

**ESTUDIO DE LA SOLDABILIDAD DEL ACERO INOXIDABLE 304 CON LA
APLICACIÓN DE LOS PROCESOS SMAW, GTAW Y GMAW**

LAURA YANNETH CAÑAS MENDOZA

**BUCARAMANGA
UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA**

2010

**ESTUDIO DE LA SOLDABILIDAD DEL ACERO INOXIDABLE 304 CON LA
APLICACIÓN DE LOS PROVESOS SMAW, GTAW Y GMAW**

LAURA YANNETH CAÑAS MENDOZA

**Tesis de grado presentada como requisito
para optar el título de Ingeniera Metalúrgica.**

Director: PhD. ORLANDO JOSÉ GÓMEZ MORENO

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICO QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA
BUCARAMANGA**

2010

DEDICATORIA

A Dios por ser El amigo fiel que nunca falla quien me ha colmado de dones, virtudes y capacidades y me ha dado la bendición de poder alcanzar mis metas.

A mis papás Adolfo y Clara por sus enseñanzas y entrega total y por infundir en mí el AMOR, la responsabilidad, perseverancia y cultura cada día, desde el instante en que me trajeron a este mundo.

A mis hermanos mayores Adriana, por mostrarme el lado alegre de la vida; a Ricardo por enseñarme a entregar el corazón a TODO y a Sergio por ser mi hermano de aventuras.

A Diego, el ser más noble y soñador que conozco; a Magda, mi hermana confidente guardián de mis secretos; a Mónica que a diario me muestra el rostro de la nobleza y alegría y a Mayita, lección constante de sinceridad y amor.

A mi amado esposo Cesar Augusto, quien ha llegado a iluminar mis días y noches con sincero amor y quien ha sido mi apoyo incondicional en el desarrollo de este maravilloso proyecto de vida.

Porque todos ustedes son responsables de esta dicha que invade en este día mi corazón, les dedico este, mi grado.

AGRADECIMIENTOS

- A DIOS, por ser mi guía y mi esperanza continua, quien iluminó cada uno de mis pensamientos en el transcurso de mi proyecto.

- A GABRIEL ORLANDO PORRAS Ingeniero metalúrgico, gerente de INGESOL LATINOAMÉRICA, quién patrocinó el material de trabajo y brindó continua colaboración a lo largo del mismo, colocando a disposición su equipo de calificados soldadores y su conocimiento en el campo de las soldadura.

- A ORLANDO JOSÉ GÓMEZ MORENO, Ingeniero metalúrgico, director del proyecto y docente, por su orientación y por los valiosos conocimientos transmitidos en el transcurso de mi carrera.

- A LA UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

- A Mi esposo Cesar, mis padres, hermanos, sobrinos y amigos, quienes de una u otra manera colaboraron y contribuyeron en la realización del presente trabajo.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	15
OBJETIVOS	19
OBJETIVO GENERAL	19
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
1. RESUMEN TEÓRICO	20
1.1 EL ACERO INOXIDABLE 304	20
1.2 EL ACERO INOXIDABLE 304 y LOS ACEROS AL CARBONO	21
1.3 EFECTO DE LA SOLDADURA EN LA RESISTENCIA A LA CORROSIÓN ...	22
1.4 PROCESOS APLICADOS PARA EL ESTUDIO DE LA SOLDABILIDAD DEL ACERO INOXIDABLE 304	24
1.4.1 Shield Metal Arc Welding “SMAW”	25
1.4.2 Gas Metal Arc Welding “GMAW”	27
1.4.3 Gas Tungsten Arc Welding “GTAW”	28
1.5 ASPECTOS IMPORTANTES DE LA SOLDABILIDAD.....	29
1.6 SELECCIÓN DE ELECTRODOS	30
2. MATERIALES Y EQUIPOS UTILIZADOS	32
2.1 METAL BASE.....	32
2.2 METALES DE APORTE	32
2.2.1 ELECTRODO SELECCIONADO PARA EL PROCESO SMAW AWS E308L- 16.	32
2.2.2 ELECTRODO SELECCIONADO PARA EL PROCESO GTAW Y EL PROCESO GMAW (MIG) AWS: ER308, ER308L.....	33

2.3 EQUIPOS UTILIZADOS	34
3. METODOLOGÍA.....	39
3.1 SELECCIÓN DE ELECTRODOS	39
3.2 PROCEDIMIENTO DE SOLDEO	39
3.3 CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE PROBETAS	39
3.4 CARACTERIZACIÓN METALOGRÁFICA DE MUESTRAS Y TOMA DE DUREZA.....	40
3.5 APLICACIÓN DE ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS	40
4. DESARROLLO EXPERIMENTAL	44
4.1 TÉCNICA DE SOLDADURA.	44
4.2 ESPECIFICACIÓN Y CALIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO (WPS Y PQR).	45
4.2.1 Calificación de Procedimientos	45
4.2.2 Análisis Metalográfico y Ensayo de Microdureza.	50
4.2.3 Inspección Radiográfica.	52
5. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	53
5.1 RESULTADOS	53
5.1.1. Resultados del Proceso de Soldadura SMAW	53
5.1.1.1 Resultados radiografía industrial del proceso SMAW (WPS 1-01).....	53
5.1.1.2. Resultados de calificación de procedimiento del proceso SMAW	55
5.1.1.3. Resultados de análisis metalográfico del proceso SMAW (WPS 1-01)....	62
5.1.1.4 Resultados de microdureza proceso SMAW (WPS 1-01)	66
5.1.2. Resultados del proceso de soldadura GMAW.....	67

5.1.2.1 Resultados radiografía industrial del proceso GMAW (WPS 3-01)	67
5.1.2.2 Resultados de calificación de procedimiento del proceso GMAW.....	69
5.1.2.3 Resultados de análisis metalográfico proceso GMAW (WPS 3-01)	76
5.1.2.4 Resultados de microdureza proceso GMAW (WPS 3-01).....	79
5.1.3 Resultados del proceso de soldadura GTAW (tig)	80
5.1.3.1 Resultados radiografía industrial del proceso GTAW (WPS 2-01)	80
5.1.3.2 Resultados de calificación de procedimiento del proceso GTAW	82
5.1.3.3 Resultados de análisis metalográfico del proceso GTAW (WPS 2-01)	89
5.1.3.4 Resultados de microdureza proceso GTAW (WPS 2-01).....	91
5.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS	93
5.2.1 Proceso SMAW (WPS 1-01)	93
5.2.1.1 Soldabilidad Operativa	93
5.2.1.1.1 Examen Visual.	93
5.2.1.1.2 Examen Radiográfico	93
5.2.1.1.3 Calificación De Procedimiento.....	93
5.2.1.2 Soldabilidad Metalúrgica:	94
5.2.1.2.1 Macroataque	94
5.2.1.2.2 Metalografía	94
5.2.1.2.3 Dureza.....	94
5.2.2 Proceso GMAW (WPS 3-01)	94
5.2.2.1 Soldabilidad Operativa	95
5.2.2.1.1 Examen Visual	95
5.2.2.1.2 Examen Radiográfico	95
5.2.2.1.3 Calificación De Procedimiento.....	95
5.2.2.2 Soldabilidad Metalúrgica	96

5.2.2.2.1 Macroataque:	96
5.2.2.2.2 Metalografía.	96
5.2.2.2.3 Dureza.....	96
5.2.3 Proceso GTAW (WPS 2-01).....	96
5.2.3.1 Soldabilidad Operativa	96
5.2.3.1.1 Examen Visual.	96
5.2.3.1.2 Examen Radiográfico.	96
5.2.3.1.3 Calificación De Procedimiento.....	97
5.2.3.2 Soldabilidad Metalúrgica	97
5.2.3.2.1 Macroataque	97
5.2.3.2.2 Metalografía	97
5.2.3.2.3 Dureza.....	98
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	99
6.1 CONCLUSIONES.....	99
6.2 RECOMENDACIONES	101
BIBLIOGRAFÍA Y ENLACES	103

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1.Composición química del acero inoxidable 304.	21
Tabla 2.Propiedades mecánicas del metal depositado con el electrodo AWS E308L-16.....	33
Tabla 3.Composición química del metal depositado con el electrodo AWS E308L-16.....	33
Tabla 4.Dimensiones y amperajes recomendados electrodo AWS E308L-16	33
Tabla 5.Propiedades mecánicas del metal depositado para el electrodo AWS E308L-16.....	34
Tabla 6.Composición química del alambre y del metal depositado para el electrodo AWS ER308/ER308L.....	34
Tabla 7.Dimensiones y amperajes recomendados para el electrodo AWS ER308/ER308L.	34
Tabla 8. Límites de espesores y especímenes de prueba para calificación de procedimiento.....	41
Tabla 9. Procedimiento de soldadura WPS 1-01.....	55
Tabla 10. Calificación de procedimiento del proceso SMAW (PQR 1-02).....	57
Tabla 11.Distribución de dureza del procedimiento 1-01	66
Tabla 12. Procedimiento de soldadura WPS 3-01.....	69
Tabla 13. Calificación de procedimiento del proceso GMAW (PQR 3-02)	71
Tabla 14. Distribución de dureza del procedimiento 3-01	79
Tabla 15. Procedimiento de soldadura WPS 2-01.....	82
Tabla 16. Calificación de procedimiento PQR No. 2-02	84
Tabla 17. Distribución de dureza del procedimiento 2-01	92

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Curvas de sensibilización Tiempo-Temperatura; efecto del control del carbono en la precipitación de carburos en el tipo 304.	24
Figura 2. Equipo para soldar con arco eléctrico y electrodo recubierto SMAW.....	26
Figura 3. Equipo para soldar con los procesos GMAW y GTAW	28
Figura 4. Diagrama de Schaeffler para selección de electrodo con delimitación de las zonas correspondientes a cada probable defecto	31
Figura 5. Fotografía equipo para ensayo de tracción	35
Figura 6. Fotografía equipo para pruebas de doblez de uniones soldadas.....	35
Figura 7. microdurómetro ZWICK ROELL ZHV 2.....	36
Figura 8. Fotografía equipo para ensayos radiográficos	37
Figura 9. Rango de Voltaje e intensidad de corriente para el equipo BALETAU NDT GFD165	37
Figura 10. Tiempo de exposición para la prueba radiográfica según condiciones de trabajo a una intensidad de corriente de 5mA.....	38
Figura 11. Orden de remoción de muestras para la calificación de procedimiento en placas de espesor menor a 0.75 pulgadas.....	42
Figura 12. Foto de proceso de preparación de un cupón de prueba para soldar ...	44
Figura 13. Foto de un cupón de prueba listo para soldar	45
Figura 14. Foto de cupón soldado por TIG.....	46
Figura 15. Foto de cupón soldado por MIG.....	46
Figura 16. Foto de un cupón soldado por SMAW.....	47
Figura 17. Tensión sección reducida – placa	48
Figura 18. Foto probeta para ensayo de tracción soldada por MIG	48
Figura 19. Foto probeta para ensayo de tracción soldada por SMAW	49
Figura 20. Foto probeta para ensayo de tracción soldada por TIG	49

Figura 21. Doblez de cara y de raíz – placa	50
Figura 22. Puntos de referencia para tomas de dureza en la unión soldada	51
Figura 23. Radiografía digitalizada del cordón de soldadura realizado por el proceso SMAW	54
Figura 24. Fuerza axial Vs. Desplazamiento axial probeta T1 SMAW	59
Figura 25. Fuerza axial Vs. Desplazamiento axial probeta T2 SMAW	59
Figura 26. Probetas soldadas según WPS 1-01 (SMAW) sometidas al ensayo de doblez.....	60
Figura 27. Macrografía del procedimiento 1-01.....	62
Figura 28. Metal base. Punto a.	63
Figura 29. Zona afectada térmicamente. Punto b.	64
Figura 30. Metal de soldadura. Punto c.....	64
Figura 31. Metal de soldadura punto d.....	65
Figura 32. Perfil de dureza del proceso 1-01	67
Figura 33. Radiografía digitalizada del cordón de soldadura realizado por el proceso GMAW	68
Figura 34. Fuerza axial Vs. Desplazamiento axial probeta estampe T1 MIG	72
Figura 35. Fuerza axial Vs. Desplazamiento axial probeta estampe T2 MIG	73
Figura 36. Probetas procedimiento 3-02 sometidas a doblez de cara y de raíz	73
Figura 37. Macrografía del procedimiento 3-01	76
Figura 38. Metal base. Punto a.	77
Figura 39. Zona afectada térmicamente. Punto b.	77
Figura 40. Metal de soldadura. Punto c.....	78
Figura 41. Zona afectada térmicamente. Punto d	78
Figura 42. Perfil de dureza del proceso 3-01	80
Figura 43. Radiografía digitalizada del cordón de soldadura realizado por el proceso GTAW.....	81

Figura 44. Fuerza axial Vs. Desplazamiento axial probeta T1 GTAW.....	85
Figura 45. Fuerza axial Vs. Desplazamiento axial probeta T2 GTAW.....	86
Figura 46. Probetas soldadas según WPS 2-01 sometidas a doblez de cara y doblez de raíz.....	87
Figura 47. Macrografía del procedimiento 2-01.....	89
Figura 48. Metal base. Punto a.	90
Figura 49. Zona afectada térmicamente. Punto b.	90
Figura 50. Metal de soldadura. Punto c.....	91
Figura 51. Perfil de dureza de la unión soldada por el proceso 2-01	92

TITULO: ESTUDIO DE LA SOLDABILIDAD DEL ACERO INOXIDABLES 304 CON LA APLICACIÓN DE TRES PROCESOS DE SOLDADURA SMAW, GTAW Y GMAW

AUTOR. Cañas Mendoza, Laura Yanneth**

Palabras Claves: Soldabilidad, WPS, PQR, END, SMAW, GMAW, GTAW, Inoxidable.

El uso de los aceros inoxidable hoy en día es imprescindible en la industria por sus buenas propiedades mecánicas y por su excelente comportamiento al estar en contacto con diferentes sustancias corrosivas; sin embargo, puede presentar una pérdida significativa en sus propiedades mecánicas y químicas al ser sometido a soldadura. Es por esto que se ha decidido hacer un estudio acerca del comportamiento del acero inoxidable 304, utilizado actualmente en la industria petroquímica, en algunas piezas al procesar bioetanol o gasolina ecológica.

La investigación consiste en analizar el comportamiento de este acero al ser sometido a tres procesos de soldadura por arco eléctrico como lo son el proceso SMAW, GTAW Y GMAW. Se ha procedido escogiendo un metal de aporte que reúna las exigencias, teniendo en cuenta las recomendaciones de diferentes proveedores y realizando un diseño de procedimiento de soldadura para cada proceso con su respectiva calificación; se han aplicado ensayos no destructivos como inspección visual y radiografía industrial, pruebas metalográficas y de dureza, para obtener información acerca de las propiedades mecánicas y metalúrgicas del metal que permitan hacer una comparación entre las uniones soldadas y sus condiciones finales.

Para la adecuada elaboración del proyecto y la correcta interpretación de los resultados obtenidos, se ha tenido en cuenta la normatividad correspondiente en cada etapa, establecida por la ASTM y ASME.

Luego de analizar y comparar los resultados obtenidos en la investigación, se concluye entre otras cosas, que el acero inoxidable 304 presenta mejor soldabilidad por el proceso GTAW, seguido del proceso SMAW. En el capítulo 6 además de otras conclusiones, se hacen algunas recomendaciones para obtener los mejores resultados en este tipo de uniones.

* Trabajo de grado, modalidad investigación

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela Ingeniería Metalúrgica

Tutor: Ingeniero Orlando José Gómez Moreno.

TITLE: STUDY OF THE WELDABILITY OF STAINLESS STEEL 304 WITH THE IMPLEMENTATION OF THE PROCESS SMAW, GTAW Y GMAW*

AUTHOR: Cañas Mendoza, Laura Yanneth**

Keywords: Weldability, WPS, PQR, NDT, SMAW, GMAW, GTAW, stainless.

The stainless steels are essential today in the industry for good mechanical properties and their excellent behavior with different corrosive substances. However, the stainless steel can present a significant loss of its mechanical and chemical properties when it is welded; that is why we have decided to study the behavior of 304 stainless steel, used actually in the petrochemical industry in some parts for the processing of bio-ethanol or organic fuel. Research is to analyze the behavior of this steel when it's welded with three different electric arc processes SMAW, GTAW and GMAW.

The filler metal has been chosen complying with the requirements and considering the recommendations from different vendors; then, welding procedure was designed for each process as well as procedures qualification record. The NDT applied were visual inspection and industrial radiography, metallographic tests and hardness to obtain information about the mechanical and metallurgical properties of metal. The previous results allowed a comparison between the welded joints and their final conditions.

Each stage of the project is based on the regulations established by ASTM, AWS and ASME, for a proper development of the project and the correct interpretation of results.

After analyzing and comparing the results of research, one of the conclusions is that 304 stainless steel has better weldability by the GTAW process followed by the SMAW process however, in chapter 6, in addition to other findings and conclusions, makes recommendations for best results on such unions.

* Gradework, research method.

** Physic-chemical Engineering Faculty. Metallurgical Engineering School

INTRODUCCIÓN

En la industria metalúrgica, el uso de los aceros es fundamental, ya que constituye un grupo de aleaciones que posee importantes características, dependiendo de sus elementos de aleación. Entre esta gama de opciones que nos brindan los fabricantes de aceros, se encuentran los aceros inoxidable, conocidos hoy por “todo el mundo” ya que sus aplicaciones abarcan el uso doméstico, la industria alimenticia, arquitectónica y química, entre otras.

A partir de la necesidad que surge de caracterizar un material para así estudiar su desempeño en un caso particular, se ha decidido realizar un análisis del acero inoxidable 304 al ser sometido a soldadura, pues en este caso viene siendo el principal candidato para la fabricación de cilindros de almacenamiento de sustancias a presión.

El acero inoxidable 304, al igual que los otros aceros de su grupo, presenta buena soldabilidad, pero, puede manifestar luego de ser soldado, ataque intergranular en la Zona Afectada Térmicamente y en el peor de los casos la capa empobrecida en cromo se corroe completamente; también es posible que después del proceso de soldadura queden discontinuidades o defectos que no brinden las propiedades mecánicas que sugiere la unión, aumentando la posibilidad de falla en la superficie del tanque.

Por lo anterior, se ha decidido aplicar sobre placas de acero inoxidable 304 tres procesos de soldadura comúnmente utilizados en la industria, para analizar seguidamente las propiedades mecánicas y metalúrgicas de las uniones soldadas, distinguiendo así la unión que presente mayor similitud con el metal base, en cuanto a las propiedades mencionadas.

Para cada proceso de soldadura aplicado se elabora el correspondiente procedimiento de acuerdo a la sección IX del código ASME, para proseguir con la elaboración de cada cordón. También se hace uso del diagrama de Schaeffler para determinar el material de aporte conveniente y obtener metal de soldadura óptimo respecto a las sollicitaciones mecánicas de la junta. Seguidamente se realizan diferentes ensayos establecidos por norma, y el análisis de los resultados obtenidos.

Los resultados de este estudio servirán de herramienta al momento de seleccionar el proceso de soldadura para unir partes de acero inoxidable 304, pues contendrá resultados de la aplicación de tres de ellos, brindando información acerca de la calidad de la unión soldada y por tanto, facilitando la toma de decisión.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Analizar la soldabilidad del acero inoxidable 304 con la aplicación de los procesos SMAW, GTAW Y GMAW para concluir cuál de ellos produce menor alteración en las propiedades mecánicas y metalúrgicas.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ♣ Seleccionar los electrodos de trabajo, a partir de la información del metal base (acero 304) y la información suministrada por diferentes proveedores.
- ♣ Realizar la caracterización mecánica y metalúrgica de las juntas soldadas con tres procesos de soldadura diferentes (SMAW, GTAW Y GMAW).
- ♣ Comparar los tres procesos de soldadura por arco eléctrico aplicados SMAW, GTAW Y GMAW, y las propiedades finales de cada unión al soldar acero inoxidable 304.

1. RESUMEN TEÓRICO

1.1 EL ACERO INOXIDABLE 304

Los aceros que contienen Níquel son indispensables en la construcción de equipos para la industria. Estos aceros se usan en lugar de los aceros convencionales por sus excelentes propiedades tales como: resistencia a la corrosión, dureza a baja temperatura y buenas propiedades a alta temperatura. Los aceros inoxidable son una excelente elección para la construcción en la industria química, láctea, alimenticia, biotecnológica y para usos arquitectónicos relacionados.

Este tipo de aceros son no magnéticos o levemente magnéticos en estado templado y pueden ser endurecidos sólo mediante trabajo en frío. Poseen excelentes propiedades criogénicas (baja temperatura) y buena resistencia a altas temperaturas. La resistencia a la corrosión es excelente en un amplio rango de ambientes corrosivos y son fáciles para fabricar, si se mantienen procedimientos adecuados.

En la tabla 1 se encuentra la composición del acero inoxidable 304 según la ASTM y la composición del acero adquirido en la compañía general de aceros. Los aceros inoxidables están definidos por ASTM como aquellos que tienen al menos 50% de hierro, a los cuales UNS* identifica con una S. También se puede observar la composición del acero inoxidable 304L, el cual posee un porcentaje de carbono más bajo que el 304 convencional [3].

*United numeration system (sistema unificado de numeración)

Tabla 1. Composición química del acero inoxidable 304.

	AISI (UNS)	C	Cr	Ni	Mn	Si	P	S
Composición especificada por ASTM	304 (S30400)	≤0.08	18-20	8-10.5	≤2.0	≤0.75	≤0.045	≤0.03
Composición del acero proveniente de la compañía general de aceros		≤0.08	18-20	8-10.5	≤2.0	--	--	0.03

FUENTE: Compañía General de aceros,

1.2 EL ACERO INOXIDABLE 304 y LOS ACEROS AL CARBONO

El acero inoxidable 304 hace parte del grupo de aceros inoxidables austeníticos. Este tipo de acero tiene menor punto de fusión que los aceros al carbono, por lo tanto requiere menos calor para fundir, lo que traduce una soldadura más rápida para el mismo calor, o menos calor para la misma velocidad de soldadura; conduce el calor más lentamente que los aceros al carbono debido a que su conductividad térmica es menor, presentando gradientes de temperatura más pronunciados, acelerando la deformación del material base y permitiendo que la zona soldada permanezca caliente por más tiempo, lo que puede resultar en una mayor precipitación de carburos, a menos que se usen medios artificiales para extraer el calor, tales como barras enfriadoras.

La resistencia eléctrica del acero 304 supera más del doble a los aceros al carbono tanto a temperatura ambiente como a altas temperaturas y esto es importante en los métodos de soldadura por arco eléctrico. La resistencia eléctrica mayor del tipo 304 resulta en la generación de más calor para la misma corriente, o la misma cantidad de calor con menos corriente, comparado con los aceros al carbono.

En lo referente a la expansión térmica, El tipo 304 se expande y contrae a una velocidad más alta que el acero al carbono, lo cual significa que se debe permitir expansión y contracción a fin de controlar la deformación y el desarrollo de tensiones térmicas después del enfriamiento. Por ejemplo, para el acero inoxidable deben usarse más puntos de soldadura que para el acero al carbono [3].

1.3 EFECTO DE LA SOLDADURA EN LA RESISTENCIA A LA CORROSIÓN

Los aceros inoxidables austeníticos como el 304 se identifican normalmente por su excelente resistencia a la corrosión la cual se puede reducir en ambientes agresivos. En la soldadura, el calor que se genera produce un gradiente de temperatura en el metal de base que puede inducir tensiones residuales en el área soldada aumentando la posibilidad de producir roturas por corrosión bajo tensión.

Uno de los primeros problemas de corrosión relacionados con la soldadura fue el ataque intergranular, en la zona soldada afectada por la temperatura. En el rango de temperaturas que va de 425 a 900 °C, el carbono se combina con el cromo para formar carburos de cromo en el borde de los granos, dejando el área adyacente a los carburos con menor cantidad de cromo. Cuando la red de carburos es continua, la envoltura empobrecida en cromo alrededor de los granos puede ser atacada selectivamente, resultando en corrosión intergranular. En el peor de los casos, la capa empobrecida en cromo se corroe completamente y los granos se separan del metal de base.

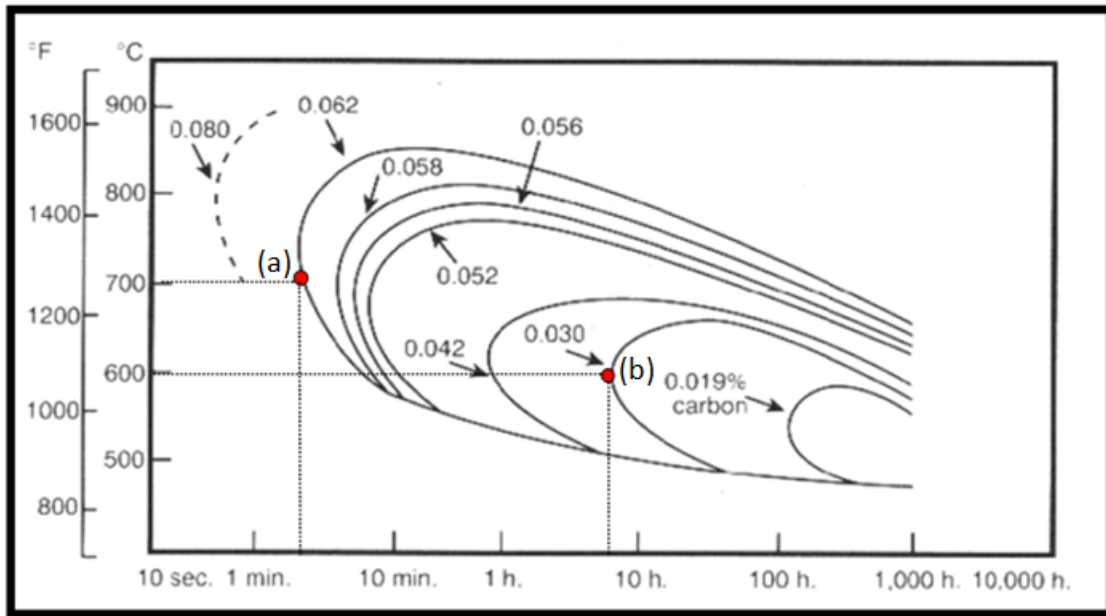
Se dice que las aleaciones están sensibilizadas, cuando por soldadura o tratamientos térmicos, existen áreas empobrecidas en cromo que puedan ser atacadas en estos ambientes corrosivos. Las aleaciones sensibilizadas aún pueden prestar buenos servicios en muchos de los ambientes moderados en que se usan los aceros inoxidables.

El grado de sensibilización, o sea la cantidad de carburos de cromo formado en los límites de grano, está influenciado por la cantidad de carbono y la temperatura y tiempo de exposición. La figura 1 ilustra las curvas de sensibilización tiempo-temperatura para el acero inoxidable tipo 304. Las curvas para otros aceros inoxidables austeníticos son similares, con valores ligeramente diferentes. Para explicar la figura 1, la aleación está sensibilizada cuando el tiempo a una temperatura determinada supera la curva de porcentaje de carbono. Si se observa el punto (a) de la figura 1, se puede ver que la temperatura a la cual la sensibilización ocurre más rápidamente en una aleación de 0.062 % de carbono, es a los 700 °C y que este tiempo es tan pequeño como 2 a 3 minutos; analizando el punto (b), para una aleación con 0.03 %C la sensibilización se da más rápidamente a los 600°C pero el tiempo en este caso podría ser de hasta 8 horas antes de sensibilizarse. Por esta razón los grados bajos en carbono se utilizan más comúnmente en los equipos resistentes a la corrosión, donde la corrosión intergranular es un riesgo.

Se puede prevenir la formación de los carburos de cromo en los límites de grano agregando titanio (Ti) o niobio (Nb)-tantalio (Ta) a la aleación. El niobio también se lo conoce como Columbio (Cb). Estos elementos tienen una afinidad más grande por el carbono que el cromo, y forman carburos distribuidos uniformemente, lejos de los límites de grano, con lo cual no se afecta la resistencia a la corrosión.

Los grados estabilizados se prefieren para aplicaciones donde la aleación estará un largo tiempo en el rango de temperaturas de sensibilización (425 a 900 °C). Otra manera de prevenir el ataque intergranular en la zona afectada por el calor en aleaciones conteniendo más de 0.03% de carbono, es redissolver los carburos de cromo por “templado por disolución”, entre 1040 y 1175 °C, seguido por un enfriamiento rápido. El templado por disolución es un buen método para restaurar completamente la resistencia a la corrosión cuando el tamaño, forma y geometría de las soldaduras permiten el tratamiento térmico. El templado por disolución debe ser muy bien controlado, tanto en el calentamiento como en el enfriamiento, para mantener la distorsión dentro de límites aceptables [3].

Figura 1. Curvas de sensibilización Tiempo-Temperatura; efecto del control del carbono en la precipitación de carburos en el tipo 304.



FUENTE: www.inoxidable.com

1.4 PROCESOS APLICADOS PARA EL ESTUDIO DE LA SOLDABILIDAD DEL ACERO INOXIDABLE 304

Los tres procesos que se llevaron a cabo para el estudio son:

- ♣ Shield Metal Arc Welding (SMAW)
- ♣ Gas Metal Arc Welding (GMAW-MIG)
- ♣ Gas Tungsten Arc Welding (GTAW-TIG)

1.4.1 Shield Metal Arc Welding “SMAW”

Este proceso de soldadura utiliza el calor de un arco eléctrico entre la pieza a soldar y un electrodo de metal recubierto. El extremo del electrodo, el baño de metal fundido, el arco y el área adyacente de la pieza a soldar, son protegidos de la contaminación atmosférica por una cubierta gaseosa obtenida de la fusión y descomposición del recubrimiento del fundente. El metal fundido es protegido por una capa de fundente líquido, escoria, obtenido del recubrimiento del electrodo.

El metal de aporte es obtenido de la fusión del núcleo metálico del electrodo y del recubrimiento, polvo de hierro y aleaciones.

Entre las funciones del recubrimiento del electrodo, podemos destacar:

- ♣ Estabilización del arco por elementos ionizantes, lo cual determina el uso del electrodo por corriente alterna, corriente directa electrodo positivo o corriente directa electrodo negativo.
- ♣ Recubrimiento gaseoso por la descomposición de elementos como la celulosa o caliza
- ♣ Aumento de la resistencia del metal adicionando elementos de aleación.

El equipo básico comprende una fuente de potencia, cables del circuito de soldadura, porta electrodos, tenaza del cable (ver figura 2).

La soldadura por arco con electrodo revestido es el proceso más ampliamente utilizado, el equipo es el menos complejo, más portátil y menos costoso que el requerido por otros procesos de soldadura [4].

Figura 2. Equipo para soldar con arco eléctrico y electrodo recubierto SMAW



FUENTE: Catálogo de productos Lincoln

EQUIPO PARA SOLDAR. La fuente de poder Invertec 275-S está diseñada con las especificaciones IP23S. Esta fuente de poder para electrodo revestido y TIG está diseñada para operar a la intemperie. Sus 275 amperios de salida CC le permite operar fácilmente con una amplia variedad de electrodos revestidos [10].

ELECTRODOS. En el mercado hay electrodos de diferentes tamaños y composiciones del núcleo metálico y hay una gran variedad de tipos y pesos de recubrimiento. Generalmente el tamaño y tipo de electrodo depende de varios factores, entre ellos:

- ◆ Disponibilidad de corriente alterna o continua
- ◆ Características del metal base
- ◆ Tipo de junta y preparación de bordes
- ◆ Condiciones de servicio
- ◆ Habilidad del soldador

IMPERFECCIONES Y DISCONTINUIDADES. El proceso está sujeto a todas las imperfecciones y discontinuidades que se presentan en soldadura. La porosidad es causada probablemente por una técnica defectuosa, metal de base

contaminado o humedad en el electrodo. Las concentraciones de porosidad a menudo ocurren a la iniciación y terminación del arco.

Las inclusiones son atrapadas debido a una manipulación defectuosa del electrodo. La fusión incompleta sugiere una corriente de soldadura inadecuada, o difícil acceso a la junta especialmente en la soldadura de múltiples pasadas, puede ser consecuencia de una preparación de junta inadecuada.

Por otras razones, pueden presentarse también socavaduras, desgarres laminares y/o grietas en caliente o en frío [4].

1.4.2 Gas Metal Arc Welding “GMAW”

También llamado MIG/MAG, es un proceso de unión que se logra por el calor aportado por un arco eléctrico, generado y mantenido entre un alambre sólido, que funciona como electrodo continuo y la pieza de trabajo. El arco y la soldadura son protegidas por un chorro de gas inerte o activo como al Ar, He y CO₂. El proceso puede utilizarse en la mayoría de metales y la gama de alambres de diferentes aleaciones y aplicaciones es casi infinita.

La soldadura GMAW es más productiva que la soldadura por arco manual, donde las pérdidas de productividad ocurren cada vez que el soldador se detiene para reemplazar el electrodo consumido.

Continuos desarrollos al proceso de la soldadura MIG (metal inert gas), lo han convertido en un proceso aplicable a muchos metales como el acero, aluminio, acero inoxidable, cobre y algunos otros. Es simple la selección del equipo, el alambre o electrodo, el gas de protección y las condiciones óptimas para producir soldaduras de alta calidad a muy bajo costo en producciones a gran escala. El proceso incluye cuatro técnicas: Transferencia por corto circuito, transferencia globular, transferencia por rociado y arco pulsado. Estas técnicas describen la

manera en la cual el metal es transferido, desde el alambre hasta la soldadura fundida [4].

Figura 3. Equipo para soldar con los procesos GMAW y GTAW



FUENTE: El autor.

EQUIPO PARA SOLDAR. El Ranger 305 D CE es un potente generador autónomo de soldadura multiproceso para corriente continua DC de hasta 300A. Proporciona unas excelentes características de arco en todos los modos de soldadura: electrodo (convencional o tubería), TIG, MIG o chaflanado. El Ranger es robusto y seguro, con una carcasa estanca insonorizada que proporciona la máxima protección al excepcional motor Kubota diesel 18.8 HP D722 refrigerado por agua, y al depósito de carburante de 45 litros de capacidad. Suministra una potencia continua de 8000 Vatios (8500 de potencia de pico) en las salidas auxiliares AC de 120V-240V-415V, lo cual permite tener conectadas diferentes herramientas mecánicas, lámparas y otros accesorios a la vez que se suelda, sin perder potencia de soldadura [10].

1.4.3 Gas Tungsten Arc Welding “GTAW”

Este proceso de soldadura también conocido como TIG, utiliza un arco eléctrico entre un electrodo de tungsteno y la pieza a soldar. Este es a menudo un proceso manual el cual puede ser mecanizado o totalmente automatizado y la protección se obtiene con un gas o mezcla de gases inertes. Cuando se agrega el metal de aporte, el proceso requiere una técnica a dos manos, lo cual exige habilidad del soldador para conseguir soldaduras sanas.

ELECTRODOS. Los electrodos no consumibles utilizados para el proceso GTAW son de tungsteno comercialmente puro, 99.5% W, o tungsteno aleado con Thorio o Zirconio. Los electrodos de Tungsteno pueden ser afilados total o parcialmente o tener una punta redondeada.

DEFECTOS. Se pueden presentar inclusiones de Tungsteno si accidentalmente el electrodo toca el baño fundido; dicha inclusiones aparecen en radiografía como puntos claros.

La porosidad ocasional puede presentarse por impurezas en la superficie o dentro del metal de base si no hay desoxidantes o fundentes introducidos en el baño metálico.

La fusión incompleta puede darse si se utiliza una técnica inadecuada y si se presentan grietas, generalmente son grietas en caliente. La falta de fusión es posible y puede ocurrir agrietamiento longitudinal a altas velocidades de avance [4].

1.5 ASPECTOS IMPORTANTES DE LA SOLDABILIDAD

En soldadura debemos asegurarnos que el proceso no produzca modificaciones importantes en las características mecánicas de los materiales utilizados, ni de lugar a estados peligrosos de tensiones en las uniones.

Hay que tener en cuenta tres aspectos importantes de la soldabilidad.

Soldabilidad operativa relativa a la operación de soldadura, estudia las condiciones de realización de las uniones por fusión, arco o cualquier otro procedimiento.

Soldabilidad estructural, concepto que hace intervenir la rigidez de la unión y depende del espesor del metal a soldar.

Soldabilidad metalúrgica, es la más importante de las tres y la de mayor interés, se refiere a las modificaciones estructurales originadas por cambios de composición durante el proceso de soldadura y trae como consecuencia, variaciones en las propiedades mecánicas.

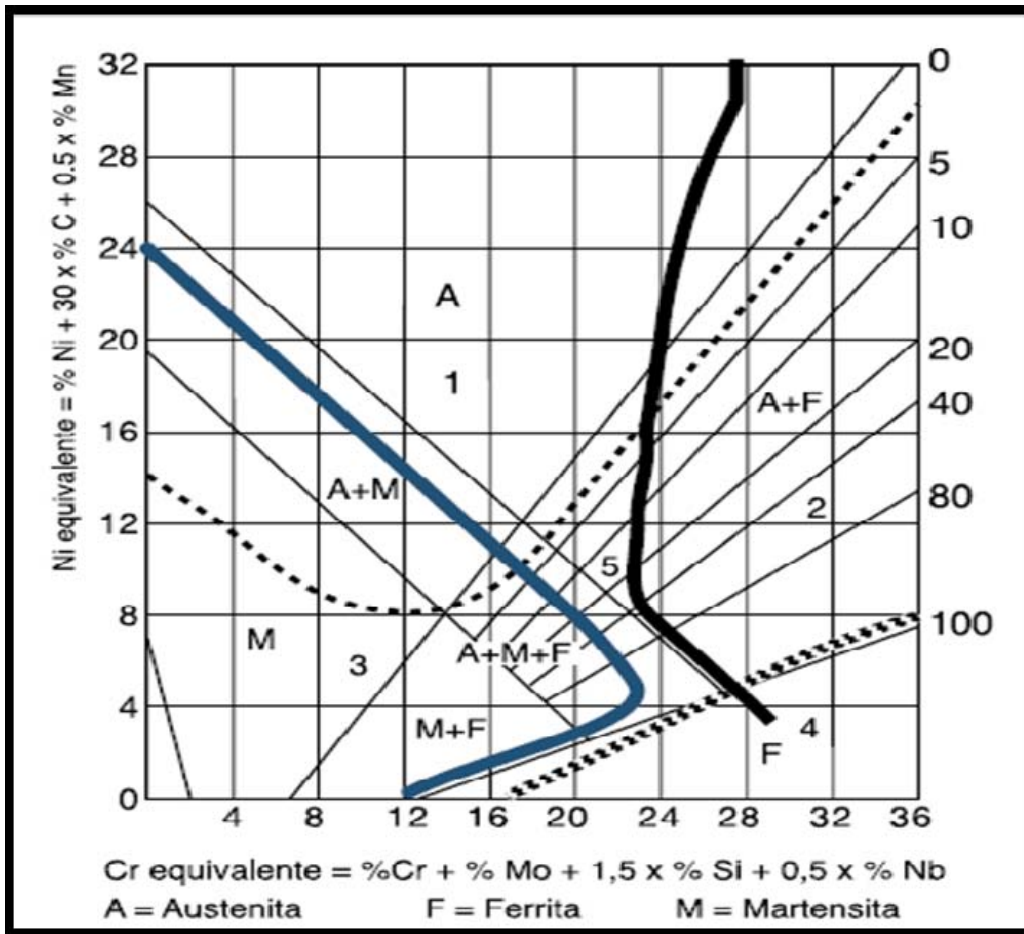
1.6 SELECCIÓN DE ELECTRODOS

Para la selección del electrodo para aceros inoxidable se utiliza el diagrama de Schaeffler, que se presenta en la figura 4.

Este se utiliza para predecir la estructura residual del metal obtenido por soldadura en la unión de aceros inoxidable iguales, disímiles o de aceros inoxidable con aceros al carbono o sin aleación. Para su empleo se utiliza el Cromo y Ni equivalente del material base y de aporte.

Al realizar la escogencia del metal de aporte, se deben tener en cuenta algunos aspectos importantes, entre ellos el hecho de que la resistencia a la tracción, el límite de fluencia, el alargamiento y la resiliencia (si se exige), del material de aporte debe ser del 1 al 10% mayor que la del metal base [4].

Figura 4. Diagrama de Schaeffler para selección de electrodo con delimitación de las zonas correspondientes a cada probable defecto



- 1 - - - - FISURACIÓN EN CALIENTE POR ENCIMA DE 1250 °C
- 2 ——— FRAGILIDAD POR FASE SIGMA ENTRE 500 Y 900 °C
- 3 ——— FISURACIÓN POR TEMPLE POR DEBAJO DE 400 °C
- 4 ——— CRECIMIENTO DE GRANO POR ENCIMA DE 1150 °C
- 5 ——— METAL DE SOLDADURA ÓPTIMO RESPECTO A SOLICITACIONES MECÁNICAS

FUENTE: INDURA tecnología a su servicio. Manual de sistemas y materiales de soldadura.

2. MATERIALES Y EQUIPOS UTILIZADOS

2.1 METAL BASE

Las láminas de acero 304 se han adquirido de la compañía general de aceros; han sido sometidas a un laminado en caliente y el acabado superficial se llama acabado 1 que tiene las siguientes características: Laminado en caliente y recocido. Una vez eliminada la cascarilla de laminación, esta superficie se clasifica como acabado 1. Esta superficie, propia de las chapas y planchas más gruesas, tiene poca reflectividad. Se utiliza, sobre todo, en motivos no decorativos, donde la apariencia óptica es menos relevante, por ejemplo, en sistemas de soporte en lugares no visibles y en aplicaciones estructurales*.

2.2 METALES DE APORTE

La selección de electrodos para este estudio se realizó según la información del metal base, con las recomendaciones de proveedores y teniendo como guía lo consignado en Metals Handbook, "Welding, Brazing and Soldering".

Los electrodos seleccionados se encuentran caracterizados a continuación:

2.2.1 ELECTRODO SELECCIONADO PARA EL PROCESO SMAW AWS E308L-16.

Es un electrodo marca West-Arco, de revestimiento rutilico con bajo contenido de carbono que disminuye el riesgo de precipitación de carburos y da mayor ductilidad a la unión.

*Información suministrada por el fabricante Compañía General de aceros S.A.

Para su aplicación se puede utilizar corriente alterna o corriente continua polaridad invertida. En las tablas 2 a la 4 se muestran las propiedades, composición química y condiciones eléctricas para este electrodo.

Tabla 2. Propiedades mecánicas del metal depositado con el electrodo AWS E308L-16

Resistencia a la tracción*	75-90Ksi (520-630MPa)
Elongación*	40-60%

*Ensayos realizados según la AWS 5.4

FUENTE: Soldaduras WEST-ARCO

Tabla 3. Composición química del metal depositado con el electrodo AWS E308L-16

Carbono 0.04%máx.	Manganeso 0.5-2.5%
Silicio 0.9%máx.	Cromo 18-21%
Níquel 9-11.0%	

FUENTE: Soldaduras WEST-ARCO S.A.

Tabla 4. Dimensiones y amperajes recomendados electrodo AWS E308L-16

Diámetro mm,[plg]	Corriente [A]
2,4 (3/32)	40 – 70
3,2 (1/8)	70 -100
4,0 (5/32)	100 135
4,8 (3/16)	130 – 180

FUENTE: Soldaduras WEST-ARCO S.A.

2.2.2 ELECTRODO SELECCIONADO PARA EL PROCESO GTAW Y EL PROCESO GMAW (MIG) AWS: ER308, ER308L.

Conforme con AWS A5.9-93 y ASME SFA-5.9, químicamente balanceado y manufacturado para ser usado con el apropiado acero inoxidable a ser soldado, Este aporte de aceros inoxidable es manufacturado bajo un número de lote de

control. En las tablas 5 a la 7, se muestran las propiedades, composición química y condiciones eléctricas para este electrodo.

Tabla 5. Propiedades mecánicas del metal depositado para el electrodo AWS ER308/ER308L.

Resistencia a la tracción	82Ksi (565Mpa)
Elongación	42%

FUENTE: Soldaduras Lincoln

Tabla 6. Composición química del alambre y del metal depositado para el electrodo AWS ER308/ER308L

% Carbono 0.03 máx. ⁽¹⁾	%Manganeso 1.0-2.5
% Silicio 0.3-0.65	%Cromo 19.5-22.0
% Níquel 9.0-11.0	%Molibdeno 0.75 máx.

(1) Lo requerido por AWS para ER308 es de máximo 0.08%C

FUENTE: Soldaduras Lincoln

Tabla 7. Dimensiones y amperajes recomendados para el electrodo AWS ER308/ER308L.

Díámetro Plg. [mm]	Corriente [A]
0.035 (0.089)	125-300
0.045 (1.14)	155-400
3/32 (2.4)	50-90
1/8 (3.18)	70-110

FUENTE: Soldaduras Lincoln

2.3 EQUIPOS UTILIZADOS

DUREZA. Las pruebas de dureza se realizaron en el microdurómetro ZWICK ROELL ZHV 2 de la empresa TRANSEJES S.A. (ver figura 7).

ENSAYOS MECÁNICOS. Para estas pruebas de tracción y doblé se utilizaron los equipos ubicados en la escuela de ingeniería civil, que van conectados a una unidad de control la cual permite ajustar los parámetros de trabajo. Estos equipos se pueden detallar en las figuras 5 y 6.

Figura 5. Fotografía equipo para ensayo de tracción



FUENTE: El autor

Figura 6. Fotografía equipo para pruebas de doblé de uniones soldadas



FUENTE: El autor

Figura 7. Microdurómetro ZWICK ROELL ZHV dois



FUENTE: Manual de operación microdurómetro ZWICK ROELL ZHV 2.

MICROSCOPIA METALOGRAFICA. Esta prueba se llevó a cabo en el laboratorio de metalografía de la Universidad Industrial de Santander ubicado en la escuela de Ingeniería Metalúrgica, el cual está conformado por lijas de diferentes calibres y paños pulidores así como de microscopios para el estudio visual de las diferentes muestras.

ENSAYOS RADIOGRÁFICOS. El equipo utilizado para esta prueba es el Balteau NDT, serie Baltospot GFD165 ubicado en el laboratorio de ensayos no destructivos de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica de la Universidad Industrial de Santander. Consiste en un generador portátil monobloque que se conecta a una unidad de control la cual ofrece la potencia necesaria y muestra los parámetros de operación del equipo. Ver figura 8.

Inicialmente se definió el voltaje, 140V y luego la intensidad de corriente, que se ajustó a 5mA. Estos valores se tomaron según el manual de operación del equipo y se utilizó la película Kodak D7. En la figura 9 se pueden observar los valores de corriente y voltaje permisibles para el equipo y en la figura 10, el tiempo de

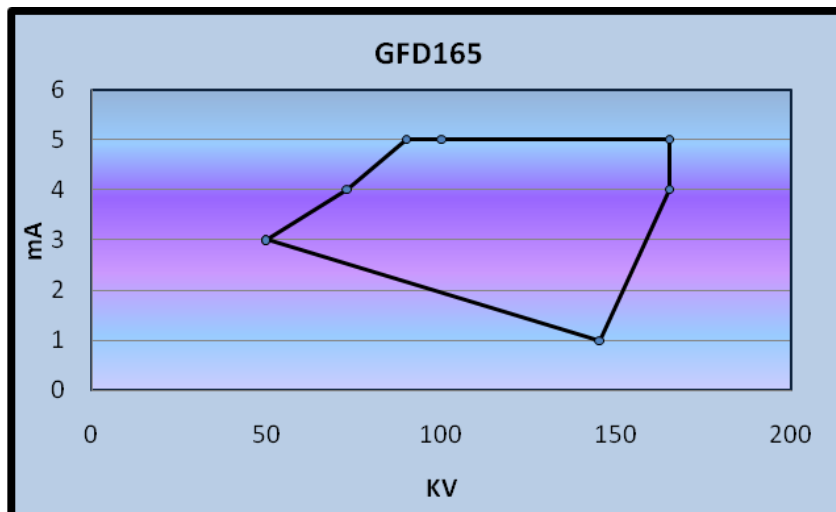
exposición que requiere una pieza según su espesor; según las referencias del manual, la exposición para aceros debe hacerse con película de plomo de 0.1mm y la distancia fuente película debe ser de 700mm.

Figura 8. Fotografía equipo para ensayos radiográficos.



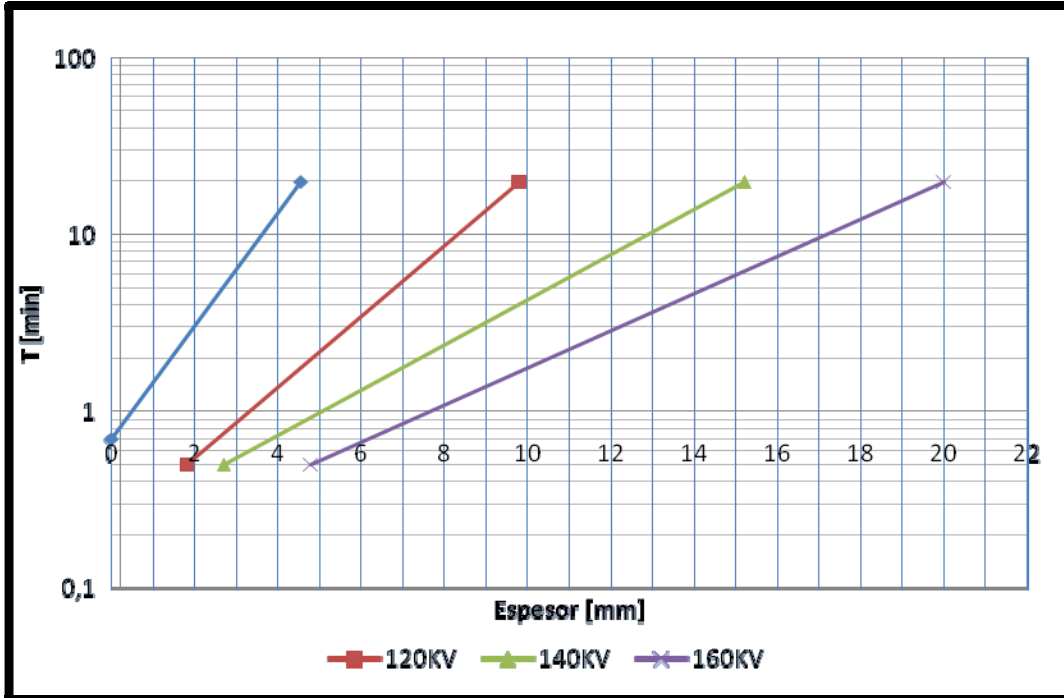
FUENTE: El autor

Figura 9. Rango de Voltaje e intensidad de corriente para el equipo BALETEAU NDT GFD165



FUENTE: Manual de operación equipo BALTEAU NDT serie Baltospot GFD165.

Figura 10. Tiempo de exposición para la prueba radiográfica según condiciones de trabajo a una intensidad de corriente de 5mA



FUENTE: Manual de operación equipo BALTEAU NDT serie Baltospot GFD165.

3. METODOLOGÍA

3.1 SELECCIÓN DE ELECTRODOS

A partir del Níquel equivalente y Cromo equivalente del metal de aporte y del metal base y con la utilización del diagrama de Schaeffler (figura 4), se ha seleccionado el electrodo apropiado para cada proceso, teniendo en cuenta las recomendaciones de los fabricantes; luego de realizar los cálculos y tomar las sugerencias, se ha concluido que el metal de aporte más apropiado es el acero inoxidable 308 ó 308L.

3.2 PROCEDIMIENTO DE SOLDEO

De acuerdo a la ASME sección IX, se han realizado los respectivos WPS para los tres procesos de soldadura. Se trabaja sobre platinas de acero 304 y la aplicación de la soldadura la realiza personal calificado para tal fin, patrocinado por la empresa INGESOL LATINOAMÉRICA.

3.3 CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE PROBETAS

Según lo especificado en ASME sección IX, numeral QW-450 y QW-451.1, para placas de espesor comprendido entre 1/16plg a 3/8plg (incluido 3/8plg), se deben realizar pruebas de tensión, dobléz de cara y dobléz de raíz para calificación de cada procedimiento. (Ver tabla 8).

Para cada proceso se elaboran las respectivas muestras que se someten a tracción, dobléz de cara y de raíz para observar el efecto de la soldadura sobre las

propiedades mecánicas del material. La figura 11 ilustra el orden de remoción de los especímenes a partir de la placa soldada.

3.4 CARACTERIZACIÓN METALGRÁFICA DE MUESTRAS Y TOMA DE DUREZA

Para el desarrollo de esta etapa se realiza la toma de durezas desde el metal base, pasando por la zona afectada térmicamente hasta la de fusión, con el fin de obtener los perfiles de dureza en la unión soldada. Adicionalmente se realiza la preparación y análisis metalográfico de los diferentes cordones depositados [11], [12].

3.5 APLICACIÓN DE ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS

Cada cordón de soldadura se somete a una prueba radiográfica, para identificar las discontinuidades y/o defectos que hayan quedado después de la unión, así como la sanidad de la soldadura.

Tabla 8. Límites de espesores y especímenes de prueba para calificación de procedimiento

PRUEBAS DE TENSION Y PRUEBAS DE DOBLEZ TRANSVERSAL DE SOLDADURA EN RANURA							
Espesor T de Muestra de Prueba Soldadura, pulg.	Orden de Espesor T de Metal Base Calificado, pulg. [Nota (1)]		Espesor t de Metal de Soldadura Depositado Calificado, pulg. [Nota (1)]	Tipo y Número de Pruebas Requeridas Pruebas de Tensión y de Doblez Guiado [Nota (4)]			
	Min.	Máx.	Máx.	Tensión QW-150	Dobleza Lateral QW-160	Dobleza de Cara QW-160	Dobleza de Raíz QW-160
Menos de $\frac{1}{16}$	T	$2T$	$2t$	2	...	2	2
$\frac{1}{16}$ a $\frac{3}{8}$, incl.	$\frac{1}{16}$	$2T$	$2t$	2	Nota (3)	2	2
Arriba de $\frac{3}{8}$, pero menos de $\frac{3}{4}$	$\frac{3}{16}$	$2T$	$2t$	2	Nota (3)	2	2
$\frac{3}{4}$ hasta menos de $1\frac{1}{2}$	$\frac{3}{16}$	$2T$	$2t$ cuando $t < \frac{3}{4}$	2 (5)	4
$\frac{3}{4}$ hasta menos de $1\frac{1}{2}$	$\frac{3}{16}$	$2T$	$2T$ cuando $t \geq \frac{3}{4}$	2 (5)	4
$1\frac{1}{2}$ y más	$\frac{3}{16}$	8 (2)	$2t$ cuando $t < \frac{3}{4}$	2 (5)	4
$1\frac{1}{2}$ y más	$\frac{3}{16}$	8 (2)	8 (2) cuando $t \geq \frac{3}{4}$	2 (5)	4

NOTAS:

(1) Vea QW-403 (.2, .3, .6, .9, .10), QW-404.32, y QW-407.4 para límites adicionales en orden de espesores calificados. Vea también QW-202(.2, .3, .4) para excepciones permisibles.

(2) Para los procesos de soldar de QW-403.7 solamente; de otra manera según Nota (1) ó $2T$, ó $2t$, cualquiera que sea aplicable.

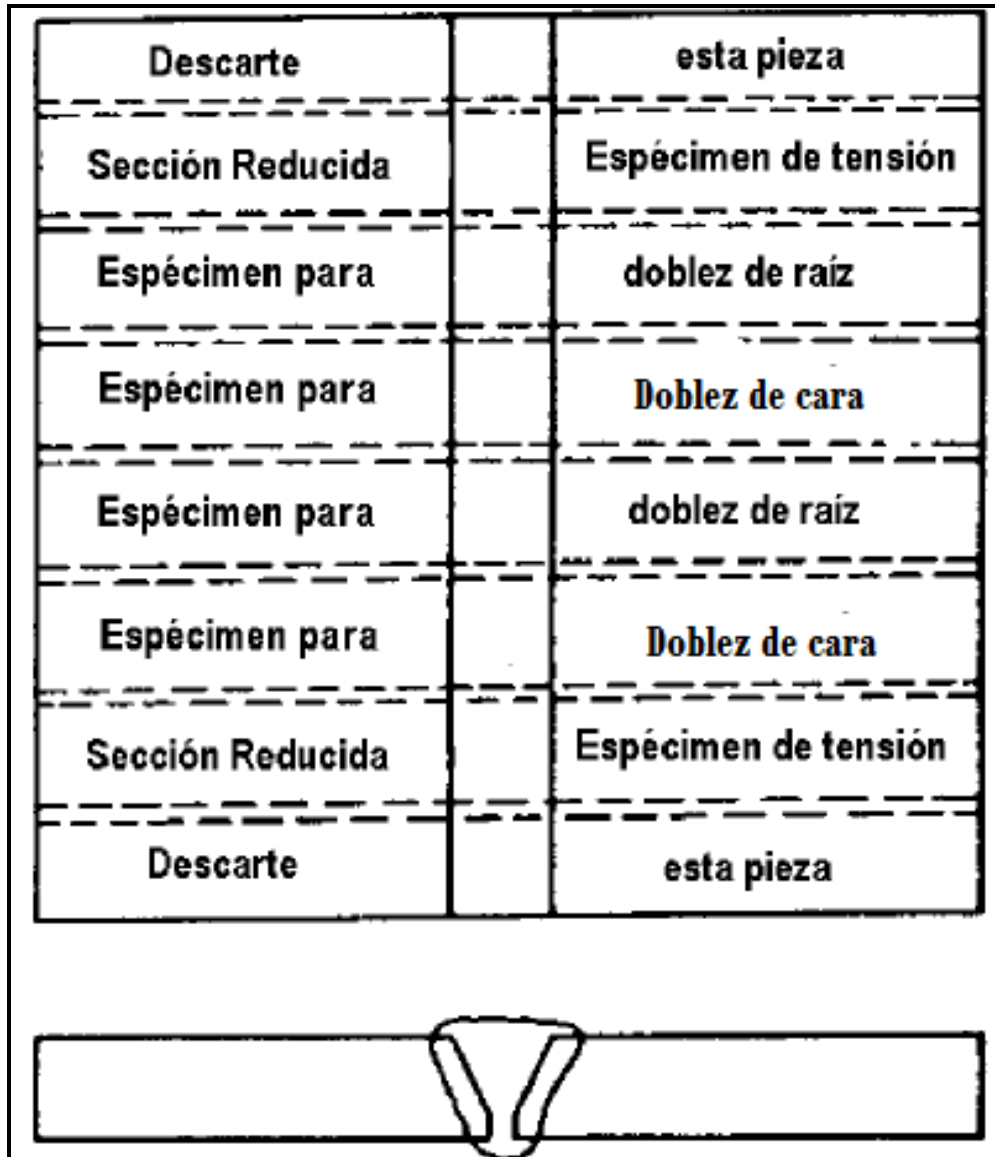
(3) Cuatro pruebas de doblez lateral pueden servir en lugar de las pruebas requeridas de doblez de cara y de doblez de raíz, cuando el espesor T es de $\frac{3}{8}$ pulg. y de más.

(4) Para combinación de procedimientos de soldar, vea QW-200.4.

(5) Vea QW-151 (.1, .2, .3) para detalles sobre especímenes múltiples cuando los espesores de muestras son de arriba de 1 pulg.

FUENTE: Código A.S.M.E. BPVC, "Welding and Brazing Qualifications". Section IX, 2007.

Figura 11. Orden de remoción de muestras para la calificación de procedimiento en placas de espesor menor a 0.75 pulgadas



FUENTE: Código A.S.M.E. BPVC, "Welding and Brazing Qualifications". Section IX, 2007

NORMAS UTILIZADAS EN LOS ENSAYOS

PRUEBA RADIOGRÁFICA. Esta prueba se llevó a cabo teniendo en cuenta las especificaciones de la norma ASTM E94-04 “Standard guide for radiographic examination”; y según las especificaciones del equipo Baltoscop.

ENSAYO DE TRACCIÓN. Esta prueba se realizó de acuerdo a las especificaciones de ASME SECCIÓN IX, “Welding and Brazing Qualifications”. 2007, numeral QW-150 y se llevó a cabo en los laboratorios de la escuela de ingeniería civil de la Universidad Industrial de Santander.

ENSAYO DE DOBLEZ DE CARA Y DE RAÍZ. Esta prueba se realizó de acuerdo a las especificaciones de la sección IX del código ASME, “Welding and Brazing Qualifications”. 2007, numeral QW-160 y se llevó a cabo en los laboratorios de la escuela de ingeniería civil de la Universidad Industrial de Santander.

ANÁLISIS METALOGRÁFICO Y MACROATAQUE. Esta prueba se realizó de acuerdo a lo especificado en Metals Handbook Vol.8 Metallography, structures and phase diagrams 8th edition. Para la preparación de la superficie se tuvieron en cuenta las especificaciones de la norma ASTM E3. “Standard methods for preparation of metallographic specimens”, así como la ASTM E340-00 y ASTM E407.

DUREZA. Las especificaciones de la toma de dureza se tomaron según Metals Handbook Vol.8 Mechanical testing 9th edition y teniendo en cuenta las especificaciones de la ASTM E92-82 (2003) e1 y ASTM E384-10.

4. DESARROLLO EXPERIMENTAL

4.1 TÉCNICA DE SOLDADURA.

BISELES DE LAS JUNTAS. Para las uniones soldadas se elaboraron biseles en V en forma manual, con un ángulo de 30° cada uno. En las figuras 12 y 13 se puede observar el proceso de preparación de un cupón de prueba para soldar y en las tablas 9, 12 y 15 se puede detallar el diseño de junta para los tres procedimientos.

Figura 12. Foto de proceso de preparación de un cupón de prueba para soldar



FUENTE: El autor

Figura 13. Foto de un cupón de prueba listo para soldar



FUENTE: El autor

4.2 ESPECIFICACIÓN Y CALIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO (WPS Y PQR).

El propósito de la especificación del procedimiento a soldar WPS y del registro de calificación del procedimiento (PQR) es determinar que el conjunto de partes soldadas propuesto para construcción sea capaz de proveer las propiedades requeridas para su aplicación destinada. Brevemente, un WPS relaciona las variables tanto esenciales como no esenciales, y los órdenes aceptables de estas variables, al usar la WPS. La WPS se destina a proveer dirección para el soldador/operario de soldadura. El PQR relaciona lo que se usó al calificar la WPS y los resultados de las pruebas.

4.2.1 Calificación de Procedimientos

El corte y preparación de los cupones se realizó de conformidad con lo especificado en la sección 3.3.

En la figura 14 se muestra un cupón soldado por el proceso GTAW; en la superficie de las placas se aprecian algunas manchas que vienen de fábrica pero que no comprometen la calidad de la soldadura.

Figura 14.Foto de cupón soldado por TIG.



FUENTE: El autor

Figura 15.Foto de cupón soldado por MIG.



FUENTE: El autor

Figura 16. Foto de un cupón soldado por SMAW.



FUENTE: El autor.

En la figura 15 se muestra un cupón soldado por el proceso GMAW; Los puntos negros que se observan son producto del chisporroteo durante la soldadura.

En la figura 16 se muestra un cupón soldado por el proceso SMAW; las manchas en la placa se dan por la remoción de la prensa utilizada en el proceso de soldeo.

CARACTERIZACIÓN MECÁNICA. Según el código ASME sección IX numeral QW-450, se requieren dos probetas de tracción, dos probetas de dobléz de cara y dos probetas de dobléz de raíz para realizar la calificación del procedimiento (Ver tabla 8).

ENSAYO DE TRACCIÓN. De cada junta soldada se maquinaron probetas de tensión, con las medidas especificadas en la SECCION IX del código ASME numeral QW-462.1 (ver figura 17), con el fin de determinar la resistencia a la tracción de las uniones soldadas por los tres procesos SMAW, GTAW Y GMAW y evaluar la soldabilidad de acuerdo al numeral QW-153; las probetas maquinadas se muestran en las figuras 18, 19 y 20.

Figura 19. Foto probeta para ensayo de tracción soldada por SMAW



FUENTE: El autor

Figura 20. Foto probeta para ensayo de tracción soldada por TIG



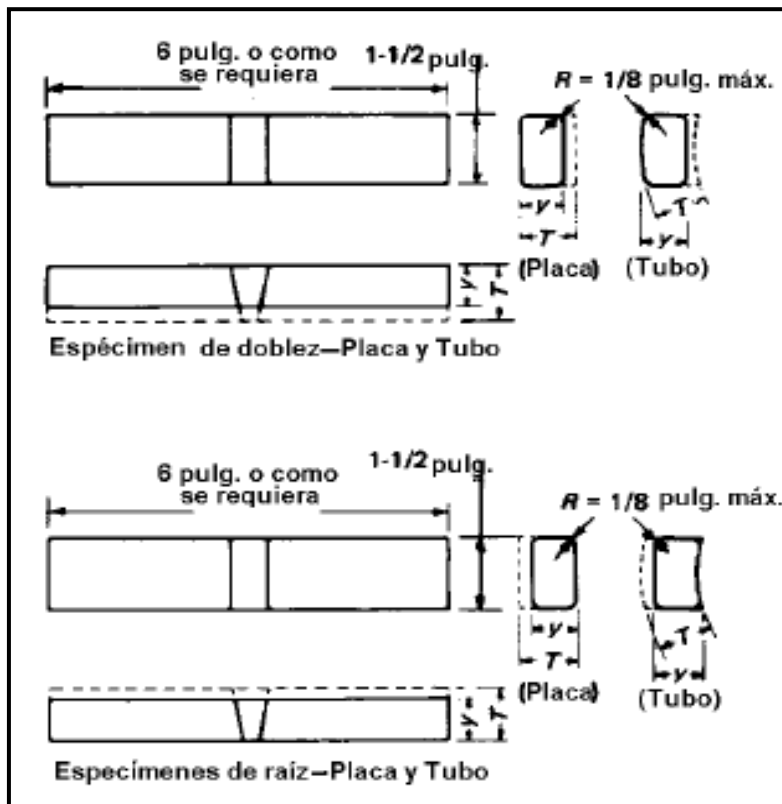
FUENTE: El autor

ENSAYO DE DOBLEZ. De cada junta soldada se maquinaron probetas de doblez, con las medidas especificadas en ASME sección IX, numeral QW-462.3 (ver figura 21), para determinar si hay presente defectos en la soldadura o en la zona afectada térmicamente y en algunos casos, para detectar falta de fusión en las

esquinas, inclusiones de escoria u otros defectos internos y evaluar la soldabilidad de acuerdo al numeral QW-163.

Estas pruebas se realizaron a temperatura ambiente y en la figura 6 se aprecia el equipo utilizado para esta prueba.

Figura 21. Dobleza de cara y de raíz – placa



FUENTE: A.S.M.E. BPVC, "Welding and Brazing Qualifications". Section IX, 2007

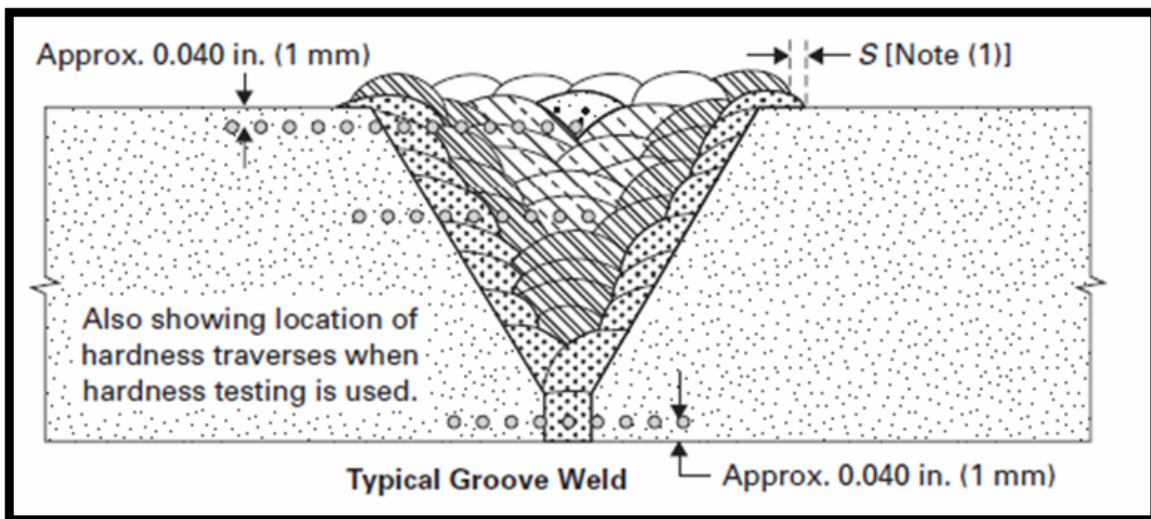
4.2.2 Análisis Metalográfico y Ensayo de Microdureza.

Con el fin de observar los cambios microestructurales que puede causar cada uno de los procesos de soldadura, se realizó el análisis metalográfico en cada caso tomando secciones de cada cordón.

Cada probeta a utilizar para análisis metalográfico fue preparada según lo especificado en la ASTM E3 y se realizó el ataque con ácido oxálico, según lo especificado en Metals Handbook Vol.8 Metallography, structures and phase diagrams 8th edition.

Para la toma de microdureza, la superficie de las muestras se preparó al espejo obteniéndose una superficie plana, limpia, homogénea, limpia y libre de óxidos y lubricantes para obtener los mejores resultados, y se prosiguió a realizar las tomas teniendo en cuenta la información consignada en Metals Handbook Vol.8 Mechanical testing 9th edition. En la figura 22 se observa la manera como se realiza la toma a lo largo de la superficie.

Figura 22. Puntos de referencia para tomas de dureza en la unión soldada



FUENTE: A.S.M.E. BPVC, "Welding and Brazing Qualifications". Section IX, 2007

ENSAYO DE MACRO ATAQUE

Para la realización de este ensayo se pule la probeta metalográficamente; seguidamente se realiza el macroataque electrolítico de la sección en una solución acuosa de ácido crómico al 10% mantenida a una temperatura entre 15°C y 40°C. La probeta es el ánodo y como cátodo sirve una chapa de platino; la distancia

entre electrodos es de 25 a 75mm; la densidad de corriente de alrededor de 1.5A por dm^2 y el tiempo de ataque de 1 a 7 minutos. [7], [12].

4.2.3 Inspección Radiográfica.

Se tomaron radiografías a las probetas de acero inoxidable 304 soldadas mediante los procesos SMAW, GTAW Y GMAW, con la finalidad de detectar posibles defectos internos ocurridos durante la ejecución de la soldadura. Se utilizó la técnica de pared simple y las variables que intervinieron en la toma radiográfica de definieron según el manual del equipo y según la película utilizada, ver sección 2.3. El equipo utilizado se puede detallar en la figura 8.

5. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1 RESULTADOS

En este capítulo se presentarán los resultados obtenidos después de llevar a cabo el desarrollo experimental expuesto, permitiendo analizar la soldabilidad del acero inoxidable 304 por los procesos SMAW, GTAW Y GMAW. Los resultados se expondrán en el siguiente orden para cada proceso:

- ◆ Resultados de radiografía industrial
- ◆ Resultados de calificación de procedimiento PQR según la sección IX del código ASME
- ◆ Resultados de análisis metalográfico
- ◆ Resultados de microdureza

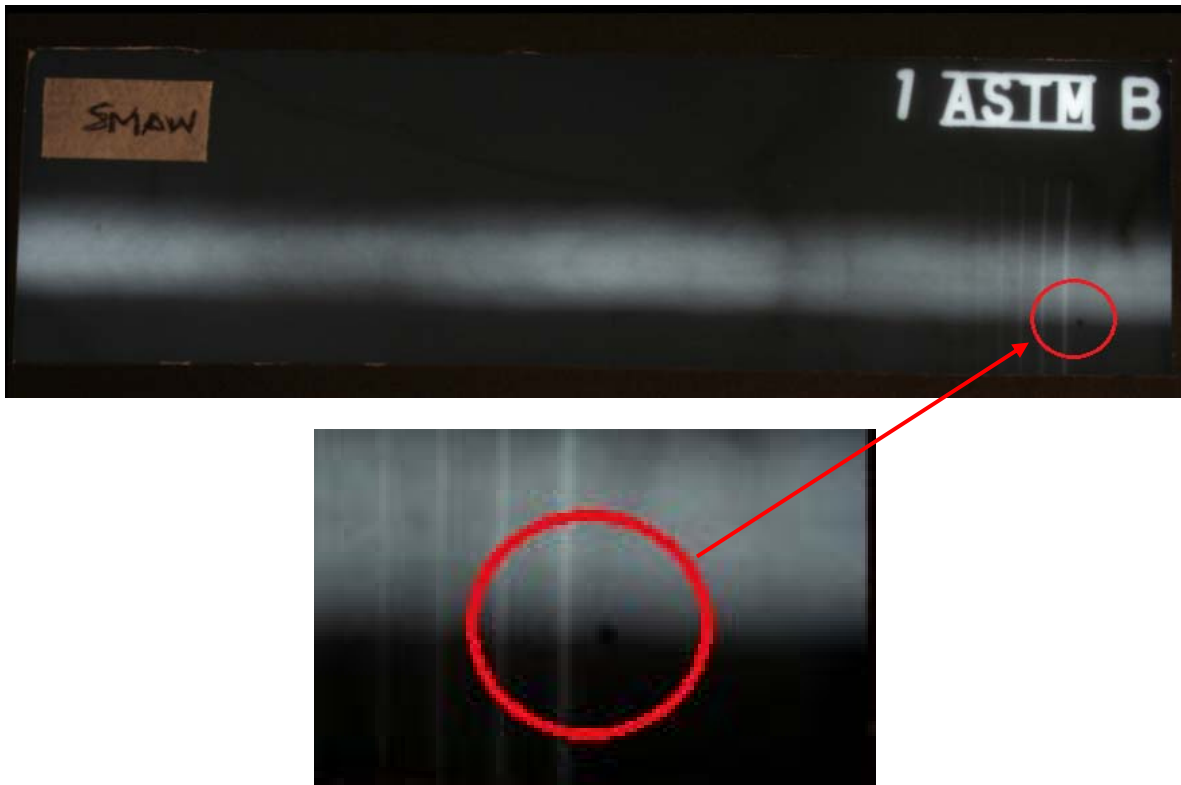
5.1.1. Resultados del Proceso de Soldadura Smaw

5.1.1.1 Resultados radiografía industrial del proceso SMAW (WPS 1-01)

El resultado obtenido se muestra en la figura 23; como se mencionó en la sección 2.3, se utilizó la película Kodak D7, la distancia fuente película fue de 700mm y el tiempo de exposición correspondiente para el espesor de este cordón fue de 2 minutos y 25 segundos; el indicador de imagen utilizado fue el 1ASTM B.

Según la sección IX del ASME numeral QW 191.2 “criterios de aceptación radiográficos”, la discontinuidad redondeada que se presenta al extremo derecho iniciando el cordón de soldadura está dentro de los límites aceptables pues no supera el 20% del espesor t ni $1/8$ ”, que son los valores mencionados.

Figura 23. Radiografía digitalizada del cordón de soldadura realizado por el proceso SMAW



FUENTE: El autor

5.1.1.2. Resultados de calificación de procedimiento del proceso SMAW

En la tabla 9 se muestra el procedimiento diseñado para el proceso SMAW, siguiendo los lineamientos del código ASME sección IX para el acero 304 como metal base y en la tabla 10 se muestra el resultado de calificación de este procedimiento.

Tabla 9. Procedimiento de soldadura (WPS 1-01)


		QW-482 SUGGESTED FORMAT FOR WELDING PROCEDURE SPECIFICATIONS(WPS)(See QW-200.1, Section IX, ASME Boiler and Pressure Vessel Code)	
Company Name <i>INGESOL LATINOAMERICA</i>		By: <i>INGESOL LATINOAMERICA</i>	
Welding Procedure Specification No.		Revision No.	
Supporting PQR No.(s)		Date	
Welding Process(es)		Type(s)	
<i>SMAW</i>		<i>MANUAL</i> (Automatic, Manual, Machine, or Semi-Auto.)	
JOINTS (QW-402)		Details	
Joint Design <u> Groove </u>			
Root Spacing <u> See Fabrication Drawings </u>			
Backing <i>NO</i>		SEE	
Backing Material (Type) <u> N.A. </u> <small>(Referirse a ambos el respaldo y los Retenedores)</small>		FABRICATION DRAWINGS	
<input type="checkbox"/> METAL <input type="checkbox"/> NONMETALLIC <input type="checkbox"/> NONFUSING METAL <input type="checkbox"/> OTHER			
<small>Sketches, Production Drawings, Weld Symbols or Written Description should show the general arrangement of the parts to be welded. Where applicable, the root spacing and the details of weld groove may be specified.</small>			
		Retainers <u> YES </u>	
BASE METALS (QW-403)			
P-No. <i>8</i> Group No. <i>1</i>		to P-No. <i>8</i> Group No. <i>1</i>	
Thickness Range:			
Base Metal: Groove <i>0,0625"</i>		to <i>0,75"</i> Fillet: <i>ALL</i>	
Maximum Pass Thickness ≤ 1/2" <input checked="" type="checkbox"/> YES <input type="checkbox"/> NO			
Other <i>N.A.</i>			
FILLER METAL (QW-404)			
Spec. No. (SFA)		<i>5.4</i>	
AWS No. (Class)		<i>AWS-E308</i>	
F-No.		<i>5</i>	
A-No.		<i>8</i>	
Size of Filler Metals		<i>1/8"; 5/32"</i>	
Filler Metal Product Form		<i>SOLID</i>	
Supplemental Filler Metal		<i>N.A.</i>	
Weld Metal Thickness Groove Range		<i>MAX 0,75"</i>	
Weld Metal Thickness Fillet Range		<i>ALL</i>	

Tabla 9. Procedimiento de soldadura WPS 1-01 (continuación)

QW-482 (Back)									
					<i>WPS No.</i>	<i>1-01</i>	<i>Rev.</i>	<i>0</i>	
POSITIONS (QW-405)					POSTWELD HEAT TREATMENT (QW-407)				
Position(s) of Groove					Temperature Range				
Welding Progression: Up N.A. Down N.A.					Time Range				
Position(s) of Fillet					Other				
PREHEAT (QW-406)					GAS (QW-408)				
Preheat Temp. Min.					Percent Composition				
Interpass Temp. Max.					Gas(es)			(Mixture)	Flow Rate
Preheat Maintenance					Shielding	N.A.	N.A.	N.A.	
(Continuous or special heating, where applicable should be recorded)					Trailing	N.A.	N.A.	N.A.	
Other: None					Backing	N.A.	N.A.	N.A.	
Other None					Other	N.A.	N.A.	N.A.	
ELECTRICAL CHARACTERISTICS (QW-409)									
Weld Layer(s)	Process	Filler Metal		Current		Volt Range	Travel Speed Range	Other (e.g. Remarks, Comments, Hot Wire, Addition, Technique, Torch Angle, Etc.)	
		Class	Dia.	Type and Polarity	Amp. Range				
1	SMAW	E308L-16	5/32"	CC-EP	100-135	---	---	---	
2-N	SMAW	E308L-16	1/8"-5/32"	CC-EP	70-135	---	---	---	
Pulsing Current		N.A.		Heat Input Max.		N.A.			
TECHNIQUE (QW-410)									
Type of Bead				<input checked="" type="checkbox"/> String		<input checked="" type="checkbox"/> Weaved			
Initial Cleaning (Brushing, Grinding, etc)				DISCO					
Interpass Cleaning (Brushing, Grinding, etc)				GRINDING					
Method of Back Gouging				N.A.					
Oscillation				0,375" - 0,46"					
Contact Tube to Work Distance				1/8" - 5/32"					
Number of Passes per side				<input type="checkbox"/> Single		<input checked="" type="checkbox"/> Multiple			
Multiple or Single Electrodes				<input checked="" type="checkbox"/> Single		<input type="checkbox"/> Multiple			
Electrode Spacing				N.A.					

FUENTE: El autor

Tabla 10. Calificación de procedimiento del proceso SMAW (PQR 1-02)


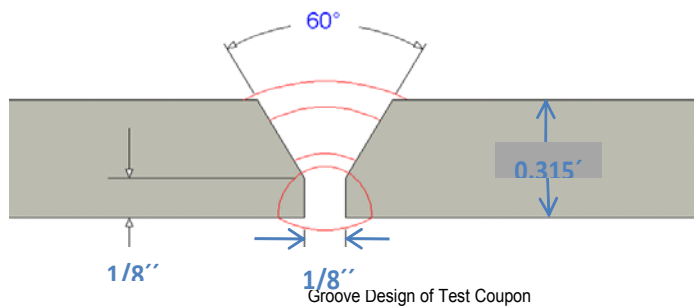
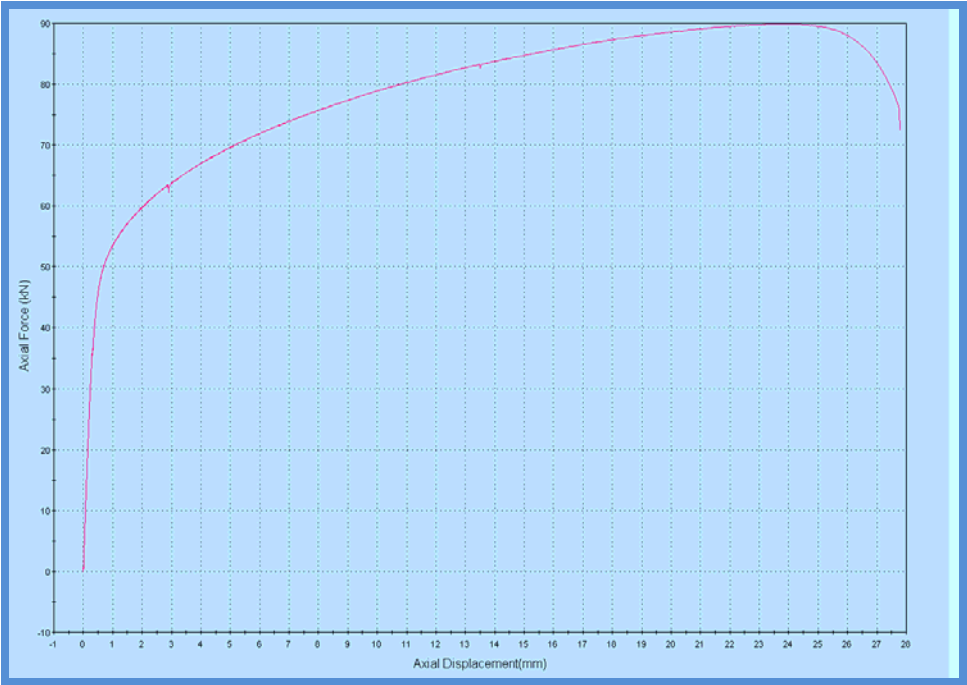
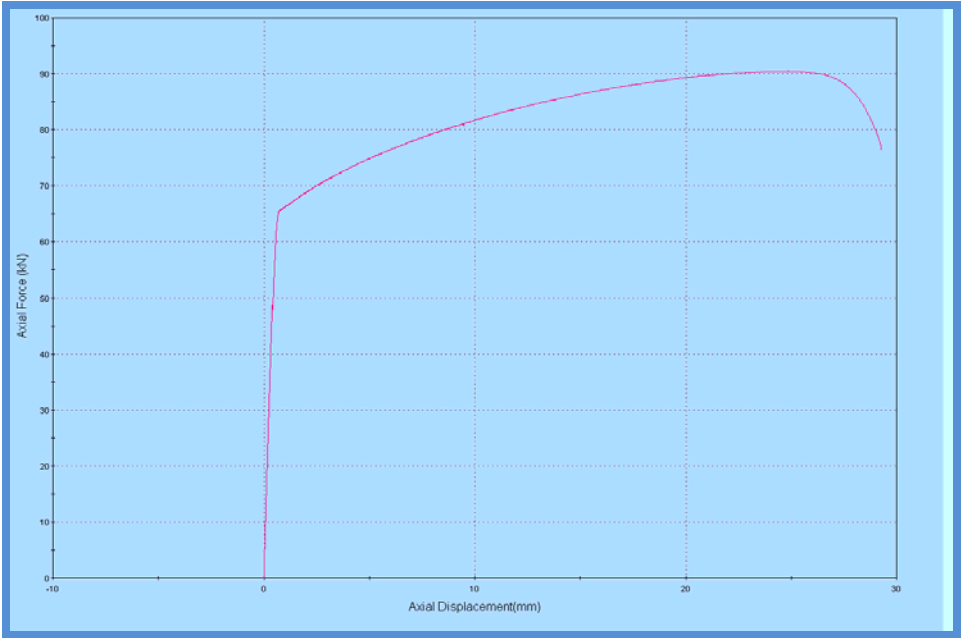
	QW-483 SUGGESTED FORMAT FOR PROCEDURE QUALIFICATION RECORDS (PQR) (See QW-200.2, Section IX, ASME Boiler and Pressure Vessel Code) Record Actual Conditions Used to Weld Test Coupon.																							
Procedure Qualification Record No. <u>1-02</u>																								
WPS No. <u>1-01</u> DATE <u>15/02/2010</u>																								
Welding Process(es) <u>SMAW</u>																								
Types(Manual, Automatic, Semi-Auto.) <u>MANUAL</u>																								
JOINTS (QW-402)  <p style="text-align: center;">Groove Design of Test Coupon</p> (For combination qualifications, the deposited weld metal thickness shall be recorded for each filler metal o process used.)																								
BASE METALS (QW-403) Material Specification. <u>E304</u> to <u>E304</u> Type or Grade <u>Type 304</u> to <u>Type 304</u> No. P <u>8</u> Gr. No. <u>1</u> a No. P <u>8</u> Gr. No. <u>1</u> Thickness of Test Coupon (T) <u>0,315"</u> Diameter of Test Coupon <u>11"X10"</u> Maximum Pass Thickness <u>0,5"</u> Other <u>N.A.</u>	POSTWELD HEAT TREATMENT (QW-407) Temperature <u>N.A.</u> Time <u>N.A.</u> Other <u>N.A.</u>																							
FILLER METALS (QW-404) SFA Specification <u>5,4</u> AWS Classification <u>E 308</u> Filler Metal F - No. <u>5</u> Weld Metal Analysis A - No. <u>8</u> Size of Filler Metal <u>350mm</u> Filler Metal Product Form <u>SOLIDO</u> Supplemental Filler Metal <u>N/A</u> Electrode-Flux Classification <u>N/A</u> Flux Type <u>N/A</u>	GAS (QW-408) <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th rowspan="2">TYPE</th> <th colspan="3">PERCENT COMPOSITION</th> </tr> <tr> <th>Gas(es)</th> <th>Mixture</th> <th>Flow Rate</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Shielding</td> <td>N.A.</td> <td>N.A.</td> <td>N.A.</td> </tr> <tr> <td>Trailing</td> <td>N.A.</td> <td>N.A.</td> <td>N.A.</td> </tr> <tr> <td>Backing</td> <td>N.A.</td> <td>N.A.</td> <td>N.A.</td> </tr> <tr> <td>Other</td> <td>NONE</td> <td>NONE</td> <td>NONE</td> </tr> </tbody> </table>	TYPE	PERCENT COMPOSITION			Gas(es)	Mixture	Flow Rate	Shielding	N.A.	N.A.	N.A.	Trailing	N.A.	N.A.	N.A.	Backing	N.A.	N.A.	N.A.	Other	NONE	NONE	NONE
TYPE	PERCENT COMPOSITION																							
	Gas(es)	Mixture	Flow Rate																					
Shielding	N.A.	N.A.	N.A.																					
Trailing	N.A.	N.A.	N.A.																					
Backing	N.A.	N.A.	N.A.																					
Other	NONE	NONE	NONE																					
POSITION (QW-405) Position of Groove <u>1G</u> Weld Progression (Uphill, Downhill) <u>N.A.</u>	ELECTRICAL CHARACTERISTICS (QW-409) Current <u>CC</u> Polarity <u>EP</u> Amps <u>70-160</u> Tungsten Electrode Size <u>N.A.</u> Mode of Metal Transfer for GMAW(FCAW) <u>N.A.</u>																							
PREHEAT (QW-406) Preheat Temperature <u>N.A.</u> Interpass Temperature <u>N.A.</u>	TECHNIQUE (QW-410) String or Weaved Bead <u>STRING AND WEAVED</u> Multipass or Single Pass <u>Multipass</u> Single or Multiple Electrodes <u>Single</u> Other <u>NONE</u>																							

Figura 24. Fuerza axial Vs. Desplazamiento axial probeta T1 SMAW



FUENTE: El autor

Figura 25. Fuerza axial Vs. Desplazamiento axial probeta T2 SMAW



FUENTE: El autor

Figura 26. Probetas soldadas según WPS 1-01 (SMAW) sometidas al ensayo de doblez.

a. doblez de cara de probeta con estampe C1S



b. Dobleza de cara probeta con estampe C2S



c. Doble de raíz probeta con estampe R1S



d. Doble de raíz probeta con estampe R2S



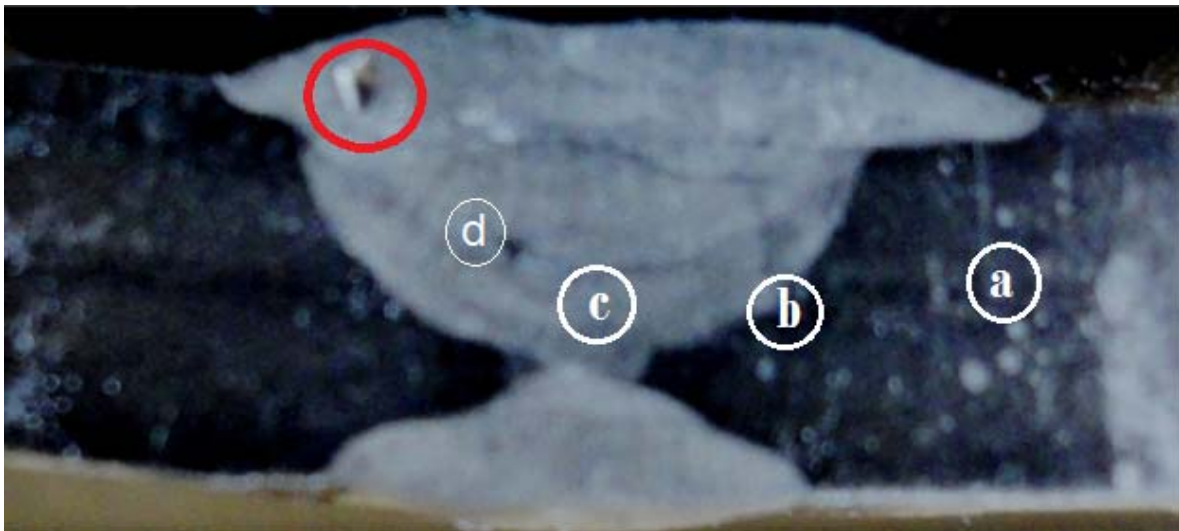
FUENTE: El autor

5.1.1.3. Resultados de análisis metalográfico del proceso SMAW (WPS 1-01)

MACROGRAFÍA DEL PROCEDIMIENTO. Este ensayo se realizó atacando electrolíticamente la superficie soldada con ácido crómico al 10% a 38°C. [7], [12].

En la figura 27 se muestran los resultados obtenidos. Se observa un poro en la parte superior izquierda del metal de soldadura debido probablemente, a que esta probeta se ha extraído del extremo del cordón, a menos de 1 plg de su comienzo; según la sección IX del código ASME, las discontinuidades ubicadas en esta zona no son motivo de rechazo al calificar.

Figura 27. Macrografía del procedimiento 1-01.

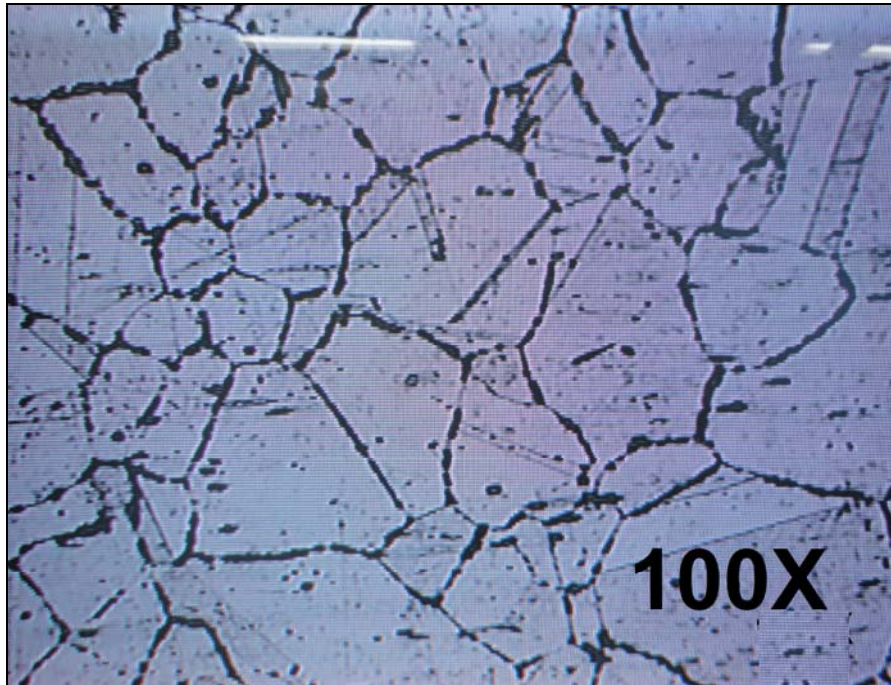


FUENTE: El autor

En las figuras 24 a la 27 se observan las microestructuras del cordón de soldadura; la ubicación de cada toma se resalta en la figura 27, puntos a, b, c y d respectivamente. En la figura 28 se detalla la estructura austenítica del metal base, en la figura 29 se presenta la zona afectada térmicamente donde se encuentran el metal base austenítico con crecimiento de grano y el metal de

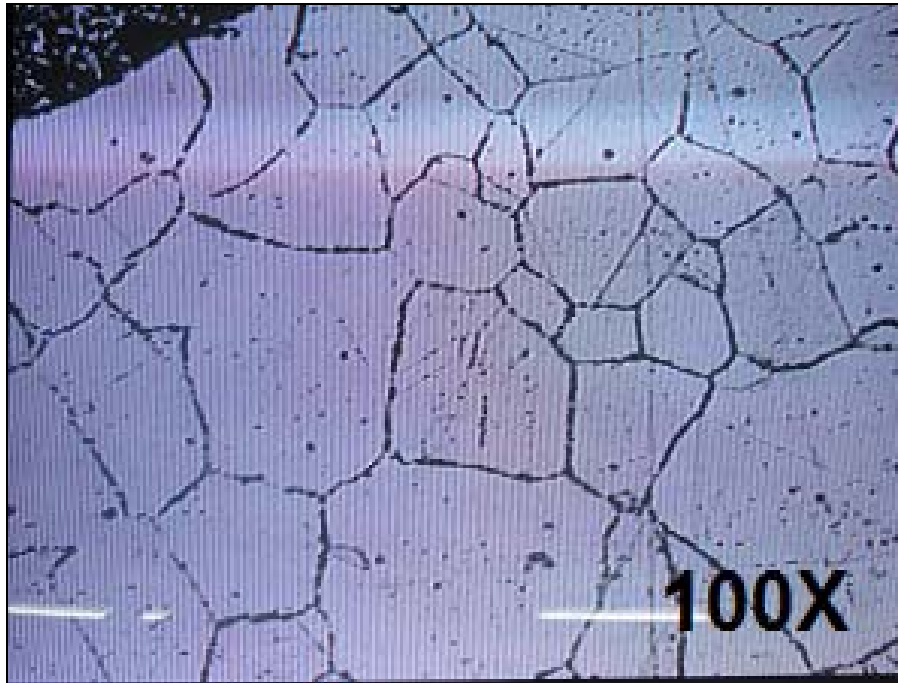
soldadura con estructura de colada. En la figura 30 se muestra la estructura de colada del metal de soldadura al igual que en la figura 31, donde alcanzan a formarse algunos granos austeníticos en el cordón.

Figura 28. Metal base. Punto a.



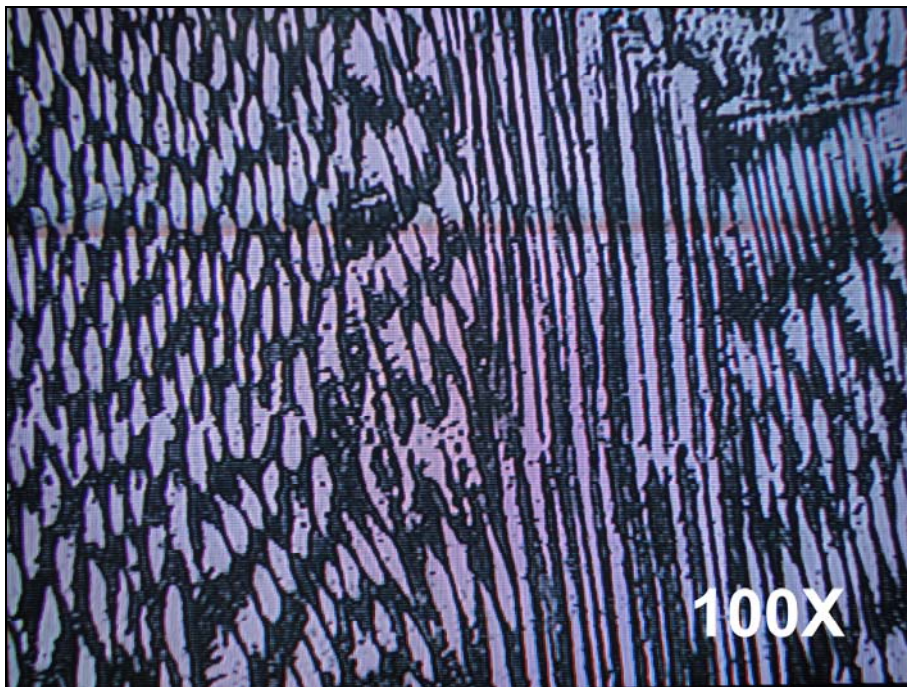
Fuente: El autor

Figura 29. Zona afectada térmicamente. Punto b.



Fuente: El autor

Figura 30. Metal de soldadura. Punto c.



Fuente: El autor

Figura 31. Metal de soldadura punto d.



FUENTE: El autor.

5.1.1.4 Resultados de microdureza proceso SMAW (WPS 1-01)

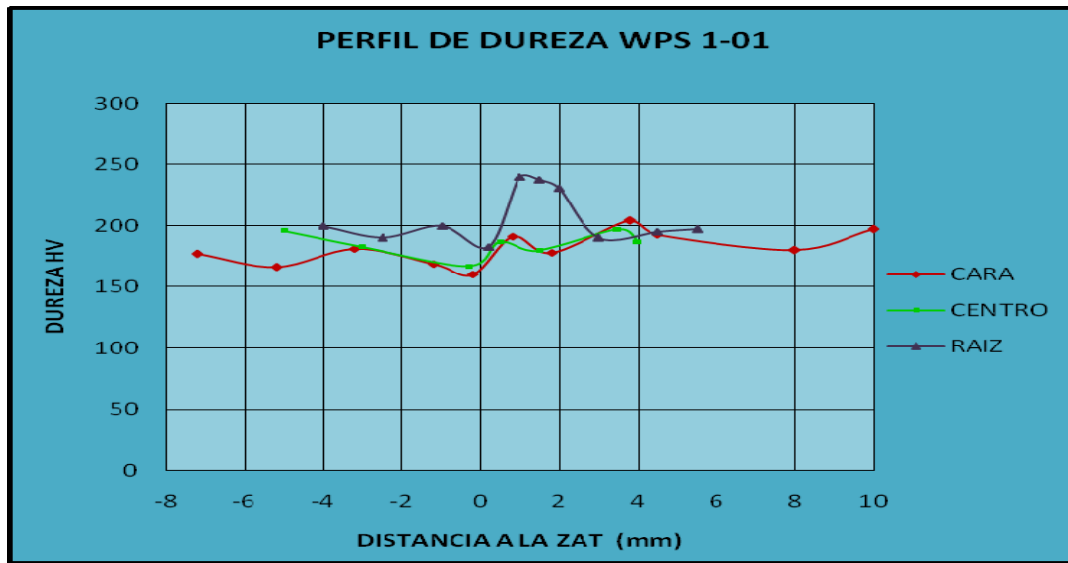
Los resultados de la prueba de micro dureza realizada a la muestra seleccionada se encuentran relacionados en la tabla 11 y para facilitar su interpretación, nos podemos referir a la figura 32 donde se muestra el perfil de dureza transversal del cordón de soldadura.

Tabla 11. Distribución de microdureza del procedimiento 1-01

DUREZA VICKERS WPS 1-01					
HV CARA	DISTANCE (mm)	HV CENTRO	DISTANCIA (mm)	HV raíz	DISTANCIA (mm)
177	-7,2	196	-5	200	-4
166	-5,2	183	-3	190	-2,5
181	-3,2	167	-0,3	200	-1
169	-1,2	187	0,5	183	0,2
160	-0,2	180	1,5	240	1
191	0,8	197	3,5	238	1,5
178	1,8	187	4	231	2
204	3,8	190	5,5	190	3
193	4,5			195	4,5
180	8			197	5,5
197	10				

FUENTE: El autor

Figura 32. Perfil de dureza del proceso 1-01



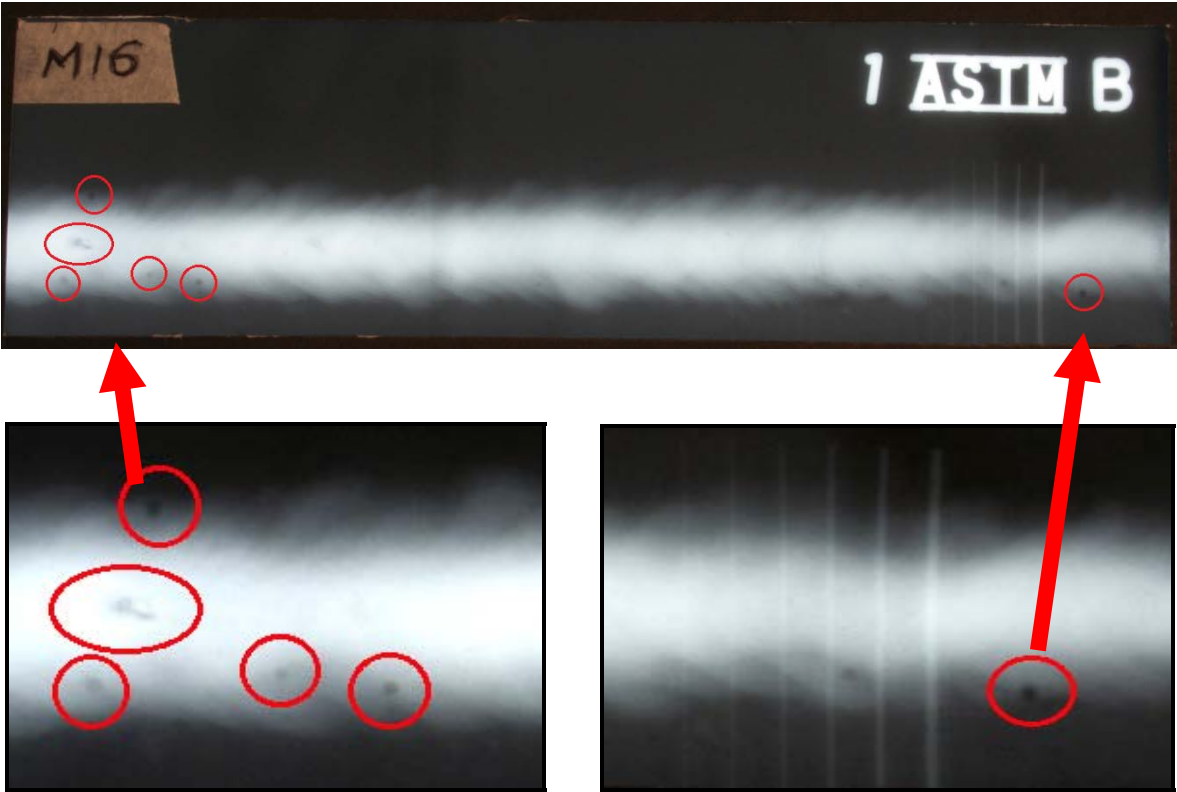
FUENTE: El autor

5.1.2. RESULTADOS DEL PROCESO DE SOLDADURA GMAW

5.1.2.1 Resultados radiografía industrial del proceso GMAW (WPS 3-01)

El resultado de radiografía industrial aplicado al cupón soldado por el proceso GMAW se muestra en la figura 33; a la izquierda del cordón se observa una discontinuidad de tipo lineal, manifestación de una grieta interna; están presentes también algunas discontinuidades redondeadas inferiores al 20% del espesor del material e inferiores a 1/8 de pulgada, límite especificado por el código ASME sección IX numeral QW-191.2; por lo tanto los resultados son aceptables.

Figura 33. Radiografía digitalizada del cordón de soldadura realizado por el proceso GMAW



FUENTE: El autor

5.1.2.2 Resultados de calificación de procedimiento del proceso GMAW (PQR 3-02) Según CÓDIGO ASME sección IX

En la tabla 12 se muestra el procedimiento diseñado para el proceso GMAW, el cual se ha elaborado de acuerdo al código ASME sección IX. Seguidamente, en la tabla 13, se encuentra la calificación de este procedimiento, con los resultados de los ensayos de tracción, dobléz de cara y dobléz de raíz, resultados que se complementan con las con la figuras 34, 35 y 36.

Tabla 52. Procedimiento de soldadura WPS 3-01



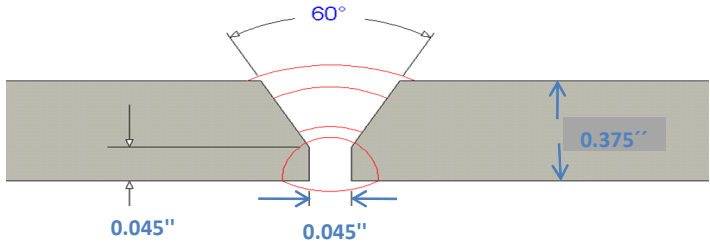
		QW-482 SUGGESTED FORMAT FOR WELDING PROCEDURE SPECIFICATIONS(WPS)(See QW-200.1, Section IX, ASME Boiler and Pressure Vessel Code)	
Company Name		INGESOL	
Welding Procedure Specification No.		3-01	
Supporting PQR No.(s)		3-02	Date 15/02/2010
Welding Process(es)		GMAW	Type(s) SEMI-AUTOMATIC <small>(Automatic, Manual, Machine, or Semi-Auto.)</small>
JOINTS (QW-402)		Details	
Joint Design	GROOVE		
Root Spacing	See Fabrication Drawings		
Backing	NO		
<small>Sketches, Production Drawings, Weld Symbols or Written Description should show the general arrangement of the parts to be welded. Where applicable, the root spacing and the details of weld groove may be specified.</small>			
BASE METALS (QW-403)		NOT USED	
P-No. 8	Group No. 1	to P-No. 8	Group No. 1
Thickness Range:			
Base Metal:	Groove	0,0625" to 0,75"	Fillet: ALL
Maximum Pass Thickness ≤ 1/2" <input checked="" type="checkbox"/> YES <input type="checkbox"/> NO			
FILLER METAL (QW-404)			
Spec. No. (SFA)	5.9		
AWS No. (Class)	ER-308		
F-No.	6		
A-No.	8		
Size of Filler Metals	0,045"		
Filler Metal Product Form	Solid		
Supplemental Filler Metal	NONE		
Weld Metal Thickness Groove Range	0,75" Max.		
Weld Metal Thickness Fillet Range	ALL		

Tabla 12. Procedimiento de soldadura WPS 3-01 (continuación)

QW-482 (Back)										
POSITIONS (QW-405)					POSTWELD HEAT TREATMENT (QW-407)					
Position(s) of Groove		1G			Temperature Range		NONE			
Welding Progression: Up		N.A.		Down		N.A.		Time Range	NONE	
Position(s) of Fillet		N.A.			Other		NONE			
PREHEAT (QW-406)					GAS (QW-408)					
Preheat Temp. Min.		N.A.			Percent Composition					
Interpass Temp. Max.		As Welded			Gas(es)		(Mixture)	Flow Rate		
Preheat Maintenance <small>(Continuous or special heating, where applicable should be recorded)</small>		Other: None			Shielding	Ar	0%	9-24 L/min		
					Trailing	None	N.A.	N.A.		
					Backing	None	N.A.	N.A.		
ELECTRICAL CHARACTERISTICS (QW-409)										
Weld Layer(s)	Process	Filler Metal		Current		Volt Range	Travel Speed Range	Other <small>(e.g. Remarks, Comments, Hot Wire, Addition, Technique, Torch Angle, Etc.)</small>		
		Class	Dia.	Type and Polarity	Amp. Range					
1-N	GMAW	ER-308 / E ₃₀₈	0,045"	DC-EP	155-400	20-34	---	---		
Pulsing Current		None			Heat Input Max.					
Mode of Metal Transfer For GMAW					<i>Spray</i>					
Electrode Wire feed speed range					50-80 plg/min					
TECHNIQUE (QW-410)				GMAW						
Type of Bead				<input type="checkbox"/> String		<input checked="" type="checkbox"/> Weaved				
Orifice or Gas Cup Size				1/2" to 3/4"						
Initial Cleaning (Brushing, Grinding, etc)				<i>Brushing and Grinding</i>						
Interpass Cleaning (Brushing, Grinding, etc)				<i>Brushing</i>						
Number of Passes per side				<input type="checkbox"/> Single		<input checked="" type="checkbox"/> Multiple				
Multiple or Single Electrodes				<input checked="" type="checkbox"/> Single		<input type="checkbox"/> Multiple				

FUENTE: El autor

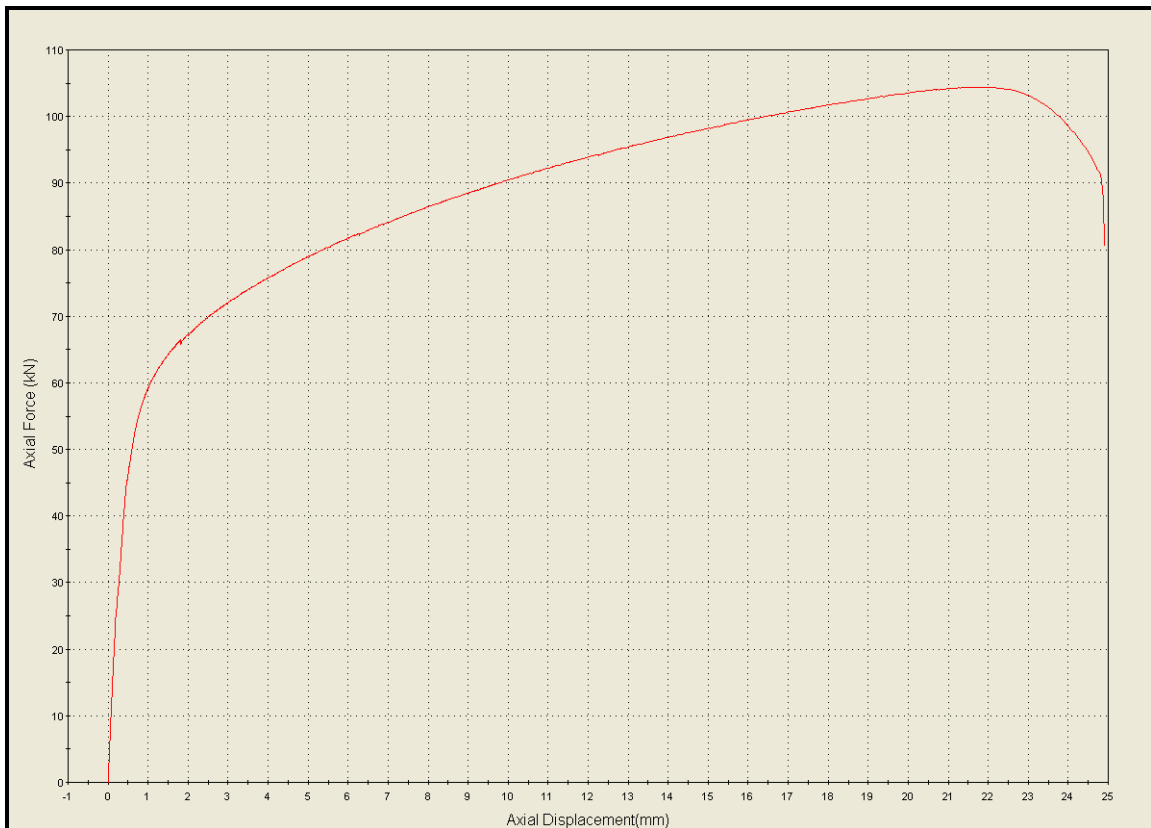
Tabla 13. Calificación de procedimiento PQR 3-02

	QW-483 SUGGESTED FORMAT FOR PROCEDURE QUALIFICATION RECORDS (PQR) (See QW-200.2, Section IX, ASME Boiler and Pressure Vessel Code) Record Actual Conditions Used to Weld Test Coupon.																							
Procedure Qualification Record No. <u>3-02'</u>																								
WPS No. <u>3-01'</u> DATE <u>15/02/2010</u>																								
Welding Process(es) <u>GMAW</u>																								
Types(Manual, Automatic, Semi-Auto.) <u>Semiautomatic</u>																								
JOINTS (QW-402)  <p style="text-align: center;">Groove Design of Test Coupon (For combination qualifications, the deposited weld metal thickness shall be recorded for each filler metal o process used.)</p>																								
BASE METALS (QW-403) Material Specification. <u>E304</u> to <u>E304</u> Type or Grade <u>Type 304</u> to <u>Type 304</u> No. P <u>8</u> Gr. No. <u>1</u> a No. P <u>8</u> Gr. No. <u>1</u> Thickness of Test Coupon (T) <u>0,375"</u> Diameter of Test Coupon <u>N.A.</u> Other <u>N.A.</u>	POSTWELD HEAT TREATMENT (QW-407) Temperature <u>N.A.</u> Time <u>N.A.</u> Other <u>N.A.</u>																							
FILLER METALS (QW-404) SFA Specification <u>5.9</u> AWS Classification <u>ER 308 / ER308L</u> Filler Metal F - No. <u>6</u> Weld Metal Analysis A - No. <u>8</u> Size of Filler Metal <u>0,045"</u> Filler Metal Product Form <u>SOLID</u> Supplemental Filler Metal <u>N/A</u> Electrode-Flux Classification <u>N/A</u> Flux Type <u>N/A</u> Flux Trade Name <u>N/A</u>	GAS (QW-408) <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th rowspan="2">TYPE</th> <th colspan="3">PERCENT COMPOSITION</th> </tr> <tr> <th>Gas(es)</th> <th>Mixture</th> <th>Flow Rate</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Shielding</td> <td>Ar/O</td> <td>98% / 2%</td> <td>N.A</td> </tr> <tr> <td>Trailing</td> <td>N.A</td> <td>N.A</td> <td>N.A</td> </tr> <tr> <td>Backing</td> <td>N.A</td> <td>N.A</td> <td>N.A</td> </tr> <tr> <td>Other</td> <td>NONE</td> <td>NONE</td> <td>NONE</td> </tr> </tbody> </table>	TYPE	PERCENT COMPOSITION			Gas(es)	Mixture	Flow Rate	Shielding	Ar/O	98% / 2%	N.A	Trailing	N.A	N.A	N.A	Backing	N.A	N.A	N.A	Other	NONE	NONE	NONE
TYPE	PERCENT COMPOSITION																							
	Gas(es)	Mixture	Flow Rate																					
Shielding	Ar/O	98% / 2%	N.A																					
Trailing	N.A	N.A	N.A																					
Backing	N.A	N.A	N.A																					
Other	NONE	NONE	NONE																					
POSITION (QW-405) Position of Groove <u>1G</u> Weld Progression (Uphill, Downhill) <u>N.A.</u>	ELECTRICAL CHARACTERISTICS (QW-409) Current <u>DC</u> Polarity <u>EP</u> Amps <u>180-280</u> Volts <u>24-32</u> Tungsten Electrode Size <u>N.A.</u> Mode of Metal Transfer <u>SPRAY</u> Other <u>NONE</u>																							
PREHEAT (QW-406) Preheat Temperature <u>NONE</u> Interpass Temperature <u>N.A.</u>	TECHNIQUE (QW-410) String or Weaved Bead <u>String and weaved</u> Multipass or Single Pass (per side) <u>Multiple</u> Single or Multiple Electrodes <u>Single</u> Other <u>NONE</u>																							

QW - 483 (BACK)				PQR No. _____		
Tensile Test (QW-150)						
Specimen	Width	Thickness	Area	Ultimate Total Load [KN]	Ultimate Unit Stress	TIPO DE FALLA Y LOCALIZACIÓN
T1 M	0,748"	0,354"	0,265"	91,431	77564,17PSI	RPS
T2 M	0,709"	0,367"	0,260"	88,507	76527,55PSI	RPS
RFS = Rompió fuera de la soldadura RPS = Rompió por la soldadura						
Guided - Bend Test (QW-160)						
IDENTIFICACIÓN	RESULTADO		CONCEPTO			
M C1	Presenta dos discontinuidades mayores a 1/8"		NO APROBADO			
M C2	Presenta dos discontinuidades menores a 1/8"		APROBADO			
M R1	SIN DISCONTINUIDADES		APROBADO			
M R2	SIN DISCONTINUIDADES		APROBADO			
Welder's Name _____ OMAR CELIS _____ Stamp No. _____ OC						

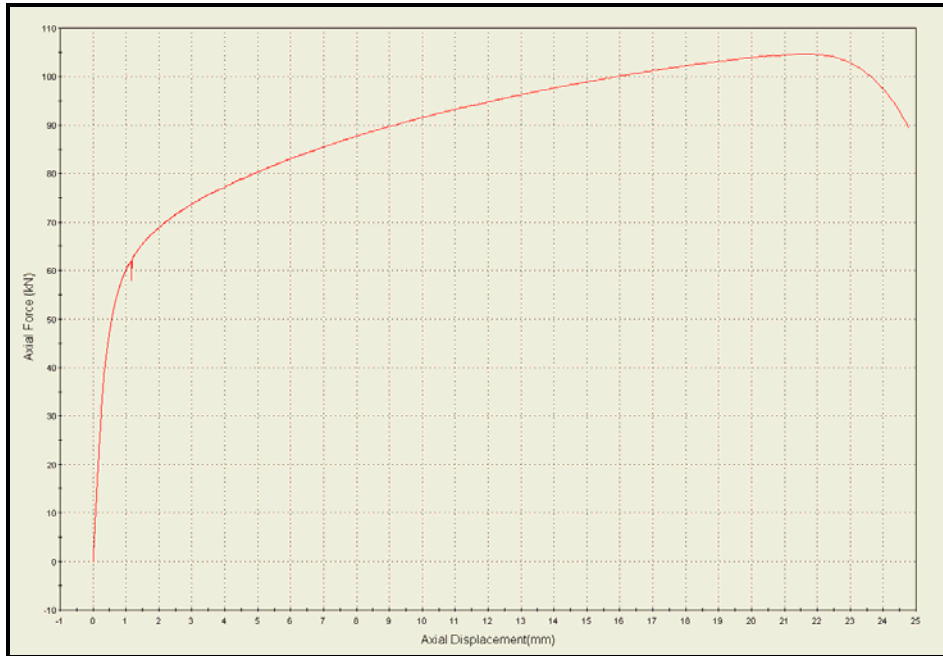
FUENTE: El autor

Figura 34. Fuerza axial Vs. Desplazamiento axial probeta estampe T1 MIG



FUENTE: El autor

Figura 35. Fuerza axial Vs. Desplazamiento axial probeta estampe T2 MIG



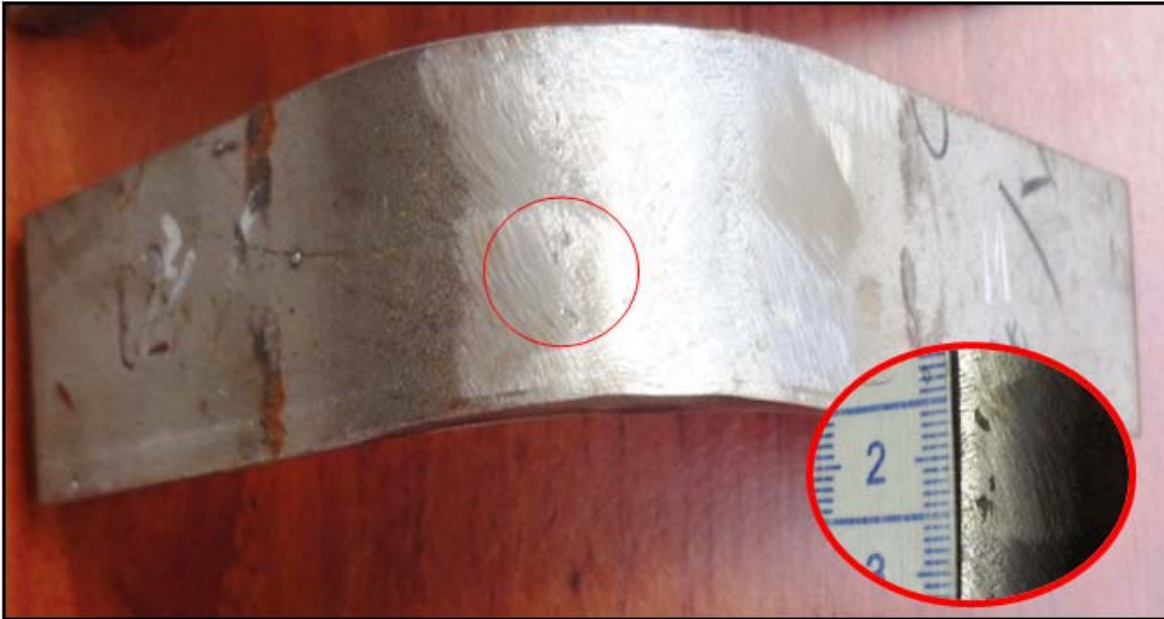
FUENTE: El autor

Figura 36. Probetas procedimiento 3-02 sometidas a doblado de cara y de raíz

a. Doblez de cara de probeta con estampe M-C1



b. Doblez de cara de probeta con estampe M-C2



c. Doblez de raíz de probeta con estampe R1-M



d. Doble de raíz de probeta con estampe R2-M



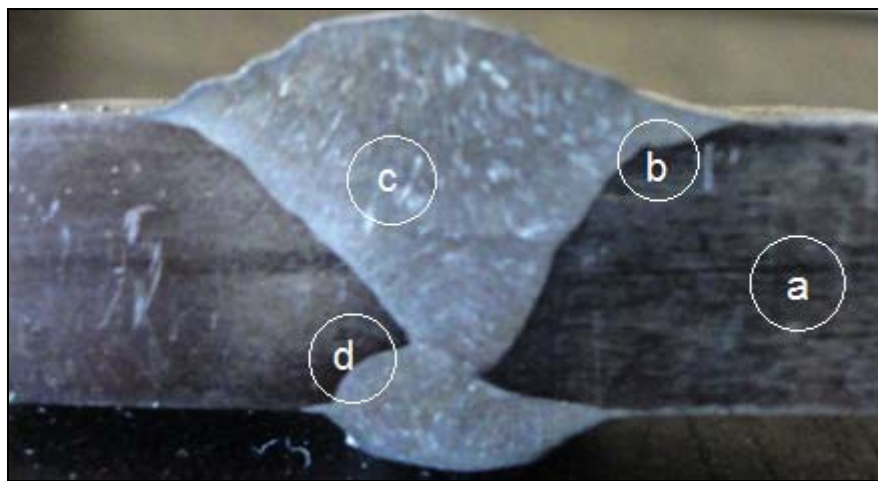
FUENTE: El autor

5.1.2.3 Resultados de análisis metalográfico proceso GMAW (WPS 3-01)

MACROGRAFÍA. Este ensayo se realizó atacando electrolíticamente la superficie soldada con ácido crómico al 10% a 38°C. [7], [12].

En la figura 37 se muestran los resultados obtenidos por el macroataque. Se observa penetración completa del metal de soldadura.

Figura 37. Macrografía del procedimiento 3-01



FUENTE: El autor

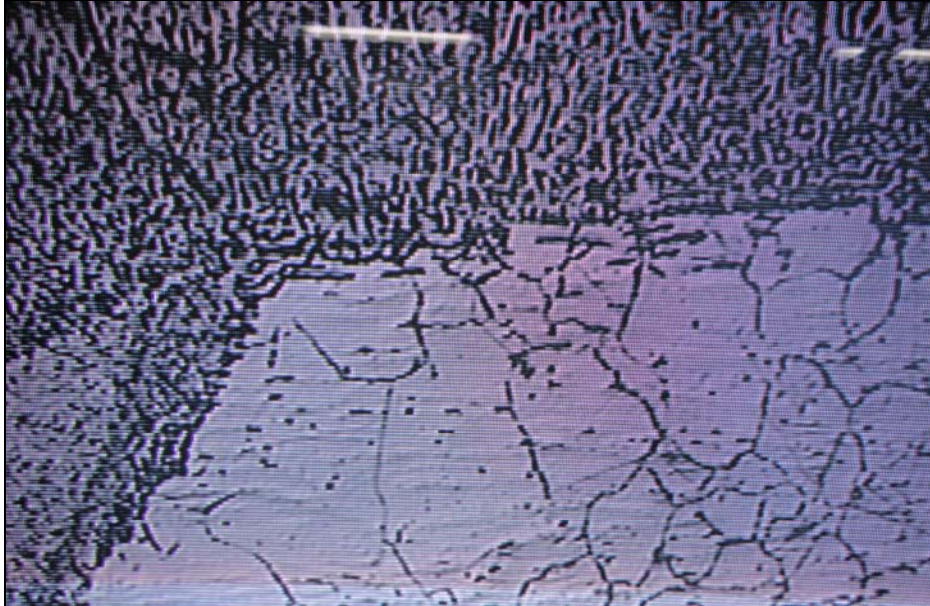
En las figuras 38 a la 41 se observan las microestructuras del cordón de soldadura aplicado por el proceso GMAW; la ubicación de cada toma se resalta en la figura 37, puntos a, b, c y d respectivamente. En la figura 38 se observa estructura austenítica característica del acero AISI 304, en la figura 39 se observa la zona afectada térmicamente donde el metal con estructura de colada se encuentra con la estructura austenítica del metal base, al igual que se ve en la figura 41; allí hay un leve crecimiento de grano. En la figura 40 se puede observar no sólo la estructura de colada del metal de soldadura, sino también el encuentro de dos de los pases aplicados.

Figura 38. Metal base. Punto a.



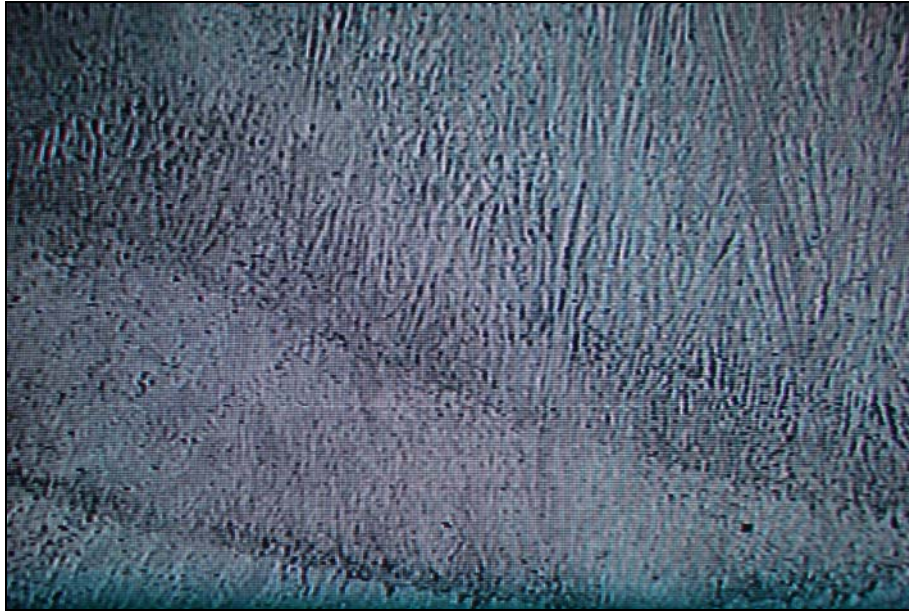
FUENTE: El autor

Figura 39. Zona afectada térmicamente. Punto b.



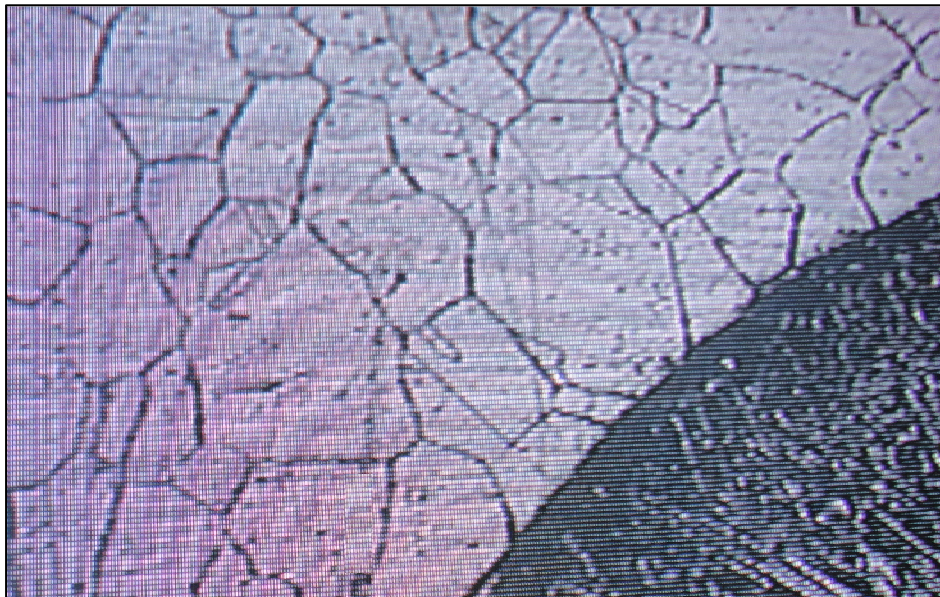
FUENTE: El autor

Figura 40. Metal de soldadura. Punto c.



FUENTE: El autor

Figura 41. Zona afectada térmicamente. Punto d



FUENTE: El autor

5.1.2.4 Resultados de microdureza proceso GMAW (WPS 3-01)

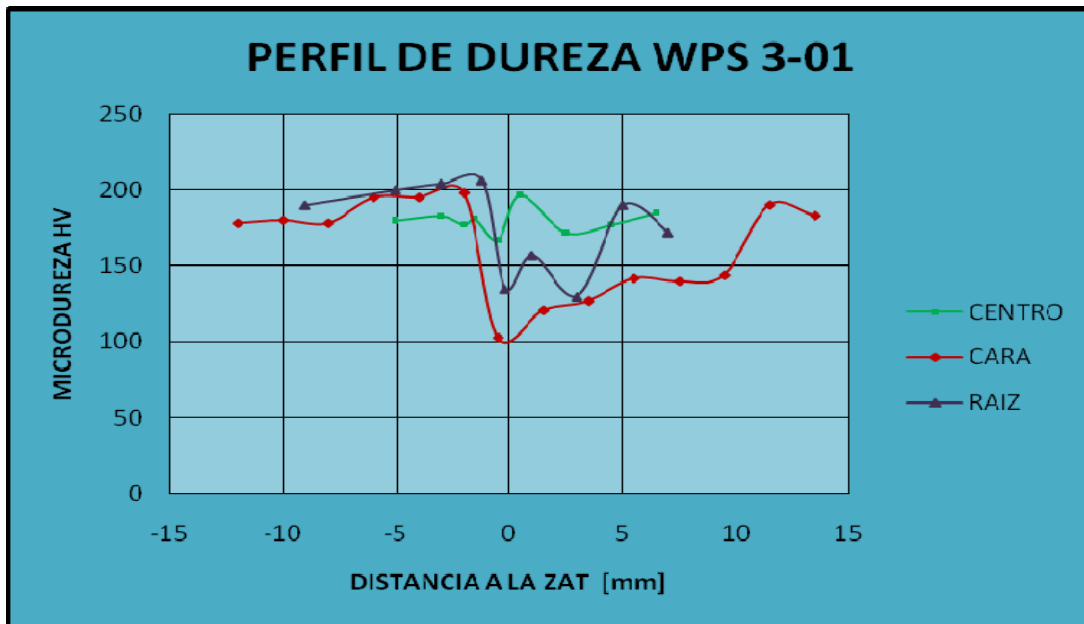
Los resultados de la prueba de micro dureza realizada a la muestra seleccionada se encuentran relacionados en la tabla 14 y para facilitar su interpretación, nos podemos referir al figura 42 donde se muestra el perfil de dureza transversal del cordón de soldadura.

Tabla 14. Distribución de microdureza del procedimiento 3-01

PRIMER BARRIDO		SEGUNDO BARRIDO		TERCER BARRIDO	
DUREZA	DISTANCIA (mm)	DUREZA	DISTANCIA (mm)	DUREZA	DISTANCIA (mm)
178	-12	180	-5	190	-9
180	-10	183	-3	200	-5
178	-8	177	-2	204	-3
195	-6	181	-1,5	206	-1,2
195	-4	167	-0,5	135	-0,2
198	-2	197	0,5	157	1
103	-0,5	172	2,5	130	3
121	1,5	177	4,5	190	5
127	3,5	185	6,5	172	7
142	5,5				
140	7,5				
144	9,5				
190	11,5				
183	13,5				

FUENTE: El autor

Figura 42. Perfil de dureza del proceso 3-01



FUENTE: El autor

5.1.3 RESULTADOS DEL PROCESO DE SOLDADURA GTAW (TIG)

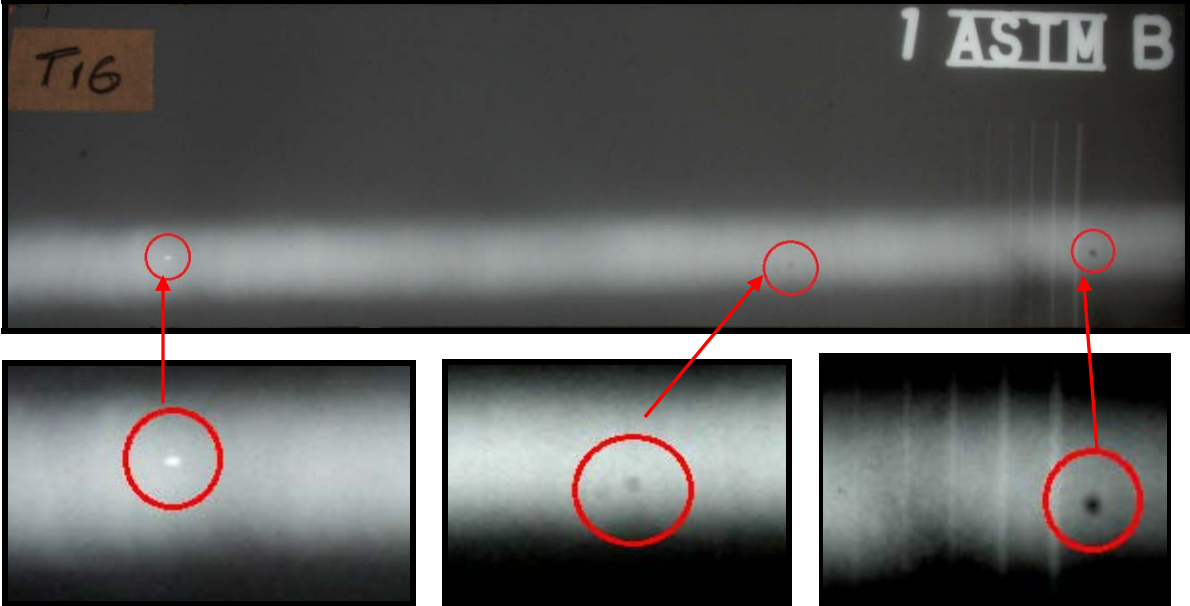
5.1.3.1 Resultados radiografía industrial del proceso GTAW (WPS 2-01)

El resultado obtenido se muestra en la figura 43; como se mencionó en la sección 2.3, se utilizó la película Kodak D7, la distancia fuente película fue de 700mm y el tiempo de exposición correspondiente para el espesor de este cordón fue de 2 minutos y 10 segundos de acuerdo al espesor del metal y el indicador de imagen utilizado fue el 1ASTM B.

Según la sección IX del ASME numeral QW 191.2 “criterios de aceptación radiográficos”, el punto claro que se presenta cerca del extremo izquierdo del cordón y que posiblemente es un inclusión de tungsteno, así como el par de discontinuidades redondeadas oscuras a lo largo del cordón, no exceden el tamaño límite de 1/8 de pulgada especificado, ni el 20% del espesor del metal base.

Por lo anterior, el resultado es aprobado.

Figura 43. Radiografía digitalizada del cordón de soldadura realizado por el proceso GTAW




FUENTE: El autor

5.1.3.2 Resultados de calificación de procedimiento del proceso GTAW (PQR 2-02) Según CÓDIGO ASME sección IX

En la tabla 15 se muestra el procedimiento diseñado para el proceso GTAW, el cual se ha elaborado de acuerdo al código ASME sección IX. Seguidamente, en la tabla 16, se encuentra la calificación de este procedimiento, con los resultados de los ensayos de tracción, doblez de cara y doblez de raíz, resultados que se complementan con los las figuras 44, 45 y 46. Las manchas que se observan en las probetas de doblez no son discontinuidades ni grietas sino marcas de la remoción del sobre espesor del cordón de soldadura.


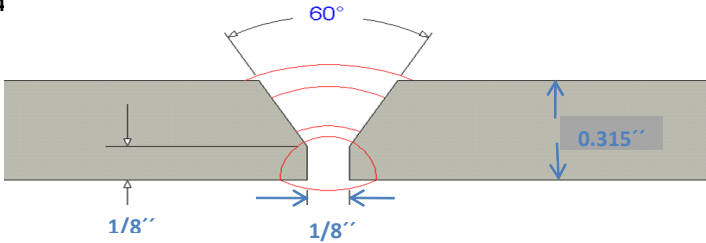
Tabla 15. Procedimiento de soldadura WPS 2-01

		QW-482 SUGGESTED FORMAT FOR WELDING PROCEDURE SPECIFICATIONS(WPS)(See QW-200.1, Section IX, ASME Boiler and Pressure Vessel Code)	
Welding Procedure Specification No.		2-01	Revision No. 1
Supporting PQR No.(s)		2-02	Date 15/02/2010
Welding Process(es)		GTAW	Type(s) MANUAL <small>(Automatic, Manual, Machine, or Semi-Auto.)</small>
JOINTS (QW-402)		Details	
Joint Design		<u>Groove and Fillets</u>	
Root Spacing		<u>See Fabrication Drawings</u>	
Backing		YES SEE	
Backing Material (Type)		<u>Cu</u> FABRICATION DRAWINGS	
<small>(Referirse a ambos el respaldo y los Retenedores)</small>			
<input checked="" type="checkbox"/> METAL		<input type="checkbox"/> NONMETALLIC	<input type="checkbox"/> NONFUSING METAL
		<input type="checkbox"/> OTHER	
		Retainers <u>YES</u>	
BASE METALS (QW-403)			
P-No.	8	Group No.	1 to P-No. 8 Group No. 1
Thickness Range:			
Base Metal:	Groove	0,0625"	to 0,75" Fillet: ALL
Maximum Pass Thickness ≤ 1/2"		<input checked="" type="checkbox"/> YES	<input type="checkbox"/> NO
FILLER METAL (QW-404)		GTAW	
Spec. No. (SFA)		5.9	
AWS No. (Class)		ER308	
F-No.		6	
A-No.		8	
Size of Filler Metals		3/32"	
Filler Metal Product Form		SOLID	
Supplemental Filler Metal		N.A.	
Weld Metal Thickness Groove Range		Máx 0,75"	
Weld Metal Thickness Fillet Range		all	

QW-482 (Back)							
					WPS No.	<i>002-2010</i>	Rev.
POSITIONS (QW-405)				POSTWELD HEAT TREATMENT (QW-407)			
Position(s) of Groove		1G		Temperature Range NONE			
Welding Progression: Up		N.A.	Down		N.A.		
Position(s) of Fillet		NONE					
PREHEAT (QW-406)				GAS (QW-408)			
Preheat Temp. Min.		N.A.		Percent Composition			
Interpass Temp. Max.		AS WELDED		Gas(es)	(Mixture)	Flow Rate	
Preheat Maintenance		N.A.		Shielding	Ar	100%	
(Continuous or special heating, where applicable should be recorded)				Trailing	N.A.	N.A.	
Other: None				Backing	N.A.	N.A.	
ELECTRICAL CHARACTERISTICS (QW-409)							
Weld Layer(s)	Process	Filler Metal		Type and Polarity	Current Amp. Range	Other	
		Class	Dia.				
<i>1</i>	<i>GTAW</i>	<i>ER-308L</i>	<i>3/32"</i>	<i>DC-EP</i>	<i>50-90</i>	---	
<i>2-N</i>	<i>GTAW</i>	<i>ER-308L</i>	<i>1/8"</i>	<i>DC-EP</i>	<i>70-110</i>	---	
Tungsten Electrode Size and Type					<i>3/32"</i>	<i>EWTh-2</i>	
TECHNIQUE (QW-410)							
Type of Bead				<input type="checkbox"/> String		<input checked="" type="checkbox"/> Weaved	
Initial Cleaning (Brushing, Grinding, etc)				BRUSHING and GRINDING			
Interpass Cleaning (Brushing, Grinding, etc)				BRUSHING			
Number of Passes per side				<input type="checkbox"/> Single		<input checked="" type="checkbox"/> Multiple	
Multiple or Single Electrodes				<input checked="" type="checkbox"/> Single		<input type="checkbox"/> Multiple	
SOLDADOR: <u>OMAR CELIS</u>				ESTAMPE: OC			

FUENTE: El autor.

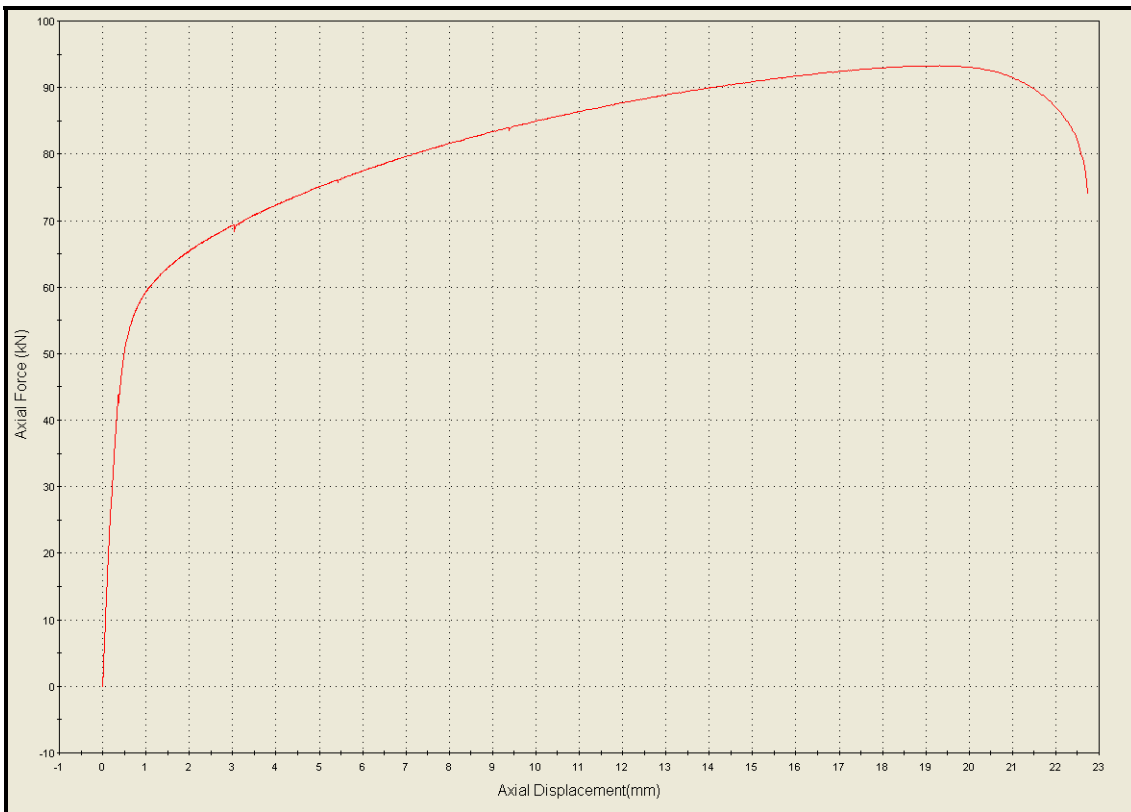
Tabla 16. Calificación de procedimiento PQR No. 2-02

	<p>QW-483 SUGGESTED FORMAT FOR PROCEDURE QUALIFICATION RECORDS (PQR)</p> <p>(See QW-200.2, Section IX, ASME Boiler and Pressure Vessel Code) Record Actual Conditions Used to Weld Test Coupon.</p>																																											
<p>Procedure Qualification Record No. <u>2-02</u></p>																																												
<p>WPS No. <u>2-01</u> DATE <u>15/02/2010</u></p>																																												
<p>Welding Process(es) <u>GTAW</u></p>																																												
<p>Types(Manual, Automatic, Semi-Auto.) <u>MANUAL</u></p>																																												
<p>JOINTS (QW-403)</p>  <p style="text-align: center;">Groove Design of Test Coupon</p> <p style="text-align: center;">(For combination qualifications, the deposited weld metal thickness shall be recorded for each filler metal or process used.)</p>																																												
<p>BASE METALS (QW-403)</p> <p>Material Specification. <u>E304</u> to <u>E304</u></p> <p>Type or Grade <u>TYPE304</u> to <u>TYPE304</u></p> <p>No. P <u>8</u> Gr. No. <u>1</u> a No. P <u>8</u> Gr. No. <u>1</u></p> <p>Thickness of Test Coupon (T) <u>0,315"</u></p> <p>Diameter of Test Coupon <u>11"X10"</u></p> <p>Other <u>N.A.</u></p>	<p>POSTWELD HEAT TREATMENT (QW-407)</p> <p>Temperature <u>N.A.</u></p> <p>Time <u>N.A.</u></p> <p>Other <u>N.A.</u></p>																																											
<p>FILLER METALS (QW-404)</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td>SFA Specification</td><td style="text-align: center;"><u>5.9</u></td></tr> <tr><td>AWS Classification</td><td style="text-align: center;"><u>E 308</u></td></tr> <tr><td>Filler Metal F - No.</td><td style="text-align: center;"><u>6</u></td></tr> <tr><td>Weld Metal Analysis A - No.</td><td style="text-align: center;"><u>8</u></td></tr> <tr><td>Size of Filler Metal</td><td style="text-align: center;"><u>3/32" - 1/8"</u></td></tr> <tr><td>Filler Metal Product Form</td><td style="text-align: center;"><u>SOLID</u></td></tr> <tr><td>Supplemental Filler Metal</td><td style="text-align: center;"><u>N/A</u></td></tr> <tr><td>Electrode-Flux Classification</td><td style="text-align: center;"><u>N/A</u></td></tr> <tr><td>Flux Type</td><td style="text-align: center;"><u>N/A</u></td></tr> <tr><td>Flux Trade Name</td><td style="text-align: center;"><u>N/A</u></td></tr> </table>	SFA Specification	<u>5.9</u>	AWS Classification	<u>E 308</u>	Filler Metal F - No.	<u>6</u>	Weld Metal Analysis A - No.	<u>8</u>	Size of Filler Metal	<u>3/32" - 1/8"</u>	Filler Metal Product Form	<u>SOLID</u>	Supplemental Filler Metal	<u>N/A</u>	Electrode-Flux Classification	<u>N/A</u>	Flux Type	<u>N/A</u>	Flux Trade Name	<u>N/A</u>	<p>GAS (QW-408)</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th rowspan="2">TYPE</th> <th colspan="3">PERCENT COMPOSITION</th> </tr> <tr> <th>Gas(es)</th> <th>Mixture</th> <th>Flow Rate</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>Shielding</td><td style="text-align: center;">Ar</td><td style="text-align: center;">100%</td><td style="text-align: center;">N.A</td></tr> <tr><td>Trailing</td><td style="text-align: center;">N.A</td><td style="text-align: center;">N.A</td><td style="text-align: center;">N.A</td></tr> <tr><td>Backing</td><td style="text-align: center;">N.A</td><td style="text-align: center;">N.A</td><td style="text-align: center;">N.A</td></tr> <tr><td>Other</td><td style="text-align: center;">NONE</td><td style="text-align: center;">NONE</td><td style="text-align: center;">NONE</td></tr> </tbody> </table>	TYPE	PERCENT COMPOSITION			Gas(es)	Mixture	Flow Rate	Shielding	Ar	100%	N.A	Trailing	N.A	N.A	N.A	Backing	N.A	N.A	N.A	Other	NONE	NONE	NONE
SFA Specification	<u>5.9</u>																																											
AWS Classification	<u>E 308</u>																																											
Filler Metal F - No.	<u>6</u>																																											
Weld Metal Analysis A - No.	<u>8</u>																																											
Size of Filler Metal	<u>3/32" - 1/8"</u>																																											
Filler Metal Product Form	<u>SOLID</u>																																											
Supplemental Filler Metal	<u>N/A</u>																																											
Electrode-Flux Classification	<u>N/A</u>																																											
Flux Type	<u>N/A</u>																																											
Flux Trade Name	<u>N/A</u>																																											
TYPE	PERCENT COMPOSITION																																											
	Gas(es)	Mixture	Flow Rate																																									
Shielding	Ar	100%	N.A																																									
Trailing	N.A	N.A	N.A																																									
Backing	N.A	N.A	N.A																																									
Other	NONE	NONE	NONE																																									
<p>POSITION (QW-405)</p> <p>Position of Groove <u>1G</u></p> <p>Weld Progression (Uphill, Downhill) <u>N.A.</u></p>	<p>ELECTRICAL CHARACTERISTICS (QW-409)</p> <p>Current <u>DC</u></p> <p>Polarity <u>EP</u></p> <p>Amps <u>50-110</u> Volts <u>15-28</u></p> <p>Tungsten Electrode Size <u>3/32"</u></p> <p>Mode of Metal Transfer for GMAW(FCAW) <u>N.A</u></p> <p>Other <u>NONE</u></p>																																											
<p>PREHEAT (QW-406)</p> <p>Preheat Temperature <u></u></p> <p>Interpass Temperature <u></u></p> <p>Other <u>NONE</u></p>	<p>TECHNIQUE (QW-410)</p> <p>String or Weaved Bead <u>string and weaved</u></p> <p>Multipass or Single Pass (per side) <u>Multipass</u></p> <p>Single or Multiple Electrodes <u>Single</u></p> <p>Other <u>NONE</u></p>																																											

QW - 483 (BACK)				PQR No. _____		
Tensile Test (QW-150)						
Specimen No.	Width	Thickness	Area	Ultimate Total Load [KN]	Ultimate Unit Stress[KSI]	Tipo de falla y localización
T1 TIG	0,748"	0,315"	0,236"	79,222	75,465	RPS
T2 TIG	0,748"	0,315"	0,236"	92,729	88,331	RPS
Guided - Bend Test (QW-160)						
IDENTIFICACIÓN	RESULTADO			CONCEPTO		
C1 T	SIN DISCONTINUIDADES			APROBADO		
C2 T	SIN DISCONTINUIDADES			APROBADO		
R1 T	SIN DISCONTINUIDADES			APROBADO		
R2 T	SIN DISCONTINUIDADES			APROBADO		
Welder's Name _____ OMAR CELIS _____ Stamp No. _____ OC						

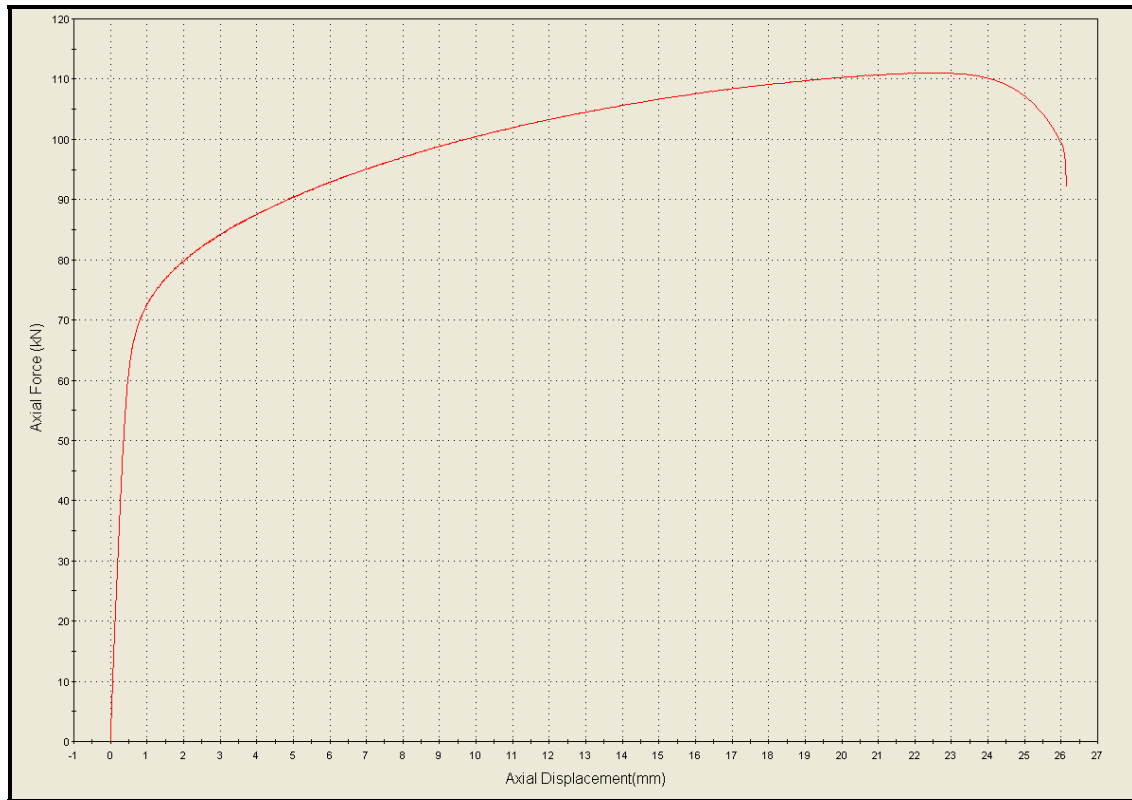
FUENTE: El autor

Figura 44. Fuerza axial Vs. Desplazamiento axial probeta T1 GTAW



FUENTE: El autor

Figura 45. Fuerza axial Vs. Desplazamiento axial probeta T2 GTAW.



FUENTE: El autor

Figura 46. Probetas soldadas según WPS 2-01 sometidas a dobléz de cara y dobléz de raíz

a. Dobléz de cara de probeta con estampe C1-TIG



b. Dobléz de cara de probeta con estampe C2-TIG



c. Doblez de raíz de probeta con estampe R1-TIG



d. Doblez de raíz de probeta con estampe R1-TIG



FUENTE: El autor

5.1.3.3 Resultados de análisis metalográfico del proceso GTAW (WPS 2-01)

MACROGRAFÍA. Este ensayo se realizó atacando electrolíticamente la superficie soldada con ácido crómico al 10% [7].

En la figura 47 se muestran los resultados obtenidos por el macroataque. Allí se observa penetración completa del metal de soldadura.

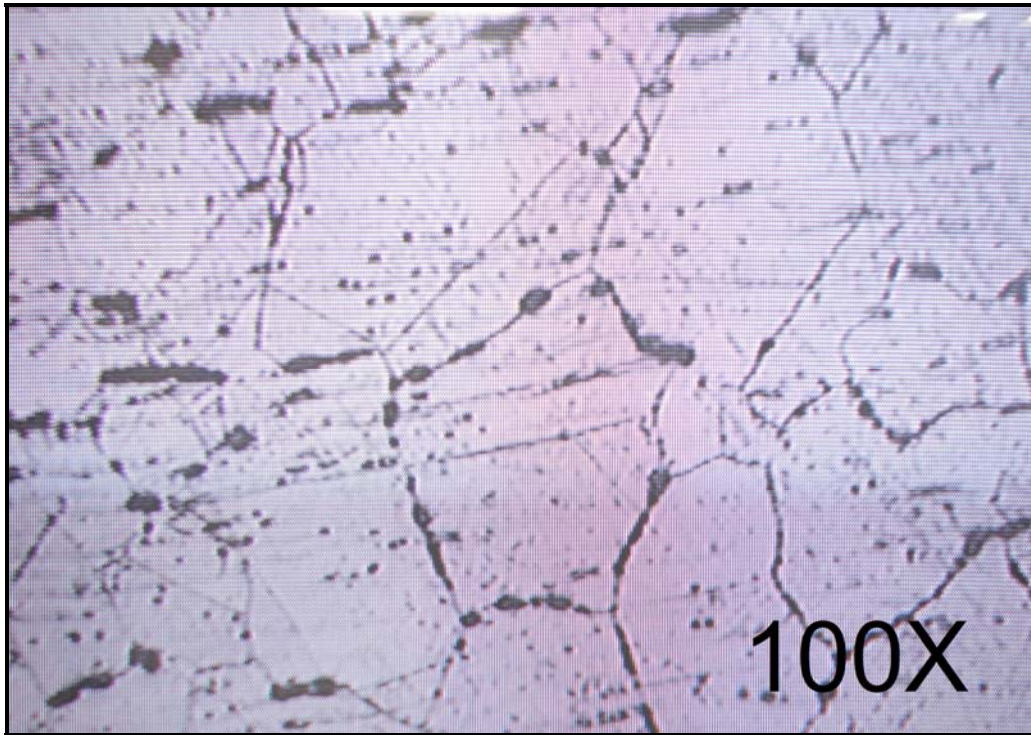
Figura 47. Macrografía del procedimiento 2-01.



FUENTE: El autor

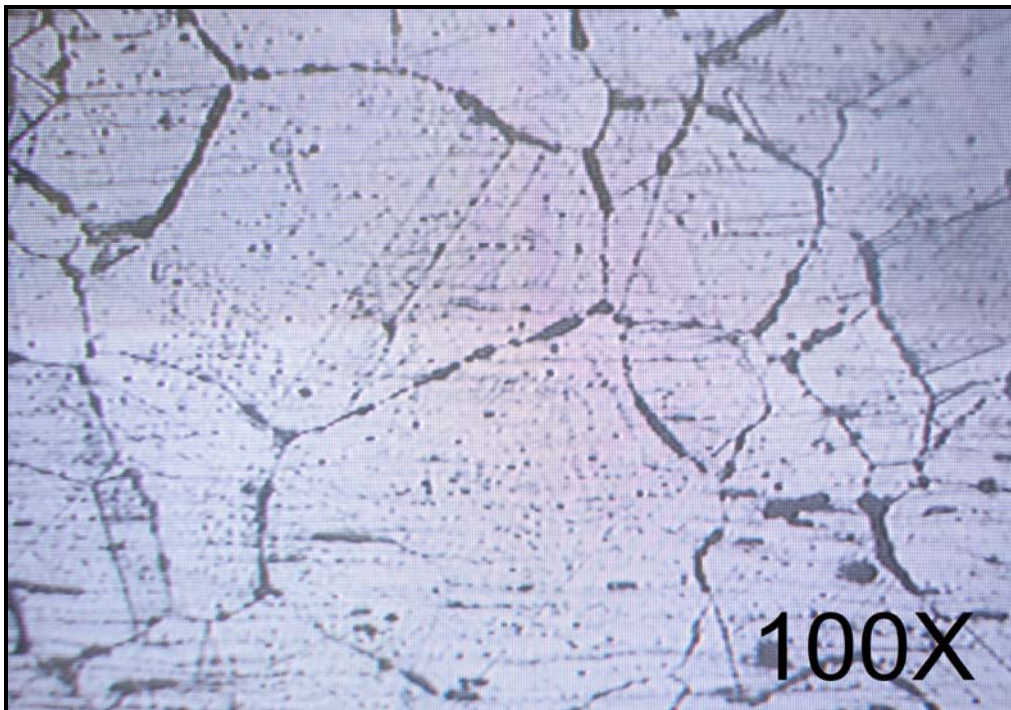
En las figuras 48 a la 50 se encuentran los resultados de la metalografía realizada, mostrando una vez más la diferencia en microestructura que se da a lo largo de la superficie. Estas imágenes corresponden a los puntos señalados en la figura 47.

Figura 48. Metal base. Punto a.



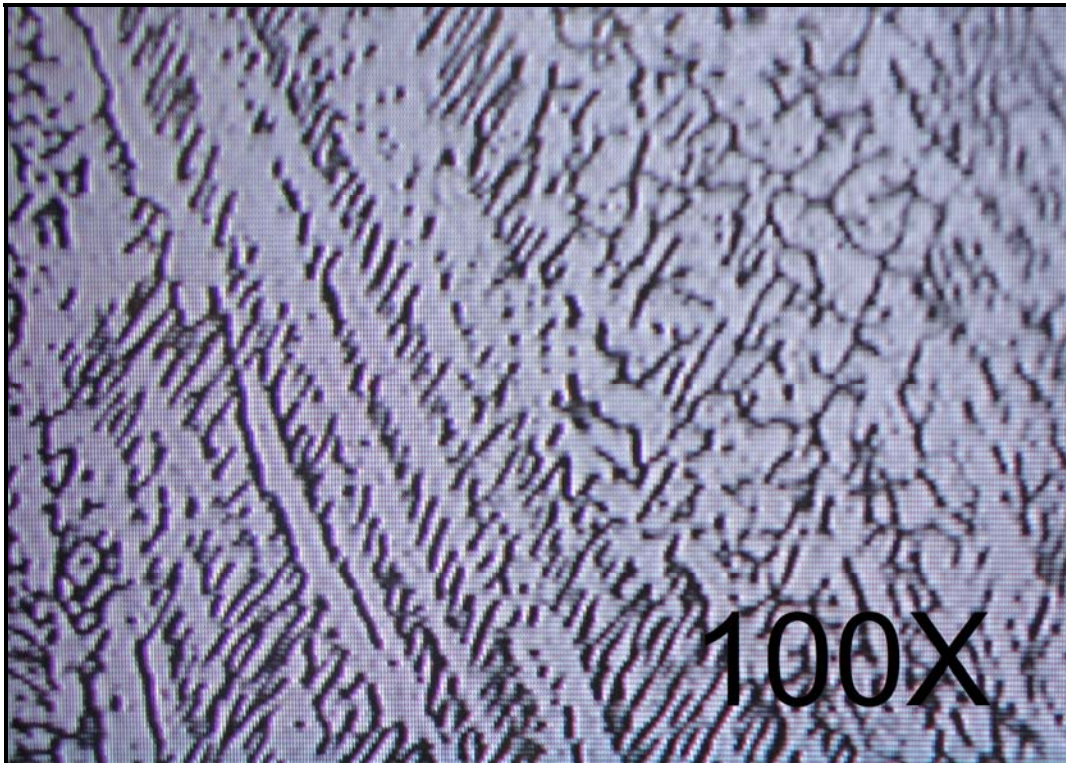
FUENTE: El autor

Figura 49. Zona afectada térmicamente. Punto b.



FUENTE: El autor.

Figura 50. Metal de soldadura. Punto c



FUENTE: El autor

5.1.3.4 Resultados de microdureza proceso GTAW (WPS 2-01)

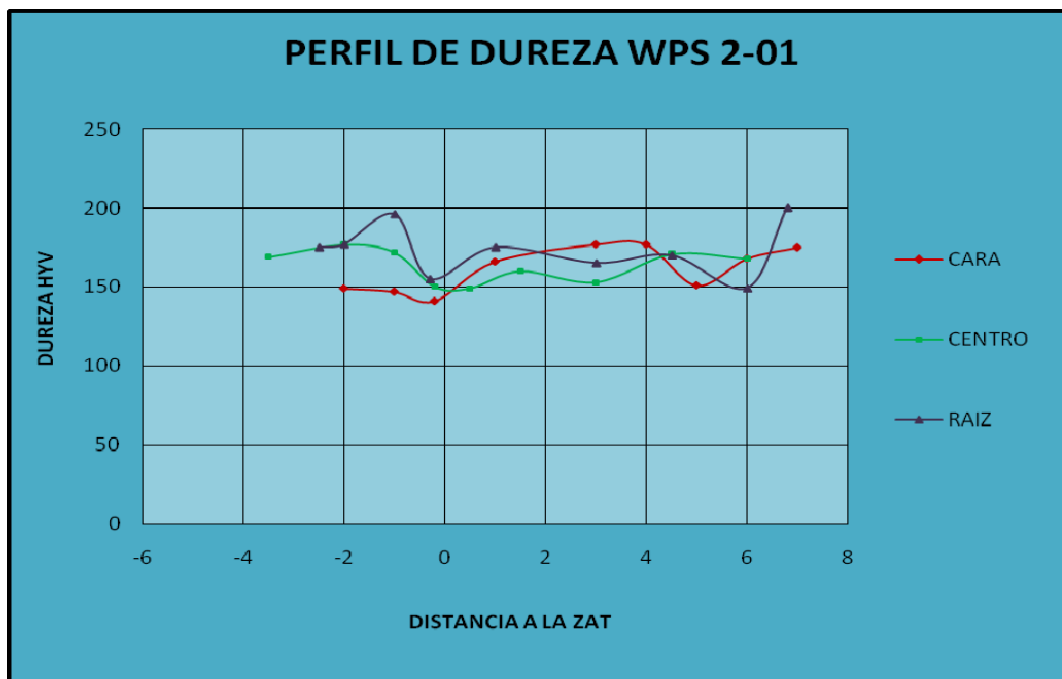
Los resultados obtenidos de microdureza para el proceso GTAW se muestran en La tabla 17 y para su mejor interpretación se encuentran en La figura 51. Nuevamente se observa una disminución de dureza en la zona afectada termicamente pero en este caso La variación no es tan marcada como en los procesos anteriores.

Tabla 67. Distribución de dureza del procedimiento 2-01

CARA		CENTRO		RAIZ	
DUREZA	DISTANCIA (mm)	DUREZA	DISTANCIA (mm)	DUREZA	DISTANCIA (mm)
149	-2	169	-3,5	175	-2,5
147	-1	177	-2	177	-2
141	-0,2	172	-1	196	-1
166	1	150	-0,2	155	-0,3
177	3	149	0,5	175	1
177	4	160	1,5	165	3
151	5	153	3	170	4,5
168	6	171	4,5	149	6
175	7	168	6	200	6,8

FUENTE: El autor

Figura 51. Perfil de dureza de la unión soldada por el proceso 2-01



FUENTE: El autor.

5.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.2.1 Proceso SMAW (WPS 1-01)

5.2.1.1 Soldabilidad Operativa

5.2.1.1.1 Examen Visual: Se observó un cordón sin porosidades, lo que indica que la técnica utilizada fue correcta; tampoco se observaron concavidades, cráteres ni grietas.

El cordón fue uniforme, lo que originó buena presentación y finalmente cumplió con lo esperado. Resultado, aprobado.

5.2.1.1.2 Examen Radiográfico: La soldadura exhibe una imperfección en el extremo derecho del cordón; dicha imperfección no excede la dimensión máxima permisible (20% de t ó 1/8 de pulgada), por tanto es juzgada como aceptable según QW-191.2.2 sección IX del código ASME.

Adicionalmente, no se presentan indicaciones redondeadas en forma típica agrupadas. Resultado, aprobado.

5.2.1.1.3 Calificación De Procedimiento

RESISTENCIA DE TENSIÓN Según el código ASME sección IX numeral QW-153 y QW/QB-422, la tensión mínima especificada para el acero inoxidable 304 es de 75KSI (515MPa). Al obtener los resultados de las pruebas de tensión de las uniones en estudio, se puede observar que se cumplen los criterios de aceptación mencionados en el código pues se la resistencia es superior a la mencionada anteriormente.

ENSAYO DE DOBLEZ TRANSVERSAL DE CARA Y DE RAÍZ. Los especímenes de doblez guiado no presentaron defectos abiertos en la soldadura ni en la zona afectada por el calor en ninguna dirección, cumpliendo con los criterios de aceptación especificados en QW-163 del código ASME sección IX; se observó una soldadura completamente sana.

5.2.1.2 Soldabilidad Metalúrgica: Este análisis es muy importante, ya que hace referencia a las modificaciones estructurales originadas por cambios de composición durante el proceso de soldadura y trae como consecuencia variaciones en las propiedades mecánicas y en este caso por tratarse de un acero inoxidable, puede producir cambios que afecten la resistencia a la corrosión del metal.

5.2.1.2.1 Macroataque. Al examinar las secciones rectas sometidas a macroataque, se observa que el metal de soldadura y la zona afectada por el calor muestran fusión completa sin presencia de grietas.

5.2.1.2.2 Metalografía. Al realizar el análisis del metal base, la zona afectada térmicamente y el metal de soldadura (ver figuras 28, 29, 30 y 31), se tiene que:

El metal base revela una estructura austenítica; La zona afectada térmicamente muestra crecimiento de grano de austenita y el metal de soldadura presenta una estructura de fundición.

5.2.1.2.3 Dureza. Al observar los perfiles de dureza de la tabla 11 y figura 32, se tiene que los valores obtenidos son variables y oscilan en el rango de 160 a 240 HV, excediendo el valor de dureza del acero 304 (213 HV), en la raíz del cordón.

5.2.2 Proceso GMAW (WPS 3-01)

5.2.2.1 Soldabilidad Operativa

5.2.2.1.1 Examen Visual. Los especímenes soldados por el procedimiento 3-01 manifiestan penetración de junta completa con fusión completa de metal de soldadura y metal base, pero su presentación no es favorable. Se encuentran presentes gran cantidad de puntos alrededor del cordón, como producto del chisporroteo en el transcurso del procedimiento; adicionalmente, presenta excesivo sobre espesor y aunque el cordón es uniforme, es muy ancho (Ver figura 15).

5.2.2.1.2 Examen Radiográfico. En este caso particular la soldadura se considera aceptable, pues las imperfecciones no exceden los límites especificados en cuanto a tamaño según QW-191.2.2. Aún así, en la figura 33 se alcanza a apreciar por los laterales de la radiografía, que la constitución de la soldadura es ancha, desfavoreciendo su presentación final.

5.2.2.1.3 Calificación De Procedimiento

RESISTENCIA DE TENSIÓN. Las probetas sometidas a tensión presentan una resistencia mayor a la especificada en QW/QB -422; por lo tanto, el diseño del procedimiento fue el adecuado y el concepto en esta prueba mecánica es aprobado (ver tabla 13).

ENSAYO DE DOBLEZ DE CARA Y DOBLEZ DE RAÍZ. Los resultados de dobléz de raíz son aceptables ya que al someter la unión soldada a este tipo de pruebas no hubo presencia de defectos en ninguna dirección, situación diferente a la que se presentó en el dobléz de cara donde una de las probetas presentó defectos abiertos mayores a 1/8" (3,18mm), incumpliendo con los criterios de aceptación especificados en el numeral QW-163 del código ASME.

5.2.2.2 Soldabilidad Metalúrgica

5.2.2.2.1 Macroataque: Al realizar el ataque a la unión soldada (ver figura 37) se pone de manifiesto que no hay grietas y la fusión es completa. De nuevo la soldadura muestra un buen resultado.

5.2.2.2.2 Metalografía. Como se puede apreciar en la figura 39, 40 y 41, el metal base presenta estructura austenítica propia del AISI 304; en cuanto a la zona afectada térmicamente, se da leve crecimiento de grano y en el metal de soldadura se produce la estructura de fundición.

5.2.2.2.3 Dureza. En este cordón el perfil de dureza oscila entre 103 y 206 HV; no excede el valor de dureza máximo del metal base pero es el perfil más irregular de los obtenidos para los tres procesos aplicados, generando posiblemente concentración de esfuerzos en el metal.

5.2.3 Proceso GTAW (WPS 2-01)

5.2.3.1 Soldabilidad Operativa

5.2.3.1.1 Examen Visual. La soldadura realizada según WPS 2-01 (ver figura 14) presenta penetración de junta completa con fusión completa de metal de soldadura y metal base. Posee excelente presentación pues el cordón es uniforme, sano, no hay chisporroteo ni distorsión superficial de ningún tipo. Concepto, aprobado.

5.2.3.1.2 Examen Radiográfico. La radiografía de este cordón de soldadura presenta un punto claro que puede ser una inclusión de Tungsteno pero que no excede la dimensión máxima permisible de 1/8 de pulgada, especificada en la

sección QW-91.2.2 de la sección IX del código ASME (ver figura 43); adicionalmente se observa un par de indicaciones circulares que pueden ser poros pero que al igual que la inclusión, tienen un tamaño que no afecta la calidad de la soldadura. En general, el cordón de soldadura es un cordón sano, libre de grietas y otras propiedades defectuosas. Concepto, aprobado.

5.2.3.1.3 Calificación De Procedimiento

RESISTENCIA A LA TENSIÓN. Al analizar los resultados de este procedimiento (ver tabla 16), se tiene que ambos especímenes cumplen con los requerimientos de resistencia a la tracción especificados en el código ASME por tanto el concepto es favorable.

ENSAYO DE DOBLEZ DE CARA Y DOBLEZ DE RAÍZ. Los especímenes de doblado guiado no presentan defectos abiertos en la soldadura ni en la zona afectada térmicamente así como tampoco presentan defectos abiertos en las esquinas del espécimen; por lo tanto no hay falta de fusión u otros defectos internos (ver figura 46). Finalmente el concepto es favorable.

5.2.3.2 Soldabilidad Metalúrgica

5.2.3.2.1 Macroataque. Al observar la muestra de macroataque, se observa que no hay presencia de grietas o falta de fusión, por lo cual la unión soldada se considera sana. Concepto: aprobado.

5.2.3.2.2 Metalografía. En las figuras 48 a la 50 se aprecia la microestructura del cordón realizado según WPS 2-01; en él se puede observar la austenita del metal base, el crecimiento de grano de la zona afectada térmicamente y la estructura de

fundición del metal de soldadura; en general la soldadura es sana sin presencia de fase sigma.

5.2.3.2.3 Dureza. En lo referente al perfil de dureza del cordón, los valores obtenidos oscilan entre un máximo de 200 HV y un valor mínimo de 141 HV, sin exceder el valor de dureza máximo del metal base y siendo además, el perfil más “uniforme” entre los tres procesos.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 CONCLUSIONES

- ✓ Para el proceso SMAW se puede dar un concepto favorable en cuanto a la soldabilidad operativa y estructural de la unión, pues además de producirse un cordón con muy buena presentación, se han cumplido todos los requerimientos según norma como es la resistencia de la junta en ranura, el grado de solidez y ductilidad de la junta soldada, reuniendo finalmente buenas condiciones de calidad; adicionalmente las uniones soldadas muestran una estructura sin defectos por lo tanto también hay buena soldabilidad metalúrgica.
- ✓ La soldabilidad operativa del acero 304 por el proceso GMAW es buena, más no excelente ya que el cordón no cumple las expectativas en cuanto a presentación por exceso de llenado del cráter y puede no alcanzarse el grado de ductilidad esperado. Adicionalmente en el transcurso del soldeo se generó bastante chisporroteo de metal, generando irregularidades superficiales que aunque no se consideran defectos, son indicaciones de una soldadura inapropiada.
- ✓ La soldabilidad operativa del acero inoxidable 304 con el proceso GTAW es buena pues cumple con los requerimientos establecidos por el código ASME y adicionalmente la presentación del cordón es excelente
- ✓ Al analizar los resultados metalográficos y de dureza del procedimiento 3-01 proceso GMAW, se puede concluir que hay buena soldabilidad metalúrgica pues no se produjo la indeseable fase sigma y los resultados fueron aceptables.

- ✓ Por el proceso GTAW, el acero inoxidable 304 presenta buena soldabilidad metalúrgica al igual que en los dos procedimientos anteriores, con una microestructura sana, libre de grietas pero a diferencia de los procesos SMAW y GTAW, la dureza a lo largo de la superficie transversal del cordón es menos variable.
- ✓ La microestructura de la unión soldada es similar en los tres procedimientos, presentando un crecimiento de grano en la zona afectada térmicamente y una estructura de fundición en el metal de soldadura.
- ✓ Si la presentación final es primordial al momento de realizar la unión entre dos piezas de acero inoxidable 304, es conveniente aplicar el proceso GTAW, seguido por el proceso SMAW; no es conveniente realizar la unión por el proceso GMAW ya que este proceso produce bastante chisporroteo y su apariencia no es buena.
- ✓ En cuanto a soldabilidad metalúrgica, se pudo observar que en ningún caso hubo formación de fase sigma ni sensitización en el área de metal afectado por el calor por tanto no hay “declinación de la soldadura”.
- ✓ En lo referente a propiedades mecánicas finales del acero inoxidable 304 soldado con SMAW, GMAW Y GTAW, se puede concluir que los tres procesos dan buenos resultados con una resistencia a la tracción en la unión soldada mayor o igual a la del metal base; sin embargo, al comparar los resultados obtenidos, la máxima resistencia a la tracción se obtiene con el proceso GTAW que adicionalmente presenta buena ductilidad.
- ✓ Tanto la correcta selección del metal de aporte adecuado, como la escogencia de personal calificado fueron agentes importantes que generaron el éxito en los tres procedimientos aplicados.

- ✓ Se verificó la información encontrada en la bibliografía en cuanto a que los aceros inoxidable poseen buena soldabilidad pero, se debe tener cuidado ya que estas uniones exigen una alta calidad y un procedimiento mal diseñado o personal de soldadura sin la habilidad que se requiere, puede ocasionar grandes pérdidas en el ámbito industrial.

6.2 RECOMENDACIONES

- ✓ Es importante tener equipos calibrados para poder llevar a cabo y de forma correcta el procedimiento diseñado.
- ✓ Se recomienda hacer un estudio adicional para el proceso GMAW en lo referente al gas de protección, variando las proporciones pues se cree que el exagerado chisporroteo producido y la mala presentación se pueden corregir variando la mezcla de gases aplicada.
- ✓ Para el proceso GTAW, se recomienda utilizar varilla de bajo espesor para lograr mayor penetración y evitar porosidades bajo el cordón de soldadura.
- ✓ Antes de llevar a cabo el proceso de soldadura por SMAW se recomienda realizar un chequeo del estado en que se encuentran los electrodos para evitar problemas al soldar que obliguen a retirar el cordón realizado y tener que volverlo a hacer.
- ✓ Al trabajar con este tipo de acero inoxidable es muy importante la limpieza superficial de las piezas para evitar inclusiones en el cordón de soldadura que afecten la calidad del mismo.
- ✓ Se recomienda la realización de ensayos no destructivos como la radiografía industrial ejecutada en este caso y/o líquidos penetrantes cuando se considere

necesario, de manera que se pueda detectar la presencia de defectos como inclusiones, poros, grietas entre otros, antes de poner la estructura en servicio o someterla a esfuerzos, de manera que se pueda realizar la correspondiente corrección y así evitar malos resultados o mal funcionamiento de la estructura.

- ✓ Al aplicar el proceso GMAW se recomienda hacer un relevo de esfuerzos para aumentar la ductilidad de la unión y eliminar el riesgo de falla por concentración de esfuerzos que se observó en la prueba de dobléz.

- ✓ Al aplicar el proceso GMAW se recomienda realizar un relevo de esfuerzos para evitar concentración de esfuerzos en el metal que provoque pérdida de ductilidad.

BIBLIOGRAFÍA Y ENLACES

- (1) A.S.M.E. BPVC, "Welding and Brazing Qualifications". section IX, 2007
- (2) A.P.I. STANDARD 1104 "Welding of Pipelines and related Facilities "Twentieth edition, November 2005.
- (3) ACERIND S.C. Soldadura de los aceros inoxidables, SECCIÓN I, II Y III, www.inoxidable.com, agosto/2010
- (4) GÓMEZ MORENO, Orlando José. Procesos de soldadura. Departamento de ingeniería metalúrgica U.I.S. Bucaramanga, 1983.
- (5) INDURA tecnología a su servicio. Manual de sistemas y materiales de soldadura, pág.58.
- (6) Manual de operación del equipo radiográfico Balteau NDT, serie Baltospot GFD165
- (7) G.L, Kehl. Fundamentos de la práctica metalográfica. Madrid, 1963
- (8) VANDER, Voort. Metallography principles and practice, Materials and engineering series.
- (9) BALDOVINO, Patricia. Evaluación de la soldabilidad de los aceros estructurales ASTM A-36, ASTM A572 GRADO 50, ASTM A588 GRADO B y sus combinaciones según código AWS D1.1 2000. Universidad Industrial de Santander, 2002

- (10) Catálogo de productos LINCOLN, www.lincolnelectric.com
- (11) METALS HANDBOOK. Metallography, structures and phase diagrams 8th edition, Vol 8.
- (12) METALS HANDBOOK. Mechanical testing 9th edition, Vol.8
- (13) METALS HANDBOOK. Atlas of microstructures of industrial alloys. 8th edition. Vol.7
- (14) METALS HANDBOOK. Welding, Brazing and Soldering
- (15) METALS HANDBOOK. Nondestructive evaluation and quality control. 9th edition, Vol.17.
- (16) Índice de electrodos West Arco, www.westarco.com
- (17) ASTM E407 Practice for micro etching metals and alloys
- (18) ASTM E384-10 Knoop and Vickers hardness of materials.
- (19) ASTM E92-82 (2003) e1. Standard test method for Vickers hardness of metallic materials.
- (20) ASTM E94-04. Standard guide for radiographic examination
- (21) ASTM E3-09 (2007) e1. Standard guide for preparation of metallographic specimens.
- (22) ASTM E340-00. Test method for macro etching metals and alloys.

(23) Índice de electrodos West Arco, www.westarco.com, agosto/2010.