



**INFLUENCIA DEL MODO DE TRANSFERENCIA POR ARCO PULSADO EN EL  
PROCESO DE SOLDADURA GMAW SOBRE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS  
Y MICROESTRUCTURALES DEL ACERO ASTM A36**

**EDUARDO SANTOS OLIVERO MONSALVE**

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

**2017**

**INFLUENCIA DEL MODO DE TRANSFERENCIA POR ARCO PULSADO EN EL  
PROCESO DE SOLDADURA GMAW SOBRE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS  
Y MICROESTRUCTURALES DEL ACERO ASTM A36**

**EDUARDO SANTOS OLIVERO MONSALVE**

**Trabajo de investigación presentado como requisito parcial para obtener el título de  
Ingeniero Metalúrgico**

**Director: Hernan Alvarez Orozco**

**Msc. Metalurgia**

**Codirector: Mauricio Rincón Ortiz**

**Msc. Materiales**

**Codirector: Afranio Antonio Cardona Granados**

**Ing. Metalúrgico**

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

**2017**

## **DEDICATORIA**

*Este trabajo y la culminación de mi formación profesional se la dedico a María Santos Monsalve Mendoza y Jesús Antonio Monsalve Mendoza.*

*El esfuerzo y sacrificio que han dedicado a formarme a lo largo de los años, ha dejado un valor incalculable para mí, me han enseñado el valor de la palabra, la honra, la amistad, el amor y la felicidad que produce ser libre sin importar los obstáculos; este logro no es mío, es de ellos y los frutos que este traiga, para ellos será.*

## **AGRADECIMIENTOS**

Es un honor para mí agradecer a quienes fueron parte de esta investigación y de todo el proceso que este implicó, pequeños o grandes aportes, todo sumó, para finalmente dar paso a una nueva etapa profesional.

A mi madre María Santos Monsalve Mendoza y tío Jesús Antonio Monsalve Mendoza, son la pieza fundamental de todo este esfuerzo, pues fueron ellos quienes hicieron los pilares de quien hoy soy y lo siguen construyendo.

A mis maestros de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales por dedicar parte de su vida a formar a la siguiente generación, son regalos de un valor incalculable.

A los diferentes maestros que tuve a lo largo de mi paso por la Universidad Industrial de Santander y todos los que forman parte de esta comunidad, pues no solo nos guiaron como estudiantes si no como personas e hijos.

A mis directores de proyecto Afranio Antonio Cardona Granados, Hernan Alvarez Orozco y Mauricio Rincón Ortiz, por el tiempo dedicado a guiarme y los aportes de su experiencia y conocimientos para que todo resultara de la mejor forma posible; a ellos les debo mucho y los recordaré con mucho cariño.

A la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y a su directora Elcy María Córdoba Tuta por facilitarme el uso de los laboratorios que dispone para la realización de las pruebas mecánicas y de caracterización metalográfica.

Al profesor e instructor del SENA Jhon Hernández quien me apoyo incondicionalmente ante las adversidades que se presentaron durante el avance del proyecto.

A mis amigos, familiares y todo aquel con quien fraternizo, desde un saludo, una sonrisa a un consejo, siempre por pequeño que sea el valor que dejara es infinito, todo aporta, para bien o mal, todo nos hace crecer.

## CONTENIDO

|  | Pág |
|--|-----|
| INTRODUCCIÓN   | 13  |
| 1. ANTECEDENTES  | 14  |
| 2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL  | 18  |
| 2.1 ADQUISICIÓN DEL METAL DE TRABAJO Y CARACTERIZACIÓN                       | 18  |
| 2.1.1 Composición química del Acero ASTM A36                                 | 18  |
| 2.1.2 Caracterización metalográfica del Acero ASTM A36                       | 18  |
| 2.2 DISEÑO DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA                                    | 19  |
| 2.2.1 Descripción de la junta soldada  | 20  |
| 2.2.2 Composición química del electrodo de alambre continuo ER70S-6          | 20  |
| 2.3 PRUEBAS MECANICAS  | 21  |
| 2.3.1 Diseño de los cupones soldados para prueba de tracción                 | 21  |
| 2.3.2 Diseño de los cupones soldados para prueba de dobléz de cara y raíz    | 22  |
| 2.3.3 Diseño de las probetas para prueba de impacto Charpy                   | 22  |
| 2.3.4 Diseño de los perfiles de dureza                                       | 22  |
| 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN  | 23  |
| 3.1 CÁLCULO DE LA ENTRADA DE CALOR   | 23  |
| 3.2 CARACTERIZACIÓN METALOGRAFICA DE LAS UNIONES SOLDADAS                    | 24  |
| 3.2.1 Microestructura de las uniones soldadas por cortocircuito convencional | 25  |

|  |    |
|--|----|
| 3.2.2 Microestructura de las uniones soldadas por cortocircuito con arco pulsado | 26 |
| 3.3 ENSAYO DE TRACCIÓN   | 26 |
| 3.4 ENSAYO DE DOBLEZ: CARA Y RAÍZ  | 28 |
| 3.5 ENSAYO DE IMPACTO CHARPY   | 28 |
| 3.6 ENSAYO DE DUREZA   | 29 |
| 4. CONCLUSIONES  | 31 |
| 5. RECOMENDACIONES   | 32 |
| BIBLIOGRAFÍA   | 33 |
| REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS   | 35 |
| ANEXOS   | 36 |

## LISTA DE TABLAS

|  | Pág |
|--|-----|
| Tabla 1. Composición química del Acero ASTM A36                        | 17  |
| Tabla 2. Principales variables del proceso de soldadura usado          | 19  |
| Tabla 3. Composición química del electrodo de alambre continuo ER70S-6 | 19  |
| Tabla 4. Mediciones de corriente entre pases para platinas soldadas    | 21  |
| Tabla 5. Resultados obtenidos en la prueba de tracción                 | 25  |
| Tabla 6. Aceptación de las pruebas de tracción según código ASME       | 25  |
| Tabla 7. Resultados del ensayo de dobléz                               | 26  |
| Tabla 8. Resultados del ensayo de impacto Charpy                       | 27  |

## LISTA DE FIGURAS

|  | Pág |
|--|-----|
| Figura 1. Fases de la corriente pulsada en la transferencia de metal   | 16  |
| Figura 2. Micrografía del metal base, acero hipoeutectoide             | 19  |
| Figura 3. Descripción de la junta soldada                              | 20  |
| Figura 4. Dimensiones de las probetas para ensayo de tracción          | 22  |
| Figura 5. Microestructura de la unión soldada por cortocircuito        | 25  |
| Figura 6. Microestructura de la unión soldada con corriente pulsada    | 26  |
| Figura 7. Resistencia a la tracción máxima de los especímenes          | 27  |
| Figura 10. Distribución de los perfiles de dureza en escala Rockwell A | 29  |

## LISTA DE ANEXOS

|   | Pág |
|---|-----|
| Anexo A. Comprobante de la composición química del acero ASTM A36 | 36  |
| Anexo B. WPS y PQR de soldadura con cortocircuito                 | 37  |
| Anexo C. WPS y PQR de soldadura con cortocircuito-arco pulsado    | 41  |
| Anexo D. Probeta de tracción utilizada en el proyecto             | 45  |
| Anexo E. Probeta de impacto charpy utilizadas en el proyecto      | 46  |
| Anexo F. Fractura en las pruebas de tracción                      | 47  |
| Anexo G. Soldadura puesta en marcha                               | 48  |
| Anexo H. Máquina de soldadura usada durante el proyecto           | 49  |

## RESUMEN

**TÍTULO:** INFLUENCIA DEL MODO DE TRANSFERENCIA POR ARCO PULSADO SOBRE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS Y MICROESTRUCTURALES DEL ACERO ASTM A36.

**AUTORES:** Olivero Monsalve, Eduardo Santos.

**PALABRAS CLAVES:** Corriente pulsada, acero hipoeutectoide, transferencia cortocircuito.

**DESCRIPCIÓN:** El presente trabajo estudia la influencia de la pulsación de la corriente en la transferencia de cortocircuito para la soldadura GMAW sobre el acero estructural ASTM A36. Se obtuvieron uniones soldadas planas con bisel tipo V usando la transferencia de cortocircuito convencional y cortocircuito con arco pulsado con una mezcla de gas 75 % Argón – 25 % CO<sub>2</sub>; las cuales fueron comparadas entre sí, analizando los cambios microestructurales y de propiedades mecánicas. La microestructura del material A36 es una matriz ferrítica con granos de perlita, típica de un acero hipoeutectoide, mientras que la microestructura de la soldadura con cortocircuito fue una matriz de perlita suave con ferrita en los límites de grano y la microestructura de la soldadura de cortocircuito con arco pulsado presentó ferrita acicular en los límites de grano, esto debido a que la transferencia pulsada aportó un calor menor generando velocidades de enfriamiento rápidas. La transferencia de calor para la soldadura de cortocircuito convencional fue calculada y se obtuvo un valor de 0.47 [kJ/pul] que es un aporte de calor bajo, característico de la transferencia cortocircuito; el calor aportado por la transferencia con arco pulsado es menor a este valor debido a que en los ciclos del pulso donde la corriente máxima decrece a alcanzar la corriente mínima se genera un enfriamiento que disminuye la transferencia de calor, generando que el depósito de metal presente un gradiente de temperatura alto y el metal se enfrié rápidamente. Los resultados en las pruebas mecánicas de tracción, doblaje, impacto se conectaron con las microestructuras observadas en donde los resultados satisfactorios los consiguió la soldadura convencional.

---

\*Proyecto de grado (modalidad: proyecto de investigación)

\*\* Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales.

Director: Ms.E. Hernan A. Orozco Codirector: PhD. Mauricio Rincón O. Codirector: Ing. Afranio Cardona G.

## ABSTRACT

**TITLE:** INFLUENCE OF PULSED ARC TRANSFER MODE ON MECHANICAL AND MICROSTRUCTURAL PROPERTIES OF ASTM A36 STEEL.

**AUTHORS:** Olivero Monsalve, Eduardo Santos.

**KEYWORDS:** Pulsed current, hypoeutectoid steel, short circuit transfer.

**DESCRIPTION:** The present work studies the influence of current pulsation on short-circuit transfer for GMAW welding on structural steel ASTM A-36. V-type bevelled flat welds were obtained using conventional short-circuit transfer and pulsed arc short-circuit with a 75% Argon-25% CO<sub>2</sub> gas mixture; which were compared to each other, analyzing the microstructural changes and mechanical properties. The microstructure of the base material is a ferrite matrix with perlite grains, typical of a medium carbon hypoeutectoid steel, where the microstructure of the short-circuit transferred welding was a pearlite matrix with ferrite at the grain boundaries and the welding microstructure of the short-circuit with pulsed arc presented acicular ferrite at the grain boundaries. The behavior can be explained by the pulsed transfer bringing a lower generated heat which causes fast cooling rates. The heat transfer for the conventional short-circuit welding was calculated and it was of 0.47 [kJ / pul], which is a low input heat, characteristic of the short-circuit transfer. The heat provided by the pulsed arc transfer is smaller than in the conventional short-circuit welding, as a consequence of the pulsed cycles where the current after reaching its maximum value, it reduced until a minimum current. Then, a fast cooling rate is produced. The tension, bending and impact tests corroborated the above mentioned behavior, where the the values approved by ASME Codewere those obtained by the conventional transfer mode of welding.

---

\*Deegre project (modality: Investigation project)

\*\* Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales.

Adviser: Ms.E. Hernan A. Orozco Coadviser: PhD. Mauricio Rincón O. Coadviser: Ing. Afranio Cardona G.

## INTRODUCCIÓN

El laboratorio de soldadura a disposición en el CIMI (Centro Industrial de Mantenimiento Integral) del SENA (Servicio Nacional de Aprendizaje), cuenta con nuevos modelos de máquinas para soldeo semiautomático, las cuales poseen una amplia gama de opciones para realizar diversos trabajos con escasa intervención humana en el ajuste de sus variables. Haciendo uso de estas tecnologías se planteó en utilizar la corriente pulsada sobre la transferencia de cortocircuito convencional en el proceso de soldadura de protección a gas con electrodo metálico (GMAW), con la finalidad de investigar optimizaciones en los métodos de soldeo convencionales y mejorar su desempeño en operación. Este trabajo pretende estudiar la influencia de la corriente pulsada sobre la transferencia de cortocircuito en la soldadura de un acero estructural ASTM A36, acero sin aleación de 0.29 % de carbono.

El objetivo general del trabajo es determinar las variaciones en la microestructura y las propiedades mecánicas de uniones soldadas con el proceso GMAW en el acero ASTM A36 utilizando los modos de transferencia de metal fundido por cortocircuito y cortocircuito con corriente pulsada.

Los objetivos específicos son: Diseñar y obtener uniones soldadas a tope con bisel tipo V utilizando los modos de transferencia de metal fundido: cortocircuito y cortocircuito con arco pulsado con una mezcla de gas de 75 % Argón – 25 % CO<sub>2</sub>. Caracterizar la microestructura de las uniones soldadas mediante análisis metalográficos. Evaluar el comportamiento mecánico del acero A36 y las respectivas uniones soldadas mediante ensayos de tracción, ensayos de doblez, ensayos de impacto y mediciones de dureza.

El alcance de este trabajo está limitado a pulsar la corriente sobre la transferencia de cortocircuito, ya que existen muchas variables dentro del proceso de soldadura los cuales requieren de planteamientos y experimentos diferentes que no formarán parte de esta investigación.

## 1. ANTECEDENTES

Los procesos de soldadura deben cumplir estrictas especificaciones de calidad para tener un desempeño óptimo en servicio. La uniformación de los procesos y la demanda de seguridad en los trabajos son cada vez más exigentes; la manufactura de aceros se puede realizar utilizando diferentes procesos de soldadura, pero el proceso por arco eléctrico con electrodo metálico y protección de gas (GMAW, Gas Metal Arc Welding) facilita trabajos que requieran altos suministros en el metal de aporte y su fácil automatización lo hacen una tendencia nacional dado su método de alimentación de alambre continuo, calidad en la soldadura y eficiencia [1].

El proceso de soldadura de arco eléctrico con electrodo metálico y gas de protección une los metales por medio del calentamiento logrado por un arco eléctrico que se establece entre un electrodo consumible y la pieza de trabajo. Este proceso suministra una mezcla de gases que protege el arco y el depósito de soldadura fundida. El proceso GMAW se puede operar en los modos automático y semiautomático, en el proceso semiautomático no se elimina la presencia del soldador pero la mayoría de variables son ajustadas automáticamente por la máquina de soldadura al insertar los datos de aleación y modo de transferencia a usar. Es posible soldar con la mayoría de aleaciones comerciales como por ejemplo aceros al carbono, aceros de alta resistencia, aceros inoxidable, aleaciones de aluminio, aleaciones cobre y aleaciones de níquel. Además, permite soldar en todas las posiciones y la alimentación del metal de aporte es continua [1,2].

La adecuada elección de la mezcla de gases de protección, los electrodos y los parámetros de soldadura, son la clave para obtener uniones soldadas con las propiedades adecuadas para su servicio. Los modos de transferencia de metal en los procesos que involucran electrodos continuos protegidos por atmósferas gaseosas, están determinados por una serie de factores que involucran el tipo de la corriente de soldadura, el diámetro y composición del electrodo, además de la relación de gases utilizada y el suministro de potencia [1].

Dentro del proceso GMAW, se puede modificar la entrada de corriente de forma sinusoidal a pulsos y también encontramos cuatro modos de transferencia que son [1,2,3]:

Transferencia por Cortocircuito: El metal se transfiere del electrodo a la pieza cuando el electrodo contacta con el metal fundido depositado por soldadura.

Transferencia globular: En forma de grandes gotas de tamaño mayor que el electrodo que caen al baño de fusión por su propio peso.

Transferencia por rocío: Se desprenden pequeñas gotas del electrodo y se desplazan a través del arco hasta llegar a la pieza.

Transferencia por rocío pulsado: Es un modo de transferencia entre tipo cortocircuito y rocío, en el cual se producen impulsos espaciados que depositan el material de aporte de forma homogénea.

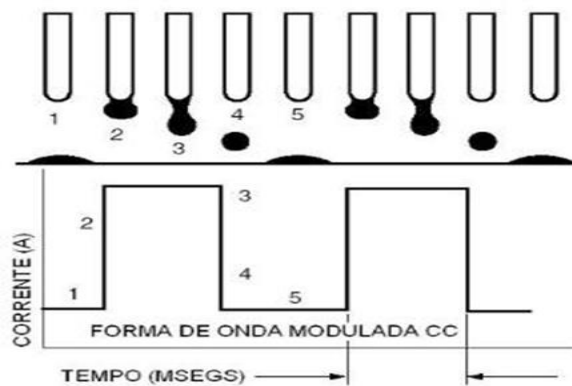
Los diferentes tipos de transferencia del proceso GMAW tienen incidencia en la microestructura de los materiales soldados debido a que el calor aportado es bajo en caso de la transferencia cortocircuito, media en la transferencia globular y alta en las transferencias rocío y rocío pulsado. Estos cambios en la temperatura de la soldadura aumentan las transformaciones y varían los tiempos de solidificación. El tamaño de grano de la zona afectada por el calor es uno de los principales cambios; todo esto incide en las propiedades mecánicas que pueden aumentar o disminuir dependiendo de las correctas transformaciones y un proceso llevado a cabo correctamente. [1,2,3,4,5]

“La transferencia por arco pulsado se caracteriza por una pulsación de la corriente entre una corriente base y una pico, de tal manera que el valor de corriente promedio este siempre por debajo del umbral de la transferencia por rocío. El propósito de la corriente base es mantener el arco estable, mientras la corriente pico forma y desprende las gotas fundidas, dando buena penetración al cordón de soldadura. Lo que permite que la energía del arco se utilice eficientemente, limitando las pérdidas de calor por conducción en el material base que ocurre utilizando la corriente constante, o la transferencia por corto circuito. El hecho de que con la transferencia por arco pulsado, la energía calorífica necesaria para fundir el material base se suministre únicamente durante pulsos de corriente pico a intervalos breves de tiempo, permite

que el calor se disipe en el material base logrando una zona afectada por el calor más estrecha” [3].

En la Figura 1, se explica lo que ocurre en la transferencia al generarse el pulso en la corriente, estos ciclos del pulso son generados automáticamente por la máquina de soldar a intervalos de milisegundos, generando que el número de gotas de metal depositado sea mayor, 200-300 gotas de metal por segundo, en cortocircuito se generan 30-50 gotas por segundo [1].

**Figura 1:** Fases de la corriente pulsada en la transferencia de metal.



Fase 1: se produce la corriente base de baja intensidad que mantiene el arco estable durante el proceso de la soldadura.

Fase 2: la corriente aumenta drásticamente para alcanzar un valor suficiente que corte la gota de metal fundido.

Fase 3: se mantiene la corriente máxima generada en la fase 2 por un espacio de tiempo para realizar el desprendimiento de la gota de metal.

Fase 4: desprendida la gota del electrodo la corriente vuelve a bajar instantáneamente a su valor base.

Fase 5: se reinicia el ciclo del pulso y la corriente se mantiene para seguir generando la técnica pulsada.

En estudios relacionados al tema de la transferencia pulsada de la Sociedad Americana de Soldadura (AWS) [1], exponen lo que sucede al pulsar la corriente en la transferencia de rocío

conocido como rocío pulsado, lo más resaltable es una disminución del calor transferido debido a los tiempos de espera entre pulso y pulso que generan una disminución de la temperatura, esto representa menor cantidad de transformaciones en la ZAC, también exponen que la penetración es mayor que la de las demás transferencias, la presentación de la soldadura es buena y se crea una buena homogeneidad en el tamaño de grano del material; también investigadores de diferentes partes del mundo han hecho aportes importantes como Romero N. S. y colaboradores (col.) [3], quien estudió los efectos de la transferencia pulsada en aceros especiales para la transferencia de rocío encontrando que esta genera mejores propiedades mecánicas al presentar tamaños de grano más homogéneos respecto a la transferencia de cortocircuito, importante resaltar estudios complementarios como los hechos por Palani P. K. y col. [6], quien plantea la importancia del gas de protección a usar y sus efectos sobre la soldadura según la composición química del gas, sugiriendo el Argón como el elemento más importante a la hora de seleccionar la transferencia pulsada con una mezcla optima de 95 % Argón – 5 % CO<sub>2</sub>; las características y documentación sobre la corriente pulsada son fuente de Collard J. F. y col. [4] quien estudió las características y el diseño de la corriente pulsada para aplicaciones automáticas.

## 2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Las consideraciones para iniciar el trabajo experimental serán presentadas a continuación con el fin de enseñar el proceso metodológico usado y dar fiabilidad a las conclusiones del trabajo presentado.

En principio, para comparar resultados, los experimentos se realizaron en tres partes: análisis del material base, material soldado por cortocircuito y material soldado por cortocircuito con arco pulsado.

El análisis incluye: ensayo de tracción, doblez cara-raíz, impacto Charpy, perfiles de dureza Rockwell y caracterización metalográfica.

### 2.1 ADQUISICIÓN DEL METAL DE TRABAJO Y CARACTERIZACIÓN

El material de trabajo es Acero ASTM A-36, lámina de acero estructural rolado en caliente con espesor de 10 [mm], el cual fue adquirido a la Cía. General de Aceros S. A. quien soportó y garantizó su composición química, véase Anexo 1.

**Tabla 1:** Composición química del Acero ASTM A36.

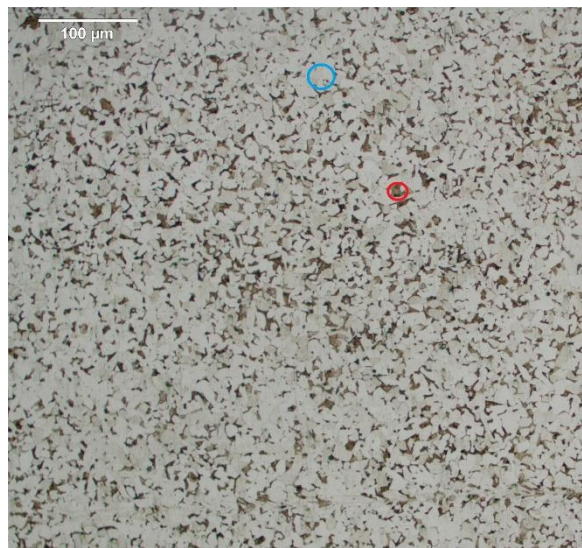
#### 2.1.1 Composición química del Acero ASTM A-36.

| ASTM | C        | Mn       | Si  | S máx | P máx |
|------|----------|----------|-----|-------|-------|
| A-36 | 0.29 máx | 0.8-0.12 | 0.2 | 0.05  | 0.05  |

**2.1.2 Caracterización metalográfica del Acero ASTM A-36.** La caracterización metalográfica de este trabajo se realizó siguiendo la normativa [7]; encontrando que el material se encuentra en estado recocido debido a que no se evidencia la microestructura normal de un proceso de laminado, presenta una matriz ferrítica y zonas de perlita, microestructura convencional de un acero hipoeutectoide. No se realizó determinación del índice de tamaño de grano debido a que el material presenta falta de homogeneidad química, es decir, al realizar el tratamiento térmico para eliminar los efectos del laminado, la

temperatura no fue elevada o la velocidad de enfriamiento no fue la adecuada para permitir que los átomos que componen la microestructura difundieran completamente en su estado normalizado y apreciar la forma equiaxiales. No es posible en el estado de entrega del acero cuantificar el índice de tamaño de grano y de realizar un tratamiento térmico de normalizado correcto para realizar la medición se pierde la medida de comparación con los especímenes soldados.

**Figura 2:** Acero hipoeutectoide de 0.29 % C a 100X, rojo perlita – azul ferrita.



## 2.2 DISEÑO DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA

El procedimiento de soldadura se realizó siguiendo las especificaciones del Código de calderas y recipientes a presión ASME sección IX [8] con el fin de que el trabajo presentado cumpla los estándares de una organización reconocida y avalada en la investigación de la soldadura y la investigación pueda continuar y dar aportes a otros investigadores. Se tomó el diseño del WPS y PQR que presenta el código para los cuales se realizaron ensayos previos para calificar el procedimiento y obtener el rango correcto de las variables a utilizar como

corriente, potencial, flujo de gas y velocidad de alimentación de alambre, véase los Anexos 2 y 3.

A continuación, en la Tabla 2, se presentan las variables principales consignadas en el procedimiento de soldadura entregado a los soldadores a cargo de la fabricación de las uniones soldadas, al tiempo que se realizó una socialización con el equipo de trabajo para coordinar la seguridad de operación:

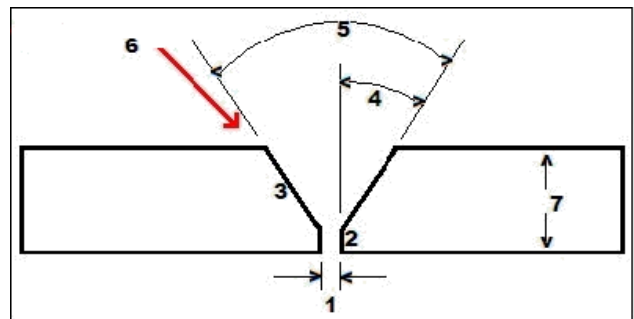
**Tabla 2:** Principales variables del proceso de soldadura usado, Autor.

| Variables de Soldadura | Soldadura 1                  | Soldadura 2                  |
|------------------------|------------------------------|------------------------------|
| Proceso                | GMAW                         | GMAW                         |
| Junta                  | Tope bisel V                 | Tope bisel V                 |
| Posición               | 1G                           | 1G                           |
| Metal Base             | ASTM A-36                    | ASTM A-36                    |
| Metal de Aporte        | ER70S-6/0.035[pul]           | ER70S-6/0.035[pul]           |
| Transferencia          | Cortocircuito                | Cortocircuito                |
| Corriente Pulsada      | No                           | Si                           |
| Mezcla de Gases        | 75% Ar – 25% CO <sub>2</sub> | 75% Ar – 25% CO <sub>2</sub> |
| Tratamiento Térmico    | No                           | No                           |

**2.2.1 Descripción de la junta soldada.** En la Figura 3 se presenta una unión a tope con bisel tipo V y talón, la cual fue la junta utilizada en las soldaduras del presente trabajo. Este tipo de junta se caracteriza por mantener buen desempeño bajo esfuerzos de tracción y esfuerzos de flexión.

**Figura 3:** Descripción de la junta soldada, Autor; [goo.gl/ML6Cyj](http://goo.gl/ML6Cyj).

|                |          |
|----------------|----------|
| 1. Abertura    | 3 [mm]   |
| 2. Talón       | 4 [mm]   |
| 3. Ranura      | 6.5 [mm] |
| 4. Ang. bisel  | 30°      |
| 5. Ang. Ranura | 60°      |
| 6. Sobremonta  | 5 [mm]   |
| 7. Espesor     | 10[mm]   |



**2.2.2 Composición química del electrodo de alambre continuo ER70S-6.** El electrodo ER70S-6 es el recomendado por el código para soldar acero A36, la composición química es diferente al material base pero sus propiedades mecánicas son superiores. La fuente de la composición química del electrodo es el fabricante Lincoln Electric, el cual cumple con los rangos de composición mencionados en el código ASME IX.

**Tabla 3:** Composición química del electrodo de aporte utilizado.

| AWS A5.18 | C    | Mn        | Si       | S máx | P máx | Cu máx |
|-----------|------|-----------|----------|-------|-------|--------|
| ER70S-6   | 0.15 | 1.40-1.85 | 0.8-0.15 | 0.035 | 0.025 | 0.50   |

## 2.3 PRUEBAS MECANICAS

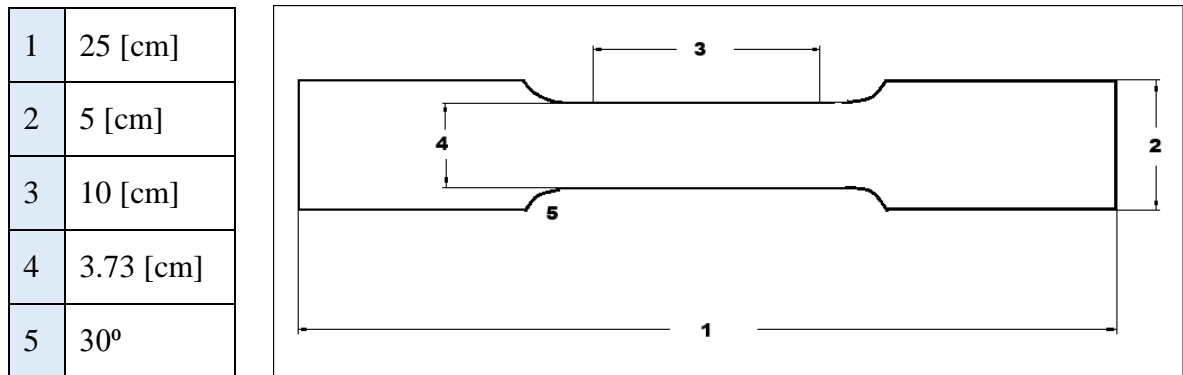
Las pruebas mecánicas descritas a continuación siguen los lineamientos expuestos por el código ASME IX, requisito para evaluar satisfactoriamente la soldadura mediante el PQR, la prueba de tenacidad no es mandatoria dentro del código pero con el fin de recopilar la mayor cantidad de información útil para la investigación se estudiaron los efectos a impacto de la soldadura, la prueba de impacto se realizó siguiendo la normativa ASTM.

Es importante conocer el comportamiento del material sometido a esfuerzos en tracción, esfuerzos de flexión y respuesta ante una fuerza de impacto, son cuestiones importantes a la hora del diseño y operación de las estructuras o equipos; esta es la importancia de realizar las pruebas mecánicas de forma estandarizada.

**2.3.1 Diseño de los cupones soldados para prueba de tracción.** Las dimensiones de los cupones se obtuvieron según el código ASME. Los cortes se realizaron con plasma para evitar daño microestructural apreciable y la sección central se mecanizó con fresadora CNC, véase Anexo 4. Se seleccionaron dos muestras por probeta, tomadas de diferentes secciones como plantea el código ASME. Los criterios de aceptación para el ensayo de tracción fueron: zona de fractura fuera del lugar donde se aplicó la soldadura y el valor de la resistencia última

a la tracción igual o superior al valor del metal base, si la fractura se produce fuera de la zona donde se aplicó la soldadura el valor de resistencia puede ser un 5 % menor a la base.

**Figura 4:** Dimensiones de probetas para tracción utilizadas, Autor.



**2.3.2 Diseño de los cupones soldados para prueba de doblez de cara y raíz.** Los cupones para las pruebas de doblez de cara y raíz fueron completamente rectangulares que tuvieron las dimensiones **1** y **2** de la Fig. 4, siguiendo las especificaciones del código ASME. Los criterios de aceptación para la prueba de doblez fueron: zona afectada por el calor (ZAC) y soldadura deben permanecer en su posición original al finalizar la prueba y si se presentan grietas no deberán ser superiores a 3 [mm].

**2.3.3 Diseño de las probetas para prueba de impacto Charpy.** La prueba de impacto no es reglamentaria dentro de las especificaciones del código ASME para la calificación de la soldadura, pero se realizó en este trabajo con el fin de observar los cambios producidos por la corriente pulsada. Las dimensiones de las probetas fueron de 5, 1, 1 [cm] de longitud, ancho y espesor respectivamente como expone la norma ASTM E23, se ensayaron dos muestras por probeta, véase Anexo 5.

**2.3.4 Diseño de los perfiles de dureza.** Las mediciones de dureza se realizaron en la escala Rockwell A. Tres mediciones por zona iniciando desde soldadura, seguido ZAC y finalizando con el metal base, las mediciones se realizaron en la sección longitudinal.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1 CÁLCULO DE LA ENTRADA DE CALOR

En el proceso semiautomático las variables principales que se introducen es el tipo de material a soldar, la transferencia, gas y la velocidad en el suministro de alambre, luego la maquina se encarga de regular los parámetros eléctricos. En la Tabla 4 se presentan los valores promedios medidos en cada pase de soldadura: raíz, relleno a, relleno b respectivamente.

**Tabla 4:** Mediciones de corriente entre pases para las platinas soldadas.

| Proceso                    | Amperaje [A] | Voltaje [V] | Velocidad de Alimentación [ipm] |
|----------------------------|--------------|-------------|---------------------------------|
| Cortocircuito              | 84           | 17.5        | 210                             |
|                            | 93           | 19.3        | 228                             |
|                            | 92           | 19.1        | 225                             |
| Cortocircuito-Arco pulsado | 69           | 18.4        | 175                             |
|                            | 55           | 16.5        | 170                             |
|                            | 50           | 16          | 170                             |

La entrada de calor  $H$  máxima para la soldadura de cortocircuito fue de 0.47 [kJ/pul], calculada usando la ecuación (1) [7]:

$$H = \frac{60 \times A \times V}{1000 \times S} \quad (1)$$

H: Aporte de energía [kJ/pul]

A: Corriente [A]

V: Potencial [V]

S: Velocidad de alimentación del alambre [pul/min o ipm]

Este valor es bajo en aporte calorífico, normal para la transferencia por cortocircuito de la cual es una de sus características. El calor aportado por el proceso con arco pulsado no puede ser calculado mediante la ecuación (1) debido a que la entrada de corriente no es constante por la emisión de pulsos cada cierto tiempo (milisegundos) [3,4]; lo anterior nos indica que en el lapso de tiempo que tarda el pulso en volverse a generar entre sus máximos y mínimos de corriente se presenta una pérdida de calor debido al  $\Delta T$  que se genera en el depósito metálico, la transferencia de calor por conducción tiene que ser menor y en este sentido el aporte de calor de arco pulsado es menor al calor aportado por la transferencia no pulsada.

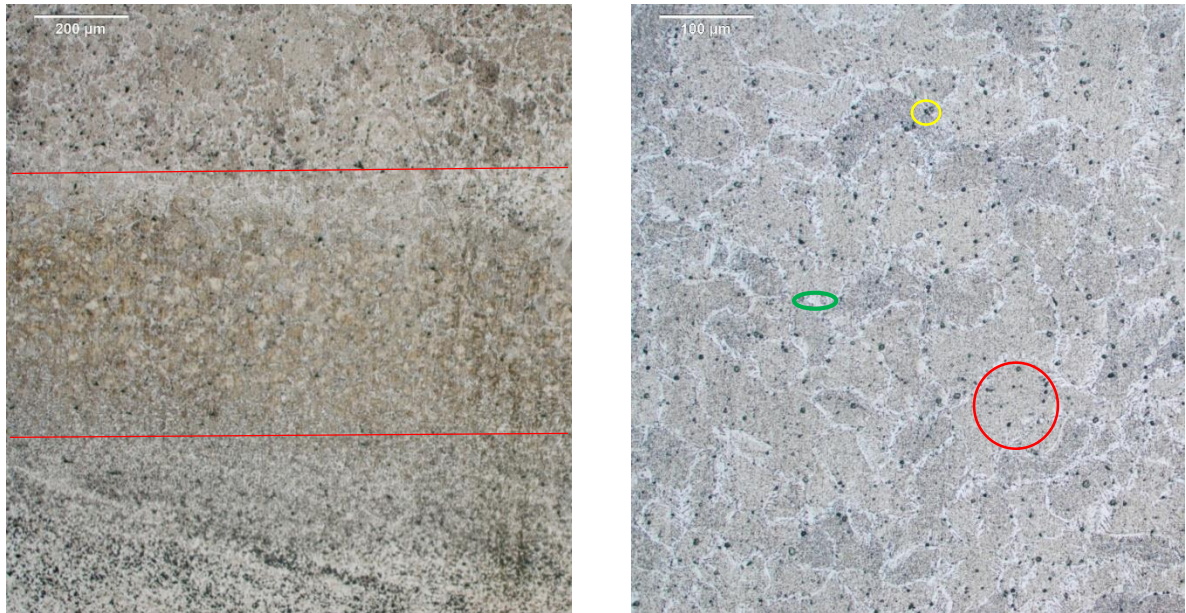
### **3.2 CARACTERIZACIÓN METALOGRAFICA DE LAS UNIONES SOLDADAS**

Al analizar las microestructuras de las uniones soldadas se evidencia que efectivamente se presentan diferencias notables entre el método convencional y el arco pulsado; la más destacable es la aparición de ferrita acicular en las uniones de arco pulsado, la cual se presenta a una velocidad de enfriamiento rápida, producto de un bajo aporte de calor como se mencionaba anteriormente. La transferencia pulsada posee una entrada de calor menor al convencional, lo que ocasiona que las gotas de metal fundido entren al charco metálico con menor temperatura, disipando su calor más rápido que las gotas fundidas en la soldadura convencional. Esto lleva a solidificar rápidamente sin dar lugar a que los átomos que forman la microestructura difundan en granos equiaxiales generando la aparición de la estructura acicular.

**3.2.1 Microestructura en las uniones soldadas por cortocircuito convencional.** En la Fig. 5 se pueden observar las tres zonas: soldadura, ZAC y metal base de forma descendente. La microestructura de la soldadura presenta granos de perlita suave con ferrita en los límites de grano. Se observa un aumento en el nivel de óxido globular respecto a la microestructura del metal base Fig.5. Esta diferencia se presenta debido a que son composiciones químicas y materiales diferentes. De igual forma se observa que se presentó una buena difusión de los

átomos que conforman la microestructura, asociado a un alto aporte de energía y condiciones de enfriamiento lentas.

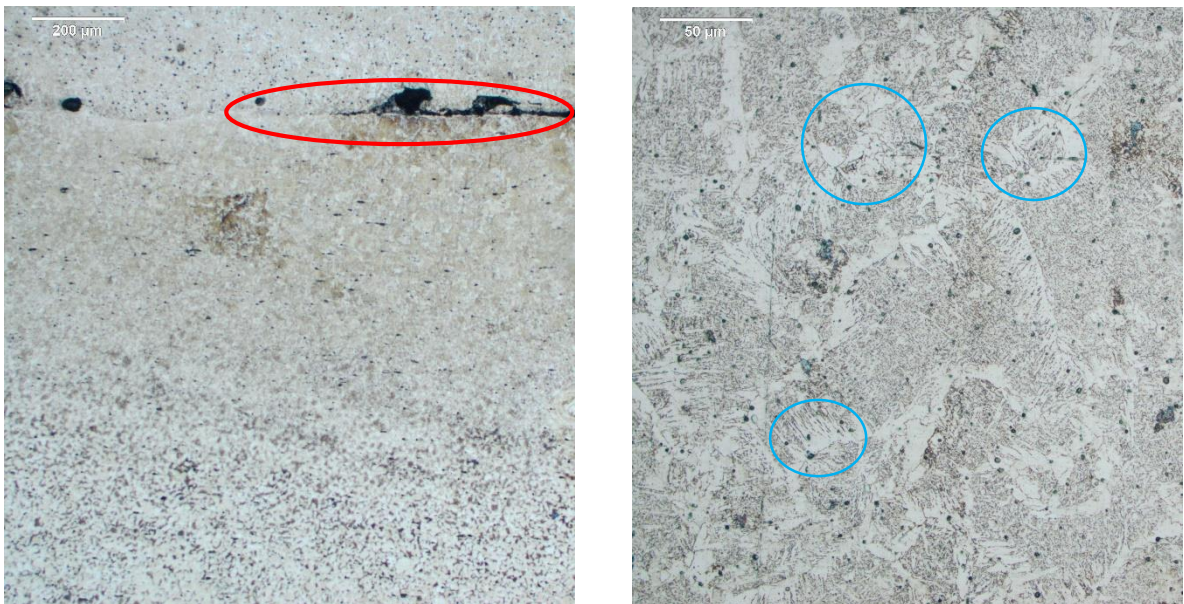
**Figura 5:** A la izquierda, microestructura de soldadura, ZAC y metal base por cortocircuito a 50X. A la derecha, microestructura de la soldadura por cortocircuito a 100X, amarillo-oxido globular, verde-ferrita, rojo-perlita. Vista superior.



**3.2.2 Microestructura en las uniones soldadas por cortocircuito con arco pulsado.** La microestructura en estas uniones presenta colonias de perlita con ferrita en forma acicular en los límites de grano. En la Fig. 6 se puede observar la microestructura de la soldadura, ZAC y metal base de forma descendente. En esta figura se observa una línea oscura que es la separación de soldadura y metal base, es la visualización de un defecto tipo: falta de fusión, este defecto se pudo presentar por dos razones sobresalientes: La primera razón es que el soldador avanzo muy rápido en el depósito del charco metálico pero las condiciones durante la ejecución de soldadura no fueron muy discrepantes a lo acordado en el procedimiento, la segunda razón es que el ajuste automático de los parámetros eléctricos y el espaciamiento del pulso calibrado manual por el soldador no resultaron efectivos, dando así un aporte calorífico significativamente bajo a lo esperado que no permitió la correcta fusión de los bordes biselados y el metal de aporte.

La ferrita acicular es producto de una velocidad de enfriamiento rápida que no da tiempo para que los átomos difundan completamente y esta solidifica en la orientación en la que se encontraba al momento de disminuir la temperatura. Estas zonas generan cambios en las propiedades mecánicas [8].

**Figura 6:** A la izquierda, microestructura de la soldadura, ZAC y metal base por arco pulsado a 50X, rojo-falta de fusión. A la derecha, microestructura de la soldadura por arco pulsado a 200X, azul-ferrita acicular; Autor.



### 3.3 ENSAYO DE TRACCIÓN

Los resultados del ensayo de tracción se presentan en la Tabla 5. En la Fig. 7 se evidencia que la soldadura de cortocircuito con arco pulsado no alcanzó el valor de resistencia a la tracción del material base y es rechazada según criterio del código ASME, véase la Tabla 6; además su zona de fractura se presentó en el cordón de soldadura, véase Anexo 6; la soldadura por cortocircuito convencional supero la resistencia del metal base, y su fractura se ubicó fuera del cordón de soldadura; en la fractura de las probetas de arco pulsado se evidencia un defecto de soldadura tipo falta de fusión, ver Fig. 7. Esto ocurrió debido al bajo aporte de calor ya mencionado. La ductilidad del material soldado con cortocircuito

disminuyó, esto se puede dar por los esfuerzos residuales que en el caso convencional aumentaron la resistencia mecánica a coste de disminuir la ductilidad un 5 % de elongación. Los datos enseñados son valores promedio de dos replicas ensayadas por muestra.

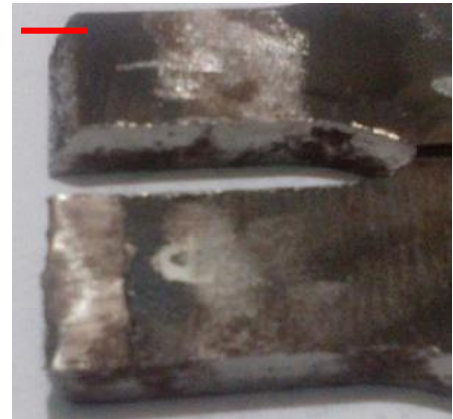
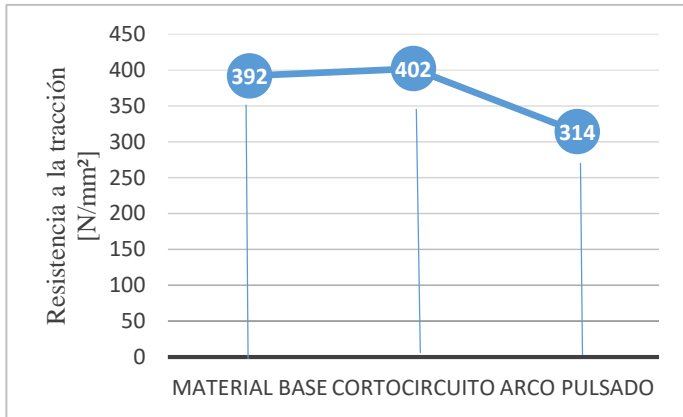
**Tabla 5:** Resultados obtenidos en la prueba de tracción, Autor.

| Muestras      | Fuerza Máx. [kN] | Esfuerzo Máx. [N/mm <sup>2</sup> ] | Esfuerzo Fluencia [N/mm <sup>2</sup> ] | Elongación Máx. [%] |
|---------------|------------------|------------------------------------|--|---------------------|
| Material Base | 113.06           | 392.68                             | 258.30                                 | 24.01               |
| Cortocircuito | 115.07           | 402.07                             | 250.92                                 | 19.88               |
| Arco Pulsado  | 91.12            | 314.99                             | 258.01                                 | 10.37               |

**Tabla 6:** Criterio de la prueba de tracción según el código ASME sección IX.

| Muestras                       | Criterio ASME IX |
|--------------------------------|------------------|
| Cortocircuito                  | Aceptado         |
| Cortocircuito con Arco Pulsado | Rechazado        |

**Figura 7:** A la izquierda, resistencia a la tracción máxima de los especímenes ensayados. A la derecha, desprendimiento de la soldadura y material base por defecto tipo: falta de fusión en las probetas de tracción en arco pulsado, Autor. La escala es de 1 [cm].



### 3.4 ENSAYO DE DOBLEZ: CARA Y RAÍZ

Los resultados de las pruebas de doblez se presentan en la Tabla 7, las probetas de arco pulsado fallaron en la prueba de cara, soportando solo 10 [kN] de fuerza, las demás probetas soportaron 30 [kN] y mantuvieron la soldadura en su posición.

**Tabla 7:** Resultados del ensayo de doblez, Autor.

| Muestras         | Cortocircuito<br>Fuerza aplicada [kN] | Arco Pulsado<br>Fuerza aplicada [kN] |
|------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|
| Cara             | 30                                    | 10                                   |
|                  | 30                                    | 10                                   |
| Raíz             | 30                                    | 32                                   |
|                  | 30                                    | 32                                   |
| Criterio ASME IX | Aceptado                              | Rechazado                            |

En las probetas de arco pulsado la raíz no se vio afectada en rendimiento ante las pruebas de doblez como se aprecia en la Tabla 7, esto puede ser debido a que la conservación de la temperatura es mayor en la zona donde se ubica la raíz al no haber una separación tan grande, la disipación del calor es menor y un mayor aporte de calor permitiría una buena fusión.

### 3.5 ENSAYO DE IMPACTO CHARPY

Tomando como consideración realizar la prueba a temperatura ambiente debido a que esa será la temperatura de trabajo de las piezas soldadas, los resultados presentados en la Tabla 8 son valores promedio de dos replicas ensayadas por muestra. Nuevamente encontramos que los mínimos valores de energía absorbida son para las probetas de arco pulsado, las probetas de cortocircuito convencional presentaron incluso mayor energía absorbida que el material base, aportándonos una idea de la calidad y efectividad de este proceso de soldadura.

Las mediciones al vacío se restaron a las medidas de los materiales para desprestigiar la fricción del aire y de los componentes de la máquina.

**Tabla 8:** Resultados de la prueba de impacto, Autor.

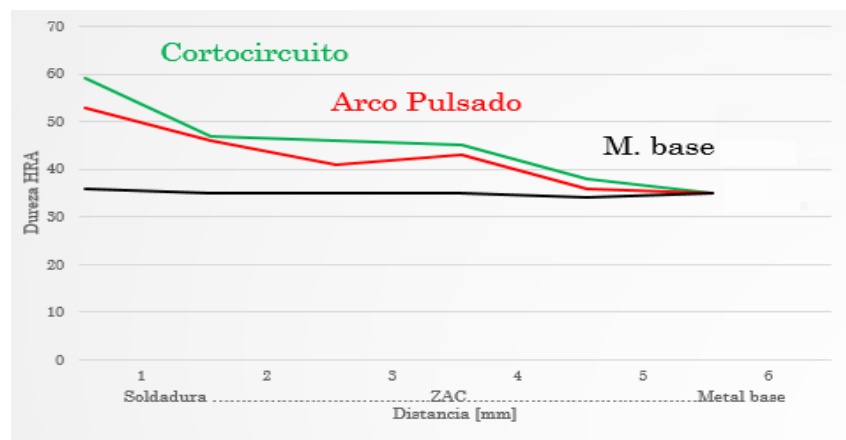
| Muestras                        | Vacío | Metal Base | Cortocircuito | Arco Pulsado |
|---------------------------------|-------|------------|---------------|--------------|
| Esfuerzo [mkg/cm <sup>2</sup> ] | 0.25  | 18         | 28            | 9.3          |
| Ángulo [°]                      | 1.5   | 66         | 81            | 33           |
| Energía [mkg]                   | 0.25  | 12.3       | 19.6          | 6.8          |

El tipo de microestructura que adquirió la soldadura realizada con arco pulsado: zonas aciculares y la baja cohesión entre las estructuras soldadura-base por el bajo aporte de calor de la técnica, no favoreció la capacidad de absorción de energía del material a temperatura ambiente.

### 3.6 ENSAYO DE DUREZA

En los resultados presentados en la Fig. 8 se observa el efecto de la temperatura en la zona afectada por el calor. Los valores de dureza más altos se encuentran en la soldadura con cortocircuito convencional y pocos valores más abajo se encuentran los valores de la soldadura con arco pulsado. Ambos disminuyen hacia la derecha alejándose de la soldadura alcanzando la medida de dureza del material base.

**Figura 8:** Distribución de los perfiles de dureza HRA en los especímenes en estudio.



#### **4. CONCLUSIONES**

Se observó que la transferencia con arco pulsado en las uniones soldadas posee una entrada calorífica baja respecto a la transferencia convencional, la combinación de las dos técnicas no produce suficiente energía para generar un charco metálico caliente en el que haya una fusión completa de la soldadura con el metal de aporte, generando así problemas en el desempeño de la unión y comprometiendo las propiedades del material.

Las microestructuras obtenidas de las muestras soldadas de cortocircuito con arco pulsado presentan una estructura acicular en los límites de grano, debido a un rápido enfriamiento en la solidificación por el bajo aporte de calor.

Se obtuvo la mejor combinación de propiedades mecánicas en tracción, flexión y resistencia al impacto utilizando la transferencia de cortocircuito convencional. El aporte calorífico ininterrumpido de la transferencia convencional favoreció una buena fusión del depósito metálico y no requiere de un tratamiento térmico posterior para mejorar las propiedades, la calidad de esta transferencia para el acero ASTM A36 es satisfactoria.

## **5. RECOMENDACIONES**

Se recomienda realizar el experimento con diferentes espesores de lámina que sean menores al espesor trabajado, es posible que al disminuir el espesor de lámina el calor aportado sea suficiente para realizar una buena fusión.

Estudiar el efecto de diferentes mezclas de gases en el proceso también puede ser recomendable, ya que sabemos que el gas desempeña un papel fundamental en la soldadura.

Estudiar diferentes tipos de junta y observar la variación en la resistencia según la aplicación y el servicio al cual vaya a ser sometido el material.

## BIBLIOGRAFÍA

AMERICAN WELDING SOCIETY, Welding Handbook, ninth edition volumen 1: Welding science and technology, 2001.

ASM Handbook. Welding, brazing and soldering. Vol. 6. p. 580, 572, 573, 1993.

ASTM E3-11. Standard guide for preparation of metallographic specimens, Edition 2016.

ASTM E23-16b. Standar test methods for notched bar impact testing of metallic materials, Edition 2016.

AWS A5.18/5.18M, Specification for carbon Steel electrodes and rods for gas shielded arc welding. 3 p, 2001.

BALASUBRAMANIAN V.; RAVISANKAR V. y MADHUSUDHAN Reddy, Influences of pulsed current welding and post weld aging treatment on fatigue crack growth behaviour of AA7075 aluminium alloy joints, 2007.

Código de calderas y recipientes sujetos a presión ASME, sección novena, Julio 1, 2010.

COLLARD J. F y col, Adaptive pulsed GMAW control: The digi pulsed system. En: *Journal of Materials Processing Technology* Vol.172, 2006.

GONZÁLES G, et al. Soldadura del acero API 5L-X52 mediante el proceso flux cored arc Welding (FCAW) con transferencia pulsada. Caracas, Universidad Central de Venezuela, 2011.

HOLLIDAY D. B, Welding Handbook, volumen 4 de la AWS, Capítulo 4, Soldadura por arco de metal y gas.

NEEDHAM J. C. y Carter A. W, Material transfer characteristics with pulsed current En: *Weld Journal*. Vol.5; p.229–241, 1965.

PALANI P. K y MURUGAN N, Selection of parameters of pulsed current gas metal arc welding En: *Journal of Materials Processing Technology* Vol.172, 2006.

PRAVEEN P.; YARLAGADDA P. y KANG M. J, Advancements in pulse gas metal arc welding. En: *Journal of Materials Processing Technology* Vol. 164–165, 2005.

ROMERO NIETO S. P. y col, Influencia del modo de transferencia de arco pulsado en el proceso de soldadura GMAW con alambre compuesto con núcleo metálico sobre la soldabilidad del acero ASTM 131 grado AH 32, Bogotá, Universidad Nacional de Colombia, 2012.

SCOTTI A, Mapping the transfer modes for stainless steel GMAW. En: *Journal of Science and Technology of Welding and Joining*. Vol. 5. No. 4; p. 227–234, 2000.

VARGA T.; KONKOLY T. y STRAUBE H, Investigation on microstructure, toughness, and defect tolerance of gas metal arc weld metal. *IIW Document*, X-1205-90.


## REFERENCIAS

- [1] AMERICAN WELDING SOCIETY, Welding Handbook, ninth edition volumen 1: Welding science and technology, 2001.
- [2] HOLLIDAY D. B, Welding Handbook, volumen 4 de la AWS, Capítulo 4, Soldadura por arco de metal y gas.
- [3] ROMERO NIETO S. P. y col, Influencia del modo de transferencia de arco pulsado en el proceso de soldadura GMAW con alambre compuesto con núcleo metálico sobre la soldabilidad del acero ASTM 131 grado AH 32, Bogotá, Universidad Nacional de Colombia, 2012.
- [4] COLLARD J. F y col, Adaptive pulsed GMAW control: The digi pulsed system. En: *Journal of Materials Processing Technology* Vol.172, 2006.
- [5] GONZÁLES G, et al. Soldadura del acero API 5L-X52 mediante el proceso flux cored arc Welding (FCAW) con transferencia pulsada. Caracas, Universidad Central de Venezuela, 2011.
- [6] PALANI P. K y MURUGAN N, Selection of parameters of pulsed current gas metal arc welding En: *Journal of Materials Processing Technology* Vol.172, 2006.
- [7] ASTM E3-11. Standard guide for preparation of metallographic specimens, Edition 2016.
- [8] Código de calderas y recipientes sujetos a presión ASME, sección novena, Julio 1, 2010.
- [9] ASTM E23-16b. Standar test methods for notched bar impact testing of metallic materials, Edition 2016.

# **ANEXOS**

## ANEXO A

Soporte de la compañía general de aceros de la composición química del acero ASTM A36.



**Cia. General de Aceros S.A.**  
50 años

**Acero ESTRUCTURAL**

**Láminas y planchas HOT ROLLED**

| Aplicaciones  | ASTM         | COMPOSICION QUIMICA |                |             |                       |                      | PROPIEDADES MECANICAS     |                         |                |    |  |
|---|--------------|---------------------|----------------|-------------|-----------------------|----------------------|---------------------------|-------------------------|----------------|----|--|
|   |              | C                   | Mn             | Si          | S máx                 | P máx                | Resistencia a la Tracción | Límite Elástico         | Alargamiento % |    |  |
| Estructuras en General  | A-36         | 0.29 máx            | 0.8-1.2        | 0.2         | 0.05                  | 0.05                 | 41-56kg/mm <sup>2</sup>   | 23-25kg/mm <sup>2</sup> | 20             | 23 |  |
| Tanques almacenamiento  | A-283 Gr. C  | 0.18 máx            | 0.5 - 0.9      | 0.3         | 0.03                  | 0.03                 | 39-46 kg/mm <sup>2</sup>  | 21kg/mm <sup>2</sup>    | 20             | 23 |  |
| Construcción naval en general   | A-131 Gr. A  | 0.26                | 0.7-1.35       | 0.35        | 0.04                  | 0.04                 | 41-50 kg/mm <sup>2</sup>  | 23kg/mm <sup>2</sup>    | 21             | 24 |  |
| Recipientes a presión para servicios a temperatura intermedias y altas. | A-516 Gr. 70 | 0.28 máx *          | 0.85 - 1.2 máx | 0.15 - 0.40 | 0.035                 | 0.035                | 49-63 kg/mm <sup>2</sup>  | 26.5kg/mm <sup>2</sup>  | 17             | 21 |  |
| Lámina de alto límite elástico (Maxdur A-650)                           | A-514 Gr. Q  | 0.20-0.24           | 1.60 máx       | 0.5         | Cr / Ni<br>1.5 / 1.35 | Mo / Cu<br>0.6 / 0.5 | 78-96 kg/mm <sup>2</sup>  | 71kg/mm <sup>2</sup>    | 14             |    |  |
| A 572   | A-572 Gr. 50 | 0.23 máx            | 1.35 máx       | 0.4 máx     | 0.05                  | 0.04                 | 49 kg/mm <sup>2</sup>     | 35kg/mm <sup>2</sup>    | 18             | 21 |  |

\* Para espesores hasta 2 pulgadas.

## ANEXO B

WPS y PQR para las uniones soldadas de cortocircuito convencional.

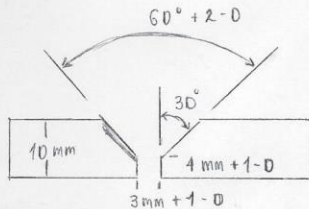
| ESPECIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA (WPS) |   |  |   |
|---|---|--|---|
| Nombre de la compañía:                              | UIS   | Por:                                       | Eduardo Santos Olivero M.   |
| Procedimiento de soldar No:                         | 01  | Fecha:                                     | 22/11/16 No.(s) de PQR que apoya: A1  |
| Revisión No.  | 01  | Fecha:                                     | 22/11/2016  |
| Proceso de Soldar                                   | GMAW  | Tipo:                                      | Cortocircuito S-A   |
| <b>SOLDADOR</b>                                     |   |  |   |
| Nombre:   | Jhon Hernández  | C.C.:                                      | <input checked="" type="checkbox"/>   |
|   |   | Estampe:                                   | JH - CIMI   |
| <b>JUNTAS</b>                                       |   | <b>DETALLES</b>                            |   |
| Diseño de la Junta                                  | Plana Bisel en V  |  |   |
| Respaldo (Si)                                       | (No) <input checked="" type="checkbox"/>                  |  |   |
| Material de Respaldo (Tipo)                         | <input checked="" type="checkbox"/>                       |  |   |
| Metal Acero A36                                     | Metal que no se funde <input checked="" type="checkbox"/> |  |   |
| Otro <input checked="" type="checkbox"/>            | No Metálico <input checked="" type="checkbox"/>           |  |   |
| <b>METALES BASE</b>                                 |   |  |   |
| No. P   | 1   | No. Grupo                                  | 1 a No. P <input checked="" type="checkbox"/> No. Grupo <input checked="" type="checkbox"/> |
| Especificación, Tipo y Grado                        | SA 36   |  |   |
| a Especificación, Tipo y Grado                      | <input checked="" type="checkbox"/>                       |  |   |
| Análisis Quím. Y Prop. Mec.                         | C 0.26 - 0.29 P 0.04 S 0.05 Si 0.040                      |  |   |
| a Análisis Quím. Y Prop. Mec.                       | <input checked="" type="checkbox"/>                       |  |   |
| Orden de Espesores                                  | 10 mm   |  |   |
| Metal Base:   | Ranura <input checked="" type="checkbox"/>                | Filete <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/>   |
| Orden de Diam. De Tubo:                             | Ranura <input checked="" type="checkbox"/>                | Filete <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/>   |
| Otros   |   |  |   |
| <b>METALES DE APORTE</b>                            |   |  |   |
| No. Espec. (SFA)                                    | SFA - 5.18  |  |   |
| No. AWS (Clase)                                     | Acero y Al. Acero ER70S-6                                 |  |   |
| No. F   | 6   |  |   |
| No. A   | 1   |  |   |
| Tamaño de Metales de Aporte                         | Di = 0.035 pul  |  |   |
| Metales de Soldadura                                | <input checked="" type="checkbox"/>                       |  |   |
| Orden de Espesores:                                 | <input checked="" type="checkbox"/>                       |  |   |
|   | Ranura  | 10 mm , 4 mm                               |   |
|   | Filete  | <input checked="" type="checkbox"/>        |   |
| Fundente de Electrodo (Clase)                       | <input checked="" type="checkbox"/>                       |  |   |
| Nombre Comercial de Fundente                        | <input checked="" type="checkbox"/>                       |  |   |
| Met. Inserto Consumible                             | <input checked="" type="checkbox"/>                       |  |   |
| Otros   | <input checked="" type="checkbox"/>                       |  |   |

| (RESPALDO) ESPECIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA (WPS)        |         |                             |          |  |                          |                  |                           |  |
|---|---------|-----------------------------|----------|--|--------------------------|------------------|---------------------------|--|
| <b>POSICIONES</b>   |         |                             |          | <b>TRATAMIENTO TERMICO POSTERIOR A SOLDADURA</b> |                          |                  |                           |  |
| Posición de Ranura <u>1G</u>  |         | P. Arriba P. Abajo          |          | Orden de Temperaturas <u>X</u>                   | Orden de Tiempo <u>X</u> |                  |                           |  |
| Progresión de Soldadura: <u>X</u>                                     |         | Posición de Filete <u>X</u> |          |  |                          |                  |                           |  |
| <b>PRECALENTAMIENTO</b>   |         |                             |          | <b>GAS</b>                                       |                          |                  |                           |  |
|   |         |                             |          | Composición en porcentaje                        |                          |                  |                           |  |
| Temp. Prealent. Min. <u>X</u>   |         |                             |          | Gas(es)  | (Mezcla)                 | Gasto            |                           |  |
| Temp. Prealent. Máx. <u>X</u>   |         |                             |          | Protección <u>Ar-CO<sub>2</sub></u>              | <u>75-25</u>             | <u>10lit/h</u>   |                           |  |
| Tiempo de Prealemtamiento <u>X</u>                                    |         |                             |          | Arrastre <u>-</u>                                | <u>-</u>                 | <u>-</u>         |                           |  |
|   |         |                             |          | Respaldo <u>-</u>                                | <u>-</u>                 | <u>-</u>         |                           |  |
| <b>CARACTERISTICAS ELECTRICAS</b>                                     |         |                             |          |  |                          |                  |                           |  |
| Corriente CA o CD <u>CD</u>   |         | Polaridad <u>Positiva</u>   |          |  |                          |                  |                           |  |
| Amps <u>80-220</u>  |         | Volts <u>16-21</u>          |          |  |                          |                  |                           |  |
| Modo de Transferencia. Metal GMAW <u>Cortocircuito</u>                |         | Corriente Pulsada <u>NO</u> |          |  |                          |                  |                           |  |
| Velocidad de Alimentación del Electrodo de Alambre <u>160-250 ipm</u> |         |                             |          |  |                          |                  |                           |  |
| <b>TÉCNICA</b>  |         |                             |          |  |                          |                  |                           |  |
| Cordón Longitudinal o de vaivén. <u>Longitudinal</u>                  |         |                             |          |  |                          |                  |                           |  |
| Tamaño Orificio o de Taza de Gas <u>~ 3/8 a 5/8 pul</u>               |         |                             |          |  |                          |                  |                           |  |
| Limpieza Inicial y Entre Pasos <u>limpieza con grata</u>              |         |                             |          |  |                          |                  |                           |  |
| Método de Cincelado Posterior <u>NO</u>                               |         |                             |          |  |                          |                  |                           |  |
| Oscilación <u>Si</u>  |         |                             |          |  |                          |                  |                           |  |
| Tubo de Contacto a Distancia de Trabajo <u>~ 3/4 pul</u>              |         |                             |          |  |                          |                  |                           |  |
| Paso Múltiple o Simple (por lado) <u>Múltiple (3)</u>                 |         |                             |          |  |                          |                  |                           |  |
| Electrodos Múltiples o Simple <u>1 tipo de electrodo ER70S-6</u>      |         |                             |          |  |                          |                  |                           |  |
| Velocidad de Recorrido (Orden de) <u>1/4 a 1/2 de pul.</u>            |         |                             |          |  |                          |                  |                           |  |
| Martillado <u>X</u>   |         |                             |          |  |                          |                  |                           |  |
| Otros <u>~</u>  |         |                             |          |  |                          |                  |                           |  |
| Capa(s) de Soldadura  | Proceso | Metal de Aporte             |          | Corriente  |                          | Orden de Voltaje | Orden de Veloc. Recorrido | Otros (Notas, Comentarios, Técnica...) |
|   |         | Clase                       | Diámetro | Tipo Polar                                       | Orden Amperaje           |                  |                           |  |
| (1-N)   | GMAW    | ER70S-6                     | D.035"   | CDPP   | 80-220 A                 | 16-21 V          | 3-6 pul/min               | X                                      |

**REGISTRO DE CALIFICACIÓN DE PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA (PQR)**

Nombre de la compañía: UIS  
 Procedimiento de soldar No: 01 Fecha: 5/12/2016  
 WPS No. 01  
 Proceso de Soldar GMAW Tipo: Cortocircuito S-A

**JUNTAS**



**METALES BASE**

Especificación, Tipo y Grado SA 36  
 No. P 1 a No. P 3  
 Espesor de Muestra de Prueba 10 mm  
 Diámetro de Muestra de Prueba χ  
 Otros χ

**TRATAMIENTO TERMICO POSTERIOR**

Temperatura χ  
 Tiempo χ  
 Otros χ

**METALES DE APORTE**

No. Especificación (SFA) SFA - 5.18  
 Clasificación AWS ER70S-6  
 Metal de Aporte No. F 6  
 Análisis Metal Soldadura No. A 1  
 Tamaño de Metales de Aporte 0.035"  
 Espesor de Metal de Soldadura ~  
 Otros χ

**GAS**

Composición en porcentaje

| Gas(es)            | (Mezcla) | Gasto               |
|--------------------|----------|---------------------|
| Ar-CO <sub>2</sub> | 75-25    | 10m <sup>3</sup> /h |
| Arrastre           | -        | -                   |
| Respaldo           | -        | -                   |

**CARACTERISTICAS ELECTRICAS**

Corriente Corriente Directa  
 Polaridad Positiva  
 Amps. 93 Volts. 19.3  
 Tamaño Electro de Tungsteno χ  
 Arco Pulsado No  
 Otros χ

**POSICIÓN**

Posición de Ranura 16  
 Progresión de Soldadura (Arriba, Abajo) χ  
 Otros χ

**TECNICA**

Velocidad de Recorrido 4 pul/min  
 Cordón Corrido o de Vaivén χ  
 Oscilación Si  
 Multipasos o Paso Simple Multipasos  
 Electrodo Múltiples o Simple 1 electrodo ER70S-6  
 Otros χ

**Precalentamiento**

Temp. Precalentamiento χ  
 Temp. Entre Pasos χ  
 Otros χ

(RESPALDO) REGISTRO DE CALIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA PQR No.: A1

Prueba de Tensión

| Espécimen No. | Ancho   | Espesor | Área                  | Carga Última total | Esfuerzo Unitario Último | Tipo de Falla y Ubicación |
|---------------|---------|---------|-----------------------|--------------------|--------------------------|---------------------------|
| Tensión 1     | 26,5 mm | 1,1 mm  | 2,91 mm <sup>2</sup>  | 115,07 kN          | 402,07 N/mm <sup>2</sup> | Metal base                |
| Tensión 2     | 26,6 mm | 1,2 mm  | 292,9 mm <sup>2</sup> | 116,22 kN          | 401,09 N/mm <sup>2</sup> | Metal base                |

Prueba de Doblez Guiado

| Tipo y Figura No. | Resultado               |
|-------------------|-------------------------|
| Doblez cara 1     | Aceptado, sin defectos. |
| Doblez cara 2     | Aceptado, sin defectos. |
| Doblez raíz 1     | Aceptado, sin defectos. |
| Doblez raíz 2     | Aceptado, sin defectos. |

Prueba de Tenacidad

| Espécimen No. | Ubicación de Muesca | Tipo Muesca | Temp. Prueba | Valores de Impacto       |            |               | Piso de Gota |            |
|---------------|---------------------|-------------|--------------|--------------------------|------------|---------------|--------------|------------|
|               |                     |             |              | V [mkg/cm <sup>2</sup> ] | Ángulo [°] | Energía [mkg] | Rotura       | Sin Rotura |
| Impacto 1     | soldadura           | V           | 25°C         | 28                       | 81         | 19,6          | .            | X          |
| Impacto 2     | soldadura           | V           | 25°C         | 28                       | 81,5       | 19,5          |              | X          |

Resultados - Satisfactorios Si  No Penetración dentro Metal Base Si No

Macro - Resultados

Otras Pruebas

Tipo de prueba X

Análisis de Depósito X

Otros X

Nombre del Soldador: Jhon Hernández No. Reloj. 11:00 am Estampe No. JH - CIM1

Pruebas conducidas por: Eduardo Santos Olivero Laboratorio de Pruebas No. 01

Certificamos que las declaraciones de este registro son correctas y que las soldadura de prueba fueron preparadas de acuerdo con los requerimientos de la Sección IX del Código de ASME.

Fecha 05 de Diciembre de 2016

Fabricante: Eduardo Santos O. M.  
Por: Eduardo Santos

## ANEXO C

WPS y PQR para las uniones soldadas de cortocircuito con arco pulsado.

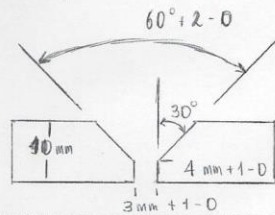
| ESPECIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA (WPS) |                                      |                 |                                      |
|---|--------------------------------------|-----------------|--------------------------------------|
| Nombre de la compañía:                              | 015                                  | Por:            | Eduardo Santos Olivero M.            |
| Procedimiento de soldar No:                         | 02                                   | Fecha:          | 22/11/16 No.(s) de PQR que apoya: B1 |
| Revisión No.  | 02                                   | Fecha:          | 22/11/2016                           |
| Proceso de Soldar                                   | GMAW                                 | Tipo:           | cortocircuito 5-A                    |
| <b>SOLDADOR</b>                                     |                                      |                 |                                      |
| Nombre:   | Juan Hernández                       | C.C.:           | x                                    |
| Estampe:  | JH - CIMI                            |                 |                                      |
| <b>JUNTAS</b>                                       |                                      | <b>DETALLES</b> |                                      |
| Diseño de la Junta                                  | Plana Bisel en V                     |                 |                                      |
| Respaldo (Si)                                       | (No)                                 | x               |                                      |
| Material de Respaldo (Tipo)                         | x                                    |                 |                                      |
| Metal Acero A36                                     | Metal que no se funde                | x               |                                      |
| Otro x  | No Metálico                          | x               |                                      |
|   |                                      |                 |                                      |
| <b>METALES BASE</b>                                 |                                      |                 |                                      |
| No. P   | 1                                    | No. Grupo       | 1 a No. P x No. Grupo x              |
| Especificación, Tipo y Grado                        | SA 36                                |                 |                                      |
| a Especificación, Tipo y Grado                      | x                                    |                 |                                      |
| Análisis Quím. Y Prop. Mec.                         | C 0.26 - 0.29 P 0.04 S 0.05 Si 0.040 |                 |                                      |
| a Análisis Quím. Y Prop. Mec.                       | x                                    |                 |                                      |
| Orden de Espesores                                  | 10 mm                                |                 |                                      |
| Metal Base:   | Ranura                               | Si              | Filete x                             |
| Orden de Diam. De Tubo:                             | Ranura                               | x               | Filete x                             |
| Otros   |                                      |                 |                                      |
| <b>METALES DE APORTE</b>                            |                                      |                 |                                      |
| No. Espec. (SFA)                                    | SFA - 5.18                           |                 |                                      |
| No. AWS (Clase)                                     | Acero y Al. Acero ER70S-6            |                 |                                      |
| No. F   | 6                                    |                 |                                      |
| No. A   | 1                                    |                 |                                      |
| Tamaño de Metales de Aporte                         | Di = 0.035 pul                       |                 |                                      |
| Metales de Soldadura                                |                                      |                 |                                      |
| Orden de Espesores:                                 | x                                    |                 |                                      |
|   | Ranura                               | 10 mm, 4 mm     |                                      |
|   | Filete                               | x               |                                      |
| Fundente de Electrodo (Clase)                       | x                                    |                 |                                      |
| Nombre Comercial de Fundente                        | x                                    |                 |                                      |
| Met. Inserto Consumible                             | x                                    |                 |                                      |
| Otros   | x                                    |                 |                                      |

| (RESPALDO) ESPECIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA (WPS) |         |                             |          |  |                    |                  |                           |  |
|--|---------|-----------------------------|----------|--|--------------------|------------------|---------------------------|--|
| <b>POSICIONES</b>  |         |                             |          | <b>TRATAMIENTO TERMICO POSTERIOR A SOLDADURA</b> |                    |                  |                           |  |
| Posición de Ranura   |         | 16                          |          | Orden de Temperaturas                            |                    | X                |                           |  |
| Progresión de Soldadura:                                       |         | P. Arriba P. Abajo          |          | Orden de Tiempo                                  |                    | X                |                           |  |
| Posición de Filete   |         | X                           |          |  |                    |                  |                           |  |
| <b>PRECALENTAMIENTO</b>  |         |                             |          | <b>GAS</b>                                       |                    |                  |                           |  |
|  |         |                             |          | Composición en porcentaje                        |                    |                  |                           |  |
| Temp. Prealent. Min.   | X       |                             |          | Gas(es)  | (Mezcla)           | Gasto            |                           |  |
| Temp. Prealent. Máx.   | X       |                             |          | Protección                                       | Ar-CO <sub>2</sub> | 75-25            | 10 lit/h                  |  |
| Tiempo de Pre calentamiento                                    | X       |                             |          | Arrastre   | -                  | -                |                           |  |
|  |         |                             |          | Respaldo   | -                  | -                |                           |  |
| <b>CARACTERISTICAS ELECTRICAS</b>                              |         |                             |          |  |                    |                  |                           |  |
| Corriente CA o CD  |         | CD                          |          | Polaridad  |                    | Positiva         |                           |  |
| Amps   |         | 50 - 200                    |          | Volts  |                    | 16 - 19          |                           |  |
| Modo de Transferencia. Metal GMAW                              |         | Cortocircuito               |          | Corriente Pulsada                                |                    | Si               |                           |  |
| Velocidad de Alimentación del Electrodo de Alambre             |         | 160 - 250 ipm               |          |  |                    |                  |                           |  |
| <b>TÉCNICA</b>   |         |                             |          |  |                    |                  |                           |  |
| Cordón Longitudinal o de vaivén.                               |         | Longitudinal                |          |  |                    |                  |                           |  |
| Tamaño Orificio o de Taza de Gas                               |         | ~ 3/8 a 5/8 pul.            |          |  |                    |                  |                           |  |
| Limpieza Inicial y Entre Pasos                                 |         | Limpieza con grata          |          |  |                    |                  |                           |  |
| Método de Cincelado Posterior                                  |         | No                          |          |  |                    |                  |                           |  |
| Oscilación   |         | Si                          |          |  |                    |                  |                           |  |
| Tubo de Contacto a Distancia de Trabajo                        |         | ~ 3/4 pul.                  |          |  |                    |                  |                           |  |
| Paso Múltiple o Simple (por lado)                              |         | Multiple (3)                |          |  |                    |                  |                           |  |
| Electrodos Múltiples o Simple                                  |         | 1 tipo de electrodo ER70S-6 |          |  |                    |                  |                           |  |
| Velocidad de Recorrido (Orden de)                              |         | 1/4 a 1/2 de pul.           |          |  |                    |                  |                           |  |
| Martillado   |         | X                           |          |  |                    |                  |                           |  |
| Otros  |         | ~                           |          |  |                    |                  |                           |  |
| Capa(s) de Soldadura   | Proceso | Metal de Aporte             |          | Corriente  |                    | Orden de Voltaje | Orden de Veloc. Recorrido | Otros (Notas, Comentarios, Técnica...) |
|  |         | Clase                       | Diámetro | Tipo Polar                                       | Orden Amperaje     |                  |                           |  |
| (1 - N)  | GMAW    | ER70S-6                     | 0.035"   | CDPP   | 50 - 200A          | 16 - 19V         | 3 - 6 pul/min             | X                                      |

**REGISTRO DE CALIFICACIÓN DE PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA (PQR)**

Nombre de la compañía: WIS  
 Procedimiento de soldar No: D2 Fecha: 5/12/2016  
 WPS No. D2  
 Proceso de Soldar 6MAW Tipo: cortocircuito S-A.

**JUNTAS**



**METALES BASE**

Especificación, Tipo y Grado SA 36  
 No. P 1 a No. P  $\chi$   
 Espesor de Muestra de Prueba 10 mm  
 Diámetro de Muestra de Prueba  $\chi$   
 Otros  $\chi$

**TRATAMIENTO TERMICO POSTERIOR**

Temperatura  $\chi$   
 Tiempo  $\chi$   
 Otros  $\chi$

**GAS**

Composición en porcentaje  
 Gas(es) (Mezcla) Gasto  
 Ar-CO<sub>2</sub> 95-25 10 l/h  
 Protección -  
 Arrastre -  
 Respaldo -

**METALES DE APORTE**

No. Especificación (SFA) SFA - 5.18  
 Clasificación AWS ER70S-6  
 Metal de Aporte No. F 6  
 Análisis Metal Soldadura No. A 1  
 Tamaño de Metales de Aporte 0.035"  
 Espesor de Metal de Soldadura -  
 Otros  $\chi$

**CARACTERISTICAS ELECTRICAS**

Corriente Corriente Directa  
 Polaridad Positiva  
 Amps. 69 Volts. 18.4  
 Tamaño Electro de Tungsteno  $\chi$   
 Arco Pulsado Si  
 Otros  $\chi$

**POSICIÓN**

Posición de Ranura 16  
 Progresión de Soldadura (Arriba, Abajo)  $\chi$   
 Otros  $\chi$

**TECNICA**

Velocidad de Recorrido 4 pul/min  
 Cordón Corrido o de Vaivén  $\chi$   
 Oscilación Si  
 Multipasos o Paso Simple Multipasos  
 Electrodo Múltiples o Simple 1 electrado ER70S-6  
 Otros  $\chi$

**Pre calentamiento**

Temp. Pre calentamiento  $\chi$   
 Temp. Entre Pasos  $\chi$   
 Otros  $\chi$

(RESPALDO) REGISTRO DE CALIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA PQR No.: 01

Prueba de Tensión

| Espécimen No. | Ancho   | Espesor | Área                  | Carga Última total | Esfuerzo Unitario Último | Tipo de Falla y Ubicación |
|---------------|---------|---------|-----------------------|--------------------|--------------------------|---------------------------|
| Tracción 1    | 26,5 mm | 11 mm   | 291,5 mm <sup>2</sup> | 91,12 kN           | 314,99 N/mm <sup>2</sup> | Soldadura                 |
| Tracción 2    | 26,5 mm | 11,2 mm | 296,8 mm <sup>2</sup> | 75 kN              | 252,69 N/mm <sup>2</sup> | Soldadura                 |

Prueba de Doblez Guiado

| Tipo y Figura No. | Resultado                                |
|-------------------|--|
| Doblez cara 1     | Rechazado, desprendimiento de soldadura. |
| Doblez cara 2     | Rechazado, desprendimiento de soldadura  |
| Doblez raíz 1     | Aceptado, sin defectos                   |
| Doblez raíz 2     | Aceptado, 2 grietas de 0,5 mm longitud.  |

Prueba de Tenacidad

| Espécimen No. | Ubicación de Muesca | Tipo Muesca | Temp. Prueba | Valores de Impacto       |            |               | Piso de Gota |            |
|---------------|---------------------|-------------|--------------|--------------------------|------------|---------------|--------------|------------|
|               |                     |             |              | V [mkg/cm <sup>2</sup> ] | Ángulo [°] | Energía [mkg] | Rotura       | Sin Rotura |
| Impacto 1     | Soldadura           | V           | 25°C         | 9,3                      | 33         | 6,8           | ~            | X          |
| Impacto 2     | Soldadura           | V           | 25°C         | 9,1                      | 33,2       | 6,7           | ~            | X          |

Resultados - Satisfactorios Si No  Penetración dentro Metal Base Si No

Macro - Resultados

Otras Pruebas

Tipo de prueba

Análisis de Depósito

Otros

Nombre del Soldador: Jhon Hernández No. Reloj. 4:00 pm Estampe No. JH - C1M1

Pruebas conducidas por: Eduardo Santos Olivero N. Laboratorio de Pruebas No. 01

Certificamos que las declaraciones de este registro son correctas y que las soldadura de prueba fueron preparadas de acuerdo con los requerimientos de la Sección IX del Código de ASME.

Fecha 05 de Diciembre de 2016

Fabricante: Eduardo Santos D. M.

Por: Eduardo Santos

## ANEXO D

Muestra representativa de las probetas utilizadas para el ensayo de tracción.



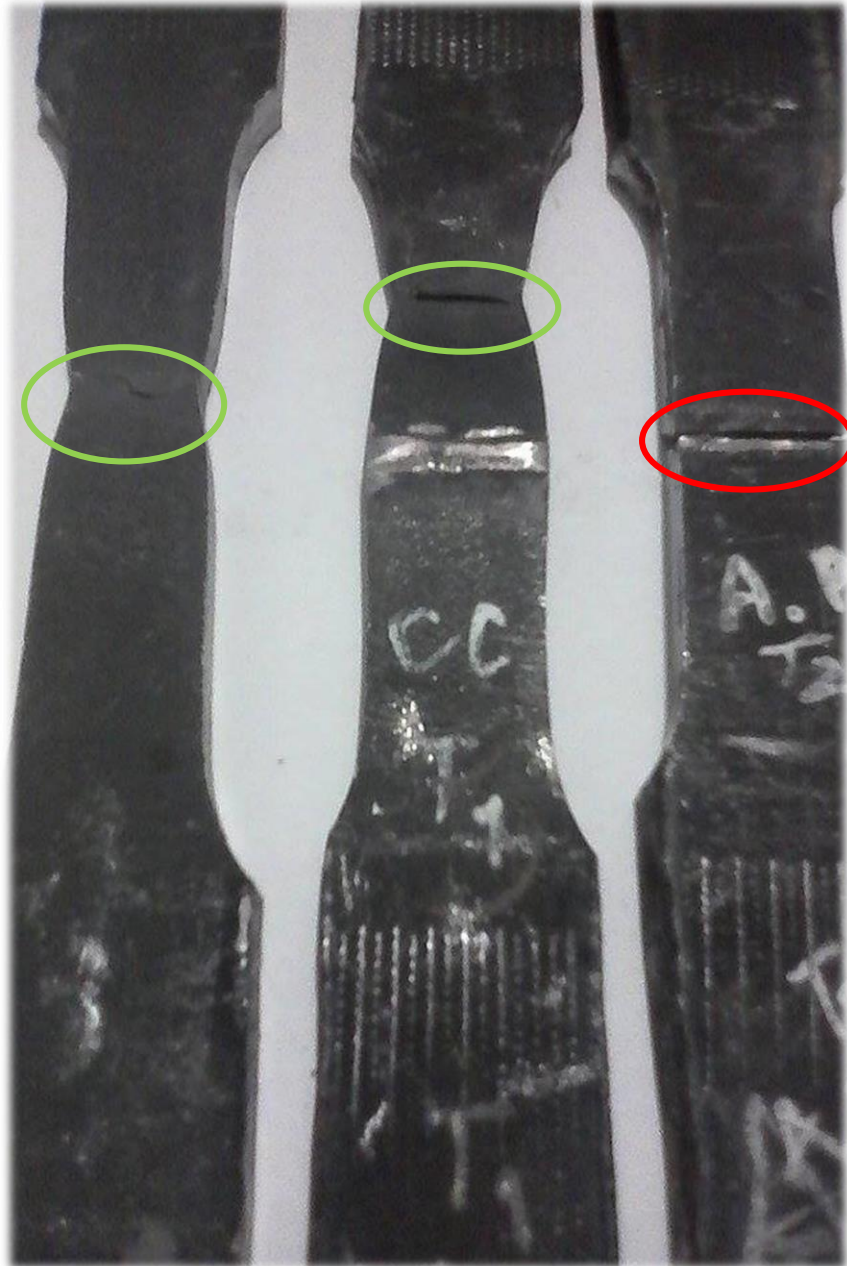
## ANEXO E

Muestra representativa de las probetas utilizadas para el ensayo de impacto Charpy; metal base, cortocircuito convencional y cortocircuito con arco pulsado respectivamente.



## ANEXO F

Zonas de fractura de las probetas ensayadas a tracción; metal base, cortocircuito y cortocircuito con arco pulsado respectivamente.



## ANEXO G

Equipo de soldadura semiautomático SMAW-GMAW de LINCOLN ELECTRIC con herramienta de alimentación de alambre y entrada digital, utilizado durante el proyecto.



## ANEXO H

Realización de la soldadura puesta en marcha en las instalaciones de CIMI-SENA.

