UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN - TACNA

Facultad de Ingeniería

Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica y Materiales

VALORACIÓN DEL AMPERAJE Y LA VELOCIDAD DE SOLDADURA DEL ACERO AUSTENÍTICO AISI/SAE 304 POR GMAW-P (MIG)

TESIS

Presentada por:

Bach. Rony Erix Ramos Ccanchi

Para optar el Título Profesional de:

INGENIERO METALURGISTA

TACNA - PERÚ

2019

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASDRE GROHMANN — TACNA

Facultad de Ingeniería

Escuela profesional de Ingeniería Metalúrgica y Materiales

VALORACION DEL AMPERAJE Y LA VELOCIDAD DE SOLDADURA DEL ACERO AUSTENÍTICO AISI/SAE 304 POR GMAW-P (MIG)

Tesis sustentada y aprobada el día 30 de noviembre del 2017, estando integrado el jurado calificador por:

PRESIDENTE :.....
Dr. Tolomeo Raúl Soto Pérez

SECRETARIO :.....
Dr. Alberto Savino Pacheco Pacheco

VOCAL :.....
Mgr. Matías Carlos Vivar Colquicocha

ASESOR :.....
Ing. Julian Nieto Quispe

DEDICATORIA

A mis padres y hermanos, así como, a mi amada esposa e hijos, por su amor y compresión, quienes me apoyaron durante este largo camino que significó crecer como persona y profesional. Además de enseñarme que con esfuerzo, perseverancia y voluntad se puede alcanzar todas las metas trazadas. De todo corazón les digo, Muchas Gracias por estar a mi lado en este logro.

AGRADECIMIENTOS

A Dios Todopoderoso.

A mis padres y hermanos así como a mi esposa e hijos, quienes me apoyaron desde el momento que emprendí este reto. Sin su apoyo y palabras de aliento, sobre todo en los momentos difíciles, no lo hubiera logrado.

A la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohomann, por brindarme la oportunidad de estudiar y crecer, en especial a la Escuela de Ingeniería Metalúrgica.

Agradezco al Ing. Julián Nieto, tutor de este trabajo, por darme la oportunidad de poder trabajar en este proyecto, además de brindarme sus sabios consejos y ayuda durante la ejecución de este trabajo.

Agradezco especialmente al Dr. Alberto Pacheco Pacheco por su ayuda prestada en la realización de este proyecto con su experiencia y trayectoria formando profesionales.

Al personal que labora en el SENATI – TACNA, por el aporte realizado a este trabajo especial de grado al brindarme sus instalaciones; al Ing. Rene Lupaca por la ayuda prestada.

A todos los profesores y compañeros de estudio de la escuela de Ingeniería Metalúrgica, con los cuales cursé materias, los cuales contribuyeron en mi formación académica.

A mis amigos que en todo momento estuvieron a mi lado.

PRESENTACIÓN

Señor Decano de la Facultad de Ingeniería, Señor Director de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica y Materiales, Señores Miembros del Jurado, pongo a su consideración el presente trabajo de Tesis titulado "**VALORACIÓN DEL AMPERAJE Y LA VELOCIDAD DE SOLDADURA DEL ACERO AUSTENÍTICO AISI/SAE 304 POR GMAW-P (MIG)"** para optar el título profesional de ingeniero metalurgista. Estructurado conforme a los últimos lineamientos, de la Facultad de Ingeniería; presentando un primer capítulo el planteamiento de la investigación, donde se describe la problemática de la aplicación de la soldadura eléctrica en el acero inoxidable en estudio; un segundo capítulo el marco teórico donde se aborda los antecedentes y diversos conceptos teóricos referente a la soldadura del acero inoxidable; un tercer capítulo con el marco metodológico, donde se considera el diseño de la investigación y el método seguido para obtener los resultados; en un cuarto capítulo se presenta los resultados de las pruebas experimentales y las discusiones; finalizando con la parte de conclusiones y recomendaciones.

CONTENIDO

DEDICATORIA i

AGRADECIM IENTOS ii

PRESENTACIÓN iv

CONTENIDO v

ÍNDICE DE TABLAS ix

ÍNDICE DE FIGURAS xi

RESUMEN xiii

INTRODUCCIÓN 1

CAPÍTULO I PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN 3

1.1 Descripción del problema 3

1.2 Antecedentes del problema 3

1.3 Formulación del problema 5

1.4 Justificación e importancia de la investigación 5

1.5 Limitaciones de la investigación 6

1.6 Objetivos de la investigación 6

1.6.1 Objetivo general 6

1.6.2 Objetivos específicos 6

1.7 Hipótesis 7

1.7.1 Hipótesis general 7
1.7.2 Hipótesis específicas 7
1.8 Variables 7
1.8.1 Identificación de las variables 8
1.8.2 Caracterización de las variables 9
1.8.3 Operacionalización de las variables 11

CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO 12
2.1 Antecedentes del estudio 12
2.2 Bases teóricas 13
2.2.1 Aceros Inoxidables 13
2.2.2 Clasificación de los aceros inoxidables 14
2.2.3 Aceros inoxidables austeníticos 17
2.2.4 Propiedades de los aceros inoxidables austeníticos 18
2.2.5 Acero inoxidable austenítico AISI/SAE 304 20
2.2.6 Soldabilidad de los aceros inoxidables 21
2.2.7 Estimación del contenido de ferrita 27
2.2.8 Proceso de soldadura GMAW 36
2.2.9 Transferencia metálica en el proceso GMAW 45
2.2.10 Parámetros de la transferencia metálica por arco pulsado 50

2.2.11 Determinación de los parámetros de la transferencia por arco pulsado. 55
2.2.12 Criterio de Burnoff 56
2.2.13 Inspección y calidad de la soldadura 61
2.2.14 Especificación del procedimiento de soldadura (EPS) 61
2.2.15 Registro de calificación de procedimiento (RCP) 63

CAPÍTULO III MARCO METODOLÓGICO 65
3.1 Tipo de investigación 65
3.2 Diseño de la investigación 65
3.3 Procedimiento experimental 67
3.3.1 Preparación del proceso de soldadura: diseño y preparación de las juntas 68
3.3.2 Preparación de la mesa de trabajo 72
3.3.3 Fuente de energía 72
3.3.4 Preparación y limpieza del material base 73
3.3.5 Determinación de los parámetros en la soldadura 74
3.3.6 Criterio de Burnoff 74
3.3.7 Construcción de la zona paramétrica 75
3.3.8 Evaluación de cordones sobre chapa plana 76
3.3.9 Realización de la soldadura en una unión a tope 78
3.3.10 Calor aportado y potencia del arco eléctrico 78

3.3.11 Rendimiento del aporte 79

CAPÍTULO IV RESULTADOS Y ANÁLISIS DE LA SOLDADURA 81

4.1 Evaluación química del material base y aporte 81

4.2 Ensayo de dureza de las probetas soldadas 83

4.3 Ensayo de doblado de las probetas soldadas 84

4.4 Análisis metalográfica 87

4.5 Ensayo de tracción de las probetas soldadas 89

4.6 Optimización de soldadura 93

4.7 Evaluación de cordones sobre chapa plana 99

CONCLUSIONES 100

RECOMENDACIONES 101

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 102

ANEXO 107

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Operacionalización de las variables..... 11

Tabla 2 Clasificación de los aceros inoxidables según la AISI/SAE. 15

Tabla 3 Composición y propiedades de los diferentes tipos de aceros inoxidables. 16

Tabla 4 Propiedades mecánicas de la familia de aceros inoxidables austeníticos 304. 20

Tabla 5 Relación Cromo/Níquel equivalente para los Aceros Inoxidables Austeníticos. 28

Tabla 6 Contenido de N_2 relacionado con el proceso. 31

Tabla 7 Metales de aporte para aceros inoxidables austeníticos. 42

Tabla 8 Gases y mezclas de gases protectores para la soldadura GMAW 45

Tabla 9 Matriz de factores y niveles del diseño experimental. 65

Tabla 10 Matriz de las condiciones de las pruebas experimentales. 66

Tabla 11 Matriz de factores y niveles del diseño experimental para la optimización de la soldadura. 66

Tabla 12 Matriz de planificación del diseño experimental de optimización 67

Tabla 13 Parámetros fijos de las pruebas de Soldadura GMAW-P realizadas. 74
Tabla 14 Composición química del material base y aporte..... 81
Tabla 15 Porcentaje de ferrita en material base y aporte de acuerdo al método metalográfico y químico. 83
Tabla 16 Resultados de la medición de dureza método Rockwell B (HRB) 84
Tabla 17 Ensayo de doblado guiado..... 85
Tabla 18 Matriz de factores y niveles del diseño factorial..... 90
Tabla 19 Matriz del diseño factorial..... 90
Tabla 20 Resultados de la resistencia a la tracción de la soldadura. 91
Tabla 21 Matriz de factores y niveles del diseño..... 93
Tabla 22 Resultados de la resistencia a la tracción de acuerdo al diseño experimental. 95
Tabla 23 Resultados del análisis de la regresión. 98
Tabla 24 Análisis de varianza 98
Tabla 25 Resumen de la evaluación geométrica de los cordones depositados sobre chapa plana. 99

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Desarrollo del Acero Inoxidable AISI/SAE 304. 21
Figura 2. Diagrama de Schaeffler para determinar el contenido de ferrita en el cordón. 30
Figura 3. Diagrama de DeLong para determinar el contenido de ferrita en el cordón. 32
Figura 4. Diagrama WRC - 1992 para determinar el contenido de ferrita del metal depositado. 35
Figura 5. Diagrama del equipo para soldadura por arco de metal y gas.. 40
Figura 6. Transferencia por Corto Circuito. 47
Figura 7. Transferencia tipo globular..... 48
Figura 8. Transferencia por Spray..... 49
Figura 9. Transferencia por arco pulsado. 50
Figura 10. Variables del arco y su energía aportada. 53
Figura 11. Gráfico del Criterio de Burnoff para soldadura corto circuito y por arco pulsado. 57
Figura 12. Zona paramétrica predicha según el Criterio de Burnoff. 60
Figura 13. Etapas de experimentación aplicada..... 68
Figura 14. Diseño seleccionado para la fabricación de la junta a tope. ... 69

Figura 15. Esquema y medidas de la junta a tope. 69
Figura 16. Vistas de la etapa de preparación de probetas y soldado. 71
Figura 17. Mesa de trabajo utilizada en la elaboración del cupón de prueba. 72
Figura 18. Equipo multiprocesos Lincoln Electric V300 y alimentador ln-25..... 73
Figura 19. Esquema de las relaciones de área para calcular la dilución del cordón depositado sobre chapa plana. 77
Figura 20. Diseño de probeta para ensayo de doblado (cara y/o raíz) de la junta soldada. 85
Figura 21. Ensayo de doblado las piezas soldadas. 86
Figura 22. Fotos tomadas en el laboratorio de microscopía de la UNJBG-ESME. 87
Figura 23. Fotomacrografía de la probeta C1 (doblez de cara). 88
Figura 24. Fotomicrografía de la probeta C1 (doblez de cara). 88
Figura 25. Equipo y probetas de tracción. 92
Figura 26. Arreglo espacial del diseño experimental. 94
Figura 27. Superficie respuesta, evaluación de los factores intensidad de corriente y velocidad de soldado. 96

RESUMEN

El presente trabajo de investigación se realizó en el laboratorio de soldadura de SENATI, en los laboratorios de ensayo de materiales y microscopía de la UNJBG, con la finalidad de determinar la influencia de la corriente y la velocidad de la soldadura en la dureza, doblado y resistencia a la tracción del acero austenítico AISI/SAE 304, soldado mediante la técnica GMAW-P (MIG); para evaluar el efecto de la velocidad de soldadura y la intensidad de corriente, se aplicó un diseño factorial de dos factores con dos niveles y un diseño de optimización con dos factores y tres niveles. Los valores reportados de dureza promedio para el metal base es de 79,22 ± 0,13 HRB; este resultado coincide con el reportado en la norma ASTM, ya que cae dentro del intervalo de dureza de 79 a 94 HRB. Mientras que para la zona fundida del cordón, la dureza aumentó hasta 81,84 ± 1,33 HRB. El ensayo doblado de 8 probetas soldadas, bajo las condiciones de 11 y 13 mm/s y 120 y 130 amperios, no originó ningún rechazo por fisuras o rotura. Se logró una mayor resistencia a la tracción de las probetas soldadas, para una velocidad de 12,5 a 13 mm/s y un amperaje entre 120 y 124 amperios.

Palabras clave: Velocidad de Soladadura

INTRODUCCIÓN

Los Aceros Inoxidables fueron introducidos por primera vez en 1912 y desde entonces su volumen de producción y área de aplicación se ha multiplicado y diversificado, estableciéndose como aleaciones indispensables en muchos tramos de la industria, especialmente en la industria petrolera, petroquímica, nuclear, naval, hogar, medicina y en la industria alimenticia entre otras. Estos vienen definidos como una aleación ferrosa que contienen básicamente hierro, carbono y cromo. Los dos primeros son elementos intrínsecos de cualquier acero y el cromo es el elemento que por encima de un 12 % les proporciona pasividad frente a medios oxidantes y corrosivos a través de la formación de una película estable de óxido de cromo. Los aceros inoxidables pueden clasificarse según su contenido de elementos aleantes (composición química) o microestructura. Los grandes grupos en que se dividen los aceros inoxidables son: aceros inoxidables austeníticos, aceros inoxidables ferríticos, aceros inoxidables martensíticos, los denominados aceros Inoxidables (austeníticos-ferríticos) o aceros inoxidables dúplex, y los aceros inoxidables endurecidos por precipitación.

En la década de 1940 se otorgó una patente de un proceso para alimentar un electrodo de alambre en forma continua a través de un arco protegido con gas. Este fue el principio del proceso MIG (metal y gas inerte), que ahora tiene la denominación oficial de la AWS soldadura con gas y arco de metal (GMAW). Este tipo de soldadura con arco se ha perfeccionado y agilizado desde sus primeros días, además se han creado procesos relacionados. Todos los metales de importancia comercial pueden ser soldados en cualquier posición con este proceso escogiendo el gas protector, electrodo y variables de soldadura apropiados.

En este trabajo se ha realizado una investigación con la finalidad de determinar el conjunto de parámetros en el proceso GMAW-P (Ip, Ib, Tp, Tb), para la unión del acero inoxidable AISI/SAE 304, de espesor 3 mm, usando como material de aporte un electrodo ER308L-Si, basándose en los criterios desarrollados por Amin para obtener parámetros de pulso estables con protección gaseosa. Igualmente se evaluará y calificará el procedimiento de soldadura, mediante la elaboración de una especificación de procedimiento de soldadura (EPS) y calificación a través de un registro de calificación de procedimiento (RCP).

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN

1.1 Descripción del problema

En nuestra región, en los talleres de soldadura de la localidad de Tacna, esporádicamente realizan trabajos de soldadura en aceros inoxidables, esto se debe a que hay poca experiencia y capacitación en este campo de la soldadura. En la soldadura por arco eléctrico existen diferentes parámetros que afectan a la calidad de la misma, dos de los cuales son la potencia y la velocidad de soldadura. Por tanto, hay necesidad de conocer qué relación tienen, estos factores, con la calidad de la soldadura de los aceros inoxidables austeníticos.

El objetivo de este trabajo es evaluar el comportamiento de la dureza, la resistencia a la tracción y el doblado de la pieza soldada en función de la velocidad de soldadura y la corriente empleada.

1.2 Antecedentes del problema

Pese a ser buena la soldabilidad de los Aceros Inoxidables austeníticos, para la obtención de un óptimo resultado en la soldadura,

es necesario realizar correctamente el soldeo y tener en cuenta la influencia de los siguientes factores:

1) Propiedades físicas.
2) Precalentamiento y tratamiento térmico del conjunto soldado.
3) Proceso de soldeo y elección del material de aporte.
4) Contenido de ferrita.

Estos factores no son del todo independientes, y cuando se modifica una casi siempre es necesario modificar una o más de las otras. Para obtener los resultados que se buscan se requiere considerable habilidad y experiencia en seleccionar los valores óptimos para cada aplicación. Estos valores óptimos son afectados por interrelación de las variables.

Si algunas condiciones se mantienen constantes, la penetración de la soldadura es máxima a una velocidad de recorrido intermedia. Cuando se reduce la velocidad de recorrido, se incrementa la deposición del metal de aporte por unidad de longitud. A velocidades muy bajas, el arco actúa sobre el charco de soldadura no sobre el metal base, con lo que se reduce la penetración efectiva.

1.3 Formulación del problema

1) Pregunta general

¿Cómo influye la intensidad de corriente y la velocidad de soldadura en la dureza, resistencia a la tracción y doblado del acero austenítico AISI/SAE 304, soldado por GMAW-P (MIG)?

2) Preguntas específicas

a) ¿Cómo influye la corriente de soldadura en la dureza, resistencia a la tracción y doblado del acero austenítico AISI/SAE 304 soldado por GMAW-P (MIG)?

b) ¿Cómo influye la velocidad de soldadura en la dureza, resistencia a la tracción y doblado del acero austenítico AISI/SAE 304 soldado por GMAW-P (MIG)?

1.4 Justificación e importancia de la investigación

Con esta investigación se pretende minimizar los rechazos de piezas soldadas de acero austenítico AISI/SAE 304 por bajas propiedades mecánicas.

La presente investigación es **útil** porque busca valorar la influencia de la intensidad de corriente y la velocidad de soldadura en la dureza, resistencia a la tracción y doblado del acero austenítico AISI/SAE 304

soldado por GMAW-P (MIG); es **original**, dado que tras la búsqueda de antecedentes, el resultado fue negativo sobre su existencia en nuestra región; es **importante**, en la medida que se aplique los resultados conseguidos en esta investigación para minimizar los rechazos.

1.5 Limitaciones de la investigación

Las limitaciones que se tiene en este tipo de investigación es el acceso de horas limitadas al taller de soldadura y al laboratorio de ensayos.

1.6 Objetivos de la investigación

1.6.1 Objetivo general

Determinar la influencia de la corriente y la velocidad de soldadura en la dureza, resistencia a la tracción y doblado del acero austenítico AISI/SAE 304 soldado por GMAW-P (MIG).

1.6.2 Objetivos específicos

1) Evaluar la influencia de la corriente de soldadura en la dureza, resistencia a la tracción y doblado del acero austenítico AISI/SAE 304 soldado por GMAW-P (MIG).

2) Evaluar la influencia de la velocidad de soldadura en la dureza, resistencia a la tracción y doblado del acero austenítico AISI/SAE 304 soldado por GMAW-P (MIG).

1.7 Hipótesis

1.7.1 Hipótesis general

Existe una influencia directa de la corriente y la velocidad de soldadura en la dureza, resistencia a la tracción y doblado del acero austenítico AISI/SAE 304 soldado por GMAW-P (MIG).

1.7.2 Hipótesis específicas

1) Existe una influencia directa de la corriente de soldadura en la dureza, resistencia a la tracción y doblado del acero austenítico AISI/SAE 304 soldado por GMAW-P (MIG).
2) Existe una influencia directa de la velocidad de soldadura en la dureza, resistencia a la tracción y doblado del acero austenítico AISI/SAE 304 soldado por GMAW-P (MIG).

1.8 Variables

Los parámetros del proceso de soldadura tales como:

- La polaridad

- ❖ Voltaje del arco
- ❖ Intensidad de la corriente de soldadura
- ❖ Longitud del arco
- ❖ Velocidad de soldadura
- ❖ Extensión del electrodo
- ❖ Orientación del electrodo
- ❖ Posición de soldadura
- ❖ Tamaño del electrodo
- ❖ Gas protector
- ❖ Tasa de flujo del gas, etc.
- ❖ Material a soldar

Requiere una estrategia de prueba y error para determinar un conjunto de condiciones aceptable. Esto se dificulta aún más por la interdependencia de muchos de los parámetros; sin embargo, el conocimiento y control de estos parámetros es indispensable para producir consistentemente soldaduras de buena calidad.

1.8.1 Identificación de las variables

1) Variables independientes

a) Corriente de soldadura

b) Velocidad de soldadura

2) Variables dependientes

a) Dureza

b) Resistencia a la tracción

c) Doblado

1.8.2 Caracterización de las variables

1) Corriente de soldadura

El amperaje de soldadura varía con la velocidad de alimentación del electrodo o con la rapidez de fusión siguiendo una relación no lineal. Al variarse la velocidad de alimentación, el amperaje de soldadura varía de manera similar si se emplea una fuente de potencia de voltaje constante.

2) Velocidad de soldadura

En algunas aplicaciones, la velocidad de avance se define como un objetivo, y las demás variables se seleccionan de modo que se logre la configuración de soldadura deseada a esa velocidad. En otros casos, la velocidad podría ser una variable dependiente, elegida de modo que se obtenga una soldadura con la calidad y uniformidad deseada en las mejores condiciones posibles con la combinación de las demás variables.

3) Dureza

Resistencia superficial que presenta un material a la deformación plástica localizada.

También se puede definir como la propiedad que tiene los materiales de resistirse al rayado o penetración por un material más duro (Vergara & Martínez, 2008).

4) Resistencia a la tracción

Es la resistencia máxima, de un material, observada en la curva carga-deformación como el punto más alto.

La resistencia máxima a la tracción puede dar alguna indicación de la presencia de defectos, tales como porosidades o inclusiones (Vergara & Martínez, 2008).

5) Doblado

El doblado consiste en someter a una deformación plástica, una probeta soldada, por medio de doblamiento sin invertir el sentido de flexión durante el ensayo. La probeta se dobla hasta que una de sus puntas forme con la otra un ángulo especificado por acción de una carga. El eje longitudinal de la probeta debe permanecer en un plano

perpendicular al eje de doblado. En el caso del doblado a un ángulo de 180º, las dos ramas de la probeta pueden aplicarse la una sobre la otra o bien quedar paralelas a una distancia determinada.

1.8.3 Operacionalización de las variables

Tabla 1

Operacionalización de las variables

OBJETIVO	VARIABLES	DIMENSIÓN (Sub variable)	INDICADORES	INSTRUMENTOS
Influencia de la corriente de soldadura en la dureza, resistencia a la tracción y doblado	**Variable independiente:** -Corriente de soldadura **Variables dependientes:**	Amperaje	**Amperaje:** 75-350 Amperios	Equipo de soldadura GMAW.
	-Dureza	-Dureza masiva	-Dureza: 30-100 HRB	
	-Resistencia mecánica	-Resistencia a la tracción	-Tracción:	
	-Doblado	-Doblado raíz y cara	-Doblado: 180º	
Influencia de la velocidad de soldadura en la dureza, resistencia y doblado	**Variable independiente:** -Velocidad de soldadura **Variables dependientes:**	Velocidad de avance	**Velocidad de avance:** 200-800 mm/min	Equipo de soldadura GMAW.
	-Dureza	-Dureza masiva	-Dureza: 30-100 HRB	
	-Resistencia mecánica	-Resistencia a la tracción	-Tracción:	
	-Doblado	-Doblado raíz y cara	-Doblado: 180º	

Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes del estudio

Leal, (2011) en su trabajo de tesis de postgrado señala que “el acero AISI 304L tiene las propiedades mecánicas mas elevadas debido a su composición química (contiene entre 18-20 % de Cr), otro aspecto que favorece a que se consigan estos niveles de esfuerzos es la alta tasa de consolidación que poseen los aceros inoxidables austeníticos” (p. 10).

“El valor de la deformación plástica promedio (R) muestra el grado de conformabilidad en un proceso de embutido o estampado profundo, por lo tanto, el acero 304L presenta la conformabilidad más elevada” (Leal, 2011, p. 10).

En la caracterización de juntas de acero inoxidable AISI 304 obtenidas por el proceso de soldadura MIG(GMAW), mediante ensayos mecánicos y técnicas de ensayos no destructivos, empleando como variables de estudio la intensidad de corriente y la velocidad de pasada, se encontró que al aumentar la intensidad de corriente, tanto la dureza como la resistencia disminuyen; mientras que al incrementar la velocidad

de pasada se consiguen los valores más altos de dureza y resistencia (Medina, Poman, Iroba, Cabello, Saenz, Porrelo & Urbano, 2014).

2.2 Bases teóricas

2.2.1 Aceros Inoxidables

Según Zbigniew, los aceros inoxidables vienen definidos como una aleación ferrosa que contienen básicamente hierro, carbono y cromo. Los dos primeros son elementos intrínsecos de cualquier acero y el cromo es el elemento que por encima de un 12 % les proporciona pasividad frente a medios oxidantes y corrosivos a través de la formación de una película estable de óxido de cromo. Los aceros inoxidables también pueden contener elementos de aleación tales como el Si, Mn, P, S, Ni, Mo, Cu, Ti, Nb, N, B, W, Se y Te.

De acuerdo con la ASM todos estos elementos de aleación tienen una influencia más o menos acentuada sobre cada una de las fases cristalinas que van a determinar la estructura metalúrgica y, por consiguiente, el tipo de acero inoxidable.

Los aceros inoxidables fueron introducidos por primera vez en 1912, su volumen de producción y área de aplicación se ha multiplicado y diversificado, estableciéndose como aleaciones indispensables en

muchos ramas de la industria especialmente en la industria petrolera, petroquímica, nuclear, naval, hogar, medicina y en la industria alimenticia entre otras.

2.2.2 Clasificación de los aceros inoxidables

Los aceros inoxidables pueden clasificarse según su contenido de elementos aleantes (composición química) o microestructura. La microestructura depende de la composición química del acero (particularmente el cromo y el níquel) y del tratamiento térmico al cual es sometido el acero. Los grandes grupos en que se dividen los aceros inoxidables son:

- Aceros inoxidables austeníticos.
- Aceros inoxidables ferríticos.
- Aceros inoxidables martensíticos.
- Aceros inoxidables austeníticos-ferríticos (aceros inoxidables dúplex).
- Los aceros inoxidables endurecidos por precipitación.

En la Tabla 2 se presenta la clasificación de los aceros inoxidables, según lo indicado por la **American Iron and Steel Institute (AISI/SAE),** con sus respectivos elementos químicos de importancia como el cromo y el níquel.

Tabla 2

Clasificación de los aceros inoxidables según la AISI/SAE.

Clasificación según AISI/SAE	Elementos químicos
2XX	Cromo - Níquel – Manganeso
3XX	Cromo – Níquel
4XX	Cromo

Fuente: Kotecki (1995)

Según DeLong, la ferrita y la austenita son las microestructuras o fases principales de los aceros inoxidables, pudiendo estar presente también la martensita. La presencia de estas depende de los elementos de aleación y del tratamiento térmico empleado: por ejemplo el níquel favorece la presencia de la austenita y un temple favorece la presencia de la martensita. La ferrita en general es blanda y con baja resistencia mecánica, la austenita se caracteriza por su gran tenacidad y la martensita por su dureza y resistencia mecánica, así corno por su fragilidad. En relación con esto, los aceros inoxidables presentan un comportamiento característico según sea el contenido y porcentaje de las fases presentes. Kotecki representa en la Tabla 3 cuatro familias o grupos de aceros inoxidables comparando sus contenidos en cromo y níquel, así como, también menciona algunas de sus propiedades.

Tabla 3

Composición y propiedades de los diferentes tipos de aceros inoxidables.

Acero Inoxidable	**%C**	**%Cr**	**%Ni**	**Estructura**	**Propiedades**
Austenítico	0,03/0,2	17 a 27	6-20	Austenita	Son los más usados y conocidos. No magnéticos. Dúctiles, tenaces y buena resistencia a la corrosión. Buena soldabilidad.
Ferrítico	0,1/0,3	15 a 30	--	Ferrita	Son magnéticos, de baja resistencia mecánica. Presentan fragilidad en la ZAT. Buena resistencia a la corrosión, sobre todo los de alto cromo.
Martensítico	0,1/1,2	13 a 18	--	Martensita	Son magnéticos. Resistentes y de alta dureza. Baja resistencia a la corrosión. Mala Soldabilidad y tenacidad.
Austenítico/ Ferrítico	0,05/0,08	18 a 19	3-8	Dúplex (Austenita y Ferríta)	Son magnéticos. Excelente resistencia a la corrosión, buenas propiedades mecánicas y buena soldabilidad.

Fuente: Kotecki D.J. (1995)

La simbolización más extendida de los aceros inoxidables es la clasificación según el Instituto Americano del Hierro y el Acero (AISI), la cual generalmente se compone de tres cifras seguidas en ocasiones de una o más letras. Winkler et al. basados en sus estudios expresan que los aceros inoxidables austeníticos son el grupo más utilizado, este debido a sus buenas propiedades de resiliencia y unos relativamente bajos valores en el límite elástico, en general por sus excelentes propiedades tanto mecánicas como de resistencia a la corrosión.

2.2.3 Aceros inoxidables austeníticos

Los aceros inoxidables austeníticos son aleaciones de hierro, carbono, cromo y níquel. En donde el contenido de carbono está comprendido entre el 0,02 % y el 0,2 % C, el cromo está comprendido entre el 16 % y el 26 % Cr y el de níquel entre el 6 % y el 26 % Ni. Siendo el níquel, en este tipo de acero, el que le proporciona la estructura austenítica.

Gerken J.M. ofrece como características principales de este grupo de aceros inoxidables de estructura austenítica que no son templables, no ofrecen respuesta magnética, presentan una buena ductilidad y son fácilmente soldables. Estas dos últimas cualidades se presentan más frecuentemente cuanto menor es el contenido en carbono. Es el grupo más generalizado y el que reúne mejores condiciones de inoxidabilidad y ductilidad.

La resistencia, resiliencia, alargamiento y en general todas las propiedades mecánicas dependen del estado del material, es decir del tratamiento mecánico o térmico realizado, pero se pueden dar los siguientes valores como típicos en un acero inoxidable austenítico: carga de rotura de 65 kg/mm, alargamiento del 40 %, la resiliencia y el alargamiento son elevados.

Los tipos más usuales de acuerdo con la ASM son los AISI/SAE 304, 316, 308, 309 y 310. Los aceros inoxidables de calidad “L” se caracterizan por su bajo contenido en carbono. Otra variante de la familia austenítica son los aceros inoxidables estabilizados. Este tipo de aceros posee contenidos bajos de niobio o de titanio, del orden de 0,8 %. Con estas adiciones se evita o disminuye la corrosión intergranular. A este tipo de aceros inoxidables pertenecen los tipos AISI/SAE 321 y 347.

2.2.4 Propiedades de los aceros inoxidables austeníticos

1) Resistencia a la Corrosión

La formación en la superficie del metal de una capa de óxido de cromo es lo que hace que el acero sea inoxidable, esta película o capa se denomina capa pasivante. Es una capa de óxido que no se desprende y protege al acero de la oxidación. Este sistema de protección es parecido al que se utiliza al pintar las superficies, o recubrirlas con cinc o níquel. La diferencia es que en los inoxidables esta capa pasivante la genera la propia aleación. Cuando esta capa se rompe sólo hace falta el contacto con el ambiente para hacer crecer de nuevo la película pasivante y el material volverá a tener la misma resistencia a la corrosión que antes de romperse la película. Se podría decir que tienen la propiedad de reparación automática. Según H. Uhlig una mejor resistencia a la

corrosión general se obtiene en los aceros inoxidable austeníticos a medida que aumenta el contenido de cromo. Para obtener la resistencia óptima a la corrosión las aleaciones austeníticas deben ser calentadas de 1050 °C a 1100 ºC y enfriadas rápidamente en agua o en chorro de aire. Las aleaciones austeníticas que contienen Mo (316, 316L, 317) poseen una mejor corrosión en los medios que contienen cloruros, medios ácidos no oxidantes diluidos y a la corrosión en ranuras. El efecto beneficioso del Mo en estos aspectos no se extiende a los aceros inoxidables exentos de Ni.

2) Propiedades mecánicas de los aceros inoxidables austeníticos

Al ser la austenita una forma de cristalización del hierro con elevada densidad atómica (FCC), se endurece considerablemente cuando se somete a deformación en frío. Esto explica por qué los aceros austeníticos solo se endurecen por deformación. En general los aceros inoxidables austeníticos exhiben moderada resistencia y excelente tenacidad y ductilidad. Son estas propiedades las que hacen que en la soldadura, materiales de aporte austeníticos sean frecuentemente usados en combinaciones disímiles con aceros al carbono, aceros inoxidables ferríticos y aceros inoxidables

martensíticos. En la Tabla 4 se muestra algunos valores característicos de los aceros inoxidables austeníticos de la familia 304.

Tabla 4

Propiedades mecánicas de la familia de aceros inoxidables austeníticos 304.

AISI/SAE	Esfuerzo de máximo (MPa)/(Ksi)	Esfuerzo de fluencia (MPa)/(Ksi)	Elongación (%)	Reducción de área (%)
304 (A, C)	515/75	205/30	40	50
304 (B, C)	620/90	310/45	30	40
304 (25 % deformado)	860/125	515/75	10	--
304 (50 % deformado)	1035/150	760/110	7	--
304L C	480/70	170/25	35	50
304L (A, C)	480/70	170/25	40	50
304L (B)	620/90	310/45	30	40
304B4	515/75	205/30	30	16-27

Nota: (A) Trabajado en caliente, (B) trabajado en frio, y (C) recocido

Fuente: ASM Metals Handbook, vol 1 - 1998

2.2.5 Acero inoxidable austenítico AISI/SAE 304

El acero inoxidable austenítico AISI/SAE 304 surge de la necesidad de conseguir un material con una alta resistencia a la corrosión, esto se consigue disminuyendo el contenido de carbono de la aleación AISI/SAE 302, luego se le realizan modificaciones para disminuir la cantidad de carburos de cromo que precipitan en el momento de soldar estos materiales alterando la resistencia mecánica. En la Figura 1 se

muestra un diagrama de la evolución de los aceros inoxidables austeníticos en donde se muestra las reformas realizadas al acero 302 hasta conseguir las distintas variaciones.

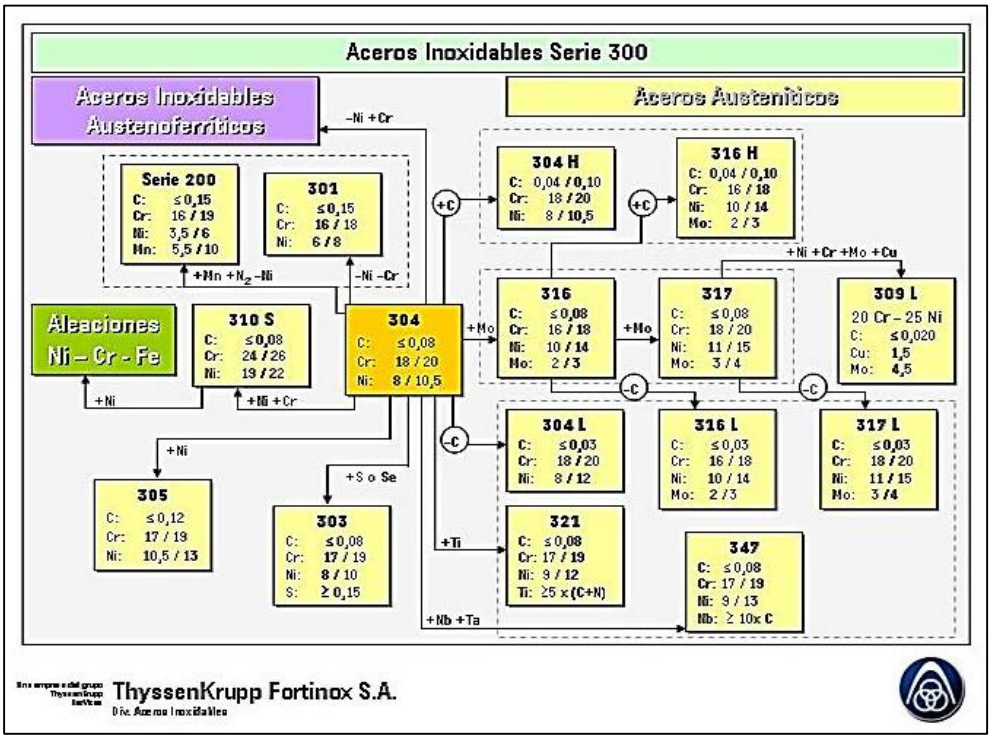


Figura 1. Desarrollo del Acero Inoxidable AISI/SAE 304.

Fuente: Web http://www.fortinox.com/lib/images/grid/serie300.j

2.2.6 Soldabilidad de los aceros inoxidables

Reyna y Brooks dicen que la soldabilidad de los aceros inoxidables austeníticos, en general, es buena al igual que sus propiedades físicas. Es notoria la diferencia en soldabilidad que presentan los aceros inoxidables austeníticos frente a los aceros inoxidables

ferríticos, aceros inoxidables martensíticos y aceros inoxidables dúplex. Como ejemplo de estas diferencias se tiene que la conductividad térmica de los aceros inoxidables austeníticos es aproximadamente la mitad que la de los aceros inoxidables ferríticos, lo cual se traduce en una reducción de la energía necesaria para realizar una soldadura de igual penetración en ambos materiales. También, el pozo de soldadura de los aceros inoxidables austeníticos es más viscoso que el de los aceros inoxidables ferríticos y aceros inoxidables martensíticos, lo cual reduce el riesgo por falta de fusión. Estas son algunas de las características por las cuales la soldabilidad de los aceros inoxidables austeníticos es mejor que la de los otros aceros de esta familia.

La unión de los aceros inoxidables austeníticos puede ser realizada sin ningún problema por un gran número de métodos, siendo los mas utilizados la soldadura por arco de metal y gas (GMAW), por arco de tungsteno y gas (GTAW), por arco con núcleo de fundente (FCAW), y por arco manual metálico protegido (SMAW). Los aceros inoxidables son aleaciones complejas en las que intervienen un buen número de elementos químicos. Para conseguir una aceptable soldabilidad, el metal aportado y zonas adyacentes deben presentar propiedades lo más semejantes posible a las del material de base, tanto

desde el punto de vista mecánico como de resistencia a la corrosión, factor este último que constituye una de las razones fundamentales por la cual se seleccionan estos materiales.

1) Factores de importancia en la soldabilidad de los aceros Inoxidables

Pese a ser buena la soldabilidad de los aceros inoxidables austeníticos, para la obtención de un óptimo resultado en la soldadura, es necesario realizar correctamente el soldeo y tenerse en cuenta la influencia de los siguientes factores:

- Propiedades físicas.
- Precalentamiento y tratamiento térmico del conjunto soldado.
- Elección del material de aporte y del proceso de soldeo.
- Contenido de ferrita.

2) Propiedades físicas

Los aceros inoxidables austeníticos tienen un coeficiente de dilatación aproximadamente de 50 % a 70 % más elevado que los aceros al carbono, mientras que la conductividad térmica es aproximadamente un 40 % inferior, por lo que la ZAT será más estrecha que la resultante de la soldadura de otros tipos de aceros.

La contracción de las juntas soldadas será, pues, considerablemente mayor, y la soldadura deberá realizarse prestando una atención especial al riesgo de posibles distorsiones o deformaciones del conjunto soldado. Por lo que es recomendable:

- Realizar el soldeo con baja aportación de calor, para lo cual es indispensable seleccionar el método adecuado de soldadura.
- Distribuir el calor de forma equilibrada, lo que se consigue gracias a una planificación previa de las distintas etapas de soldadura y efectuándola lo más simétricamente posible. Procurar que el nivel de embridamiento del conjunto soldado sea el más bajo posible.

3) Precalentamiento y tratamiento térmico de los conjuntos soldados

Este tipo de práctica se realiza únicamente cuando se trabaja con espesores de chapa gruesa, o por razones químicas en donde el material está en contacto con un medio agresivo, el cual implica un riesgo de corrosión. En ambos casos se acostumbra realizar un tratamiento térmico de alivio de tensiones. Fuera de estos casos particulares, ninguna operación de soldadura de un acero inoxidable austenítico requiere un precalentamiento o un tratamiento térmico.

4) Elección del metal de aporte y el proceso de soldadura

Es fundamental seleccionar adecuadamente, tanto el material de aporte como el proceso de soldadura a utilizar, ya que el agrietamiento en caliente es un inconveniente típico en la soldadura de los aceros inoxidables austeníticos.

Las grietas en los cordones son debidas a una acumulación de impurezas, provenientes del metal de aporte. En aquellas zonas donde el metal solidifica de último pueden formarse superficies débiles, propensas a romperse y generar grietas bajo la influencia de la propia tensión de contracción de la soldadura. Como solución a este problema se sugiere reducir las tensiones mecánicas, eliminar las impurezas (principalmente de S y P). La elección del proceso de soldadura debe realizarse sobre la base de los siguientes criterios:

- Aporte y distribución de calor.
- Operatividad.
- Velocidad de soldeo.
- Inconvenientes de resistencia a la corrosión.
- Disponibilidad comercial y costo.

5) Contenido de ferrita

La ferrita es capaz de disolver elementos tales como el azufre y el fósforo que de otro modo segregarían, por tal motivo, una cierta cantidad de esta fase en la soldadura tiene una influencia favorable en la reducción del agrietamiento en caliente. Además su presencia es positiva al incrementar las propiedades mecánicas de la unión, pero al mismo tiempo, es desfavorable por disminuir la resistencia a la corrosión frente a ácidos oxidantes calientes.

En sus investigaciones, Rabenstiener considera óptimo el contenido de ferrita entre el 5 y 15 % para beneficiarse con las ventajas de esta fase y reducir en gran medida los inconvenientes en la solidificación. El porcentaje de ferrita requerido en la unión soldada se consigue seleccionando adecuadamente tanto el material de aporte como los parámetros en el proceso de soldadura. Gretoft y Karisson, encuentran en sus investigaciones que la distribución de las tensiones durante la solidificación es uno de los factores que contribuye a que sea beneficiosa la presencia de la fase. Ellos establecen desde el punto de vista de la soldadura, que los mejores resultados se obtienen cuando la secuencia de solidificación comienza con la fase ferrítica y posteriormente la transformación de fase a austenita en estado sólido.

2.2.7 Estimación del contenido de ferrita

La determinación del contenido de ferrita en un acero inoxidable puede llevarse a cabo por métodos químicos (diagramas de Schaeffler, DeLong y WRC), magnéticos y metalográficos. Más de 40 años han pasado desde que un gran número de investigadores se han volcado a la tarea de formular cantidades de relaciones empíricas con el fin de estimar el contenido de ferrita en el depósito de soldadura partiendo de la composición química de los materiales (ver en Tabla 5).

Tabla 5

Relación Cromo/Níquel equivalente para los Aceros Inoxidables Austeníticos.

Autor	Año	Relaciones empíricas
Schaffler	1949	Cr_{EQ} = %Cr + %Mo + 1,5 %Si + 0,5 %Nb Ni_{EQ} = %Ni + 30 %C + 0,5 %Mn
De Long	1956	Cr_{EQ} = %Cr + %Mo + 1,5 %Si + 0,5 %Nb Ni_{EQ} = %Ni + 30 %C + 0,5 %Mn + 30 %N
Hull	1973	Cr_{EQ} = %Cr + 1,21 %Mo + 0,48 %Si + 0,14 %Nb + 2,27 %V + 0,72 %W + 2,2 %Ti + 0,21 %Ta + 2,48 %Al Ni_{EQ} = %Ni + 2,45 %C + 0,11%Mn – 0,0086 $\%Mn^2$ + %14,2 %N + 0,41 %Co + 0,44 %Cu
Hammer-Svenson	1979	Cr_{EQ} = %Cr + 1,37 %Mo + 1,5 %Si + 2 %Nb + 3 %Ti Ni_{EQ} = %Ni + 30 %C + 0,3 %Mn + 14,2 %N + %Cu
Espy	1982	Cr_{EQ} = %Cr + %Mo + 1,5 %Si + 0,5 %Nb + 5 %V + 3%Al Ni_{EQ} = %Ni + 30 %C + 0,87 %Mn + 0,33 %Cu + A(%N – 0,045) Donde A=30 si N<0,2; A=22 si 0,21 N 0,25; A=2 si 0,25 N 0,35
McCowan, Siewert y Olson (WRC-1988)	1988	Cr_{EQ} = %Cr + %Mo + 0,7 %Nb Ni_{EQ} = %Ni + 35 %C + 20 %N
Kotecki Siewert (WRC-1992)	1992	Cr_{EQ} = %Cr + %Mo + 0,7 %Nb Ni_{EQ} = %Ni + 35 %C + 20 %N + 0,25 %Cu

Fuente: ASM Metals Handbook, vol 1 - 1998

1) Diagrama de Schaeffler

De estos investigadores, el primero, y de gran importancia es Schaeffler, ya que determinó el porcentaje de ferrita utilizando medios metalográficos. En la Figura 2 se muestra el diagrama utilizado en sus investigaciones. Él establece que el contenido de ferrita del metal depositado es función de diversos factores, tales como:

- Proceso (longitud de arco y contaminación atmosférica, especialmente de N_2). La forma y solape al realizar el depósito.
- La velocidad del enfriamiento del cordón.
- Los parámetros de soldeo.
- El grado de dilución del metal base.

En las aplicaciones en las que el contenido de ferrita en el metal aportado sea crítico, el procedimiento de soldadura debe controlarse rigurosamente. Las variaciones de nitrógeno y cromo afectan significativamente al contenido de ferrita. Una técnica inadecuada puede producir contaminaciones por nitrógeno (N_2) debidas al exceso en la longitud del arco y a la pérdida de cromo por oxidación. El resultado puede ser una unión con un contenido de ferrita menor a la especificada.

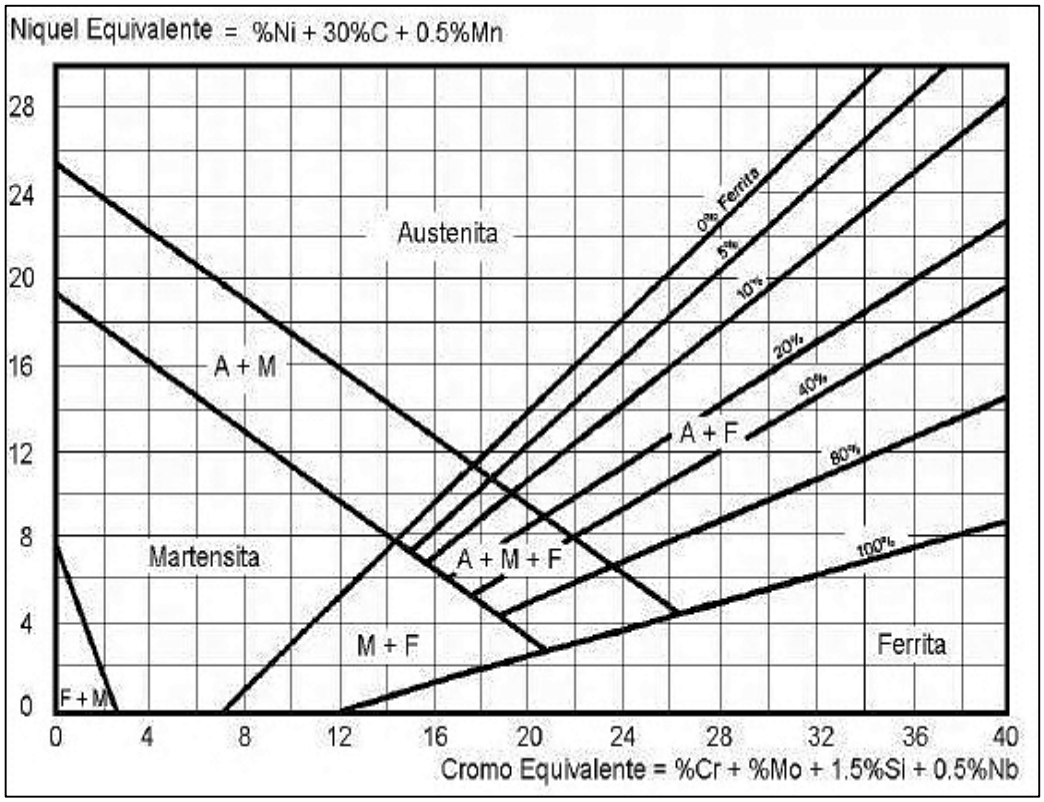


Figura 2. Diagrama de Schaeffler para determinar el contenido de ferrita en el cordón.

Fuente: Schaeffler A.L. 1949.

2) Diagrama de DeLong

El diagrama de DeLong fue publicado en 1974 incorporando el concepto de Número de Ferrita (FN) al diagrama, posteriormente este concepto fue estandarizado en la norma A4.2 de la AISI/AWS. W.T. DeLong reconoció en 1956 el efecto del nitrógeno en la promoción de la austenita a expensa de la ferrita, por lo que realizó un nuevo diagrama que abarca un intervalo de composiciones más estrictas e

incluye el efecto del nitrógeno. La determinación del N_2 presenta algunas dificultades al requerir un análisis de este gas. En consecuencia, Brooks recomienda, en ausencia de este dato, emplear los siguientes valores (Tabla 6) aproximados en función del proceso de soldeo:

Tabla 6

Contenido de N_2 relacionado con el proceso.

Proceso	**N_2 en el metal depositado**
SMAW	0,060
GTAW	0,045
GMAW (hilo tubular)	0,090
GMAW	0,140

Fuente: AWS, 1991.

En la práctica se evidencia que estos valores de N_2 para el proceso GMAW, en la investigación realizada por Ignoto, se encontraron valores entre 169 – 194 ppm N_2 en depósitos de soldadura trabajando con un acero inoxidables 316L. El diagrama modificado por DeLong es mostrado en la **Figura 3**.

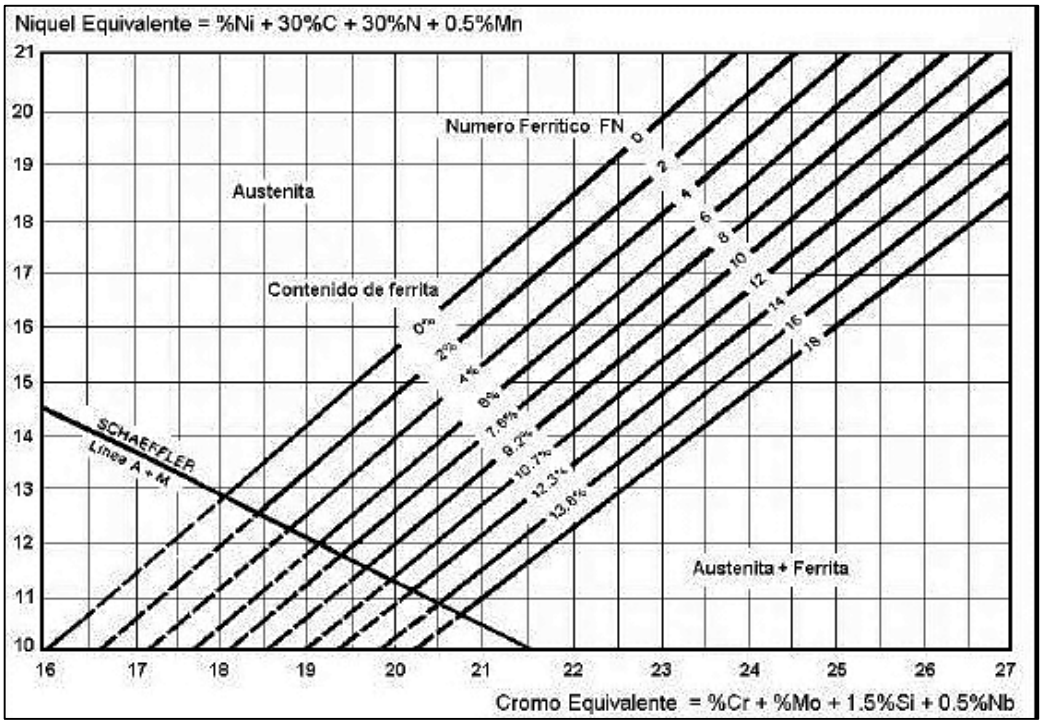


Figura 3. Diagrama de DeLong para determinar el contenido de ferrita en el cordón.

Fuente: DeLong W.T. 1974

Los diagramas más conocidos y utilizados son el Schaeffler y el de DeLong y ambos tienen los mismos principios de ejecución y uso. En el eje de las ordenadas presentan la suma de porcentajes de elementos formadores de austenita, multiplicados por unos coeficientes que son función de la influencia austenitizante del elemento de aleación. Esta suma se expresa en forma de equivalente de níquel, como elemento más representativo de la formación de austenita. Y en el eje de las abscisas se tiene, la suma de porcentajes de elementos

formadores de ferrita, asimismo, multiplicados por coeficientes que representan su influencia ferritizante. En este caso la suma se expresa en forma de cromo equivalente, que es el elemento básico formador de ferrita. Ambos diagramas difieren en los elementos tomados en consideración para determinar los equivalentes de níquel y de cromo, y, en los coeficientes aplicados a estos elementos.

3) Diagrama WRC – 1992

Este diagrama soportado por la Welding Research Council (WRC) indica la más reciente actualización desde que en 1988 Siewert desarrolla un diagrama de mayor exactitud utilizando recursos electrónicos. Posteriormente, McCowan y Siewert continuaron estudiando la mejor manera de representar el diagrama, hasta que en 1992 Kotecki y Siewert presentan el diagrama WRC – 1992, mostrado en la Figura 4. Este diagrama presenta una mejora respecto al diagrama de DeLong al expandir el término de cromo equivalente incluyendo un mayor número de metales para la soldadura de aceros inoxidables austeníticos y dúplex. De este diagrama se nota que los factores equivalentes para el manganeso y silicio han sido eliminados y el factor multiplicador para el carbono, nitrógeno y niobio han sido alterado. Este diagrama muestra

los diferentes modos de solidificación posibles en estos dos grupos de aceros inoxidables nombrados.

En función de los materiales involucrados en la soldadura y el proceso de soldadura, se puede seleccionar el diagrama que mejor se ajuste a la práctica realizada. Es importante determinar el número de ferrita (FN) ya que este, según la norma ANSI/AWS A4.2 implantada por la AWS en 1991, tiene como finalidad reducir las grandes variaciones de niveles de ferrita determinados sobre un espécimen dado, usando diferentes técnicas de medidas por diferentes laboratorios. El número de ferrita (FN) es aproximadamente igual al porcentaje en volumen de ferrita, a niveles por debajo de 8 FN. Por encima de este valor, ocurre una desviación, donde el valor de FN excede el porcentaje en volumen de ferrita. Por ejemplo, un metal de soldadura con 16 FN contiene aproximadamente 13,8 % volumen.

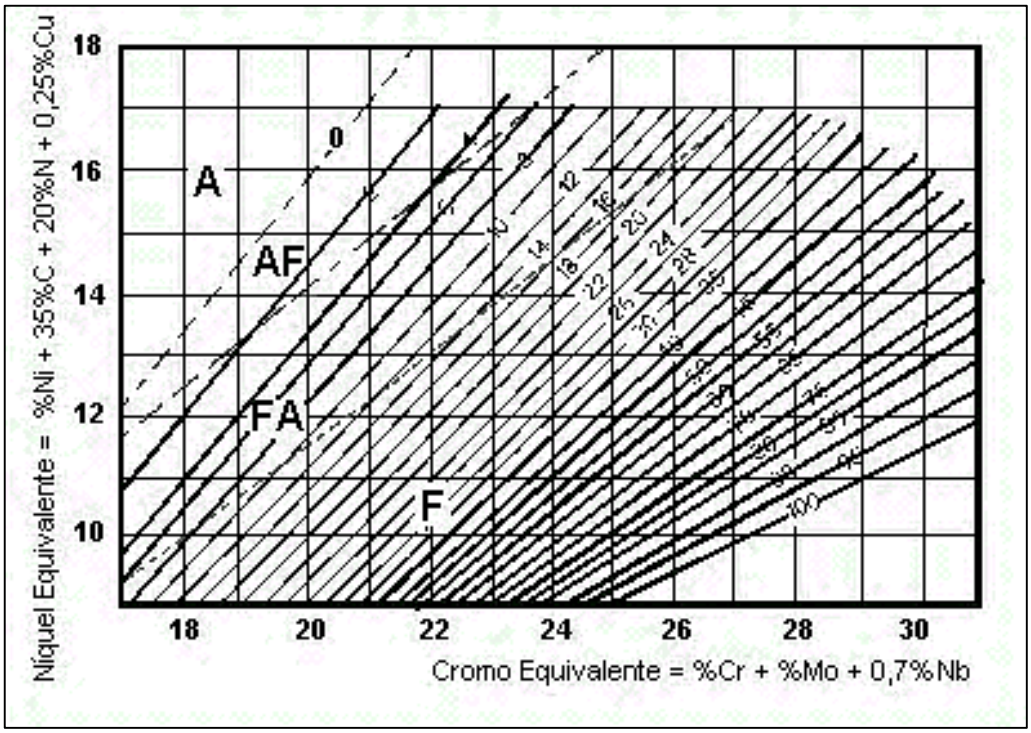


Figura 4. Diagrama WRC - 1992 para determinar el contenido de ferrita del metal depositado.

Fuente: Kotecki D.J. and Siewrt T.A. 1992.

4) Métodos Magnéticos

Debido a las propiedades magnéticas de la ferrita, su contenido puede ser medido, a temperatura ambiente, usando un método aprobado por la WRC en donde se reportan valores del Número de Ferrita (FN), de esta manera se hacen más precisas y económicas las mediciones. Para tal fin existe un instrumento que proporciona una respuesta confiable sobre el contenido de ferrita en las juntas soldadas, estos

instrumentos de medición o “ferritómetros” calibrados de acuerdo con los estándares de ANSI/AWS A4.2 1997 son los más utilizados hoy en día. La reproducibilidad del método es ± 1FN, si esta está en el intervalo de 0 – 28 FN, lo que supera la posibilidad de los demás métodos utilizados para determinar el contenido de ferrita. El método magnético para la medición del contenido de ferrita se aplica a lo largo de la línea central de los cordones, con acabado liso y sin tratamiento térmico. Lefeybre et al. Concuerdan en que el FN no sólo depende de la composición del aporte puro, sino de la relación entre el aporte y el metal depositado en la junta (dilución), así como también de la longitud de arco y de la energía.

2.2.8 Proceso de soldadura GMAW

1) Descripción del proceso

La soldadura por arco de metal y gas (Gas Metal Arc Welding, GMAW) es definida por la AWS como un proceso de soldadura por arco que emplea un arco entre un electrodo continuo de metal de aporte y el charco de soldadura. El proceso se realiza bajo un escudo de gas suministrado externamente y sin aplicación de presión. Una vez que el operador ha hecho los ajustes iniciales, el equipo puede regular automáticamente las características eléctricas del arco. Por todo esto, en efecto, los únicos controles manuales que el soldador requiere para la

operación semiautomática son los de velocidad y dirección del desplazamiento, así como también el posicionamiento de la pistola. En la década de 1940 se otorgó una patente de un proceso para alimentar un electrodo de alambre en forma continua a través de un arco protegido con gas. Este fue el principio del proceso MIG (metal y gas inerte), que ahora tiene la denominación oficial de AWS Soldadura con gas y arco de metal (GMAW). Este tipo de soldadura con arco se ha perfeccionado y agilizado desde sus primeros días, además se han creado procesos relacionados. En algunos de ellos se emplea un electrodo de alambre desnudo, protegido con un gas inerte. En otros se emplea un electrodo fundente similar a los convencionales para soldadura con arco. En determinados procesos se hace uso de una combinación de electrodo con núcleo de fundente y un gas protector.

El proceso GMAW puede operar en modalidades mecanizada, semiautomática o automática. Todos los metales de importancia comercial, como el acero al carbono, el acero de baja aleación y de alta resistencia mecánica, el acero inoxidable, el aluminio, el cobre, el titanio y las aleaciones de níquel se pueden soldar en cualquier posición con este proceso escogiendo el gas protector, electrodo y variables de soldadura apropiados.

2) Ventajas y limitaciones del proceso de soldadura GMAW

Los usos del proceso GMAW, desde luego, están regidos por sus ventajas; sin embargo, como en cualquier proceso de soldadura, hay ciertas limitaciones que restringen el uso de la soldadura por arco de metal y gas. A continuación se presentan una serie de ventajas y limitaciones del proceso.

VENTAJAS

- Es el único proceso de electrodo consumible que puede servir para soldar todos los metales y aleaciones comerciales.
- GMAW no tiene la restricción de tamaño de electrodo limitado que se presenta con la soldadura por arco de metal protegido.
- Puede soldarse en todas las posiciones, algo que no es posible con la soldadura por arco sumergido.
- Se logran tasas de deposición bastante más altas que con la soldadura por arco de metal protegido.
- Las velocidades de soldadura son más altas que con soldadura por arco de metal protegido gracias a la alimentación continua del electrodo y a las mayores tasas de deposición del metal de aporte. Como la alimentación de alambre es continua, es posible depositar soldaduras largas sin parar o volver a comenzar.

- Cuando se utiliza transferencia por aspersión, es posible lograr mayor penetración que con la soldadura por arco de metal protegido, lo que puede permitir el uso de soldaduras de filete más pequeñas para obtener una resistencia mecánica equivalente.
- Casi no se requiere limpieza después de la soldadura porque no se produce mucha escoria.

LIMITACIONES

- El equipo de soldadura es más complejo, más costoso y menos transportable que el de SMAW
- GMAW es más difícil de usar en lugares de difícil acceso porque la pistola soldadora es más grande que un porta-electrodos de arco de metal protegido, y la pistola debe estar cerca de la unión para asegurar que el metal de soldadura esté bien protegido.
- El arco de soldadura debe protegerse contra corrientes de aire que puedan dispersar el gas protector. Esto limita las aplicaciones en exteriores a menos que se coloquen barreras protectoras alrededor del área de soldadura.
- Los niveles relativamente altos de calor radiado y la intensidad del arco pueden hacer que los operadores se resistan a utilizar el proceso.

5) Equipos utilizados en la soldadura GMAW

El equipo necesario para GMAW se muestra en la Figura 5, los componentes básicos del equipo son la unidad de pistola soldadora y cables, la unidad de alimentación del electrodo, la fuente de potencia y la fuente de gas protector

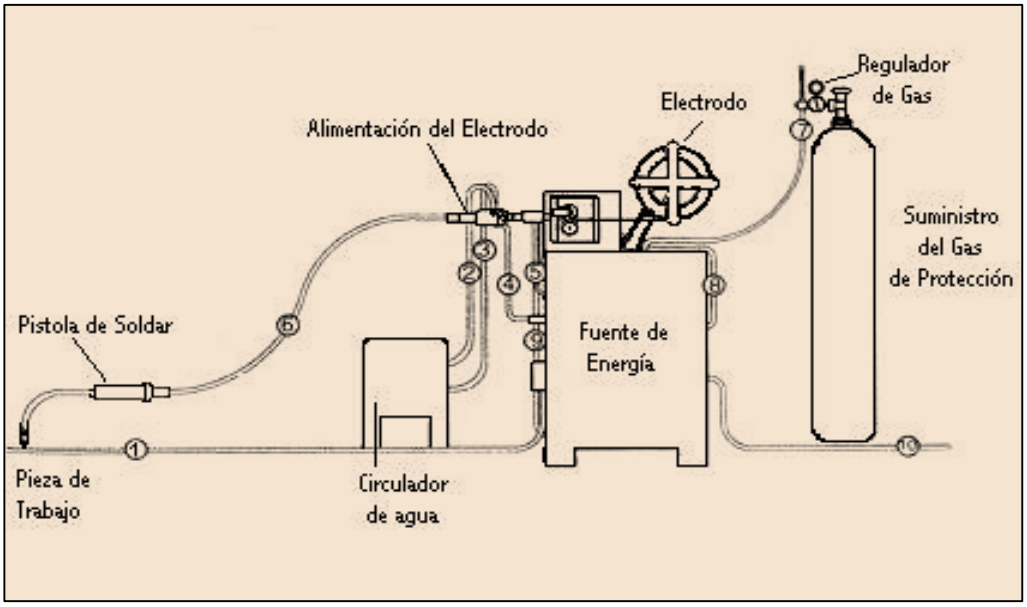


Figura 5. Diagrama del equipo para soldadura por arco de metal y gas.

Fuente: Hernández Riesco 1998

Riesco Hernández indica que la pistola guía el electrodo consumible y conduce la corriente eléctrica y el gas protector al trabajo, de modo que proporciona la energía para establecer y mantener el arco,

fundir el electrodo, y proporcionar la protección necesaria contra la atmósfera del entorno.

Se emplean dos combinaciones de unidad de alimentación de electrodo y fuente de potencia para lograr la autorregulación de la longitud del arco que se desea. Generalmente, esta regulación se efectúa con una fuente de potencia de voltaje (potencial) constante en conjunción con una unidad de alimentación de electrodo de velocidad constante. Como alternativa, una fuente de potencia de corriente constante proporciona una curva volt-ampere de caída, y la unidad de alimentación del electrodo se controla por medio del voltaje del arco.

6) Electrodos utilizados en el proceso GMAW

La American Welding Society establece que el electrodo a seleccionar debe satisfacer ciertas demandas del proceso en cuanto a estabilidad del arco, comportamiento de transferencia de metal y características de solidificación. También debe producir un depósito de soldadura compatible en gran medida con las características del metal base (composición química, resistencia mecánica, ductilidad y tenacidad entre otras), además de proporcionar una unión libre de discontinuidades.

Es preciso considerar también otras propiedades como la resistencia a la corrosión, la respuesta al tratamiento térmico, la resistencia al desgaste. Sin embargo, todas estas consideraciones tienen importancia secundaria en comparación con la compatibilidad metalúrgica del metal base y el metal de aporte.

En la **Tabla 7** se indican los metales de aportación recomendados para varios tipos de acero inoxidable austenítico. Se ha utilizado la designación AWS por ser la más utilizada. Consiste en los mismos números de designación del material base (según AISI/SAE), la letra E indica electrodo, R varilla y T electrodo tubular.

Tabla 7

Metales de aporte para aceros inoxidables austeníticos.

Tipo de acero inoxidable	Electrodo recomendado
201, 202	ER209, E219, E308
301, 302, 304, 305	ER308
304L	ER308, ER347
309	ER309
309S	ER309L
310, 314	ER310
310S	ER310
316	ER316
316L	ER316L
316H	ER16-8-2, ER316H
317	ER317
317L	ER317L
321	ER321
330	ER330
347, 348	ER347

Fuente: AWS. ANSI/AWS A4.2 – 1991

7) Gases de protección

El gas protector que se emplea para el proceso de arco de metal y gas puede ser inerte (argón o helio), reactivo ($C0_2$) o una mezcla de ambos tipos. Se puede agregar un poco de oxígeno y en ocasiones de hidrógeno a fin de lograr otras características de arco y geometría de franja de soldadura deseadas. La selección del mejor gas protector se basa en la consideración del material que se va a soldar y del tipo de transferencia de metal que se empleará para la transferencia.

La función primaria del gas protector es impedir que la atmósfera entre en contacto con el metal de soldadura fundido. Esto es necesario porque la mayor parte de los metales, al calentarse hasta su punto de fusión en aire, presentan una marcada tendencia a formar óxidos y, en menor grado, nitruros. Además, el oxígeno reacciona con el carbono del acero fundido para formar monóxido y dióxido de carbono. Estos diversos productos de reacción pueden causar deficiencias de la soldadura, como escoria atrapada, porosidad y pérdida de ductilidad del metal de soldadura. Los productos de reacción mencionados se forman con facilidad en la atmósfera si no se toman precauciones para excluir el oxígeno y el nitrógeno.

De lo expuesto en este punto hay que definir que los gases activos son aquellos que reaccionen químicamente con el baño, y por consecuencia que los gases inertes son aquellos que se mantienen inalterables durante el proceso. Cabe destacar que en las mezclas al ser uno de los componentes activos se considera la mezcla de gases como un gas protector activo. En la **Tabla 8** se muestran los principales gases que se usan con GMAW. Casi todas son mezclas de gases inertes que también pueden contener pequeñas cantidades de oxígeno o el empleo de nitrógeno al soldar cobre es una excepción.

Tabla 8

Gases y mezclas de gases protectores para la soldadura GMAW

GAS ROTECTOR	ACCIÓN QUÍMICA	OBSERVACIÓN
Argón (Ar)	Inerte	Para soldar la mayoría de los metales, excepto acero.
Helio (He)	Inerte	En aleaciones de Al y Cu para un máximo calor y minimizar la porosidad.
Ar + He (20-80 a 50-50 %)	Inerte	En aleaciones de Al y Cu para un máximo calor y minimizar la porosidad. Arco más silencioso y estable.
Ar y Cloro (Cl)	Esencialmente inerte	Todas las aleaciones, para minimizar la porosidad.
Nitrógeno N_2	Reductora	En el cobre, permite un arco muy potente; se usa más en Europa.
Ar + 25-30 % N_2	Reductora	En cobre, un arco más potente y suave, de control más fácil que solo con N_2.
Ar + 1-2 % O_2	Oxidantes	Aceros Inoxidables y de aleaciones, también para algunas aleaciones de cobre desoxidado.
Ar + 3-5 % O_2	Oxidantes	Aceros al carbono, aleaciones de acero y acero inoxidable, se requiere electrodo desoxidado.
Ar + 20-30 % O_2	Oxidantes	Diversos aceros, se usa principalmente con arco en corto circuito.
Ar + 5 % O_2 + CO_2	Oxidantes	Diversos aceros, requiere electrodo desoxidado.
CO_2	Oxidantes	Aceros al carbono y de baja aleación.

Fuente: Hernández Riesco 1998

2.2.9 Transferencia metálica en el proceso GMAW

La mejor forma de describir las características del proceso GMAW es en términos de cuatro mecanismos básicos empleados para transferir metal del electrodo a la pieza a soldar.

- Transferencia por cortocircuito.

- Transferencia globular.
- Transferencia por aspersión.
- Transferencia por arco pulsado.

El tipo de transferencia conseguida en la soldadura es el resultado de la interacción y el compromiso de varios factores, tales como: magnitud y tipo de la corriente de soldadura, tensión de soldeo, diámetro del electrodo, composición del electrodo, extensión del electrodo, gas protector; siendo los de mayor influencia los dos primeros.

1) Transferencia por cortocircuito

La transferencia por cortocircuito se produce por contacto del alambre con el metal depositado (**Figura 6**). Se obtiene este tipo de transferencia cuando la intensidad y la tensión de soldeo son bajas. Se utiliza este tipo de transferencia para el soldeo en posición vertical bajo techo. Parámetros típicos: Voltaje 16 a 22 V, Intensidad 50 a 150 A. Se reconoce porque el arco es corto, suele haber proyecciones y hay un zumbido característico. Este tipo de transferencia se obtiene fácilmente con dióxido de carbono.

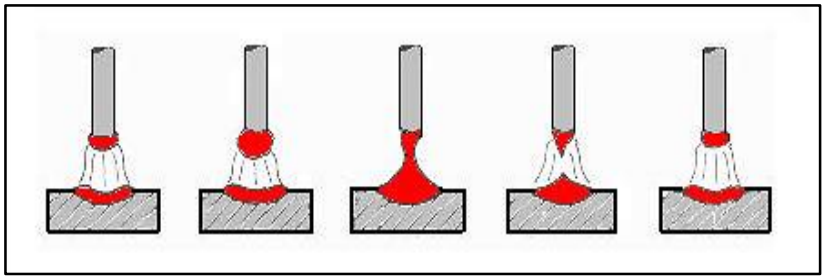


Figura 6. Transferencia por Corto Circuito.

Fuente: Hernández Riesco 1998

2) Transferencia globular

La transferencia globular se caracteriza principalmente por la formación de una gota relativamente grande de metal fundido en el extremo del alambre **(figura 7)**. Ésta se va formando hasta que cae al baño fundido por su propio peso. Este tipo de transferencia no suele tener aplicaciones tecnológicas por la dificultad de controlar adecuadamente el metal de aportación y porque suele provocar faltas de penetración y sobre espesores elevados. Parámetros típicos: Voltaje de 20 a 35 ½: Intensidad 70 a 255 A.

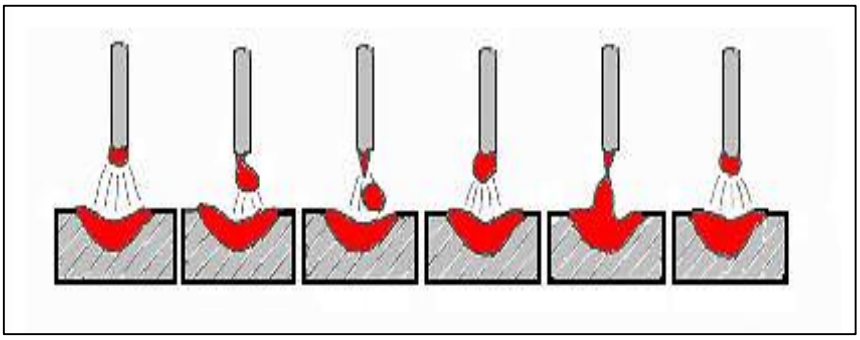


Figura 7. Transferencia tipo globular.

Fuente: Hernández Riesco 1998

3) Transferencia por spray

En la transferencia por arco-spray las gotas son iguales o menores que el diámetro de alambre y su transferencia se realiza desde el extremo del alambre al baño fundido en forma de una corriente axial de gotas finas (corriente centrada con respecto al alambre). Se obtiene este tipo de transferencia con altas intensidades y altos voltajes, intensidades de 150 a 500 A y voltajes de 24 a 40 V. Los gases inertes favorecen este tipo de transferencia (ver figura 8). La transferencia en spray se puede aplicar para cualquier material base pero no se puede utilizar en espesores muy finos porque la corriente de soldeo es muy alta. Se consiguen grandes tasas de deposición y rentabilidad.

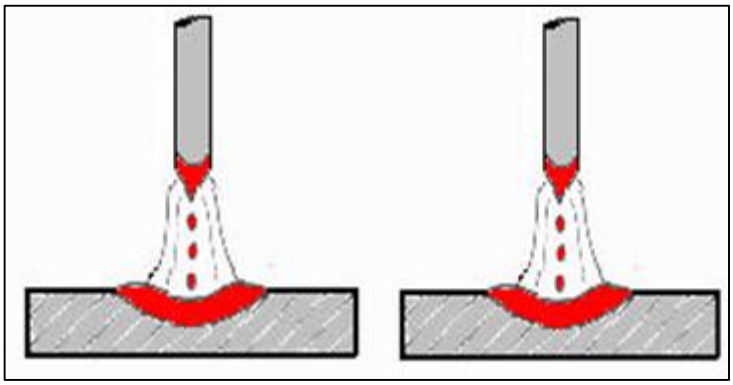
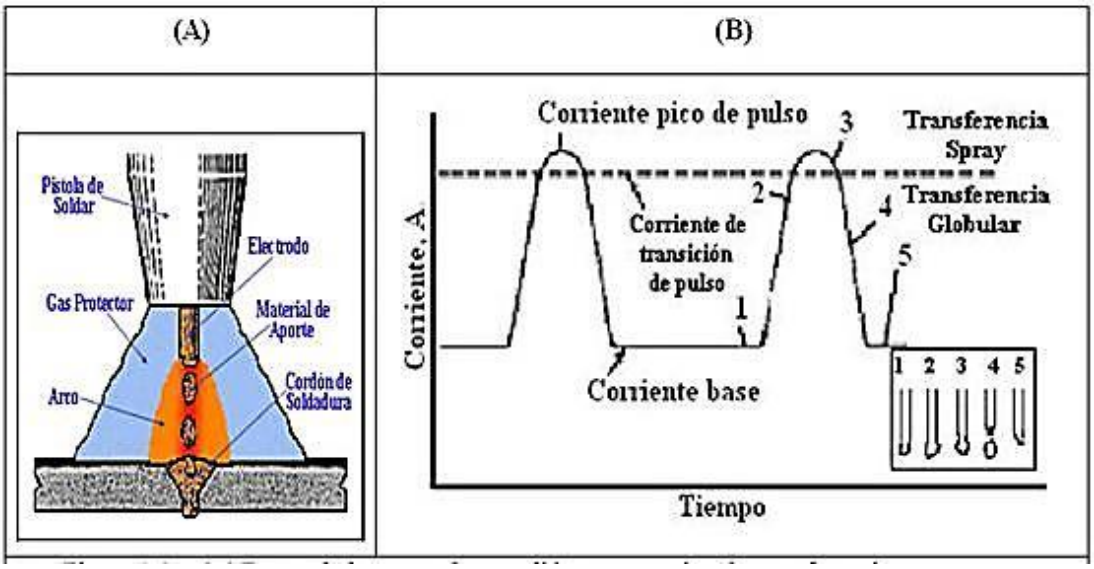


Figura 8. Transferencia por Spray.

Fuente: Hernández Riesco 1998

4) Transferencia por arco pulsado

La transferencia por arco pulsado es una modalidad del tipo spray, que se produce por pulsos a intervalos regularmente espaciados, en lugar de suceder al azar como ocurre en el arco-spray. Este tipo de transferencia se obtiene cuando se utiliza una corriente pulsada, que es la composición de una corriente de baja intensidad, que existe en todo momento (es constante) y se denomina corriente base, y un conjunto de pulsos de intensidad elevada denominada corriente de pico (ver **Figura 9**). La intensidad de fondo sirve para precalentar y acondicionar el alambre que va avanzando continuamente. La gota saltará cuando se aplique una corriente de pico.



Nota: (a) Forma de las gotas desprendidas por este tipo de transferencia.

(b) Esquema del ciclo de corriente que presenta la transferencia por arco pulsado

Figura 9. Transferencia por arco pulsado.

Fuente: Gómez R. 1995

2.2.10 Parámetros de la transferencia metálica por arco pulsado

Para que exista transferencia metálica por este tipo, es preciso que la intensidad de corriente conmute entre dos niveles, uno inferior y otro superior. En el nivel inferior, denominado corriente de base (Ib), se aporta una energía que no funde material, pero que consigue mantener el arco activo entre el nivel superior. Durante el nivel superior, denominado corriente de pico (Ip), se proporciona la energía capaz de fundir una porción de material de aporte y depositarlo sobre el baño de

fusión. Según Gómez R. y Amín M. los parámetros que caracterizan una soldadura con transferencia metálica por arco pulsado son los siguientes: tiempo de pulso o de pico (Tp), intensidad de pulso o de pico (Ip), intensidad de base (Ib) y frecuencia (f).

1) Tiempo de pico (Tp)

Se refiere al tiempo por el cual es mantenida la intensidad pico (Ip), teniendo en cuenta que una soldadura óptima debe desprender una gota por pulso, un tiempo de pico inferior o superior a este generará una energía de pulsación insuficiente para formar y desprender una gota o la proyección de varias gotas por pulso respectivamente, cualquiera sea el caso se le restará calidad a la soldadura.

2) Corriente de pico (Ip)

Es la intensidad del pulso que en combinación con el tiempo pico suministran la energía transferida al material para la formación y proyección de la gota. Por tal motivo, existen múltiples combinaciones para conseguir un mismo resultado, por ejemplo, si se trabaja con un equipo cuya Ip no puede ser elevada entonces se incrementa el tiempo de pulso.

3) Corriente base (Ib)

La intensidad de base (Ib) tiene como objetivo mantener el arco encendido entre pulsaciones, pero sin fundir material. Si este valor es elevado aumenta de manera innecesaria la intensidad media, por el contrario si este valor es bajo el arco pierde estabilidad y puede extinguirse.

4) Frecuencia del pulso (f) y tiempo base (Tb)

Una variación de la frecuencia del pulso (f), supone una variación del tiempo de base (Tb), de este modo si se aumenta la frecuencia, aumentan los pulsos por unidad de tiempo o lo que es lo mismo, las gotas de material de aporte. Esta demanda de material se traduce en un aumento en la velocidad de alimentación del alambre. Del mismo modo, una disminución de la frecuencia exigirá una disminución de dicha velocidad. En la **Figura 10** se esquematizan todas las variables del modo de transferencia pulsado, según el oscilograma que representa el mismo, además de la energía aportada la cual se representa como el área bajo la curva.

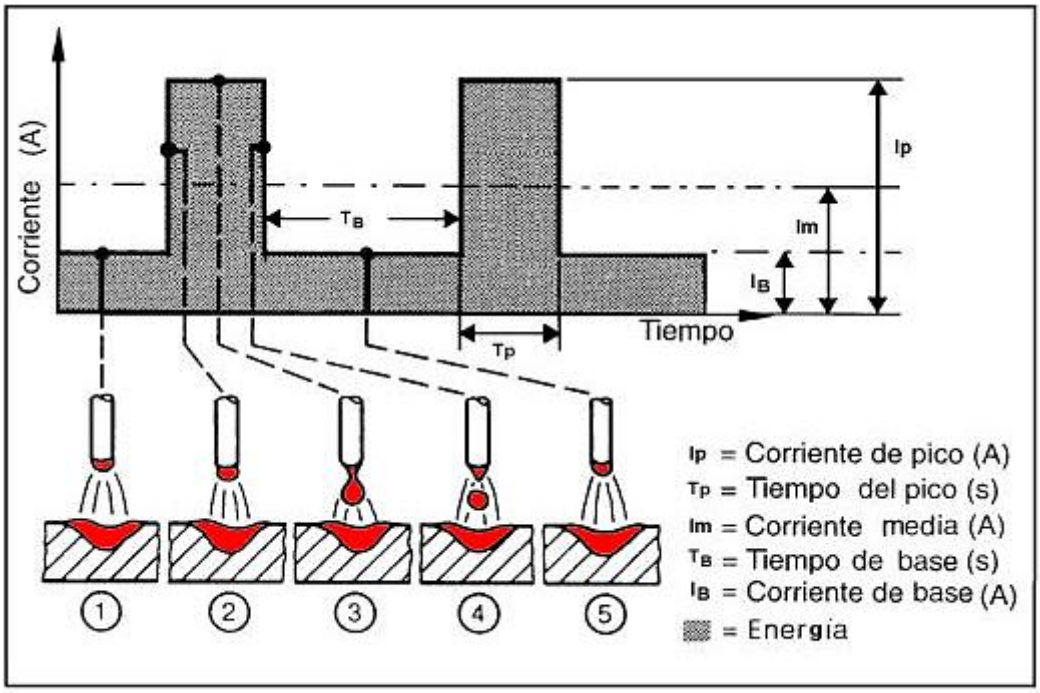


Figura 10. Variables del arco y su energía aportada.

Fuente: Gómez R. 1995

A partir de lo expresado por Y. Kim, se establecen dos condiciones para garantizar la ausencia total de proyecciones o salpicaduras en el material soldado:

a) Sólo debe desprenderse una gota de material por pulso. El momento en que se desprende la gota debe ser durante el tiempo de base (Tb). Para cumplir con esta condición, es necesario que la energía aportada al material durante el pulso sea la justa y necesaria al momento de soldar.

b) El volumen de la gota debe ser equivalente al diámetro del electrodo utilizado. El tamaño de la gota depende de la relación entre la velocidad de avance del hilo y la frecuencia de los impulsos. Para conseguir el tamaño de gota adecuado y mantener el sincronismo con la velocidad de avance, es preciso que la frecuencia sea variable de forma continua, y proporcional a la velocidad de avance del electrodo. En efecto, la cantidad de material depositado en el metal base, es el producto del volumen (V) de la gota, por la frecuencia de pulso (f), o lo que es lo mismo, el producto del área de la sección transversal del electrodo (s) por su velocidad (v). Es decir:

$$V.f = S \,.\, v \qquad [1]$$

Admitiendo que la gota desprendida es esférica, su volumen vendrá dado por la expresión:0

$$V = (4\pi/3).r^3 \qquad [2]$$

Por otra parte, el área de la sección transversal del electrodo es:

$$S = \pi.r^2 \qquad [3]$$

Sustituyendo:

$$(4\,\pi\,/3).r^3.f = \pi r^2.v \qquad [4]$$

y colocando el diámetro en función del radio, se obtiene finalmente:

$$v = (2/3).d.f \qquad [5]$$

Esta expresión proporciona el valor de la velocidad de avance del electrodo en función de su diámetro y la frecuencia de pulsación. Puede verse que, para un determinado diámetro de hilo, a medida que la frecuencia aumenta, también debe hacerlo la velocidad de avance del hilo.

2.2.11 Determinación de los parámetros de la transferencia por arco pulsado.

La determinación de los parámetros de soldadura (Ip, Tp, Ib, Tb) empleando modo de transferencia metálica por arco pulsado, se basa en el trabajo de investigación realizado por M. Amin considerando las respectivas correcciones realizadas por S. Rajasekaran, S. D. y otros. La determinación de los parámetros de la transferencia por arco pulsado está basada en tres requerimientos fundamentales utilizando GMAW-P

con alambre macizo, dichos requerimientos se explican brevemente a continuación.

2.2.12 Criterio de Burnoff

Este consiste en la construcción de una relación funcional que represente todas las posibles condiciones de los parámetros del pulso (Ip, Ib, Tp, Tb) asociados a una corriente media específica (Im). Esta relación debe abarcar un área de trabajo que incluya todas las posibles combinaciones de parámetros, la cual se representará en una región denominada zona paramétrica. Para la construcción de esta zona se debe hallar, como primer paso, una función que relacione la corriente media (Im) y la velocidad de alimentación (Wf) empleando GMAW- P y usando parámetros experimentales. Esta función se logra al realizar soldaduras por ensayo y error tomando en cuenta todas las variables de las mismas, las cuales se seleccionan escogiendo las de mayor estabilidad del arco y con una longitud de arco aproximadamente constantes. Una vez seleccionadas las mejores combinaciones para realizar el arco de soldadura, los valores obtenidos de intensidad media (Im) se grafican con sus respectivas velocidades de alimentación, obteniéndose una relación representada en la Figura 11, solo con GMAW –P. La corriente

media puede ser calculada según la siguiente ecuación usando los parámetros registrados de cada soldadura:

$$Im = (Tp.Ip + Tb.Ib).(Tp + Tb) \quad [6]$$

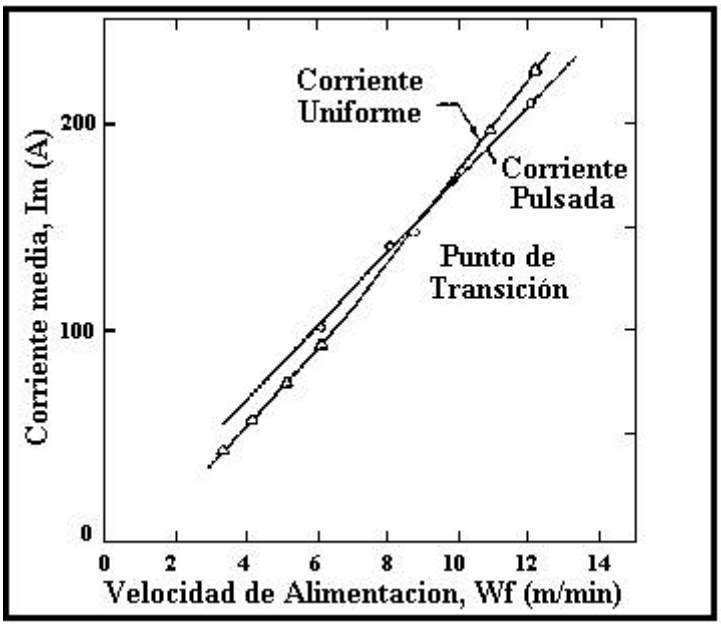


Figura 11. Gráfico del Criterio de Burnoff para soldadura corto circuito y por arco pulsado.

Fuente: Rajasekaran S. 1998

En los trabajos realizados por Rajasekaran se establece con el objetivo de encontrar un valor que indique la transición entre una transferencia corto circuito y una transferencia tipo spray, que se debe elaborar un gráfico similar al construido por Amin M. (Im vs. Wf) pero empleando un arco convencional. El punto de intersección de ambas

rectas indicará entonces la transición en la transferencia metálica. Este punto puede ser apreciado en el gráfico de la Figura 11. En sus investigaciones Rajasekaran considera el volumen de la gota igual al producido por una esfera de diámetro similar al diámetro del electrodo, argumentando que al trabajar con volúmenes de gotas mayores al diámetro del alambre se puede favorecer la transferencia corto circuito y salpicaduras. Dicha consideración se traduce en la siguiente ecuación:

$$V_D = (4\pi/3).r^3 \qquad [7]$$

Donde:

r = radio del alambre (mm) y V_D = Volumen de la gota (mm^3)

De igual manera se asume que el tiempo del ciclo debe ser tal que produzca una gota por pulso en relación con la velocidad del alambre (Wf) que se emplee, produciendo la siguiente expresión:

$$T_C = 240.V_D / ð.d^2.Wf \qquad [8]$$

Donde: T_C = tiempo de ciclo (ms) y d = diámetro del alambre (mm)

Considerando el tiempo del ciclo T_C como la suma del tiempo pico y del tiempo base, y que la intensidad media puede ser descrita por la ecuación de una recta, se tiene que:

$$T_C = Tp + Tb \quad [9]$$

$$Im = m \cdot Wf + K \quad [10]$$

Donde: m = pendiente de la recta y K = intersección con la ordenada.

Relacionando con la ecuación [6] se obtiene que:

$$Ip = (T_C/Tp) \cdot Im - ((T_C/Tp) - 1) \cdot Ib \quad [11]$$

Para un tiempo pico (T_C) específico esta ecuación establece la relación entre la intensidad pico (Ip) y la intensidad base (Ib) para una intensidad media (Im) determinada. Con dicha relación puede ser construida una gráfica como la que se muestra en la Figura 12**,** en donde se presenta una zona paramétrica, dentro de esta zona existe una relación lineal entre Ip e Ib, y siendo el valor mínimo posible el punto en común Im = Ip = Ib. Esta zona presenta las múltiples combinaciones entre Ip, Ib y Tp para una Im determinada con lo cual se garantiza una condición de pulso que cumplen con el Criterio de Burnoff.

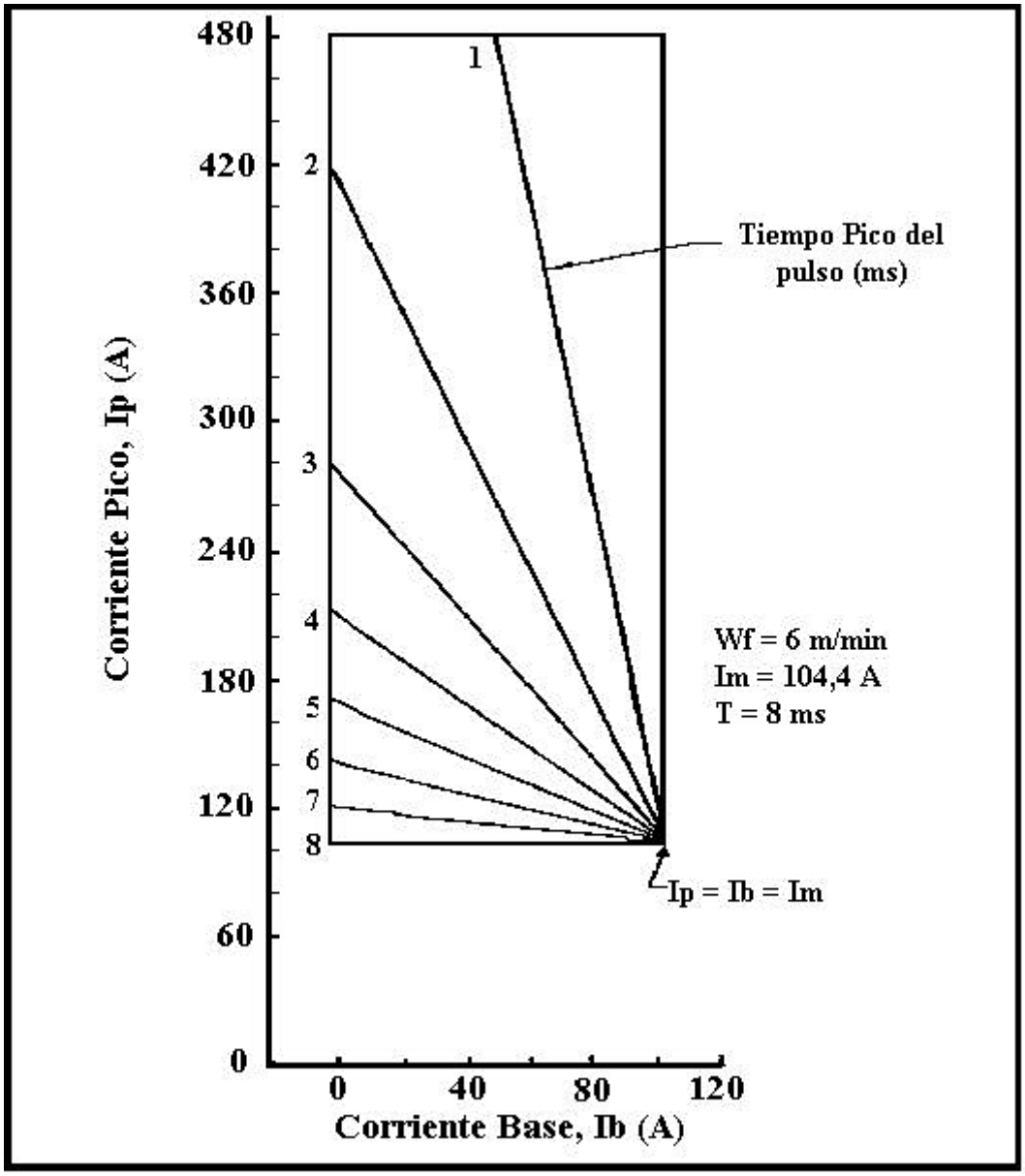


Figura 12. Zona paramétrica predicha según el Criterio de Burnoff.

Fuente: Rajasekaran S. 1998.

2.2.13 Inspección y calidad de la soldadura

Los procedimientos de control de calidad para las uniones de GMAW son muy similares a los que se usan para otros procesos. De acuerdo con las especificaciones aplicables, los procedimientos de inspección deberán servir para determinar si es apropiado el desempeño del soldador o del operador, para calificar un procedimiento de soldadura satisfactorio y para realizar un examen completo del producto final soldado. La inspección de la soldadura del producto terminado se limita a los métodos de examen no destructivos como la inspección visual, con líquido penetrante, con partículas magnéticas, radiografía y ultrasonido. Las pruebas destructivas (de tensión, corte, fatiga, impacto, flexión, fractura, sección transversal o dureza) por lo regular se limitan al desarrollo de ingeniería, la calificación de procedimientos de soldadura y la calificación del rendimiento de los soldadores y operadores.

2.2.14 Especificación del procedimiento de soldadura (EPS)

M. Benzo y A. Capodicasa establecen que una EPS es un procedimiento de soldadura calificado que proporciona las directrices para elaborar una soldadura de producción y/o reparación, según los requerimientos. Una especificación del procedimiento de soldadura, debe considerar todas las variables esenciales, no esenciales y en

algunos casos, las variables esenciales suplementarias, para cada proceso de soldadura. Los cambios pueden ser hechos en variables no esenciales de un EPS, sin la necesidad de un reclasificar, mientras que una modificación de las variables esenciales o esenciales suplementarias requiere reclasificación del EPS. La información dada en la EPS puede estar en cualquier formato, que satisfaga las necesidades de cada fabricante.

Una EPS está disponible en el sitio de fabricación para consultar y revisión por el personal autorizado. Esta debe describir todas las variables esenciales, no esenciales y cuando sea necesario, las variables esenciales suplementarias para cada proceso de soldadura dado en la EPS.

Según el Código ASME sección IX, las variables esenciales son aquellas en las cuales un cambio como se describe en las variables específicas, es considerado que afecta las propiedades mecánicas de la soldadura y debe requerir de la recalificación de la EPS. Algunas de estas son: espesor del metal base, contenido de ferrita y austenita, tratamientos térmicos post-soldadura, etc. Por otra parte, las variables no esenciales son aquellas en las cuales un cambio, como se describe en las variables específicas, pueden ser hechos en la EPS sin necesidad de

recalificación. Ejemplo de estas son: el tipo de ranura, posición de soldadura, montaje del sistema.

2.2.15 Registro de calificación de procedimiento (RCP)

Un RCP es un registro de la calificación de procedimiento de los datos de soldadura usados para la elaboración del cupón de prueba, y de los resultados de los ensayos aplicados a las diferentes probetas. El RCP debe documentar todas las variables esenciales, tales como materiales y dimensiones utilizados, velocidad de alimentación del alambre, velocidad de desplazamiento de la soldadura, posición de la soldadura, proceso de soldadura y variables seleccionadas, diseño de la junta, número de pases, dirección del cordón, y todos aquellos resultados obtenidos de los ensayos realizados.

Los cambios al RCP no son permitidos, ya que el RCP es un registro de la que ocurrió durante una prueba particular de la soldadura. Son permitidas correcciones en la parte editorial. La información requerida para estar en el RCP puede estar en cualquier formato que satisfaga las necesidades de cada fabricante. También debe ser enlistado los tipos números y resultados de los ensayos aplicados a las probetas. Los RCP usados para soportar los EPS deben estar a la disposición, bajo solicitud, para ser revisados por el personal autorizado,

no es necesario que esté disponible para el soldador. En los anexos 1a y 1b se presentan los formatos elaborados por el SENATI – TACNA que sirven para realizar en Registro de Calificación del procedimiento (RCP), este puede ser tan extenso como sea requerido para plasmar en él todos los datos antes mencionados.

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

3.1 Tipo de investigación

Es una investigación semi-experimental que permite la evaluación del efecto de la intensidad de corriente y la velocidad de soldadura, del método GMAW-P (MIG), sobre las propiedades mecánicas del acero austenítico AISI/SAE 304.

3.2 Diseño de la investigación

Para evaluar el efecto de la velocidad de soldadura y la intensidad de corriente, se aplicó el diseño factorial de dos factores a dos niveles y un diseño de optimización de dos factores a tres niveles.

Tabla 9

Matriz de factores y niveles del diseño experimental.

Factor	Unidades	Niveles	
		Mínimo	Máximo
A= Velocidad de avance	mm/s	-1	+1
B= Intensidad de Corriente	A	-1	+1

Fuente: Elaboración propia

El diseño factorial de dos factores codificados de 2 niveles para la realización de las pruebas experimentales se indican en la Tabla 9.

Tabla 10

Matriz de las condiciones de las pruebas experimentales.

Prueba	A	B
I	-1	-1
A	+1	-1
B	-1	+1
Ab	+1	+1

Fuente: Elaboración propia

Para encontrar las condiciones óptimas del proceso de soldadura, basado en la influencia de la velocidad de avance y la intensidad de corriente sobre la resistencia a la tracción, se utilizó un diseño factorial a tres niveles, cuya matriz del diseño se muestra en la Tabla 10**.**

Tabla 11

Matriz de factores y niveles del diseño experimental para la optimización de la soldadura.

Factor	Niveles		
	Mínimo	**Medio**	**Máximo**
A	-1	0	+1
B	-1	0	+1

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 12 se ilustra la planificación del diseño factorial a 3 niveles, el cual indica los valores de las variables en escala natural (A y B) y las variables en escala codificada (Xi), siendo Y la variable dependiente (tracción).

Tabla 12

Matriz de planificación del diseño experimental de optimización

Nº	Variable natural		Variable codificada		Variable respuesta
Prueba	A	B	X1	X2	Y
01	11	120	-1	-1	
02	12	120	0	-1	
03	13	120	+1	-1	
04	11	125	-1	0	
05	12	125	0	0	
06	13	125	+1	0	
07	11	230	-1	+1	
08	12	230	0	+1	
09	13	230	+1	+1	

Fuente: Elaboración propia

3.3 Procedimiento experimental

En la Figura 13 se muestra el diagrama de flujo que describe el procedimiento experimental empleado en esta investigación. En dicho procedimiento experimental se destacan cuatro etapas principales, a saber: evaluación de los materiales (Base y Aporte); preparación de probetas experimentales; desarrollo de las pruebas experimentales de soldadura; y por último se procede con la evaluación de pieza soldada

empleando los ensayos no destructivos (inspección visual, líquidos penetrantes y radiografía), así como, los ensayos destructivos (análisis metalográficos, medición de ferrita, dureza, tracción y doblez) a objeto de evaluar la influencia sobre la calidad y las propiedades de juntas soldadas a tope de acero inoxidable AISI/SAE 304.

Figura 13. Etapas de experimentación aplicada

Fuente: Elaboración propia

3.3.1 Preparación del proceso de soldadura: diseño y preparación de las juntas

Las juntas a tope, cuyas medidas son de 440 mm de largo, 125 mm de ancho y 3 mm de espesor, fueron primero biseladas a un ángulo de 30º respecto a la vertical, como se ilustra en la Figura 14 y luego estas fueron lijadas con lija N° 80 para eliminar las irregularidades

superficiales. Luego dichas juntas fueron punteadas en los extremos a unas pequeñas chapas de acero al carbono para realizar las probetas de prueba, tal como se muestra esquemáticamente en la Figura 14.

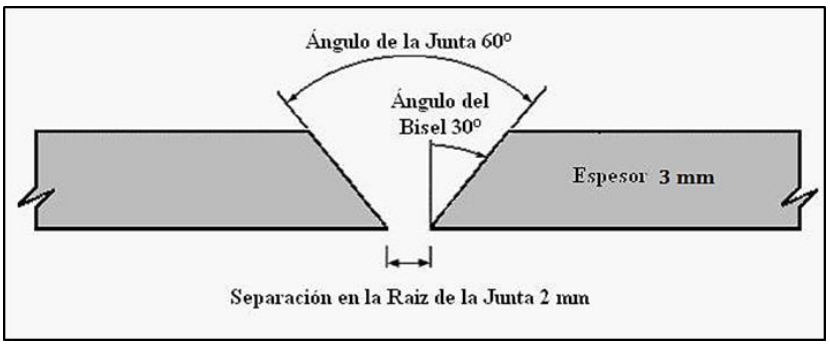


Figura 14. Diseño seleccionado para la fabricación de la junta a tope.

Fuente: AWS, 1990

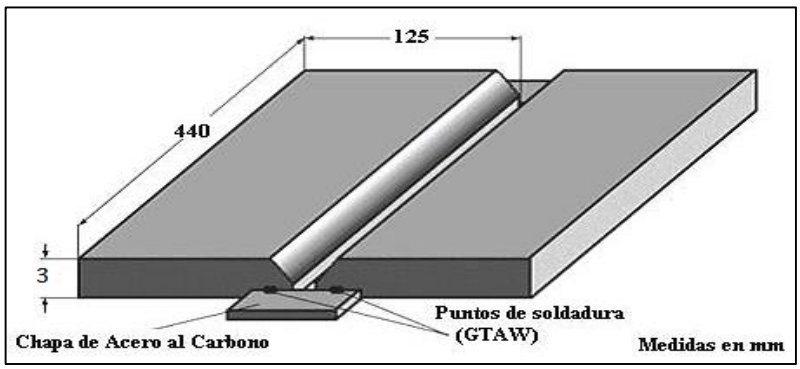


Figura 15. Esquema y medidas de la junta a tope.

Fuente: AWS, 1990

Esto se hizo para minimizar tanto el movimiento de las placas producidas por la dilatación del metal debido al calor aportado durante la

soldadura, asegurando así que la separación de 2 mm entre las placas sea constante. Debido a la longitud de la junta es necesario puntearla en el centro para minimizar la distorsión durante el proceso semi-automático de soldadura.

Figura 16. Vistas de la etapa de preparación de probetas y soldado.

Fuente: Elaboración propia

3.3.2 Preparación de la mesa de trabajo

Para efectos de realizar la soldadura se preparó una mesa de trabajo que funcionó como soporte de las piezas de trabajo, ver Figura 17. Para la deposición de los cordones se utilizó un sistema de traslación automático al cual fue fijada la pistola de soldadura, pudiendo de esta manera predeterminar una velocidad constante a la cual se realizará la soldadura.

Figura 17. Mesa de trabajo utilizada en la elaboración del cupón de prueba.

Fuente: Elaboración propia

3.3.3 Fuente de energía

Se empleó una fuente multiproceso de soldadura multiprocesos Lincoln Electric V300. En la Figura 18 se muestra el equipo completo con

su sistema de alimentación de alambre. Esta fuente de soldadura al arco está diseñada para operar con transferencia metálica pulsada.

Figura 18. Equipo multiprocesos Lincoln Electric V300 y alimentador ln-25.

Fuente: Elaboración propia

3.3.4 Preparación y limpieza del material base

Antes de depositar los cordones de soldadura, las superficies de las láminas de Acero Inoxidable Austenítico fueron limpiadas cuidadosamente mediante cepillo de alambre, lijas y gasolina a fin de eliminar posibles residuos de grasa, aceite o cualquier otro tipo de contaminante presente en la superficie.

3.3.5 Determinación de los parámetros en la soldadura

A fin de determinar los parámetros de soldadura por transferencia metálica pulsada (Ip, Ib, Tp, y Tb) se empleó la metodología desarrollada por Amín. En la Tabla 13 se resume todas las consideraciones asumidas para las pruebas de soldadura necesarias para determinar la zona Paramétrica para la velocidad de alimentación del alambre seleccionada.

Tabla 13

Parámetros fijos de las pruebas de Soldadura GMAW-P realizadas.

Parámetro	Valor
Modo de Transferencia Metálica	Pulsado
Material de Aporte	ER 308L-Si, diámetro 1,2 mm
Gas de Protección	Argón + 2 % O_2
Velocidad de Alimentación (W_F)	5 m/min.
Polaridad	Corriente Directa (CD); Electrodo (+)
Distancia Boquilla/Pieza	15 mm
Posición de Soldadura	Plana (1G); Orientación del electrodo 90°
Flujo de Gas Protector	16 L/min.

Fuente: Kotecki, 1995

3.3.6 Criterio de Burnoff

Para establecer la tasa de quemado y con esto un equilibrio entre la velocidad de alimentación del alambre (W_F) y la tasa de fusión del alambre; se procedió a establecer una relación entre la corriente media (Im) y la velocidad de alimentación del alambre (W_F). Para esto se

realizaron depósitos sobre una chapa plana. Buscando satisfacer el criterio de Burnoff se realizaron cordones, primero empleando GMAW-P y luego GMAW convencional (corriente no pulsada) para distintas velocidades de alimentación del alambre, los parámetros en cada caso se ajustaron adecuadamente hasta obtener un arco estable, condición que se evalúo mediante la constancia en el valor de la tensión y de la corriente media observados en la pantalla de la máquina de soldar. Para cada velocidad de alimentación (W_F) se registró el valor de la corriente media (I_M) y se realizaron gráficas W_F vs. I_M. Al igual que en trabajos anteriores se asumió una gota de diámetro igual al del alambre de aporte, y utilizando la ecuación 2, se calculó el volumen de gota desprendida V_D. Este valor se utilizó junto a la ecuación 8 para calcular el tiempo del ciclo T para una velocidad de alimentación estudiada. Luego utilizando la gráfica Im vs. W_F (de corriente pulsada), con la velocidad de alimentación estudiada se procedió a determinar su correspondiente Im. Por último, utilizando la ecuación 11 se logró la realización de la zona paramétrica para una velocidad de 5 (m/min).

3.3.7 Construcción de la zona paramétrica

Las curvas de potencia de arco constante obtenidas para cada aporte junto con el límite de arco estable se superponen al área que

satisface el criterio de Burnoff para definir la zona paramétrica resultante que presenta el conjunto de parámetros de pulso que satisface el criterio de Burnoff. Puesto que los puntos dentro de esta zona no garantizan la combinación de parámetros de pulso más adecuada para producir arcos estables y buenas características de forma del cordón tales como penetración, aspecto superficial, etc, fue necesario realizar combinaciones adicionales de parámetros de pulso y evaluar su estabilidad. Estos puntos se graficaron sobre las zonas paramétricas correspondientes. Todos los puntos que no cortocircuitaron o se comportaron inestablemente se unieron con una curva para definir un área de comportamiento estable, de dimensiones mucho más pequeñas que la anterior. Dentro de cada una de estas áreas se tomaron tres combinaciones distintas de parámetros de pulso con los cuales se realizaron cupones de prueba.

3.3.8 Evaluación de cordones sobre chapa plana

A fin de seleccionar las mejores condiciones para realizar una soldadura con un modo de transferencia pulsada con una gota por pulso, se pre-seleccionaron de entre las mejores condiciones obtenidas en los ensayos de transferencia metálica, tres condiciones por su comportamiento, el cual fue medido en primera instancia con los

oscilogramas obtenidos en los ensayos. Luego se realiza la deposición sobre una chapa plana, de dichas soldaduras se extrajo una probeta (por condición) las cuales se prepararon metalográficamente. Partiendo de las características superficiales (aspecto del cordón, penetración, dilución, refuerzo de cara y anchura del cordón) y a las características de uniformidad en el desprendimiento de la gota así como la estabilidad del arco, se procedió a seleccionar el conjunto de parámetros adecuado para realizar la soldada pulsada en las junta a tope del acero AISI/SAE 304.

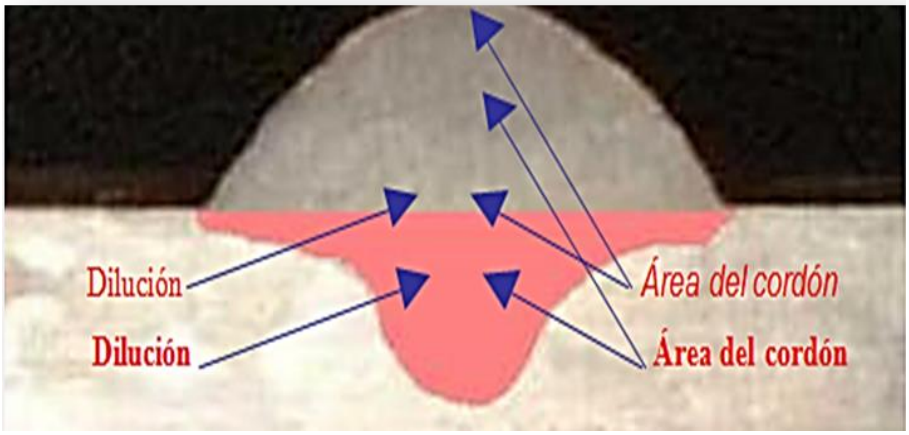


Figura 19. Esquema de las relaciones de área para calcular la dilución del cordón depositado sobre chapa plana.

Fuente: Elaboración propia

3.3.9 Realización de la soldadura en una unión a tope

Una vez determinado el cordón que presentó las mejores condiciones de soldadura, se procedió a la fabricación del cupón de prueba necesario para la calificación del procedimiento de soldadura. Para esto el material base fue preparado como se establece en el punto de diseño y preparación de juntas. La soldadura fue realizada en posición 1G (Plana Horizontal), con una orientación de pistola de 90° respecto al plano de soldadura y la distancia de trabajo en 16 mm, las láminas fueron sujetadas sobre un bloque de aluminio (por medio de sargentos) el cual tenía una ranura que coincidía con la raíz de la soldadura, este bloque inducía un enfriamiento del montaje más rápido.

3.3.10 Calor aportado y potencia del arco eléctrico

La **Energía Bruta Aportada** por el proceso de soldadura (**EBA**) y la **Energía Neta Absorbida** (**ENA**) durante la soldadura por arco eléctrico "GMAW", se calcula aplicando las siguientes ecuaciones.

$$\mathrm{EBA} = \frac{\mathrm{I} \,.\mathrm{V} \,.60}{\mathrm{V_S}} \qquad [12]$$

$$\mathrm{ENA} = \mathrm{Ef} \,.\, \mathrm{EBA} \qquad [13]$$

Donde:

Vs = Velocidad de soldadura (mm/min).

I = Corriente media del proceso (A).

Ef = Eficiencia térmica del proceso (0,70 para GMAW).

V = Voltaje medio del proceso (V).

EBA = Energía bruta aportada (julios/mm).

ENA = Energía neta absorbida (julios/mm).

La Energía Neta Absorbida (ENA) toma en cuenta la corriente y la tensión eficaz o efectiva del arco, la velocidad de soldadura y la eficiencia del proceso; que según la AWS y ASM oscila entre (0,7 y 0,8) para los modos de transferencia metálica cortocircuito y pulsado respectivamente.

3.3.11 Rendimiento del aporte

Para calcular el rendimiento del aporte de soldadura de la variables fijadas, se trabajaron con tres muestras que reproducían a escala menor, las condiciones de diseño de juntas seleccionado. De esta forma se determina qué porcentaje de material de aporte se pierde en polvillo,

salpicadura o se volatiza durante el proceso de soldadura. La ecuación utilizada para determinar la eficiencia es la siguiente.

$$\textbf{Rendimiento (\%)} = (P_{om} - P_{fm}) / (P_{oa} - P_{fa}) \quad [14]$$

Donde:

P_{om} = Peso inicial de la muestra.

P_{fm} = Peso final de la muestra.

P_{oa} = Peso inicial del aporte.

P_{fa} = Peso final del aporte.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y ANÁLISIS DE LA SOLDADURA

4.1 Evaluación química del material base y aporte

Para la caracterización de ambos materiales se consideró su análisis químico, contenido de ferrita, a objeto de verificar si cumple con las especificaciones indicadas por las normas y reportadas por el fabricante.

1) Composición química

La composición química del material base y de aporte se presenta en la Tabla 14.

Tabla 14

Composición química del material base y aporte

Material		Porcentaje en peso (%)			
		C	**Mn**	**Cr**	**Ni**
Base (QW-403)	Acero inoxidable austenítico AISI 304	0,08	2,0	18,0	8,0
Aporte (AWS A59/ASMESFA-5,9: ER 308L, Si) SOLDEXA	Acero inoxidable DIN: 8556 5G X 2CrNi Mol912 MIGFIL 2010 Mo)	0,08	2,0	18,0	8,0
Gas protector	Argón CFH (pie^3/h)				

Fuente: Bohler, 1994

2) Contenido de ferrita en metal base

El contenido de ferrita en el material base se determinó por dos métodos, el método metalográfico el cual reportó un valor, en porcentaje de ferrita, (% Ferrita = 7,75-0,08) para el material base. Por el Método Químico a través del uso de los diagramas de Schaeffler, en el que se obtuvo un valor entre 5-10 % Ferrita para el material base y de 10 % Ferrita para el material de aporte; por otro lado, utilizando el diagrama de DeLong se obtuvo un valor de 7,6 % Ferrita para el material base y superior a 13,6 % Ferrita para el material de aporte. Estos valores corresponden a lo reportado por los fabricantes de Aceros Inoxidables Austeníticos y sus respectivos electrodos. Sin embargo, de esto se observa que el contenido de Ferrita en el material de aporte ER 308L-Si, es mayor en comparación con el calculado para el material base; este incremento (% Ferrita) asegura una mayor resistencia a la fisuración en caliente en el cordón de soldadura de los Aceros Inoxidables Austeníticos.

Tabla 15

Porcentaje de ferrita en material base y aporte de acuerdo al método metalográfico y químico.

Materiales	Método metalográfico	Método químico	
		Diagrama de Schaeffler	Diagrama de DeLong
Base	7,75 ± 0,08	5 – 10	8
Aporte	-	7,6	> 13,6

Fuente: Bohler, 1994

La similitud entre los valores obtenidos por los métodos metalográficos y químicos se debe a que tanto el diagrama de Schaeffler como el diagrama de DeLong, se basaron en métodos metalográficos para su construcción.

4.2 Ensayo de dureza de las probetas soldadas

Se determinó la dureza del material base de acuerdo a la norma ASTM E 384, los resultados se muestran en la Tabla 16**.**

Tabla 16

Resultados de la medición de dureza método Rockwell B (HRB)

Nº Prueba	ID de Muestra	Dureza HRB		
		Zona Fundida	Zona sobre calentamiento	Metal base
01	C1	80,9	80,6	79,3
02	C2	84,1	82,7	62,3
03	C3	83,7	86,0	83,4
04	C4	82,0	84,0	81,0
05	C5	81,0	83,0	82,0
06	C6	81,5	83,0	81,0
07	C7	81,0	83,0	81,0
08	C8	80,5	84,4	82,0

Fuente: Elaboración propia

Los valores reportados de dureza para el metal base es de 79,22 ± 0,13 HRB. Este resultado coincide con lo reportado en la norma ASTM ya que cae dentro del intervalo de dureza de 79 a 94 HRB reportado por las normas y fabricantes. Mientras que para la zona fundida resultó una dureza promedio de 81,84±1,33 HRB.

4.3 Ensayo de doblado de las probetas soldadas

El ensayo de dobles se efectuó bajo el criterio de aceptación o rechazo mediante una inspección visual. Para la realización de este tipo de ensayo se elaboraron 08 probetas según la norma QW-462,3(a) del código ASME, sección IX; esta regla contempla como medida las señaladas en la Figura 20.

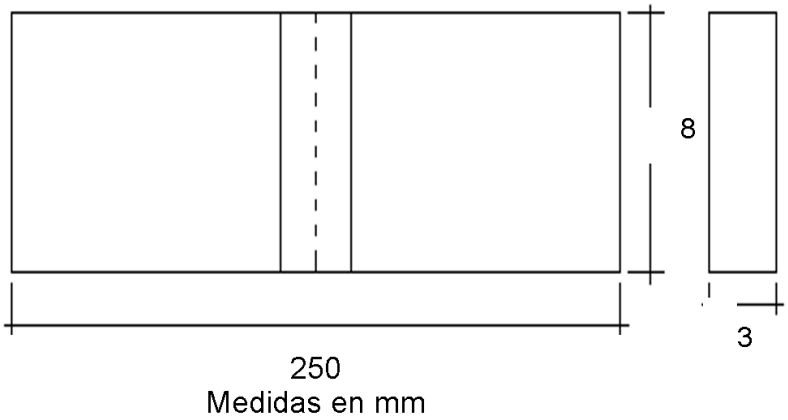


Figura 20. Diseño de probeta para ensayo de doblado (cara y/o raíz) de la junta soldada.

Fuente: Norma ASME QW-462,3(a), sección IX.

Tabla 17

Ensayo de doblado guiado

Nº Prueba	ID de muestra	Doblado		Evaluación visual	
				Cara	Raíz
01	C1	Cara	-	Sin defectos	-
02	C2	Cara	-	Sin defectos	-
03	C3	Cara	-	Sin defectos	-
04	C4	Cara	-	Sin defectos	-
05	C5	-	Raíz	-	Sin defectos
06	C6	-	Raíz	-	Sin defectos
07	C7	-	Raíz	-	Sin defectos
08	C8	-	Raíz	-	Sin defectos

Fuente*:* Elaboración propia en base a reporte de resultados de SENATI.

De las ocho probetas elaboradas, cuatro fueron destinados para doblez transversal de cara, mientras que las otras cuatro para la

realización de doblez transversal de raíz. El equipo usado fue una máquina universal de ensayos estáticos de 20 toneladas marca LOSENHAUSEN, modelo UHP 20, ubicado en los talleres de SENATI-Tacna (Figura 21).

Figura 21. Ensayo de doblado las piezas soldadas.

Fuente: Elaboración propia

4.4 Análisis metalográfica

La importancia de conocer el estado inicial del material base mediante una micrografía radica en la necesidad de observar el cambio de tamaño de los granos durante la deposición del material de aporte en la fabricación de los cordones de soldadura, con respecto a la condición inicial del mismo, ya que la deposición de cordones de soldadura someten al material base a diferentes condiciones de calentamiento y enfriamiento que producen variaciones microestructurales dentro del mismo en función del calor aportado. La caracterización metalográfica se realizó en ambos sentidos, longitudinal y transversal al sentido de laminación.

Figura 22. Fotos tomadas en el laboratorio de microscopía de la UNJBG-ESME.

Fuente: Elaboración propia

Figura 23. Fotomacrografía de la probeta C1 (doblez de cara).

Fuente: Laboratorio de microscopía UNJBG-ESME.

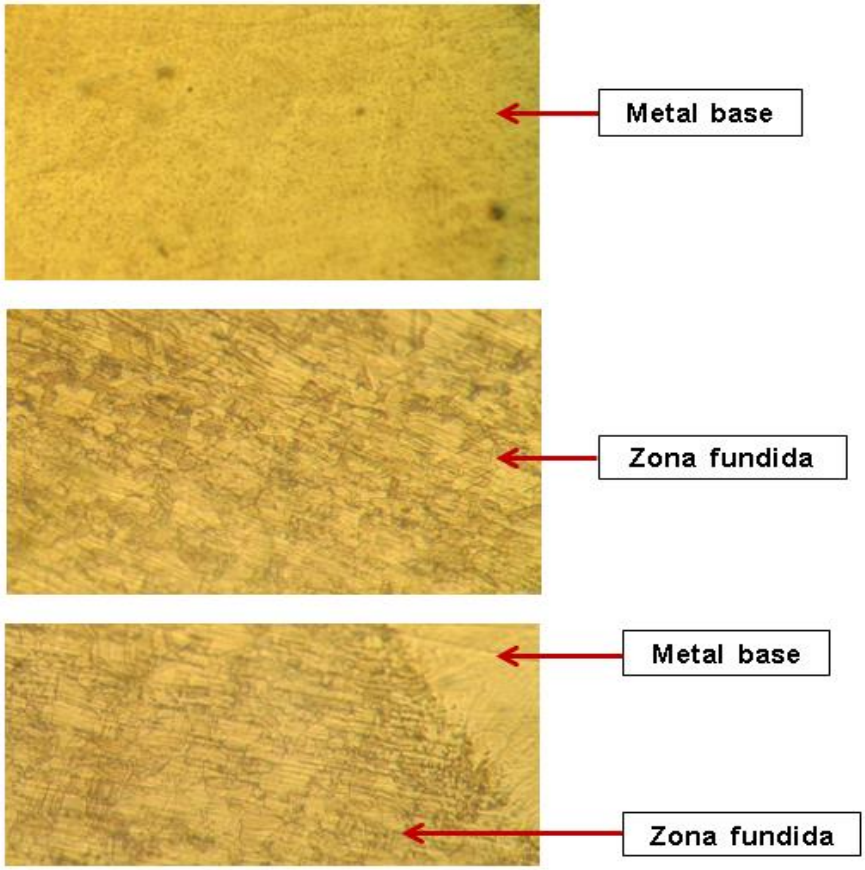


Figura 24. Fotomicrografia de la Probeta C1 (doblez de cara).

Fuente: Elaboración propia

Una inspección visual de las probetas dobladas nos da la evidencia que no se presenta fisuras macroscópicas, a causa del ensayo, en cada una de las probetas ensayadas. El análisis metalográfico, tanto macroscópico como microscópico, permitió verificar la no presencia de microfisuras, en el cordón de soldadura ni en el material base que circunda el cordón de soldadura.

4.5 Ensayo de tracción de las probetas soldadas

Para evaluar los factores:

- Velocidad de soldadura (mm/s)
- Amperaje (A)

Como influye en la resistencia a la tracción del cordón soldado.

Se ha implementado el siguiente diseño factorial, teniendo en cuenta los siguientes niveles mínimo y máximo.

Tabla 18

Matriz de factores y niveles del diseño factorial.

Factor	Niveles	
	Mínimo	**Máximo**
A= Velocidad de soldadura (mm/s)	-1	+1
B= Amperaje (A)	-1	+1

Fuente: Elaboración propia

Se aplicó el siguiente diseño factorial:

Tabla 19

Matriz del diseño factorial.

Prueba	**Variable codificada**		**Variable real**	
	A	B	**Velocidad mm/s**	**Amperaje A**
I	-1	-1	11	120
A	+1	-1	13	120
B	-1	+1	11	130
Ab	+1	+1	13	130

Fuente: Elaboración propia

Se obtuvo las siguientes resistencias a la tracción de las probetas soldadas, obtenidas con el diseño factorial:

Tabla 20

Resultados de la resistencia a la tracción de la soldadura.

Prueba	velocidad	Amperaje	Resistencia a la Tracción
	mm/s	A	kg/cm^2
I	11	120	5323
A	13	120	6108
B	11	130	5466
Ab	13	130	5527

Fuente: Elaboración propia

Para analizar cómo influye la velocidad de soladura y el amperaje empleado en la calidad de la soldadura (Resistencia a la tracción); utilizaremos la siguiente técnica para determinar el efecto:

Efecto del factor "a" = [Σ(valores con signo "+") - Σ(valores con signo "-")]/2

Efecto de la velocidad = (6108 + 5527 – 5323 – 5466)/2 = **423**

Efecto del amperaje = (5466 + 5527 – 5323 – 6108)/2 = **-219**

Efecto de velocidad y amperaje = (5323 + 5527 – 6108 – 5466)/2 = **-362**

ANÁLISIS:

- El incremento del factor velocidad tiene un efecto positivo en la resistencia de la tracción.
- El incremento del amperaje tiene un efecto negativo en la resistencia a la tracción.
- El incremento de la velocidad y del amperaje tiene un efecto negativo en la resistencia a la tracción.

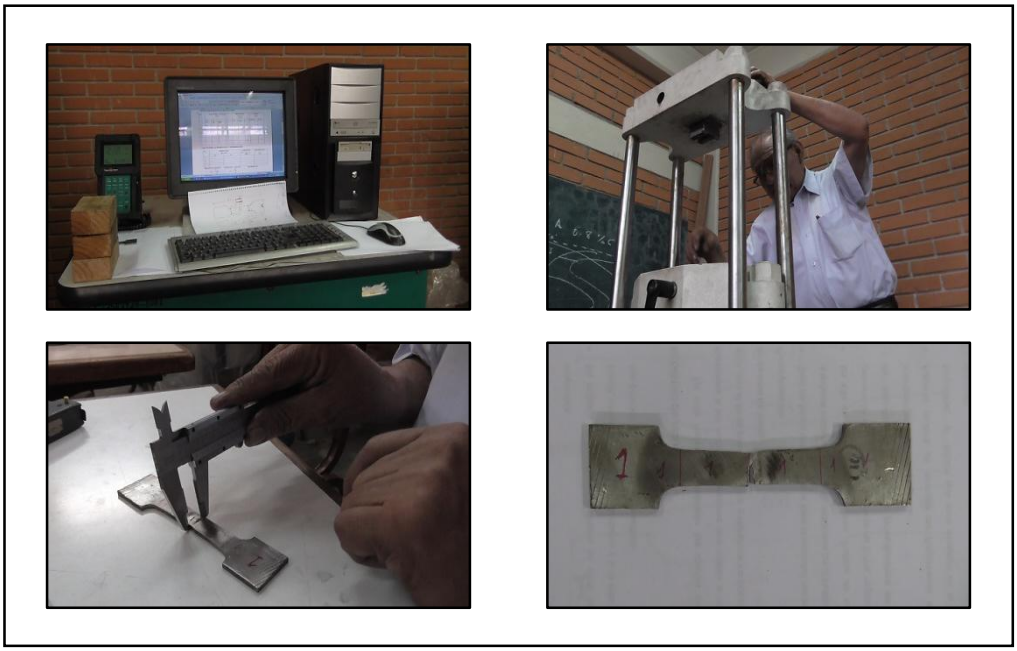


Figura 25. Equipo y probetas de tracción.

Fuente: Elaboración propia

4.6 Optimización de soldadura

Para poder optimizar la velocidad de soldadura y el amperaje, el diseño factorial de 2 niveles (2^2 = 4 pruebas) se ha complementado a un diseño factorial de 3 niveles (3^2 = 9 pruebas). Se tiene a continuación los niveles de cada factor que se está evaluando:

Tabla 21

Matriz de factores y niveles del diseño.

Factor	Niveles		
	Mínimo	**Medio**	**Máximo**
A= Velocidad de soldadura (mm/s)	11	12	13
B= Amperaje (A)	120	125	130

Fuente: Elaborado por el autor.

Con estos valores se tiene el siguiente arreglo espacial:

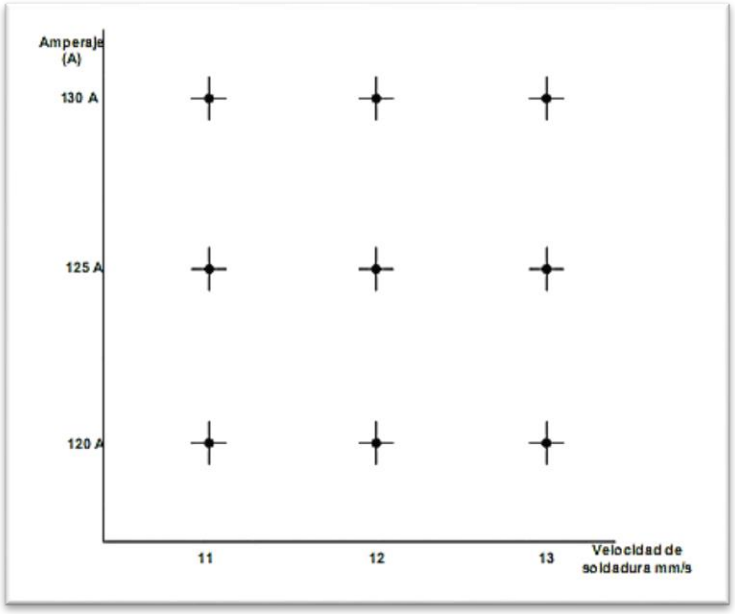


Figura 26. Arreglo espacial del diseño experimental.

Fuente: Elaboración propia

Se aplicó el siguiente diseño factorial de dos factores de 3 niveles y se obtuvo las siguientes resistencias a la tracción.

Tabla 22

Resultados de la resistencia a la tracción de acuerdo al diseño experimental.

Prueba	Velocidad mm/s	Amperaje A	Resistencia a la Tracción kg/cm^2
1	11	120	5323
2	11	125	5170
3	11	130	5466
4	12	120	5904
5	12	125	5486
6	12	130	5425
7	13	120	6108
8	13	125	6088
9	13	130	5527

Fuente: Elaboración propia

Elaborando la representación de superficie respuesta de la resistencia a la tracción de las probetas soldadas, utilizando el diseño factorial de 3 niveles, se tiene:

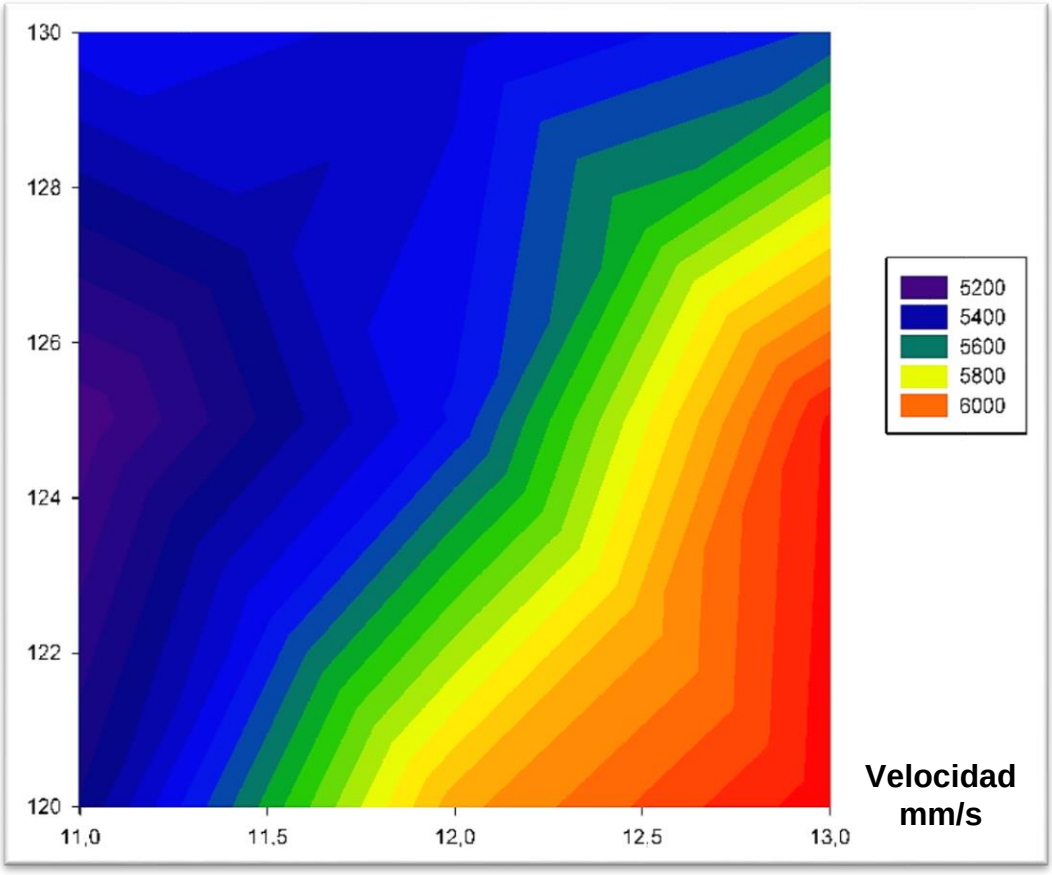


Figura 27. Superficie respuesta, evaluación de los factores intensidad de corriente y velocidad de soldado.

Fuente: Elaboración propia

ANALISIS:

En la Figura 24 se aprecia, que se logra una mayor resistencia a la tracción en la soldadura una velocidad 12,5 a 13 mm/s, y un amperaje entre 120 y 124 A.

ANÁLISIS DE REGRESIÓN MULTIPLE:

Se ha estimado el siguiente modelo genérico que representa la "Resistencia a la tracción (RT)" de las piezas soldadas:

$$\mathbf{RT = \beta_0 + \beta_1.v + \beta_2.A + \beta_{11}.v^2 + \beta_{22}.A^2 + \beta_{12}.v.A} \qquad \mathbf{[12]}$$

Donde:

RT = Resistencia a la tracción (kg/cm^2)

$\boldsymbol{\beta_i}$ = Coeficientes

v = Velocidad de soldadura (mm/s)

A = Amperaje empleado (A)

Para hacer el análisis de regresión múltiple se empleó Excel, obteniendo el siguiente resultado (modelo específico):

$$\mathbf{RT=-19579,44 + 4611.v - 37,833.A + 8,667.v^2 + 1,767A^2 - 36,2.v.A} \qquad \mathbf{[13]}$$

Tabla 23

Resultados del análisis de la regresión.

Estadísticas de la regresión	
Coeficiente de correlación múltiple	0,93096
Coeficiente de determinación R^2	0,86655
R^2 ajustado	0,64414
Error típico	201,8694
Observaciones	9

Fuente: Elaboración propia

Por ser el coeficiente de correlación múltiple 0,93096 se acepta estadísticamente los resultados de la experimentación. La variabilidad de la resistencia a la tracción es de 201,8694 kg/cm^2.

Tabla 24

Análisis de varianza

	G.L.	***SC***	***SCM***	***F calc.***	***F Tablas***
Regresión	5	793 859,778	158 771,956	3,8961	0,1461
Residuos	3	122 253,778	40 751,259		
Total	8	916 113,556			

Fuente: Elaborado por el autor.

En el análisis de varianza de la prueba experimental se tiene que F_c calculado es mayor que F_t de tablas para una probabilidad de 95 %, por lo que se ratifica la aceptación estadística del modelo propuesto.

4.7 Evaluación de cordones sobre chapa plana

De **11** ensayos sólo 3 preseleccionadas por ofrecer los mejores comportamientos. Para la selección de una de estas condiciones se realizaron deposiciones sobre chapa plana y así poder estudiar su geometría a fin de tener otro criterio de selección. En la inspección visual a los cordones depositados se detalla la escasa presencia de salpicadura, también es bueno mencionar que las tres condiciones seleccionadas mostraron una forma de cráter elíptica, lo cual, según la teoría, disminuye la posibilidad de fisuración en caliente.

Tabla 25

*Resumen de la **evaluación** geométrica de los **cordones** depositados sobre chapa plana.*

Ensayo	Ancho (mm)	Refuerzo de cara (mm)	Relación Ancho/Alto	Dilución (%)
E2.2-2	7,2	2,3	1,5	19
E2.4-1	8,4	2,3	1,7	23
E2.7-1	7,9	2,5	1,6	17

Fuente: Recopilación propia

De las tres condiciones seleccionadas, es la condición E2.4-1 la que presentó un porcentaje de dilución óptimo, unido a un perfil de penetración adecuado, lo que lleva a seleccionar dicha condición como la definitiva para la realización del experimento.

CONCLUSIONES

Se puede deducir que los valores de velocidad de soldadura (11-13 mm/s) y la cantidad de corriente (120-130 A) suministrado durante el proceso de soldadura se manifiesta en una mejora en la resistencia al doblado y moderado incremento de la dureza del cordón.

Existe una influencia negativa de la intensidad de corriente y la velocidad de soldadura en la resistencia a la tracción del acero austenítico AISI/SAE 304 soldado por GMAW-P (MIG).

Existe una influencia negativa de la intensidad de corriente en la resistencia a la tracción del acero austenítico AISI/SAE 304 soldado por GMAW-P (MIG).

Existe un efecto positivo de la velocidad de soldadura en la resistencia a la tracción del acero austenítico AISI/SAE 304 soldado por GMAW-P (MIG).

Para maximizar la resistencia a la tracción de la pieza soldada se debe trabajar estos factores dentro del rango: velocidad 12,5 a 13 mm/s, y un amperaje entre 120 y 124 A.

RECOMENDACIONES

La Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica debe ser un centro de homologación en soldadura de aceros inoxidables.

Los futuros ingenieros pueden evaluar otros factores que afectan la calidad de la piezas soldadas del acero inoxidable, AISI/SAE 304.

Los egresados de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica deben evaluar la resistencia a la corrosión de las piezas soldadas del acero inoxidable AISI/SAE 304.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Amin M. (1983). *Pulsed Current Parameters for Arc Stability and Controlled Metal Transfer in Arc Welding,* Metal Construction 15 (5), pp 272-278.

ASM Metals Handbook, Vol 1. (1998). *Property and Selection Iron.* 10th Edition.

AWS. ANSI/AWS A4.2. (1991). *Standard Procedures for Calibrating Magnetic Instruments to Measure the Delta Ferrite Content of Austenitic and Duplex Austenitic Ferritic Stainless Steel Weld Metal.* Miami.

Bohler Welding Technology. (1994). *Aspectos metalúrgico y tecnológicos en el soldeo de aceros inoxidables.* Soldadura y tecnologías de unión. Nº27, 1994, pp 20-48.

Brito Lenin. (2004). *Caracterización de defectos inducidos en patrones de Acero AISI 304 a través de Radiografía, TOFD y Ultrasonido.* Tesis para optar el grado de Ingeniero Metalurgista. Universidad Simón Bolívar – Venezuela.

Camacho Juan y otros**.** (2011). *Estudio comparativo del proceso de soldadura MIG y TIG en un acero inoxidable 416 utilizado en la industria alimenticia y de generación de calor.* Tesis para obtener el título de ingeniero mecánico. Instituto Politécnico Nacional – México.

DeLong W.T. (1974). *Ferrite in Austenitic Stainless Steel Weld Metal,* Welding Journal. Vol. 53 (No. 7), pp 273s-286s.

Díaz Ángeles y otros. (2006). *Propagación de Grietas en Acero Inoxidable AISI 304L en Condiciones de Química de Hidrógeno (HWC).* XXIV Reunión Annual de la SMSR**.** Del 3 al 8 de septiembr 2006 . Acapulco – Mexico.

Gerken J.M. and Kotecki D.J. (1990). *Stainless Steels*, Publication No. M250, The Lincoln Electric Company.

Gómez R. (1995). *Algunas Referencias en la Soldadura por Arco Pulsado,* Soldadura y Tecnologías de Unión, No.36, 1995, pp 28-33.

Gretoft B. y Karlsson L. (1990). (Laboratorio Metalográfico del Grupo ESAB), *Fisuración en Caliente durante la Soldadura de Aceros Inoxidables Austeníticos. Soldadura y Tecnologías de Unión,* No. 6, 1990, pp 68-73.

Herbert Uhlig. (1970). *Corrosión y Control de Corrosión.* URMO, Bilbao. pp 290-320.

Hernández Riesco G. (1998). *Manual del Soldador.* 4ta ed. Cesol. Madrid.

INEN. (1975). Norma técnica ecuatoriana NTE INEN 110:1975. *Ensayo de doblado para el acero.* Instituto Ecuatoriano de Normalización. Pg. 1-11. Quito. Ecuador. Disponible en: https://law.resource.org/pub/ec/ibr/ec.nte.0110.1975.pdf

J. A. Brooks; J.C.Lippold. (1995). *Selection of Wrought Austenitic stainless Steels.* ASM Handbook. Vol 6, 9th edition. pp. 456 - 469.

Jamaes A. Pender**.** (1989). *Soldadura.* McGraw-Hill, 3ra edicion, pp 175-190.

Kotecki D.J. and Siewert T.A. (WRC-1992). *Constitution Diagram for Stainless Steel Weld Metals: a Modification of the WRC-1988 Diagram,* Welding Journal. vol 71 (No. 5), p 171s-178s.

Kotecki D.J. (1995). *Welding of Stainless Steels***.** ASM Handbook. Vol 6, 9th edition. pp. 677 - 707.

Lefevbre J. (1993). *Guidance on Specifications of Ferrite in Stainless Steel Welds Metal*. Welding in The World, vol 31(6) 1993, pp390-

407.

M. Benzo; A. Capodicasa. (1995). *Calificación de Procedimientos de Soldadura Tubo / Tubo Usados en Calderas*. Universidad Central de Venezuela, pp 75–77.

Medina L. y otros. (2014). *Influencia de la velocidad de pasada e intensidad de corriente en la soldadura orbital GTAW del acero inoxidable AISI 304.* Revista Ingeniería Universidad Carabobo, Vol. 21 N° 2. Agosto 2014 pp. 43-51. Venezuela.

Rabensteiner G**.** (1995). *Influencia del contenido de Cr y Ni en los Aceros Inoxidables Austeníticos.* Periodical "Technia", No. 15/16-88.

Rajasekaran, S., Kulkarni, S. D., Mallya U. D., and Chaturvedi R.C. (1998) *Droplet detachment and plate fusion characteristics in pulsed current gas metal arc welding process.* Welding Journal, vol 77 (No. 6), pp 254s-269s.

Reyna, M. (1949). *Soldadura de los Aceros, Aplicaciones.* 2ed. Madrid X. pp 343-373.

Schaeffler A.L. (1949). *Constitution Diagram for Stainless Steel Weld*

Metal, Met. Prog, vol 56 (No. 11), pp 680-680B.

Vergara C., Fernando y Martínez C., Norma J. (2008). *Ingeniería mecánica. Apuntes de ciencia de materiales II*. Instituto Politécnico Nacional. Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica. Unidad Profesional Azcapotzalco. México. Pg. 10-35.

Zbigniew D. Jastrzebski. (1979). *Naturaleza y Propiedades de los Materiales para Ingeniería.* Interamericana, 2da Edición, México. pp 323-327.

ANEXO

SERVICIO NACIONAL DE ADIESTRAMENTO EN EL TRABAJO INDUSTRIAL REGISTRO DE CALIFICACIÓN DE PROCEDIMIENTO **RCP**

RCP Nº:
EPS Nº:
FECHA:
CÓDIGO REF:

NOMBRE SOLDADOR: | C.I.: | IDENTIFICACIÓN: | HOJA: **1/2**

PROCESO

OFW ( ) GMAW (X) SAW ( )
SMAW ( ) GTAW ( ) Otro ( )
Procesos Especiales:

TIPO

( ) Manual (X) Semiautomático ( ) Automático

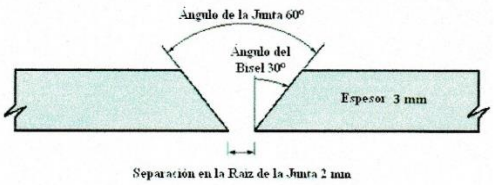
DISEÑO DE JUNTA

Tipo de Junta: Ranura — Ranura (X) Filete ( ) Otra:

Respaldo: Si (X) No ( )

Material del Respaldo: Aluminio

Espesor de Recargue: N.A.



METAL BASE

Especificación, Grado o Tipo:
Nº P: 8 Nº Grupo: 1
Plancha (X) Espesor: 3 mm

a Especificación, Grado o Tipo:
a Nº P: 8 Nº Grupo: 1
Tubería ( ) Espesor: Diámetro:

METAL DE APORTE

	Aporte (A)	Aporte (B)	Aporte (C)	Aporte (D)
Especificación Fabricante	308L-Si			
AWS (Clase)	308L-Si			
Nº F	> 13,6			
Diámetro	1,2 mm			
Espesor Material Depositado	12,35 mm			

POSICION Y ALINEACIÓN DE LA JUNTA

Posición: 1G
Progresión: Plana
Nº de puntos: 1
Distancia entre puntos:

TÉCNICA

Cordón: Recto (X) Ondulado ( )
Oscilación: N.A.
Electrodo: Múltiple ( ) Sencillo (X)
Pases por lado: Múltiples ( ) Sencillo (x)

PRECALENTAMIENTO

Temperatura mín. precalentamiento:
Temperatura entre pases
Tiempo de permanencia:
Otros:

POST-CALENTAMIENTO

Intervalo de temperatura:
Tiempo de permanencia:
Enfriamiento:
Otros:

GAS

	Tipo	Composición	Flujo (Lts/min)
Protección	Inerte	98% Ar + 2% O_2	16
Arrastre			
Respaldo	-	-	-
Otros			

LIMPIEZA

Inicial: papel abrasivo, cepillo de alambre y gasolina

Entre pases: N.A.

PARAMETROS ELÉCTRICOS (GMAW-P)

Pase	Proceso	MAT. DE APORTE		CORRIENTE (A)							Amperaje (A)	Velocidad de Avance (cm/min)	Velocidad de Alimentación (mm/seg)
		Clase AWS	[mm]	Tipo	Polaridad	Ip	Ib	Tp	Tb	Im			
1	G M A W	ER308L-Si	1.2	pulsada	Inversa	398	63	2,4	7,2	147	120-130	Estándar	11-13

OBSERVACIONES:
Penetración Completa