

# Análisis de soldabilidad de aceros inoxidables con aceros de medio y bajo carbono por SMAW

Analysis of stainless steel weldability with medium and low carbon by SMAW steel

Fecha de Recepción: 24 de octubre de 2013  
Fecha de Aprobación: 23 de noviembre de 2013

José Luddey Marulanda Arevalo\*  
Victor Manuel Burbano\*\*  
Jaime Andrés Peláez\*\*\*

## Resumen

Se presenta un estudio de la soldabilidad de aceros inoxidables austeníticos AISI 304 y AISI 316 con aceros de bajo y medio carbono AISI 1020 – AISI 1045, empleando como materiales de aporte los electrodos EutecTrode® 52 NG, 54 NG y 57 NG, mediante el proceso de arco eléctrico con electrodo revestido (SMAW). Para analizar la soldabilidad de estos electrodos cuando se realiza la unión de aceros inoxidables con aceros al carbono, se practicaron pruebas metalográficas y ensayos mecánicos de dureza, dobléz y tracción, con el fin de observar el comportamiento tanto de la zona afectada térmicamente como del cordón de soldadura, a partir del cambio en las propiedades mecánicas y metalúrgicas en las diferentes regiones de las uniones soldadas. Durante el proceso de soldadura se siguió una especificación del procedimiento de soldadura (WPS), para que los resultados fueran repetibles, minimizando los problemas de agrietamiento en

## Abstract

It presents a weldability study of the austenitic stainless steels AISI 304 and AISI 316 with medium and low carbon steel AISI 1020 – AISI 1045, using as filler materials, the electrodes Eutectrode® 52 NG, 54 NG and 57 NG, by the shield metal arc welding process (SMAW). To analyze these electrodes' weldability for joining stainless steels with carbon steels, some metallographic and mechanical tests were performed for hardness, bends and strength, in order to observe the behavior, both in the heat affected zone, and in the weld bead, regarding the welded joints changes in the mechanical and metallurgical properties around the different welded regions. During the arc welding process, it was followed a welding procedure specification (WPS), in order to enable that the results were repeatable, and minimizing the hot and the cold cracking, the sigma phase formation and the carbides precipitation' problems.

\* Ph.D. Universidad Tecnológica de Pereira (Colombia). jlmarulanda@utp.edu.co

\*\* Universidad Tecnológica de Pereira (Colombia).

\*\*\* Universidad Tecnológica de Pereira (Colombia).

caliente, agrietamiento en frío, formación de fase sigma y precipitación de carburos.

**Palabras clave:** Aceros al carbono, Aceros inoxidables, Electrodo, Proceso SMAW, Soldadura eléctrica, Soldabilidad de aceros.

**Keywords:** Carbon Steels, Stainless Steels, Electrode, Welding SMAW Process, Electrical Welding, Steel weldability.

## I. INTRODUCCIÓN

La ciencia de la soldadura se está modernizando a grandes pasos, aunque sus principios básicos sean los mismos. A pesar de los grandes avances tecnológicos en la soldadura, esta sigue siendo susceptible a fallas, razón por la cual se debe seguir investigando en la soldabilidad de los diferentes materiales, ya que ella juega un papel muy importante en la calidad de las juntas soldadas. Durante el proceso de soldadura ocurre la coalescencia o fusión del material que se quiere unir, y posteriormente se solidifica; estos cambios de estado se llevan a cabo en tiempos muy cortos, afectando la microestructura de los aceros y modificando las propiedades físicas, mecánicas y químicas; además, se pueden generar alteraciones dimensionales de la pieza en la unión soldada; por tal motivo, se deben controlar las variables de soldeo y establecer los límites operativos que permitan obtener soldaduras sanas, que puedan soportar los requerimientos mecánicos y demandas extremas del servicio en su vida útil [1, 2].

Es importante determinar qué tipo de material de aporte es el más apropiado en la unión de estos aceros, utilizando ensayos de tracción, ensayos de doblez, de dureza y metalográficos, ya que durante la soldadura se pueden presentar fallas o disminución de sus propiedades mecánicas [3, 4]. La creciente aplicabilidad de los aceros inoxidable en la fabricación de componentes de la industria petroquímica, química y de la vida cotidiana, así como los cambios microestructurales que pueden ocurrir en este material durante los procesos de soldadura, hacen necesario estudiar la soldabilidad de estas uniones [5, 6].

Durante la soldadura de los aceros inoxidable austeníticos se recomienda mantener lo más baja posible la temperatura del material base y de la zona afectada térmicamente (ZAT). Esto se logra usando bajas intensidades de corriente, arco corto, secuencia de paso peregrino, cordones

cortos o, simplemente, esperando que la pieza se enfríe entre cordón y cordón. Se puede limitar la temperatura a 70 °C cerca del cordón de soldadura [7, 8]. En el rango de 420-850 °C el cromo y el carbono disueltos en estos aceros se combina y precipita en el borde de grano como carburo de cromo. La disminución de Cr en las adyacencias del borde de grano deja poco Cr para formar la película protectora de óxido de cromo. Esta situación, que deja al acero inoxidable vulnerable a ciertos medios, se denomina sensitización. En la soldadura de estos aceros tiende a ocurrir la sensitización principalmente en bandas paralelas al cordón de soldadura [8, 9].

El análisis de la soldabilidad de los aceros inoxidable con aceros de medio carbono permitirá una mejor selección de los materiales de aporte para realizar la unión entre estos aceros, contribuyendo a realizar mejores procedimientos de soldadura; para ello se llevó a cabo este estudio, en el que se realizaron uniones de acero inoxidable con aceros de medio carbono utilizando diferentes materiales de aporte, y las probetas soldadas fueron sometidas a ensayos mecánicos y análisis metalográficos.

### *A. Soldabilidad de los aceros inoxidable austeníticos*

Los aceros inoxidable austeníticos contienen por lo menos 18% de cromo y otros elementos de aleación, como níquel, molibdeno, titanio y columbio, para mejorar la resistencia a la corrosión y la oxidación, y para que a alta temperatura mantengan sus propiedades mecánicas. El carbono incrementa las propiedades mecánicas a altas temperaturas, pero disminuye la resistencia a la corrosión, debido a la formación del carburo de cromo. Estos aceros tienen una alta soldabilidad, sin embargo, hay ciertas precauciones que se deben tener en la zona afectada térmicamente y en el cordón de soldadura, para obtener un cordón sano. En la práctica se recomienda pasar una tela húmeda después de solidificarse el cordón de soldadura, para que este se enfríe rápidamente

y se disminuya la posibilidad de formar la fase sigma, y de que el cromo se combine con las trazas de carbono para formar carburos [6, 10].

Se debe controlar la presencia de carbono en el metal de aporte, fundente, escoria o gas de protección, debido a que este elemento forma carburos de cromo, lo que disminuye la cantidad de este elemento de aleación, llevando a disminuir la resistencia a la corrosión de los aceros inoxidables; además, la humedad en el recubrimiento de los electrodos se debe mantener lo más baja posible, debido a que puede producir porosidad en el cordón de soldadura. Tras la soldadura, se debe retirar la escoria con grata de acero inoxidable y trabajar los electrodos con un 15% menos de amperaje que los electrodos de acero al carbono (E-XXXX). Para asegurar que la estructura del cordón de soldadura tenga una resistencia a la corrosión similar o mayor al metal base, el metal depositado en el cordón de soldadura generalmente es más rico en cromo y níquel que el metal base. Según la AWS, los electrodos recomendados son los de bajo hidrógeno y de tipo básico, como los EXXX-15, EXXX-16 y EXXX-17 [6, 11].

El agrietamiento en caliente de la soldadura es generado por la segregación de constituyentes de bajo punto de fusión en los límites de grano, lo que lleva a la rotura intergranular, cuando son aplicados esfuerzos de tensión o de compresión; el mayor responsable de este problema es el azufre en forma de sulfuros, cuyo efecto tiende a incrementarse con la presencia de níquel y silicio; este problema es predominante en los aceros totalmente austeníticos. Para reducir la probabilidad de ocurrencia de este fenómeno en el cordón de soldadura se adicionan elementos de aleación para que formen pequeñas cantidades de ferrita en los límites de grano, aumentando su área y previniendo la aparición de películas continuas en dichos límites de grano. Para lograr una alta soldabilidad de estos aceros se requiere que la ferrita se encuentre en pequeñas cantidades, entre

5% y 10%, debido a que el aumento de la fase ferrítica en el acero aumenta la posibilidad de que se forme la fase sigma, que es un intermetálico duro y frágil, que fragiliza toda la microestructura del acero [6]. La fase sigma se forma durante el enfriamiento, en el rango de 870 °C a 530 °C, y puede ser redisuelta con calentamientos del orden de 1100 °C, y su formación evitada por un enfriamiento rápido [8].

Una ayuda gráfica muy utilizada por los soldadores de aceros inoxidables austeníticos es el diagrama de Schaeffler (presentado en la Fig. 1), el cual tiene una amplia aplicación para determinar el porcentaje de ferrita en estas aleaciones. Para la construcción de este diagrama, todos los estabilizadores de la austenita fueron agrupados, y sus efectos son expresados en términos de níquel equivalente (Nieq), es decir, la cantidad de austenizantes que serían necesarios para producir el mismo efecto del níquel. Lo mismo se hace para los elementos ferritizantes, que son expresados en términos de cromo equivalente (Creq). Además de la cantidad de ferrita, el diagrama de Schaeffler puede también ser utilizado para predecir el tipo de microestructura que se va a encontrar en el cordón de soldadura.

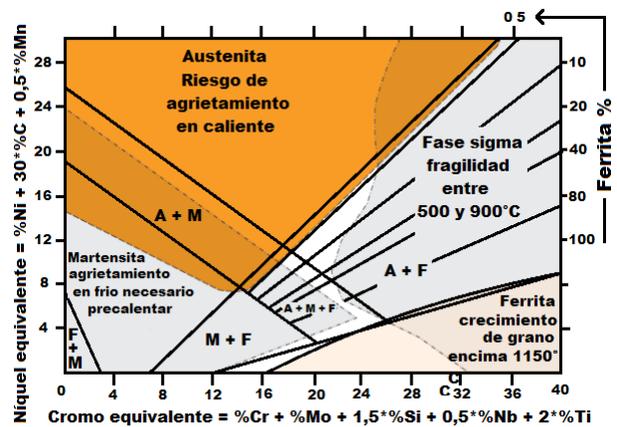


FIG. 1. Diagrama de SCHAEFFLER [5, 8, 11, 13].

Las expresiones matemáticas para calcular el Creq y el Nieq son: [6, 8, 11].

$$C_{req} = \%Cr + \%Mo + 1,5 \%Si + 0,5 \%Nb$$

(1)

$$N_{req} = \%Ni + 30 \%C + 0,5 \%Mn$$

(2)

### ***B. Soldabilidad de aceros de medio carbono***

En la práctica, el acero es una aleación de hierro combinado con menos de 1% de carbono, aproximadamente, además de pequeñas cantidades de otros elementos; se caracteriza por su gran resistencia mecánica, al contrario del hierro puro, que resiste muy poco la deformación plástica, por estar constituido solo por cristales de ferrita. Cuando el hierro se alea con carbono, se forman estructuras diferentes, que permiten un gran incremento de su resistencia; esta cualidad y su abundancia han constituido al hierro como el material más utilizado durante varios siglos [9, 10]. El aumento del carbono, como recurso para aumentar la resistencia del acero, trae problemas de soldabilidad; como consecuencia, a mayor contenido de carbono en el acero, menor la soldabilidad sin comprometer su resistencia mecánica. Piezas de gran espesor de acero AISI 1045 no son soldables por medios comunes sin comprometer su resistencia, ya que su contenido de carbono disminuye la soldabilidad. El aumento de temperatura en la zona de la soldadura y su posterior enfriamiento pueden templar el acero en las zonas próximas a la soldadura, produciendo fragilidad y falla en la zona afectada térmicamente. Existen aceros de medio carbono soldables, los cuales tienen aleantes que evitan la fragilización, pero debe estar especificado el método de soldadura por utilizar y las variables del proceso, como el requerimiento de precalentamiento, entre otros [6, 12, 13].

## **II. METODOLOGÍA**

En las uniones soldadas se determinaron algunas propiedades mecánicas por medio de ensayos de tracción y pruebas de doblez, en donde

normalmente se requieren pruebas de doblez de cara y raíz. La prueba de dureza se realizó en la sección transversal de la zona afectada térmicamente y en el cordón de soldadura, debido a que hay una correlación entre esta propiedad y la resistencia a la tensión; esta prueba es importante en materiales que tienen cambios microestructurales en la zona afectada térmicamente, debido al ciclo de temperatura durante la soldadura. Se realizaron los ensayos de tensión en la máquina universal de ensayos WPM ZD40. El análisis metalográfico se realizó en la sección transversal de la soldadura para obtener información microestructural del cordón de soldadura.

La preparación de las juntas se realizó, con bisel en V, a 6 platinas de acero inoxidable AISI 304, 6 platinas de acero inoxidable AISI 316, 6 platinas de acero de medio carbono AISI 1020 y 6 platinas de acero de medio carbono AISI 1045, todas ellas usadas como probetas. La aplicación del material de aporte se realizó uniendo una platina de acero inoxidable con una platina de acero de medio o bajo carbono, y fue realizada con los electrodos EutecTrode® 52 NG, 54 NG y 57 NG, por un soldador calificado para este fin, quien siguió la especificación del procedimiento de soldadura (WPS). Se usó corriente continua con polaridad invertida, manteniendo el arco lo más corto posible. Para la deposición de los electrodos se utilizó un equipo REGAS 350, en donde los amperajes de deposición de los electrodos estuvieron entre 70 A y 90 A. En la Fig. 2 se puede observar el cordón de soldadura depositado por el proceso SMAW. El corte de las probetas se realizó mediante sierra mecánica, y se trabajó con base en las normas ASTM E8 y ASME sección IX, correspondientes a cada una de las pruebas (14, 15). De cada platina soldada se obtuvieron 2 probetas para tracción, 2 probetas para doblez de cara, 2 probetas para doblez de raíz, 1 probeta para metalografía y 1 probeta para toma de durezas Vickers.



FIG. 2. Unión soldada de un acero inoxidable con un acero de medio carbono depositado por el proceso SMAW

### III. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En la Tabla 1 se resumen los resultados de las pruebas de tensión a las 24 probetas; en general, en estas pruebas las probetas se fracturaron por el material base más débil, aunque seis probetas de tracción se fracturaron por el cordón de soldadura. Cinco probetas que se fracturaron por el cordón de soldadura pasaron el ensayo, ya que superaron la resistencia mínima requerida. Dos probetas que fallaron por el cordón de soldadura fueron fabricadas soldando el acero AISI 304 con el acero AISI 1045, por medio del electrodo 57

NG; esta falla se debió a falta de penetración, que se pudo corroborar en la prueba de doblez; a pesar de la falta de penetración, una probeta pasó la prueba de tensión. Otra probeta que falló en el cordón de soldadura fue fabricada soldando el acero AISI 304 con el acero AISI 1020 por medio del electrodo 57 NG; esta probeta falló por una inclusión de escoria en el centro de la soldadura; a pesar de ello, esta probeta pasó la prueba tensión, ya que superó el esfuerzo máximo teórico del material base más débil. En general, cuando el material falló en el cordón de soldadura se debió a un procedimiento inadecuado en la aplicación del material de aporte.

**TABLA 1**  
RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE TRACCIÓN

Material base	Prueba	Material de aporte	Esfuerzo máximo (Kgf/mm <sup>2</sup> )	Esfuerzo de fractura (Kgf/mm <sup>2</sup> )	Material donde está la ruptura
304-1020	1	52 NG	40.424	31.620	1020
	2	52 NG	39.928	28.644	1020
	1	54 NG	41.044	27.280	1020
	2	54 NG	42.656	33.232	1020
	1	57 NG	42.780	30.876	1020
	2	57 NG	42.160	33.480	Unión

Material base	Prueba	Material de aporte	Esfuerzo máximo (Kgf/mm <sup>2</sup> )	Esfuerzo de fractura (Kgf/mm <sup>2</sup> )	Material donde está la ruptura
304-1045	1	52 NG	59.024	49.104	304
	2	52 NG	62.868	52.080	304
	1	54 NG	56.172	50.753	304
	2	54 NG	58.645	47.120	Unión
	1	57 NG	59.768	37.820	Unión
	2	57 NG	51.708	50.840	Unión
316-1020	1	52 NG	41.540	33.480	1020
	2	52 NG	42.532	31.000	1020
	1	54 NG	41.168	28.892	1020
	2	54 NG	43.276	31.124	1020
	1	57 NG	42.160	31.000	1020
	2	57 NG	41.168	33.232	1020
316-1045	1	52 NG	60.140	41.292	316
	2	52 NG	55.552	35.960	316
	1	54 NG	51.956	43.028	Unión
	2	54 NG	53.444	52.700	Unión
	1	57 NG	58.032	44.764	316
	2	57 NG	54.188	37.820	316

En la Fig. 3 se muestran imágenes de las probetas a las que se les realizó el ensayo de doblez de cara y de raíz de la unión soldada del acero inoxidable AISI 316 con el acero AISI 1020, usando como material de aporte el electrodo 57 NG. Estos ensayos permitieron obtener conclusiones interesantes acerca de la soldabilidad entre este tipo de materiales. Durante las pruebas de doblez

se observó que fallaron dos probetas soldadas con el material de aporte 57 NG, al someterlas al ensayo de doblez de raíz. En un análisis detallado de estas probetas se observó que este cordón de soldadura tenía una penetración insuficiente, siendo esta una de las causas principales por las cuales estas probetas soldadas también fallaron en el ensayo de tracción.



a) Dobleza de cara



b) Dobleza de raíz

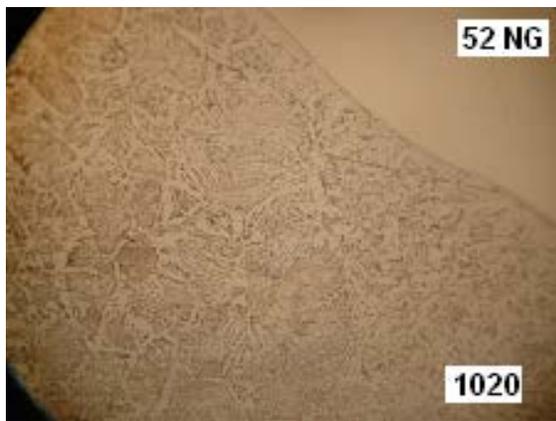
FIG. 3. Resultados de doblez de la unión soldada del acero inoxidable AISI 316 con acero AISI 1020 utilizando el electrodo 57NG

El proceso de ataque químico para el análisis metalográfico se realizó en dos etapas, debido

a que los materiales base tienen composiciones químicas diferentes. En las micrografías de la

Fig. 4 se puede observar que solo en una de ellas se puede ver la microestructura de la soldadura, debido a que el material de medio carbono fue atacado con nital al 2% y el cordón de soldadura no sufrió cambio por tener una composición química diferente. El acero inoxidable y la soldadura tienen una composición química similar y se atacaron con agua regia, la cual quemó el límite entre el acero de medio carbono con la soldadura.

El tipo de reactivo para los ataques químicos está regido por la norma ASTM E 407 (16). El tamaño del grano en la zona afectada térmicamente (ZAT) no tuvo un crecimiento notable, pero sí se observa la transición de la microestructura entre el material base y el material de aporte. El límite de la zona de fusión muestra el crecimiento de granos columnares típicos de la ZAT.



a) Acero AISI 304 y electrodo 52NG

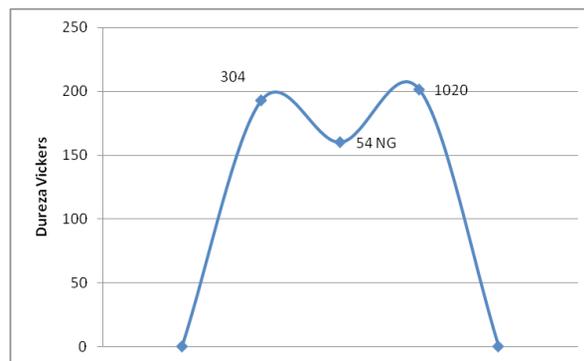


b) Acero AISI 1020 y electrodo 52NG

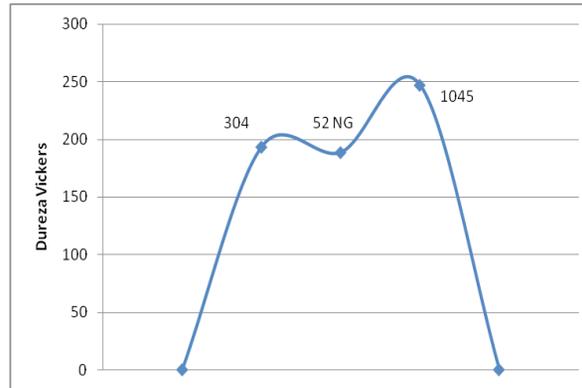
FIG. 4. Microestructura del acero AISI 304 soldado con el acero AISI 1020, utilizando el electrodo 52NG a 200X

La prueba de microdureza fue realizada bajo la norma ASTM E384 (17). Las durezas se tomaron en la zona afectada térmicamente y en el centro del cordón de soldadura. En la Fig. 5 se observan las tres durezas tomadas en los cordones de soldadura; en estas gráficas de dureza, el cordón de soldadura tiene un comportamiento intermedio

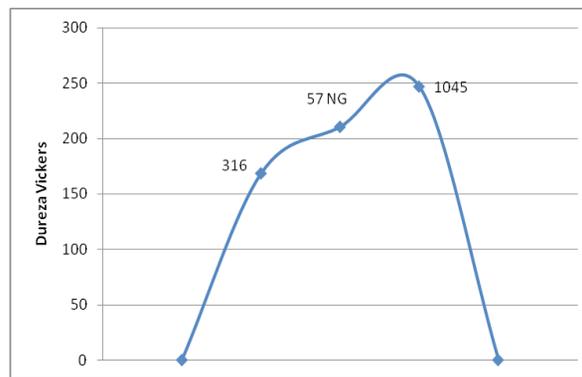
entre los dos materiales base que se unen. Estos perfiles de dureza tienen un comportamiento normal, y en conjunto con el ensayo de doblez, no se observó ninguna anomalía que indique una disminución de la soldabilidad de las uniones.



a) Dureza Vickers en los aceros AISI 304-1020 y en el cordón de soldadura, soldados con electrodo 54NG



b) Dureza Vickers en los aceros AISI 304-1045 y en el cordón de soldadura, soldados con electrodo 52NG



c) Dureza Vickers en los aceros AISI 316-1045 y en el cordón de soldadura, soldados con electrodo 57NG

FIG. 5. Durezas Vickers en los cordones de soldadura y la zona afectada térmicamente.

#### IV. CONCLUSIONES

Los ensayos de doblez, dureza y tensión demostraron que estos tres tipos de electrodos, EutecTrode 52 NG, 54 NG y 57 NG, tienen una alta soldabilidad para unir aceros inoxidables austeníticos con aceros de medio y bajo carbono. Además, la fractura de las probetas por la soldadura, en los ensayos de doblez y tracción, se debió a problemas ajenos al proceso, como presencia de inclusiones de escoria o falta de penetración, defectos que actúan como concentradores de esfuerzos y son producidos por una mala aplicación del material de aporte.

Analizando los ensayos mecánicos y metalográficos realizados se concluye que el material de aporte que garantizó las mejores propiedades mecánicas y metalúrgicas es el EutecTrode 52 NG, debido a que su comportamiento en cada una de las pruebas realizadas fue el mejor; por tal motivo, se sugiere para tal fin.

El material de aporte de menor desempeño entre los tres electrodos, pero que tuvo un buen comportamiento, fue el EutecTrode 57 NG, a pesar de ser el recomendado por su fabricante para realizar este tipo de uniones; lo anterior, posiblemente, se debió a que este electrodo tiene poca penetración, por su baja entrada de calor.

## REFERENCIAS

- [1] J. Marulanda. “Proceso de soldadura por transferencia de metal en frío”. *Scientia et Technica*. N.º 38, junio de 2008. Universidad Tecnológica de Pereira.
- [2] R. Cortés, J. Villanueva, E. Ponce, M. Rojas y E. Rojas. “Estudio de la soldabilidad y corrosión del acero inoxidable AISI 904L con los agentes utilizados en la lixiviación del cobre”. *Revista Facultad de Ingeniería*, 12(2), UTA, CHILE. 2004.
- [3] J. Hicks. *Welded Design - Theory and practice*. Abington, Cambridge, England. 2000.
- [4] J. Marulanda, A. Zapata y D. Mesa. *Fundamentos en la soldadura de los metales*. Universidad Tecnológica de Pereira, 2007.
- [5] J. Peláez y V. Burbano. *Análisis de la soldabilidad de aceros inoxidables con aceros de medio carbono*. Universidad Tecnológica de Pereira. Pereira. 2008.
- [6] R. Ospina, H. Aguirre y H. Parra. “Soldabilidad en aceros inoxidables y aceros disimiles”. *Scientia et Technica*, N.º 34, mayo de 2007. Universidad Tecnológica de Pereira.
- [7] SAGER S.A. *Manual de soldadura*. SAGER, Cali, 2004.
- [8] A. Lázaro. *Propiedades y soldabilidad de los aceros inoxidables*. LINCOLN ELECTRIC. España, 2012.
- [9] S. Laufgang. *Tratamiento térmico de soldadura – prueba hidráulica de gasoductos*. TERMO SOLDEX S.A. 2003
- [10] F. Rodríguez. *Diseño y Construcción de Piezas Soldadas*. Barcelona: Ediciones EAC, 1970.
- [11] American Welding Society (AWS). *Welding Inspection Technology*. 2010.
- [12] WEST RODE. *Información técnica y publicaciones. Diagrama de Schaeffler*. Disponible en: <http://www.westrode.com/InfoTecnica/Diagrama%20de%20Schaeffler.pdf>. Enero de 2013.
- [13] INDURA. *Manual aceros inoxidables*. Disponible en: [http://www.indura.net/\\_file/file\\_1774\\_manualdeacerosinoxidables%20indura.pdf](http://www.indura.net/_file/file_1774_manualdeacerosinoxidables%20indura.pdf). Enero 2013.
- [14] American Society of Mechanical Engineers (ASME). *Código de Calderas y Recipientes Sujetos a Presión, Sección IX*. Disponible en: <https://law.resource.org/pub/us/code/ibr/asme.bpvc.ix.2010.pdf>. Enero 2013.
- [15] ASTM E8/E8M. *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*.
- [16] ASTM E407-07. *Standard Practice for Microetching Metals and Alloys*.
- [17] ASTM E384-11. *Standard Test Method for Knoop and Vickers Hardness of Materials*.