



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica

**ANÁLISIS DE LOS DEFECTOS INTERNOS EN LA UNIÓN
POR SOLDADURA ELÉCTRICA DE TUBERÍA DE ACERO
INOXIDABLE, DEL TIPO AUSTENÍTICO AISI 304**

Carlos Rovidio Ceferino López

Asesorado por el Ing. Carlos Enrique Chicol Cabrera

Guatemala, julio de 2016

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ANÁLISIS DE LOS DEFECTOS INTERNOS EN LA UNIÓN
POR SOLDADURA ELÉCTRICA DE TUBERÍA DE ACERO
INOXIDABLE, DEL TIPO AUSTENÍTICO AISI 304**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

CARLOS ROVIDIO CEFERINO LÓPEZ
ASESORADO POR EL ING. CARLOS ENRIQUE CHICOL CABRERA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO MECÁNICO

GUATEMALA, JULIO DE 2016

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Raúl Eduardo Ticún Córdova
VOCAL V	Br. Henry Fernando Duarte García
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

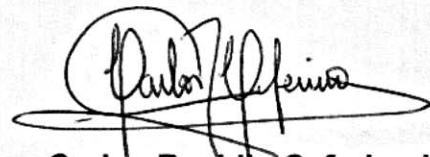
DECANO	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno (a. i.)
EXAMINADOR	Ing. Carlos Enrique Chicol Cabrera
EXAMINADOR	Ing. Hugo Leonel Ramírez Ortíz
EXAMINADOR	Ing. Elvis José Álvarez Valdéz
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

ANÁLISIS DE LOS DEFECTOS INTERNOS EN LA UNIÓN POR SOLDADURA ELÉCTRICA DE TUBERÍA DE ACERO INOXIDABLE, DEL TIPO AUSTENÍTICO AISI 304

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica, con fecha 24 marzo del 2014.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Carlos Rovido Ceferino López', written over a horizontal line.

Carlos Rovido Ceferino López

Guatemala 26 de mayo de 2016

Ingeniero
Roberto Guzmán Ortiz
Director de Escuela de Ingeniería Mecánica
Universidad de San Carlos de Guatemala
Presente

Ingeniero Roberto Guzmán:

Le saludo cordialmente. Atentamente le informo que se procedió con la asesoría y revisión del trabajo de graduación titulado, **"ANÁLISIS DE LOS DEFECTOS INTERNOS EN LA UNIÓN POR SOLDADURA ELÉCTRICA DE TUBERÍA DE ACERO INOXIDABLE, DEL TIPO AUSTENÍTICO AISI 304"**, desarrollado por el estudiante, Carlos Rovidio Ceferino López.

Se ha concluido satisfactoriamente, por lo que considero puede continuarse con el trámite correspondiente.

"Id y Enseñad a Todos"



Ing. Carlos Enrique Chicol Cabrera
Colegiado No. 6965
Asesor de tesis

Carlos Enrique Chicol Cabrera
Ingeniero Mecánico
Col. 6965



USAC

TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería Mecánica

Ref.E.I.M.177.2016

El Coordinador del Área Complementaria de la Escuela de Ingeniería Mecánica, luego de conocer el dictamen del Asesor y habiendo revisado en su totalidad el trabajo de graduación titulado: **ANÁLISIS DE LOS DEFECTOS INTERNOS EN LA UNIÓN POR SOLDADURA ELÉCTRICA DE TUBERÍA DE ACERO INOXIDABLE, DEL TIPO AUSTENÍTICO AISI 304** desarrollado por el estudiante **Carlos Rovidio Ceferino López, carné 2001-13580** recomienda su aprobación.

"Id y Enseñad a Todos"



Ing. Carlos Humberto Pérez Rodríguez
Coordinador Área Complementaria
Escuela de Ingeniería Mecánica



Guatemala, mayo 2016



USAC
TRICENTENARIA

Universidad de San Carlos de Guatemala


Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería Mecánica

Ref.E.I.M.194.2016

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica, de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor y con la aprobación del Coordinador del Área Complementaria del trabajo de graduación titulado: **ANÁLISIS DE LOS DEFECTOS INTERNOS EN LA UNIÓN POR SOLDADURA ELÉCTRICA DE TUBERÍA DE ACERO INOXIDABLE, DEL TIPO AUSTENÍTICO AISI 304** del estudiante **Carlos Rovidio Ceferino López**, carné No. **2001-13580** y luego de haberlo revisado en su totalidad, procede a la autorización del mismo.

"Id y Enseñad a Todos"


Ing. Roberto Guzmán Ortiz
Director
Escuela de Ingeniería Mecánica



Guatemala, julio de 2016

/aej

Universidad de San Carlos
de Guatemala

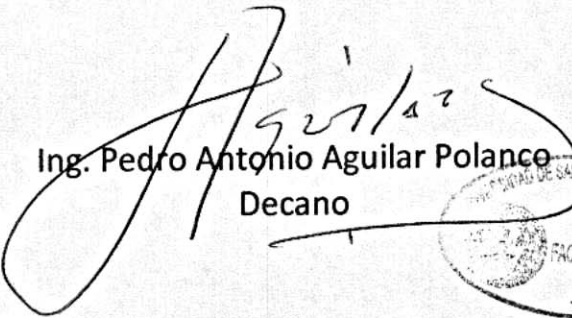


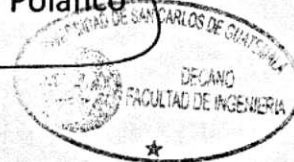
Facultad de Ingeniería
Decanato

DTG. 335.2016

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica, al Trabajo de Graduación titulado: **ANÁLISIS DE LOS DEFECTOS INTERNOS EN LA UNIÓN POR SOLDADURA ELÉCTRICA DE TUBERÍA DE ACERO INOXIDABLE, DEL TIPO AUSTENÍTICO AISI 304**, presentado por el estudiante universitario: **Carlos Rovidio Ceferino López**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:


Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Decano



Guatemala, julio de 2016

/gdech

ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por todas las bendiciones derramadas en mi vida, su inmenso amor al permitirme obtener este triunfo y por ser guía en mi camino.
- Mis padres** José Obdulio Ceferino (q. e. p. d.) y Julia López Morales, por su apoyo incondicional durante cada etapa de mi carrera universitaria.
- Mi esposa e hijos** Natalia Fabián Lucas, José Carlos y Nataly Ceferino Fabián, por su apoyo y amor incondicional.
- Mis hermanos** José Antonio, Fredy, Lilian, Saúl, Sergio, Cristian y Jorge Ceferino López.
- Mi familia** Mis abuelos Evangelina Ceferino (q. e. p. d.), Margarito López (q. e. p. d.) y Susana Morales, por su cariño y buenos consejos, a mis tíos y primos.
- Mis amigos** A todos y cada uno de ellos por nombre, por el apoyo y convivencias que me brindaron a lo largo de la carrera y en el campo laboral.
- .

AGRADECIMIENTOS A:

Dios	Por todas las bendiciones derramadas en mi vida, por permitirme cumplir un sueño y ser guía de mi camino.
Mi esposa	Licda. Natalia Fabián Lúcas, por su cariño y apoyo en la culminación de mi carrera.
Universidad de San Carlos de Guatemala	Por darme la oportunidad de desarrollarme como profesional en el campo.
Facultad de Ingeniería	Por brindarme los conocimientos necesarios para desarrollarme como ingeniero.
Escuela de Ingeniería Mecánica	Docentes y personal administrativo. En especial a mi asesor Ing. Carlos Enrique Chicol Cabrera, por su asesoría y colaboración en el presente trabajo de graduación y al Centro de Investigaciones de Ingeniería, por permitirme realizar los ensayos.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	VII
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
GLOSARIO	XI
RESUMEN.....	XV
OBJETIVOS.....	XVII
INTRODUCCIÓN.....	XIX
1. ANTECEDENTES	1
1.1. Historia del acero inoxidable.....	1
1.2. Descripción de los aceros inoxidable.....	2
1.3. Usos y aplicaciones del acero inoxidable	3
1.4. Composición química del acero inoxidable AISI 304 (UNS S30400).....	4
1.5. Acero inoxidable AISI 304 (Fe/Cr18/Ni10).....	5
1.6. Clasificación, características generales y metalurgia de los aceros inoxidable.....	6
1.6.1. Aceros martensíticos	6
1.6.2. Aceros inoxidable ferríticos	7
1.6.3. Aceros inoxidable austeníticos.....	8
1.6.4. Categorización de los aceros austeníticos	9
1.6.5. Aceros dúplex.....	10
1.7. Elementos de aleación de los aceros inoxidable	12
1.8. Estructura molecular de los aceros inoxidable, según su elemento de aleación	13
1.9. Diagrama de fases de los aceros inoxidable	17

1.9.1.	Diagrama hierro (Fe)-cromo (Cr).....	17
1.9.2.	Diagrama influencia del carbono	19
1.9.3.	Diagrama Fe-Cr-Ni a temperatura ambiente	21
1.9.4.	Diagrama de Schaeffler.....	22
1.10.	Comparación de las propiedades de los aceros inoxidables....	24
2.	CORROSIÓN EN LOS ACEROS INOXIDABLES.....	27
2.1.	Corrosión intergranular.....	28
2.2.	Corrosión galvánica.....	29
2.3.	Corrosión por contacto	32
2.4.	Picado o corrosión en forma de pinchazos de alfiler	33
2.5.	Corrosión por fatiga.....	33
3.	PROCESOS DE SOLDADURA UTILIZADOS EN LA UNIÓN POR FUSIÓN DE ACEROS INOXIDABLES.....	37
3.1.	Proceso de soldadura MIG.....	38
3.2.	Proceso de soldadura TIG	38
3.3.	Proceso de soldadura GTAW.....	39
3.4.	Gases inertes y gases activos para soldadura de acero inoxidable	39
3.4.1.	Gases utilizados en procesos de soldadura	40
3.5.	Gases utilizados en el proceso de soldadura TIG	42
3.6.	Composición química del electrodo o material de aporte.....	44
3.7.	Electrodo	45
3.7.1.	Electrodo revestido.....	45
3.7.1.1.	Partes del electrodo	46
3.7.1.2.	Condiciones de uso	47
3.7.2.	Electrodo desnudo o sin revestimiento.....	47
3.8.	Normas de aplicación.....	47

3.9.	Clasificación de electrodos para aceros al carbono	48
3.10.	Clasificación de electrodos para aceros de baja aleación	50
3.11.	Clasificación de electrodos para aceros inoxidables	52
3.11.1.	Clasificación de electrodos para soldaduras al arco con gas	54
3.12.	Ángulo o posición del electrodo con respecto a la pieza	55
3.13.	Arco eléctrico	57
3.14.	Movimientos del electrodo	57
3.14.1.	Movimiento de zigzag (longitudinal).....	57
3.14.2.	Movimiento circular	58
3.14.3.	Movimiento semicircular	59
3.14.4.	Movimiento en zigzag (transversal)	59
3.14.5.	Movimiento entrelazado.....	60
3.15.	Tipos de corrientes utilizadas en la soldadura de acero inoxidable	61
4.	DISEÑO DE JUNTAS, HOLGURAS Y TRASLAPES EN PIEZAS DE TUBERÍA DE ACERO INOXIDABLE.....	63
5.	DEFECTOS EN SOLDADURAS DE ACEROS INOXIDABLES	65
5.1.	Porosidad o filtración de gases.....	66
5.2.	Soplo magnético.....	66
5.3.	Socavaciones	67
5.4.	Falta de penetración.....	67
5.5.	Contaminación de la soldadura	68
5.6.	Simbología de polaridades en los procesos de soldadura	69
5.7.	Tabla de amperaje según el espesor del electrodo	70
5.8.	Normas de seguridad en los procesos de soldadura.....	71
5.9.	Pruebas no destructivas	73

5.9.1.	Ensayo de inspección visual	74
5.9.2.	Ensayo de líquidos penetrantes	75
5.9.3.	Ensayo por partículas magnéticas	76
5.9.4.	Ensayo por radiografía o rayos X.....	77
5.9.5.	Ensayo por ultrasonido industrial (UT)	78
5.10.	Pruebas destructivas.....	80
5.10.1.	Metalografía mediante examen macroscópico y microscópico	80
5.10.2.	Ensayo de tracción aplicado a tuberías.....	82
5.10.3.	Ensayo de doblado según código ASME sección IX.....	82
6.	METODOLOGÍA DE TRABAJO.....	83
6.1.	Análisis de variables.....	83
6.2.	Delimitación del área de estudio	83
6.3.	Norma aplicada a las probetas de ensayos	83
6.4.	Procedimiento	84
6.5.	Ordenamiento y análisis de la información.....	85
7.	ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	87
7.1.	Corte y preparación de las probetas de ensayo	87
7.2.	Soldadura de las probetas en taller, mediante proceso TIG	89
7.3.	Inspección visual de los cordones de soldadura en las probetas	92
7.4.	Ensayo de tracción de las probetas en la máquina universal...	92
7.5.	Ensayo de prueba hidrostática.....	98
7.6.	Ensayo de doblado perpendicular al eje de la probeta.....	102
7.7.	Análisis y discusión de resultados.....	105
7.7.1.	Inspección visual	105

7.7.2.	Ensayo de tracción	105
7.7.3.	Prueba hidrostática de rotura rápida.....	108
7.7.4.	Ensayo de doblado	108
CONCLUSIONES		111
RECOMENDACIONES.....		113
BIBLIOGRAFÍA.....		115
ANEXOS.....		119

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Estructura molecular.....	14
2.	Estructura molecular tipo bolas de palo.....	15
3.	Estructura molecular tipo llenado espacial	15
4.	Estructura molecular tipo cúbica	16
5.	Diagrama hierro (fe) –cromo (cr)	18
6.	Influencia del carbono ampliando el bucle gamma.....	20
7.	Diagrama Fe-Cr-Ni a temperatura ambiente.	21
8.	Diagrama de Schaeffler.....	23
9.	Electrodo revestido.....	46
10.	Movimientos de zigzag (longitudinal).....	58
11.	Movimiento circular.....	58
12.	Movimiento semicircular	59
13.	Movimiento zigzag (transversal)	60
14.	Movimiento entrelazado	60
15.	Falta de penetración.....	68
16.	Ensayo de inspección visual	75
17.	Corte de las probetas de ensayo ASTM A312, AISI 304.....	87
18.	Biselado de las piezas a soldar	88
19.	Purga de la tubería con gas argón	88
20.	Proceso de soldadura TIG.....	90
21.	Cordón de soldadura por proceso TIG	91
22.	Soldadura de insertos de varilla de acero inoxidable como tapones para sujeción de la probeta tubular, realizada con electrodo E308L	91

23.	Máquina universal para ensayo de tensión	93
24.	Falla por rotura de la soldadura en las probetas	95
25.	Gráfica esfuerzo-deformación	96
26.	Máquina para ensayo de presión hidrostática	100
27.	Ensayo a presión hidrostática	101
28.	Probeta de ensayo a presión hidrostática	101
29.	Apoyo de probeta en máquina universal para el ensayo de doblado..	103
30.	Probeta de ensayo de doblado	104
31.	Probetas de tubería ASTM A312 AISI 304 ensayadas	104

TABLAS

I.	Composición química del acero inoxidable AISI 304	4
II.	Propiedades del acero inoxidable AISI 304	5
III.	Elementos que modifican las propiedades del acero inoxidable.....	12
IV.	Propiedades mecánicas de los aceros inoxidables.....	26
V.	Interpretación para el último dígito, según la clasificación AWS de electrodos	49
VI.	Porcentaje aproximado de aleación en el depósito de soldadura.....	50
VII.	Tipo de corriente y revestimiento del electrodo según la Norma AWS ...	51
VIII.	Clasificación de electrodos para soldaduras al arco con gas	55
IX.	Comparación entre uso de corriente continua y alterna.....	61
X.	Simbología de polaridades para procesos de soldadura TIG	70
XI.	Amperaje para electrodos para soldadura TIG	70
XII.	Comparación de los porcentajes de elementos de aleación contenidos en el acero AISI 304 y el metal de aporte para la soldadura	90
XIII.	Datos obtenidos del ensayo de tracción	94
XIV.	Datos obtenidos del ensayo de prueba hidrostática	100
XV.	Datos obtenidos en el ensayo de doblado	103

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
S	Azufre
cm	Centímetro
Cu	Cobre
CA	Corriente alterna
CC	Corriente continua
CO₂	Dióxido de carbono
°C	Grados Celsius
°F	Grados Fahrenheit
H	Hidrógeno
Kg	Kilogramo
Kpsi	Kilolibras por pulgada cuadrada
MHz	Megahercio,
MPa	Mega Pascal
MIG	Metal inerte gas
mm	Milímetro
Mo	Molibdeno
O	Oxígeno
(-)	Polo negativo
(+)	Polo positivo
”	Pulgadas
Fe	Simbología del hierro
Ti	Titanio
Tg (W)	Tungsteno

TIG

Tungsteno inerte gas

GLOSARIO

AISI	Instituto Americano del Hierro y Acero, American Iron and Steel Institute.
ASME	Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos American Society of Mechanical Engineers.
ASTM	Sociedad Americana de Pruebas y Materiales American Society for Testing and Materials.
AWS	Sociedad Americana de Soldadura, American Welding Society.
Capilaridad	Propiedad en virtud de la cual la superficie libre de un líquido puesto en contacto con un sólido sube o baja en las proximidades de este, según que el líquido lo moje o no. Sus efectos son especialmente aparentes en el interior de los tubos capilares o entre dos láminas muy próximas.
Cobre	Elemento químico de número atómico 29, masa atómica 63,546 g/mol, símbolo Cu, punto de fusión a 1 085 °C.
Cobalto 60	Isótopo radiactivo sintético del cobalto, con un periodo de desintegración de 5,27 años.

Cromo	Elemento químico de número atómico 24, masa atómica 51,996 g/mol y símbolo Cr, es de color gris, muy duro, resistente e inoxidable. Punto de fusión a 1 875 °C y punto de ebullición a 2 665 °C.
Defecto	Discontinuidad interna o externa que altera las propiedades físicas, químicas y mecánicas de un cordón de soldadura, fuera del límite de valores aceptables por la norma aplicable.
DIN	Instituto Alemán de Normalización, Deutsches Institut für Normung.
Ductilidad	Capacidad de un metal de deformarse de forma elástica hasta llegar a un estado plástico sin romperse.
Ensayo	Procedimiento de aplicación de una técnica de inspección para determinar defectos o fallas.
GTAW	Soldadura de Arco Gas Tungsteno, Gas Tungsten Arc Weldin.
Hierro	Elemento químico de número atómico 26, situado en el grupo 8, periodo 4 de la tabla periódica de los elementos. Su símbolo es Fe y tiene masa atómica de 55,845 u. Punto de fusión a 1 538 °C y punto de ebullición a 2 862 °C.

Metal base	Material del cual están fabricadas las piezas o elementos a unir por medio de soldadura.
Método de ensayo	Procedimiento de aplicación de una técnica de inspección de fallas o defectos.
Neumoconióticos	Compuestos tóxicos en forma de polvos que producen una reacción inflamatoria fibrotizante de los pulmones por inhalación de los mismos.
Rigidez	Medida cualitativa de la resistencia a las deformaciones elásticas, producidas por un material.
Rotura	Acción o efecto de romperse, aplicado a un efecto físico o material. Desprendimiento de material bajo la acción de esfuerzos externos.
Tungsteno	Elemento químico de número atómico 74. Metal escaso en la corteza terrestre, se encuentra en forma de óxido y de sales en ciertos minerales.

RESUMEN

El acero inoxidable posee propiedades físicas, químicas y mecánicas ante el ataque de sustancias corrosivas, por lo que es muy utilizado en líneas de proceso para conducción de líquidos y sustancias altamente corrosivas en industrias de Guatemala. En los procesos industriales se utilizan tuberías de acero inoxidable normados por la ASTM A-312, empleando proceso de soldadura TIG para la unión de tuberías y sus accesorios, en algunos casos la unión se realiza por elementos roscados y bridas. Debido a las presiones y temperaturas de las sustancias que conducen, es necesario considerar los posibles defectos internos que se presenten en la unión por soldadura, los cuales pueden ocasionar fallas, roturas, pérdida de tiempo, paros de la producción y riesgos para el operario.

La tubería de acero inoxidable utilizada está normada por ASTM A-312 y es del tipo austenítico AISI 304, del cual se elaboran y sueldan probetas de ensayo para determinar los posibles defectos internos que puedan presentarse. Se utilizan ensayos no destructivos y destructivos (END), inspección visual, tracción, doblado y prueba de presión hidrostática.

Mediante consulta e investigación de diferentes autores y empresas dedicadas a la manufactura y distribución de aceros inoxidables, se realiza un compendio de información acerca de la clasificación, elementos de aleación y propiedades de los aceros inoxidables, en especial del tipo austenítico, serie AISI 304. Además, se hace mención sobre normas de seguridad que deben considerarse, por operarios de procesos de soldadura de aceros inoxidables y otros metales.

OBJETIVOS

General

Analizar las posibles averías o defectos internos, en la unión por proceso de soldadura TIG de tuberías de acero inoxidable del tipo austenítico AISI 304.

Específicos

1. Identificar los tipos de defectos internos en la unión por soldadura eléctrica de los aceros inoxidables, los cuales pueden ocasionar fallas por fractura de las piezas soldadas.
2. Enfatizar y contribuir en la selección de un método adecuado para la soldadura de tuberías de acero inoxidable, considerando que la misma estará expuesta a altas presiones, temperatura del líquido y agentes corrosivos como sales, solventes, ácidos, cloro y otros.
3. Aportar material de consulta en lo referente a soldadura de aceros inoxidables, para el curso de Procesos de Manufactura 2.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el acero inoxidable es un material muy utilizado en la industria alimenticia, química, farmacéutica y en elementos decorativos de proyectos constructivos. Las ventajas que ofrece frente a otros materiales, como sus propiedades físicas, químicas y mecánicas, resistencia al ataque de sustancias corrosivas, hacen que el acero inoxidable sea un material muy versátil para estas aplicaciones. Además, estas ventajas permiten su utilización en la conducción de líquidos, sin contaminarlos de herrumbre o corrosión.

Existe gran variedad de aplicaciones para el acero inoxidable, es utilizado en la fabricación de tanques de proceso, almacenamiento, utensilios de cocina, mesas de trabajo, tornillos, válvulas, tuberías y otros accesorios afines. En el ramo de la construcción, se utiliza como elemento decorativo, ya que ofrece una belleza inigualable, es de bajo mantenimiento y no se corroe con el ambiente.

Para efectos de esta investigación, la unión entre tuberías de acero inoxidable se efectuará por medio de proceso de soldadura TIG, con adición de material de aporte con características similares al metal base.

El proceso de soldadura TIG para acero inoxidable es confiable, sin embargo, hay cierta probabilidad que en la fusión de las piezas a unir se presenten fisuras internas, inclusión de partículas no deseadas y falta de penetración, las cuales pueden ocasionar fallas o roturas de las mismas.

1. ANTECEDENTES

1.1. Historia del acero inoxidable

La historia del acero inoxidable es relativamente corta y está en desarrollo continuo. Durante años, ha sido tema de discusión quién inventó los aceros inoxidables y cuándo se empezó a utilizar con fines industriales. En la actualidad, es de aceptación general que el acero inoxidable fue descubierto a inicios del siglo XX, cuando se descubrió que una pequeña cantidad de cromo (habitualmente un mínimo de 11 %) añadido al acero común, le daba un aspecto brillante y lo hacía altamente resistente al ataque de agentes ácidos y a la oxidación. Esta resistencia a la oxidación, denominada resistencia a la corrosión, es lo que hace al acero inoxidable diferente de otros tipos de acero. Sin embargo, aún existe cierto debate sobre quiénes y en dónde se produjo la primera aplicación para uso comercial.

Harry Brearley nació en Sheffield, Inglaterra, en 1871, probablemente él fue el inventor del acero inoxidable¹. Su padre era un fundidor de acero y mediante estudios privados y escuela nocturna, se volvió un experto en acero y en su producción. En 1908 le dieron la oportunidad de montar los laboratorios Brown Firth, financiados por las dos acerías principales de Sheffield de aquella época. En 1912 se le pidió resolver los problemas encontrados por un pequeño fabricante de armas, quien indicaba que los diámetros internos de los barriles de sus rifles se erosionaban demasiado rápido debido al calor y los gases de descarga. Por lo tanto, Brearley estaba buscando un acero con mayor

¹ *Breve historia del acero inoxidable*. <http://www.jnaceros.com.pe/blog/breve-historia-acero-inoxidable/>. Consulta: marzo de 2016.

resistencia a la erosión, no a la corrosión. Como parte de su investigación, decidió experimentar con un acero que contenía cromo, pues era conocido por tener un punto de fusión más alto que los aceros ordinarios.

Usando primero el proceso de crisol y luego un horno eléctrico con mayor éxito, se realizaron una serie de coladas con porcentajes de entre 6 y 15 de cromo y contenido variable de carbono. El primer acero realmente inoxidable fue fundido el 13 de agosto de 1913. Contenía 0,24 % de carbono y 12,8 % de cromo. En este momento Brearley seguía buscando un acero más resistente al desgaste, para examinar la estructura de los granos del acero necesitaba grabar (atacar con ácido) las muestras, antes de examinarlas bajo el microscopio. Los agentes usados en cubiertos de cocina, estaban basados en ácido nítrico y descubrió que este nuevo acero resistía muy bien el ataque químico. Luego expuso las muestras a vinagre y otros ácidos de comida como jugo de limón y encontró el mismo resultado.

Brearley demostró que este nuevo acero podía revolucionar la industria de los cubiertos, pero fue muy difícil convencer a sus conservadores jefes. Por cuenta propia hizo sus propios cuchillos con el cuchillero local, R. F. Mosley. Al principio, Brearley se refería a su invención como antiherrumbre. Fue Ernest Stuart, el mánager del cuchillero que se refirió por primera vez a los cuchillos como de acero inoxidable, luego de no poder oxidarlos con vinagre. Acero resistente a la corrosión debería ser el término correcto, pues los aceros inoxidables ordinarios se corroen luego de mucho tiempo en ambientes hostiles.

1.2. Descripción de los aceros inoxidables

Según la Sociedad Americana de Pruebas y Materiales (ASTM, por sus siglas en inglés), el acero inoxidable no es un metal simple sino una aleación

entre acero (hierro + carbono) y otros elementos aleantes como cromo, níquel, manganeso, magnesio u otros. Lo que tienen en común todos los aceros es que el principal ingrediente (elemento de aleación) es hierro, al que se añade una pequeña cantidad de carbono.

El acero inoxidable es un material sólido y no un revestimiento especial aplicado al acero común para darle características inoxidables. Aceros comunes, e incluso otros metales, son a menudo cubiertos o bañados con metales blancos como el cromo, níquel o cinc para proteger sus superficies o darles otras características superficiales. Mientras que estos baños tienen sus propias ventajas y son muy utilizados, el peligro radica en que la capa puede ser dañada o deteriorarse de algún modo, lo que anularía su efecto protector. La apariencia del acero inoxidable puede, sin embargo, variar y dependerá en la manera que esté fabricado y en su acabado superficial.

1.3. Usos y aplicaciones del acero inoxidable

Su resistencia a la corrosión es lo que da al acero inoxidable su nombre. Sin embargo, justo después de su descubrimiento se apreció que el material tenía valiosas propiedades que lo hacen idóneo para una amplia gama de usos diversos. Por ende, las aplicaciones del acero inoxidable son casi ilimitadas.

En el hogar se utiliza en utensilios de cocina, menaje, fregaderos, sartenes, baterías de cocina, hornos y barbacoas, equipamiento de jardín y mobiliario.

En arquitectura se utiliza en proyectos de construcción, como elemento decorativo, ya que es de bajo mantenimiento y da un complemento artístico arquitectónico. Se utiliza en perfiles para estaciones de autobuses, cabinas

telefónicas y resto de mobiliario urbano, fachadas de edificios, ascensores, escaleras e infraestructuras.

En la industria, debido a su característica de resistencia a la corrosión y fácil limpieza, es utilizado en mobiliario y líneas de conducción de productos alimenticios y farmacéuticos, plantas químicas y petroquímicas, aeronáutica, equipos de lavandería, marmitas de cocción, depósitos de combustible y productos químicos. Además, se utiliza en plantas para el tratamiento de aguas potables y residuales.

1.4. Composición química del acero inoxidable AISI 304 (UNS S30400)

Este acero es el más versátil y uno de los más usados de los aceros inoxidables de la serie 300. Tiene excelentes propiedades para el conformado y el soldado. Se puede usar para aplicaciones de embutición profunda de rolado y corte. Excelente resistencia a la corrosión, excediendo al tipo 302 en una amplia variedad de ambientes corrosivos, incluyendo productos de petróleo calientes o con vapores de combustión de gases. Resistencia a la corrosión en servicio intermitente hasta 870 °C y en servicio continuo hasta 925 °C. No se recomienda utilizarse entre 425-860 °C, pero se desempeña muy bien por debajo y por encima de ese rango.

Tabla I. Composición química del acero inoxidable AISI 304

Elemento	Porcentaje (%)
Carbono (C)	0.08 % mínimo
Manganeso (Mn)	2.0 %
Silicio (Si)	1.00 %
Cromo (Cr)	18.0 -20.0 %
Níquel (Ni)	8.0 – 10.5 %
Fósforo (P)	0.045 %
Azúfre (S)	0.03 %

Fuente: *Propiedades térmicas del acero inoxidable*. <http://www.sumiteccr.com/Aplicaciones/Articulos/pdfs/AISI%20304.pdf>. Consulta: enero de 2016.

1.5. Acero inoxidable AISI 304 (Fe/Cr18/Ni10)

Para la empresa Goodfellow, los aceros inoxidables AISI 304 son aleaciones de hierro con un mínimo de un 10,5 % de cromo. Sus características se obtienen mediante la formación de una película adherente e invisible de óxido de cromo. La aleación 304 es un acero inoxidable austenítico de uso general, con una estructura cúbica de caras centradas. Es esencialmente no magnético en estado recocido y solo puede endurecerse en frío. Su bajo contenido en carbono con respecto a la aleación 302 otorga una mejor resistencia a la corrosión en estructuras soldadas.

Tabla II. **Propiedades del acero inoxidable AISI 304**

a) Propiedad eléctrica	
b) Resistividad eléctrica (μohmcm)	c) 70-72
d) Propiedad física	
e) Densidad (g cm^{-3})	f) 7,93
g) Punto de fusión (c)	h) 1400-1455
i) Propiedad mecánica	
j) Alargamiento (%)	k) <60
l) Dureza brinell	m) 160-190
n) Impacto izod (j m^{-1})	o) 20-136
p) Módulo de elasticidad (gpa)	q) 190-210
r) Resistencia a la tracción (mpa)	s) 460-1100
t) Propiedades térmicas.	
u) Coeficiente de expansión térmica @20-100c ($\times 10^{-6} \text{ k}^{-1}$)	v) 18,0
w) Conductividad térmica a 23c ($\text{w m}^{-1} \text{ k}^{-1}$)	x) 16,3

Fuente: *Goodfellow*. www.goodfellow.com/S/Acero-Inoxidable-AISI-304.htm.

Consulta: 11 de marzo de 2016.

1.6. Clasificación, características generales y metalurgia de los aceros inoxidable

Es un tipo de acero resistente a la corrosión, el cromo que contiene posee gran afinidad por el oxígeno y reacciona con él formando una capa pasivadora que evita la corrosión del hierro contenido en la aleación. Sin embargo, esta película puede ser afectada por algunos ácidos dando lugar a un ataque y oxidación del hierro por mecanismos intergranulares o picaduras generalizadas.

1.6.1. Aceros martensíticos

En los aceros martensíticos, el carbono está en una concentración que permite la transformación de ferrita en austenita en altas temperaturas y esta se transforma en martensita durante el enfriamiento.

La martensita es una fase rica en carbono, frágil y muy dura. Estos aceros son fabricados y vendidos en la industria en el estado recocido, con estructura ferrítica, baja en dureza y buena ductilidad. Solamente después de un tratamiento térmico de temple tendrá una estructura martensítica y serán muy duros y poco dúctiles. Pero es en esta condición, solamente templados, que serán resistentes a la corrosión.

También son llamados aceros inoxidable al cromo o serie 400. Por tener menos elementos de aleación que los austeníticos, su costo es más bajo. Metalúrgicamente, el cromo es un formador de ferrita, la cual tiene una estructura cristalina cúbica centrada en el cuerpo. Acero con contenido de 11 a 14 % de cromo, pueden ser tratados térmicamente (tipos 410, 420, 440). Calentando estas aleaciones aproximadamente a 980 °C, empieza la fase austenítica y luego, debido a la alta templabilidad que le confieren los

elementos de aleación y a un enfriamiento lento, la fase se transforma en martensita.

1.6.2. Aceros inoxidable ferríticos

Los aceros inoxidable ferríticos son magnéticos y contienen como elemento principal de aleación al cromo. El contenido de carbono es mucho menor que en los martensíticos, con el fin de obtener una estructura totalmente ferrítica. Debido a ello, estos aceros no responden a los tratamientos térmicos, aunque cuando se calientan a 1 095 °C crece el tamaño de grano y sólo puede regenerarse por trabajo en frío posterior. Los aceros con un contenido en cromo superior al 20 % no se pueden someter a calentamientos a temperaturas intermedias, por el peligro de aparición de la fase σ , razón por la que la soldadura presenta problemas. Además, cuando el contenido de carbono es grande, se forman carburos de cromo, dando lugar a un empobrecimiento de cromo en la matriz y disminuyendo su resistencia a la corrosión. En relación con su comportamiento frente a la corrosión, ocupan un lugar intermedio entre los martensíticos y austeníticos.

Una característica mecánica a destacar, común a los aceros ferríticos y martensíticos, es que al tener una estructura cúbica centrada en el cuerpo (BCC) poseen una temperatura de transición dúctil-frágil, por debajo de la cual la tenacidad se hace muy pequeña. En los aceros inoxidable ferríticos, los contenidos típicos de los elementos de aleación son 0,01 a 16 % de cromo y otros elementos como manganeso, silicio, fósforo, azufre, molibdeno, titanio y cobre. Mantienen su estructura cúbica centrada en el cuerpo (BCC), del hierro alfa desde la temperatura ambiente hasta el punto de fusión, ya que no atraviesan el campo austenítico (de estructura cúbica centrado en las caras (FCC) del Hierro gamma) durante el calentamiento.

1.6.3. Aceros inoxidables austeníticos

Constituyen la familia con el mayor número de aleaciones disponibles, integra las series AISI 200 y AISI 300². Su popularidad se debe a su excelente formabilidad y superior resistencia a la corrosión.

Sus características son las siguientes:

- Excelente resistencia a la corrosión
- Endurecidos por trabajo en frío y no por tratamiento térmico
- Excelente soldabilidad
- Excelente factor de higiene y limpieza
- Habilidad de ser funcionales en temperaturas extremas
- No magnéticos

Los austeníticos se obtienen adicionando elementos formadores de austenita, como níquel, manganeso y nitrógeno. El contenido de cromo generalmente varía del 16 al 26 % y su contenido de carbono es del rango de 0,03 al 0,08 %. El cromo proporciona una resistencia a la oxidación en temperaturas aproximadas 650 °C en una variedad de ambientes. Los aceros inoxidables austeníticos son de alta ductilidad y tenacidad. En el estado templado recocido es muy suave y moldeable. La dureza de los austeníticos se incrementa con el aumento de los niveles de carbono, nitrógeno y, en cierta medida, de molibdeno.

² *Clasificación de los aceros inoxidables.* <http://www.bonnet.es/clasificacionacerinox.pdf>. Consulta: marzo de 2016.

1.6.4. Categorización de los aceros austeníticos

Estos aceros se clasifican básicamente en dos series:

- Serie AISI 300: aleaciones cromo-níquel

Es la más extensa, mantiene alto contenido de níquel y hasta 2 % de manganeso. También puede contener molibdeno, cobre, silicio, aluminio, titanio y niobio, elementos que son adicionados para conferir ciertas características. En ciertos tipos se usa azufre o selenio para mejorar su habilidad de ser maquinados.

- Serie AISI 200: aleaciones cromo-manganeso-nitrógeno

Contiene menor cantidad de níquel. El contenido de manganeso es de 5 a 20 %. La adición de nitrógeno incrementa la resistencia mecánica.

La última incorporación al mercado de los aceros inoxidable austeníticos, es la serie 4420. El austenítico 4420 contiene alto porcentaje de cromo, lo que hace que sea más resistente a los ácidos y adecuado para su uso en:

- Construcción
- Pulpa y papel
- Estructuras
- Tubería
- Aplicaciones de tratamiento de agua

Al igual que todos los aceros inoxidable, los aceros austeníticos se producen con las normas de calidad y los requisitos de rendimiento más

estrictos. Son mecanizables en frío, buena resistencia a la corrosión atmosférica y resistencia a muchos compuestos orgánicos e inorgánicos.

1.6.5. Aceros dúplex

Metal Actual manifiesta que los aceros dúplex pueden ser utilizados en puentes o estructuras que estén en zonas de marea y expuestas a la corrosión, dado que están compuestos por ferrita y austenita, que junto con elementos como nitrógeno, níquel, entre otros, le aportan propiedades superiores para resistir mejor la corrosión por cloruros y poseer mayor tenacidad³.

Un estudio realizado por la Universidad Carlos III de Madrid (UC3M) ha evidenciado las propiedades de los aceros inoxidable dúplex en los procesos de corrosión que se dan en el hormigón armado. La investigación afirma que usar refuerzos con este material en las zonas más importantes de un edificio aumentaría la duración del mismo en ambientes marinos, donde las concentraciones de cloruros son significativas. Estos hechos demuestran la importancia que ha adquirido este tipo de acero en la industria metalmeccánica mundial, por lo que es pertinente abordar los aspectos generales de este material con tan valiosas propiedades.

Las aplicaciones en la industria y el costo de los aceros inoxidable dúplex, en general, se debe a las propiedades de resistencia a corrosión y a temperaturas extremas que presentan. Por ejemplo, en la construcción son muy utilizados en los puntos críticos de las estructuras como esquinas y uniones, además en las zonas expuestas a la intemperie. En estructuras, como puentes o zonas de marea, expuestas a ambientes más agresivos que tienden a generar

³ *Calidad en la soldadura*. http://www.metalactual.com/revista/23/procesos_soldadura.pdf. Consulta: 20 de abril de 2016.

alta corrosión, también suelen ser aplicados los aceros dúplex, dado a que su estructura bifásica les permite resistir mayor tiempo a los cloruros de estos entornos. Las piezas que son utilizadas en aplicaciones exigentes también suelen ser elaboradas con este tipo de aceros, como ejemplo podrían nombrarse los intercambiadores de calor, las hélices, ejes, equipos de producción de pulpa y papel, tanques de carga en cargueros químicos, plantas de desalinización, sistemas de agua marina, entre otros.

En cuanto al costo de los aceros dúplex, puede afirmarse que aumenta de 5 a 15 por ciento respecto a los aceros inoxidable comunes, dependiendo la composición del material y los procesos a los que es sometido. Sin embargo, vale decir que en lo que respecta a las estructuras en las que es utilizado el material, los costos de mantenimiento a largo plazo son menores, debido a que reporta ventajas frente a otros aceros. Del mismo modo, las piezas fabricadas con aceros dúplex presentan mayor vida útil en aplicaciones exigentes.

Otra ventaja de los aceros dúplex en general es su soldabilidad, considerando ciertos procedimientos y precauciones al soldar este tipo de aceros, porque es probable que pierdan las características superiores que poseen y, por ende, los productos no tengan un óptimo desempeño. La microestructura de los aceros dúplex es bifásica, puesto que está compuesta por ferrita y austenita. La composición de la ferrita le confiere resistencia al acero y la austenita le brinda un grado de tenacidad mayor. Esta aleación, normalmente, está compuesta por cromo (18 a 25 %), níquel (entre 4,5 y 6,5 %) y carbono (menos de 0,03 %); además de molibdeno, nitrógeno, cobre, wolframio, elementos agregados para elevar la resistencia a la corrosión.

1.7. Elementos de aleación de los aceros inoxidable

Grover, define una aleación, como una mezcla sólida homogénea de dos o más metales⁴. En algunos casos, la aleación puede realizarse con algunos elementos no metálicos, tal es el caso del acero, que es una aleación de hierro y carbono. Dependiendo de los elementos aleantes, así serán las propiedades físicas, mecánicas y químicas que tendrá la aleación. El objetivo principal de las aleaciones es para mejorar sus propiedades.

Tabla III. **Elementos que modifican las propiedades del acero inoxidable**

ELEMENTOS	PROPIEDADES
Aluminio	Se emplea como desoxidante en la fabricación de muchos aceros
Boro	Aumenta la capacidad de endurecimiento superficial, proporcionando un revestimiento duro y mejorando la templabilidad
Cobalto	Disminuye la templabilidad, mejora la dureza en caliente. Se usa en los aceros rápidos para herramientas, de la misma manera en para aceros refractarios. Aumenta las propiedades magnéticas de los aceros.
Cromo	Es uno de los más utilizados en la fabricación de aceros aleados. Se usa en aceros de construcción, en los de herramientas y en los inoxidables, aumenta la dureza y la resistencia a la tracción y la tenacidad de los aceros, mejora la templabilidad, aumenta la resistencia al desgaste, la inoxidabilidad. Se utiliza en revestimientos embellecedores o recubrimientos duros de gran resistencia al desgaste en émbolos y ejes.
Estaño	Es el elemento empleado para recubriendo láminas delgadas conformar la hojalata.
Manganeso	Se añade para neutralizar la negativa influencia del azufre y del oxígeno, actúa como desoxidante. De no tener manganeso, los aceros no se podrían laminar ni forjar.
Molibdeno	Aumenta la profundidad de endurecimiento del acero, y su tenacidad, mejorando la resistencia a la corrosión
Níquel	Produce gran tenacidad, es un elemento de gran importancia en la producción de aceros inoxidables, porque aumenta la resistencia a la corrosión

⁴ GROOVER, Mikell P. *Fundamentos de manufactura moderna: materiales, procesos y sistemas*.

Continuación de la tabla III.

Plomo	Favorece la mecanización por arranque de viruta, (torneado, cepillado, taladrado) ya que el plomo es un buen lubricante de corte, se añade a los aceros porque mejora la maquinabilidad.
Silicio	Se usa como elemento desoxidante
Titanio	Se usa para estabilizar y desoxidar el acero
Tungsteno o volframio	Mejora muy significativamente la dureza y la resistencia al desgaste, produce aceros rápidos con los que es posible triplicar la velocidad de corte de las herramientas
Vanadio	Desoxidante, proporcionan al acero una buena resistencia a la fatiga, tracción y poder cortante en los aceros para herramientas
Zinc	Es elemento empleado para producir acero galvanizado

Fuente: elaboración propia, con información de GROOVER, Mikell. *Fundamentos de manufactura moderna: materiales, procesos y sistemas*.

1.8. Estructura molecular de los aceros inoxidables, según su elemento de aleación

Gisperti indica que, en química, un metal (del griego μεταλλον) es un elemento que forma cationes fácilmente y que tiene enlaces metálicos⁵. Una manera de describir a los metales es pensar en ellos como si fuesen un enrejado tridimensional (*lattice*) de iones positivos inmersos en un mar de electrones o, si se prefiere, rodeados por una nube de electrones deslocalizados. Los metales, además, son uno de los tres tipos de elementos que se distinguen por su energía de ionización y sus propiedades de enlace (además de los metaloides y los no metales).

Una definición más moderna del significado de metal procede de la teoría que mejor los explica como elementos que tienen en su estructura electrónica bandas de conducción y bandas de valencia. Con esta definición se amplía el concepto de metal, incluyendo otras sustancias, además de los metales a los

⁵ O'CONNOR, Paul et al. *Química: experimentos y teorías*.

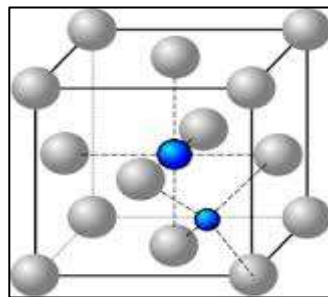
polímeros metálicos y a los metales orgánicos. La mayoría de los metales son inestables químicamente, casi todos reaccionan con oxígeno a presión y temperatura ambiente.

Una de las características de los metales es que pueden combinarse químicamente entre ellos mismos, de manera no estequiométrica, formando lo que se conoce con el nombre de aleación. Una aleación es una mezcla estequiométrica de al menos dos elementos, uno de los cuales es necesariamente un metal.

Como ejemplos de aleaciones, las más comunes son: acero (hierro y carbono), latón (cobre y cinc), bronce (cobre y estaño), duraluminio (aluminio y cobre), acero inoxidable o *stainless steel* (hierro, cromo, carbono y níquel), plata *sterling* (plata y cobre), oro de 14 kilates (oro y cobre).

Las estructuras de los metales, la más sencilla, es aquella que se puede acomodar como un conjunto de canicas, se acercarán las unas a las otras hasta que las interacciones repulsivas sean importantes, a este arreglo se le conoce como empaquetado cerrado.

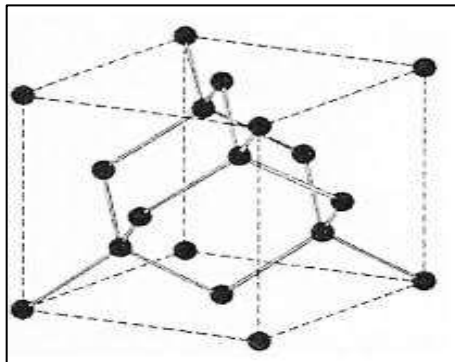
Figura 1. **Estructura molecular**



Fuente: O'CONOR, Paul et al. *Química: experimentos y teorías*. p. 177.

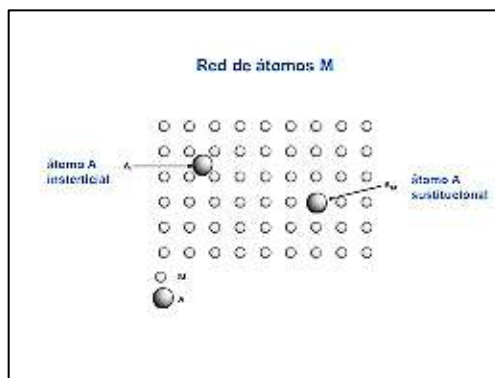
Entre las estructuras moleculares de los metales, las tres más importantes son:

Figura 2. **Estructura molecular tipo bolas de palo**



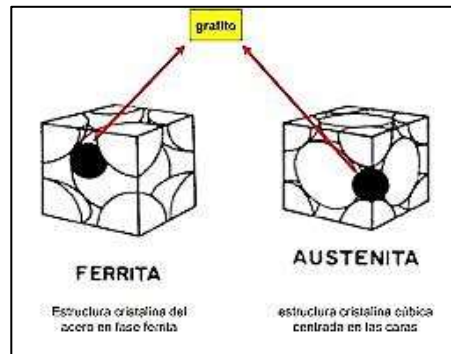
Fuente: O'CONOR, Paul et al. *Química: experimentos y teorías*. p. 178.

Figura 3. **Estructura molecular tipo llenado espacial**



Fuente: O'CONOR, Paul et al. *Química: experimentos y teorías*. p. 179.

Figura 4. **Estructura molecular tipo cúbica**



Fuente: O'CONNOR, Paul et al. *Química: experimentos y teorías*. p. 181.

En el enlace metálico, los átomos metálicos típicamente tienen electrones de valencia que se encuentran ligados débilmente a sus núcleos (energías de ionización pequeñas), de esta manera pueden deslocalizarse formando un mar de electrones en el que se encuentran sumergidos los *cores* (kernels) de los átomos metálicos; es decir que son iones positivos. El hecho de que la mayoría de los metales sean sólidos y que en general tengan puntos de fusión muy grandes, implica que el enlace entre ellos es fuerte.

Para explicar mejor el comportamiento del enlace metálico, se presenta un ejemplo: el sodio tiene una estructura electrónica $1s^2 2s^2 2p^6 3s^1$. Cuando dos átomos de sodio se juntan, el electrón de valencia de un átomo de sodio ($3s^1$) comparte el espacio del electrón de valencia del siguiente átomo al superponerse los orbitales donde se encuentran cada uno, dando como resultado la formación de un orbital molecular, de la misma manera que en que se forma un enlace covalente. Sin embargo, hay una pequeña diferencia, es que en esta ocasión cada átomo de sodio está tocando a otros 8 átomos vecinos y a cada uno de estos a su vez lo tocan otros 8 átomos.

1.9. Diagrama de fases de los aceros inoxidables

Los aceros inoxidables son una clase especial de aleaciones de acero conocidos principalmente por sus propiedades resistentes a la corrosión⁶. Las características inoxidables asociadas con estas aleaciones se logran a través de la formación de una película superficial de óxido invisible y adherente, rica en cromo que cuando se daña, tiene la rara habilidad de curarse a sí mismo en presencia de oxígeno.

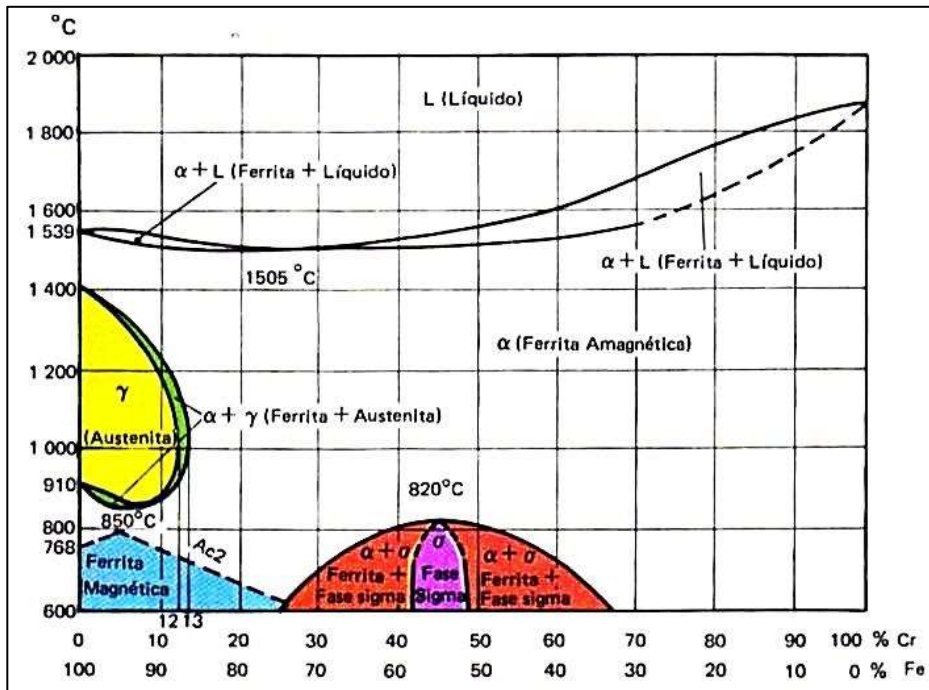
Otras características deseables pueden incluir excelente conformabilidad, alta temperatura ambiente, tenacidad criogénica, buena resistencia a la descamación, oxidación y a la fluencia a temperaturas elevadas. El cromo es el elemento de aleación que brinda resistencia a la corrosión a los aceros inoxidables, pero muchos otros elementos pueden ser añadidos para estabilizar otras fases, proporcionar resistencia a la corrosión o producir propiedades mecánicas mejoradas. En los aceros inoxidables austeníticos, la dureza se produce por trabajo en frío y la formación de martensita inducida por deformación.

1.9.1. Diagrama hierro (Fe)-cromo (Cr)

La figura 5 muestra el diagrama de equilibrio estable Cr-Fe, su análisis presenta una forma adecuada de revisar los conceptos básicos detrás de los diferentes tipos de aceros inoxidables: ferríticos, martensíticos, austeníticos, dúplex y endurecidos por precipitación.

⁶ Universidad Tecnológica de Pereira. *Metalografía*. blog.utp.edu.co/metalografia/7-aceros-inoxidables. Consulta: marzo de 2016.

Figura 5. Diagrama hierro (Fe)–cromo (Cr)



Fuente: Universidad Tecnológica de Pereira. *Metalografía*. blog.utp.edu.co/metalografia/7-aceros-inoxidables. Consulta: marzo de 2016.

Del análisis del diagrama Cr-Fe se deduce lo siguiente:

- Las aleaciones hierro-cromo, con menos de 12 % de cromo, transforman su estructura ferrítica a austenítica (fase gamma, γ) durante el calentamiento. Por enfriamiento rápido hasta la temperatura ambiente, se consigue transformar la austenita en martensita (aceros inoxidables martensíticos).
- Las aleaciones de hierro con contenidos de cromo entre 12 y 13 % forman, a elevadas temperaturas, estructuras bifásicas (α y γ) que, enfriadas rápidamente a temperatura ambiente, presentarán una

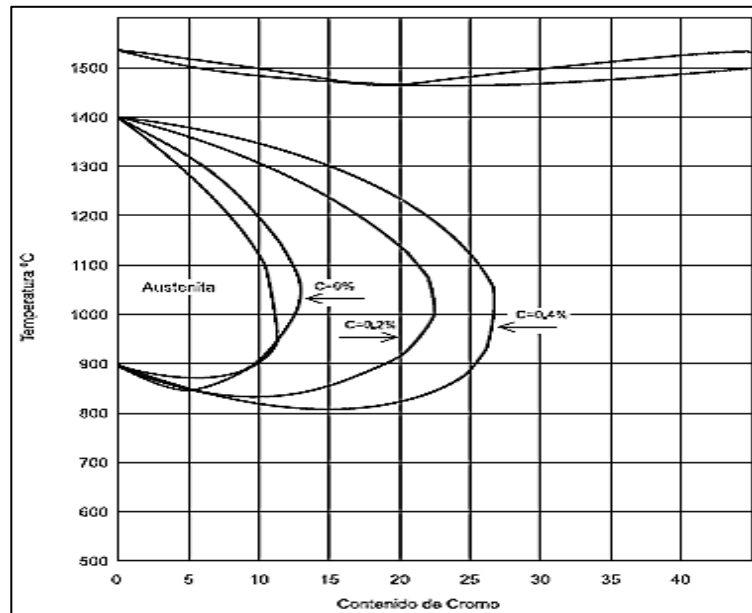
estructura formada por ferrita y martensita (aceros ferríticos-martensíticos).

- En las aleaciones hierro – cromo con contenidos de este último de 25 a 42 % y de 48 a 65 % a temperaturas comprendidas entre 600 y 900 °C, aparece una fase intermetálica llamada fase sigma (σ) que coexisten con la ferrita. Con contenidos de cromo de 42 a 48 % aproximadamente toda la ferrita puede transformarse en fase sigma (σ). Esta fase es muy dura, frágil y se puede disolver en la ferrita, calentando por encima de los 900 °C. Al aumentar el contenido de carbono se amplía el límite del bucle gamma (γ), siendo un elemento favorecedor de la formación de esta fase.
- Las aleaciones hierro-cromo con más de 13 % de cromo, mantienen su estructura ferrítica, desde temperatura ambiente hasta el punto de fusión. Durante el calentamiento, dicha estructura no atraviesa el campo austenítico (fase gamma), luego no puede austenizarse y posteriormente templarse para formar martensita. Estos corresponden a los denominados aceros inoxidable martensíticos.

1.9.2. Diagrama influencia del carbono

La figura 6 muestra el diagrama de influencia del carbono con el cromo. Es importante limitar el contenido de carbono para prevenir que el campo gamma se expanda y prevenir la formación de martensita.

Figura 6. **Influencia del carbono ampliando el bucle gamma**



Fuente: Universidad Tecnológica de Pereira. *Metalografía*. blog.utp.edu.co/metalografia/7-aceros-inoxidables. Consulta: marzo de 2016.

De la figura 6 se deduce lo siguiente:

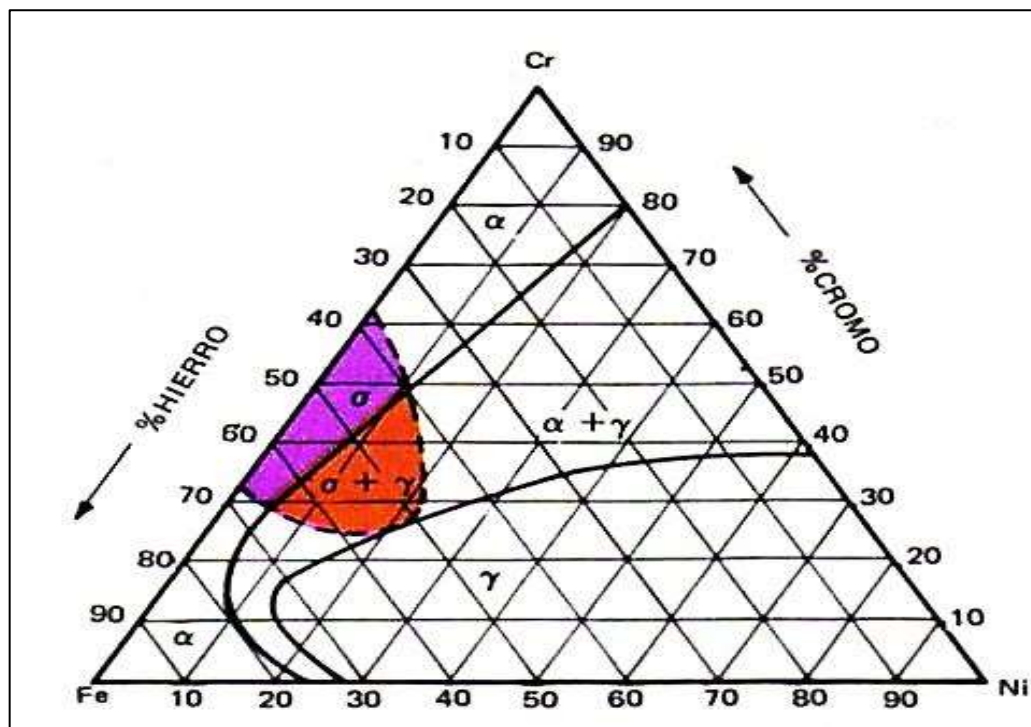
- En el diagrama hierro-cromo, el bucle gamma se expande a la derecha al aumentar el contenido de carbono de la aleación. El carbono favorece la formación de fase gamma.
- Es importante considerar que si el carbono alcanza 0,6 %, el límite del bucle gamma queda limitado para un cromo aproximado del 18 %. Por lo tanto, con carbono superior al 0,4 % ya no se amplía el bucle y el exceso de carbono queda en el acero formando distintos tipos de carburos de hierro y cromo que dependen de la temperatura, del contenido de carbono y de cromo.

- Las aleaciones hierro-cromo-carbono con cromo superior a 27 % son ferríticas.
- Se pueden conseguir aleaciones hierro-cromo-carbono de hasta aproximadamente 17 % de cromo que sean martensíticas a temperatura ambiente.

1.9.3. Diagrama Fe-Cr-Ni a temperatura ambiente

A continuación se presenta el diagrama Fe-Cr-Ni a temperatura ambiente.

Figura 7. Diagrama Fe-Cr-Ni a temperatura ambiente



Fuente: Universidad Tecnológica de Pereira. *Metalografía*. blog.utp.edu.co/metalografia/7-aceros-inoxidables. Consulta: marzo de 2016.

De la figura 7 se deduce lo siguiente:

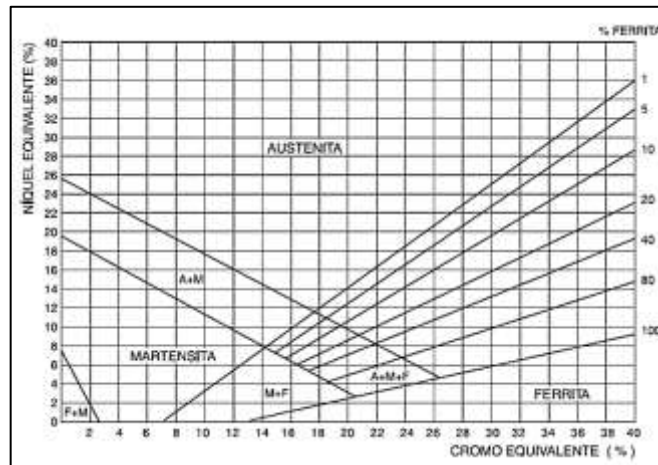
- Influencia del níquel. El níquel amplía el campo de estabilidad de la austenita y rebaja la temperatura a la que ocurre la transformación α - γ . También indica la formación a temperatura ambiente de las distintas estructuras según el contenido de hierro, cromo y níquel.
- Fase sigma. Una de las razones para la formación de la fase sigma en los aceros inoxidable se debe a la presencia de ferrita cuando se mantiene durante largo tiempo a temperaturas comprendidas entre los 600 y 900 °C, transformándose en un compuesto intermetálico de hierro y cromo. Esta fase se caracteriza fundamentalmente por su pérdida de ductilidad y resiliencia. Sus características fundamentales son dureza superior y provoca grietas muy finas.
- La fase sigma no solamente se forma en los aceros con alto contenido de cromo, ya que puede darse en los aceros ferríticos con contenidos de cromo desde 14 %. También puede formarse en los aceros austeníticos y austeno-ferríticos. Su influencia es notable en las características mecánicas, resistencia a la corrosión y las propiedades de la soldadura.

La importancia de este diagrama ternario está en que lo aceros inoxidable comerciales más habituales están compuestos por un 75 % de hierro, un 18 % de cromo y un 8 % de níquel.

1.9.4. Diagrama de Schaeffler

A continuación se presenta el diagrama de Schaeffler.

Figura 8. Diagrama de Schaeffler



Fuente: Universidad Tecnológica de Pereira. *Metalografía*. blog.utp.edu.co/metalografia/7-aceros-inoxidables. Consulta: marzo de 2016.

Procede de su antecesor, el diagrama de Maurer, el cual presenta las estructuras que va a presentar un acero al cromo-níquel de acuerdo a los porcentajes de estos presentan en el acero. Antón Scheaffler lo mejoró, incorporando la influencia de distintos elementos de aleación en la formación de ferrita y austenita. Se definió así el concepto de cromo equivalente y níquel equivalente. El cromo equivalente incorpora los elementos alfa genos (estabilizadores de ferrita) y el níquel equivalente los elementos gamma genos (estabilizadores de austenita). Cada elemento va multiplicado por un factor que depende de su grado de influencia en la formación de ferrita o austenita respectivamente.

Cromo equivalente: $\% \text{Cr} + \% \text{Mo} + (1,5 \times \% \text{Si}) + (0,5 \times \% \text{Nb})$.

Níquel equivalente: $\% \text{Ni} + (30 \times \% \text{C}) + (0,5 \times \% \text{Mn})$.

El diagrama de Schaeffler muestra la presencia de las fases austenítica, ferrítica y martensítica propias de los aceros inoxidable cuando son enfriados a las velocidades normales de soldadura. Además, presenta las zonas de frágiles en frío debido a la presencia de martensita, la zona de fragilidad caliente originada por la presencia de austenita, la zona de fragilidad por presencia de fase sigma y la zona de crecimiento de grano ferrítico.

1.10. Comparación de las propiedades de los aceros inoxidable

El acero inoxidable es una aleación de hierro y carbono que contiene, por definición, un mínimo de 10,5 % de cromo. Algunos tipos de acero inoxidable contienen además otros elementos aleantes. Los principales son el níquel y el molibdeno. Es un tipo de acero resistente a la corrosión, el cromo que contiene posee gran afinidad por el oxígeno y reacciona con él formando una capa que evita la corrosión del hierro contenido en la aleación. Sin embargo, esta película puede ser afectada por algunos ácidos, dando lugar a un ataque y oxidación del hierro por mecanismos intergranulares o picaduras generalizadas.

Existen muchos tipos de acero inoxidable y no todos son adecuados para aplicaciones estructurales, particularmente cuando se llevan a cabo operaciones de soldadura⁷. Hay cinco grupos básicos de acero inoxidable clasificados de acuerdo con su estructura metalúrgica: austeníticos, ferríticos, martensíticos, dúplex y de endurecimiento por precipitación. Los aceros inoxidable que contienen solamente cromo, se llaman ferríticos, ya que tienen una estructura cristalina metalográfica formada básicamente por ferrita. Son magnéticos y se distinguen porque son atraídos por un imán. Estos aceros, con elevados porcentajes de carbono, son templeables y, por lo tanto, pueden

⁷ *Propiedades del acero inoxidable*. <https://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/3319/4/55868-4.pdf>. Consulta: 12 de enero de 2016.

endurecerse por tratamiento térmico pasando a llamarse aceros inoxidable martensíticos, por tener martensita en su estructura metalográfica. Los aceros inoxidable que contienen más de 7 % de níquel, se llaman austeníticos, ya que tienen una estructura cristalina metalográfica en estado recocido, formada básicamente por austenita. No son magnéticos en estado recocido y por lo tanto no son atraídos por un imán. Estos aceros austeníticos se pueden endurecer por deformación, pasando su estructura metalográfica a contener martensita. En esta situación se convierten en parcialmente magnéticos.

Los aceros inoxidable austeníticos y dúplex son, en general, los grupos más empleados en aplicaciones estructurales. Los aceros inoxidable austeníticos proporcionan una buena combinación de resistencia a la corrosión y de las propiedades de fabricación. Los aceros inoxidable dúplex tienen alta resistencia a la tracción y al desgaste, además de buena resistencia a la corrosión bajo tensión.

Los grados más utilizados, referidos generalmente como grados austeníticos estándares, son 1.4301 (comúnmente conocido como 304 en denominación AISI) y 1.4401 (AISI 316). Estos aceros inoxidable contienen entre 17 y 18 % de cromo y 8 y 11 % de níquel. El grado 1.4301 es adecuado en ambientes rurales, urbanos y ligeramente industriales, mientras que el 1.4401 es un grado más aleado y recomendable en ambientes marinos e industriales. Las versiones de estos mismos grados con bajo contenido en carbono son 1.4307 (AISI 304L) y 1.4404 (AISI 316L).

Los grados 1.4301 y 1.4401 se fabricaban anteriormente con contenidos de carbono más elevados lo cual tenía implicaciones en el comportamiento de los mismos frente a la corrosión. Tanto el grado L como un acero estabilizado como el 1.4541 y el 1.4571, deberían utilizarse cuando sea determinante el

comportamiento frente a corrosión en estructuras soldadas. A todos los aceros inoxidable se les puede añadir un pequeño porcentaje de molibdeno, para mejorar su resistencia a la corrosión por cloruros.

Tabla IV. **Propiedades mecánicas de los aceros inoxidables**

Tabla 2.1 Propiedades mecánicas especificadas para los aceros inoxidables usuales según EN 10088-2						
	Grado	Producto ¹⁾	Espesor máximo (mm)	Mínima resistencia ²⁾ correspondiente al 0.2% (N/mm ²)	Resistencia última a tracción (N/mm ²)	Alargamiento de rotura (%)
Aceros inoxidables austeníticos básicos de cromo y níquel	1.4301	C	8	230	540 – 750	45 ³⁾
		H	13,5	210	520 – 720	45 ³⁾
		P	75	210	520 – 720	45
Aceros inoxidables austeníticos de molibdeno, cromo y níquel	1.4307	C	8	220	520 – 700	45
		H	13,5	200	520 – 700	45
		P	75	200	500 – 700	45
Aceros inoxidables austeníticos de molibdeno, cromo y níquel	1.4401	C	8	240	530 – 680	40
		H	13,5	220	530 – 680	40
		P	75	220	520 – 670	45
Aceros inoxidables austeníticos estabilizados	1.4541	C	8	220	520 – 720	40
		H	13,5	200	520 – 720	40
		P	75	200	500 – 700	40
Aceros inoxidables austeníticos bajos en carbono, altos en nitrógeno	1.4318	C	8	240	540 – 690	40
		H	13,5	220	540 – 690	40
		P	75	220	520 – 670	40
Aceros inoxidables dúplex	1.4362	C	8	350	650 – 850	35
		H	13,5	330	650 – 850	35
		P	75	330	630 – 830	45
Aceros inoxidables dúplex	1.4462	C	8	450	650 – 850	20
		H	13,5	400	650 – 850	20
		P	75	400	630 – 800	25
Aceros inoxidables dúplex	1.4462	C	8	500	700 – 950	20
		H	13,5	460	700 – 950	25
		P	75	460	640 – 840	25

Notas:
 1) C=fleje laminado en frío, H=fleje laminado en caliente, P=chapa laminada en caliente
 2) Propiedades transversales
 3) Para material más estirado, los valores mínimos son un 5% más bajos

Fuente: *Propiedades del acero inoxidable*. <https://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/3319/4/55868-4.pdf>. Consulta: 28 de noviembre de 2015.

2. CORROSIÓN EN LOS ACEROS INOXIDABLES

Todos los aceros inoxidables contienen suficiente cromo para darles sus características inoxidables. Muchas aleaciones inoxidables contienen además níquel para reforzar aún más su resistencia a la corrosión. Estas aleaciones son añadidas al acero en estado de fusión para hacerlo inoxidable en toda su masa. Por este motivo, los aceros inoxidables no necesitan de ningún otro tratamiento superficial para mejorar su resistencia a la corrosión, ni ser chapeados, ni pintados.

El empleo de acero inoxidable estará bajo la dependencia de las características oxidantes del ambiente. Si imperan condiciones fuertemente oxidantes, los aceros inoxidables resultan superiores a los metales y aleaciones más nobles. Sin embargo, en la misma familia de los aceros inoxidables, la resistencia a la corrosión varía considerablemente de un tipo al otro. En el grupo al cromo níquel, los tipos 301 y 302 son menos resistentes a la corrosión que los tipos 310 y 316. En el grupo más sencillo al cromo, los tipos 405 y 410 son menos resistentes a la corrosión que los tipos 430 y 442.

La utilización de los aceros al cromo (serie 400) para fines industriales se debe principalmente a las condiciones de resistencia a la oxidación. Un acero al cromo con el 12 % desarrollará una película de óxido superficial al cabo de varias semanas de exposición a una atmósfera industrial. La película, una vez formada, actúa como barrera contra la corrosión más pronunciada, pero si se ha de tener en cuenta la apariencia del metal, el tipo 410 y el tipo 405 pueden resultar objetables. El tipo 430, con 17 % de cromo, necesita varios meses hasta que se forma la película superficial de óxido, mientras que el tipo 442, con

más de 20 % de cromo, se vuelve pasivo en la atmósfera sin que se desarrolle una película de óxido visible. Otro procedimiento para evitar que en condiciones semejantes se forme óxido, consiste en añadir más del 7 % de níquel a una aleación con el 17 % o más de cromo, como son los tipos 301, 302 y 304. En atmósferas que contengan aire salino o humos procedentes de fábricas de productos químicos, la adición de molibdeno aumenta la resistencia a la corrosión, como es el caso con el tipo 316⁸.

2.1. Corrosión intergranular

Un tratamiento térmico inadecuado del acero inoxidable puede producir una red de carburos en los aceros con más del 0,03 por ciento de carbono, o sin adición de titanio o de columbio. El metal que contenga tal red es susceptible de corrosión intergranular que podrá ser causa de fracaso en condiciones muy corrosivas y reducir la duración útil en muchos servicios relativamente ligeros. Los procedimientos normales de soldadura introducen en el metal la susceptibilidad a la precipitación de los carburos. Que el acero sea susceptible de corrosión intergranular no significa necesariamente que será atacado por ella. En servicio, el resultado puede ser satisfactorio, pero la posibilidad de corrosión intergranular deberá ser tenida en cuenta siempre que no quede excluida según la experiencia previa. La precipitación de carburos puede ser eliminada por uno de los tres procedimientos indicados a continuación:

- Por recocido: una vez terminadas las operaciones de elaboración y de soldadura, el acero deberá ser calentado hasta una temperatura lo suficientemente alta para disolver los carburos, lo que es generalmente entre 1 036 y 1 150 °C, para enfriarlo luego con la rapidez suficiente para

⁸ *Soluciones en acero inoxidable.* www.inoxidables.com. Consulta: octubre de 2015.

evitar que se vuelva a precipitar el carburo y utilizando para ello un chorro de aire o agua. Un tratamiento térmico localizado en la zona inmediatamente adyacente a la soldadura no da resultados satisfactorios. Para un recocido efectivo, toda la pieza deberá ser calentada y apropiadamente enfriada con rapidez.

- Utilizando acero que contenga menos de 0,03 % de carbono.
- Utilizando un acero estabilizado: el titanio o el columbio se combinan con el carbono y evitan las precipitaciones perjudiciales. Los aceros estabilizados son necesarios para todo servicio que implique prolongadas exposiciones a las temperaturas entre 426 y 871 °C.

El peligro inherente a la precipitación de carburo de cromo ha llegado a ser tan bien conocido y tan fácilmente evitado que ocurren pocos fracasos debidos a esta causa.

2.2. Corrosión galvánica

Ejerce una acción localizada, la cual puede presentarse cuando dos metales diferentes entran en contacto por medio de un electrolito o líquido conductor, fluye una corriente desde el metal anódico al catódico o metal más noble a través del electrolito. Como resultado, el metal menos noble se corroe.

En un medio corrosivo, los dos metales diferentes forman unos electrodos cortocircuitados y constituyen una celda electroquímica. De ello resulta la disolución del electrodo anódico, mientras que el cátodo permanece inalterable. El potencial variará según la posición ocupada por los metales y aleaciones en el cuadro de las series galvánicas que se acompaña.

El empleo de distintos metales en una solución corrosiva no significa que la corrosión galvánica sea inevitable. Los factores que influyen la corrosión galvánica son:

- Conductividad del circuito: tiene que existir el contacto entre metales diferentes en una solución de alta conductividad para que se produzca el ataque galvánico.
- Potencial entre ánodo y cátodo: la posición que ocupa cada metal en la serie galvánica determina el potencial y la dirección del flujo de corriente cuando se compone una celda. El metal que ocupa la posición más alta en la serie constituye el cátodo. El otro metal es el ánodo y, debido a ello, es el que resulta atacado por la acción de la celda. El potencial se incrementa cuanto más apartadas unas de otras son las posiciones ocupadas por cada metal en la serie. Los aceros inoxidable en estado pasivo figuran en la serie justo a continuación de la plata, del grafito y del oro. Así pues, en una solución oxidante, los aceros inoxidable pasivos suelen constituir el cátodo, mientras que serán los otros metales los que serán atacados.

Cuando la solución es reductora, el acero inoxidable se vuelve activo, los metales como el cobre y el bronce constituirán el cátodo y acelerarán la corrosión del acero inoxidable. El acero y la fundición de hierro ocupan puestos inferiores en la serie galvánica que el que ocupa el acero inoxidable activo por lo que este será atacado si se forma una célula entre ellos y el acero inoxidable, lo mismo si están sumergidos en una solución oxidante que en una reductora.

- Polarización: este efecto es el que se produce sobre los electrodos de una celda galvánica por el depósito de los gases liberados por la corriente. La evolución de los iones de hidrógeno puede cambiar de pasiva en activa la superficie del acero inoxidable, acelerando así la corrosión del ánodo.
- Áreas relativas del cátodo y ánodo: ejercen un efecto pronunciado sobre el daño producido por la acción galvánica. Un pequeño ánodo con un cátodo grande produce una corriente de elevada densidad y acelera la corrosión en el ánodo. Deberán evitarse las pequeñas áreas del metal menos noble. No se utilizarán piezas de sujeción de aluminio para el acero inoxidable. En cambio, el empleo de piezas de sujeción de acero inoxidable para aluminio da resultados satisfactorios.
- Relación geométrica entre superficies de distintos metales: un borde o una esquina del metal menos noble no deberá estar en contacto con el centro de un área de gran superficie del metal que ha de constituir el cátodo si llega a formarse una celda galvánica.

La corrosión se atribuye frecuentemente a la acción galvánica cuando su verdadera causa se debe efectivamente a unas condiciones anormales de operación. Así, por ejemplo, el uso de ácido clorhídrico para sustituir un material de limpieza normal puede destruir la película pasiva del acero inoxidable. En tal caso, se puede formar una celda galvánica que empezará a funcionar tan pronto como la pieza en cuestión entre en función. El volver a proyectar y a construir una pieza que sea completamente de acero inoxidable puede ser muy costoso y la nueva pieza proyectada puede ser difícil de fabricar.

2.3. Corrosión por contacto

El tercer riesgo es la corrosión por contacto. Una diminuta partícula de acero al carbono, una escama de óxido, cobre u otra substancia extraña cualquiera incrustada en el acero inoxidable puede ser suficiente para destruir la pasividad en el punto de contacto. El ataque empieza al formarse una celda galvánica con la partícula de material extraño como ánodo. Mientras dura la acción electroquímica que disuelve lo contaminado, iones de hidrógeno se liberan haciendo que el acero inoxidable se vuelva activo en el punto de contacto. La acción de picado puede proseguir después de haber sido eliminada la partícula extraña, por haberse constituido una celda activa-pasiva entre la diminuta superficie anódica atacada y la extensa área catódica circunvecina.

Cuando las secciones inoxidables entran en servicio, deberán estar limpias de escamas de óxido, de aceite, de pequeñas partículas metálicas procedentes de las herramientas, troqueles e hileras, así como de todo material extraño. La corrosión por contacto puede iniciarse al cabo de mucho tiempo de estar la pieza en servicio si los métodos de limpieza empleados no son meticulosos. Óxido y suciedad en los conductos de vapor, herramientas impregnadas con acero al carbono, e inclusive aparatos de transporte sucios. Pueden acarrear substancias creadoras de corrosión por contacto hasta los recipientes de acero inoxidable durante un período de limpieza. Unas superficies limpias y lisas, así como la ausencia de arañazos y grietas reduce el riesgo de que se produzca corrosión por contacto.

El ingeniero proyectista puede prevenir el ataque galvánico, pero, a su vez, el personal encargado de la fabricación, la operación y la conservación de los equipos de acero inoxidable, ha de prevenir la corrosión por contacto.

2.4. Picado o corrosión en forma de pinchazos de alfiler

Las soluciones que contengan cloruros podrían atacar por una acción de picado y en las picaduras se podrán desarrollar celdas galvánicas. Los daños debidos a este picado son también llamados pinchazos de alfiler causados por la corrosión. Los cloruros ácidos, tales como el cloruro férrico y el cloruro sódico son particularmente peligrosos, pero cualquier cloruro en concentración apreciable puede ser la causa posible de perturbaciones. Generalmente, los fracasos del acero inoxidable en un medio supuestamente a salvo de la corrosión son atribuibles a la presencia del ion cloruro en mayor concentración que la previsible.

El molibdeno contenido en los tipos 316 y 317 aumenta la resistencia al picado. Estas aleaciones quedan sometidas a los desperfectos debidos a la corrosión por fatiga; así pues, los recipientes deberán quedar tan exentos de tensiones como sea posible. Fisuras y bolsas de estancamiento deberán ser eliminadas, ya que son las superficies limpias y en buen estado las que mejor resisten al picado, cualquiera que sea la calidad del acero inoxidable.

2.5. Corrosión por fatiga

Este es otro de los riesgos que han de ser prevenidos. Casi todos los metales y aleaciones, incluso el acero inoxidable austenítico, pueden fallar al agrietarse o quebrarse debido a la corrosión por fatiga, en condiciones que impliquen esfuerzos aplicados o tensiones residuales combinadas con agentes ligeramente corrosivos. Las soluciones de cloruro son de lo más perjudicial al provocar el agrietamiento de los aceros inoxidables austeníticos.

El mecanismo causante de la corrosión por fatiga todavía no ha sido determinado. Generalmente la fatiga es transgranular y puede ir acompañada de ataques de picado. Son muy susceptibles las piezas que han estado sometidas a un fuerte trabajo en frío, pero el acero recocido puede también agrietarse cuando se le somete a condiciones difíciles. Es más fácil que el agrietamiento se produzca en soluciones calientes que en frías. El tipo 315 y el tipo 317, en la condición de recocido, ofrecen mayor resistencia al ion cloruro que el tipo 302 y el 304.

También puede ocurrir en planchas perforadas. Las grietas en forma de rayos que parten de los taladros son típicas del agrietamiento debido a la corrosión por fatiga. Los productores canadienses han resuelto este problema completamente recociendo a fondo las planchas después de taladradas. Los aceros inoxidable, estirados, embutidos o trabajados en frío se agrietan fácilmente en sistemas que contengan sulfuro de hidrógeno acuoso y soluciones cáusticas calientes bajo presión.

Para eliminar completamente las tensiones internas, sin perjuicio para la resistencia a la corrosión, se deberá recocer por encima de 926 °C, con enfriamiento rápido para que los carburos permanezcan en solución. Como no es posible hacer esto con los recipientes grandes, un tratamiento de revenido a 648 °C puede ser suficiente para reducir las tensiones residuales. Este tratamiento a 648 °C podrá ser aplicado únicamente para los tipos 304 L, 316 L, 317 L, 321 y 347, tan solo cuando se sepa que el nivel de la tensión en el cual puede ocurrir la corrosión sea más bajo que lo que se espera después de semejante tratamiento térmico a baja temperatura. Cuando se utiliza acero inoxidable como forro para un recipiente de acero al carbono, no será posible aligerar las tensiones debido a que los coeficientes de expansión son muy

diferentes. Lo mismo ocurre cuando se trata de recipientes de acero inoxidable que lleven soldados refuerzos, soportes o sujeciones de acero al carbono.

Las precauciones generales que se indican a continuación deberán ser adoptadas para prevenir la corrosión por fatiga:

- Asegurarse de que no se acumulen sales corrosivas procedentes del material aislante, del goteo o de pulverizaciones o salpicaduras corrosivas en el área del recipiente.
- Evitar toda cavidad donde se recoja agua durante el ciclo de operación, evitando con ello una concentración de sales en la cavidad.
- Especificar que las planchas perforadas deberán ser tratadas para eliminar completamente las tensiones interiores después de haber sido taladradas, si han de ser utilizadas como pantalla para operaciones de las que se sabe corren el riesgo de que se produzca corrosión.
- Elegir tubos con buena concetricidad y con uniformidad en el espesor del calibre de la pared, con el fin de evitar tensiones elevadas y desiguales cuando se someten a doblado, para ser utilizados como haces de tubos en los intercambiadores de calor.
- Utilizar los tipos con el 0,03 % como máximo de carbono, 304 L, 316 L y 317 L, para reparar recipientes respectivamente de los tipos 304, 316 y 317 siempre que se desee reducir localmente las tensiones después de hecha la reparación. Únicamente el acero con el 0,03 % de carbono como máximo deberá ser calentado a más de 426 °C, siempre que exista el riesgo de que se produzca corrosión intergranular.

- Evítese el curvado cíclico que repetidamente tensa el acero inoxidable por encima de su resistencia a la deformación o límite de elasticidad. Esto puede formar tensiones interiores que favorezcan la corrosión por fatiga inclusive en un medio de efecto moderado.

3. PROCESOS DE SOLDADURA UTILIZADOS EN LA UNIÓN POR FUSIÓN DE ACEROS INOXIDABLES

Entre los especialistas y profesionales metalmecánicos existe un viejo adagio que reza: “soldar es bueno, pero no soldar es mejor”. Es decir, preferiblemente se suelda cuando no hay más opción, de lo contrario conviene elegir otro método de conformación que no altere las propiedades de los materiales. Dicha sentencia, aunque se cumple para todos los metales, es particularmente pertinente al trabajar acero inoxidable. Esto no quiere decir que los inoxidables no se puedan soldar, simplemente que, por sus características intrínsecas, el proceso de soldeo debe ser diferente al del acero al carbono y al de los aceros de baja aleación.

Al soldar inoxidables hay que tener especial cuidado para que ni la estructura, ni la composición del cordón de soldadura y de la zona afectada por el calor cambien sustancialmente, ya que el punto de fusión de dichos materiales es más bajo, por lo cual se requiere menos calor para llegar. Además, su resistencia eléctrica es mayor que la del acero al carbono y por esto los procesos de soldadura necesitan menor intensidad de corriente. Para obtener óptimos resultados es necesario tener en cuenta estas diferencias, elegir cuidadosamente los parámetros, los métodos de soldadura, metales de aporte y consumibles correctos, todo ello con base en el tipo de inoxidable a soldar y el uso final que se le dará a la pieza⁹.

⁹ *Consideraciones para trabajar acero inoxidable*. http://www.metalactual.com/revista/20/procesos_consideracionesII.pdf. Consulta: octubre de 2015.

3.1. Proceso de soldadura MIG

Soldadura metálica con arco eléctrico y gas o soldadura MIG (*metal inert gas*) es también conocida como gas arco metal o MAG. La soldadura metálica con arco eléctrico y gas, SMAEG (en inglés *gas metal arc welding*, GMAW), es un proceso en el cual el electrodo es un alambre metálico desnudo consumible y la atmósfera de protección se proporciona inundando el arco eléctrico con un gas.

El alambre desnudo se alimenta en forma continua y automática, desde una bobina a través de la pistola de soldadura. En la GMAW se usan diámetros de alambre que van desde 0,8 a 6,4 mm, el tamaño depende del grosor de las partes que se van a unir y la velocidad de deposición deseada. Para protección se usan gases inertes como el argón y el helio, también gases activos como el dióxido de carbono (CO₂). La elección de los gases y sus mezclas depende del material que se va a soldar, al igual que de otros factores. Se usan gases inertes para soldar aleaciones de aluminio y aceros inoxidable, en tanto que normalmente se usa dióxido de carbono para soldar aceros al bajo y mediano carbono.

3.2. Proceso de soldadura TIG

La soldadura TIG fue desarrollada inicialmente con el propósito de soldar metales anticorrosivos y otros metales difíciles de soldar, no obstante, al pasar el tiempo, su aplicación se ha expandido incluyendo tanto soldaduras como revestimientos endurecedores (*hard facing*) en prácticamente todos los metales usados comercialmente.

En cualquier tipo de proceso de soldadura, la mejor soldadura que se puede obtener, es aquella donde la soldadura y el metal base comparten las

mismas propiedades químicas, metalúrgicas y físicas. Para lograr esas condiciones, la soldadura fundida debe estar protegida de la atmósfera durante la operación, de otra forma, el oxígeno y nitrógeno de la atmósfera se combinarían, literalmente, con el metal fundido, resultando en una soldadura débil y con porosidad.

3.3. Proceso de soldadura GTAW

La soldadura de tungsteno con arco eléctrico y gas, STAEG (en inglés *gas tungsten arc welding*, GTAW), es un proceso que usa un electrodo de tungsteno no consumible y un gas inerte para proteger el arco eléctrico. Con frecuencia, este proceso se denomina soldadura de tungsteno con gas inerte (en inglés *tungsten inert gas welding*, TIG *welding*); en Europa se le denomina wolframio con gas inerte (*WIG welding*).

3.4. Gases inertes y gases activos para soldadura de acero inoxidable

Las propiedades químicas de los gases ejercen una acción directa sobre el baño de fusión. Los gases puros pueden clasificarse desde el punto de vista de la soldadura en inertes y activos.

- Gases inertes: son aquellos que no reaccionan químicamente con otros elementos para formar compuestos. Los gases inertes que tienen aplicación en soldadura son el argón y el helio.
- Gases activos: son aquellos que, bajo determinadas condiciones, pueden combinarse químicamente con otros elementos químicos del baño de fusión. Los gases activos que tienen aplicación en soldadura son el

oxígeno, el dióxido de carbono (CO_2) y el hidrógeno. Estos gases actúan sobre el baño de fusión como agentes oxidantes, o como agentes reductores.

- Gases tóxicos: son todos aquellos cuyo límite de máxima concentración tolerable durante ocho horas por día y cuarenta horas por semana es inferior a 50 partes por millón.
- Gases corrosivos: son todos aquellos que producen una corrosión de más de 5 mm al año en acero expuestos. El oxígeno es un gas fuertemente oxidante que se combina fácilmente con los elementos químicos del baño de fusión formando óxidos. Su acción puede evitarse utilizando desoxidantes adecuados. Los elementos manganeso y silicio, tienen gran afinidad por el oxígeno, lo captan formando óxido de manganeso y óxido de silicio que pasan a la escoria. El oxígeno libre forma monóxido de carbono con el carbono del acero, a la temperatura de soldadura.
- El dióxido de carbono también actúa como agente oxidante aunque menos fuerte que el oxígeno puro.
- El hidrógeno es un elemento fuertemente reductor.

3.4.1. Gases utilizados en procesos de soldadura

Los procesos de soldadura con gas de protección son MIG (metal inerte gas), MAG (metal activo gas) y TIG (tungsteno inerte gas). Cada uno de estos gases tiene un comportamiento específico en el proceso de soldadura.

- Argón: es fácil de ionizar facilita el cebado del arco, es el gas base de todas las mezclas, es 38 % más pesado que el aire, actúa desplazando al aire de las inmediaciones del arco eléctrico. El bajo potencial de ionización del argón implica menor energía a introducir en la columna de plasma y longitud de arco más corta. El argón tiene una pureza del 99,995 %, sus principales impurezas son el nitrógeno con cantidades inferiores a 30 ppm, el agua con cantidades inferiores a 8 ppm y el oxígeno con cantidades por debajo 10 ppm.
- Oxígeno: facilita la fluidez del baño y mejora el desprendimiento de las gotas del hilo. El oxígeno es alrededor del 10 % más pesado que el aire, la influencia de su densidad es limitada, debido a las pequeñas cantidades utilizadas en las mezclas de gas, que son de un máximo del 5 %. Su principal aplicación en la soldadura es para los aceros especiales, aleados o de alto contenido en carbono.
- Dióxido de carbono: aumenta la viscosidad del baño y la penetración. Con protección de dióxido de carbono se obtiene más penetración que con ningún otro gas, para su aplicación en soldadura tiene que tener una pureza mínima de un 99,7 % y estar exento de humedad. Su peso específico es de 1,97 kg/m³, es decir, 1,5 veces más pesado que el aire.
- El dióxido de carbono, al ser más pesado que el aire, se comporta como una protección eficaz frente a la atmósfera, es un gas muy activo, tiene un potencial de oxidación entre 10 y el 50 %. El dióxido de carbono se suele utilizar mezclado con el argón en cantidades que van del 15 al 18 % aproximadamente. Esta mezcla está homologada en Europa por las normas DIN 5859-SG2 y 5859-SG3 para un determinado tipo de electrodos como material base.

- Helio: proporciona un arco rígido aumentando la velocidad de soldadura. El helio tiene un 17 % del peso del aire, por lo que no es tan eficaz en el desplazamiento del aire como es el argón, esta es la razón por la que se necesitan caudales de helio tan altos, una mezcla estándar de argón/helio es al 50 %, aunque también se mezcla argón 70 % y helio 30 %.
- Hidrógeno: aumenta la penetración, siendo un gas eminentemente reductor, su densidad es de 7 % de la del aire. El hidrógeno es el gas más ligero, pero el efecto de su bajo peso específico es despreciable debido a las pequeñas proporciones utilizadas en sus mezclas, se limitan a un máximo del orden de 5 %. Los gases de protección que contienen hidrógeno se recomiendan solamente para la soldadura de aceros inoxidable.

3.5. Gases utilizados en el proceso de soldadura TIG

Estos son argón, helio e hidrógeno. Nunca se utilizan gases oxidantes para evitar la contaminación del electrodo. El electrodo del proceso de soldadura TIG es de tungsteno. Los gases utilizados en proceso de soldadura TIG deben cumplir los siguientes requerimientos:

- Oxidante: es la propiedad que tienen algunos cuerpos de oxidar o ceder oxígeno. La oxidación es un fenómeno químico que debilita notablemente las características mecánicas de los aceros.
- Reductor: en sentido químico, se dice que un cuerpo es reductor cuando tiende a reducir los efectos de oxidación que tienen algunos cuerpos; en

el caso del hidrógeno, reduce o absorbe el oxígeno de la mezcla para evitar la oxidación de las soldaduras.

- **Comburente:** se dice que un gas es comburente cuando el mismo no arde, pero ayuda de manera activa a que otros cuerpos puedan arder. El más conocido de los comburentes que se manejan es el aire y como parte fundamental de este, el oxígeno.
- **Ionización:** es el proceso por el cual un átomo neutro se carga eléctricamente por la pérdida o ganancia de un electrón. Si el gas no se ioniza, no conducirá la corriente y el proceso de soldadura por arco eléctrico no funcionará. El potencial de ionización no debe confundirse con la tensión de soldadura.
- **Conductividad térmica:** indica la facilidad con la que el gas disipa el calor.
- **Densidad:** es la masa por unidad de volumen. Densidad relativa de un gas es su densidad en relación con la densidad del aire. La densidad puede indicar que un cuerpo es más pesado que el cuerpo de referencia, si el valor es superior a 1, o al contrario, que es más ligero si el valor es inferior a 1. Una densidad igual a la unidad indica que ambos cuerpos son igual de densos.
- **Soldabilidad:** es la aptitud de un material para ser soldado, los materiales metálicos, como el acero al carbono, acero inoxidable, aluminio, cobre, entre otros, según la cantidad de composiciones químicas, que lleven en sus aleaciones, se sueldan con mayor o menor facilidad.

- **Compacidad:** es la aptitud de una soldadura para estar libre de inclusiones extrañas. Las más frecuentes son los poros, que son inclusiones de gas y las inclusiones de escoria. Un cuerpo compacto es aquel que es denso poco poroso. La masa del pan es compacta, pero el pan sacado del horno no es compacto, es poroso.
- **Mojabilidad:** es la aptitud que tiene el baño de fusión para extenderse sobre la superficie de la pieza que se está soldando.
- **Plasma:** es el término dado a un gas que está formado por un conjunto de iones, electrones libres, átomos neutros y moléculas, de tal suerte que es capaz de conducir una corriente eléctrica, para que el plasma sea eléctricamente conductor, el número de partículas ionizadas debe ser superior al 5 % del total de partículas del gas. Las propiedades físicas del gas que afectan a la columna de plasma son potencial de ionización, conductividad térmica y densidad.

3.6. Composición química del electrodo o material de aporte

Para Galbarro, la mayoría de los electrodos para soldadura por arco se clasifican a partir de las propiedades del metal de aporte, que fueron clasificadas y estudiadas por un comité asociado a la AWS y a la ASME¹⁰.

Las características mecánicas de los aceros dependen en gran medida del tipo de aleación incorporada durante su fabricación. Por tanto, los electrodos de material de aporte empleados para soldadura se deberán seleccionar en función de la composición química del acero que se vaya a soldar.

¹⁰ RODRÍGUEZ GALBARRO, Hermenegildo. *Soldadura por arco con electrodo revestido*. p. 11.

Las diferentes características de operación entre los electrodos existentes en el mercado dependen del revestimiento que cubre al alambre del electrodo. Por otro lado, este alambre es generalmente del mismo tipo, acero al carbón AISI 1010 que tiene un porcentaje de carbono de 0,08 a 0,12 C para la serie de electrodos más comunes.

Por lo general los aceros se clasifican de acuerdo con su contenido de carbono, esto es, acero de bajo, mediano y alto contenido en carbono.

En el caso particular del presente trabajo de graduación, la varilla a utilizarse como material de aporte se selecciona de acuerdo a la composición química de la tubería de acero inoxidable ASTM A312 AISI 304, el material de aporte compatible con el material base y sus coeficientes de transferencia calórica. Considerando la ficha técnica del fabricante del tubo, en la cual se dan los porcentajes de los elementos que conforman la aleación, se procede a seleccionar el material de aporte.

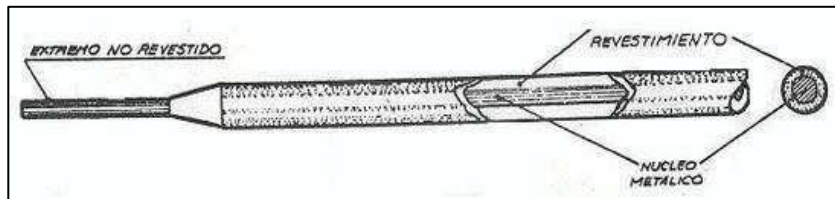
3.7. Electrodo

Es una varilla metálica especialmente preparada para servir como material de aporte en los procesos de soldadura por arco. Se fabrican en metales ferrosos y no ferrosos. Existen dos tipos de electrodos: metal revestido y no revestido.

3.7.1. Electrodo revestido

Tiene un núcleo metálico, un revestimiento a base de sustancias químicas y un extremo no revestido para fijarlo en el porta electrodo.

Figura 9. **Electrodo revestido**



Fuente: *Manual de soldadura por arco manual*. <http://www.monografias.com/trabajos90/soldadura-arco-manual/soldadura-arco-manual.shtml>. Consulta: octubre de 2015.

3.7.1.1. Partes del electrodo

Las partes del electrodo se desarrollan a continuación.

- Núcleo: es la parte metálica del electrodo que sirve como material de aporte. Su composición química varía de acuerdo a las características del material a soldar.
- Revestimiento: es un material que está compuesto por distintas sustancias químicas. Tiene las siguientes funciones:
 - Dirige el arco conduciendo a una fusión equilibrada y uniforme.
 - Crea gases que actúan como protección evitando el acceso del oxígeno y el nitrógeno.
 - Produce una escoria que cubre el metal de aporte, evitando el enfriamiento brusco y también el contacto del oxígeno y del nitrógeno.
 - Contiene determinados elementos para obtener una buena fusión con los distintos tipos de materiales.

- Aporta al baño de fusión elementos químicos que darán al metal depositado las distintas características para las cuales fue formulado.
- Estabiliza el arco eléctrico.

3.7.1.2. Condiciones de uso

Los electrodos deben almacenarse en un lugar seco, libre de humedad y a temperatura por encima de los 40 °C.

3.7.2. Electrodo desnudo o sin revestimiento

Es un alambre trefilado o laminado, que solo puede ser empleado en procesos donde exista una protección externa para impedir la acción del oxígeno y del nitrógeno. Estos procesos se denominan atmósfera inerte, utilizando para esto gases inertes industriales como el argón, el helio o la mezcla de argón y dióxido de carbono. Este proceso se denomina soldadura TIG.

3.8. Normas de aplicación

La AWS y la ASME son las máximas autoridades en el mundo de la soldadura, las cuales dictan las normas de clasificación de los electrodos para soldadura eléctrica, ya que son las más reconocidas internacionalmente.

3.9. Clasificación de electrodos para aceros al carbono

La especificación AWS A5.1, se refiere a los electrodos para soldadura de aceros al carbono, trabaja con la siguiente designación para electrodos revestidos

E XXYZ - 1 HZR

- E, indica que se trata de un electrodo para soldadura eléctrica manual.
- XX, son dos dígitos (o tres si se trata de un número de electrodo de cinco dígitos) que designan la mínima resistencia a la tracción, sin tratamiento térmico postsoldadura, del metal depositado, en kilolibras por pulgada cuadradas, como se indican en los ejemplos siguientes:

E 60XX... 60000 lbs/pulg² mínimo (60 Kpsi)

E 70XX... 70000 lbs/pulg² mínimo (70 Kpsi)

E110XX... 110000 lbs/pulg² mínimo (110 Kpsi)

El tercer dígito indica la posición en la que se puede soldar satisfactoriamente con el electrodo en cuestión. Así, si vale 1 (por ejemplo, E6011) significa que el electrodo es apto para soldar en todas posiciones (plana, vertical, techo y horizontal), 2 si solo es aplicable para posiciones planas y horizontal; y si vale 4 (por ejemplo E 7048) indica que el electrodo es conveniente para posición plana, pero especialmente apto para vertical descendente.

- Z, el último dígito, está íntimamente relacionado con el anterior, es indicativo del tipo de corriente eléctrica y polaridad en la que mejor trabaja el electrodo e identifica a su vez el tipo de revestimiento, que es

calificado según el mayor porcentaje de materia prima contenida en el revestimiento. Por ejemplo, el electrodo E 6010 tiene un alto contenido de celulosa en el revestimiento, aproximadamente un 30 % o más, por ello a este electrodo se le califica como un electrodo tipo celulósico.

Tabla V. Interpretación para el último dígito, según la clasificación AWS de electrodos

Ultima cifra	Tipo de corriente	Tipo de Revestimiento	Tipo de Arco	Penetración
E XX10	CCPI Polaridad inversa	Orgánico ⁽¹⁾	Fuerte	Profunda ⁽²⁾
E XX11	CA ó CCPI Polaridad inversa	Orgánico	Fuerte	Profunda
E XX12	CA ó CCPD Polaridad directa	Rutilo	Mediano	Mediana
E XX13	CA ó CC Ambas polaridades	Rutilo	Suave	Ligera
E XX14	CA ó CCPI Polaridad inversa	Rutilo	Suave	Ligera
E XX15	CCPI Polaridad inversa	Bajo Hidrógeno	Mediano	Mediana
E XX16	CA ó CCPI Polaridad inversa	Bajo Hidrógeno	Mediano	Mediana
E XX17	CCPI Polaridad inversa	Bajo Hidrógeno	Suave	Mediana
E XX18	CA ó CCPI Polaridad inversa	Bajo Hidrógeno	Mediano	Mediana

⁽¹⁾ E 6010: Orgánico; E 6020: Mineral; E 6020: CA y CC polaridad directa.

⁽²⁾ E 6010: profunda; E 6020: Media.

Fuente: RODRÍGUEZ GALBARRO, Hermenegildo. *Soldadura por arco con electrodo revestido*. p. 11.

Por otro lado, los códigos para designación que aparecen después del guión son opcionales e indican lo siguiente:

- 1 designa que el electrodo (E 7016, E 7018 o E 7024) cumple con los requisitos de impacto mejorados E y de ductilidad mejorada en el caso E 7024.

- HZ indica que el electrodo cumple con los requisitos de la prueba de hidrógeno difusible para niveles de Z de 4,8 o 16 ml de hidrógeno por 100 gr de metal depositado (solo para electrodos de bajo hidrógeno).
- R indica que el electrodo cumple los requisitos de la prueba de absorción de humedad a 80 °F y 80 % de humedad relativa (solo para electrodos de bajo hidrógeno).

3.10. Clasificación de electrodos para aceros de baja aleación

La especificación AWS A5.5., que se aplica a los electrodos para soldadura de aceros de baja aleación, utiliza la misma designación de la AWS A5.1. con excepción de los códigos para designación que aparecen después del guion opcional. En su lugar, utiliza sufijos que constan de una letra o de una letra y un número (por ejemplo A1, B1, B2, C1, G, M, entre otros), los cuales indican el porcentaje aproximado de aleación en el depósito de soldadura, como se puede observar en la tabla VI.

Tabla VI. **Porcentaje aproximado de aleación en el depósito de soldadura**

A1	0.5 % Mo
B1	0.5 % Cr, 0.5 % Mo
B2	1.25 % Cr, 0.5 % Mo
B3	2.25 % Cr, 1.0 % Mo
B4	2.0 % Cr, 0.5 % Mo
B5	0.5 % Cr, 1.0 % Mo
C1	2.5 % Ni
C2	3.25 % Ni
C3	1.0 % Ni, 0.35 % Mo, 0.15 % Cr

Continuación de la tabla VI.

D1 y D2	0.25-0.45 % Mo, 1.75 % Mn
G(*)	0.5 % mín. Ni, 0.3 % mín. Cr, 0.2 % mín Mo, 0.1 % mín. V, 1.0 % mín Mn
(*) Solamente se requiere un elemento de esta serie para alcanzar la clasificación general	

Fuente: RODRÍGUEZ GALBARRO, Hermenegildo. *Soldadura por arco con electrodo revestido*. p. 17.

Tabla VII. **Tipo de corriente y revestimiento del electrodo según la Norma AWS**

Clasificación AWS	Tipo de Revestimiento	Posición de soldeo	Corriente eléctrica
E 6010	Alta celulosa, sodio	F, V, OH, H	CC (+)
E 6011	Alta celulosa, potasio	F, V, OH, H	CA ó CC(+)
E 6012	Alto titanio, sodio	F, V, OH, H	CA, CC (-)
E 6013	Alto titanio, potasio	F, V, OH, H	CA, CC (+) ó CC (-)
E 6020	Alto óxido de hierro	H-Filete	CA, CC (-)
E 6020	Alto óxido de hierro	F	CA, CC (+) ó CC (-)
E 7014	Hierro en polvo, titanio	F, V, OH, H	CA, CC (+) ó CC (-)
E 7015	Bajo hidrógeno, sodio	F, V, OH, H	CC (+)
E 7016	Bajo hidrógeno, potasio	F, V, OH, H	CA ó CC (+)
E 7018	Bajo hidrógeno, potasio, hierro en polvo	F, V, OH, H	CA ó CC (+)
E 7018M	Bajo hidrógeno, hierro en polvo	F, V, OH, H	CC (+)
E 7024	Hierro en polvo, titanio	H-Filete, F	CA, CC (+) ó CC (-)
E 7027	Alto óxido de hierro, hierro en polvo	H-Filete	CA, CC (-)
E 7027	Alto óxido de hierro, hierro en polvo	F	CA, CC (+) ó CC (-)
E 7028	Bajo hidrógeno, potasio	H-Filete, F	CA ó CC (+)
E 7028	Hierro en polvo		
E 7048	Bajo hidrógeno, potasio	F, V, OH, H	CA ó CC (+)
E 7047	Hierro en polvo	F, V, OH, HV- Descendente	

Fuente: RODRÍGUEZ GALBARRO, Hermenegildo. *Soldadura por arco con electrodo revestido*. p. 18.

Según las normas AWS las posiciones de soldadura son:

- F: plana
- H: horizontal
- H-filete: filete horizontal
- V-descendente: vertical descendente
- V: vertical
- OH: techo o sobre cabeza

3.11. Clasificación de electrodos para aceros inoxidables

La especificación AWS A5.4 dicta las normas de clasificación de electrodos para soldar aceros inoxidables. Como los casos anteriores, el sistema de clasificación de estos electrodos también es numérico. Como muestras de clasificación de estos tipos de electrodos son, por ejemplo, E 308-15 o E 310-16.

Antes de entrar en la explicación del sistema, es conveniente resaltar que los aceros inoxidables se han identificados de acuerdo a lo que indica la AISI. Por ejemplo, el acero inoxidable AISI 310 corresponde a un acero cuya composición química es del 25 % de cromo y el 20 % de níquel, entre sus elementos principales.

La especificación AWS A5.4, que se refiere a los electrodos para soldadura de aceros inoxidables, trabaja con la siguiente designación para electrodos revestidos:

E XXX-YZ

- E indica que se trata de un electrodo para soldadura por arco.
- XXX indica la numeración que se corresponde a la clase AISI de acero inoxidable, para el cual está destinado el electrodo.
- Y, el penúltimo número indica la posición en que puede utilizarse. Así de los ejemplos E 308-15 o E 310-16, el 1 indica que el electrodo es apto para todas las posiciones.
- Z, el último número de los ejemplos anteriores (5 y 6) señala el tipo de revestimiento, la clase de corriente y la polaridad a utilizarse, en la forma siguiente:
 - 5: significa que el electrodo tiene un revestimiento alcalino que debe utilizarse únicamente con corriente continua y polaridad inversa (el cable del portaelectrodo al polo positivo).
 - 6: significa que el electrodo tiene un revestimiento de titanio, que podrá emplearse con corriente alterna o corriente continua. En caso de utilizarse con corriente continua esta debe ser con polaridad inversa (el cable del portaelectrodo al polo positivo).

En algunos casos se podrá encontrar que en la denominación del electrodo aparece un índice adicional al final con las letras ELC, que significa que el depósito del electrodo tiene un bajo contenido de carbono (E: extra; L: bajo; C: carbono).

3.11.1. Clasificación de electrodos para soldaduras al arco con gas

La especificación AWS A5.18 dicta las normas de clasificación del material de aporte para procesos de soldadura con protección gaseosa (MIG/MAG, TIG y plasma). En este caso, los electrodos se denominan de la siguiente forma:

ERXX-SX

- E: indica electrodo para soldadura por arco (solo caso MIG/MAG).
- R: indica aporte que funde por un medio diferente que el que conduce la corriente del arco eléctrico (sólo caso TIG y plasma).
- XX: indica la resistencia a la tracción nominal del depósito de soldadura (igual para todos los casos).
- S: indica que el electrodo es sólido.
- X: último número que indica la composición química del electrodo.

Tabla VIII. **Clasificación de electrodos para soldaduras al arco con gas**

E 60S-1	Argón-5 % O ₂	C.C. Polaridad Inversa	62 000
E 60S-2	Argón- 5 % O ₂ ó CO ₂	C.C. Polaridad Inversa	62 000
E 60S-3	Argón- 5 % O ₂ ó CO ₂	C.C. Polaridad Inversa	62 000
E 70S-4	CO ₂	C.C. Polaridad Inversa	72 000
E 70S-5	CO ₂	C.C. Polaridad Inversa	72 000
E 70S-6	CO ₂	C.C. Polaridad Inversa	72 000
E 80S-G	No específica	No específica	72 000
E 70S - IB	CO ₂	C.C. Polaridad Inversa	72 000
E 70S - GB	No específica	No específica	72 000
E 70 U-I	Argón- 5 % O ₂ ó Argón	C.C. Polaridad Directa	72 000
E 70T-1	CO ₂	C.C. Polaridad Inversa	72 000
E 70T-2	CO ₂	C.C. Polaridad Inversa	72 000
E 70T-3	Ninguno	C.C. Polaridad Inversa	72 000
E 70T-4	Ninguno	C.C. Polaridad Inversa	72 000
E 70T-5	CO ₂ Ninguno	C.C. Polaridad Inversa	72 000
E 70T-G	No específica	No específica	72 000

Fuente: RODRÍGUEZ GALBARRO, Hermenegildo. *Soldadura por arco con electrodo revestido*. p. 19.

3.12. **Ángulo o posición del electrodo con respecto a la pieza**

La soldadura con electrodo revestido implica, para el soldador, un doble movimiento de su brazo a coordinar, hacia abajo, para mantener la longitud del arco mientras se consume el electrodo, además de mantener el ángulo de la traslación lateral en el sentido de avance para la conformación del cordón y, donde lo requiera el procedimiento, un tercer movimiento de oscilación.

Las posiciones de soldadura se refieren exclusivamente a la posición del eje de la soldadura en los diferentes planos a soldar. Básicamente son cuatro, y todas exigen conocimiento y dominio perfecto del soldador para la ejecución de una unión soldadura.

En la ejecución del cordón de soldadura eléctrica aparecen piezas que no pueden ser colocadas en posición cómoda. Según el plano de referencia, fueron establecidas las cuatro posiciones siguientes:

- Posición plana o de nivel: es aquella en que la pieza recibe la soldadura colocada en posición plana a nivel. El material adicional viene del electrodo que está con la punta para abajo, depositando el material en ese sentido.
- Posición horizontal: es aquella en que las aristas o cara de la pieza a soldar está colocada en posición horizontal sobre un plano vertical. El eje de la soldadura se extiende horizontalmente.
- Posición vertical: es aquella en que la arista o eje de la zona a soldar recibe la soldadura en posición vertical, el electrodo se coloca aproximadamente horizontal y perpendicular al eje de la soldadura.
- Posición sobre cabeza: la pieza, colocada a una altura superior a la de la cabeza del soldador, recibe la soldadura por su parte inferior. El electrodo se ubica con el extremo apuntando hacia arriba verticalmente. Esta posición es inversa a la posición plana o de nivel.

3.13. Arco eléctrico

Es el fenómeno físico producido por el paso de una corriente eléctrica a través de una masa gaseosa (ionización), generándose en esta zona una alta temperatura, la cual es aprovechada como fuente de calor en todos los procesos de soldadura por arco eléctrico.

- **Ventajas:** se aprovecha como fuente de calor en el proceso de soldadura por arco, con el fin de fundir los metales en los puntos que han de unirse, de manera que se fundan a la vez y formen luego una masa sólida única.
- **Desventajas:** provoca irradiaciones de rayos luminosos, infrarrojos y ultravioleta, los cuales producen trastornos orgánicos si no se toman las debidas precauciones.
- **Precauciones:** debe evitar exponerse sin equipo de seguridad a los rayos luminosos, infrarrojos y ultravioleta, ya que estos provocan encandilamiento, quemaduras de la piel y ojos, respectivamente.

3.14. Movimientos del electrodo

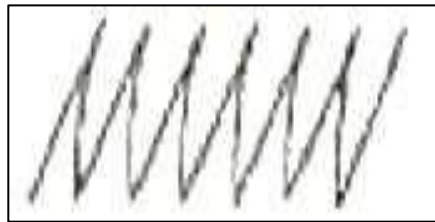
Abarca los movimientos que se realizan con el electrodo a medida que se avanza en una soldadura. Estos movimientos son de oscilación, están determinados principalmente por la clase de electrodo y la posición de la unión.

3.14.1. Movimiento de zigzag (longitudinal)

Es el movimiento zigzagueante en línea recta efectuado con el electrodo en sentido del cordón. Este movimiento se usa en posición plana para mantener el cráter caliente y obtener una buena penetración. Cuando se suelda en posición vertical ascendente, sobre cabeza y en juntas muy finas se utiliza este

movimiento para evitar acumulación de calor e impedir así que el material de aporte gotee.

Figura 10. **Movimientos de zigzag (longitudinal)**

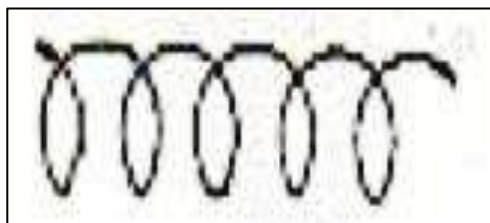


Fuente: *Manual de soldadura por arco manual*. <http://www.monografias.com/trabajos90/soldadura-arco-manual/soldadura-arco-manual.shtml>. Consulta: octubre de 2015.

3.14.2. **Movimiento circular**

Se utiliza esencialmente en cordones de penetración donde se requiere poco depósito; su aplicación es frecuente en ángulos interiores, pero no para relleno de capas superiores. A medida que se avanza, el electrodo describe una trayectoria circular.

Figura 11. **Movimiento circular**

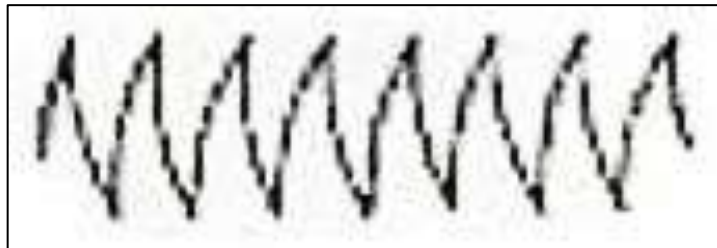


Fuente: *Manual de soldadura por arco manual*. <http://www.monografias.com/trabajos90/soldadura-arco-manual/soldadura-arco-manual.shtml>. Consulta: octubre de 2015.

3.14.3. Movimiento semicircular

Garantiza una fusión total de las juntas a soldar. El electrodo se mueve a través de la junta describiendo un arco o media luna, lo que asegura la buena fusión en los bordes. Es recomendable en juntas biseladas y recargue de piezas.

Figura 12. **Movimiento semicircular**

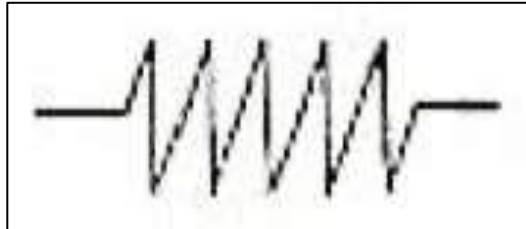


Fuente: *Manual de soldadura por arco manual*. <http://www.monografias.com/trabajos90/soldadura-arco-manual/soldadura-arco-manual.shtml>. Consulta: octubre de 2015.

3.14.4. Movimiento en zigzag (transversal)

El electrodo se mueve de lado a lado mientras se avanza. Este movimiento se utiliza principalmente para efectuar cordones anchos. Se obtiene un buen acabado en sus bordes, facilitando que suba la escoria a la superficie, permite el escape de los gases con mayor facilidad y evita la porosidad en el material depositado. Este movimiento se utiliza para soldar en toda posición.

Figura 13. **Movimiento zigzag (transversal)**

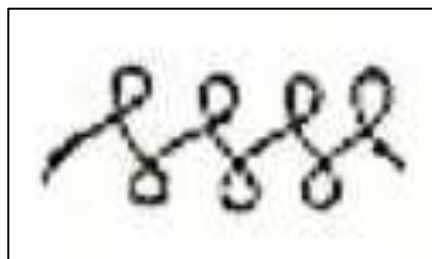


Fuente: *Manual de soldadura por arco manual*. <http://www.monografias.com/trabajos90/soldadura-arco-manual/soldadura-arco-manual.shtml>. Consulta: octubre de 2015.

3.14.5. Movimiento entrelazado

Este movimiento se usa generalmente en cordones de terminación, en tal caso se aplica al electrodo una oscilación lateral, que cubre totalmente los cordones de relleno. Es de gran importancia que el movimiento sea uniforme, ya que se corre el riesgo de tener una fusión deficiente en los bordes de la unión.

Figura 14. **Movimiento entrelazado**



Fuente: *Manual de soldadura por arco manual*. <http://www.monografias.com/trabajos90/soldadura-arco-manual/soldadura-arco-manual.shtml>. Consulta: octubre de 2015.

3.15. Tipos de corrientes utilizadas en la soldadura de acero inoxidable

El tipo de corriente depende fundamentalmente del tipo de electrodo que se va a utilizar. A pesar de que la corriente continua es la más común, existe amplia gama de electrodos en el mercado actual que pueden utilizarse con corriente continua y con alterna. El costo de la energía con corriente alterna es menor que con corriente continua, pero representa una parte poco relevante del coste total de soldadura, no siendo un factor decisivo la selección del tipo de corriente.

Tabla IX. Comparación entre uso de corriente continua y alterna

Características	Corriente continua	Corriente alterna
Pérdida de tensión en cables	Grande, los cables han de ser tan cortos como sea posible	Pequeña, preferible para soldar a gran distancia de la fuente.
Electrodos	Son válidos todos los tipos de electrodos.	El revestimiento debe contener sustancias que restablezcan el arco.
Encendido del arco	Fácil.	Más difícil sobre todo en electrodos de pequeño diámetro.
Mantenimiento del arco	Fácil.	Más difícil, excepto cuando se utilizan electrodos de gran rendimiento.
Efecto de sopro	Muy sensible, sobre todo cuando la soldadura está cerca de extremos de la pieza.	Es raro que se produzca. La alternancia de ciclos neutraliza los campos magnéticos.
Salpicaduras	Poco frecuentes.	Más frecuentes, debidas a la pulsación.
Posiciones de soldeo	Más fácil de usar en posición para soldaduras de secciones gruesas.	Fácil de usar en cualquier posición si se dispone del electrodo adecuado.
Soldadura de hojas metálicas	Preferible.	Si no se actúa con gran precaución, se puede deteriorar el material debido a la dificultad de encendido del arco.
Soldaduras de secciones gruesas	Rendimiento bajo.	Preferible pues al poder utilizar un mayor diámetro del electrodo y más intensidad de corriente, se logran altas tasas de rendimiento

Fuente: *Soldadura: cursos y homologaciones*. soldaduracursos.blogspot.com/2013/.../selección-del-tipo-de-corriente. Consulta: 14 de enero de 2016.

4. DISEÑO DE JUNTAS, HOLGURAS Y TRASLAPES EN PIEZAS DE TUBERÍA DE ACERO INOXIDABLE

Con excepción del corte oxiacetilénico, el acero inoxidable puede ser cortado con los mismos métodos utilizados para el acero al carbono. El corte oxiacetilénico resulta en la formación de óxidos de cromo refractarios que impiden un corte preciso y uniforme¹¹.

El diseño de juntas utilizadas para acero inoxidable es similar a las de los aceros ordinarios. El diseño de junta seleccionada debe producir una soldadura de resistencia apropiada y desempeño en servicio, manteniendo bajos los costos. Las soldaduras a tope deberán ser con penetración completa, para servicio en atmósferas corrosivas.

El acero inoxidable fundido de la soldadura es bastante menos fluido que el acero al carbono, y la profundidad de la penetración de la soldadura no es tan grande. Para compensar, las juntas de soldadura en acero inoxidable deberán tener un bisel y un espacio para la pasada de raíz más ancha. El proceso de soldadura también influencia el diseño de junta óptimo.

El objetivo de la unión soldada es transferir los esfuerzos entre los miembros a través de esta unión. La resistencia depende no solo del tamaño de la soldadura, sino también de la resistencia del metal de aporte en el proceso de soldadura.

¹¹ *Soldadura de los aceros inoxidables*. <http://www.cientificosaficionados.com/libros/solinox1.pdf>. Consulta: octubre de 2015.

Hay muchos factores que se deben considerar al diseñar una unión soldada. Esto influye sobre la facilidad de preparación de los bordes de las tuberías, la resistencia que se desea en el punto de unión y el espesor de la chapa de la tubería a unir. Los factores a considerar son:

- Diámetro de la tubería
- Espesor de la chapa
- Proceso de soldadura a utilizar
- Posición para soldar
- Accesibilidad del punto de unión, si es tubería instalada

En el caso de las probetas de ensayo, las juntas se biselaron con un ángulo de 60 grados, lo que permite mejor penetración del cordón de raíz y llenado con el material de aporte.

5. DEFECTOS EN SOLDADURAS DE ACEROS INOXIDABLES

Los defectos internos en soldadura de aceros inoxidable son: falta de penetración del cordón de raíz por baja intensidad de corriente, lo cual no permite la fusión del metal base; socavaciones debido a una intensidad de corriente elevada; porosidades debido a inclusión de agentes externos por insuficiencia de la atmósfera de protección del gas inerte; grietas en el cordón debido a tensiones residuales en piezas embridadas; inclusiones de óxidos por falta de limpieza; corrosión intergranular; raíz del cordón de soldadura oxidada debido a la falta de purga o gas de protección dentro de la cámara de la tubería, entre otras.

La unión por soldadura de aceros inoxidable debe ser un esfuerzo conjunto de la selección de la aleación correcta del metal de aporte y el proceso de soldadura a emplear, ambos elementos son esenciales.

Los aceros inoxidable deben ser manejados con un poco más de cuidado que los aceros ordinarios, en el corte y montaje. El cuidado que se tome en la preparación para la soldadura será tiempo bien utilizado, lo que incrementará la calidad de la soldadura y la terminación del producto, lo cual dará un óptimo rendimiento en servicio.

En ductos que conducen fluidos a altas temperaturas y presiones, los defectos se consideran altamente peligrosos debido a posibles fallas en las uniones.

5.1. Porosidad o filtración de gases

Otros de los aspectos que habrá que cuidar mucho es la humedad, cuya presencia puede producir porosidades en el cordón de soldadura. La humedad no solo puede presentarse en el ambiente que rodea mientras se ejecuta la soldadura, sino que puede estar presente a través del metal base o estar impregnada en el propio revestimiento de los electrodos inoxidables que se empleen, provocando filtración de gases al proceso de soldadura y, con ello, burbujas de vapor atrapadas en la misma.

Para esto se recomienda mantener los electrodos en ambientes cerrados y temperaturas arriba de los 36 °C, o bien, en termos portátiles hasta su utilización, para evitar que se produzca la absorción de humedad por parte del revestimiento del electrodo.

Algunos síntomas que pueden indicar de la presencia de humedad en el revestimiento de los electrodos son la dificultad que presenta la remoción de la escoria de la superficie del cordón o la presencia visible de porosidad. Algunos fabricantes han desarrollado alambres que contienen elementos con los cuales el oxígeno se combina preferentemente al carbón para formar escorias inofensivas. Estos elementos, llamados desoxidantes, son manganeso (Mn), silicio (Si), titanio (Ti), aluminio (Al) y zirconio (Zr).

5.2. Soplo magnético

Los aceros austeníticos no son magnéticos, sin embargo están sujetos al soplo del arco, como en los aceros al carbono. El soplo magnético es una desviación del arco eléctrico que se forma entre el electrodo de tungsteno y la pieza a soldar. Se debe principalmente a las fuerzas magnéticas que actúan

entre los cables de conexión. El fenómeno se observa cuando el arco eléctrico oscila de un lado a otro y ocasiona distorsión en la dirección del cordón de soldadura.

Una medida de prevención de este fenómeno es afilar el electrodo y acercar lo más posible la masa de tierra al área en proceso de soldadura. Otra causa puede ser una presión muy alta del gas inerte, diámetro del electrodo o baja intensidad (amperaje).

5.3. Socavaciones

Las socavaciones en el cordón de soldadura y en las piezas a unir se dan por varias razones, cuando se utiliza una intensidad de corriente más elevada que la recomendada para el diámetro de electrodo, ángulo de la antorcha inadecuado o movimiento muy variado del electrodo. Este defecto es fácil de detectar visualmente, por eso es conveniente la observación previa en el proceso de soldadura.

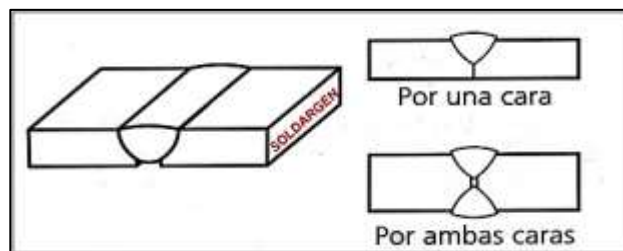
5.4. Falta de penetración

La falta de penetración del cordón de soldadura se da cuando hay poca fusión de los bordes de las piezas a unir. Por consiguiente, aparecen de espacios vacíos que debilitan enormemente la soldadura. Las causas pueden ser:

- Empleo de un electrodo de excesivo diámetro, tomar en cuenta la separación entre las piezas a soldar y los espesores de las mismas.

- Bajo ajuste del amperaje en el equipo de soldadura, se debe regular la intensidad en función del espesor de las piezas a soldar, diámetro del electrodo y posición de la soldadura.
- Velocidad no adecuada en el proceso de depósito del cordón de soldadura.
- La longitud del arco eléctrico debe ser aproximadamente el diámetro del electrodo.

Figura 15. **Falta de penetración**



Fuente: *Defectos del soldeo por arco*. http://soldargen.blogspot.com/2012_05_01_archive.html.

Consulta: octubre de 2015.

Por el contrario, también se da la excesiva penetración del cordón de soldadura. Las causas pueden ser: intensidad excesiva, velocidad de avance del electrodo muy lenta, excesiva separación de los bordes de las piezas a unir, entre otros.

5.5. Contaminación de la soldadura

En los procesos de soldadura por fusión, el arco eléctrico y las altas temperaturas provocan reacciones con los agentes de la atmósfera que rodean al mismo, tal es caso del oxígeno, nitrógeno e hidrógeno presentes en el aire.

Las propiedades mecánicas de la unión soldada pueden degradarse seriamente por estas reacciones. Para proteger la operación de soldadura de estos contaminantes, casi todos los procesos de soldadura con arco eléctrico proporcionan algún medio para proteger el arco del aire en el ambiente. Esto se logra cubriendo la punta del electrodo, el arco eléctrico y el charco de fusión con un manto de gas activo o inerte, lo que inhibe la exposición del metal soldado al aire.

5.6. Simbología de polaridades en los procesos de soldadura

Cuando se trabaja con corriente continua, el circuito de soldadura puede alimentarse con polaridad directa o con polaridad inversa, la circulación de electrones se produce desde la pieza hacia el electrodo, originando un fuerte calentamiento de este último. El intenso calor generado en el electrodo tiende a fundir su extremo y puede producir la contaminación del cordón de soldadura.

Con polaridad inversa se requiere el empleo de electrodos de mayor diámetro que los utilizados con polaridad directa a la misma intensidad. La polaridad también afecta a la forma del cordón de soldadura. Concretamente, la polaridad directa da lugar a cordones estrechos y de buena penetración. Por el contrario, la polaridad inversa produce cordones anchos y con poca penetración.

Por esta razón, la corriente continua con polaridad inversa no se utiliza nunca en el procedimiento TIG, a excepción de soldeo en aluminio o magnesio. En estos metales se forma una pesada película de óxido, que se elimina fácilmente cuando los electrones fluyen desde la pieza hacia electrodo (polaridad inversa).

Tabla X. **Simbología de polaridades para procesos de soldadura TIG**

Símbolo	Descripción
~	Corriente alterna
= +	Corriente directa polo positivo
= -	Corriente directa polo negativo
= ±	Corriente directa polo positivo o negativo
=+~	Corriente directa polo positivo o corriente alterna
= ±~	Corriente directa polo negativo o corriente alterna
=+~	Corriente directa polo positivo o negativo corriente alterna

Fuente: RODRÍGUEZ GALBARRO, Hermenegildo. *Soldadura por arco con electrodo revestido*. p. 21.

5.7. Tabla de amperaje según el espesor del electrodo

El amperaje, en términos generales, es regular la intensidad de corriente para fusión del electrodo y el metal base, en el proceso de soldadura.

Tabla XI. **Amperaje para electrodos para soldadura TIG**

GUIA PARA LA ELECCION DE LOS ELECTRODOS Y DE LAS CORRIENTES PARA SOLDADURA TIG							
Electrodo tipo Ø ▼	D.C. Tungsteno Torio 2%	A.C.					
		Pos. Max. Penetración		Pos. Cero balanceo		Pos. Max. Limpieza	
		Tungsteno puro	Tungsteno ZR 0.8 %	Tungsteno puro	Tungsteno ZR 0.8 %	Tungsteno puro	Tungsteno ZR 0.8 %
0.5mm - 0.02"	15A - 40A	-	-	10A - 20A	5A - 20A	-	-
1mm - 0.04"	25A - 85A	-	-	20A - 30A	20A - 60A	-	-
1.6mm - 1/16"	70A - 150A	50A - 100A	70A - 150A	30A - 60A	50A - 80A	20A - 40A	30A - 60A
2.4mm - 3/32"	150A - 250A	100A - 160A	140A - 235A	60A - 120A	80A - 140A	40A - 100A	60A - 120A
3.2mm - 1/8"	200A - 350A	150A - 210A	225A - 325A	80A - 160A	100A - 180A	60A - 140A	80A - 160A
4mm - 5/32"	300A - 400A	200A - 275A	300A - 400A	100A - 240A	150A - 280A	80A - 200A	150A - 250A

Fuente: *Manual de instrucciones para soldadura TIG*. <http://www.cebora.it/istr/431e.pdf>.

Consulta: 12 de febrero de 2016.

5.8. Normas de seguridad en los procesos de soldadura

En términos generales, soldadura es la unión de metales ferrosos y no ferrosos mediante fusión de las piezas o con material de aporte de iguales características que el metal base a unir.

Para ello se utilizan, generalmente, tres fuentes directas:

- Llama producida por la combustión de un gas con aire u oxígeno.
- Arco eléctrico, establecido entre un electrodo y una pieza.
- Resistencia eléctrica opuesta al paso de una corriente entre dos o más piezas.

En casi todos los procesos de soldadura se encuentran, fundamentalmente, humos metálicos que dependerán de una serie de factores como punto de fusión y vaporización de los metales de aleación del metal base y varilla de aporte. Entre los humos metálicos están:

- Tóxicos o irritantes: cadmio, cromo, manganeso, zinc, mercurio, níquel, titanio, vanadio, plomo, molibdeno.
- Neumoconióticos poco peligrosos: aluminio, hierro, estaño, carbón.
- Neumoconióticos muy peligrosos: asbestos, sílice, cobre, berilio.
- Gases que se desprenden al soldar, utilizados como atmósfera de protección en el proceso de soldadura (dióxido de carbono, argón, helio, entre otros), o bien, porque se desprenden de los revestimientos de los electrodos o piezas a soldar.

- También se producen vapores nitrosos, siendo el nitrito el que con mayor concentración se encuentra. Los procesos de soldadura con electrodos de tungsteno revestido. El ozono (O₃) es otro de los gases producido por la emisión de rayos ultravioleta que generan las operaciones de soldeo. La producción de ozono es menor cuando se utiliza argón en comparación con helio.

Las normas de seguridad para soldadura de aceros inoxidable son esencialmente las mismas que para todos los metales, y se refieren a áreas tales como equipamiento eléctrico, de gases, protección de ojos, cara, protección contra incendios, etiquetado de materiales peligrosos, entre otros. Una buena guía de referencia sobre seguridad en soldadura es la norma ANSI/ASC, Z49.1-88, *Safety in welding and cutting*, publicada por la American Welding Society.

La adecuada ventilación es importante para minimizar la exposición de los soldadores a los humos, en la soldadura y corte de todos los metales, incluyendo al acero inoxidable. Además de una buena ventilación, los soldadores deben evitar aspirar los humos que se desprenden del trabajo, posicionándolo de tal manera que su cabeza se encuentre fuera de la columna de humo. La composición de los humos de soldadura varía con el metal de aporte y el proceso. Las soldaduras por arco también producen gases como ozono y óxidos de nitrógeno. Se ha manifestado preocupación en la soldadura con consumibles de acero inoxidable y aceros de alta aleación debido al cromo, y en menor grado al níquel, presentes en los humos de soldadura. Una buena ventilación minimizará estos riesgos a la salud. El Instituto Internacional de Soldadura desarrolló una serie de hojas informativas para soldadores, que ofrecen sugerencias internacionalmente aceptadas para el control del humo.

5.9. Pruebas no destructivas

Los ensayos no destructivos (END) conocidos también como NDT (*non destructive testing*), son pruebas que se realizan, entre otros, para detectar las discontinuidades en las soldaduras, con el fin de conocer información relevante sobre su estado y calidad. Este tipo de ensayos, que se realiza mediante la aplicación de pruebas físicas como ondas electromagnéticas, acústicas y elásticas, emisión de partículas subatómicas y capilaridad, entre otras, se considera no destructivo, porque su práctica no representa ningún riesgo real para el objeto en estudio, ni altera de forma permanente sus propiedades físicas, químicas, mecánicas ni dimensionales¹².

Los END pueden aplicarse en cualquier etapa del proceso, ya sea para controlar la calidad de la materia prima, durante los procesos de producción y fabricación, como medio de control de calidad en las salidas de producción o como método de inspección durante esquemas y servicios de mantenimiento.

Este tipo de ensayos puede aplicarse en uniones soldadas, materiales, productos y objetos de áreas industriales tan diversas como la petroquímica, naval, automotriz, aeronáutica, construcción o la térmica, es decir, en cualquier pieza o componente soldado. Detectar a tiempo las discontinuidades, defectos e imperfecciones de los cordones de soldadura puede marcar la diferencia entre uniones seguras y aquellas potencialmente riesgosas o susceptibles de siniestralidad. Es por ello que la realización de ensayos no destructivos para verificar el estado de la soldadura y de las piezas a las que pertenece se ha convertido en una de las prácticas más utilizadas actualmente.

¹² *Calidad en la soldadura*. [http:// www.metalactual.com/ revista/ 23/ procesos_soldadura.pdf](http://www.metalactual.com/revista/23/procesos_soldadura.pdf). Consulta: 20 de abril de 2016.

Los ensayos no destructivos son de gran importancia a la hora de examinar las uniones de piezas soldadas, ya que este tipo de pruebas permiten no solo determinar la calidad y características de la soldadura, sino que, además, pueden alertar sobre la presencia de discontinuidades en la misma y ofrecer datos tan relevantes como tamaño, forma y situación de dichos errores.

5.9.1. Ensayo de inspección visual

Como su nombre lo indica, es un ensayo que se realiza mediante un proceso de inspección visual y brinda información inmediata del área evaluada. Además, permite llevar control de calidad del acabado, forma y tamaño del cordón de soldadura.

Aunque su práctica es sencilla, requiere de personal calificado, capaz de comparar los datos obtenidos en la superficie del cordón de soldadura, con los estándares nacionales e internacionales que determinan la aceptabilidad y calidad de una unión soldada. Es por esta razón que algunos organismos que vigilan y regulan las buenas prácticas de soldeo, como la American Welding Society (AWS, Sociedad Americana de Soldadura), recomiendan que este tipo de ensayo sea practicado por inspectores capacitados y certificados que se ciñan a la normatividad preestablecida.

Para la práctica de este ensayo, además de agudeza y destreza visual, el inspector requiere elementos como lupas, linternas, espejos e instrumentos de medición, como flexómetros y reglas. Mediante este método se puede examinar, sobre todo, aspectos relacionados con la dimensión del cordón, longitud y todas aquellas imperfecciones superficiales que pueden, a futuro, causar fallas de resistencia y fatiga del material o de las uniones soldadas. Según la AWS, este tipo de ensayo, aunque confiable, solo permite reconocer

discontinuidades que se presentan en la superficie del cordón, por lo tanto, y la mayoría de las veces, debe ir acompañado o complementarse con otro tipo de inspecciones o ensayos no destructivos.

Figura 16. **Ensayo de inspección visual**



Fuente: *Calidad en la soldadura*. http://www.metalactual.com/revista/23/procesos_soldadura.pdf. Consulta: 20 de abril de 2016.

5.9.2. Ensayo de líquidos penetrantes

Estos ensayos se aplican para detectar los defectos en la superficie de componentes durante las inspecciones en servicio y procesos de fabricación. Este ensayo es de los más extendidos y sencillos, sin contar con requisitos exigentes desde el punto de vista de equipos de examen. El ensayo por líquidos penetrantes permite detectar imperfecciones y defectos no perceptibles mediante la inspección visual.

Este procedimiento se utiliza básicamente para detectar discontinuidades en materiales sólidos no porosos, como el acero inoxidable, aluminio y sus aleaciones, cobre, bronce y latón; además, es uno de los métodos no

destrutivos más usados en la inspección de soldadura y sus acabados. Este ensayo se basa en el principio físico conocido como capilaridad y se realiza, básicamente, mediante la aplicación sobre la superficie a inspeccionar, por inmersión, brocha, pincel o pulverización, de líquidos de baja tensión superficial que penetran los poros y son retenidos en las discontinuidades y fisuras.

Se reconoce como uno de los ensayos no destructivos más favorables, porque es económico, fácil de emplear, no requiere de equipos complejos ni costosos, permite inspeccionar la totalidad de la superficie de la pieza sin importar su geometría ni tamaño, y revela de manera inmediata los defectos. Sin embargo, también presenta limitaciones, ya que no puede usarse en materiales porosos, ni en superficies o piezas pintadas o con algún tipo de recubrimiento protector, pues hay riesgo de afectar el material o el recubrimiento con los líquidos¹³.

5.9.3. Ensayo por partículas magnéticas

Mediante este método se pueden detectar las discontinuidades que se encuentran en la superficie soldada. Es una prueba que se puede llevar a cabo en piezas de tamaño y forma variable, superficies con acabados soldados y en todo tipo de metales ferrosos. Para realizar esta prueba es preciso someter el cordón de soldadura a una magnetización o flujo magnético y espolvorear sobre él partículas finas de material ferromagnético o polvo de hierro. Si en algún lugar de la superficie examinada se forma un campo de fuga que atrae hacia este el polvo de hierro, es porque presenta una imperfección o discontinuidad. Este ensayo es de gran utilidad a la hora de detectar imperfecciones superficiales y subsuperficiales; sin embargo, tiene algunas limitantes asociadas

¹³ *Calidad en la soldadura*. http://www.metalactual.com/revista/23/procesos_soldadura.pdf. Consulta: 20 de abril de 2016.

con la dirección de las discontinuidades, ya que solo detecta las ubicadas perpendicularmente al campo. Además, solo puede aplicarse a materiales ferromagnéticos, y tiene una capacidad de penetración limitada.

El principio del método es la formación de distorsiones del campo magnético o de polos cuando se genera o se induce un campo magnético en un material ferromagnético; es decir, cuando la pieza presenta una zona en la que existen discontinuidades perpendiculares a las líneas del campo magnético, este se deforma o produce polos.

5.9.4. Ensayo por radiografía o rayos X

Este ensayo se realiza mediante la aplicación de rayos gamma, conocidos también como rayos X, que tienen la propiedad de atravesar los materiales opacos sin reflejarse ni refractarse para producir una impresión fotográfica. Esta cualidad de los rayos gamma permite inspeccionar internamente los cordones de soldadura y detectar defectos como grietas, bolsas e inclusiones, entre otros, ya que dichas discontinuidades absorben las radiaciones en diferente proporción del material base y generan un tipo de contrastes claro-oscuro, que permite identificarlas fácilmente en las radiografías, de acuerdo a la disposición de los equipos que intervienen en la emisión de los rayos X¹⁴. Existen las siguientes técnicas de ensayo:

- Técnica de pared simple: se llama de esta forma porque realiza la interpretación de la pared que está más próxima o cercana a la película fotográfica. Es la técnica que se utiliza con más frecuencia por ser la de más fácil interpretación.

¹⁴ *Calidad en la soldadura*. http://www.metalactual.com/revista/23/procesos_soldadura.pdf. Consulta: 20 de abril de 2016.

- Técnica de pared doble vista simple: aunque el rayo atraviesa dos paredes de la pieza, solo se proyecta sobre la película radiográfica más cercana a la pieza.
- Técnica de pared doble vista: la radiación atraviesa dos paredes de la pieza y las proyecta sobre la radiografía.
- Técnica de exposición panorámica: la fuente de radiación se ubica en un punto equidistante de la superficie y la película radiográfica.

Se dice que este tipo de ensayo es altamente efectivo a la hora de evaluar los cordones de soldadura, ya que posibilita inspeccionar mejor los defectos presentes en el interior de las mismas. Sin embargo, posee una limitante, que no detecta fácilmente los defectos o discontinuidades de poco espesor que estén ubicados perpendicularmente a la dirección de las radiaciones, por lo que es necesario examinar la pieza o soldadura en distintas direcciones.

Entre las discontinuidades que se detectan mediante este método están las cavidades, porosidades, sopladuras, inclusiones sólidas de escoria, fisuras, microgrietas, falta de penetración, mordeduras, falta de fusión y exceso de penetración. Es una técnica que está regulada por normas internacionales como la UNE 14011, y que se puede llevar a cabo con equipos generadores de rayos X o fuentes isotópicas.

5.9.5. Ensayo por ultrasonido industrial (UT)

Se define como un procedimiento de inspección no destructiva de tipo mecánico que se basa en la impedancia acústica, la que se manifiesta como el producto de la velocidad máxima de propagación del sonido entre la densidad

de un material. Los equipos de ultrasonido que se emplean actualmente permiten detectar discontinuidades superficiales, subsuperficiales y a gran profundidad del material; dependiendo del tipo de palpador utilizado y de las frecuencias que se seleccionen dentro de un ámbito de 0,25 hasta 25 MHz. Este tipo de ensayos permite detectar fisuras e imperfecciones en una fase temprana y, de esta forma, a evitar fallas en tuberías o piezas soldadas.

Sustituye al tradicional examen de radiografía, el cual obligaba a parar la producción de la actividad y necesitaba disponer de áreas adecuadas autorizadas para la utilización cobalto 60, para radiografiar componentes de grandes espesores. En los últimos años, diferentes códigos de diseño y construcción como ANSI/ASME B31.1, ASME I y VIII, AWS, API, entre otros, han sido revisados o han emitido casos al código (*code cases*) permitiendo sustituir el examen radiográfico por el examen por ultrasonidos con registro.

Con este ensayo se obtiene información relevante sobre el estado, la heterogeneidad, la dimensión y la localización de las imperfecciones.

Las ventajas con respecto a las técnicas de radiografía son:

- Seguridad: sustituye al examen radiográfico, evitando el riesgo de la utilización de radiaciones ionizantes, sin necesidad de parar la producción.
- Velocidad: debido a la capacidad de exploración (lineal, sectorial), aumenta la velocidad del examen.
- Registro: permite registrar la inspección en el modo más adecuada para su interpretación y evaluación (S-scan, B-scan, C-scan y otras imágenes 2D y 3D).

- Flexibilidad: realiza una gran variedad de tipos de exploración para la detección de diferentes tipos de defectos localizados en distintas configuraciones y componentes.
- Archivo: guarda los registros en diferentes formatos, con lo que se puede crear un banco de datos estadísticos para futuras consultas.

5.10. Pruebas destructivas

Son pruebas que se realizan a algunos materiales como el acero. Algunas de ellas son: ensayo de tracción, flexión y compresión. Se les llama destructivos porque deforman al material. Estas pruebas tienen como objetivo aportar valores de los esfuerzos en la unión por soldadura de tuberías de acero inoxidable. De los resultados obtenidos, con base en investigación y criterio fundamentado, se puede concluir si la calidad de la soldadura es alta o aceptable.

5.10.1. Metalografía mediante examen macroscópico y microscópico

“La metalografía consiste en el estudio de la constitución y la estructura de los metales y las aleaciones”.¹⁵ La forma más sencilla de hacer dicho estudio es examinando las superficies metálicas a simple vista, pudiendo determinar de esta forma las características macroscópicas. Este examen se denomina macrográfico, del cual se pueden obtener datos sobre los tratamientos mecánicos sufridos por el material; es decir se puede determinar si el material fue trefilado, laminado o forjado. Además, se obtiene información de defectos como fisuras superficiales, rechupes, falta de fusión y socavaciones en los

¹⁵ MOYA, J. web.fi.uba.ar/jmoya/Metalografia.pdf. p. 1.

cordones de soldadura. Dependiendo del estudio a realizar por examen macroscópico, se utilizan criterios para el corte transversal o longitudinal en la muestra. El corte transversal se utiliza para determinar la naturaleza del material, homogeneidad, segregaciones y proceso de fabricación. El corte longitudinal se usa para controlar los procesos de fabricación de piezas, tipo y calidad de la soldadura.

Con la ayuda del microscopio se puede realizar un ensayo micrográfico con el cual es posible determinar el tamaño de grano, y el tamaño, forma y distribución de las distintas fases e inclusiones que tienen gran efecto sobre las propiedades mecánicas del material. La microestructura revelará el tratamiento mecánico y térmico del metal, y podrá predecirse cómo se comportará mecánicamente.

El examen micrográfico es una técnica más avanzada que el macrográfico y necesita de una preparación más especial y cuidadosa de la muestra. Se basa en la amplificación de la superficie mediante instrumentos ópticos (microscopio) para observar las características estructurales microscópicas (microestructura). Este tipo de examen permite realizar el estudio o controlar el proceso térmico al que ha sido sometido un metal, debido a que los mismos ponen en evidencia la estructura o los cambios estructurales que sufren en dicho proceso. Como consecuencia de ello, también es posible deducir las variaciones que experimentan sus propiedades mecánicas.

El examen de la microestructura es muy útil para determinar si un metal o aleación satisface las especificaciones en relación a trabajos mecánicos, tratamientos térmicos y composición general. La microestructura es un instrumento para analizar las fallas metálicas y para controlar procesos industriales.

5.10.2. Ensayo de tracción aplicado a tuberías

Por medio de este ensayo se obtiene información de la resistencia mecánica de la unión por soldadura de las tuberías. El ensayo provoca fisuras o desprendimiento de las piezas bajo tensión originada por corrosión intergranular y endurecimiento del material por esfuerzo en frío, con mayor incidencia en aceros inoxidable austeníticos y ferríticos. La prueba de tensión tiene como propósito determinar la resistencia a la tracción de la unión por soldadura de los elementos de la probeta y verificar si es mayor o igual a la resistencia dada por el fabricante. Los valores de los esfuerzo deben ser similares a los valores dados por el fabricante, caso contrario, habrá que determinar las posibles causas o defectos que originaron la falla.

5.10.3. Ensayo de doblado según código ASME sección IX

Este ensayo ayuda a determinar el grado de ductilidad y homogeneidad de la unión por soldadura de tuberías de acero inoxidable. En este tipo de ensayos se verifica la existencia o no de discontinuidades en el cordón de soldadura o en la zona afectada por el calor. El ensayo se debe realizar a temperatura ambiente (mientras no se especifique otra temperatura), pero en ningún caso debe ser menor a 10 °C. Esta prueba es aceptada si no existen discontinuidades o, si existen, no excedan los 3 mm en total en cualquier dirección en la superficie convexa después del doblado.

6. METODOLOGÍA DE TRABAJO

Se describen las consideraciones, normas aplicables y procedimientos a seguir en las probetas de ensayo en el Centro de Investigaciones de Ingeniería, de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

6.1. Análisis de variables

Análisis de la relación de dependencia o independencia entre las variables o factores que se presentan en un proceso de soldadura TIG, para el acero inoxidable ASTM A312 austenítico AISI 304. Las variables a considerar son tipo de acero, composición química del acero, material de aporte, método de soldadura a utilizar y amperaje a la salida.

6.2. Delimitación del área de estudio

Con la implementación de ensayos no destructivos y destructivos se pretende determinar los posibles defectos internos en la unión por soldadura TIG de tubería de acero inoxidable del tipo austenítico AISI 304.

6.3. Norma aplicada a las probetas de ensayos

Las probetas para los ensayos están normadas por ASTM E8-83.

6.4. Procedimiento

A continuación se presenta el procedimiento a tomar.

- Materiales a utilizar: tubería de acero inoxidable bajo norma ASTM A312 del tipo AISI 304 y varilla de la marca Indura 308L (AWS ER308L) adecuada para aceros inoxidables que contienen entre 16-21 % cromo, 8-13 % níquel, aceros de la serie 302 304 304 L, 304 LN, 308, 321, 347. También se utiliza electrodo E308L, para soldeo de los tapones en los extremos de las probetas, para garantizar que el tubo no se deforme mientras se sujeta a la mordaza. Los tapones son insertos de varilla de acero inoxidable de $\frac{3}{4}$ " x 80 mm. Estos materiales son distribuidos en Guatemala por Mainco, Almacén Americano y Aceros Suecos.
- Corte, preparación y soldadura de probetas de ensayo en taller, mediante proceso TIG.
- Equipo de soldadura TIG (*tungsten inert gas*), también llamada soldadura GTAW (*gas tungsten arc welding*). Equipo de protección personal, para procesos de soldadura al arco.
- Mano de obra de soldador industrial certificado.
- Ensayos de tracción, prueba hidrostática de rotura máxima y doblado, en el Centro de Investigaciones de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.

6.5. Ordenamiento y análisis de la información

Toma de datos y lecturas de máquina de ensayos de tracción, doblado y prueba hidrostática.

7. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

7.1. Corte y preparación de las probetas de ensayo

Las probetas de ensayo están normadas por ASTM designación E8-83 pruebas a tuberías. El material a utilizar es tubería de acero inoxidable de diámetro $\frac{3}{4}$ ", AISI 304, cédula 40, bajo norma ASTM A312. Las dimensiones de las probetas a ensayar son diámetro $\frac{3}{4}$ " x 400 mm.

Figura 17. Corte de las probetas de ensayo ASTM A312, AISI 304



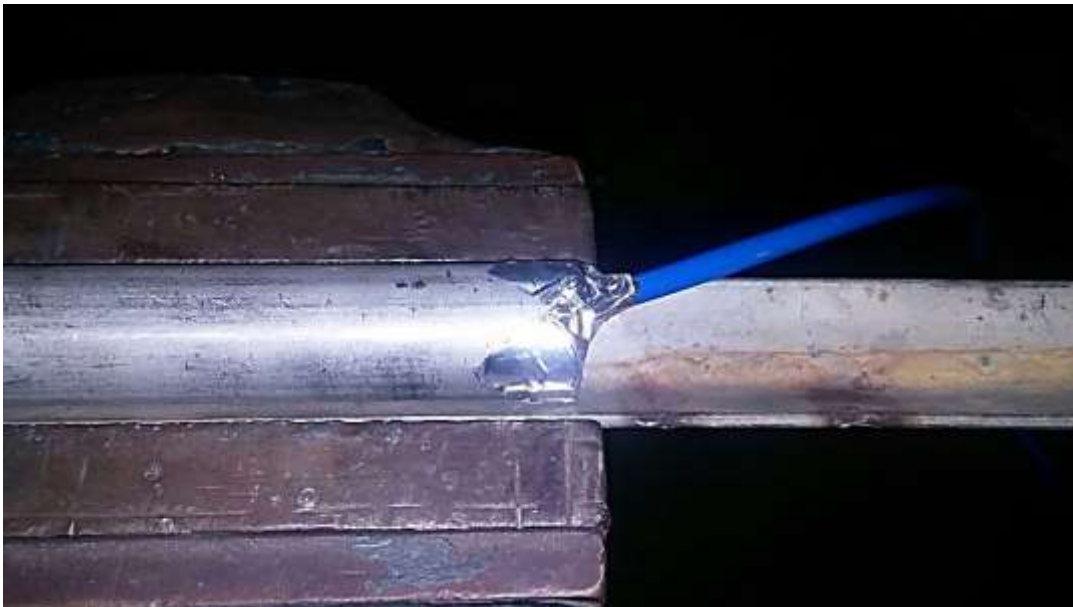
Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

Figura 18. **Biselado de las piezas a soldar**



Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

Figura 19. **Purga de la tubería con gas argón**



Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

La purga con gas argón (*gas backing*), o camareado, es recomendable realizarla en procesos de soldadura de tuberías y es aplicada en aceros inoxidable y aleados, con el fin de proporcionar una atmósfera de protección a lo interno del tubo, con lo cual se minimiza el riesgo de porosidades y recalentamiento en las áreas próximas al cordón de soldadura. Prácticamente, el flujo de gas argón desplaza al oxígeno dentro de la tubería. Se recomienda un flujo de gas argón como máximo de 20 pie³/hora.

7.2. Soldadura de las probetas en taller, mediante proceso TIG

Las piezas a soldar se limpian en los bordes biselados de las juntas. Las juntas a ser soldadas deben estar libres de impurezas, rebabas de metal y óxidos superficiales. Algunos elementos contaminantes que deben ser evitados durante el proceso de soldadura son hidrocarburos, grasas, ceras, imprimantes, marcas de crayones, pinturas, óxidos de acero y polvo que pueda estar presente en el taller.

Una limpieza inapropiada puede causar defectos en la soldadura, como fisuras, porosidades e incluso falta de fusión. Se recomienda realizar la limpieza con un cepillo con alambres de acero inoxidable. Después de realizar la limpieza de juntas, estas deben ser cubiertas, a menos que se realice inmediatamente la soldadura.

De acuerdo a la composición química de la tubería de acero inoxidable ASTM A312 AISI 304, se selecciona el material de aporte compatible con el material base y sus coeficientes de transferencia calórica. Considerando la ficha técnica del fabricante del tubo, en la cual se dan los porcentajes de los elementos que conforman la aleación, se procede a seleccionar el material de aporte.

Tabla XII. **Comparación de los porcentajes de elementos de aleación contenidos en el acero AISI 304 y el metal de aporte para la soldadura**

Acero	Cr (%)	Ni (%)	C (%)	Mn (%)	Si (%)	Mo (%)	S (%)	P (%)
Tubería AISI 304	18.0-20.0	8.00-10.5	0.08	2.00	1.00	0.10	0.03	0.045
Varilla Indura 308L (AWS ER308L)	19.80	9.8	0.02	1.90	0.38	0.19	0.01	0.020

Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos de las fichas técnicas del tubo ASTM A312 AISI 304 y el *Manual para soldadores de Indura*.

Figura 20. **Proceso de soldadura TIG**



Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

Figura 21. **Cordón de soldadura por proceso TIG**



Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

Figura 22. **Soldadura de insertos de varilla de acero inoxidable como tapones para sujeción de la probeta tubular, realizada con electrodo E308L**



Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

7.3. Inspección visual de los cordones de soldadura en las probetas

Después de realizar el proceso de soldadura, se deja que las probetas se enfríen y se limpian los cordones adecuadamente, utilizando gafas de protección, guantes, picador y cepillo de alambre de acero inoxidable. Se elimina la escoria, si hubiese, aunque el proceso TIG no produce escoria y humo. Con esto se verifica superficialmente la apariencia, uniformidad y penetración de los cordones de soldadura en las probetas.

Con la ayuda de una lupa, se observa que los cordones depositados son uniformes en todo el contorno del tubo. En apariencia no presentan imperfecciones, sin embargo, este tipo de ensayo únicamente permite visualizar discontinuidades superficiales en el cordón de soldadura, por lo tanto, es conveniente someter a otros ensayos de tipo destructivo a las probetas.

7.4. Ensayo de tracción de las probetas en la máquina universal

Este ensayo tiene como objetivo determinar la resistencia a la tracción de la unión por soldadura con proceso TIG, en las probetas fabricadas con tubería de acero inoxidable AISI 304, diámetro $\frac{3}{4}$ ", cédula 40. La carga máxima de rotura de esta tubería es de 515 MPa, según ficha técnica dada por el fabricante.

El material de aporte utilizado para el proceso de soldadura TIG es varilla de la marca Indura 308L (AWS ER308L), adecuada para soldar aceros inoxidables que contienen entre 16-21 % cromo, 8-13 % níquel, aceros de la serie 302, 304, 304 L, 304 LN, 308, 321, 347¹⁶, cuya resistencia a la tracción es de 570 MPa, siendo de similar resistencia a la tracción con la resistencia de la tubería a ensayar.

¹⁶ Datos obtenidos de la ficha técnica del fabricante, catálogo Indura 2016.

El procedimiento del ensayo de tracción para tuberías está normado por el código ASTM E8-83.

La máquina de ensayos universal consta de dos mordazas para sujeción de las probetas por los extremos y la aplicación de cargas axiales incrementadas de manera progresiva, sin choques, ni vibraciones. Con la aplicación de cargas de tensión se logra esforzar las probetas o uniones de las mismas, para determinar el esfuerzo máximo de elongación y rotura. Para garantizar la sujeción de las probetas tubulares se insertan varillas de acero inoxidable de $\frac{3}{4}$ ", soldadas a los extremos de las mismas. Con esto se evita la deformación o aplastamiento de los tubos, que podría ocasionar las mordazas a la hora del ensayo. La eficiencia en el ensayo de tracción depende de la sujeción óptima de los extremos de las probetas tubulares a las mordazas de la máquina universal.

Figura 23. **Máquina universal para ensayo de tensión**



Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

De acuerdo a los resultados obtenidos, se analizan e interpretan los defectos que puedan encontrarse. Para este ensayo se toma la carga máxima o de rotura de la soldadura, considerando el área neta del tubo.

Tabla XIII. Datos obtenidos del ensayo de tracción

<p>Tubo de acero inoxidable AISI 304, cédula 40 Porcentaje de elongación 35 % (según ficha técnica del fabricante). Diámetro ¾", área neta del tubo= 2,11 cm Resistencia a la tracción 515 MPa</p> <p>Longitud de probeta 400 mm Unión por proceso de soldadura TIG Material de aporte para soldadura Indura 308/AWS ER-308 Resistencia a la tracción= 570 MPa,</p>								
Probeta	Material de aporte para la soldadura	Test de prueba de tensión (kg)			Carga máxima (kg/cm ²)	Carga máxima (MPa)	Porcentaje de elongación en 50 mm	Tipo de falla
		Carga inicial (kg)	Carga Cedente (kg)	Carga máxima (kg)				
Núm. 1	Indura 308/AWS ER-308 σ= 570 MPa	5 000	7 500	12 000	5 687,20	557,91	48 %	Rotura de soldadura
Núm. 2	Indura 308/AWS ER-308 σ= 570 MPa	5 000	7 000	11 750	5 568,75	546,30	49 %	Rotura de soldadura
Núm. 3	Indura 308/AWS ER-308 σ= 570 MPa	5 000	9 000	11 500	5 721,39	561,30	48 %	Rotura de soldadura
	Promedio de cargas máximas (MPa)					555,17	48,33 %	
	Variación de carga máxima promedio con respecto a carga específica de diseño del fabricante del material de aporte, Indura 308/AWS ER-308 (σ= 570 MPa),					35,17		

Fuente: elaboración propia, con datos del ensayo de tracción realizados en el Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

Considerar 1 kg/cm²= 98 100 Pa=0,0981 MPa

Con la aplicación de la carga máxima, la falla se da por rotura de la soldadura.

La sujeción de las probetas a las mordazas de la máquina no presenta inconvenientes durante la realización del ensayo, por lo tanto, garantiza que las cargas se transmiten sin pérdida a la unión por soldadura de la tubería.

Figura 24. **Falla por rotura de la soldadura en las probetas**

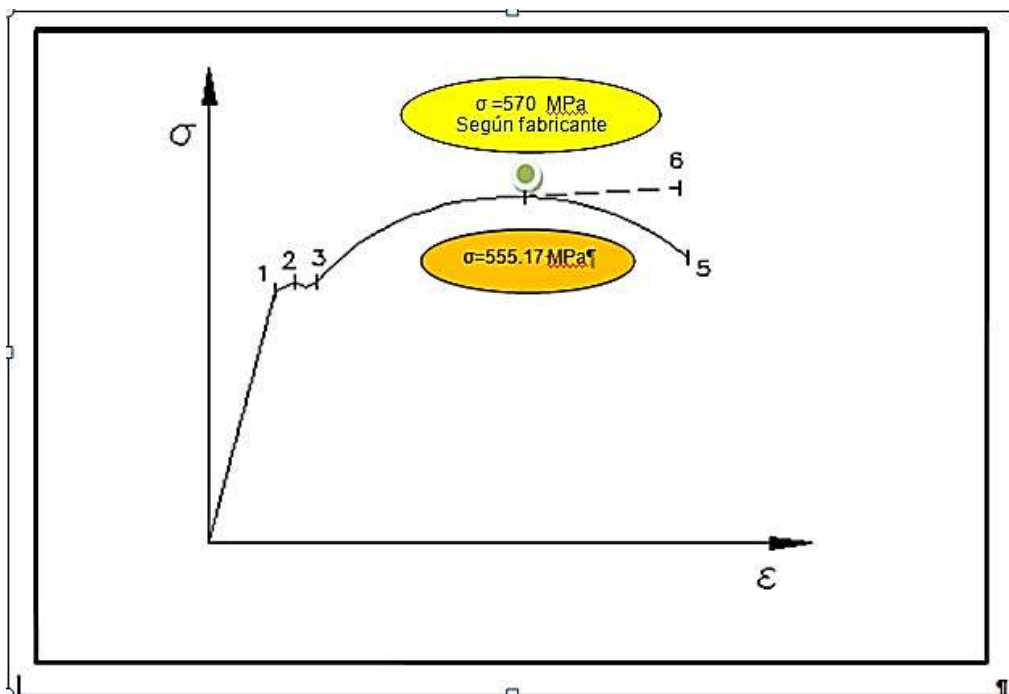


Fuente Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

De los datos obtenidos en los ensayos a probetas se puede esbozar la gráfica esfuerzo-deformación, ya que bajo la aplicación de cargas se remarcan las zonas de deformación elástica debido a la ductilidad de la tubería, pasando a una zona plástica después de su punto de fluencia o inflexión, hasta llegar a la falla por rotura de la soldadura. Según datos de la prueba de ensayo de tracción, la carga máxima promedio aplicada es de 555,17 MPa, teniendo una diferencia de 14,83 MPa, con la especificación del fabricante del material de aporte utilizado en la soldadura con proceso TIG.

Con este ensayo se demuestra la resistencia máxima a la tracción del material de aporte, debido a la carga aplicada durante el mismo hasta la rotura. También se observa en las probetas ensayadas la reducción del área transversal, por ser un material dúctil.

Figura 25. **Gráfica esfuerzo-deformación**



Fuente: DAVIS, Hamer; TROXELL, George y WISKOCIL, Clement. *Ensayo e inspección de los materiales de ingeniería*. p. 477.

A continuación se presenta la interpretación gráfica esfuerzo-deformación del ensayo de tracción.

- Punto 1: límite proporcional (σ_{1p})

Es el mayor esfuerzo que un material es capaz de desarrollar sin perder la proporcionalidad entre esfuerzo y deformación, es decir, que representará el último punto en la pendiente de la gráfica, que cumple con la ley de Hooke.

- Punto 2: límite elástico (σ_{le})

Es el mayor esfuerzo que un material es capaz de desarrollar sin que ocurra la deformación permanente al retirar el esfuerzo. Es difícil determinar los valores a los que inicia o finaliza esta zona. Las probetas empiezan a estirarse de una forma dúctil y reducen su área transversal.

- Punto 3: resistencia a la cedencia (σ_{YF})

Es el esfuerzo al cual ocurre un aumento de deformación para valores casi cero en incrementos de la carga aplicada. En este punto cede el material a los defectos de cristal (vacancias, intersticios y dislocaciones), por lo que provoca el desplazamiento molecular (deformación) sin oponerse a la fuerza aplicada. Básicamente, es el punto de inflexión que determina el cambio de zona elástica a zona plástica. El área transversal de las probetas llega a una reducción máxima antes de que la soldadura falle por rotura.

- Punto 4: resistencia máxima ($\sigma_{m\acute{a}x}$)

Es el esfuerzo máximo que puede desarrollar el material debido a la carga aplicada durante el ensayo, el área transversal de la probeta se reduce hasta el punto de rotura del cordón de soldadura.

- Punto 5: esfuerzo de rotura aparente (σ_{rot-a})

Es el esfuerzo nominal al ocurrir la falla. Este valor se calcula dividiendo la carga decreciente en la caratula de la máquina y el área inicial de la probeta.

Punto 6: esfuerzo de rotura real o verdadero (σ_{rot-v})

Es el esfuerzo nominal al ocurrir la falla y se obtiene dividiendo la carga entre el área real que disminuye conforme se aplica esta. Este esfuerzo es improbable sobre la sección crítica o de falla, ya que el laminado del metal causa el desarrollo de una compleja distribución de esfuerzos.

En las probetas sometidas a ensayo de tracción, se presentó un alargamiento en la longitud y reducción del área. Para las probetas se tomó como longitud base $L_0 = 5$ cm y después del ensayo la longitud final fue $L_f = 7,4$ cm, cuyo porcentaje de alargamiento fue del 48 %.

7.5. Ensayo de prueba hidrostática

Este método consiste en determinar la estanqueidad en la unión por soldadura de tuberías de acero inoxidable. Este ensayo sirve para detectar si en una red de tubería para conducción de sustancias o líquidos existen fugas o la probabilidad de que estas se den a corto plazo. En la industria, es de suma importancia la prevención de este tipo de problemas, ya que provocan fugas de líquidos o pérdida de presión en las redes de distribución y proceso.

Esta prueba se realiza mediante presurización de la tubería o la red, utilizando agua a presión durante cierto tiempo, conectando la probeta a la

bomba de ensayo, la cual está provista de una válvula piloto de acción positiva tipo cheque, la cual se activa a base de aire a presión.

En el ensayo de presión hidrostática, los valores de la presión de operación y de diseño deben considerarse para las condiciones más severas que se espera alcanzar durante el proceso o servicio. Al igual que en el ensayo de tracción, de acuerdo a los resultados obtenidos, se analizan e interpretan los defectos que puedan encontrarse.

Este procedimiento esta normado por el código ASME B31.9¹⁷:

- La unión por soldadura TIG, es ensayada a un valor semejante de la presión de trabajo más un factor de seguridad, como mínimo de 1,5 veces el valor de la misma. Para el ensayo de rotura rápida por presión hidrostática, se toma el 100 % de la presión de diseño dada por el fabricante del tubo.
- El tiempo de aplicación de la presurización de la tubería debe ser por al menos 20 minutos, en periodos de 7 minutos cada una.
- Si se presentan fugas de agua en la unión por soldadura, es necesario corregirlas limpiando y biselando el área donde se presenten las fugas.
- Según ficha técnica del fabricante, la presión de diseño del tubo de diámetro $\frac{3}{4}$ ", cédula 40 ASTM A312 AISI 304, es 3750 psi x 2= 7 500 psi.

¹⁷ American Society of Mechanical Engineers. *ASME B31.9. Building Services Piping. ASME code for pressure piping.*

Tabla XIV. **Datos obtenidos del ensayo de prueba hidrostática**

Tubo de acero inoxidable AISI 304, cédula 40 Presión de diseño del fabricante 3 750 psi Longitud de probeta 400 mm Unión por proceso de soldadura TIG Material de aporte para soldadura Indura 308/AWS ER-308 Resistencia a la tracción= 570 MPa,								
Probeta	Diámetro	Longitud (mm)	Material de aporte para la soldadura	Proceso	Test de presurización (en psi)			
					Tiempo	7 minutos	14 minutos	20 minutos
Núm. 4	¾"	400	Indura 308/ AWS ER-308L $\sigma = 570$ MPa	TIG	Presión	5 000 psi	6 500 psi	8 000 psi
Observaciones			La unión por soldadura TIG, no presentó ninguna fuga durante el tiempo ensayado a una presión de 8 000 psi, como presión de rotura rápida.					

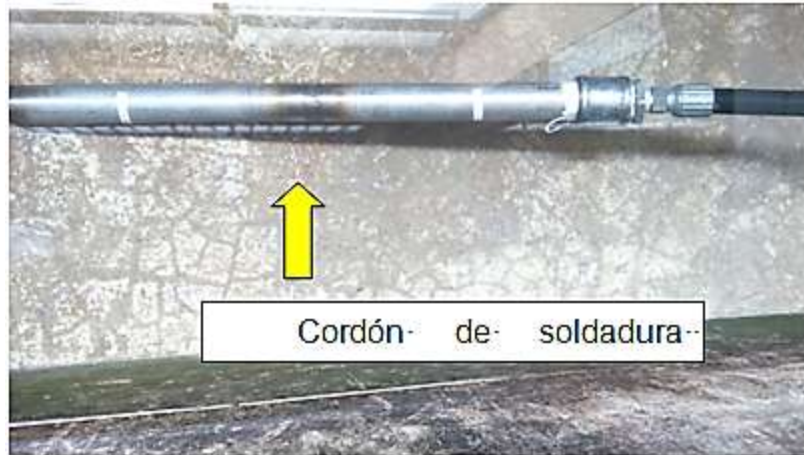
Fuente: elaboración propia, tomando datos del ensayo prueba hidrostática, realizado en el Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

Figura 26. **Máquina para ensayo de presión hidrostática**



Fuente: en Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

Figura 27. **Ensayo a presión hidrostática**



Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

Figura 28. **Probeta de ensayo a presión hidrostática**



Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

7.6. Ensayo de doblado perpendicular al eje de la probeta

El ensayo de doblado tiene como objetivo determinar la resistencia mecánica de la unión por soldadura, realizada mediante proceso TIG en la tubería de acero inoxidable. Durante el ensayo de doblado, la probeta de tubería tiende a flexionarse por ser dúctil, en algunos casos sufre deformación, pero se espera que el cordón de soldadura no falle durante el tiempo que se aplique la carga para doblarla. La unión por soldadura en la tubería concentra esfuerzos de tensión y compresión, los cuales podrían ocasionar fallas por fisuras, rotura o fatiga de la unión soldada.

Es necesario considerar la composición del material de aporte de la soldadura, si este tiene propiedades dúctiles permitirá esforzarla sin que presente fisuras o desprendimiento de la soldadura hasta cierta carga aplicada.

El ensayo se realiza apoyando la probeta sobre dos ejes móviles, que permiten el movimiento y utilizando un mandril con rueda móvil, con un diámetro 4 veces mayor al diámetro de tubería a ensayar. En este caso, el diámetro exterior del tubo es de 26,7 mm, por lo tanto se utiliza el mandril de 100 mm

Este ensayo conlleva tener pericia, en cuanto a la aplicación de carga a una velocidad constante, con el objeto de no deformar las paredes de la tubería. Aunque para efectos del presente ensayo, lo que se requiere es determinar el comportamiento del cordón de soldadura mientras la probeta se dobla bajo la acción de una carga aplicada de 2 100 kg, hasta lograr un doblado de 180 grados.

El procedimiento de ensayo de doblado está normado por el código ASME sección IX, artículo QB-466.2

Tabla XV. **Datos obtenidos en el ensayo de doblado**

Tubo de acero inoxidable AISI 304, cédula 40 Porcentaje de elongación 35 % (según ficha técnica del fabricante) Diámetro ¾", área neta del tubo= 2,11 cm Resistencia a la tracción 515 MPa Longitud de probeta 400 mm Unión por proceso de soldadura TIG Material de aporte para soldadura Indura 308/AWS ER-308L Resistencia a la tracción= 570 MPa,					
Probeta	Carga aplicada (kg)	Área neta del tubo (cm ²)	Carga aplicada (kg/cm ²)	Carga aplicada en MPa	Observaciones
Núm. 5	2 100 kg	2,10 cm ²	1 000 kg/cm ²	98,07	La probeta de tubería se sometió a ensayo de doblado hasta un ángulo de 180°.

Fuente: elaboración propia, con datos del ensayo de doblado, realizado en el Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

Figura 29. **Apoyo de probeta en máquina universal para el ensayo de doblado**



Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

Figura 30. **Probeta de ensayo de doblado**



Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

Figura 31. **Probetas de tubería ASTM A312 AISI 304 ensayadas**



Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

7.7. Análisis y discusión de resultados

En esta sección se analizan los posibles defectos internos que pueden presentarse en la unión por soldadura TIG de probetas de tubería de acero inoxidable. Con base en los resultados obtenidos en los ensayos no destructivos y destructivos se verifica si existe variabilidad con los valores establecidos en la ficha técnica del fabricante.

7.7.1. Inspección visual

Los cordones de soldadura tienen buena apariencia, en cuanto a uniformidad y penetración. Se observan algunas socavaciones pero son mínimas, casi a superficie, los cordones depositados están a un mismo plano que la pared del tubo, es decir, no están abultados sobre la superficie. Las socavaciones pueden darse debido al bisel empleado en la preparación de las piezas o una temperatura muy elevada en zona afectada por la soldadura.

En cuanto a la uniformidad y apariencia del cordón de soldadura, depende directamente de la experiencia y pericia del técnico en proceso de soldadura TIG. La penetración depende del amperaje correcto utilizado y de la técnica de camareado o purga en la tubería. Los cordones de soldadura no presentan inclusiones de escoria ni porosidades.

7.7.2. Ensayo de tracción

Para realizar la unión por soldadura TIG es importante mencionar que deben considerarse los datos de la ficha técnica del fabricante de la tubería, para seleccionar de manera correcta el tipo de varilla a utilizar como material de aporte en el proceso de soldadura TIG. Se encontró, en el mercado local, una

varilla cuya composición química contiene porcentajes de elementos de aleación similares al metal base, siendo esta de marca Indura 308L (AWS ER308L), adecuada para soldar aceros inoxidable que contienen entre 16-21 % cromo, 8-13 % níquel, aceros de la serie 302, 304, 304 L, 304 LN, 308, 321, 347, cuya resistencia a la tracción es de 570 MPa.

Según datos de la prueba de ensayo de tracción, la carga máxima promedio aplicada es de 555,17 MPa, teniendo una diferencia de 14,83 MPa, con el valor de esfuerzo máximo, dado en la ficha técnica del fabricante del material de aporte utilizado.

La resistencia medida por la escala de la máquina de ensayo varía en 2,6 %, con el valor del parámetro establecido por el fabricante. El sesgo de la desviación del valor de resistencia obtenida durante el ensayo con el valor de resistencia dado por el fabricante es relativamente pequeño, está entre los límites aceptables de este parámetro.

Aunque, en promedio, el valor de resistencia máxima está por debajo del valor dado por el fabricante, el sesgo de diferencia entre ambos valores depende de las características y factores inherentes en los ensayos realizados a las probetas y al proceso de soldadura. En la práctica, no se pueden subestimar los resultados experimentales obtenidos, aunque los mismos pueden dar lugar a un error experimental o de muestreo, siendo esta una desviación del valor medido en el laboratorio de ensayo respecto al valor dado por el fabricante. Bajo las premisas antes mencionadas, los errores experimentales son ineludibles y dependen de los procedimientos elegidos, condiciones y la tecnología disponible para la realización de los ensayos. En la práctica, como usuarios de este tipo de materiales, se tiene más confianza en el

uso del mismo si los resultados experimentales fuesen similares a los valores dados por el fabricante. Lo anterior no necesariamente debe ser así.

Es importante mencionar que este ensayo comprueba la teoría que los materiales con propiedades dúctiles presentan un comportamiento de acuerdo a las zonas enmarcadas en la gráfica de esfuerzo-deformación.

Estos se citan a continuación:

- Zona elástica
- Punto de inflexión donde la gráfica esfuerzo-deformación cambia de concavidad
- Zona plástica
- Endurecimiento del material y el cordón de soldadura por deformación
- Resistencia máxima
- Estricción por fluencia (reducción de sección del área transversal) hasta llegar a fallar por rotura de la soldadura

En este caso, la falla se da por endurecimiento o por deformación del cordón de soldadura bajo la aplicación de carga máxima; en la superficie interna del cordón de soldadura no se observan porosidades o imperfecciones.

Se descartan otros posibles factores, ya que el amperaje para la fusión o coalescencia del material de aporte con el metal base fue de 90 amperios. Se considera la separación entre piezas a unir, limpieza, purga con gas argón y biselado de los bordes de las juntas. No había incidencia de porosidades a lo interno de las soldaduras. En la probeta número 3 se observó irregularidad en la superficie del cordón de soldadura, aunque esto se debió a desprendimiento o desgarre del grano en el material al momento de la falla.

De acuerdo con los resultados obtenidos, el proceso TIG utilizado fue bien desarrollado, ya que los valores de los esfuerzos de carga ensayados en laboratorio son similares a los dados por el fabricante del material de aporte para la soldadura.

7.7.3. Prueba hidrostática de rotura rápida

Se sometió una de las probetas a prueba de presión hidrostática, a la cual se realizó rosca en un extremo para conexión del equipo y el otro extremo taponado con un perfil redondo sólido de acero inoxidable de $\frac{3}{4}$ " , soldado mediante electrodo E308L. La unión de la piezas de la probeta se realizó con proceso TIG y material de aporte Indura 308L (AWS ER308L). La tubería a ensayar es con costura, cumple con la norma ASTM A312 y es del tipo AISI 304.

El ensayo consiste en presurizar la probeta de tubería a 8 000 psi, durante 20 minutos, para detección de fugas. La probeta no presenta fugas. Con ello se demuestra estanqueidad en la unión de la tubería con soldadura TIG. En conclusión, el método de soldadura TIG es confiable, ya que no presenta defectos que puedan ocasionar fallas por rotura o porosidades.

7.7.4. Ensayo de doblado

En el ensayo de doblado se demostró la resistencia mecánica de la unión por soldadura, realizada mediante proceso TIG en la tubería de acero inoxidable. La carga aplicada de forma perpendicular al cordón de soldadura fue de 2 100 kg. Durante el ensayo de doblado, la probeta de tubería tiende a flexionarse por ser de material dúctil, sufre cierta deformación del diámetro,

pero el cordón de soldadura no falla durante el tiempo que se aplica la carga para doblarla, el cual es de 20 minutos.

Se observa que la probeta de tubería tiene un comportamiento dúctil, ya que permite la deformación sin presentar fisuras o falla por fatiga del material. El cordón de soldadura también tiene comportamiento dúctil, considerando que la probeta se dobla hasta un ángulo de 180 grados.

Este ensayo está normado por el código ASME sección IX, artículo QB-466.2

CONCLUSIONES

1. Para efectos del presente trabajo de graduación, se realizan ensayos no destructivos y destructivos a probetas de tubería de acero inoxidable del tipo ASTM 312 AISI 304. Los ensayos de tracción, doblado y prueba hidrostática realizados a las probetas de tubería, demuestran que no hay defectos internos en la soldadura. En cuanto a defectos externos en los cordones de soldadura, se realizó inspección visual, observándose uniformidad en la apariencia del cordón y buena penetración de la raíz. Únicamente una de las probetas presenta socavación en la orilla del cordón, lo cual se genera debido al bisel empleado en la preparación de la pieza y a concentraciones de temperatura muy elevada en la zona cercana a la soldadura. Los cordones de soldadura no presentan inclusiones de escoria ni porosidades. Los resultados de los ensayos demuestran que la resistencia de la soldadura está dentro de los parámetros aceptables, considerando la información en la ficha técnica del fabricante y el resultado experimental obtenido por lectura de las máquinas de ensayo.
2. En el ensayo de tracción, la falla se da por endurecimiento y por deformación del cordón de soldadura, bajo la aplicación de carga máxima en la superficie interna del cordón de soldadura no se observan porosidades o imperfecciones.
3. Los ensayos realizados a las probetas permiten concluir que el método de soldadura TIG es el recomendado para este tipo de tubería de acero inoxidable. Este proceso proporciona un arco estable y concentrado. No

produce escoria, ya que la varilla no utiliza revestimiento, se puede utilizar con o sin material de aporte, en función de la aplicación, para todas posiciones y excelente penetración del cordón de raíz. Con base en los estudios realizados, el presente trabajo de graduación sirve como fuente de consulta para operarios y estudiantes del curso de Procesos de Manufactura 2, en lo referente a soldadura de aceros inoxidable austeníticos AISI 304 por proceso TIG.

RECOMENDACIONES

1. El proceso de soldadura TIG se puede utilizar para el soldeo de varios metales, como aluminio, magnesio y materiales sensibles a la oxidación como el titanio, circonio y sus aleaciones. Con este proceso se obtienen soldaduras de alta calidad y con una elevada pureza metalúrgica, además de baja probabilidad de defectos y buen acabado superficial. Para la selección del material de aporte es de suma importancia consultar la ficha técnica del fabricante del material base a soldar. Con esto se garantiza mejor fusión del material base con el material de aporte del proceso de soldadura. Es importante cumplir con esta recomendación para que la coalescencia o fusión del metal base y la varilla de aporte sea homogénea, de similares propiedades químicas y físicas, como en este caso.
2. Se debe realizar la limpieza del área a soldar con cepillo de alambres de acero inoxidable. Después de realizar la limpieza a las piezas, las juntas deben ser cubiertas, a menos que se realice inmediatamente la soldadura.
3. La purga con gas argón (*gas backing*), o camareado, es recomendable realizarla en procesos de soldadura de tuberías de aceros inoxidables y aleados, esta práctica se realiza con el fin de proporcionar una atmósfera de protección a lo interno del tubo, con lo cual se minimiza el riesgo de oxidación, porosidades y recalentamiento en las áreas próximas a la raíz del cordón de soldadura. El flujo de gas argón debe ser, como máximo, de 20 ft³/hora. Con el presente trabajo de graduación se deja un

precedente para el estudio de nuevas líneas de investigación, en cuanto al tema de soldadura de aceros inoxidable, ya que este tema es muy extenso y de mucha aplicación en industrias de Guatemala y de otros países.

BIBLIOGRAFÍA

1. ALBERTI, Manuel. *Fittings de acero inoxidable*. [en línea]. <www.inoxidable.com>. [Consulta: 13 de marzo de 2016].
2. *Breve historia del acero inoxidable*. [en línea]. <<http://www.jnaceros.com.pe/blog/breve-historia-acero-inoxidable>>. [Consulta: 13 de marzo de 2016].
3. *Calidad en la soldadura*. [en línea]. <http://www.metalactual.com/revista/23/procesos_soldadura.pdf>. [Consulta: 20 de abril de 2016].
4. *Clasificación de los aceros inoxidables*. [en línea]. <<http://www.bonnet.es/clasificacionacerinox.pdf>>. [Consulta: 10 de marzo de 2016].
5. *Consideraciones para trabajar acero inoxidable*. [en línea]. <http://www.metalactual.com/revista/20/procesos_consideraciones_II.pdf>. [Consulta: octubre de 2015].
6. DAVIS, Hamer; TROXELL, George y WISKOCIL, Clement. *Ensayo e inspección de los materiales de ingeniería*. México: CECSA, 1981. 577 p.

7. *Defectos del soldeo por arco*. [en línea]. <http://soldargen.blogspot.com/2012_05_01_archive.html>. [Consulta: octubre de 2015].
8. Facultad de Ciencias Tecnológicas, Ingeniería Mecánica. *Procesos de soldadura*. [en línea]. <materias.fcyt.umss.edu.bo/tecnologia/PDF/cap-43.pdf>. [Consulta: 8 de febrero de 2016].
9. O'CONNOR, Paul et al. *Química: experimentos y teorías*. España: Reverté, S. A. 1982. 516 p.
10. GROOVER, Mikell P. *Fundamentos de manufactura moderna: materiales, procesos y sistemas*. México: Prentice-Hall Hispanoamericana, 1997. 1 038 p.
11. *Ingeniería estructural*. [en línea]. <www.monografias.com>Ingenieria>. [Consulta: 14 de marzo de 2016].
12. LAUFGANG, Sergio. G. *Aceros inoxidables*. Argentina: Termo Soldex, 2003. 40 p.
13. *Libro inspector de soldaduras*. [en línea]. <soldaduracursos.blogspot.com/2013/.../selección-del-tipo-corriente.h>. [Consulta: 14 de enero de 2016].
14. *Manual de instrucciones para soldadura TIG*. [en línea]. <<http://www.cebora.it/istr/431e.pdf>>. [Consulta: 12 de febrero de 2016].

15. *Manual de soldadura por arco manual.* [en línea]. <<http://www.monografias.com/trabajos90/soldadura-arco-manual/soldadura-arco-manual.shtml>>. [Consulta: octubre de 2015].
16. *Propiedades del acero inoxidable.* [en línea]. <<https://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/3319/4/55868-4.pdf>>. [Consulta: 12 de enero de 2016].
17. RODRÍGUEZ GALBARRO, Hermenegildo. *Soldadura por arco con electrodo revestido.* España: Ingemecanica, 2016. 25 p.
18. *Soldadura.* [en línea]. <[url:http://www.obtesol.es/Title:Ferriticos](http://www.obtesol.es/Title:Ferriticos)>. [Consulta: 10 de marzo de 2016].
19. *Soldadura: cursos y homologaciones.* [en línea]. <soldaduracursos.blogspot.com/2013/.../selección-del-tipo-de-corriente>. [Consulta: 14 de enero de 2016].
20. *Soldadura de los aceros inoxidables.* [en línea]. <<http://www.cientificosaficionados.com/libros/solinox1.pdf>>. [Consulta: octubre de 2015].
21. *Soluciones en acero inoxidable.* [en línea]. <www.inoxidables.com>. [Consulta: octubre de 2015].
22. Universidad Tecnológica de Pereira. *Metalografía.* [en línea]. <blog.utp.edu.co/metalografia/7-acerosinoxidables>. [Consulta: 11 de marzo de 2016].


23. *Valor del acero inoxidable*. [en línea]. <www.goodfellow.com/S/Acero-Inoxidable-AISI-304.htm>. [Consulta: 11 de marzo de 2016].

ANEXOS

Anexo 1. Ficha técnica de tubería de acero inoxidable

Tubos ASTM A312 SCH10/40/80

La tubería A312 está destinada para aplicaciones sometidas a temperatura y agentes corrosivos en general. Longitud 6m. Acabado de extremos planos y roscados NPT ASME B1.20.1.



Presión de Trabajo de Tubería			
Medida Nominal	SCH 10	SCH 40	SCH 80
	psi	psi	psi
1/4"	4240	5970	8520
3/8"	3320	4810	7000
1/2"	3420	4810	6486
3/4"	2890	3750	5296
1"	2830	3510	4889
1 1/4"	2210	2880	4039
1 1/2"	1920	2590	3864
2"	1520	2180	3158
2 1/2"	1380	2390	3312
3"	1120	2070	2893
4"	867	1750	2499
6"	655	1395	2152
8"	555	1227	1913
10"	495	1113	1803

Test de Tensión				
Material	Carga de Rotura, min.		Limite Elástico, min.	
	psi	MPa	psi	MPa
304L	70000	485	25000	170
304	75000	515	30000	205
316L	70000	485	25000	170
316	75000	515	30000	205

TUBO ACERO INOXIDABLE

Diámetro Nominal	Dimen. Exterior	SCH-10			SCH-40			SCH-80		
		Espesor Nominal	Diám. Interior	Peso	Espesor Nominal	Diám. Interior	Peso	Espesor Nominal	Diám. Interior	Peso
Pulgadas	mm	mm	mm	kg/m	mm	mm	kg/m	mm	mm	kg/m
1/4	13.7	1.85	10.42	0.49	2.24	9.24	0.83	3.62	7.88	0.90
3/8	17.1	1.85	13.85	0.83	2.31	12.53	0.85	3.28	16.75	1.99
1/2	21.3	2.11	17.12	1.00	2.77	15.88	1.27	3.73	13.88	1.82
3/4	26.7	2.11	22.45	1.28	2.87	20.63	1.89	3.91	18.85	2.28
1	33.4	2.77	27.86	2.09	3.58	26.64	2.59	4.95	24.36	3.24
1 1/4	42.2	2.77	36.82	2.89	3.58	35.64	3.39	4.95	32.48	4.47
1 1/2	48.3	2.77	42.72	3.11	3.88	40.90	4.05	5.08	38.10	5.41
2	60.3	2.77	54.79	3.93	3.91	52.51	5.45	5.54	48.25	7.48
2 1/2	73.0	3.05	66.93	5.27	5.16	62.71	6.84	7.01	59.01	11.42
3	88.9	3.05	82.80	6.48	5.49	77.62	11.30	7.82	73.88	15.28
4	114.3	3.05	106.20	8.37	6.02	102.28	16.09	8.58	97.18	22.34
6	168.3	3.49	161.48	13.85	7.11	151.98	28.28	10.97	148.54	42.89
8	219.1	3.78	211.56	18.98	8.18	202.72	42.57	12.79	193.68	64.89
10	273.0	4.19	264.47	27.88	9.27	254.51	60.36	15.86	242.93	95.82
12	323.8	4.57	314.71	38.88	10.31	303.23	79.01	17.45	288.95	131.97

*Nota: Todas las medidas son nominales. Los pesos en kg/m son teóricos.

Fuente: ASTM A 312, AISI 304.


Anexo 2: **Ficha técnica de la varilla a utilizar como material de aporte**

INDURA 308 L		TIG
AWS: ER308 L		
Descripción: Varilla con bajo contenido de carbono para soldar acero inoxidable con proceso TIG. El bajo contenido de carbono en el metal de aporte (0,03 máximo), disminuye la posibilidad de precipitación de carburos e incrementa la resistencia a la corrosión intergranular sin el uso de estabilizadores tales como columbio y titanio.		
Usos: Adecuado para uso de aceros inoxidables que contienen 16-21% Cr, 8-13% Ni, aceros estabilizados y no estabilizados (302, 304, 304L, 304LN, 308, 321, 347).		
Aplicaciones típicas: Equipos de proceso y almacenamiento de productos alimenticios y químicos. Bombas, intercambiadores de calor.		
Posiciones de soldadura: P, H, V, SC.		
Tipo de corriente: CCEN.		
Composición química:		
C: 0.02%	Mn: 1.90%	
Si: 0.38%	P: 0.020	
S: 0.01	Cr: 19.80%	
Ni: 9.80%	Mo: 0.19%	

60 Manual de Aceros Inoxidables para Soldadores

Fuente: *Indura*. www.indura.net. Consulta: 11 de octubre de 2015.


Anexo 3: **Características de la composición química de la varilla Indura 308L**



INDURA
Tecnología a su Servicio

INDURA 308L

Rev.01-010412



- Alambre sólido de acero inoxidable
- Revestimiento: No tiene

Clasificación:

ASME IIC 3FA 5.9/AWS A5.9
ER 308L

Características:

- Está diseñado para cumplir con los requisitos de los aceros inoxidables que utilizan procesos de soldadura con gas Inerte (MIG y TIG).
- El bajo porcentaje de carbono en el metal depositado reduce la posibilidad de precipitación de carburos, incrementando la resistencia a la corrosión intergranular.
- Es utilizado para soldar aceros inoxidables AISI tipo 304L, 308L que pueden ser utilizados en un amplio rango de condiciones corrosivas, sin necesidad de hacer tratamientos térmicos posteriores a la soldadura.
- Aplicaciones típicas: Aceros Inoxidables 308L, 304L, 308, 321 y 347. Equipos de proceso y almacenamiento de productos alimenticios y químicos corrosivos. Bombas, Intercambiadores de calor, etc.

Análisis Típico del metal alambre (% en peso)

C%	Mn%	Si%	P%	S%	Cr%	Ni%	Mo
0,02	1,90	0,38	0,02	0,01	19,8	9,8	0,19


Propiedades Mecánicas Típicas del Metal Depositado:

Esf. Fluencia en 0.2%, MPa	Esf. Máx. de Tracción, MPa	Elongación (L=4d), %	E. Absorbida Ch-v
No requerido	570	44	90 J a 0°C

Parámetros de Soldadura y Datos

Diámetro, mm	0.9	1.2
Int. de Corr., A	125-300	155-450
Voltaje, Volts	18-32	20-34


Posición de Soldadura



CCEP

INDURA 308L

INDURA S.A. – Centro de Servicio al Cliente 600 600 3030 – www.indura.net



1

Fuente: Indura. www.indura.net. Consulta: 11 de octubre de 2015.

Anexo 4: **Informe de resultados de Ensayos de Tensión, Doblado y prueba de presión Hidrostática**



**CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**



No. 07683

O.T. No. 35901 INFORME No. 190-M

INTERESADO: CARLOS ROVIDIO CEFERINO LOPEZ, CARNE No. 2001-13580

PROYECTO: TRABAJO DE GRADUACIÓN "ANÁLISIS DE LOS DEFECTOS INTERNOS EN LA UNIÓN POR SOLDADURA ELECTRICA DE TUBERIA DE ACERO INOXIDABLE DEL TIPO AUSTENITICO AISI 304"

ASUNTO: ENSAYO DE TENSION, DOBLADO Y PRESION Y RUPTURA RAPIDA EN TUBERIA DE ACERO INOXIDABLE DE "N"

FECHA: 18/04/2016

Antecedentes

El estudiante CARLOS ROVIDIO CEFERINO LOPEZ, CARNE No. 2001-13580, de la carrera de Ingeniería Mecánica, solicita a este Centro de Investigaciones de Ingeniería que se realice, ensayo de tensión, doblado y presión de ruptura rápida a 5 tubos de acero inoxidable de 1" de diámetro. Los ensayos en cuestión son parte del trabajo de tesis, "ANÁLISIS DE LOS DEFECTOS INTERNOS EN LA UNIÓN POR SOLDADURA ELECTRICA DE TUBERIA DE ACERO INOXIDABLE DEL TIPO AUSTENITICO AISI 304".

Resultados

Ensayo de Tensión

No.	Diámetro		Área neta	Carga kg		Esfuerzo Cedente (Máximo)			% Elongación 5 cm	Tipo de falla
	interno cm	externo cm		Cedente	Máximo	Kg/cm ²	Mpa	Psi		
1	2.065	2.635	2.11	7.500	12.900	3554.50 (5687.20)	348.55 (557.72)	50555.40 (80890.24)	48	Soldadura
2	2.067	2.640	2.11	7.000	11.750	3317.54 (5588.75)	325.34(546.10)	47185.97 (79209.02)	48	Soldadura
3	2.078	2.658	2.01	8.000	11.500	4477.81(5721.39)	439.10 (561.08)	63885.97 (81378.51)	48	Soldadura

Prueba de Doblado = 2100 kg

Prueba de Presión y ruptura rápida = 8000 psi carga Máxima sin falla

Atentamente,



M.Sc. Ing. Pablo Christian De León Rodríguez
Jefe de Metales y Productos
Manufacturados

/cbr





Ing. Francisco Javier Quiñonez de la Cruz
DIRECTOR C.I.I.



FACULTAD DE INGENIERIA --USAC--
Edificio 5-B, Ciudad Universitaria zona 12
Teléfono directo: 2418-9115, Planta: 2418-8000 Ext. 86209 y 86221 Fax: 2418-8121
Página web: <http://ci.usac.edu.gt>

Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.