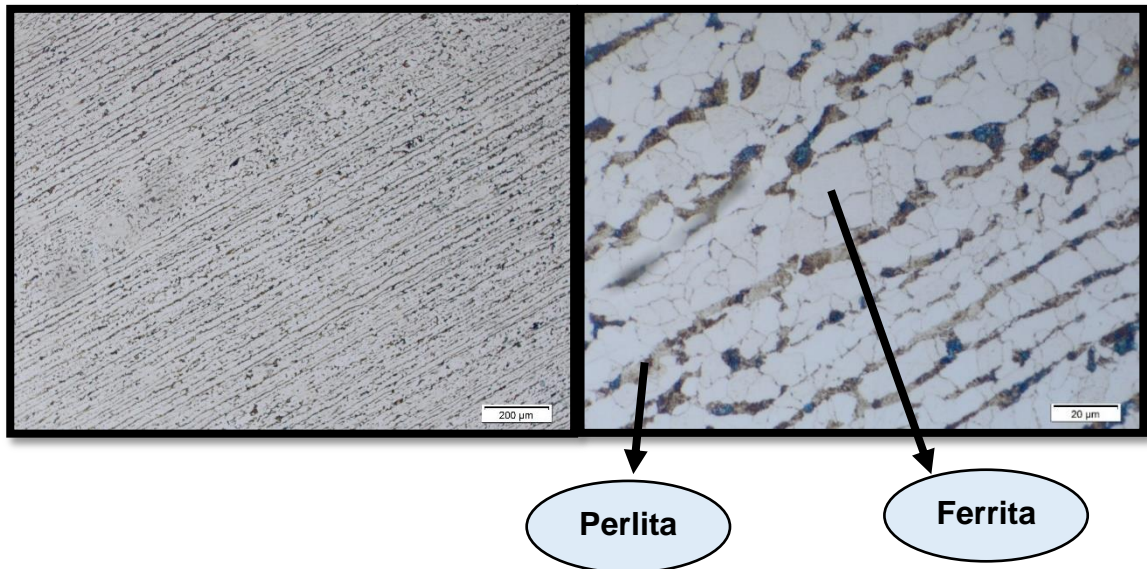
A pesar de haber presencia de silicatos y poros, algo que es normal en los aceros debido a las pequeñas cantidades de impurezas que quedan disueltas en el metal al momento de ser fundido, la severidad de inclusiones presentes no es alta. Para saber si las propiedades mecánicas se podrían ver afectadas por dichas inclusiones se llevaron a cabo los ensayos mecánicos de caracterización del metal base.

- **Fases presentes en la microestructura.** En la figura 3 se observa la estructura de un acero al carbono hipoeutectoide, en la que los constituyentes presentes son: la ferrita y la perlita. Se puede ver también que el material ha sido sometido a un proceso de deformación por medio de laminación, un indicativo de esto es la forma laminar que presenta la perlita, que es el microconstituyente en forma de colonias oscuras lineales continuas que siguen la dirección del proceso de laminado, mientras que la fase matriz de ferrita está en forma de granos

blancos equiaxiales. Además puede verse que la cantidad de ferrita presente es mucho mayor que la de perlita.

Figura 3. Microestructura del metal base.

(Sección transversal, izquierda 100X, derecha 1000X, ataque nital 2%).



- **Tamaño de grano:** El tamaño de grano se halló usando el método de comparación estipulado en la norma ASTM E112. No obstante, debido a que los aceros HSLA se caracterizan por su tamaño de grano fino, y aparte de esto el acero estudiado presentaba una severidad de laminación alta, no fue posible encontrar el tamaño de grano por comparación directa con la rejilla a 100 aumentos a causa que se encuentra por fuera del rango de tamaños cubiertos normalmente que va desde 1 hasta 8. Para poder realizar un análisis adecuado del tamaño de los granos se hizo la observación de la estructura a 200 aumentos.

Con lo que, habiendo observado un tamaño de grano promedio de la ferrita de 8 a 200 aumentos, haciendo uso de la ecuación 1 se obtuvo que el tamaño real es de aproximadamente 10, que es un tamaño de grano pequeño característico de los

aceros estructurales. La diferencia en la forma entre los granos de perlita y ferrita puede deberse a la precipitación de ferrita a partir de una matriz de austenita deformada, que se dio a través del tiempo con el descenso en la temperatura del material.

A pesar que el laminado fue en caliente, como consecuencia del enfriamiento rápido que se aplica al acero una vez se deforma (enfriamiento con agua), no se logró un tiempo suficiente de difusión atómica para que la perlita pudiera recrystalizarse. El tamaño de grano fino que el acero presenta produce un aumento significativo en sus propiedades mecánicas (aumento en la dureza, en la resistencia y en la tenacidad del material) debido a que aumenta el número de bordes de grano presentes en la microestructura, los cuales restringen la movilidad de las dislocaciones del metal, al ocurrir esto, disminuye la capacidad de deformación plástica del mismo y aumenta su resistencia mecánica.

5.1.4 Ensayo de impacto (prueba Charpy). La prueba de impacto se llevó a cabo con 3 probetas con entalla en V siguiendo la norma ASTM E23. El ensayo fue llevado a cabo a temperatura ambiente de 25 °C aproximadamente, por lo que para calcular la energía absorbida por cada probeta a dicha temperatura y posteriormente su tenacidad a la fractura en estas condiciones se hizo uso de las ecuaciones 4 y 5. Se calculó una masa promedio de las 3 probetas $m = 0.0382 \text{ Kg}$ y se asumió una velocidad promedio de caída del péndulo $v = 5,6 \frac{m}{s}$ [11], con lo cual se obtuvo:

$$E_k = 0.6 \text{ Julios}$$

A continuación se midió en la máquina de ensayo la energía del péndulo en caída libre E_f , obteniéndose un valor $E_f = 3.92 \text{ Julios}$.

Una vez calculados estos dos valores se llevó a cabo el ensayo para la determinación de E_i en cada probeta. Los resultados de la energía reportada por la máquina y la energía absorbida obtenidos se muestran en la tabla 7.

Tabla 7. Valores de energía absorbida en la prueba de impacto.

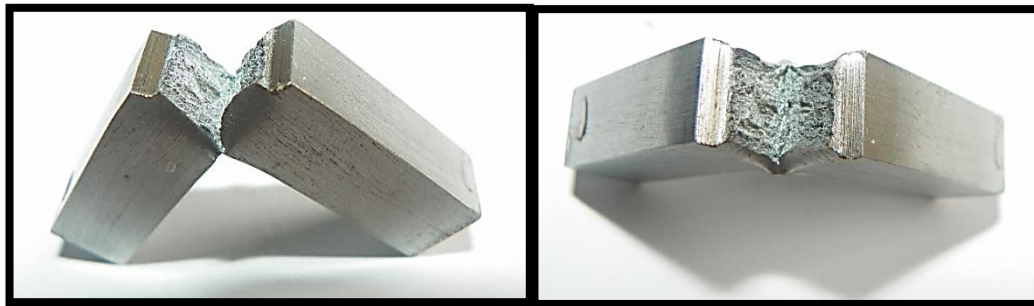
Temperatura [° C]	Probeta	Energía reportada en la maquina [J]	Energía absorbida [J]
25	1	61,29	56,77
25	2	66,69	62,17
25	3	76,49	71,97
			Promedio = 63.63

Se obtuvo que las probetas en promedio absorben una energía de 63.63 Julios antes de romper. El cálculo de la resistencia al impacto se realiza dividiendo la energía promedio absorbida entre el área de la sección reducida de las probetas. Siendo el área igual a $A = 0.00008 \text{ m}^2$ se encontró que la resistencia al impacto resultante era de 795.4 kilojulios por metro cuadrado.

Luego del ensayo las probetas mostraron una fractura de tipo dúctil, tal y como se puede observar en la figura 4. En estas se presentó una deformación previa a la ruptura observándose una reducción de área en la zona de falla.

Se ve también que la fractura de las probetas no fue total, presentándose una pequeña región en donde el material no alcanza a romper, razón por la se concluye que gran parte de la energía generada en el impacto es absorbida, demostrándose que a la temperatura en que se llevó a cabo el ensayo el acero presenta una buena resistencia al impacto.

Figura 4. Probetas Charpy ensayadas a temperatura ambiente (25 °C aprox.)



5.1.5 Ensayo de dureza. Según los resultados mostrados en la tabla 8, se aprecia que la dureza presentada es relativamente baja, pese al proceso de laminado y el tamaño de grano fino, razón por la que el acero puede ser calificado como blando. Esto es razonable, debido a que al contener un muy bajo porcentaje de carbono (cuyo efecto sobre el acero es el de endurecerlo) en la microestructura el constituyente predominante será la ferrita y al ser esta una fase con un contenido de carbono muy pequeño (0.025% máximo) la dureza que se presentara será baja comparada con la de los aceros al carbono.

Tabla 8. Resultados de la prueba de dureza.

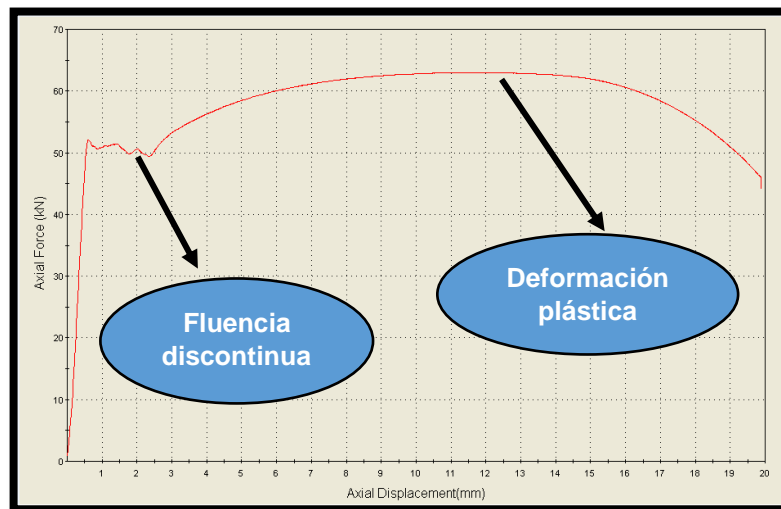
Carga aplicada [Kg]	Dureza	Escala
60	45	Rockwell A
60	50	Rockwell A
60	51	Rockwell A
60	49	Rockwell A
60	48.5	Rockwell A
60	50	Rockwell A
Promedio	48.92	Rockwell A

Fuente: Durómetro, marca: Wilson

5.1.6 Ensayo de tensión. En el estudio de la resistencia mecánica del material, se compararon los esfuerzos calculados en el ensayo de tensión aplicado con las especificaciones brindadas por la norma ASTM A572 y por el fabricante. Se tomo el área de la sección transversal de las probetas ensayadas como constante durante toda la prueba (esfuerzo ingenieril).

Las gráficas obtenidas en el ensayo de tensión mostraron un comportamiento semejante al observado en la figura 5. Aquí se ve una zona de deformación plástica amplia lo cual es sinónimo de una alta ductilidad. Se puede apreciar también una zona de fluencia discontinua que es característica en los aceros al carbono que contienen pequeñas cantidades de impurezas en su microestructura y se presenta como resultado del proceso de envejecimiento (endurecimiento por precipitación) que sufre el material a medida que este se va deformando plásticamente. En esta región se produce una inestabilidad en la deformación del material por la precipitación de partículas de carbono a los bordes de grano de la microestructura.

Figura 5. Gráfica de tensión del metal base.



Fuente: Máquina para ensayo de tracción, marca: Material Test System 810

Tomando como área transversal de las probetas:

$$Area = 9.6 \text{ mm} * 12.4 \text{ mm} = 119.04 \text{ mm}^2$$

Luego de aplicar la ecuación 2, reemplazando los valores de fuerza obtenidos de las gráficas de tensión, se calcularon los esfuerzos de fluencia, máximo y ultimo del acero. Los resultados se muestran en la tabla 9.

- **Esfuerzo de fluencia promedio:** 422.13 *Mpa*
- **Esfuerzo máximo promedio:** 533.43 *Mpa*
- **Esfuerzo ultimo promedio:** 388.53 *Mpa*

Tabla 9. Datos obtenidos de la curva de carga vs deformación del metal base.

Tipo de carga	Carga [KN]	Área [mm²]	Esfuerzo [MPa]
Fluencia 1	51.5	119.04	432.63
Fluencia 2	49	119.04	411.63
Máxima 1	64.5	119.04	541.83
Máxima 2	62.5	119.04	525.03
Fractura 1	46.5	119.04	390.63
Fractura 2	46	119.04	386.42

Fuente: Maquina de tracción.

Para calcular el porcentaje de elongación se tomó como longitud inicial la que existía en la sección reducida de las probetas, y midiendo luego de la fractura la longitud total de esta sección fue aplicada la ecuación 3. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 10.

Tabla 10. Datos de elongación obtenidos para el metal base.

Probeta	Lo [mm]	Lf [mm]	% elongación
1	96	117	21,88
2	96	116	20.83
			Promedio = 21,36

Una vez conocidos los esfuerzos de fluencia, máximo y de rotura y el porcentaje de elongación del material a partir del ensayo de tensión se compararon los resultados con los valores suministrados por el fabricante y los establecidos según la norma. En la tabla 11 se muestra dicha comparación:

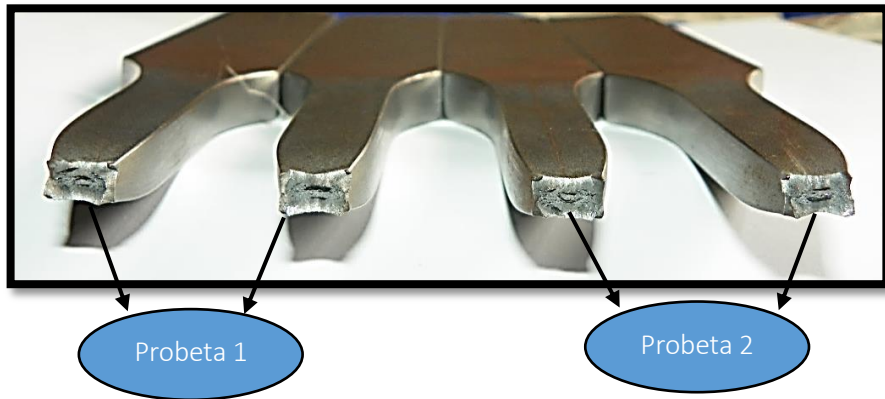
Tabla 11. Comparación de las propiedades mecánicas del metal base según la norma, el fabricante y el ensayo de tensión aplicado.

Propiedad mecánica	Norma	Fabricante	Ensayo
Esfuerzo de fluencia	345 Mpa min	350 Mpa	422.13 Mpa
Esfuerzo máximo	450 Mpa min	480 Mpa	533.43 Mpa
Esfuerzo de fractura	-	-	388.53 Mpa
% de elongación	18% min	18%	21.36%

Fuente: Norma ASTM A572 Gr 50, fabricante del acero y máquina de tracción.

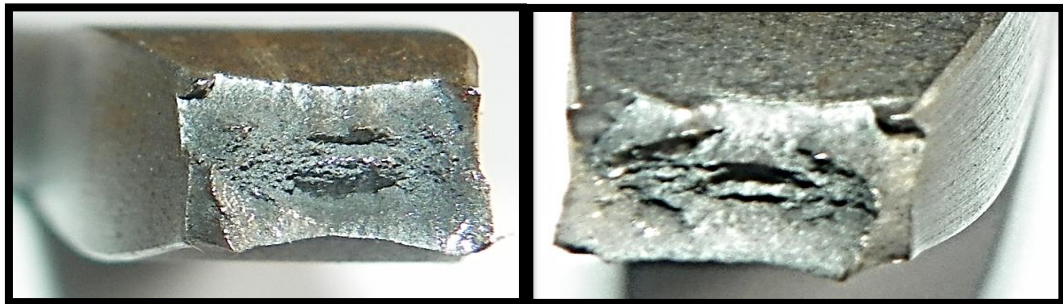
Se puede apreciar como las propiedades mecánicas están muy por encima de las establecidas en la norma y también de las brindadas por el fabricante, comprobándose de este modo que el material cuenta con una excelente resistencia mecánica. Otra manera de analizar esto es por medio del comportamiento que presentaron las probetas antes de la fractura (ver figuras 6 y 7).

Figura 6. Probetas de tracción del metal base luego de la fractura.



Fuente: Los autores

Figura 7. Superficie de fractura de las probetas de tracción del metal base.



Fuente: Los autores


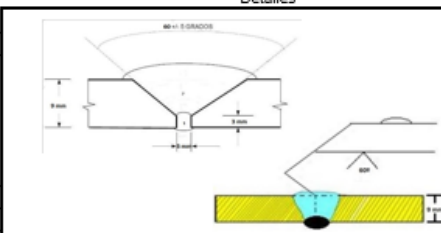
En la figura 6 se observa que las probetas antes de fallar presentaron una reducción de área (acuellamiento), proceso característico de los materiales dúctiles. Según el tipo de fractura observado en la figura 7, se puede clasificar al acero como dúctil aun sin que se genere en la falla la forma de cono perfecto, esto es debido al proceso de endurecimiento que sufre la sección reducida de la probeta por la deformación que se va presentando en ella. Al final del ensayo, la textura que presenta la superficie de fractura posee características tanto de tipo dúctil como frágil (fibrosa y granular, brillante en los bordes y opaca en su interior).

Otro detalle que se puede observar en la rotura, es que esta se da a un ángulo de 45° justo antes que la probeta rompa totalmente, algo que también identifica a los materiales dúctiles.

5.2 ESPECIFICACION Y CALIFICACION DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA


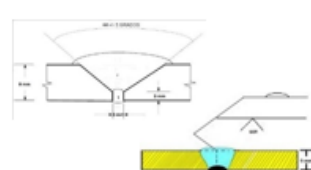
5.2.1 Especificación del procedimiento de soldadura bajo código AWS D1.1

Figura 8. Ficha del WPS aplicado.

		ESPECIFICACIÓN DE PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA WPS		Página 1 / 1																																									
Especificación de Procedimiento de Soldadura No. <u>1</u> Elaborado por <u>LUZ DARY VANEGAS – DIEGO SUAREZ¹</u> Soldador <u>JHON BOLAÑOS</u> Proceso de soldadura <u>GMAW</u>		Fecha <u>05/02/2015</u> PQR de soporte No. <u>1</u> Norma de Soldadura <u>AWS D 1.1</u> Estampe Tipo <u>SEMIAUTOMATICO</u> (Automático, semiautomático, manual o máquina)																																											
JUNTAS Respaldo (Si) _____ (No) <u>X</u> Material del respaldo (Tipo) <u>NA</u> (Refiere a respaldo y retenedores) <input type="checkbox"/> Metálico <input type="checkbox"/> No metálico <input type="checkbox"/> Metal no fusible <input type="checkbox"/> Otro Diseño de Junta <u>A TOPE CON BISEL EN V</u> Número de pases Material de aporte <u>3 ó MAS</u> Tiempo máximo entre pases <u>2 min.</u> Tipo de alineador <u>NA</u>		Detalles 																																											
* METALES BASE Tipo de especificación y grado <u>ASTM A-572 Gr 50</u> a Tipo de especificación y grado <u>ASTM A-572 Gr 50</u> Espesor <u>8 mm</u> Rango cubierto Ranura <u>3 - 18 mm</u> Filete <u>NA</u>																																													
* METALES DE APORTE Especificación AWS <u>5.18</u> AWS No. (Clase) <u>ER 70S-6</u> F-No. <u>6</u> A-No. <u>1</u> Diam. de los metales de aporte <u>0.045"</u>		GAS Porcentaje de composición <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Gas(es)</th> <th>Mezcla</th> <th>Rate flujo</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Protección</td> <td><u>Ar/CO₂</u></td> <td><u>75/25</u></td> <td><u>12.5-15 L/m</u></td> </tr> <tr> <td>Arrastre</td> <td><u>NA</u></td> <td><u>NA</u></td> <td><u>NA</u></td> </tr> <tr> <td>Respaldo</td> <td><u>NA</u></td> <td><u>NA</u></td> <td><u>NA</u></td> </tr> </tbody> </table>					Gas(es)	Mezcla	Rate flujo	Protección	<u>Ar/CO₂</u>	<u>75/25</u>	<u>12.5-15 L/m</u>	Arrastre	<u>NA</u>	<u>NA</u>	<u>NA</u>	Respaldo	<u>NA</u>	<u>NA</u>	<u>NA</u>																								
	Gas(es)	Mezcla	Rate flujo																																										
Protección	<u>Ar/CO₂</u>	<u>75/25</u>	<u>12.5-15 L/m</u>																																										
Arrastre	<u>NA</u>	<u>NA</u>	<u>NA</u>																																										
Respaldo	<u>NA</u>	<u>NA</u>	<u>NA</u>																																										
POSICIONES Posición(es) de ranura <u>2 G</u> Progresión de soldadura <u>Asce.</u> Desc. _____ Posición(es) de filete _____		TRATAMIENTO TÉRMICO POSTSOLDADURA Rango de temperatura <u>NA</u> Rango de tiempo <u>NA</u>																																											
PRECALENTAMIENTO Temperatura de precalentamiento Min. <u>NA</u> Temperatura entre pases Max. <u>NA</u> Permanencia del precalentamiento <u>NA</u> Longitud del precalentamiento <u>NA</u>		CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS Corriente AC ó DC <u>DC</u> Polaridad <u>Inversa</u> Amperaje (Rango) <u>100 - 340 A</u> Voltaje (Rango) <u>17 - 22 V</u>																																											
TÉCNICA Limpieza inicial y entre pases (Cepillado, pulido, etc.) <u>PRIMER PASE PULIDO CON DISCO ABRASIVO</u> <u>PASES POSTERIORES LIMPIEZA CON GRATA DE ACERO</u>																																													
Pase simple o múltiple (Por lado) _____ Electrodo simple o múltiple _____ Cordón recto u oscilado _____ Modo de transferencia del metal para GMAW _____ Distancia del trabajo a la boquilla de contacto (Prolongación electrizada) _____ Velocidad de avance (Rango) <u>5-10 mm/s</u>		MULTIPLE SIMPLE OSCILADO CORTO CIRCUITO 0.5"																																											
<table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">Capa(s) de soldadura</th> <th rowspan="2">Proceso</th> <th colspan="2">Metal de aporte</th> <th colspan="2">Corriente</th> <th rowspan="2">R. voltaje</th> <th rowspan="2">Rango velocidad de avance</th> <th rowspan="2">Otros (Comentarios)</th> </tr> <tr> <th>Clase</th> <th>Diámetro</th> <th>Polaridad</th> <th>R. amperaje</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>GMAW</td> <td>ER 70S-6</td> <td>0.045"</td> <td>Inversa</td> <td>130 - 180 A</td> <td>17 - 22 V</td> <td>5-10 mm/s</td> <td></td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>GMAW</td> <td>ER 70S-6</td> <td>0.045"</td> <td>Inversa</td> <td>130 - 180 A</td> <td>17 - 22 V</td> <td>5-10 mm/s</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Backweld</td> <td>GMAW</td> <td>ER 70S-6</td> <td>0.045"</td> <td>Inversa</td> <td>130 - 180 A</td> <td>17 - 22 V</td> <td>5-10 mm/s</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>		Capa(s) de soldadura	Proceso	Metal de aporte		Corriente		R. voltaje	Rango velocidad de avance	Otros (Comentarios)	Clase	Diámetro	Polaridad	R. amperaje	1	GMAW	ER 70S-6	0.045"	Inversa	130 - 180 A	17 - 22 V	5-10 mm/s		2	GMAW	ER 70S-6	0.045"	Inversa	130 - 180 A	17 - 22 V	5-10 mm/s		Backweld	GMAW	ER 70S-6	0.045"	Inversa	130 - 180 A	17 - 22 V	5-10 mm/s					
Capa(s) de soldadura	Proceso			Metal de aporte		Corriente					R. voltaje	Rango velocidad de avance	Otros (Comentarios)																																
		Clase	Diámetro	Polaridad	R. amperaje																																								
1	GMAW	ER 70S-6	0.045"	Inversa	130 - 180 A	17 - 22 V	5-10 mm/s																																						
2	GMAW	ER 70S-6	0.045"	Inversa	130 - 180 A	17 - 22 V	5-10 mm/s																																						
Backweld	GMAW	ER 70S-6	0.045"	Inversa	130 - 180 A	17 - 22 V	5-10 mm/s																																						
1. Orientación y revisión: ING EDWIN LOMBANA RIAÑO – CWI 10101241V. Contratación: STECKERL ACEROS S.A.S.																																													

5.2.2 Registro de calificación del procedimiento de soldadura

Figura 9. Ficha del PQR aplicado

		REGISTRO DE CALIFICACION DE PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA - PQR		Página 1 / 1																					
Nombre de la empresa: <u>STEKERL ACEROS</u> Registro de calificación de procedimiento No <u>1</u> Fecha: <u>05/03/2015</u> WPS No. <u>1 (WPS-SA-D 1.1 – 572Gr50-GMAW)</u>																									
Proceso(s) de soldadura <u>GMAW</u> Tipo(s) (Automático, semiautomático, manual o maquina) <u>SEMIAUTOMATICO</u>																									
JUNTAS Diseño de junta _____ Respaldo (Si) _____ (No) <u>X</u> Material del respaldo (Tipo) <u>NA</u> (Refiere a respaldo y retenedores) Metálico _____ No metálico _____ Metal no fusible _____ Otro _____ Diseño de Junta <u>A TOPE CON BISEL EN V</u> Número de pases Material de aporte <u>3 ó MAS</u> Tiempo máximo entre pases <u>2 min.</u> Tipo de alineador <u>NA</u>			Detalles 																						
METALES BASE Especificación de material _____ Tipo y grado <u>ASTM A-572 Gr 50</u> A Tipo y grado <u>ASTM A-572 Gr 50</u> Espesor de cupón de prueba <u>9 mm</u> Rango cubierto <u>3-18 mm</u>		METALES DE APORTE Especificación AWS <u>5.18</u> AWS No. (clase) <u>ER 70S-6</u> F-No. <u>6</u> A-No. <u>1</u> Diam. Metales de aporte <u>0.045"</u>																							
GAS Protección <u>Ar/CO₂</u> Arrastre <u>NA</u> Respaldo <u>NA</u>		Porcentaje de composición Mezcla <u>75/25</u> Rata flujo <u>12.5-15 L/m</u>		CARACTERISTICAS ELECTRICAS Corriente AC O DC <u>DC</u> Polaridad <u>Inversa</u> Amperaje (Rango) <u>137-172 A</u> Voltaje (Rango) <u>17,4 – 18,2 V</u>																					
POSICIONES Posición(es) de ranura <u>2G</u> Progreso de soldadura Asce. _____ Desc. _____ Posición(es) de filete _____		TRATAMIENTO TERMICO POSTSOLDADURA Rango de temperatura <u>NA</u> Rango de tiempo <u>NA</u>																							
Prueba de tracción																									
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Espécimen No</th> <th>Ancho</th> <th>Espesor</th> <th>Área</th> <th>Ultima carga total</th> <th>Ultima unidad de esfuerzo</th> <th>Tipo de falla y localización</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>T1</td> <td>19.89</td> <td>8.72</td> <td>173.44</td> <td>21185.99 LbF</td> <td>78755.47 PSI</td> <td>RFS</td> </tr> <tr> <td>T2</td> <td>19.99</td> <td>8.81</td> <td>176.11</td> <td>20902.73 LbF</td> <td>76579.90 PSI</td> <td>RFS</td> </tr> </tbody> </table>	Espécimen No	Ancho	Espesor	Área	Ultima carga total	Ultima unidad de esfuerzo	Tipo de falla y localización	T1	19.89	8.72	173.44	21185.99 LbF	78755.47 PSI	RFS	T2	19.99	8.81	176.11	20902.73 LbF	76579.90 PSI	RFS				
Espécimen No	Ancho	Espesor	Área	Ultima carga total	Ultima unidad de esfuerzo	Tipo de falla y localización																			
T1	19.89	8.72	173.44	21185.99 LbF	78755.47 PSI	RFS																			
T2	19.99	8.81	176.11	20902.73 LbF	76579.90 PSI	RFS																			
Prueba de Doblado guiado																									
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Identificación</th> <th>Descripción de discontinuidad-defecto</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>DC 1</td> <td>Ok</td> </tr> <tr> <td>DC 2</td> <td>Ok</td> </tr> <tr> <td>DR 1</td> <td>Ok</td> </tr> <tr> <td>DR 2</td> <td>Ok</td> </tr> </tbody> </table>		Identificación	Descripción de discontinuidad-defecto	DC 1	Ok	DC 2	Ok	DR 1	Ok	DR 2	Ok														
Identificación	Descripción de discontinuidad-defecto																								
DC 1	Ok																								
DC 2	Ok																								
DR 1	Ok																								
DR 2	Ok																								
Nombre del soldador <u>JHON BOLAÑOS</u> No. Identificación <u>79.506.072</u> Estampe No. <u>JB</u> Prueba de soldadura dirigida por <u>ING. EDWIN LOMBANA RIAÑO</u>																									
Certificamos que los datos consignados en este registro son correctos y que los cupones de prueba fueron preparados, soldados y probados de acuerdo con los requerimientos del Código AWS d1.1																									
Fecha <u>Marzo 05 de 2015</u> Por <u>Luz Dary Vanegas – Diego Mauricio Suarez¹</u>																									
1. Orientación y revisión: ING EDWIN LOMBANA RIAÑO – CWI 10101241V. Contratación: STECKERL ACEROS S.A.S.																									

5.3 METAL SOLDADO

5.3.1 Prueba de radiografía

- **Unión de láminas de acero A572 Gr 50- A572 Gr 50**

Luego de aplicar la soldadura de las láminas se verifico por medio de una radiografía que no existieran defectos internos en la junta soldada que pudieran afectar la resistencia mecánica de la misma.

En la radiografía mostrada en la figura 10 no se observó ningún tipo de defecto o discontinuidad, con lo cual calificó en esta prueba el procedimiento de soldadura que se aplicó. En el anexo D4 se adjunta el certificado de aprobación de la soldadura en la prueba de radiografía y las condiciones a las que esta fue realizada.

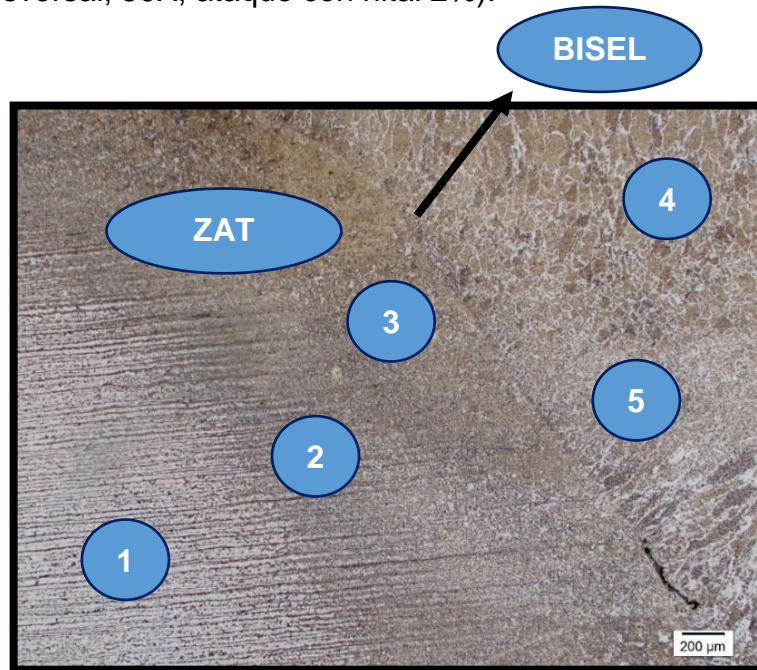
Figura 10. Radiografía del cordón de soldadura.



5.3.2 Metalografía de la unión soldada. En la figura 11 fácilmente se pueden identificar las diferentes zonas de interés a nivel microestructural en la junta soldada, presentándose formas disimiles en los granos debido a los ciclos de calentamiento y enfriamiento aplicados.

Figura 11. Zonas de análisis metalográfico del metal soldado.

(Sección transversal, 50X, ataque con nital 2%).



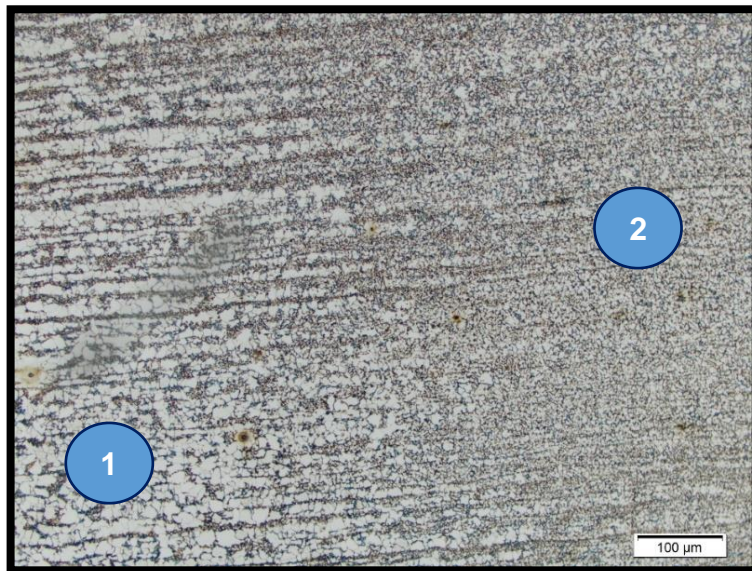
1. Región del metal base.
2. Región de recocido.
3. Región de recalentamiento.
4. Región superior (pase de presentación).
5. Región central (pases de relleno).

- **Microestructuras presentes**

La figura 12 muestra el cambio progresivo de microestructura que se presenta entre el metal base y la zona de recocido. En la zona del metal base aparecen colonias laminares de perlita (fase oscura) dentro de una matriz de ferrita (fase clara) de granos equiaxiales. En la zona de recocido aparecen granos equiaxiales de ferrita mientras que la perlita va perdiendo su forma laminar y se va dispersando de forma homogénea dentro de la microestructura, estando esta última en mayor cantidad que en el metal base. Esto se debe a que en esta región el metal alcanza una temperatura lo suficientemente alta como para producir un recocido de recristalización, con lo cual empieza a desvanecerse la estructura laminar de las colonias de perlita.

Figura 12. Transición metal base - zona de recocido.

(Sección transversal, 100X, ataque con nital 2%).

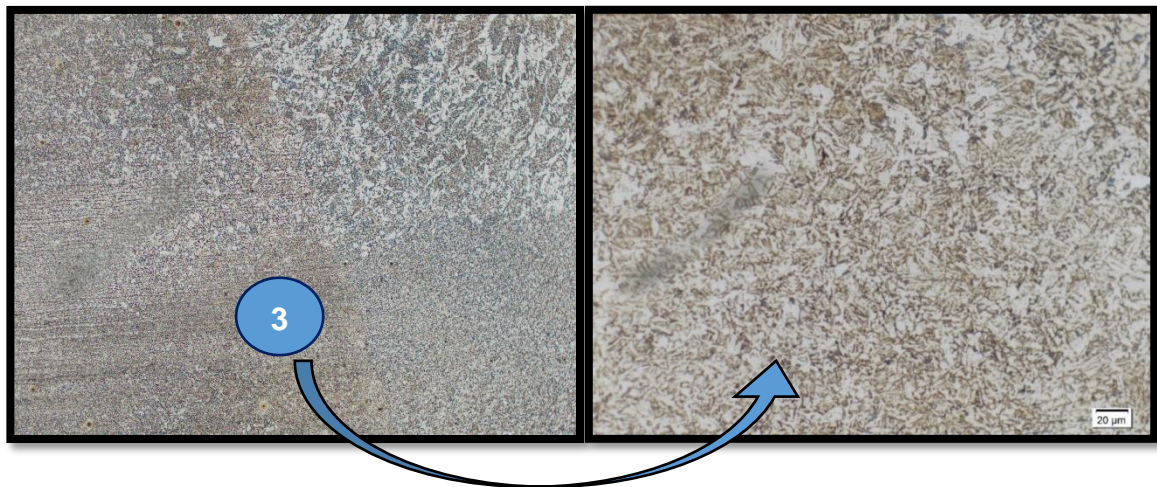


En la figura 13 se ve un aumento en el tamaño y en la cantidad de las colonias de perlita (fase oscura) a comparación de la perlita presente en la zona de recocido, lo que provoca que la dureza en esta región aumente significativamente en

comparación con la dureza del metal base. También hay presencia de ferrita Widmanstätten como consecuencia del enfriamiento rápido de esta zona. El aumento en el tamaño de las colonias de perlita y la disminución en la distancia interlaminar de esta se debe a las altas temperaturas que esta parte del material alcanza y al enfriamiento rápido que posteriormente se produce, lo que conlleva a que los granos de menor tamaño desaparezcan y pasen a ser parte de los granos más grandes. El pronunciado gradiente de temperatura producido en esta zona hace que se dé un enfriamiento abrupto del metal, por lo que se producen microestructuras fuera del equilibrio.

Figura 13. Zona de recalentamiento.

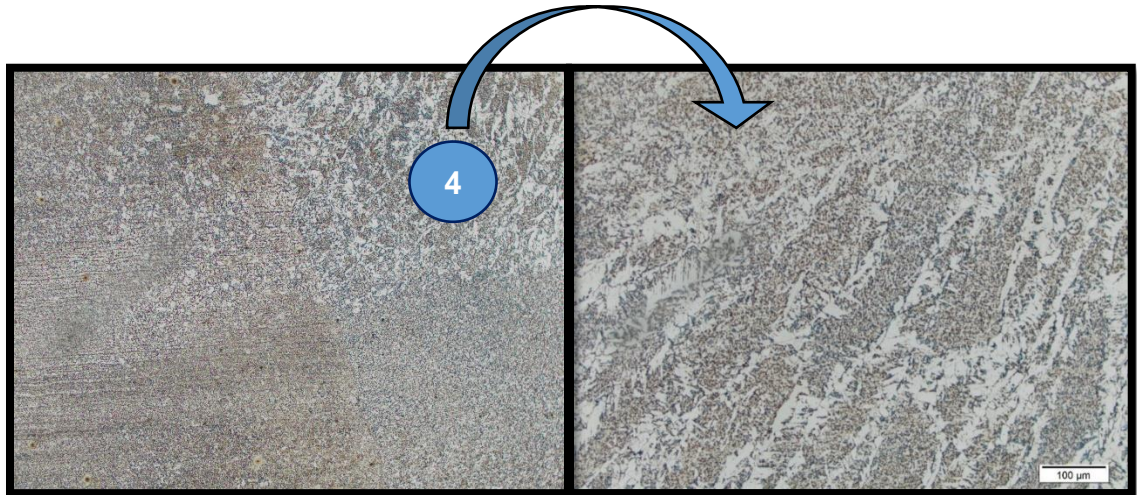
(Sección transversal, izquierda 100X, derecha 500X, ataque con nital 2%).



En el caso de la microestructura del pase de presentación mostrada en la figura 14, se observa una fase de ferrita (fase clara) de borde de grano y de ferrita Widmanstätten, además de colonias de gran tamaño de perlita fina (fase oscura). En este caso se ve que el crecimiento de los granos se da en una misma dirección (la dirección opuesta al flujo de calor). En esta zona el valor de dureza es aún mayor que en la zona de recalentamiento debido al tamaño de grano basto de la perlita.

Figura 14. Región superior.

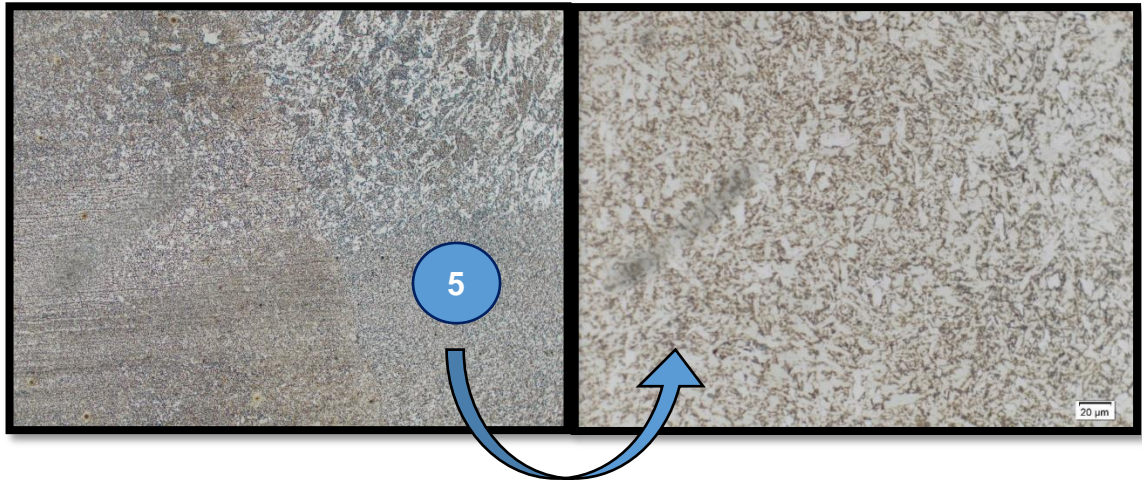
(Sección transversal, izquierda 100X, derecha 200X, ataque con nital 2%).



La zona entre pases que se muestra en la figura 15 evidencia la existencia de perlita homogéneamente dispersa dentro de una matriz de ferrita, mostrando una cantidad de ferrita (fase clara) superior a la cantidad de perlita (fase oscura). Debido al proceso de recristalización producido por la aplicación de pases posteriores las colonias de gran tamaño de perlita similares a las observadas en la figura 14 desaparecen, tornándose en este caso nódulos de un tamaño reducido y por ende un descenso en la dureza con respecto a la de las estructuras de tamaño de grano grueso.

Figura 15. Región central

(Sección transversal, izquierda 100 X, derecha 500X, ataque con nital 2%).



5.3.3 Prueba de doblez

Figura 16. Probetas de doblez del metal soldado luego del ensayo



Las probetas no mostraron defectos o daños en el cordón una vez terminados los ensayos de doblez tal y como se observa en la figura 16, con lo cual se demuestra que hubo una buena soldadura, quedando calificado el procedimiento que se aplicó.

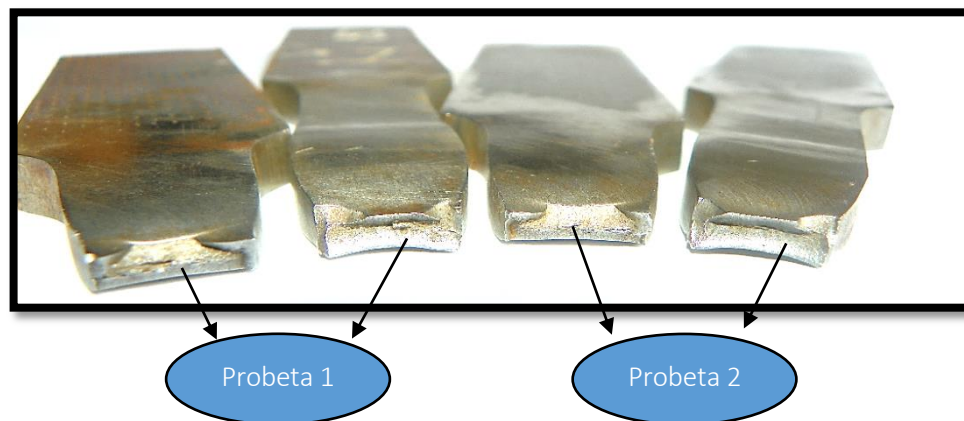
5.3.4 Prueba de tensión

Figura 17. Probetas de tracción del metal soldado luego de la falla.



En este ensayo ambas probetas fallaron por la parte del metal base tal y como se ve en la figura 17. A partir de esto, se puede concluir que tanto las especificaciones que se hicieron en el WPS y el PQR, y el procedimiento de soldadura llevado a cabo, cumplen con los requerimientos exigidos, demostrando que la unión hecha al material no tiene problema alguno. Se comprobó que las propiedades mecánicas de la unión soldada fueron superiores a las del metal base, razón por la cual la falla de las probetas no se presentó en la junta soldada. La falla que se dio fue tipo dúctil al igual que en el metal base, muestra de ello es el labio de corte presentado en la figura 18 a causa del desgarramiento que sufre el materia antes de fracturarse

Figura 18. Labio de corte en los extremos de la fractura.



En la tabla 12 se observa que en el caso de los esfuerzos máximos, los valores presentados en el metal base y en el metal soldado son bastante cercanos, estando el del metal soldado un poco por encima al del metal base que es lo que se espera en un proceso de soldadura exitoso en cuanto a la resistencia mecánica que la junta soldada debe presentar. En el caso del esfuerzo de rotura se presenta una diferencia muy pronunciada, estando el del metal soldado muy por debajo al del metal base. Esto puede deberse a que la región en donde fallaron las probetas soldadas al estar en una zona aledaña al cordón de soldadura posiblemente sufrió cambios microestructurales producto de un recocido que puede haber provocado un ablandamiento en el metal base, lo que se traduce en un aumento de la deformación previa a la falla de este.

Tabla 12. Comparación de los esfuerzos representativos del metal base y del metal soldado.

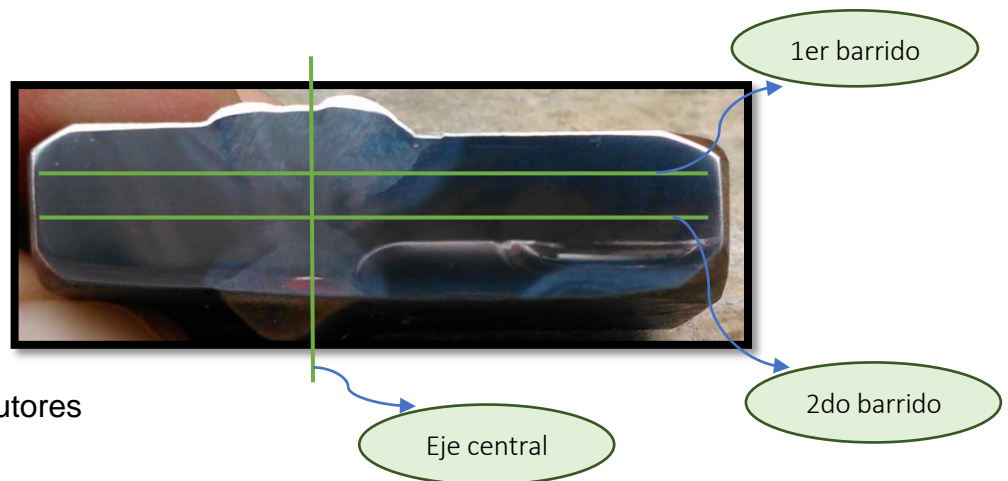
	Metal base		Metal soldado	
	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 1	Probeta 2
Carga máxima [KN]	64.5	62.5	94.24	92.98
Esfuerzo máximo [Mpa]	541.83	525.03	543	528
Carga de rotura [KN]	46.5	46	46.26	46.46
Esfuerzo de rotura [Mpa]	390.63	386.42	267	264

Fuente: Reporte de la empresa Control calidad y montajes Ltda.

- **Esfuerzo máximo promedio del metal base = 533.43 Mpa**
- **Esfuerzo máximo promedio del metal soldado = 535.5 Mpa**
- **Esfuerzo de rotura promedio del metal base = 388.53 Mpa**
- **Esfuerzo de rotura promedio en el metal soldado = 265.5. Mpa**

5.3.5 Prueba de microdureza. En la figura 19 se muestra la probeta del metal soldado usada para el ensayo de microdureza además de la manera en cómo se realizaron los barridos.

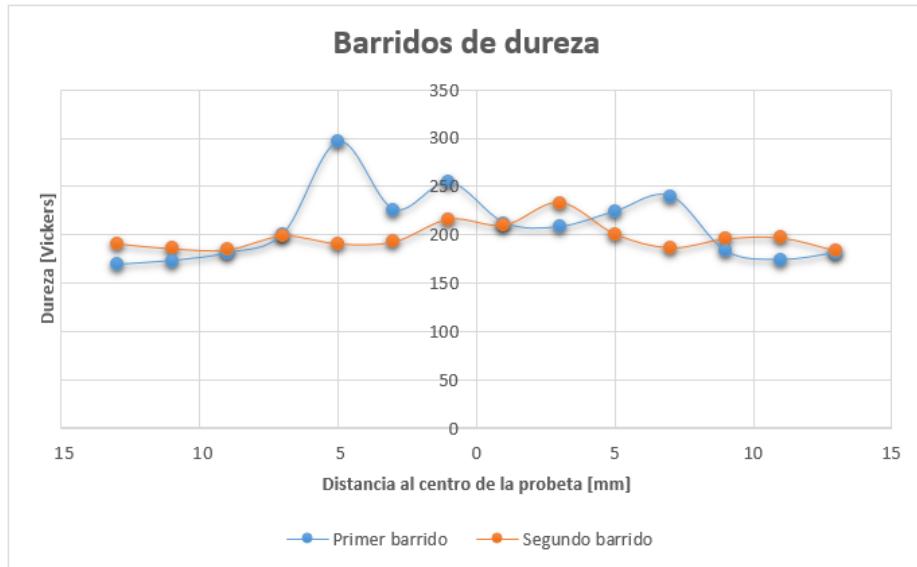
Figura 19. Probeta del metal soldado con macroataque.



Fuente: Los autores

Conforme a los perfiles de dureza obtenidos en el metal soldado los cuales se muestran en la figura 20, se puede ver que en el material se presentan ciertos incrementos leves de dureza en las regiones que corresponden a las zonas afectadas térmicamente de las láminas soldadas, el máximo valor se registra a 5 milímetros del centro de la probeta soldada en la parte izquierda. Estos incrementos son algo de esperar puesto que en estas zonas es en donde se producen los cambios microestructurales del metal base en el proceso de soldadura como consecuencia de los ciclos de calentamiento y enfriamiento que en este se dan. Sin embargo, puede observarse que la dureza en el metal base y en el metal de soldadura es casi la misma, lo cual permite que no se produzcan cambios de dureza bruscos en la unión soldada que puedan actuar como acumuladores de esfuerzo y promuevan el agrietamiento de la junta.

Figura 20. Perfil de dureza del metal soldado.



Fuente: Microdurómetro del parque tecnológico Guatiguará, Marca: Innova Test

Las regiones en donde se produce el aumento de dureza son aquellas en las que el choque térmico es más marcado, es decir, las que mayores temperaturas alcanzan, lo que permite que se produzcan microestructuras de tipo acicular en las cuales no hay difusión y por tal razón quedan esfuerzos retenidos.

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos del metal soldado, como primera medida se pudo observar que la soldabilidad operativa, la cual tiene que ver con las condiciones o parámetros que se aplicaron en el procedimiento de soldadura fue buena, quedando calificada la unión soldada en todas las pruebas exigidas por el código AWS D1.1. Posteriormente, se observó que la soldabilidad metalúrgica, que es la relacionada con los cambios microestructurales presentados debido a los ciclos de calentamiento y enfriamiento en la soldadura también fue buena, viéndose una dureza casi constante entre el metal base y el metal de soldadura a pesar de presentarse distintas microestructuras en estos, lo cual indica que habrá homogeneidad en las propiedades mecánicas del metal base y de la unión soldada.

6. CONCLUSIONES

- Se pudo observar que el acero en estudio cumple con las especificaciones de la norma ASTM A572 en cuanto a su composición química a excepción de las cantidades de niobio y de vanadio presentes, las cuales son muy bajas y se encuentran fuera de los rangos permitidos.
- Se identificó en el material una microestructura compuesta de ferrita en forma de granos equiaxiales de tamaños semejantes y de colonias alargadas de perlita debido al proceso de laminado en caliente, observándose que la cantidad de ferrita presente era muy superior. Aparte de esto se pudo observar que el tamaño de grano de la matriz de ferrita era fino debido a la adición de niobio y vanadio a la composición, procedimiento hecho con el fin de mejorar las propiedades mecánicas.
- En cuanto a requerimientos tensiles del metal base, se confirmó que también los presentados superan los valores mínimos de esfuerzos y de elongación que la norma estipula para aceros grado 50, evidenciando que la combinación de resistencia y ductilidad del material es muy buena.
- La prueba de resistencia al impacto realizada a temperatura ambiente (25 °C) mostró que en estas condiciones el metal es totalmente dúctil, viéndose una deformación previa del metal sin presentarse una ruptura total del mismo, lo que representa una elevada absorción de energía al momento de aplicar cargas instantáneas de gran magnitud.

- Por medio de las pruebas de calificación del procedimiento de soldadura especificado se pudo observar que las propiedades mecánicas de la unión soldada son superiores a las del metal base, demostrándose que la soldabilidad del mismo es buena siempre y cuando el proceso de soldadura sea preparado y aplicado por personal calificado.

- Tomando como referencia los resultados obtenidos con los análisis llevados a cabo, se puede ver que el acero estructural ASTM A 572 Gr 50 estudiado no presenta problema alguno en ningún aspecto tanto en estado base como luego de la soldadura.

7. RECOMENDACIONES

- Se recomienda aumentar las cantidades de niobio y vanadio presentes en el acero debido a que los valores reportados para estos dos elementos en la prueba de espectrometría se encuentran por fuera de los rangos aceptados por la norma ASTM A572. Esto podría llevar a quienes adquieran el producto a sacar conclusiones apresuradas y erróneas acerca de la calidad del material en cuestión.
- Es recomendable para quien adquiera el material, que en caso de ser usado en condiciones de temperaturas muy bajas (por debajo de los 0 °C) solicite la realización del ensayo Charpy a diferentes temperaturas para la construcción de la curva de transición dúctil-frágil de dicho acero y saber en qué intervalo de temperaturas el material no presentara problemas de fragilidad.
- En el caso del ensayo de radiografía es recomendable aumentar el contraste entre el metal base y el cordón de soldadura disminuyendo el tiempo de exposición de la placa a la radiación con el fin de poder realizar un análisis más detallado de los defectos presentes en la unión soldada.
- Al momento de realizar un estudio metalográfico del metal ya sea en estado base o luego de ser soldado se recomienda una exposición mínima del material al agua debido a que este tiende a oxidarse rápidamente y esto dificulta el análisis de la microestructura en gran medida.

CITAS

[1] GROOVER, Mikell P. Fundamentos de manufactura moderna. Materiales, procesos y sistemas. [En línea]. 1era Edición. México. Prentice-Hall. 1997. Disponible en:

<https://books.google.com.co/books?id=tcV0l37tUr0C&printsec=frontcover&dq=fundamentos+de+manufactura+moderna+primera+edicion&hl=es&sa=X&ved=0CBwQ6AEwAGoVChMIjbXU6Z-OxgIVID-MCh2i-gxc#v=onepage&q=fundamentos%20de%20manufactura%20moderna%20primera%20edicion&f=false>

[2] AMERICAN SOCIETY FOR METALS HANDBOOK. Properties and Selection: Irons, steels and High-Performance Alloys. 10 Edición. United States of América: ASM. 1990. Volumen1. p. 1037-1412.

[3] INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS Y CERTIFICACION. Acero. Ensayo Charpy (Entalla en V). (NTC 20-1) 1996 (ASTM E-23)

[4] DIETER, George. Mechanical metallurgy. Londres: Mc Graw Hill, 1988.

[5] INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS Y CERTIFICACION. Materiales metálicos. Ensayo de dureza, ensayo de Rockwell. (Escala A-B-C-D-E-F-G-H-K). (NTC 19). 1996.

[6] AMERICAN WELDING SOCIETY. Código de soldadura estructural – Acero AWS D1.1. 22da edición.

[7] ORDOÑEZ JIMENEZ, Jose Luis. Estandarización de Procesos de Soldadura, Para Mejorar la Competitividad. Revista Metal Actual. [Artículo en línea]. Colombia. Disponible en: http://www.metalactual.com/revista/25/procesos_asme.pdf

[8] INDURA, Tecnología a su servicio. Manual de sistemas y materiales de soldadura. Disponible en: http://www.indura.net/_file/file_2182_manual%20de%20soldadura%20indura%20007.pdf

[9] CONTROL DE PROCESOS DE SOLDADURA. Establecimiento de los procedimientos de soldadura (W.P.S. - P.Q.R), Calificación de soldadores. [Actualizado 28 de octubre de 2007]. Disponible en: <http://controlsoldaduramargot.blogspot.com/2007/10/establecimiento-de-los-procedimientos.html>

[10] HALL, E.D.1951. Proc. Phys. Soc. Serie B; (64) p.747. Citado por: SAENZ, L, CASTRO C, y GOTA J. Evaluación de las propiedades mecánicas de un acero microaleado al vanadio sometido a un tratamiento térmico de normalizado. (2005); p. 1-8

[11] UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA. Ensayo de impacto. Ensayo dinámico a flexión de probetas ranuradas. Ensayo Charpy. [En línea]. Disponible en: <http://www.utp.edu.co/~gcalle/Contenidos/Impacto.htm> [Citado el 3 de febrero de 2015]

[12] CARREÑO, Claudia, VILLARREAL, María. Caracterización metalográfica y evaluación de las propiedades mecánicas de tracción e impacto del acero ASTM A 572 Gr 50. Trabajo de grado Ingeniería Metalúrgica. Bucaramanga. Universidad Industria de Santander. Facultad de ingenierías fisicoquímicas. 2006.

8. BIBLIOGRAFÍA

- Baldovino, Patricia, Bossa, Cesar, Delgado, Roger, Herrera, Claudia, Pinilla, Luis. Tesis de pregrado. Evaluación de la soldabilidad de los aceros estructurales ASTM A-36, ASTM A 572 grado 50, ASTM A 588 grado B y sus combinaciones según código AWS D1.1 2000. Trabajo de grado Ingeniero Metalúrgico. Bucaramanga: Facultad de Ingenierías Físico-Químicas, Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales, 2002.
- CALLISTER, William D. Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales. Reverté.
- SÁENZ, Jorge, RAMÍREZ, Sergio. Tesis de pregrado. Diseño y calificación de un WPS, PQR y WPQ de soldadura según norma API 1104 para la estación de recolección campo escuela colorado. Trabajo de grado Ingeniero Metalúrgico. Bucaramanga: Facultad de Ingenierías Físico-Químicas, Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales, 2014.
- SANABRIA, María, BECERRA, Marlon. Tesis de pregrado. Diseño de un WPS y un PQR de soldadura, bajo la norma AWS D1.1 aplicado a los procedimientos de la compañía precisión LTDA. Trabajo de grado Ingeniero Metalúrgico. Bucaramanga: Facultad de Ingenierías Físico-Químicas, Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales, 2014.

9. ANEXOS

ANEXO A. INSTRUMENTOS USADOS PARA EL PROCESO DE SOLDADURA

Figura A 1. Pinza voltiamperimétrica



Figura A 2. Máquina de soldadura Miller. GMAW



Figura A 3. Procedimiento de limpieza con disco abrasivo



Figura A 4. Grata de acero



Figura A 5. Medidor de flujo de gas



Figura A 6. Galga digital



ANEXO B. MAQUINARIA USADA PARA LOS ENSAYOS MECANICOS Y EL ANALISIS METALOGRAFICO

Figura B 1. Máquina de doblado montada.



Figura B 2. Microscopio óptico invertido. Olympus GX71.



Figura B 3. Izquierda: Micro durómetro marca Innova test, Derecha: Durómetro marca Wilson.



Figura B 4. Máquina de ensayo de tracción. Material Test System 810.



Figura B 5. Péndulo de impacto marca Insoltec.



Figura B 6. Máquina de pulido marca Metkon.



Figura B 7. Máquina de desbaste marca Buehler.



Figura B 8. Prensa para montaje en baquelita



ANEXO C. CURVAS CARGA-DEFORMACION DEL METAL BASE Y DEL METAL SOLDADO

Figura C 1. Curva esfuerzo deformación del metal base para la primera probeta

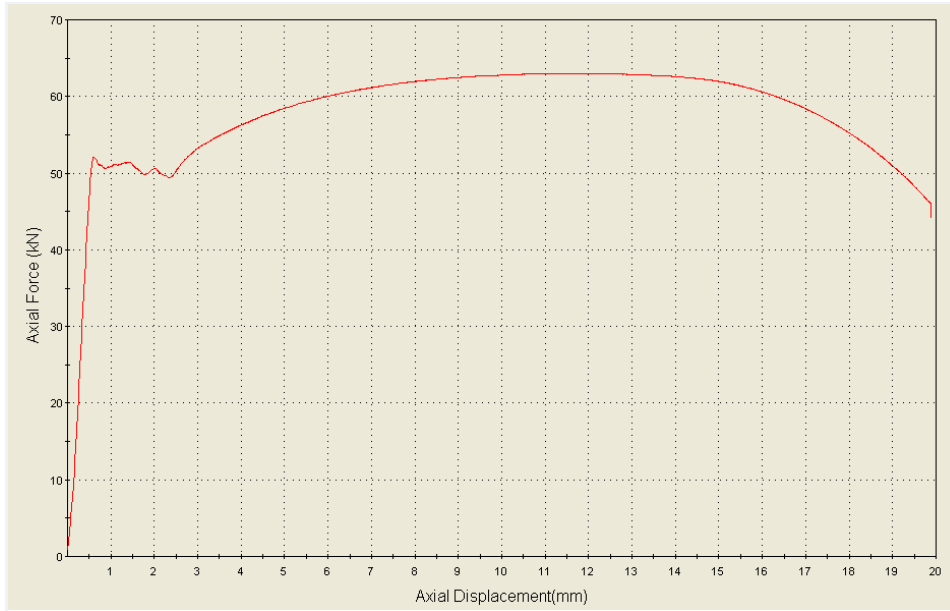


Figura C 2. Curva esfuerzo deformación del metal base para la segunda probeta

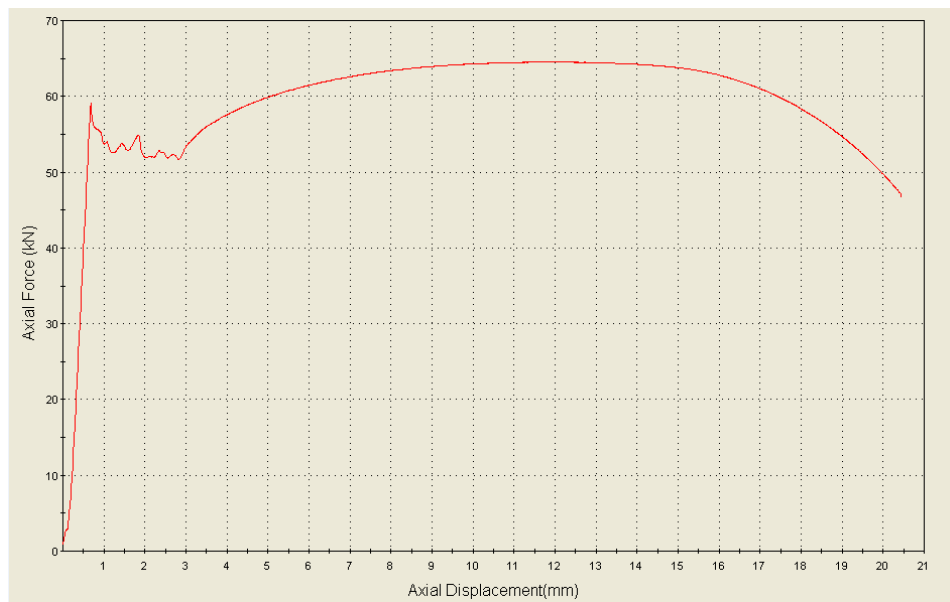


Figura C 3. Reporte del ensayo de tracción al metal soldado con sección reducida de la primera probeta.



LABORATORIO DE ENSAYOS MECÁNICOS

Control Calidad y Montajes Ltda.

CALLE 85 A No. 24 - 32. TÉLS.: 5333563 – 533 95 30
 CELULAR: (310) 238 15 65 – (320) 2313750 BOGOTÁ D.C.

www.controlcalidadymontajes.com

REPORTE ENSAYO MECÁNICO

TENSIÓN 1 WPS 002 / MATERIAL ASTM A 572 GR 50			
Customer	STECKERL ACEROS	TestDate	28-Feb-15
Coil No/Packet No		Type	Flat
Size(mm)	19.89*8.72	So(mm ²)	173.44
Lo(mm)	250	Lu(mm)	
A(%)	/	Su(mm ²)	/
Z(%)	/	Fm(KN)	94.24
Rm(Mpa)	543	FeH(KN)	/
ReH(Mpa)	/	FeL(KN)	46.26
ReL(Mpa)	267	Fp(KN)	46.26
Rp(Mpa)	267	Ft(KN)	/
Rt(Mpa)	/	E(GPa)	/

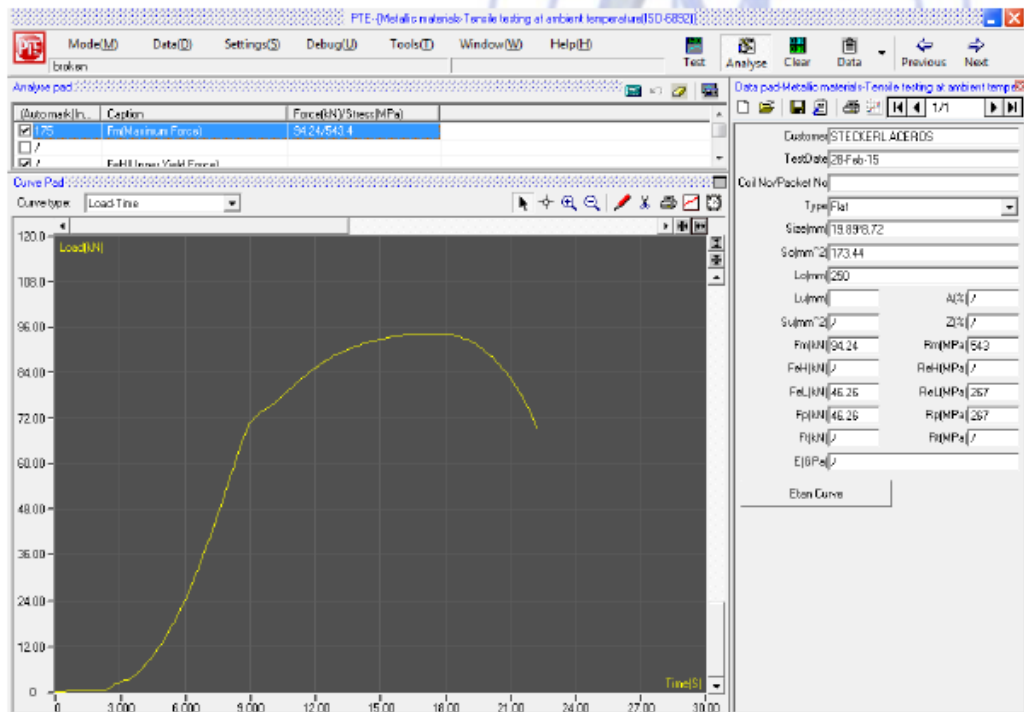


Figura C 4. Reporte del ensayo de tracción al metal soldado con sección reducida de la segunda probeta.



LABORATORIO DE ENSAYOS MECÁNICOS

Control Calidad y Montajes Ltda.

CALLE 85 A No. 24 - 32. TELS.: 5333563 – 533 95 30

CELULAR: (310) 238 15 65 – (320) 2313750 BOGOTÁ D.C.

www.controlcalidadymontajes.com

REPORTE ENSAYO MECÁNICO

TENSIÓN 2 WPS 002 / MATERIAL ASTM A 572 GR 50

Customer	STECKERL ACEROS	TestDate	28-Feb-15
Coil No/Package No		Type	Flat
Size(mm)	19.99*8.81	So(mm ²)	176.11
Lo(mm)	250	Lu(mm)	
A(%)	/	Su(mm ²)	/
Z(%)	/	Fm(KN)	92.98
Rm(Mpa)	528	FeH(KN)	/
ReH(Mpa)	/	FeL(KN)	46.46
ReL(Mpa)	264	Fp(KN)	46.46
RP(Mpa)	264	Ft(KN)	/
Rt(Mpa)	/	E(GPa)	/

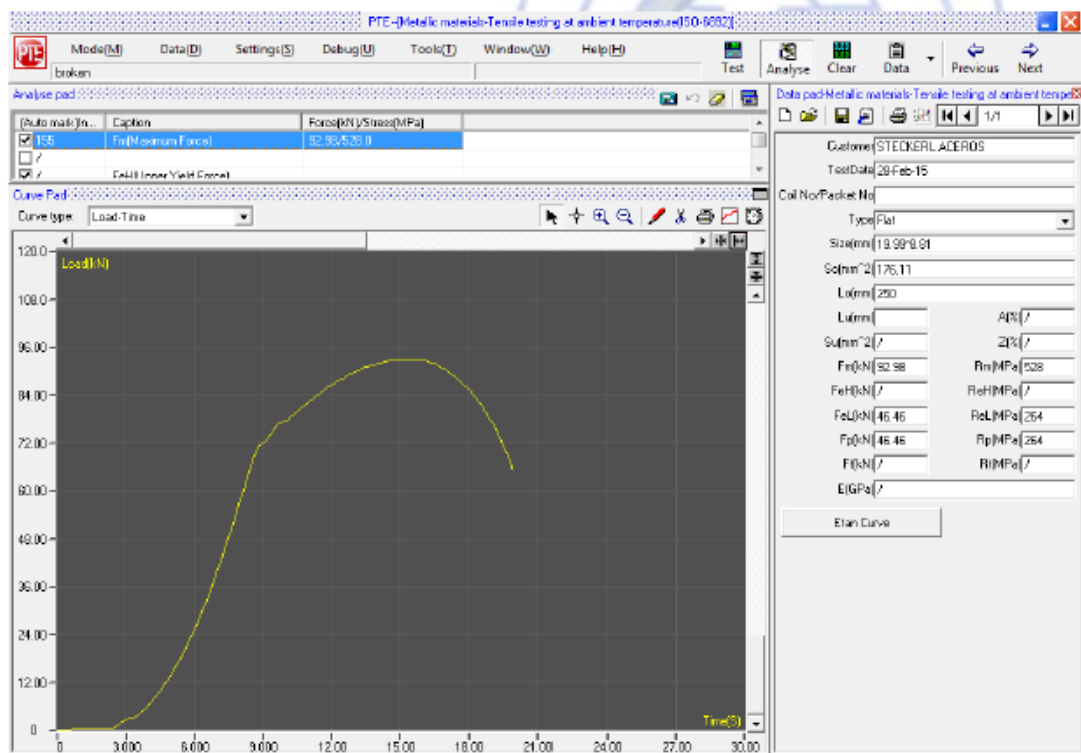


Figura D 2. Certificado de la composición química y propiedades mecánicas del metal base luego de la colada, suministrado por el fabricante.

辽宁省营口市老边区冶金街
Yejin street, Laobian
district, Yingkou, Liaoning, P. R. China
115005 YINGKOU, CHINA
TEL: 0417-3256081

产品质量证明书
INSPECTION CERTIFICATE

五矿营口中板有限责任公司
Mimmetals Yingkou Medium Plate Co., Ltd



邮编: 115005
FAX: 0417-3256057

订货单位 (SOLD TO)	Samsung C&T Corporation	产品名称 (PRODUCT)	热轧钢板 HOT ROLLED PLATE	证明书编号 (CERTIFICATE)	D070015082014B067770
收货单位 (PURCHASER)	Samsung C&T Corporation	交货状态 (DELIVERY CONDITION)	热轧 (AR)	签发日期 (DATE OF ISSUE)	2014-10-20
合同编号 (CONTRACT NO.)	YKCB85140809280-B-02	技术条件 (SPECIFICATION)	ASTM A572/A572M	到站 (DESTINATION)	
合同牌号	客户号	车号 (TRAIN NO.)	辽HK1585; 辽HK1009; 辽HK0430; 辽H20160; 辽H21383; 辽HK1570; 辽HK0760; 辽HK1596; 辽H74086; 辽HK1592; 辽HC0965;		

牌号 GRADE	批号 BATCH NO.	炉号 HEAT NO.	规格尺寸 (mm)			重量 WEIGHT (ton)	拉伸试验 TENSILE TEST				弯曲试验 BEND TEST	冲击试验 AKV (J)			探伤检验 ULTRASONIC TEST				
			T	W	L		屈服ReL (N/mm2)	屈服ReH (N/mm2)	屈服Rp0.2 (N/mm2)	抗拉Rm (N/mm2)		伸长率A (%)	尺寸mm ²	温度 (°C)	1	2	3	探伤级别 RATE	探伤结果 RESULT
A 572 Gr. 50	14J5294	14213309C	15	2438	12192	3	10.500			360	560	22							
A 572 Gr. 50	201410020055	14307757A	9	2438	12192	6	12.600			410	590	17							
A 572 Gr. 50	201409270124	14213488D	31.5	2438	6096	3	11.025			430	615	24							
A 572 Gr. 50	14J5293	14213309C	15	2438	6100	4	7.004			355	555	22.5							
合计						16	41.129												

批号 BATCH NO.	化学成分 CHEMICAL COMPOSITION (%)																		
	C	Si	Mn	P	S	Als	Al	Cr	Ni	Cu	Mo	V	Ti	B	As	N	Nb	CeV	Ceq
14J5294	0.17	0.27	1.49	0.018	0.004	0.031	0.035	0.017	0.006	0.013	0.005	0.003	0.015	0.0019	0.007	0.005	0.013	0.43	
201410020055	0.17	0.31	1.51	0.023	0.008	0.033	0.038	0.008	0.007	0.012	0.005	0.002	0.012	0.0018	0.013	0.004	0.012	0.43	
201409270124	0.16	0.30	1.50	0.016	0.006	0.030	0.032	0.018	0.012	0.011	0.001	0.003	0.014	0.0019	0.011	0.003	0.012	0.42	
14J5293	0.17	0.27	1.49	0.018	0.004	0.031	0.035	0.017	0.006	0.013	0.005	0.003	0.015	0.0019	0.007	0.005	0.013	0.43	

备注 NOTE:	ACCORDING TO EN10204 3.1:Al+Al+铜应为镇静钢 The steel should be made fully killed 本产品已按照标准要求进行制造和检验, 其结果符合要求, 特此证明。 WE HEREBY CERTIFY THAT MATERIAL DESCRIBED HAS MANUFACTURED AND TESTED WITH SATISFACTORY RESULTS IN ACCORDANCE WITH THE REQUIREMENTS OF THE ABOVE MATERIAL SPECIFICATION	
野牛 签发人 INSPECTOR	质量检查部部长 (章) DIRECTOR OF QUALITY (STAMP)	

Figura D 3. Certificado de la prueba de espectrometría de emisión óptica del acero ASTM A-572 emitido por la West Arco.


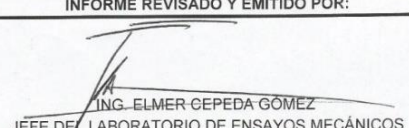



LABORATORIO DE ENSAYOS MECÁNICOS Y QUÍMICOS SOLDADURAS WEST ARCO S.A.S. NIT. 900.216.225-3 ACREDITACIÓN ISO/IEC 17025: 2005 CERTIFICADO DE ACREDITACIÓN: 12-LAB-038		 Número UNO en soldadura UNA COMPAÑÍA BEAR							
INFORME DE ANÁLISIS DE ESPECTROMETRÍA DE EMISIÓN ÓPTICA									
INFORME No.:	I-15088-2	No. de Páginas: 1 de 1							
INFORMACIÓN DEL CLIENTE									
Nombre:	STECKERL ACEROS	FECHA DE RECEPCIÓN DE LA MUESTRAS							
Dirección:	Carrera 128 No 14B-31	2015-03-17							
Teléfono:	3117703323	FECHA DE REALIZACIÓN DEL ENSAYO							
Ciudad:	Bogotá D.C.	2015-03-18							
DATOS DEL MATERIAL BASE Y/O UNIÓN SOLDADA									
Identificación:	AQ2 A572 088	Espesor: 8,5 mm							
NORMA PARA ENSAYO									
INSTRUCTIVO EQUIPO ARL QUANTRIS OPTICAL EMISION									
SOPORTE DE LECTURAS REALIZADAS									
A continuación se relacionan los resultados de las probetas según el análisis de espectrometría:									
1. Muestra OS 15088-2. Correspondiente a la probeta identificada AQ2 A572 088									
18/03/2015 14:00:38 Muestra: OS-15088-2 Programa: FELAST Tarea: PECOLAST									
Nº	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	V
Med	0.14441	0.19903	1.27721	0.01060	0.01215	0.02229	0.01375	0.01602	!0.00100
	Al	Cu	Ti	Nb	W	As	Sn	Co	Pb
Med	0.02186	0.00581	0.00580	!0.00100	!0.01300	0.06902	0.00166	0.00287	!0.00100
	B	Sb	Zr	Ca	Zn	N	FE%	Total	
Med	0.00167	!0.00300	!0.00100	!0.00005	!0.00030	0.00561	98.1316	1.33027	
1. En los elementos con signo de admiración (!), el porcentaje en peso real está por debajo del valor aquí registrado.									
2. Los elementos Arsénico, Plomo, Antimonio, Circonio, Calcio y Cinc se reportan con fines informativos.									
ENSAYO REALIZADO POR:	INFORME REVISADO Y EMITIDO POR:	FECHA EMISIÓN INFORME							
SANDRA ROJAS JEFE DE LABORATORIO QUÍMICO	 ING. ELMER CEPEDA GÓMEZ JEFE DEL LABORATORIO DE ENSAYOS MECÁNICOS	2015-03-18							
NOTAS:									
1. DECLARAMOS QUE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN LOS ENSAYOS REPORTADOS EN ESTE INFORME ESTÁN RELACIONADOS ÚNICAMENTE CON LAS MUESTRAS ARRIBA MENCIONADAS QUE SE HAN IDENTIFICADO Y ENSAYADO, LAS CUALES FUERON ENVIADAS POR EL CLIENTE AL LABORATORIO A TRAVÉS DEL INSTITUTO DE SOLDADURA WEST ARCO S.A.S.									
2. ESTE INFORME NO SE DEBE REPRODUCIR PARCIAL O TOTALMENTE SIN LA AUTORIZACIÓN ESCRITA DEL LABORATORIO DE ENSAYOS MECÁNICOS Y QUÍMICOS DE SOLDADURAS WEST ARCO S.A.S.									
3. LA APLICACIÓN Y EMPLEO DE LOS DATOS Y RESULTADOS REPORTADOS EN ESTE INFORME NO SON RESPONSABILIDAD DEL LABORATORIO DE ENSAYOS MECÁNICOS Y QUÍMICOS DE SOLDADURAS WEST ARCO S.A.S.									
4. LOS DATOS DE MATERIAL BASE Y/O UNIÓN SOLDADA SON SUMINISTRADOS POR EL CLIENTE. POR LO TANTO NO SON RESPONSABILIDAD DEL LABORATORIO DE ENSAYOS MECÁNICOS Y QUÍMICOS DE SOLDADURAS WEST ARCO S.A.S.									
FIN DEL INFORME									
		LAB-P-0018-F1-GC 4aEd.							
AV. CRA 68 No. 5-93 - BOGOTÁ D.C. PBX. 4176288 EXT. 1201/1202/1206/2011		 ACREDITADO ISO/IEC 17025: 2005 12-LAB - 038							
		 BUREAU VERITAS							
		 Miembro Activo ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE SOLDADURA Y ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS							

Figura D 5. Reporte de los resultados de la prueba de tracción en el metal soldado con sección reducida.





 LABORATORIO DE ENSAYOS MECÁNICOS Control Calidad y Montajes Ltda. CLL 85 A No. 24 - 32. TELS.: 5333563 - 533 95 30 CELULAR: (310) 238 15 65 - (310) 8594150 BOGOTA D.C. www.controlcalidadymontajes.com						
REPORTE DE ENSAYOS MECÁNICOS DE TENSION						
				CCMRP-F-044 Rev 0		
CLIENTE:	STECKERL			REPORTE N°:	T 371-15	
DIRECCIÓN:	CR 128 N° 14B - 31			PAGINA:	1 DE 1	
TELÉFONO:	7425888			ORDEN DE SERVICIO:	5295	
CIUDAD:	BOGOTA			CANTIDAD DE MATERIAL DE ENSAYO		
				2 PROBETAS		
MATERIAL BASE				FECHA DE INGRESO DEL MATERIAL DE ENSAYO		
ESPECIFICACIÓN:	ASTM	DIAMETRO:	NA	25 de Febrero de 2015		
TIPO:	A 572	WPS:	002			
GRADO:	50	ESPESOR:	9 mm			
UNION SOLDADA						
PROCESO:	GMAW	PROGERSION	ASCENDENTE			
TIPO DE PROCESO:	SEMIATUMATICO	POSICIÓN:	2G			
APORTE METALICO:	ER 70S-6	NOMBRE DEL SOLDADOR:	JOHN BOLAÑOS			
TIPO DE JUNTA:	A TOPE	ESTAMPE:	J.B			
ENSAYO DE TENSION						
DOCUMENTOS DE REFERENCIA:	ASTM E8 Standard test methods for tension testing of metallic materials. AWS B4.0 Standard method for mecanic testing weld.					
NORMA DEL ENSAYO:	AWS D1.1 Structural Weldig Code Steel.					
FECHA DE REALIZACIÓN DEL ENSAYO:	28 de Febrero de 2015					
INFORMACION DEL EQUIPO UTILIZADO PARA EL ENSAYO						
EQUIPO:	PRENSA UNIVERSAL DE ENSAYOS		FECHA DE CALIBRACION:	21 de Noviembre de 2014		
MARCA:	JINAN TESTING EQUIPMENT CO LTD		CERTIFICADO N°:	CFA-14-4084		
SERIE N°:	1112469		CALIBRADO POR:	Quality Control Ltda.		
ENSAYO TENSION A UNION SOLDADA						
DIMENSIONES INICIALES DE LAS PROBETAS			IDENTIFICACION			
			T1	T2	T3	T4
LONGITUD TOTAL (mm):			250	250		
ANCHO (mm):			19.89	19.99		
ESPESOR EN EL MATERIAL BASE (mm):			8.72	8.81		
ÁREA SECCIÓN TRANSVERSAL (mm ²):			173.44	176.11		
TEMPERATURA (°C):			19.1	19.1		
	IDENTIFICACION				UBICACIÓN DE LA ROTURA	
	T1	T2	T3	T4		
CARGA MAXIMA	21185.99	20902.73			T1	RFS
Lbf / KN	94.24	92.98				
ESFUERZO MAXIMO	78755.47	76579.90			T2	RFS
Psi / Mpa	543	528				
CARGA DE ROTURA	10399.66	10444.62			T3	
Lbf / KN	46.26	46.46				
ESFUERZO DE ROTURA	38725.06	38289.95			T4	
Psi / Mpa	267	264				
RFS: ROMPE FUERA DE LA SOLDADURA		RS: ROMPE POR LA SOLDADURA		T: TENSION		
OBSERVACIONES:						
LA UNION CUMPLE CON LOS REQUERIMIENTOS DE LA NORMA. ACEPTADO						
ENSAYO REALIZADO POR TECNICO DE LABORATORIO			REVISADO Y EMITIDO POR			
						
INSP. FRANKLIN SANDOVAL			ING. JOSE MANUEL VILLAMIL			
FECHA: 28 de Febreo de 2015			FECHA: 28 de Febrero de 2015			
FIN DE INFORME				CCMRP-F-044 Rev 0		

Figura D 6. Reporte de los resultados de la prueba de dobléz en el metal soldado

 LABORATORIO DE ENSAYOS MECÁNICOS Control Calidad y Montajes Ltda. CLL 85 A No. 24 - 32. TELS: 5333563 - 533 95 30 CELULAR: (310) 238 15 65 - (310) 8594150 BOGOTA D.C. www.controlcalidadymontajes.com					
REPORTE DE ENSAYOS MECÁNICOS DE DOBLEZ GUIADO					
CLIENTE: STECKERL DIRECCIÓN: CR 128 N° 14B - 31 TELÉFONO: 7425888 CIUDAD: BOGOTA			CCMRP-F-045 Rev 0		
			REPORTE N°: D 372-15 PAGINA: 1 DE 1 ORDEN DE SERVICIO: 5295		
			CANTIDAD DEL MATERIAL DE ENSAYO 4 PROBETAS		
MATERIAL BASE			FECHA DE INGRESO DEL MATERIAL DE ENSAYO		
ESPECIFICACIÓN: ASTM TIPO: A 572 GRADO: 50	DIAMETRO: NA WPS: 002 ESPESOR: 9 mm	25 de Febrero de 2015			
UNION SOLDADA					
PROCESO: GMAW TIPO DE PROCESO: SEMIATUMATICO APORTE METALICO: ER 70S-6 TIPO DE JUNTA: A TOPE	PROGERSION: ASCENDENTE POSICIÓN: 2G NOMBRE DEL SOLDADOR: JOHN BOLAÑOS ESTAMPE: J.B				
ENSAYO DE DOBLEZ GUIADO					
DOCUMENTOS DE REFERENCIA: ASTM E190 Standard test method for guided bend test for ductility of welds. AWS B4.0 Standard method for mecanic testing weld.					
NORMA DEL ENSAYO: AWS D1.1 Structural Weldig Code Steel.					
FECHA DE REALIZACIÓN DEL ENSAYO: 28 de Febrero de 2015					
INFORMACION DEL EQUIPO UTILIZADO PARA EL ENSAYO					
EQUIPO: MATRIZ ASME DOBLEZ GUIADO MARCA: NR SERIE N°: NR	FECHA DE CALIBRACION: 06 de Agosto de 2012 CERTIFICADO N°: 20872 CALIBRADO POR: Superintendencia de Industria y Comercio				
ENSAYO TRACCIÓN UNIÓN SOLDADA					
DIMENSIONES DE LAS PROBETAS		IDENTIFICACION			
		DC1	DC2	DR1	DR2
LONGITUD TOTAL (mm):		250	250	250	250
ANCHO (mm):		38	38	38	38
ESPESOR EN EL MATERIAL BASE (mm):		9	9	9	9
TEMPERATURA (°C):		19.1	19.1	19.1	19.1
RESULTADOS ENSAYO DE DODLEZ GUIADO					
IDENTIFICACION	OBSERVACIONES	RESULTADO			
DC1	SIN INDICACIONES	OK			
DC2	SIN INDICACIONES	OK			
DR1	SIN INDICACIONES	OK			
DR2	SIN INDICACIONES	OK			
DC: DOBLEZ DE CARA		DR: DOBLEZ DE RAIZ		DL: DOBLEZ DE LADO	
OBSERVACIONES:					
ENSAYO REALIZADO POR TECNICO DE LABORATORIO			REVISADO Y EMITIDO POR		
					
INSP. FRANKLIN SANDOVAL			ING. JOSE MANUEL VILLAMIL		
FECHA: 28 de Febrero de 2015			FECHA: 28 de Febrero de 2015		
FIN DE INFORME			CCMRP-F-045 Rev 0		