CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

SOLDABILIDAD DE ACEROS ASTM A572 G-50 POR EL PROCESO GMAW-LSC, UTILIZANDO 100% CO_2 COMO GAS DE PROTECCION EN LA APLICACIÓN DE UNIÓNES DE SOLDADURA DE FILETE EN COMPONENTES PARA LA INDUSTRIA PESADA

POR

MBA. JUAN CASTAÑEDA RUIZ

MONOGRAFIA

EN OPCIÓN COMO ESPECIALISTA EN TECNOLOGÍA DE LA SOLDADURA INDUSTRIAL.

SALTILLO, COAHUILA, MÉXICO. **MARZO DE 2016**

CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

SOLDABILIDAD DE ACEROS ASTM A572 G-50 POR EL PROCESO GMAW-LSC, UTILIZANDO 100% CO_2 COMO GAS DE PROTECCION EN LA APLICACIÓN DE UNIÓNES DE SOLDADURA DE FILETE EN COMPONENTES PARA LA INDUSTRIA PESADA

POR

MBA. JUAN CASTAÑEDA RUIZ

MONOGRAFIA

EN OPCIÓN COMO ESPECIALISTA EN TECNOLOGÍA DE LA SOLDADURA INDUSTRIAL.

SALTILLO, COAHUILA, MÉXICO. **MARZO DE 2016**

Corporación Mexicana de Investigación en Materiales
Gerencia de Desarrollo Humano
División de Estudios de Posgrado

Los miembros del Comité Tutorial recomendamos que la Monografía **SOLDABILIDAD DE ACEROS ASTM A572 G-50 POR EL PROCESO GMAW-LSC, UTILIZANDO 100% CO_2 COMO GAS DE PROTECCION EN LA APLICACIÓN DE UNIÓNES DE SOLDADURA DE FILETE EN COMPONENTES PARA LA INDUSTRIA PESADA**, realizada por el alumno (a) **JUAN CASTAÑEDA RUIZ**, con número de matrícula 14ES-181 sea aceptada para su defensa como ESPECIALIDAD en Tecnología de la Soldadura Industrial.

El Comité Tutorial

Dr. Felipe de Jesús García Vázquez
Tutor Académico

Dr. Víctor Hugo López Cortez
Tutor de Planta

Dra. Rocio Saldaña Garcés
Asesor

Vo.Bo
Dr. Felipe Arturo Reyes Valdés
Coordinador de Posgrado

Corporación Mexicana de Investigación en Materiales

Gerencia de Desarrollo Humano

División de Estudios de Posgrado

Los abajo firmantes, miembros del Jurado del Examen de especialización del alumno **JUAN CASTAÑEDA RUIZ,** una vez leída y revisada la Monografía titulada **SOLDABILIDAD DE ACEROS ASTM A572 G-50 POR EL PROCESO GMAW-LSC, UTILIZANDO 100% CO_2 COMO GAS DE PROTECCION EN LA APLICACIÓN UNIONES DE SOLDADURA DE FILETE EN COMPONENTES PARA LA INDUSTRIA PESADA,** aceptamos que la referida monografía revisada y corregida, sea presentada por el alumno para aspirar al grado de Especialista en Tecnología de la Soldadura Industrial durante la defensa de la monografía correspondiente.

Y para que así conste firmamos la presente a los [18] del [Enero] del [2016].

[Nombre del Presidente]
Presidente

[Nombre del Secretario]
Secretario

[Nombre del Vocal]
Vocal

AGRADECIMIENTOS

Mi agradecimiento a la empresa Caterpillar México SA de CV. Por darme la oportunidad de seguir aprendiendo en el plano personal y profesional, la información y el conocimiento es la base del éxito para afrontar los retos que día a día se nos presentan. Esta especialidad en Tecnología de la soldadura, me da la oportunidad de continuar vigente y preparado para las oportunidades venideras.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo principalmente a mi familia. Por estar siempre a mi lado, formando parte de mis sueños…y éste lo cumplimos juntos!

Para **mi esposa Laura.**

Quién va conmigo en el mundo de mis sueños. Mi fortaleza, quien me da el aliento y el amor que me motiva día a día para ser mejor.

A mis hijos:

Para **Jonathan David**, quien día a día busca una oportunidad en esta vida. Orgullo que me motiva a ser mejor padre a través de su ejemplo.

Para **Laura Itzel**, mi ternura, quien mezcla su temple con una sonrisa sin alejarse de sus sueños.

Para **Santiago**, que a través de sus juegos, sueños y asombros me hace recordar mi infancia, tan lejana pero tan cerca de mi mente. Motor que genera luz en nuestras vidas, esperanza que nos une y nos mantiene en sueños.

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS v

Mi agradecimiento a la empresa Caterpillar México SA de CV. Por darme la oportunidad de seguir aprendiendo en el plano personal y profesional, la información y el conocimiento es la base del éxito para afrontar los retos que día a día se nos presentan. Esta especialidad en Tecnología de la soldadura, me da la oportunidad de continuar vigente y preparado para las oportunidades venideras. . v

DEDICATORIA vi

Dedico este trabajo principalmente a mi familia. Por estar siempre a mi lado, formando parte de mis sueños…y éste lo cumplimos juntos! vi

ÍNDICE vii

SÍNTESIS 1

CAPÍTULO 1 3

INTRODUCCIÓN 3

1.1 Antecedentes 3

1.2 Objetivos 5

1.2.1 Objetivo general 5

1.2.2 Objetivos específicos 5

1.3 Justificación 5

1.4 Planteamiento del problema 7

1.5 Aportación industrial 7
1.6 Alcance y delimitaciones 8
CAPÍTULO 2 9
ESTADO DEL ARTE 9
2.1 Soldadura de arco metálico con gas de protección – GMAW 9
2.1.1 Generalidades 9
2.1.2 Proceso GMAW 10
2.1.3 Gases de protección 12
2.1.4 Equipo de soldadura 24
2.1.5 Proceso de soldadura de arco metálico con control de baja salpicadura GMAW-LSC 27
2.1.7 Parámetros. 32
2.1.8 Fundamentos del proceso GMAW LSC 34
2.2 Generalidades de los aceros de bajo, medio y alto carbono 37
2.2.1 Aceros al carbono 37
2.3 Propiedades de los aceros HSLA 40
2.4 Defectos asociados con soldadura de arco 43
2.4.1 Plan de inspección 43
2.4.2 Proceso de inspección 44
2.4.2.1 Inspección antes de la soldadura 45
2.4.2.2 Inspección durante la soldadura 46
2.4.2.3 Inspección posterior a la soldadura 46
2.5 Tipos de uniones 47
2.5.1 Diseño de uniones de soldadura 47
CAPÍTULO 3 49

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LA BIBLIOGRAFÍA 49

CAPÍTULO 4 52

CASO DE ESTUDIO 52

4.1 Metodología 52

4.2 Material: Acero de alta resistencia y baja aleación (HSLA)..... 53

4.3 Material de aporte: ER70S-3..... 55

4.4 Proceso de soldadura y preparación de la unión: GMAW 55

4.5 Calor de entrada y su efecto en la microestructura..... 56

4.6 Proceso de caracterización: Zona afectada por calor, Soldadura y Metal base 58

4.7 Resultados de la caracterización, junta de filete traslapada 58

4.7.1 Material base 61

4.7.2 Zona afectada por el calor 61

4.7.3 Zona de soldadura..... 62

4.7.4 Efecto de la actividad de cobertura del gas oxígeno sobre la microestructura del metal de soldadura del proceso de arco metálico, en la aplicación de aceros microaleados HSLA..... 63

4.8 Resultados. Pruebas de tensión de esfuerzo cortante..... 63

4.8.1 Pruebas mecánicas. 64

4.8.2 Medición de características de la unión de soldadura. 67

4.8.3 Prueba de dureza. 69

Capítulo 5: CONCLUSIONES 71

Anexos 74

Bibliografía 75

SÍNTESIS

En la industria de la minería, relacionada con el equipo de extracción, es usual que se utilicen aceros de alta resistencia y baja aleación (HSLA, por sus siglas en inglés) por sus excelentes propiedades al desgaste, resistencia al impacto y sobre todo por su excelente propiedad de soldabilidad. La calidad no sólo es evaluada por sus características de resistencia, sino también las características de calidad externa que tienen que ver con la forma y configuración del cordón de soldadura de acuerdo al tipo de unión que se esté soldando.

Dentro del proceso de aplicación de soldadura por arco metálico (GMAW, por sus siglas en inglés) para conformar estos productos, un factor (consumible) preponderante que influye en la calidad de la unión de soldadura es el gas de protección. Esta protección gaseosa puede establecerse utilizando normalmente gases inertes (argón, helio) o mezclas de ellos ya sea con porcentajes bajos de oxígeno (3%) o dióxido de carbono (10%) para lograr los resultados necesarios.

Debido a la recesión de los últimos años y la necesidad de estar vigentes en el mercado, la industria está demandando la optimización de los recursos, llámese equipos de soldar, tipos de acero, tipos de juntas y sobre todo consumibles (gases, boquillas, puntas de contacto y tipos de soldadura). Este estudio precisamente está relacionado con la optimización y desarrollo de los gases de protección, en especial la utilización del dióxido de carbono (CO_2), el cual es utilizado dentro de las mezclas con un bajo porcentaje en la aplicación de

hasta un 10%. El objetivo principal es utilizar este gas de protección en un 100%, en los aceros HSLA en el rango de espesor de 5 mm a 6 mm.

Con los métodos de transferencia y tecnología tradicionales es difícil aplicar estos cambios, debido a que el gas CO_2 es un gas reactivo y tiene una inestabilidad de arco suficiente para crear un proceso de perdida de metal de soldadura por la excesiva generación de salpicaduras, excesivo tiempo de limpieza y una calidad en cuanto a apariencia y propiedades mecánicas que no logran sustituir al proceso de protección gaseosa utilizando gases inertes, más allá de que estos son 4 ó 5 veces más caros.

El desarrollo del estudio está basado en la utilización de nueva tecnología en el mercado con una variante en el modo de transferencia mediante el control de onda o ciclos rectificados. Este proceso es llamado control de baja salpicadura GMAW-LSC (LSC, por sus siglas en ingles) que mejoran precisamente la calidad superficial y propiedades mecánicas de la junta.

El propósito final de este estudio es el determinar una nueva alternativa a los procesos productivos de soldadura, un proceso de menor costo, de igual o mayor calidad y productividad que les permita seguir siendo competitivos en cuanto a precio del producto.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

En el proceso de soldadura por arco y gas de protección (GMAW) intervienen un número considerable de variables que impactan en la soldabilidad y calidad de la soldadura aplicada. Estas variables pueden ser: tipo de junta, posición de soldadura, parámetros de soldadura, espesor de los materiales a ser unidos, técnicas de aplicación de soldadura y gases de protección, entre otros. Los gases tienen un papel preponderante en la calidad y características de los depósitos de soldadura, así como una parte importante en el costo del proceso.

En la actualidad, dentro de un mercado competitivo no solo demanda el lograr la mejor calidad a un bajo costo, sino la mejora constante de la utilización de los recursos perecederos con ayuda de nuevas tecnologías, estas mejoras y ahorros son consideradas ventajas competitivas importantes para quien las utiliza y más aún para quién las desarrolla y las comercializa.

El proceso de soldadura por arco y gas de protección (GMAW) es un proceso que funde y une metales por calentamiento de ellos con un arco estabilizado entre un alimentador continuo de alambre de soldadura y los metales,

para lograr esta estabilidad de arco la función del uso de mezclas de protección es fundamental, pues con ellas se logra el tipo de transferencia de metal de soldadura (aporte) a la unión a realizar.

El desarrollo de este estudio tiene como finalidad el utilizar más ampliamente el uso del gas CO_2 en el proceso de GMAW logrando los mismos estándares de calidad y propiedades mecánicas obtenidos con el uso de gases inertes tales como el argón (Ar) o helio (He). Al mismo tiempo logrando una reducción significativa en el costo de gas utilizado, ayudado por la utilización de una nueva tecnología en el mercado, el proceso de soldadura de arco metálico de baja salpicadura (por sus siglas en inglés, GMAW-LSC).

Desarrollos de tecnología recientes por parte de las compañías fabricantes de soldadura (máquinas de soldar) en esta materia muestran un posible cambio en el uso de estos gases de forma tradicional, utilizando una mejora en el proceso de soldadura por arco, llamado GMAW-LSC, con un control de baja salpicadura de soldadura. Esta es una variante de arco para equipos de soldadura, basado en un nuevo algoritmo, destacando por una mayor estabilidad de arco y menor generación de proyecciones.

Los nuevos parámetros de soldadura forman la base para las funciones disponibles por primera vez en el sector, como el estabilizador de penetración. Además, compañías fabricantes han realizado nuevas mejoras en las funciones de corrección de la longitud de arco y corrección dinámica. (1)

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Estudiar la soldabilidad de aceros HSLA de 6 mm de espesor en soldaduras de filete utilizados en la industria pesada unidos mediante el proceso GMAW-LSC utilizando gas CO_2 100% como gas de protección y su efecto en las propiedades metalúrgicas y mecánicas.

1.2.2 Objetivos específicos

- Revisión bibliográfica: Evaluación, revisión y discusión de la bibliografía, respecto al proceso GMAW.
- Realizar caso de estudio para la evaluación de factibilidad de aplicación de esta tecnología utilizando gas de protección CO_2
- Realizar una caracterización microestructural para determinar los efectos del metal depositado y su transición con el metal base de la unión.
- Evaluar propiedades mecánicas de las uniones. (esfuerzo de corte y Microdureza HK)
- Determinar la capacidad de penetración, fusión y características externas (convexidad, concavidad, traslape, falta de fusión, socavado, tamaño de garganta en soldadura de filete, escoria y salpicadura) de soldadura.
- Realizar un caso de estudio comparativo entre el proceso GMAW-LSC con el GMAW convencional.

1.3 Justificación

La utilización de gases inertes en el proceso de soldadura por arco metálico y gas de protección (GMAW,), hacen que este proceso sea costoso y más allá de que las transferencias de metal depositado a través del arco eléctrico sean excelentes para lograr las características de calidad, no dejan de ser una excelente oportunidad para establecer nuevas metas y estudios en cuanto al uso de gases de protección más baratos (3 ó 4 veces) como el $CO_{2,}$ utilizando nuevas

tecnologías para lograr las mismas características de calidad a un menor costo que lo sitúe como ventaja competitiva en el mercado.

Debido a que con el uso de gas de protección CO_2, se obtiene una inestabilidad de arco por una transferencia globular que causa una gran generación de salpicadura y fusiones incompletas, hacen que este proceso no sea muy viable en los procesos productivos a gran escala, debido también a los tiempos altos de limpieza y bajas características de apariencia de la soldadura.

En los últimos años a nivel mundial se ha presentado una gran recesión, principalmente en la industria minera y de construcción, mercado en el cual por su baja demanda, los costos de producción juegan un papel muy importante y las estrategias de reducción de costos son las diferencias fundamentales para mantenerse en forma competitiva a nivel global.

Por ello, es importante que se analicen nuevas formas de trabajo, se emplee nueva tecnología y maximice el uso de los componentes perecederos como los gases de protección para abarcar mayor capacidad de proceso a un menor costo, utilizando una nueva tecnología llamada GMAW-LSC en el proceso de soldadura por arco eléctrico utilizando un gas reactivo como protección MAG (Metal Active Gas por sus siglas en inglés.)

1.4 Planteamiento del problema

El uso del dióxido de carbono (CO_2) como gas de protección en el proceso de soldadura GMAW (evita el contacto del metal caliente de soldadura con el aire), es comúnmente utilizado por su bajo costo, buenas características y propiedades de soldadura. Sin embargo debido a la gran cantidad de salpicaduras generadas por la inestabilidad del arco de soldadura, hacen que su uso sea restringido a gran escala. Hoy en día la implementación de estrategias de optimización de los recursos (gases de protección) para reducir el costo de producción, plantean la necesidad de mejorar esta aplicación mediante la utilización de una nueva tecnología que produce una mínima cantidad de salpicaduras, mejorando las propiedades mecánicas y características de calidad necesarias para competir con procesos de mayor costo (4 ó 5 veces), como lo son los procesos de soldadura que utilizan gases de protección inertes.

1.5 Aportación industrial

Con la aplicación de tecnología de control de baja generación de salpicaduras GMAW-LSC, utilizando un gas de protección (CO_2), se pretende expandir su uso, generar una alternativa competitiva de bajo costo, igualar y/o mejorar las propiedades de soldabilidad en cuanto a penetración y fusión, de resistencia mecánica y de calidad superficial de acuerdo a los estándares y criterios internacionales.

Esta aportación no solo es para aquellas industrias que compiten globalmente y que requieren de la optimización de los recursos para mantenerse en forma competitiva, sino también para aquellas industrias de pequeña y mediana participación en el mercado, las cuales no cuentan con los recursos económicos suficientes para la aplicación de procesos de soldadura que les provea una calidad competitiva y que son de alto costo.

1.6 Alcance y delimitaciones

El alcance de este estudio es el comparativo entre el proceso convencional GMAW utilizando gases inertes y el uso de esta nueva tecnología GMAW-LSC utilizando un gas de protección CO_2 (reactivo), en aceros al carbono ASTM A-572 G-50 y espesores hasta 6mm, en soldaduras de filete tipo traslape. Con el objetivo de determinar la capacidad de las variables de proceso que intervienen y analizar si efectivamente se puede utilizar la nueva tecnología como una alternativa competitiva que satisfaga las necesidades del mercado nacional e internacional.

Entre las diferentes variables que intervienen y que se utilizarán para realizar este comparativo se encuentran: propiedades mecánicas (tensión a esfuerzo cortante), propiedades de soldabilidad (penetración y fusión), propiedades de características externas (forma, contorno, de resistencia mecánica y cosméticas). Por último se desarrollarán caracterizaciones de las microestructuras generadas por ambos procesos, macroataques y pruebas de durezas en la zona afectada por el calor (ZAC) y determinar el efecto producido por la entrada de calor propiciado por el uso de los diferentes parámetros de soldadura utilizados en estos respectivos procesos.

CAPÍTULO 2

ESTADO DEL ARTE

2.1 Soldadura de arco metálico con gas de protección – GMAW

2.1.1 Generalidades

La función primaria del gas protector es impedir que la atmósfera entre en contacto con el metal 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 en 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. (2)

Además de proporcionar un entorno protector, el gas protector y la tasa de flujo tienen un efecto importante sobre lo siguiente:

(1) Características del arco.
(2) Modalidad de transferencia del metal.
(3) Penetración y perfil de la franja de soldadura.
(4) Velocidad de soldadura.
(5) Tendencia al socavamiento.
(6) Acción limpiadora
(7) Propiedades mecánicas del metal de soldadura.

2.1.2 Proceso GMAW

El proceso de soldadura por arco metálico y gas de protección (GMAW, por sus siglas en inglés) es un proceso que funde y une metales por calentamiento de ellos con un arco estabilizado entre un alimentador continuo de alambre de soldadura y los metales, como se muestra en la Figura 2. 1. La protección gaseosa del arco y el charco de metal fundido, se consigue utilizando gas inerte tal como el Ar y He, y esta es la razón del porqué también es llamado como soldadura de gas inerte (MIG).

Dado que, no solo se usa gas inerte, sino que también se utiliza un gas reactivo como el gas CO_2, este proceso “GMAW” es el nombre más apropiado. Este proceso de soldadura de arco metálico, es el más ampliamente utilizado para los procesos de fabricación con aceros de bajo y medio carbono. El proceso es esquematizado en La Figura 2. 2.

Utilizando **polaridad positiva “DCEP”** para el proceso GMAW, se obtiene un arco estable, suave transferencia de metal con poca pérdida por salpicaduras y una buena penetración de la soldadura. En cambio utilizando una **polaridad negativa “DCEN”** o corriente alterna “AC” la transferencia de metal es errática. (3)

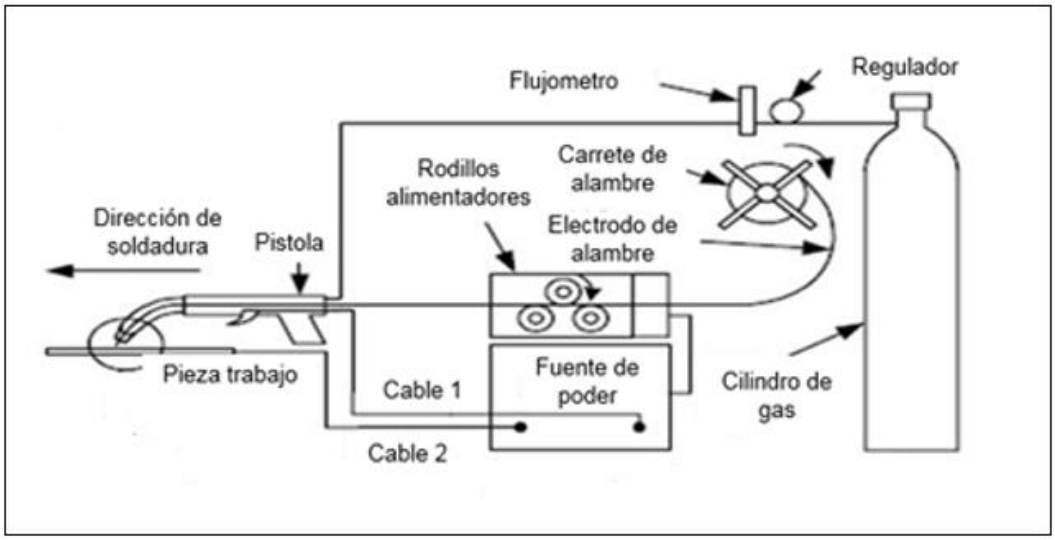


Figura 2. 1 Soldadura por arco metálico con gas. Proceso general (3)

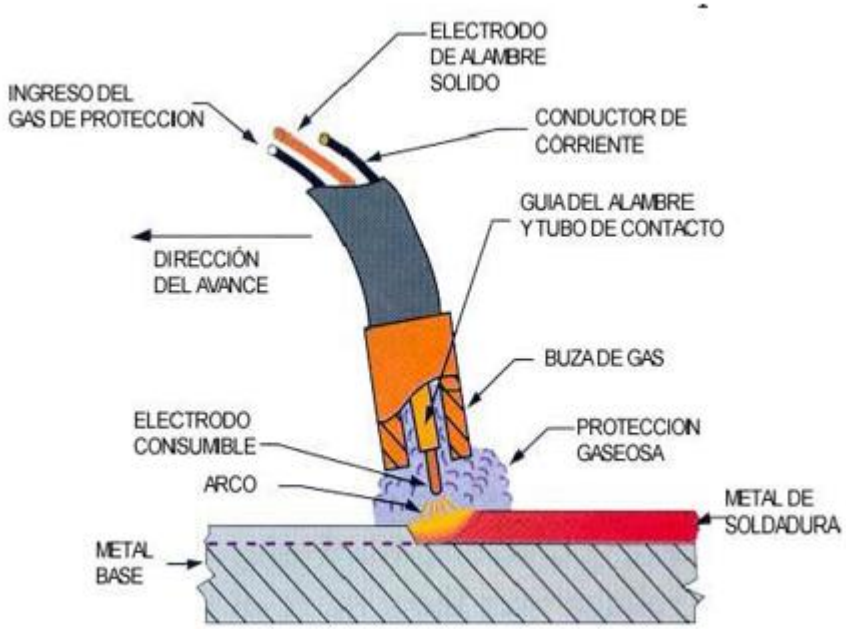


Figura 2. 2 Soldadura por arco metálico con alambre y protección gaseosa (4)

2.1.3 Gases de protección

Los gases protectores inertes: argón y helio.

El argón y el helio son gases inertes. Estos dos y sus mezclas se emplean para soldar metales no ferrosos y aceros inoxidables, al carbono y de baja aleación. Las diferencias entre el argón y el helio son la densidad, la conductividad térmica y las características del arco.

El argón es aproximadamente 1.4 veces más denso que el aire, en tanto que la densidad del helio es alrededor de 0.14 veces la del aire. El argón, al ser más pesado, es más efectivo para proteger el arco y cubrir el área de la soldadura en la posición plana. El helio requiere tasas de flujo unas dos o tres veces mayores que las usadas con argón para proporcionar una protección equivalente.

El helio tiene mayor conductividad que el argón y produce un plasma de arco en el cual la energía del arco está distribuida de manera más uniforme. El plasma del arco del argón, en cambio, se caracteriza por un núcleo de alta energía y una zona exterior de menor energía. Esta diferencia afecta sobremanera el perfil de la franja de soldadura. Un arco protegido con helio produce una franja profunda, ancha, parabólica. Un arco protegido por argón produce un perfil de franja caracterizado por una penetración tipo “dedo”. En la Figura 2. 3 se ilustran los perfiles de franja típicos de argón, helio, mezclas argón-helio y dióxido de carbono.

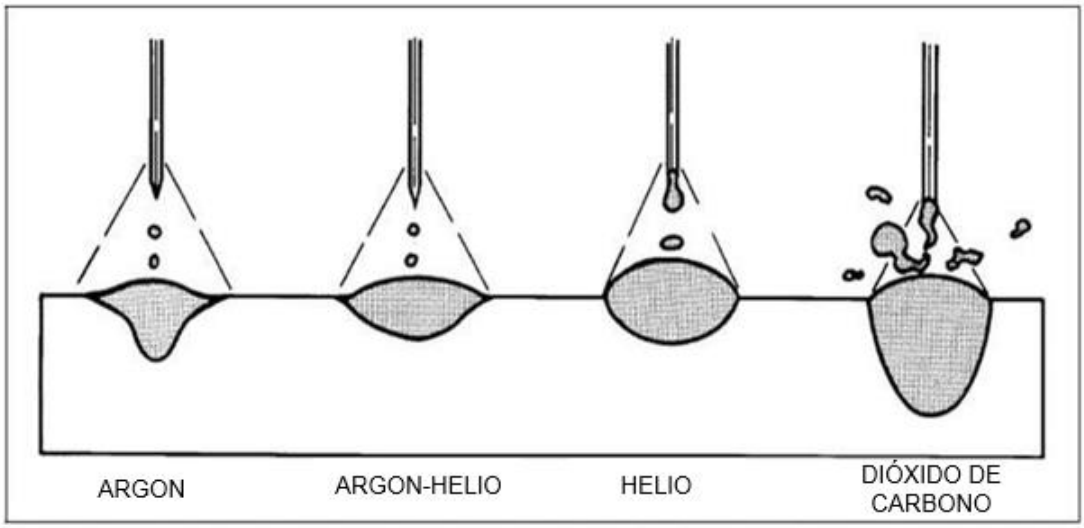


Figura 2. 3 Perfiles de soldadura y penetración para diversos gases de protección. (4)

Mezclas de protección de múltiples gases.

Las mezclas de argón con hasta 20% de dióxido de carbono y de 3 a 5 % de oxígeno son versátiles. Proveen una protección adecuada y características de arco deseables para soldar en las modalidades de aspersión, corto circuito y a pulsos. Las mezclas con 10 a 20% de dióxido de carbono no son comunes en Estados unidos pero si gozan de popularidad en Europa.

Dióxido de carbono.

El dióxido de carbono (CO_2) es un gas reactivo ampliamente utilizado en su forma pura para soldadura de arco de metal y gas de aceros al carbono y de baja aleación. Es el único gas reactivo que puede usarse solo como escudo en el proceso de GMAW. La mayor velocidad de soldadura, la penetración más profunda en la unión y el bajo costo son características generales que han promovido el uso del CO_2 como gas protector.

Con un escudo de CO_2, la modalidad de transferencia de metal es en corto circuito o bien globular. La transferencia por aspersión axial requiere un escudo de argón y no puede lograrse con uno de CO_2 Con la transferencia globular, el arco es muy brusco y produce abundantes salpicaduras, lo que exige fijar las condiciones de soldadura de jodo que produzcan un arco enterrado muy corto (la

punta del electrodo está por debajo de la superficie de trabajo) a fin de minimizare las salpicaduras.

En una comparación general con el arco protegido por una mezcla rica en argón, el arco protegido por CO_2 produce una franja de soldadura con excelente penetración y un perfil superficial más áspero, con una acción de “mojado” muy inferior en los bordes de la franja de soldadura gracias al arco enterrado. Se logran depósitos de soldadura muy íntegros, pero las propiedades mecánicas pueden sufrir menoscabo por la naturaleza oxidante del arco. (4)

Aceros al carbono y de baja aleación son comúnmente soldados con CO_2 como mezcla de gas, además tiene las ventajas de ser soldadura de alta velocidad, alta penetración y bajo costo. Debido a que el gas CO_2 produce mucha salpicadura, un voltaje relativamente bajo se utiliza para mantener una longitud de arco corto para reducir al mínimo las salpicaduras; es decir, la punta del electrodo está en realidad por debajo de la superficie de la pieza (3)

En estudios anteriores realizados por S. Mukhopadhyay (5), referente al efecto de la mezcla de gases de protección sobre aceros HSLA y relacionados al proceso GMAW. La alta productividad, aplicabilidad para un amplio rango de espesores para materiales base en todas las posiciones de soldadura y la adaptabilidad para la automatización son características del proceso de soldadura por arco eléctrico (GMAW). La mezcla de gas utilizado para este proceso tiene el propósito de proteger el metal de soldadura fundido y propiciar la transferencia a través del arco. Tradicionalmente el CO_2, es usado como gas de protección debido a su bajo costo, sin embargo su uso se ha limitado debido a que presenta problemas de salpicaduras, y perdidas de metal por oxidación, además de que no se puede utilizar en todas las posiciones. Por otro lado no se puede utilizar el Ar solamente como gas de protección, ya que tampoco da todas las características de calidad deseadas.

Durante la soldadura, y la adición de CO_2 u O_2 en Ar causa oxidación, el cual resulta en algunas pérdidas de constituyentes de aleación por oxidación y

produce inclusiones en el metal depositado. En general la presencia de inclusiones es perjudicial a las propiedades de la soldadura, sin embargo bajo este conjunto de condiciones, ciertas inclusiones de óxidos promueven la formación de una fase de ferrita acicular la cual mejora la tenacidad. Por otro lado un aumento considerable de la formación de esta ferrita acicular promueve el inicio de una fractura dúctil prematura.

Por lo tanto, la calidad, eficiencia y operatividad del proceso GMAW son fuertemente dependientes de la composición de la mezcla de gases. (5)

Acero de alta resistencia y baja aleación (HSLA) de 700MPa mínima resistencia a la cedencia, es utilizado como material base. Alambre solido (ER70S6) y alambres tubulares (E71T/1M) de 1.2 mm de diámetro fueron utilizados para las pruebas. Para este propósito se utilizaron varias composiciones de mezcla de protección entre Ar, CO_2 y O_2 que van desde 80/18/2 ($Ar/CO_2/O_2$), hasta 75/25/0. Placas de 20mm de espesor, por 150 mm de ancho y 300 mm de longitud. Fueron utilizados múltiples pases de soldadura.

Los elementos microaleantes no mostraron una significante variación en relación a la composición de mezcla de gases, sin embargo los contenidos de manganeso y silicio tienen menor incremento comparado con el efecto del oxígeno en la mezcla del gas.

Las microestructuras obtenidas en el metal de soldadura usando las mezclas de gases mencionadas, se observan en la Figura 2. 4 en la que predomina una microestructura alargada típica de regiones depositadas de la porción central de la soldadura la cual es revelada. En general la microestructura contiene regiones de ferrita acicular (AF), ferrita en los límites de grano (GF) y placas laterales de ferrita (FS). Sin embargo, la proporción total de AF y FS parece ser mayor para soldaduras de proceso FCAW, diferente para el alambre sólido. Figura 2. 4

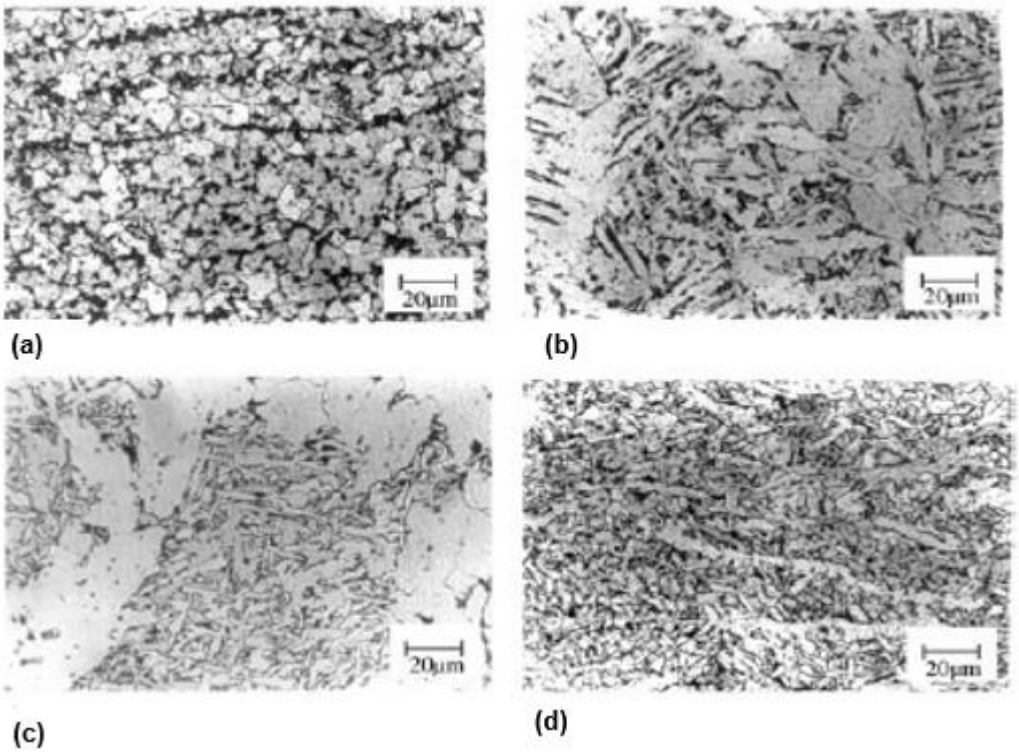


Figura 2. 4 a-d. a) Microestructura de metal base, b) Muestra S1 de metal de soldadura, c) Muestra de S4, d) Muestra F1. (5)

A continuación se tienen las conclusiones.

1. Los constituyentes microestructurales como AF, GF y FS en soldaduras de aceros HSL son influenciados por el contenido de oxígeno y el dióxido de carbono en la mezcla de gases.
2. En el caso de alambre sólido, ambas la cedencia YS y la resistencia máxima UTS se incrementan con el contenido de oxigeno (hasta 4%), en la mezcla de gas. Mayores incrementos de la cantidad de oxigeno resultan en una reducción en la resistencia máxima UTS y en % de alargamiento del metal de soldadura
3. El proceso de soldadura por arco eléctrico de alambre solido (GMAW) puede lograr aceptables propiedades del metal de soldadura en aceros HSLA con la apropiada combinación de metal de aporte (alambre) y composición de mezcla utilizada. (5)

En estudios anteriores realizados por Irina Boiko (6), en relación con los gases de protección para procesos MAG. Las compañías en Estados bálticos han venido desarrollando su producción más y más competitiva dentro del oeste y norte de Europa durante los últimos años. La industria metalmecánica es una de las brechas que han crecido en la demanda y competitividad de reducción de costos y recursos humanos, desarrollando y adquiriendo nuevos procesos y tecnologías que contribuyan al volumen de producción.

La soldadura es uno de estos procesos que toman relevancia en los procesos de la industria metalmecánica así como parte de todos sus costos. Esto es por la influencia de diferentes procesos como MIG/MAG, TIG, SMAW, soldadura de plasma y laser. MIG/MAG es uno de los procesos que comúnmente son usados en los Estados bálticos, Gases de protección toman relevancia en este proceso de MIG/MAG

El objetivo de esta investigación fue encontrar la influencia del costo sobre la composición de las mezclas de gases de soldadura y las propiedades utilizando MAG. (6)

2. Experimentación

2.1 Materiales. En los Estados bálticos el material más comúnmente utilizado es el acero S235, utilizando éste para la experimentación en placa de 150 mm x 75 mm con espesor de 5mm, presentado (ESAB Company) en la Tabla 2. 1

Tabla 2. 1 Composición química del acero S235 y alambre de soldadura Autrod 12.51. (7)

	Contenido de elementos quimicos (% e.p.)								
Alambre	Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
	97.25	0.09	0.83	1.45	0.011	0.01	0.03	<0.01	0.02
	Al	Co	Cu	Nb	Ti	V	W	Pb	Zr
	<0.01	-	0.09	-	<0.01	0.01	-	-	<0.01
Acero	Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
	99	0.106	0.186	0.381	0.008	0.009	0.024	0.01	0.039
	Al	Co	Cu	Nb	Ti	V	W	Pb	Zr
	0.037	<0.01	0.084	0.012	<0.01	<0.01	<0.07	<0.02	0.002

5 diferentes mezclas de protección fueron utilizadas en este experimento, dentro de las cuales el CO_2 es el más barato y la mezcla de Ar 92% + CO_2 8% es la más cara dentro de los participantes. A continuación se mencionan en la Tabla 2. 2Tabla 2. 2 Composición química y nombre de las mezclas de gases, suministrados por compañía AGA y utilizados en este estudio. (7)

Tabla 2. 2 Composición química y nombre de las mezclas de gases, suministrados por compañía AGA y utilizados en este estudio. (7)

No	Nombre	Contenido, %				Etiqueta
		Ar	CO_2	O_2	*No*	
1	MISION-18	82	18	-	0.03	M18
2	MISION-25	75	25	-	0.03	M25
3	CORGON-3	90	5	5	-	C3
4	MISION-8	92	8	-	0.03	M8
5	CO_2	100	-	-	-	CO_2

2.2 La muestra de acero S235 fue soldada en posición horizontal en una prueba de filete con la aplicación de una soldadura de filete de 4 a 5mm, los parámetros de soldadura esta dados en la Tabla 2. 3, donde los parámetros de soldadura fueron puestos separadamente para cada muestra.

Tabla 2. 3 Parámetros de soldadura MAG, usando diferentes gases de protección. (6)

Parámetros	M18	M25	C3	M8	CO_2
Corriente (A)	161	158	158	171	215
Voltaje (V)	22.1	21.9	21.9	23	25.9
Velocidad alambre soldadura (m/min)	9	8	8	10	10.3
Composicion de mezcla de gases (l/min)	15	15	15	15	15
Longitud de la unión de soldadura	150 mm				
Tiempo de soldadura (segundos)	9,8	11,3	11,3	8,5	12
Velocidad de soldadura	920	800	800	1060	750

2.3 Diferentes tipos de pruebas fueron realizadas después de la aplicación de la soldadura:

- Pruebas visuales. Salpicadura después de soldadura
- Pruebas químicas. Composición química en la unión de soldadura
- Prueba de penetración. En cada muestra
- Prueba de microscopio. Prueba en la estructura de la unión de soldadura a (200x)

Las pruebas visuales mostraron que la superficie con más salpicadura fue con el uso de CO_2, todos las demás mezclas mostraron buen desarrollo con buena limpieza, esto significa que no se necesitó limpieza adicional que se refleja en reducción de costos.

3. Resultados y discusión

3.1 Composición química y microestructura. En general la composición química del metal de soldadura depende de la mezcla de gas utilizada. Para muchos de los elementos la variación no fue muy significante, pero para los elementos como C, Si, Mn, P y S esas variaciones fueron considerables, de tal manera que el CO_2 como mezcla de gas muestra el peor resultado en cuanto a composición de metal de soldadura, una cantidad de elementos microaleados fueros eliminados del metal de soldadura. Esto puede influenciar la resistencia de las partes soldadas durante la exploración.

Los resultados también muestran que el esfuerzo a la cedencia para el caso del CO_2 es el más bajo, así también en cuanto se incrementa el uso del O_2. Esto se observa en la Figura 2. 5 Resistencia a la cedencia y resistencia máxima de la unión.

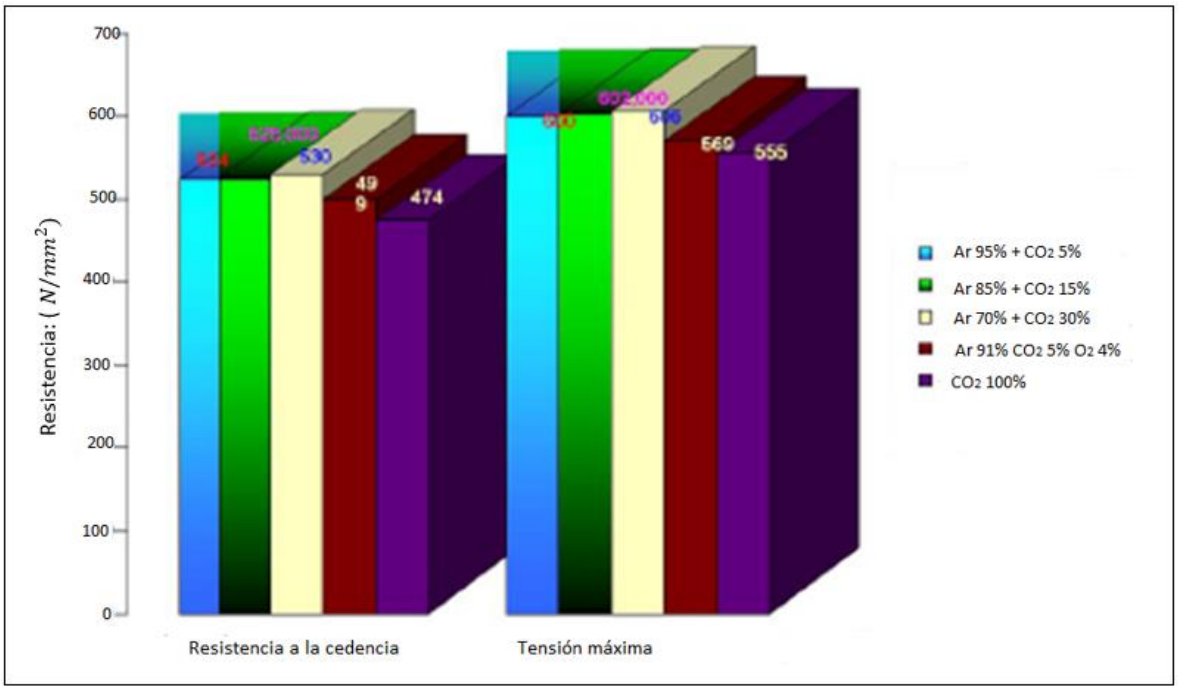


Figura 2. 5 Resistencia de cedencia y tensión máxima de una unión de soldadura. (6)

Como se observa en la Figura 2. 6, la microestructura más homogénea encontrada es la mostrada con contenidos de Ar 98%, CO_2 18% (3d). Es evidente que con el incremento de CO_2 en la mezcla de gases así como el incremento de O_2 (3c), se incrementa el tamaño de grano debido a la alta entrada de calor.

El grado de desoxidación es alto con el CO_2 puro y el oxígeno y se tiene la presencia de muy altos volúmenes de fracciones de inclusiones que pueden iniciar fracturas dúctiles prematuramente.

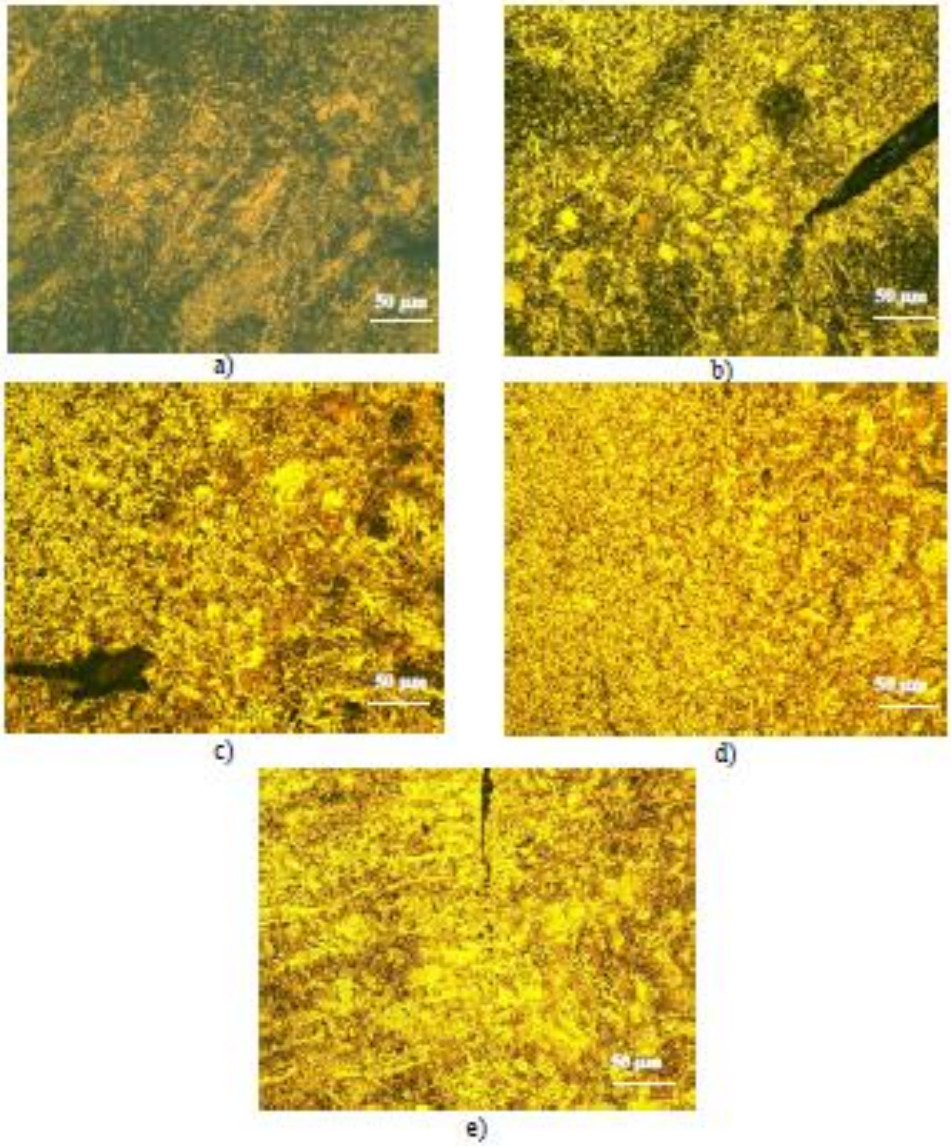


Figura 2. 6 Microestructura del metal de soldadura utilizando diferentes gases de protección: a) Misión 18, b) Misión 25, c) Corgon 3, d) Misión 8, e) CO_2. (6)

3.1 El siguiente paso fue determinar el nivel de penetración de las mezclas involucradas. El grado de penetración y fusión de la pared de lado son factores importantes, porque ello refleja la calidad de la soldadura. Las macroestructuras de otras muestras se muestran en la Figura 2. 7

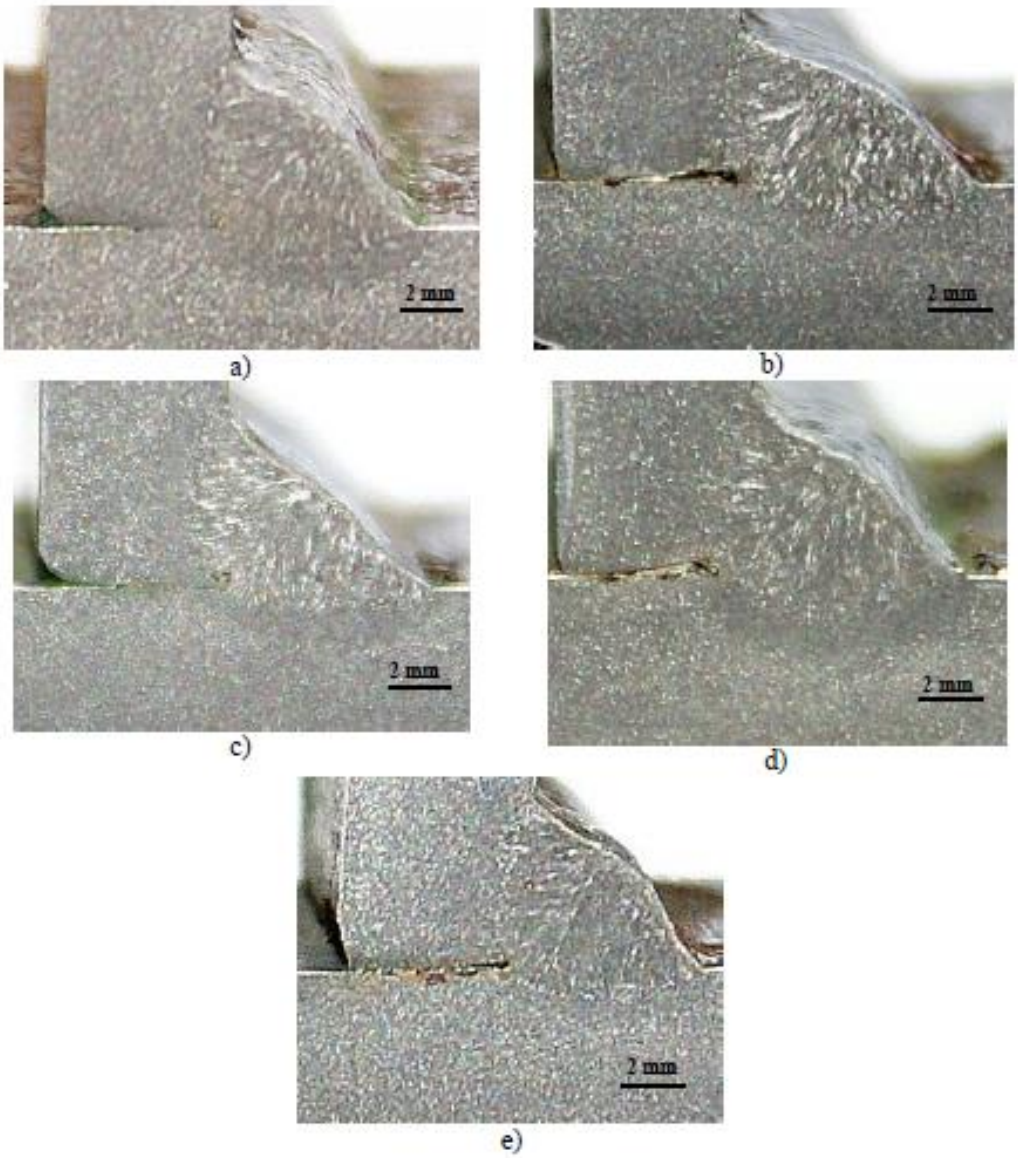


Figura 2. 7 Vista de la penetración de soldadura usando diferentes gases de protección: a) Misión 18, b)Misión 25, c) Corgon 3, d) Misión 8, e) CO2. (6)

En estas imágenes se muestra que la mejor penetración se logró con el CO_2 , esto puede ser descrito con el corto circuito que se forma cuando el alambre de soldadura se funde en el charco de soldadura. Esto también es la razón de donde vienen las salpicaduras después del proceso de soldadura con CO_2, al mismo tiempo el corto circuito (arco corto) funde el material base y esto forma una buena y amplia penetración. La peor penetración se logró con el uso de la mezcla Ar + CO_2 + O_2.

El tamaño de las gotas de soldadura (transferencia) depende de los parámetros de soldadura escogidos y mezcla de gas seleccionada. A altos parámetros y menor contenido de CO_2 en Ar el tamaño de gota es menor y con esto durante la aplicación de la soldadura no aparece tanta salpicadura, debido al uso de cantidades de CO_2 que van alrededor del 8% en Ar.

3.3 El costo de la mezcla de gases en el proceso de soldadura es de sólo un 5% del total de los costos

Los costos dependen del tiempo invertido en la soldadura. Tan rápido se suelde se abarata la fuerza laboral y los costos de soldadura. Algunas compañías han calculado el coeficiente de eficiencia del alambre de soldadura dependiendo de la mezcla de gases utilizado. De un 80 a un 90% de alambre de soldadura permanece en la unión de soldadura utilizando CO_2 como gas de protección.

4. Durante la investigación se reveló que diferentes gases de protección tuvieron diferente influencia en el proceso de soldadura, calidad de la unión de soldadura y también en los costos de esta. Algunas de las conclusiones más importantes:

- La composición química, microestructura en el metal de soldadura de los aceros S235, así como penetración de soldadura, tensión máxima y cedencia de la unión de soldadura son influenciados por los contenidos de CO_2 y O_2 con la mezcla de gases utilizados.
- Es claro que el uso de dióxido de carbono no es la mejor opción como gas de protección. Se muestra mayor salpicadura, y menor velocidad de soldadura, mostrando el peor desarrollo de todas las mezclas participantes.
- Los mejores resultados se encontraron con mezclas de Ar con contenidos de CO_2 y O_2
- A pesar de los bajos costos de la mezcla del CO_2, éste último no provee el menor costo de soldadura. Y se puede concluir que la mezcla de gas Ar con 8 % CO_2 es la mejor opción para el acero S235 con el proceso MAG. (6)

2.1.4 Equipo de soldadura

Generalidades:

El voltaje que las compañías eléctricas suministran para fines industriales es demasiado alto para utilizarse directamente en la soldadura por arco. Por lo tanto la primera función de las fuentes de potencia para soldadura de arco es reducir el voltaje de entrada o de línea a un intervalo de voltaje de salida apropiado (por lo regular de 20 a 80 volts). Se puede usar ya sea un transformador, un inversor de estado sólido o un motor-generador para reducir la potencia de 120, 240 o 480 volts de la línea al voltaje terminal o de circuito abierto especificado apropiado para la soldadura por arco.

El mismo dispositivo (transformador o motor-generador) proporciona también una corriente de soldadura elevada, generalmente del orden de 30 a 1500 amperes (A). La salida típica de una fuente de potencia puede ser corriente alterna (CA), corriente continua (cc) o ambas. Puede ser de corriente constante, de voltaje constante o ambas cosas. También tener un modo de salida de pulsos. Algunas configuraciones de fuente de potencia solo proporcionan ciertos tipos de corriente, por ejemplo, las fuentes de potencia tipo transformador solo suministran corriente alterna. Las fuentes de potencia de transformador-rectificador pueden proporcionar tanto “CA” como “CC”.

Máquinas de corriente constante / voltaje constante.

La Asociación Nacional de Manufactureros Eléctricos (NEMA, por sus siglas en inglés), define una fuente de potencia que produce tanto corriente constante como voltaje constante así “una fuente de potencia para máquina soldadora por arco de corriente constante / voltaje constante es una fuente de potencia en la que puede seleccionarse entre las características de una fuente de potencia para soldadura por arco de corriente constante y una fuente de potencia para soldadura por arco de voltaje constante.” (7)

Corriente constante.

En la Figura 2. 8 se muestran curvas de salida voltaje-amperaje típicas de una fuente de potencia de corriente constante convencional. A veces se dice que la fuente es de caída a causa de la marcada pendiente descendente (negativa) de las curvas. La fuente puede contar con regulación de voltaje de circuito abierto además del control de la corriente de salida. Al variar cualquiera de estos controles se modificará la pendiente de la curva volt-ampere.

El efecto de la pendiente en la curva V-A sobre la potencia de salida es evidente en la Figura 2. 8 En la curva A, que tiene un circuito abierto de 80 V, un aumento uniforme en el voltaje del arco de 20 a 25 volts (25%) producirá una disminución en la corriente de 123 a 115 A (6.5%). El cambio en la corriente es relativamente pequeño, Por tanto en un proceso de soldadura con electrodo consumible, la tasa de fusión del electrodo se mantiene más o menos constante si el cambio en la longitud del arco no es muy grande.

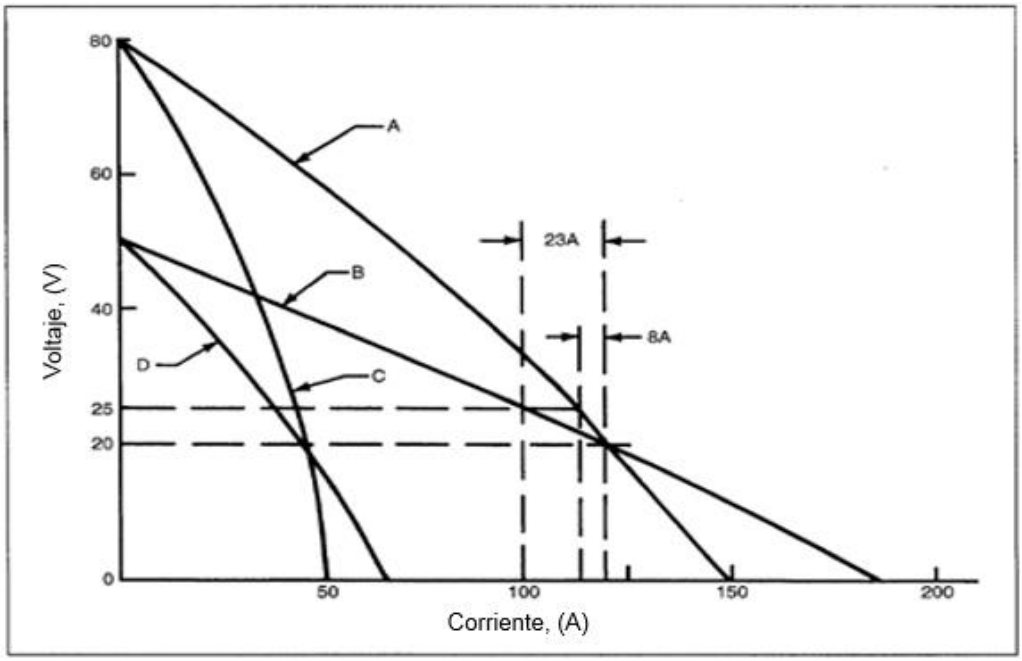


Figura 2. 8 Típico Voltaje - Amperaje característico de una fuente de caída de potencia, con un voltaje ajustable de circuito abierto. (7)

Voltaje constante.

En la Figura 2. 9 se muestra una curva volt-ampere típica para una fuente de potencia de voltaje constante convencional. Esta fuente de potencia no tiene salida de voltaje verdaderamente constante; tiene una pendiente ligeramente descendente (negativa) por que la impedancia eléctrica interna del circuito de soldadura causa una ligera caída del voltaje en la salida. Si se modifica esa impedancia se altera la pendiente de la curva volt-ampere. Partiendo del punto B de la Figura 2. 9, el diagrama muestra que un incremento o decremento del voltaje A o C (5 V o 25%) produce un cambio considerable en el amperaje (100 A o 50%). Esta característica de V-A es apropiada para procesos con alimentación continua del electrodo como la soldadura por arco de metal con gas, por arco sumergido y por arco con núcleo de fundente, y sirve para mantener un arco de longitud constante.

Un pequeño cambio en la longitud del arco (voltaje) causará un cambio apreciable en la corriente de soldadura, esto elevará o reducirá automáticamente la tasa de fusión del electrodo para recuperar la longitud de arco (voltaje) deseada. Este efecto ha recibido el nombre de autorregulación. Algunas fuentes de potencia de voltaje constante cuentan con ajustes para modificar la pendiente o la forma de la curva de V-A. Si esto se hace con dispositivos de inducción, las características dinámicas también cambiarán. (7) (4)

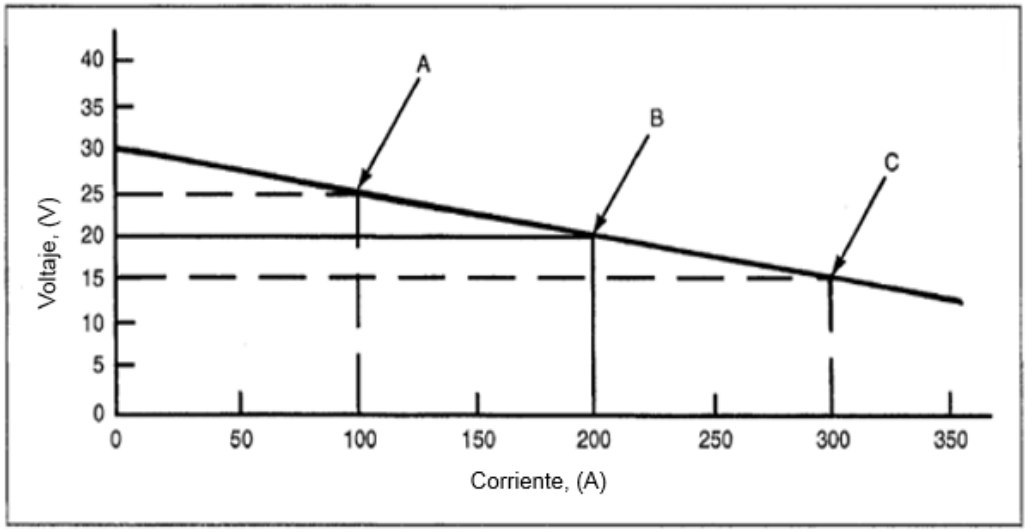


Figura 2. 9 Relación de salida Voltaje - Amperaje para una fuente de poder de voltaje constante. (7)

2.1.5 Proceso de soldadura de arco metálico con control de baja salpicadura GMAW-LSC

El proceso de soldadura LSC se basa en el modo de transferencia de corto circuito, el cual se modificó para:

- Minimizar las proyecciones de soldadura (salpicaduras)
- Incrementar la estabilidad de arco
- Incrementar la calidad de la soldadura
- Disminuir el tiempo de entrenamiento
- Incrementar la tasa de depósito de soldadura
- Mantener la consistencia en la penetración de soldadura

Las características de control de baja salpicadura de raíz y universal (LSC, por sus siglas en inglés) se basan en un nuevo algoritmo, destacando por una mayor estabilidad de arco y menor generación de proyecciones. Los nuevos parámetros de soldadura forman la base para las funciones disponibles por primera vez en el sector, como el estabilizador de penetración. Además, compañías fabricantes de equipo han realizado nuevas mejoras en las funciones de corrección de la longitud de arco y corrección dinámica, las versiones avanzadas de LSC de raíz y universal permiten, (Figura 2. 10) junto con un hardware especial, utilizar juego de cables

más largos, con la misma alta calidad de soldadura. Todas estas novedades facilitan el manejo de la fuente de corriente, garantizando así unos resultados óptimos de soldadura y soldadura fuerte (brazing, por sus siglas en inglés) incluso para los soldadores más expertos.

Para LSC se ha desarrollado un algoritmo completamente nuevo que aprovecha la forma eficaz, la elevada capacidad de cálculo, la enorme memoria y el avance del hilo altamente dinámico de la última plataforma para fuentes de corriente MIG/MAG, lo que asegura un arco estable y con pocas proyecciones.

Los avances de esta técnica por los fabricantes de tecnología en soldadura se manifiestan especialmente en la soldadura de raíz y baja salpicadura, para la cual se ha desarrollado. Este proceso, el cual se muestra en la Figura 2. 10, garantiza una excelente fusión de la raíz y una tasa alta de depósito, combinándose aporte térmico reducido. A diferencia de la soldadura MAG convencional, por primera vez es posible soldar incluso en posiciones descendentes, sin que por eso se produzcan fallas de unión, lo que facilita claramente al usuario la soldadura de raíz. Además la nueva generación de antorchas de soldadura, se ha conseguido reducir la pérdida de gas protector en hasta un 3%.

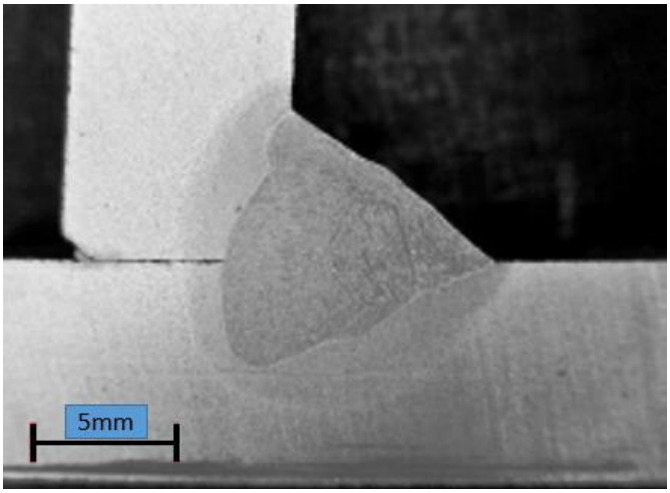


Figura 2. 10 Técnica LSC avanzada: Diámetro de la bobina de hilo: 1.2mm, avance de hilo: 4m/min. (8)

Las características del arco LSC universal resultan especialmente adecuadas para la soldadura de cordones de garganta, soldaduras en ángulos,

soldaduras de traslape, así como para capas de relleno, capas de recubrimiento y para soldadura fuerte.

Los usuarios que utilizan este tipo de procesos de soldadura por arco eléctrico LSC, se benefician también del nuevo estabilizador de penetración. Durante la activación en caso de oscilaciones del sobresaliente de la tobera (Stickout, por sus siglas en inglés) mantiene constante la penetración gracias a la nueva regulación de la velocidad del hilo que puede ajustarse libremente por el usuario. El efecto positivo es especialmente evidente en cordones de garganta que deben soldarse en posición ascendente con un movimiento pendular. Es aquí cuando el estabilizador asegura una penetración constante y profunda, incluso si existen influencias perturbadoras externas. De esta forma pueden obtenerse unos resultados muy buenos incluso con alambres sólidos más económicos, además es posible ajustar la presión del arco a través de la corrección dinámica. (1)

En estudios anteriores realizados por Valter Alves de Meneses, con relación a la estabilidad en la transferencia de metal sobre la generación de humos, morfología y composición en proceso de corto circuito con la aplicación de soldadura por MAG. La estabilidad del proceso MIG/MAG es determinada por 3 factores: Estabilidad de arco (relacionada con la movilidad, evaluada por taza de señales eléctricas); Regularidad del metal de transferencia (relacionado a la firmeza del metal bajo la transferencia); y a comportamiento operacional del proceso (relacionado a la emisión de salpicaduras, consistencia de ruido, sanidad del cordón de soldadura, etc.). Estos factores están relacionados entre sí de una manera cercana. (9)

Para estudiar la influencia de la estabilidad de la transferencia del metal sobre la generación de humos en el proceso de soldadura MAG por corto circuito, se propuso colocar cordones de soldadura sobre placa de acero utilizando diferentes parámetros para alcanzar la alta y baja estabilidad de transferencia (mayor y menor salpicadura), utilizando la misma corriente, y gas de protección (alambre de 1.2mm, AWS ER70S-6, Ar + 25% CO_2) y medir y analizar la cantidad de humos (constituyentes y tamaños de partículas). El análisis se hizo desde la

óptica de exposición de soldadores bajo los mismos parámetros mencionados. Estos valores se pueden observar en la Tabla 2. 4

Tabla 2. 4 Parámetros de experimentación utilizados para definir condiciones diferentes de estabilidad en la transferencia de metal (corriente promedio de 150 +/- 2ª). (9)

Pruebas	Parámetros definidos		Monitoreados	
	V set (V)	CTWD (mm)	Vm (V)	*I* m (A)
1	17	15	14.9	148.3
2	19	14	16.9	151.3
3	21	12	18.6	151.8
4	23	12	20.4	148.7
5	25	9	22.2	151.8

Para llegar a resultados y conclusiones el autor Valter Alves de Meneses (9), se basó en lo siguiente:

1. Determinación de las condiciones de alta y baja estabilidad de la transferencia de metal
2. Efecto de la salpicadura en la generación de humos
3. Efecto de otros factores correlacionados con la generación de humos
4. Efecto de la salpicadura sobre la composición y morfología de los humos.

Considerando las condiciones experimentales aplicadas (soldadura MAG en corto circuito, con 1.2mm AWS E70S-6, Ar +25%CO_2, manteniendo una corriente promedio de 150A, velocidad de alambre de 3.0 m/min y una velocidad de desplazamiento de 17.4 cm/min, utilizando placas de acero al carbono en posición horizontal. Se concluye lo siguiente:

a). No hay correlación entre la cantidad de salpicadura generada y la velocidad de generación de humos. La hipótesis de que la transferencia de metal por corto circuito se incrementa, el cual significa menor salpicadura, menor producción de humos, no se sostiene;

b). Un aumento en la tasa de generación de humos como en el voltaje aumentado (todavía en el rango de la transferencia de corto circuito) no es debido a

salpicaduras (como consecuencia de la menor estabilidad de transferencia de metal), pero causada por al menos (algunos o todos) los siguientes factores, aislados o en forma combinada (interrelacionados):

- Alta corriente de corto circuito (Isc)
- Diámetro grande de gota antes del desprendimiento ($Ø_{Gota}$)
- Longitud de arco mayor (Alto voltaje)
- Mayor tiempo de formación de arco (t arcing).

La estabilidad del metal de transferencia, generación de salpicaduras, y la velocidad de generación de humos no influencia en el tamaño de partícula, ni en la forma o composición de los humos.

2.1.7 Parámetros.

Las diferencias entre parámetros para un proceso convencional MAG y un proceso de baja salpicadura se observan en la

Tabla 2. 5 (1)

Tabla 2. 5 Comparativo de parámetros de soldadura entre proceso convencional manual y nueva tecnología LSC. (8)

PARÁMETROS	Manual (SMAW)	Control de baja salpicadura (LSC)		
Entrada de calor (kj/mm)	1.26	0.51	59% decremento	+
Velocidad alimentacion (cm/min	9	25	2.7 veces mas rápido	+
Tasa de deposito (kg/hr)		1.9		+
Consumo de gas (l/min)		40		-
Remocion de escoria	Si	No		+
Cambio de electrodo	Seguido	Raro		+
Penetracion	Perfecto	perfecto		=
Refuerzo de raiz	Si	Si		=
Manejo operativo	Dificil	Fácil		+
Arco corto Vertical descendente		**Control de baja salpicadura (LSC)**		
Entrada de calor (kj/mm)	0.55	0.51		=
Velocidad alimentacion (cm/min	25	25		=
Tasa de deposito (kg/hr)	1.9	1.9		=
Consumo de gas (l/min)	48	40	17% menos	+
Remocion de escoria	No	No		=
Cambio de electrodo	Raro	Raro		=
Penetracion	Falta de fusión	Perfecto		+
Refuerzo de raiz	No	Si		+
Manejo operativo	Dificil	Fácil		+
Arco corto Vertical ascendente		**Control de baja salpicadura (LSC)**		
Entrada de calor (kj/mm)	0.8	0.51	37% menos	+
Velocidad alimentacion (cm/min	12	25	2 veces mas rápido	+
Tasa de deposito (kg/hr)	1.3	1.9	46% mas	+
Consumo de gas (l/min)	100	40	60% menos	+
Remocion de escoria	No	No		=
Cambio de electrodo	Raro	Raro		=
Penetracion	Bueno	Perfecto		+
Refuerzo de raiz	Minimo a 0	Si		+
Manejo operativo	Dificil	Fácil		+

2.1.8 Fundamentos del proceso GMAW LSC

El proceso de soldadura de arco metálico de baja salpicadura, es un proceso desarrollado dentro de las nuevas tecnologías en soldadura y principalmente en lo que se refiere a máquinas de soldar. A través de esta mejora en tecnología se abre la posibilidad de no solo utilizar los gases de forma tradicional. Este proceso llamado GMAW-LSC, con un control de baja salpicadura, es una variante del proceso de soldadura por arco basado en un nuevo algoritmo, destacando por una mayor (1)

Los fundamentos del proceso LSC, en los cuales está basado (8), se pueden observar en la Figura 2. 11

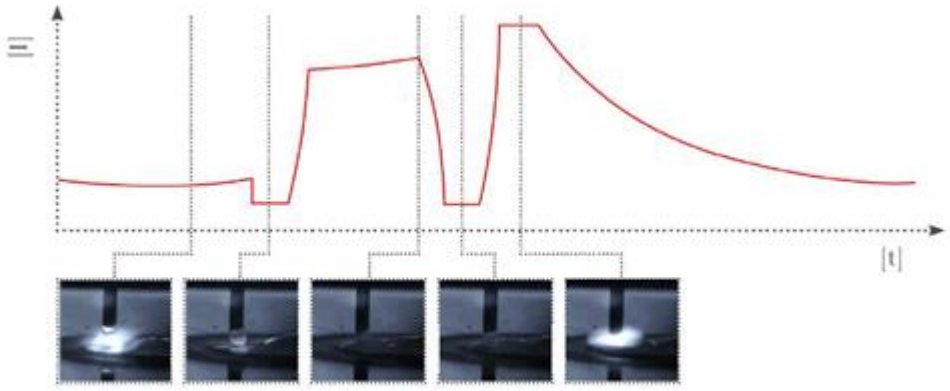


Figura 2. 11 Fundamentos del proceso LSC Root. Fronius International. (8)

La corriente principal forma gotas de soldadura. La terminación del alambre funde y forma gotas de tamaño muy grande, tal como se aprecia en la Figura 2. 12

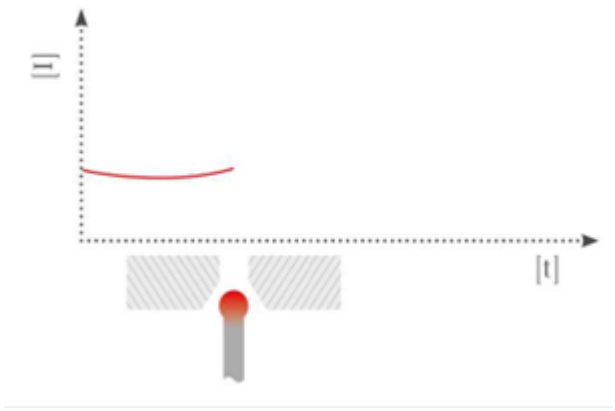


Figura 2. 12. Mecanismo inicial de la formación inicial de goteo. (8)

La gota que se forma de tamaño grande toca el charco de soldadura y forma un puente en la abertura de raíz. La corriente se reduce a un mínimo para evitar cualquier salpicadura o comportamiento de arco áspero. Esto se aprecia en la siguiente Figura 2. 13.

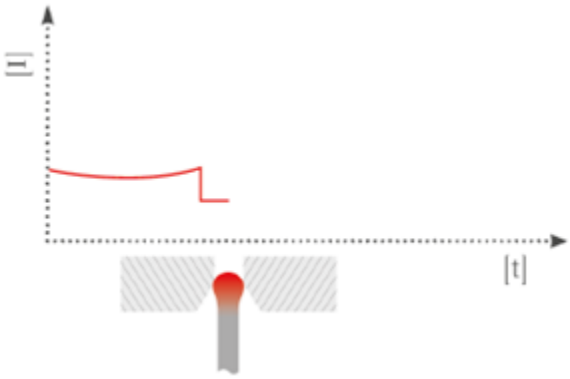


Figura 2. 13. La corriente se incrementa y forma el cuello de la gota en el alambre. (8)

La corriente se incrementa y forma el cuello de la gota en el alambre, como se aprecia en la siguiente Figura 2. 14

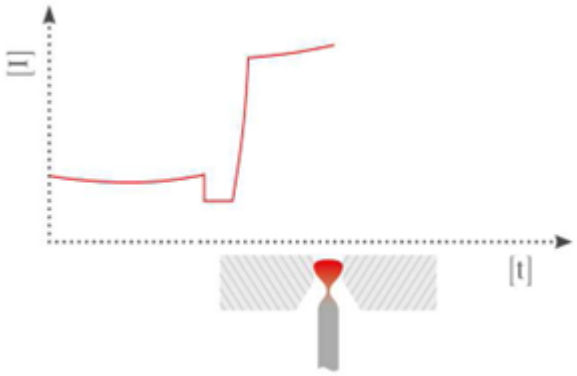


Figura 2. 14. Formación del cuello en el alambre, al incrementar la corriente. (8)

La transferencia ocurre a un mínimo de corriente. La abertura es completamente cerrada. Las bajas corrientes evitan quemar a través de la unión y que el alambre se pegue al charco de soldadura, como se ve en la Figura 2. 15

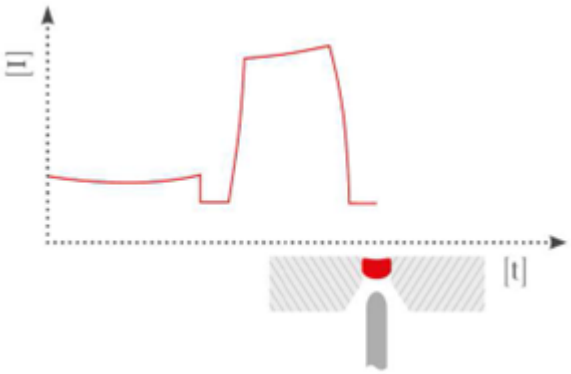


Figura 2. 15. La transferencia ocurre a un mínimo de corriente. (8)

La corriente aumenta a un pico más alto y empuja a través del charco de soldadura. Como resultado un excelente refuerzo de raíz es formado. Este efecto se observa en la siguiente Figura 2. 16.

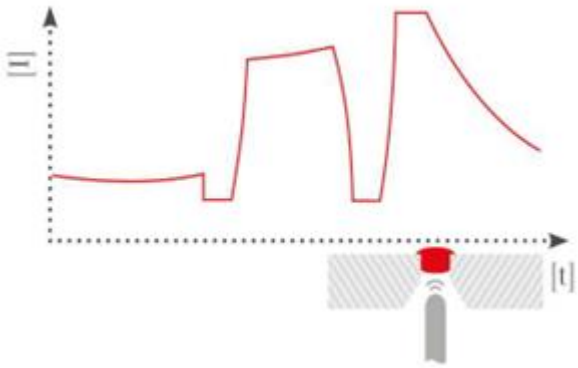


Figura 2. 16. La corriente aumenta a un pico más alto y empuja a la soldadura. (8)

2.2 Generalidades de los aceros de bajo, medio y alto carbono

2.2.1 Aceros al carbono

Aceros al carbono son aleaciones de hierro y carbono en el cual el carbono usualmente no excede de 1.0%, manganeso no excede de 1.65%, y cobre y silicio no exceden de 0.60% cada uno de ellos. Otros elementos de aleación normalmente no están presentes en más de cantidades residuales. Aceros al carbono normalmente son categorizados de acuerdo a su contenido de carbono, como se enlista en la Tabla 2. 6. Las propiedades y soldabilidad de estos aceros dependen principalmente de los contenidos de carbono; otros elementos tienen efectos limitados (10).

Tabla 2. 6 Clasificación y soldabilidad de aceros al carbono. (10)

Nombre comun	% C	Dureza Típica	Uso Tipico	Soldabilidad	Comments
Aceros de bajo carbono	0.15 Máx	60 HRB	Placas y formas especiales, Hoja, Tiras, electrodos de soldadura	↑↑↑↑	Excelente
Aceros laminados	0.15 - 0.30	90 HRB	Formas estructurales, Placas y Barras	↑↑↑	Buena
Aceros de Medio Carbono	0.30 - 0.50	25 HRC	Partes maquinadas y herramientas	↑↑	Justa Pre-Postcalentamiento, se recomienda proceso de bajo Hidrógeno
Aceros alto Carbono	0.50 - 1.00	40 HRC	Resortes, Dados	↑	Pobre Pre-Postcalentamiento, se recomienda proceso de bajo Hidrógeno

Aceros de bajo carbono

Aceros con menos del 0.15% de carbono, son conocidos como aceros de bajo carbono. En general, estos aceros tienen muy bajo endurecimiento y son fáciles de unir por soldadura. Como se mencionó previamente, un acero al carbono que contiene 0.15% de carbono es capaz de endurecerse entre 30 y 40 Rockwell “C” cuando es enfriado a muy alta velocidad. Generalmente estos aceros se sueldan con la mayoría de los proceso por arco como son GTAW, GMAW, SAW, FCAW, etc. en el caso de soldarse con GMAW se recomienda utilizar el material de aporte E70S-2 por la gran cantidad de desoxidantes. (10).

Aceros al carbono rolados

Aceros al carbono que contienen de 0.15% a 0.30% de carbono son comúnmente llamados “Aceros de medio carbono”. Fracturas entre cordones o baja tenacidad en la zona afectada por el calor, usualmente no se encuentran cuando se utilizan aceros de medio carbono con no más de 0.20% de carbono y 1.0% de manganeso. Estos aceros pueden soldarse sin precalentamiento o post-calentamiento, o procesos especiales cuando se utilizan espesores menores de 25mm, y cuando los esfuerzos en las juntas a unirse no son severos.

De manera que el contenido de carbono se incrementa alrededor de 0.30% y contenidos de manganeso de 1.40%, la soldabilidad se mantiene bien, sin embargo, este tipo de soldaduras son más susceptibles a fracturas por hidrógeno debido a que se incrementa el endurecimiento y resistencia a la cedencia. Soldadura con proceso de bajo hidrógeno es recomendado precalentamiento y control de temperatura entre pases también es recomendado, particularmente cuando los espesores de las juntas son arriba de 25mm, o cuando los esfuerzos por el proceso son altos.

Algunos de los aceros de medio carbono son suministrados en condición de normalizado templado y revenido para proveer buena tenacidad y altas propiedades de resistencia. (10).

Aceros de medio carbono

Un cambio pronunciado en la soldabilidad de aceros al carbono toma lugar sobre el contenido del rango de carbono por arriba de 0.30% a 0.50%, los cuales se identifican como aceros de medio carbono. Aceros conteniendo alrededor de 0.30% y contenidos de manganeso menores de 1.5% tienen una relativamente buena soldabilidad. Sin embargo, con el incremento del contenido de carbono, los procesos de soldadura deben ser designados para evitar la formación de grandes cantidades de martensita en la zona afectada por el calor (ZAC). Si un acero contiene 0.50% de carbono son soldados generalmente con procedimientos para aceros al carbono rolados, la ZAC es básicamente dura, baja en tenacidad, y susceptible a las fracturas por hidrógeno.

Para mayores aplicaciones, aceros de medio carbono deberán ser precalentados antes de la aplicación de soldadura para tener un buen control de la velocidad de enfriamiento en la zona afectada por el calor, y al mismo tiempo el control de la formación de la martensita. El apropiado precalentamiento depende del carbono equivalente en el acero, espesores de la unión, y del procedimiento de soldadura. En general los requerimientos de la temperatura de precalentamiento se incrementan con altos contenidos de carbono equivalente, mayores espesores de juntas, o incrementos de hidrógeno en el arco de soldadura. Con carbono equivalentes en rango entre 0.45% y 60%, se recomienda una temperatura de precalentamiento en el rango de 95°C a 200°C, dependiendo del proceso de soldadura y del espesor de la unión (10).

Aceros de alto carbono

La soldabilidad de los aceros de alto carbono es muy pobre debido al alto endurecimiento y sensibilidad a las fracturas en el metal de soldadura y la zona afectada por el calor. Procesos de soldadura de bajo hidrógeno deben de ser utilizados para soldadura de arco. Precalentamiento y temperatura entre pases de 204 °C y arriba son requeridos para retardar la formación de martensita frágil de alto carbono en la soldadura y en la ZAC. El relevado de esfuerzos posterior a la

aplicación de la soldadura es recomendado, particularmente en uniones con calibres de espesores gruesos.

La selección adecuada del metal de aporte depende del carbono equivalente del acero, normalmente materiales de aporte no son producidos con alto carbono equivalente, sin embargo un electrodo de metal de aporte de bajo carbono es recomendado para muchas aplicaciones. Estos aceros son generalmente utilizados para aplicaciones que requieren alta dureza y resistencia a la abrasión, la cual es impartida por tratamiento térmico. El acero debe ser soldado en condiciones de recocido y posteriormente tratado térmicamente. (10)

2.3 Propiedades de los aceros HSLA

Los aceros de alta resistencia y baja aleación HSLA, están diseñados para proporcionar mejores propiedades mecánicas que los aceros al carbono convencionales. Estos aceros tienen generalmente límites de elasticidad de 290 a 550 MPa (42-80 ksi). Son también generalmente del tipo carbono-manganeso, con muy pequeñas adiciones de niobio y vanadio para asegurar tanto el refinamiento de grano, como el endurecimiento por precipitación. El término de aceros micro aleados se utiliza a menudo en referencia a estos materiales.

Los fabricantes suelen soldar estos aceros en la condición de laminados o normalizados. La soldabilidad de la mayoría de los aceros HSLA es similar a la de acero suave.

Aceros templados y revenidos. Son tratados con calor para proporcionar límites de elasticidad de 345 a 1035 MPa (50 a 150 ksi). ASTM A 514 y A 517 son ejemplos bien conocidos de esta categoría de acero. Otros ejemplos incluyen los aceros HY-80, HY-100, y HY-130 que son aceros de níquel-cromo-molibdeno cubiertos por especificaciones militares.

Ensambles soldados fabricados a partir de éstos materiales generalmente no necesitan someterse a tratamientos térmicos posteriores a excepción de un relevado de esfuerzos en algunas aplicaciones especiales. Por ejemplo, HY-100 y

HY-130 requieren controles sobre el contenido de carbono del material de aporte, mínimos y máximos precalentamiento entre pases, la entrada de calor, y después del tratamiento posterior de la soldadura para lograr las propiedades mecánicas de las normas militares deseadas. (11)

Ventajas de los aceros HSLA sobre aceros templados y revenidos

En ciertas situaciones, la Marina de los EE.UU sustituye aceros HSLA-80 por HY-80, y HSLA-100 por HY-100. Una ventaja significativa de esta sustitución es la reducción del precalentamiento de soldadura requerido para el endurecimiento por envejecido de cobre del acero HSLA frente a los aceros HY. También hay que señalar que los aceros HSLA- 100 no tienen una soldabilidad como los aceros suaves.

La susceptibilidad relativa de aceros al agrietamiento en frío inducido por hidrógeno

La Figura 2. 17 muestra dónde se encuentran diferentes clases de aceros en un diagrama de Graville. Éste ha sugerido que la susceptibilidad al agrietamiento en frío inducido por hidrógeno se puede evaluar mediante el cálculo del carbono equivalente (CE) y comparándolo con el contenido de carbono.

Aceros de la zona I tienen bajo contenido de carbono y de baja templabilidad y no son muy susceptibles al agrietamiento. En la zona III los aceros tienen tanto alto carbono equivalente, como alto endurecimiento y todas las condiciones de soldadura producirán microestructuras sensibles al agrietamiento. Por lo tanto, para evitar el agrietamiento en frío inducido por hidrógeno en los aceros de la zona III, el usuario debe aplicar procedimientos de bajo hidrógeno, incluyendo precalentamiento y tratamiento térmico posterior a la soldadura. Los aceros de la zona II tienen altos niveles de carbono con baja capacidad de endurecimiento. Por lo tanto, es posible evitar microestructuras sensibles al agrietamiento por la restricción de las tasas de velocidades de enfriamiento en la zona afectada por el calor (ZAC). Esto se puede lograr a través del control de entrada de calor y, en menor medida, con precalentamiento. (12)

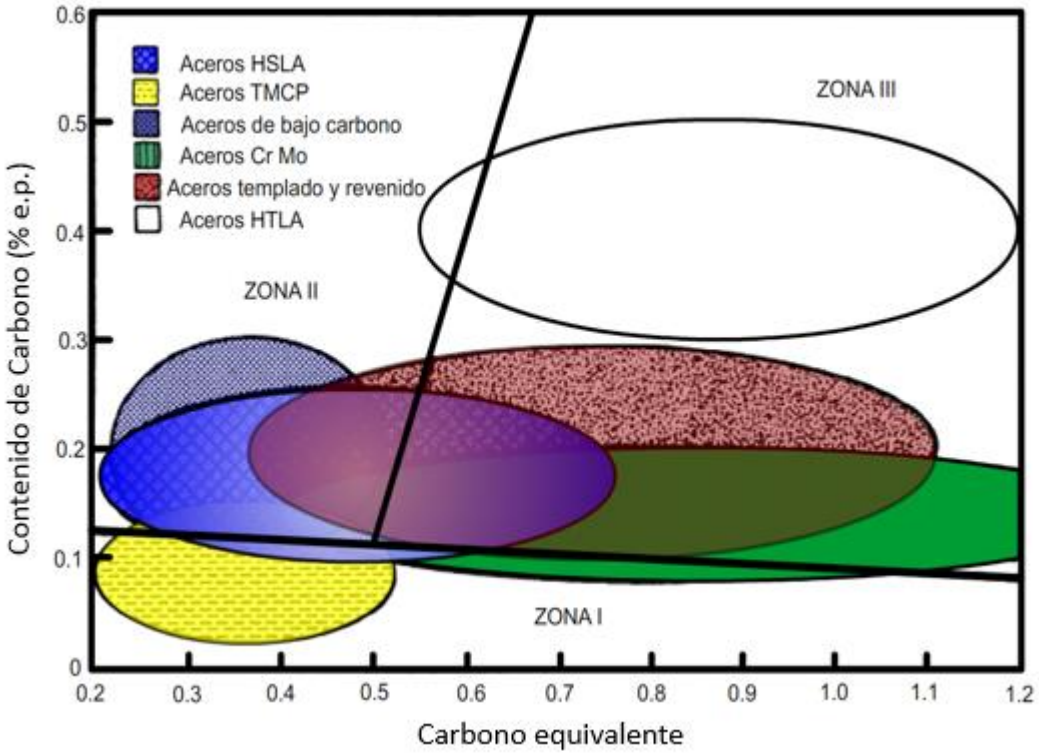


Figura 2. 17 Diagrama de Graville muestra la susceptibilidad de los aceros al agrietamiento en frio por hidrógeno inducido relativo al contenido de carbono equivalente. La susceptibilidad al agrietamiento en frio aumenta progresivamente a medida que los aceros emigran de las zonas I y II, a la III. (12)

Un concepto útil para entender la susceptibilidad al agrietamiento de los aceros al carbono y aleados, inducido por el hidrógeno es el carbono equivalente (CE), una relación empírica que intenta reducir el número significativo de variables que afectan a la soldabilidad de los aceros en una sola cantidad. Varias ecuaciones de carbono equivalente han sido desarrolladas para diferentes clases de aceros. Un ejemplo se muestra en la ecuación 1: (13)

$$CE = \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{\%Cr+\%Mo+\%V}{5} + \frac{\%Si+\%Ni+\%Cu}{15} \qquad \text{(Ec.1)}$$

Desde un punto de vista metalúrgico, la fórmula del carbono equivalente puede estar relacionada con el desarrollo de microestructuras sensibles al hidrógeno. Es decir, a medida que la equivalencia del carbono aumenta, la microestructuras se desarrolla durante el enfriamiento a través del rango de temperatura de transformación que son cada vez más susceptibles al

agrietamiento inducido por el hidrógeno. A valores altos de carbono equivalente, se puede esperar que las estructuras sean martensíticas.

Fórmulas de carbono equivalente son generalmente desarrolladas a partir de grandes bases de datos de las concentraciones críticas de hidrógeno y restricciones o contracciones en juntas de soldadura que se traducirá en agrietamiento inducido por hidrógeno en los aceros. (13)

En distintos niveles de carbono equivalente, ciertos requisitos de precalentamiento a menudo se establecen. Por ejemplo, cuando el carbono equivalente supera el 0,35%, se recomienda el precalentamiento para minimizar la susceptibilidad al agrietamiento por hidrógeno. En niveles altos de carbono equivalente, pueden ser requeridos ambos tratamientos de precalentamiento y post-calentamiento (13)

2.4 Defectos asociados con soldadura de arco

2.4.1 Plan de inspección

Para el promedio general de inspección de soldadura, generalmente involucra una completa examinación y un muestreo parcial aleatorio. De acuerdo a esto, todas las soldaduras deberán ser inspeccionadas visualmente. Estas muestras aleatorias parciales son usadas, utilizando uno o más métodos de examinación no-destructiva.

La inspección total es llevada a cabo con el aseguramiento de la alta calidad en los ensambles usados en condiciones críticas de servicio, uno o más métodos de inspección de pruebas no destructivas, acompañado por una inspección visual, puede ser especificado para uniones críticas.

Los métodos de examinación no-destructiva (NDE) más comúnmente utilizados para la inspección de soldaduras son:

1. Examinación Visual (VT)
2. Prueba Radiográfica (RT)
3. Prueba de Ultrasonido (UT)
4. Prueba de Partículas Magnéticas (MT)
5. Prueba de Líquidos Penetrantes (PT)
6. Pruebas Electromagnéticas (ET), y
7. Pruebas de emisión Acústica (AET).

2.4.2 Proceso de inspección

Para óptimos resultados, la actividad de inspección visual debe ocurrir en varias etapas durante el proceso de fabricación: antes de iniciar una operación de soldadura, durante la soldadura y subsecuentemente después de la aplicación de ésta, un efectivo programa de inspección visual generalmente resulta en el descubrimiento de defectos que pueden ser detectados después, pero a través de métodos no destructivos muy costosos. Consecuentemente un programa de inspección visual es altamente efectivo en costo cuando es implementado correctamente. (14)

La inspección de soldaduras usualmente incorpora características cuantitativas, así como cualitativas de la unión. Numerosas herramientas o estándares de medición están disponibles para la evaluación de las geometrías de la unión y ajuste, tamaño de soldadura, altura del refuerzo de soldadura, desalineamiento, y profundidad de socavado. Calibradores típicos utilizados para medir las soldaduras se muestran en la Figura 2. 18

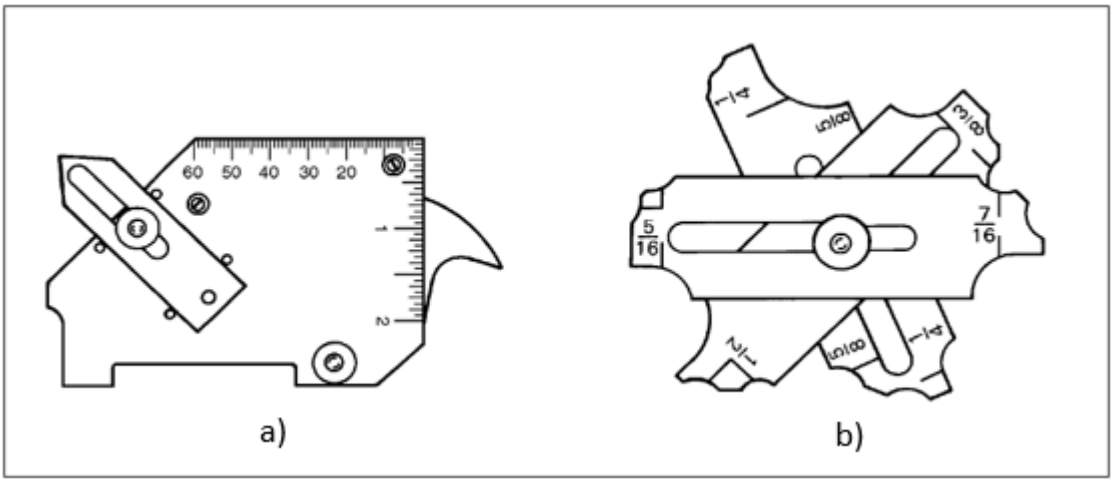


Figura 2. 18 Calibradores típicos para la medición de tamaño y forma de la soldadura: (a) Calibrador multipropósito y (b) Calibrador tipo regla para tamaño de soldadura de filete. (14)

2.4.2.1 Inspección antes de la soldadura

La examinación del metal base antes de la operación de soldadura puede revelar condiciones que causan defectos de soldadura. Escama, óxido, costuras, u otra condición desfavorable pueden ser identificados, como la laminación en las esquinas de las placas. El metal base deberá ser identificado por el tipo y grado de acero, y las dimensiones deben ser confirmadas dimensionalmente. Cualquier corrección necesaria puede ser hecha antes de proceder con el trabajo. Una vez que las piezas de trabajo han sido ensambladas, el inspector deberá revisar el ensamble con detalles que pueden afectar la calidad de la soldadura. Específicamente el inspector deberá examinar lo siguiente de acuerdo al cumplimiento de la especificación:

1. Preparación de ranuras, superficies, dimensiones y limpieza
2. Dimensiones de apertura entre placas y placas de soporte
3. Alineación entre piezas que están siendo soldadas
4. Proceso de soldadura y consumibles
5. Procedimientos de soldadura y ajustes de las máquinas
6. Temperatura de precalentamiento especificada; y
7. Calidad del punteo de soldadura.

2.4.2.2 Inspección durante la soldadura

Durante el curso de la soldadura, una examinación visual es el primer método de control de calidad. Los aspectos de calidad que pueden ser monitoreados en esta etapa incluyen lo siguiente:

1. Calidad de pases de raíz y cordones de soldadura posteriores
2. Condición de la raíz antes de soldar el lado opuesto
3. Tratamiento de puntos de soldadura
4. Adecuado precalentamiento y temperatura entre pases
5. Secuencia de pases para control de entrada de calor y distorsión
6. Limpieza entre pases de soldadura
7. Cumplimiento con el procedimiento especificado, y
8. Control de metal de aporte.

La porción más crítica de todas las soldaduras es el pase de raíz, debido a que muchos tipos de defectos están asociados con el área de raíz.

La abertura de raíz deberá ser monitoreada a medida que la aplicación de la soldadura avanza, especial énfasis deberá ser puesto en el adecuado punteo de las partes, la sujeción y espaciamiento de abertura de raíz para mantener la apropiada apertura y lograr una buena penetración y alineamiento.

2.4.2.3 Inspección posterior a la soldadura

Para permitir la detección y la segura evaluación de las discontinuidades, la superficie de la soldadura deberá ser limpiada para remover óxidos y escoria. La operación de limpieza debe ser cuidadosamente desarrollada para evitar marcas discontinuas que empobrecen la vista de la unión. Por ejemplo, golpes de martillo utilizado para remover la escoria ya que el martillo puede ocasionar pequeñas fisuras. La limpieza con granalla a alta velocidad puede ocultar discontinuidades y no debe ser utilizado antes de desarrollar la examinación visual de la soldadura.

La mayoría de los códigos y especificaciones describen el tipo y tamaño de discontinuidades que son aceptables, las siguientes discontinuidades, las cuales

son encontradas en la superficie de una soldadura terminada, pueden ser detectadas por examinación visual:

1. Fracturas
2. Socavados
3. Traslapes
4. Porosidad expuesta e inclusión de escoria
5. Perfil de soldadura inaceptable, y
6. Rugosidad de caras de soldadura

Características que son monitoreadas por examinación visual después de concluir la soldadura incluyen lo siguiente:

1 Apariencia final de la soldadura
2 Precisión dimensional
3 Exceso de soldadura
4 Tamaño de soldadura final
5 Cantidad de distorsión, y
6 Tratamiento térmico posterior.

La apariencia superficial de la soldadura debe cumplir los requerimientos estándar. Estándares visuales o probetas de soldadura suministradas por el fabricante y de acuerdo con el comprador pueden ser utilizados como guía para calificar la apariencia.

2.5 Tipos de uniones

2.5.1 Diseño de uniones de soldadura

Las cargas en una estructura soldada son transferidas de un miembro a otro a través de soldaduras localizadas en la unión. Los diferentes tipos de uniones utilizadas en construcciones soldadas y las soldaduras aplicables son mostradas en la Figura 2. 19. Combinaciones de soldadura pueden ser utilizadas para conectar una unión, dependiendo de los requerimientos de resistencia y

condiciones de carga. Por ejemplo, soldaduras de filete y ranura son frecuentemente combinadas en esquina y uniones en “T”. (15).

Las uniones de soldadura son diseñadas primeramente para cumplir la resistencia y requerimientos de desarrollo para las condiciones bajo las cuales deben de desarrollar. La manera en que el esfuerzo será aplicado en servicio, ya sea en tensión, compresión, corte, doblez, torsión, o una combinación de ellas, deberán ser consideradas.

Sin embargo estos procesos y uniones están dados con un estatus de precalificados, provistos para cumplir los procesos de soldadura y otros requerimientos específicos del código de acero estructural de Soldadura, AWS D1.1 (16)

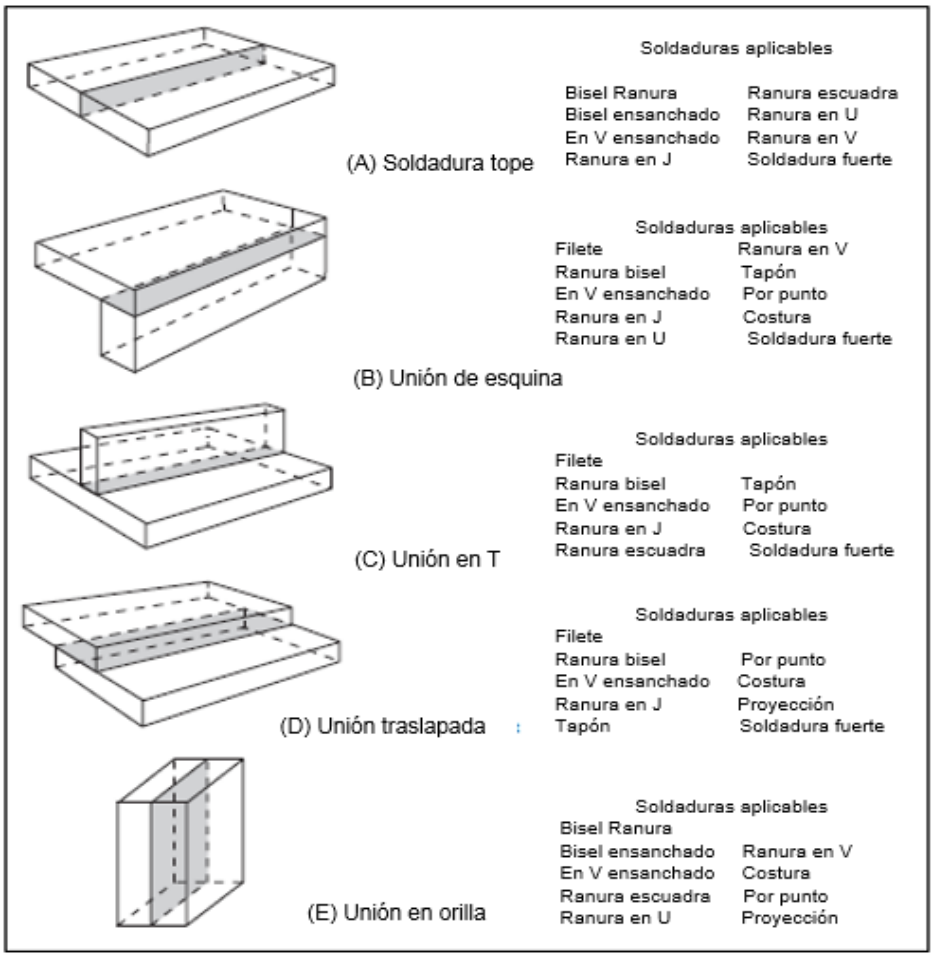


Figura 2. 19 Tipos de juntas. (16)

CAPÍTULO 3

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LA BIBLIOGRAFÍA

Durante la investigación y consulta de la bibliografía referente a la aplicación de soldadura por arco metálico, se mencionan las diferentes variables de influencia en el proceso, estas van desde el tipo de trasferencia utilizado, tipo de gases usados en forma individual, así como combinaciones de mezclas para lograr las diferentes transferencias, las cuales dan como resultado final las características físicas y de resistencia de la unión soldada. Se hace hincapié que la investigación bibliográfica está basada en la aplicación del proceso de arco metálico GMAW.

El caso de estudio se basa en la comparativa de la aplicación del proceso GMAW-corto circuito, proceso convencional contra el proceso de nueva tecnología GMAW-control de baja salpicadura (LSC) y determinar ventajas de aplicación entre los dos procesos con el objetivo de reducir costos por uso de mezcla de gas argón las cuales son caras, sustituyéndola por el uso de un gas barato como lo es

el gas CO_2, manteniendo las características de calidad y resistencia necesarios para cumplir con los estándares de calidad por norma.

Se puntualizó en la investigación bibliográfica en lo referente a tipos de transferencia y el efecto de los gases sobre los aceros y se destaca lo siguiente. En estudios realizados por S. Mukhopadhyay (5) referente al efecto de la mezcla de gas de protección sobre aceros HSLA, con el proceso de soldadura por arco, utilizando alambre sólido (GMAW) y tubular (FCAW). Señala que la calidad, eficiencia y operatividad del proceso GMAW son fuertemente dependientes de la composición de la mezcla de gases. También concluye que los gases utilizados para lograr los tipos de transferencia influyen directamente en la formación de fases y en este caso diferentes tipos de ferrita se forman con el cambio de porcentaje en el uso de gases como lo son el O_2 y CO_2. Así mismo las propiedades de cedencia (YS) y la resistencia máxima (UTS) se incrementan con el contenido de oxígeno (hasta 4%), en la mezcla de gas. Mayores incrementos de la cantidad de oxígeno resultan en una reducción en la resistencia máxima UTS y en % de alargamiento del metal de soldadura.

Por otro lado, en estudios realizados por Irina Boiko (6) mencionan que la industria metalmecánica es una de las brechas que han crecido en la demanda y competitividad de reducción de costos y recursos humanos, desarrollando y adquiriendo nuevos procesos y tecnologías que contribuyan al volumen de producción. Una conclusión importante de este estudio es referente a que a pesar de los bajos costos del gas CO_2, éste último no provee el menor costo de soldadura. Y se puede concluir que la mezcla de gas Ar con 8 % CO_2 es la mejor opción para el acero S235 con el proceso MAG. (6). La otra conclusión importante es que el costo de la mezcla de gases en el proceso de soldadura es de solo un 5% del total de los costos.

En cuanto al efecto de la estabilidad en la transferencia de metal (salpicaduras) sobre la generación de humos, morfología, y composición, en corto circuito, según estudios realizados por Valter Alves de Meneses (9), el proceso de soldadura MIG/MAG es uno de los procesos más aplicados en la industria de

manufactura y un modo operacional muy comúnmente utilizado es la transferencia de corto circuito. Esto lleva a una relación directa con el uso de bajos parámetros de soldadura y mezclas reactivas a la producción de humos y salpicadura, sin embargo se concluye que la estabilidad del metal de transferencia, generación de salpicaduras, y la velocidad de generación de humos no influencia en el tamaño de partícula, ni en la forma o composición de los humos.

Desafortunadamente aún y cuando las referencias bibliográficas apuntan solo al proceso convencional en un porcentaje muy elevado y solamente una pequeña información relacionada a la nueva tecnología, se ha podido establecer comparativas en cuanto al funcionamiento de los procesos de arco metálico convencionales por corto circuito y aquellos de tecnología nueva, también en modo de corto circuito pero controlados por una onda de pulso rectificada que propicia la diferencia entre los dos procesos.

Finalmente con el análisis de la bibliografía de este caso de estudio, lleva a puntualizar en las diferencias sustanciales de los dos procesos, tales diferencias estriban en los conceptos, variables y aplicaciones siguientes: materiales utilizados como el tipo de acero, tipo de mezclas o gases utilizados, parámetros en el proceso de soldadura, efectos en las propiedades mecánicas, geometrías y perfiles en las aplicaciones de soldadura, posiciones y uniones de soldadura.

CAPÍTULO 4

CASO DE ESTUDIO

La investigación bibliográfica en la cual se basa este caso de estudio consiste en la soldabilidad de un acero HSLA A572-50 utilizando 100% gas de protección CO_2, apoyado con una nueva tecnología que utiliza corriente eléctrica con longitud de onda rectificada, lo cual le da estabilidad a la aplicación. Comparándola contra el proceso convencional el cual exhibe una transferencia de onda no rectificada lo cual disminuye la estabilidad de arco, no importando que la mezcla de gas utilizada contenga alto contenido de argón que proporciona estabilidad de arco eléctrico, pero que a la vez encarece el proceso por su alto costo.

4.1 Metodología

Para dar el seguimiento adecuado a las diferentes actividades y pruebas requeridas para realizar el comparativo entre los 2 procesos (nueva tecnología y tecnología convencional), se desarrolló un diseño de experimentos con las variables y pruebas necesarias para determinar la factibilidad de su aplicación industrial.

Para las pruebas de soldabilidad, mecánicas, inspección, evaluación de microestructura, se aplicaron las siguientes normas: Código estructural AWS D1.1, ASTM A572-50, AWS-A5.18, AWS B4.0M:2000(R2010).

La caracterización de microestructura fue a través de microscopía óptica (MO), equipo marca Leco, modelo LM100. Para los ensayos de tensión de esfuerzo cortante, se utilizó una máquina universal Tinius Olsen, modelo 1980.

Finalmente se reúnen y se analizan los resultados para llegar a las conclusiones, a partir de las siguientes actividades Tabla 4. 1

Tabla 4. 1 Descripción de actividades para el desarrollo de experimentación

DESARROLLO EXPERIMENTAL (DOE)		
Actividad	**Proceso LSC**	**Proceso convensional**
Gas utilizado	100% CO_2	90% Ar, 10% CO_2
Transferencia	Corto circuito	Corto circuito
Ensayo de tension, esfuerzo cortante	X	X
Ensayo metalografico	X	X
Caracterizacion de microestructura	X	X
Macroataque: Penetracion	X	X
Microdureza: Zac, soldadura, material	X	X
Fractografía: Zona de fractura	X	X
Perfil de soldadura	X	X

4.2 Material: Acero de alta resistencia y baja aleación (HSLA)

Características: Acero estructural soldable y de baja aleación, aleado con niobio y vanadio como refinadores de grano. Sus propiedades mejoradas permiten reducir espesores y peso de estructuras utilizadas en puentes, carrocerías, edificios, equipos de transporte y estructuras en general.

Las probetas de este material (dimensiones) para la experimentación fueron de 150 mm X 300 mm X 6 mm, con un tipo de unión tipo traslape con intersección de 1 pulgada entre ellas. **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**,

unión de placas tipo traslape con dimensiones de 150mm x 300mmX 6mm, en acero ASTM A572-50

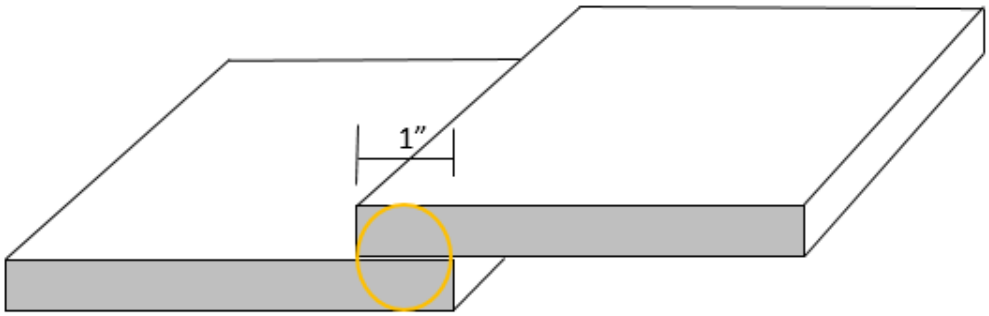


Figura 4. 1 Unión de placas tipo traslape con dimensión de 150mm X 300mm X 6mm, acero ASTM A572-50

La composición química de este material de prueba se muestra en la Tabla 4. 2

Tabla 4. 2 Composición química (% e.p.) de acero A572-50 utilizado en la experimentación.

Elemento	C	Mn	P	S	Si	Cu	Cr	Ni	Mo	Al	V	Nb	Ti	Sn
% e.p	0.163	0.818	0.016	0.006	0.04	0.014	0.023	0.015	0.008	0.036	0.003	0.001	0.002	0.001

Las propiedades mecánicas típicas de este acero se muestran a continuación en la Tabla 4. 3

Tabla 4. 3 Propiedades mecánicas de acero utilizado ASTM A572-50.

Esfuerzo Fluencia		Esfuerzo Tracción		Elongacion %
Kg/mm^2	MPa	Kg/mm^2	MPa	
35 (min)	345 (min)	46 (min)	450 (min)	21 (min)

4.3 Material de aporte: ER70S-3

El electrodo utilizado tiene una designación AWS A5.18. Especificación para electrodos de aceros al carbono y varillas para soldadura por arco protegido con gas. El proceso utilizado en esta investigación es el de GMAW.

Este electrodo está manufacturado bajo la norma ASTM A36/A 36M especificación para aceros estructurales al carbono. A continuación se muestra la Tabla 4. 4 de requerimiento de composición química para electrodos y varillas sólidos (17).

Tabla 4. 4 Composición química (% e.p.) para electrodos y varillas sólidos.

Clasificacion AWS		% en peso.												
A5.18	A5.18M	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	V	Cu	Ti	Zr	Al
ER70S-3	ER48S-3	0.06 a 0.15	0.90 a 1.40	0.45 a 0.75	0.03	0.04	0.2	0.2	0.2	0.03	0.5			

El calibre utilizado es de 0.045” (1.2mm) y es del tipo de electrodo de alambre con recubrimiento de cobre y de alimentación continúa.

4.4 Proceso de soldadura y preparación de la unión: GMAW

Las uniones de prueba utilizadas son de preparación de junta tipo traslape con una dimensión de 150mm X 300mm X 6mm, acero ASTM A572-50. La soldadura que se aplica es de un pase de filete de 6mm en ambas geometrías, tal y como se muestra en la Figura 4. 2

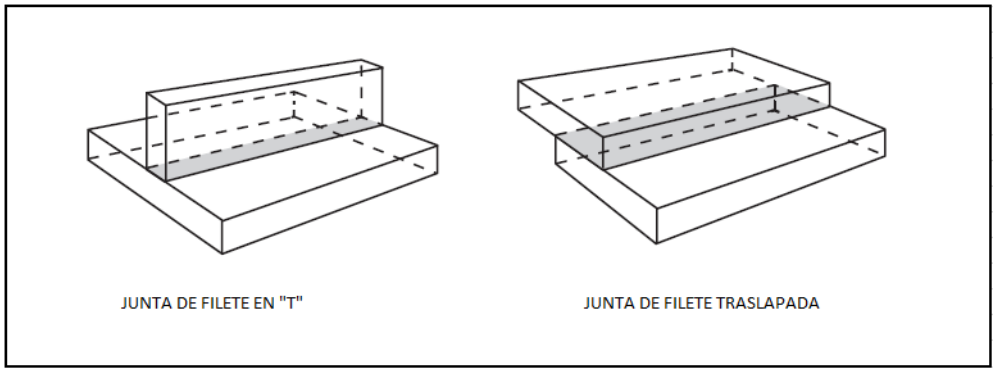


Figura 4. 2 Detalle de uniones utilizadas en el proceso de experimentación. (16)

En la aplicación de soldadura de los 2 procesos de estudio, se utilizaron parámetros de soldadura, los cuales se muestran en la Tabla 4. 5

Tabla 4. 5 Parámetros de soldadura utilizados en el caso de estudio.

Proceso	Aplicación	Metal de aporte	Diametro	Tipo de polaridad	Velocidad de desplazamiento	Amperaje	Voltaje
Control de baja salpica	GMAW	ER70S-3	1.2mm	CDEP	Parametrizacion		
Proceso convencional	GMAW	ER70S-3	1.2mm	CDEP	6.15 in/min.	116	18

4.5 Calor de entrada y su efecto en la microestructura

Uno de los factores importantes es el calor de entrada en el proceso de fusión y solidificación en la aplicación de una soldadura. El control de los parámetros de entrada para soldar una unión entre metal base y soldadura, determinan la severidad en la transición estructural entre el metal de soldadura y material base, dicha zona de transición es llamada zona afectada por el calor (ZAC), y sus características microestructurales son determinadas por el calor de entrada y la velocidad de enfriamiento. A continuación se realizó el cálculo de entrada de calor de los dos procesos analizados en este caso de estudio, de acuerdo a la ecuación 2. (3).

$$Q = \frac{EI}{V} \qquad \text{(Ec.2)}$$

Donde:

E = Voltaje constante

I = Corriente constante

V = Velocidad de desplazamiento

Eficiencia de la fuente de calor.

En el proceso GMAW: A diferencia de GTAW, la transferencia de calor al electrodo puede ser transferido de vuelta a la pieza de trabajo a través de gotitas de metal, mejorando de esta manera la eficiencia de arco. En la Figura 4. 3 podemos observar la eficiencia de calor de diferentes procesos en los que se observa el proceso GMAW con una eficiencia del 80%. (3)

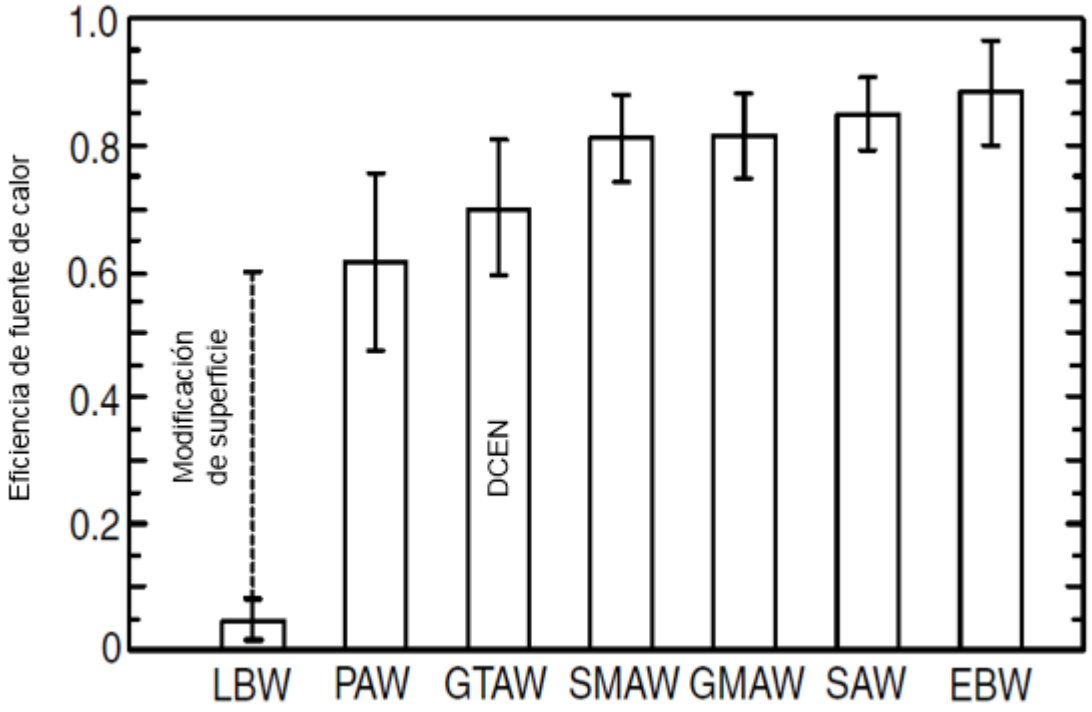


Figura 4. 3 Eficiencia de fuentes de calor en varios procesos de soldadura. (3)

En cada proceso analizado, se aplicó un solo cordón de soldadura debido al espesor de placa de 6mm. De acuerdo a la selección de parámetros de cada proceso se obtienen resultados que se presentan en la Tabla 4. 6

Tabla 4. 6 Calor de entrada aplicado en los distintos cordones de los diferentes procesos estudiados.

Proceso	Cordones	Calor de entrada (Q)
Proceso convencional	1	20 kJ/cm
Proceso LSC	1	30 kJ/cm

4.6 Proceso de caracterización: Zona afectada por calor, Soldadura y Metal base

El proceso de caracterización en la investigación de la estructura de los metales inicia con la preparación de la muestra, cortando la sección a estudiar y montándola en bakelita para el inicio de desbaste y pulido hasta dejarla en acabado espejo (18). Subsecuente a este proceso lleva un ataque con reactivo químico Nital al 3% en este caso para observar la microestructura y al 10% para revelar la macroestructura de las muestras y observar la unión de soldadura como lo es el metal base, zona afectada por el calor y la propia soldadura.

Las muestras sometidas a estudio fueron tomadas de las pruebas realizadas con los 2 procesos, en los cuales la aplicación de soldadura fue mediante el proceso de soldadura de arco metálico GMAW, y estas fueron caracterizadas mediante microscopia óptica básica (MO), con un equipo marca Leco, modelo LM100AT. Los aumentos (magnificación) utilizados para la determinación del tipo de microestructura en la unión fueron de 100X y 400X.

4.7 Resultados de la caracterización, junta de filete traslapada

A continuación se puede observar la estructura y las intersecciones entre la unión soldada de un acero A572-50 a través del proceso de soldadura. Las zonas a destacar es la del metal base, zona afectada por el calor (ZAC) y la soldadura.

Las Figura 4. 4 y Figura 4. 5 muestran el cambio de estructura a través de la unión lograda entre material base y soldadura de los dos procesos estudiados en aumentos de 100X y 500X respectivamente.

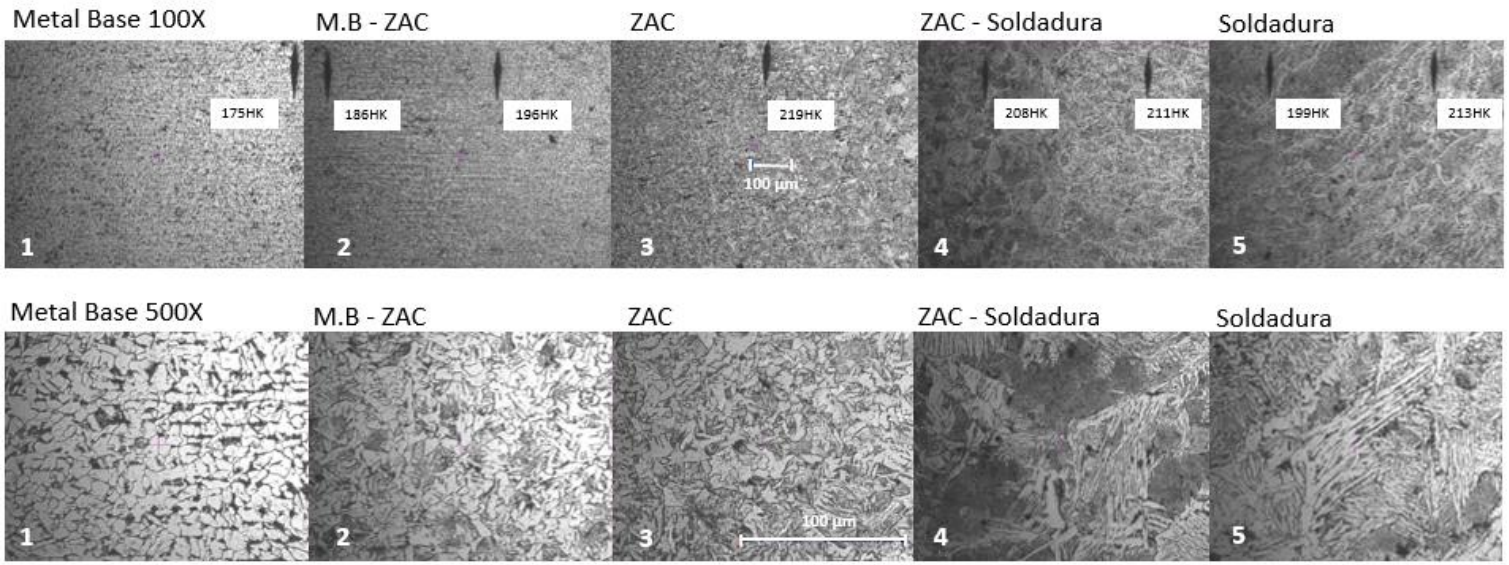


Figura 4. 4 Desarrollo de la estructura en la unión de soldadura (Convencional).

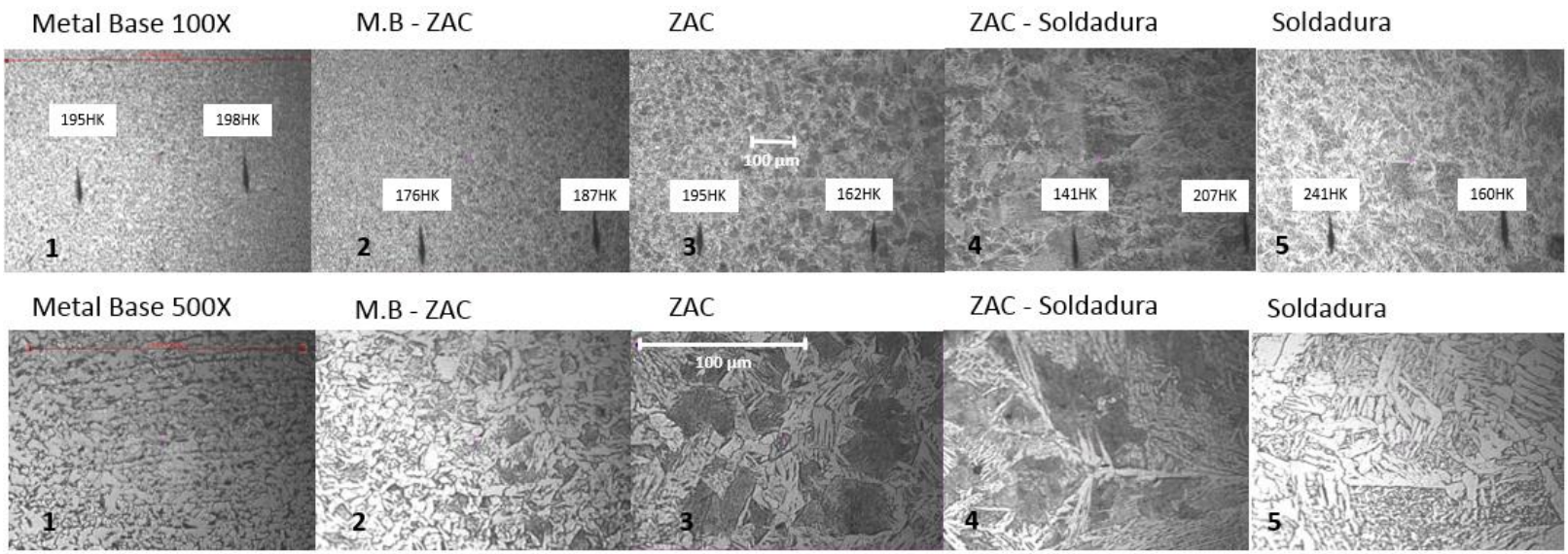


Figura 4. 5 Desarrollo de la estructura en la unión de soldadura (LSC).

4.7.1 Material base

La microestructura del material base se analiza a una magnificación de 500X, para lograr una mejor caracterización de la estructura presente original antes de someterse a la unión con soldadura. Figura 4. 6 muestra una estructura perlítica perfectamente alineada de acuerdo a la orientación del rolado. La distribución es de un 70/30, balance entre la fase ferrítica de color blanco y la fase perlítica

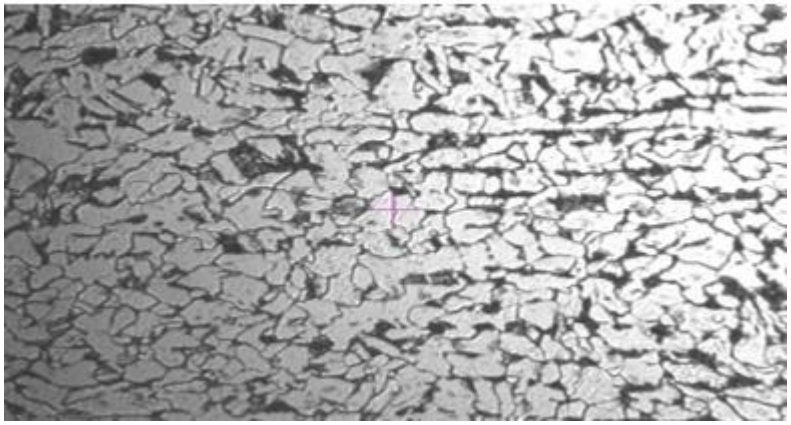


Figura 4. 6 Estructura perlítica, típica de un acero HSLA A572-50, placa de acero rolado en caliente, 6 mm espesor, con ataque químico nital 3%, 500X.

4.7.2 Zona afectada por el calor

La zona afectada por el calor ha sido caracterizada a 500X para los dos procesos analizados en este caso de estudio. En la microestructura identificada como proceso convencional mostrado con la letra a) de la Figura 4. 7 se puede observar una estructura de ferrita y perlita con una falta de granos equidistantes y dureza de 219 HK, lo cual indica un enfriamiento poco uniforme mientras en la microestructura del proceso de baja salpicadura mostrado con la letra b), se observa también estructura de ferrita y perlita de granos más uniformes con una dureza más baja de 176 HK, lo que indica una menor velocidad de enfriamiento y una estructura más homogénea.

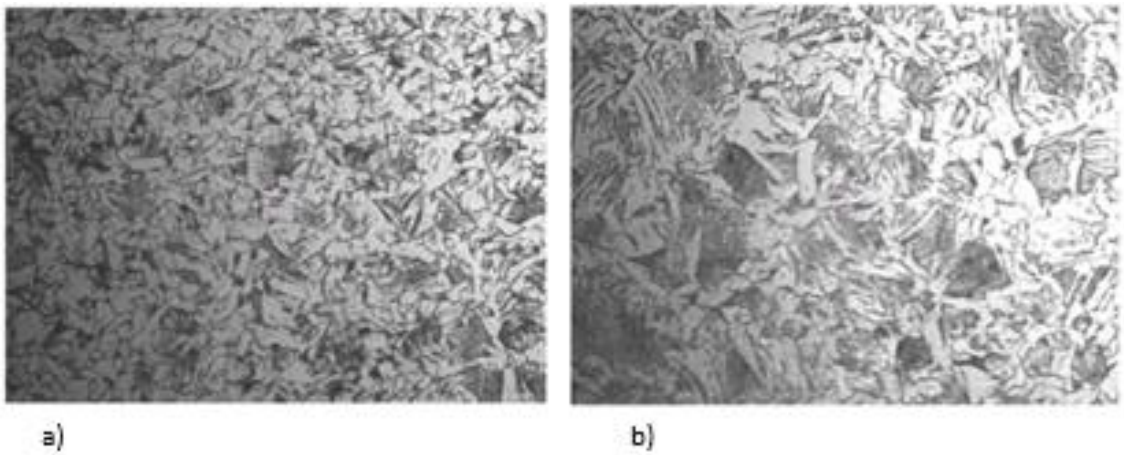


Figura 4. 7 Estructura de ZAC tomada a 500X, a) Proceso convencional, Perlita y Ferrita con una falta de granos equidistantes. b) Proceso de baja salpicadura (LSC). Ferrita y perlita Widmastatten

4.7.3 Zona de soldadura

En la estructura obtenida del proceso convencional en la zona de soldadura, se puede observar componentes de ferrita y perlita con estructura Widmanstätten, con una dureza en el rango de 199-213 HK, mientras que en la estructura del proceso de baja salpicadura, mostrado en b) se obtuvo una estructura de perlita y ferrita con un tipo de Idiomórfica (dureza de 160HK). Estas diferencias de estructura se muestran en Figura 4. 8

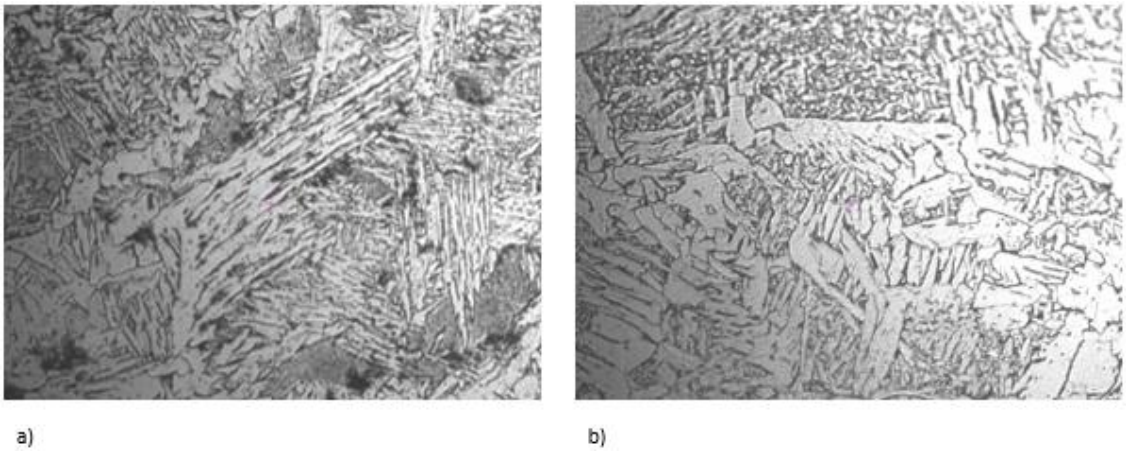


Figura 4. 8 Estructura de aplicación de soldadura compuesta de perlita y ferrita tomada a 500X. a) Proceso convencional. Ferrita y Perlita, con estructura widmanstatten. B) Proceso Baja Salpicadura (LSC). Ferrita y Perlita, con estructura idiomorfica

4.7.4 Efecto de la actividad de cobertura del gas oxígeno sobre la microestructura del metal de soldadura del proceso de arco metálico, en la aplicación de aceros microaleados HSLA

La nucleación y crecimiento de grano en aceros HSLA está influenciado por la velocidad de enfriamiento y la composición química. Este mecanismo se lleva a cabo a través de la nucleación de óxidos durante el proceso de soldadura, estas partículas de óxido se determinan por el tipo de soldadura y los gases utilizados, en esta investigación se variaron el tipo de gas, tipo de electrodo utilizado como soldadura y la entrada de calor. Varios tipos de mezcla de argón y CO_2 fueron utilizados. Desde que las propiedades del metal de soldadura son dependiente de la microestructura, cambios en las velocidades de calentamiento y enfriamiento y la composición química afectaran las propiedades del metal de soldadura (19).

1. La fracción de volumen de ferrita acicular es definitivamente influenciada por el oxígeno y el contenido de dióxido de carbono en el gas argón como cobertura.
2. El proceso de soldadura por arco metálico puede lograr aceptables microestructuras de metal de soldadura en aceros microaleados de niobio solo con la combinación adecuada de alambre de soldadura, gases de protección y entrada de calor.

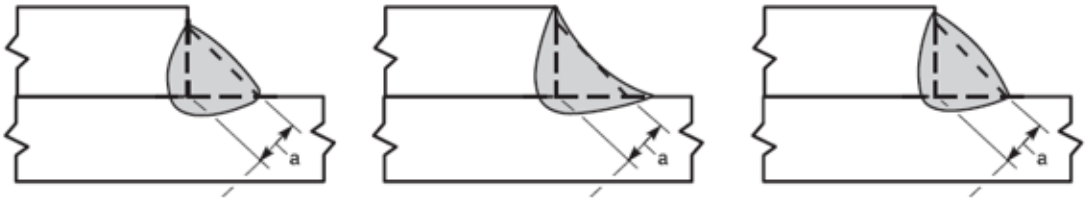
4.8 Resultados. Pruebas de tensión de esfuerzo cortante

Pruebas de soldadura en uniones filetes traslapados: Las pruebas de soldadura se realizaron en unión tipo traslape en posición vertical ascendente y aplicación de filete, como se muestra en la Figura 4. 9 con el objetivo de comparar los procesos de estudio y técnicas utilizadas en ellos para determinar la calidad y eficiencia de la unión.

Figura 4. 9 Estructura de aplicación de soldadura compuesta de perlita y ferrita tomada a 500X del proceso convencional y de baja salpicadura

4.8.1 Pruebas mecánicas.

Las pruebas mecánicas de tensión serán invalidadas si la fractura ocurre en el material base (20), y el esfuerzo cortante será calculado de acuerdo a Figura 4. 10**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** referente al tipo de unión y prueba de esfuerzos de corte o cizalla.



Garganta teórica Convexa | Garganta teórica Concava | Garganta teórica Piernas desiguales

$$\tau = \frac{P}{LXa}$$

Donde:
τ = Resistencia, esfuerzo de corte en la soldadura
P = Carga
L = Longitud total de la soldadura sometida al esfuerzo de corte
a = Dimension teórica de la garganta

Figura 4. 10 Cálculo del esfuerzo cortante o Cizalla. (20)

Las pruebas de esfuerzo cortante (tensión) se realizaron con el objetivo de determinar la resistencia mecánica de las uniones soldadas tipo traslape y observar que la fractura sucediera en alguna parte de la unión de soldadura y no en metal base de acuerdo a los requerimientos de la norma (20). Estos resultados se aprecian en la Tabla 4. 7.

Tabla 4. 7 Pruebas de esfuerzo cortante de los 2 procesos analizados

Probeta	Proceso	Ancho (mm)	Carga máxima kgf	Ezfuerzo cortante τ (mpa)	Promedios esfuerzos τ (mpa)	Desv. Estándar	Zona de ruptura
1	Convencional	12	2030	470			ZAC
2	Convencional	12	1852	428	472	45.5	ZAC
3	Convencional	12	2260	519			ZAC
4	LSC	12	1757	407			ZAC
5	LSC	12	2530	586	496	89.5	ZAC
6	LSC	12	1178	495			ZAC

Como conclusión respecto a la zona de ruptura en ambos procesos estudiados la fractura se observó en la unión del metal base y la soldadura

típicamente conocida como la zona afectada por el calor, esto se puede observar en la Figura 4.12. Lo cual le da validez a la prueba y resultados obtenidos.

A continuación se puede observar en la gráfica de esfuerzos cortantes, mostrados en la Figura 4. 11, hay un incremento importante en las propiedades mecánicas resultantes del proceso de baja salpicadura “LSC”.

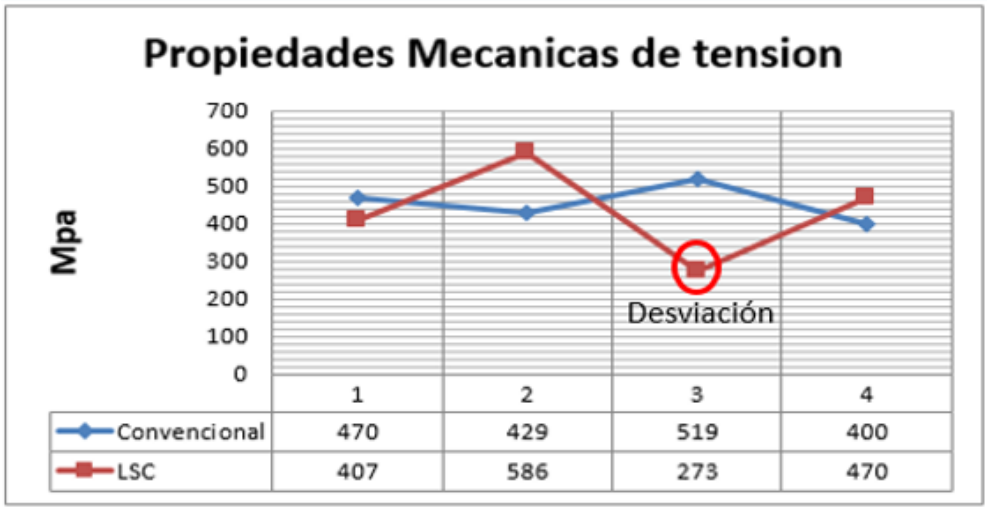


Figura 4. 11 Gráfica de esfuerzo cortante de los 2 procesos analizados

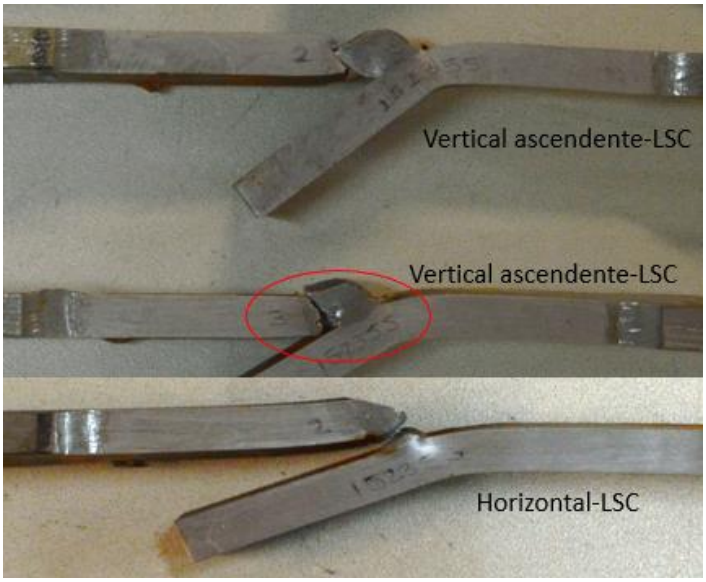


Figura 4.12 Fotografía mostrando la forma de falla en probetas del proceso LSC.

Las pruebas de tensión de esfuerzo cortante se realizaron en una máquina universal como se puede observar en la Figura 4. 13.

Figura 4. 13 Fotografía del ensayo de tensión en la unión de soldadura, acero ASTM A572-50 para ambos procesos estudiados.

4.8.2 Medición de características de la unión de soldadura.

Es importante medir estas características de forma, como penetración, ruptura y perfil, ya que de estas depende la calidad visual y resistencia. Algunas de ellas de manera indirecta en cuanto a la resistencia y tenacidad de la unión soldada.

4.8.2.1 Perfil de soldadura.

El contorno de la soldadura en una prueba de filete en términos de cara de soldadura, mientras más se acerca a una forma plana como parte de una hipotenusa, más perfecto será (21) y por consiguiente su resistencia a cargas sometidas de tensión, compresión, inclusive a la fatiga será mejorada.

En relación a este caso de estudio, los perfiles mostrados en soldadura de filete de ambos procesos, se muestra una convexidad excesiva, sobre todo en el proceso LSC, obtenida debido a la posición de la junta de vertical ascendente. Este perfil obtenido definitivamente no favorece a ninguno de los dos procesos analizados. Este perfil se puede observar en las fotografías siguientes representadas en la Figura 4. 14.

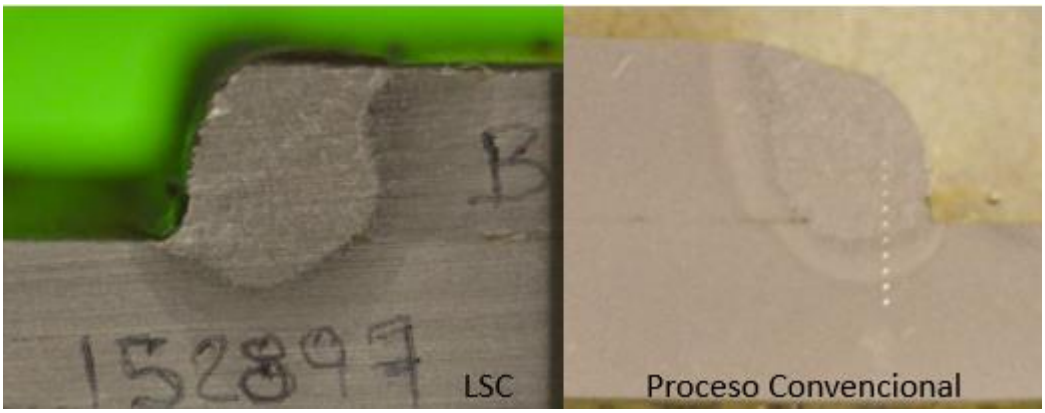


Figura 4. 14 Perfiles de soldadura de filete en los dos procesos analizados.

4.8.2.2 Fractografía (ruptura)

Las muestras sometidas a tensión cortante tanto del proceso convencional como de baja salpicadura, presentaron fractura dúctil en la mayoría de los casos, a excepción de una de las probetas #3 (LSC) que presentó comportamiento frágil, debido principalmente a faltas de fusión en placa superior de la unión y probable contaminación de escoria (centro de la soldadura) como se puede observar en la Figura 4. 15 que muestra este tipo de defecto en la fractura.

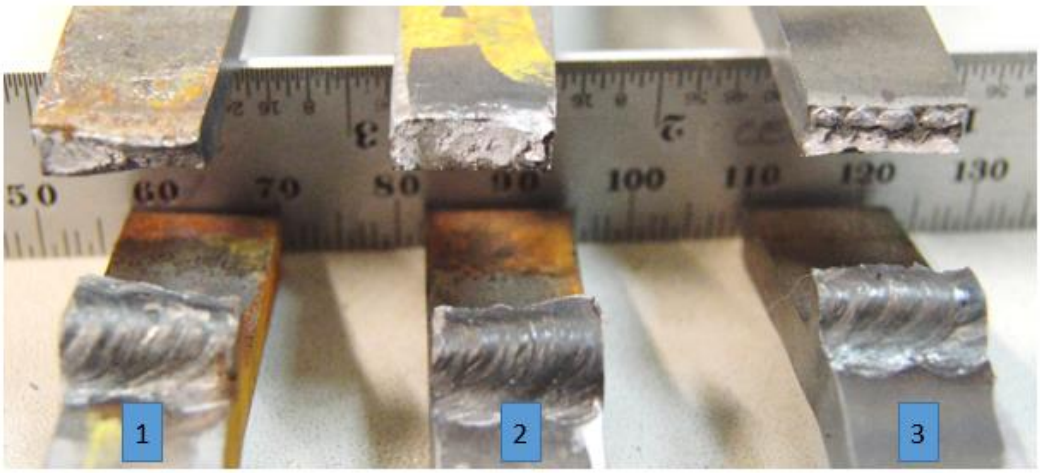
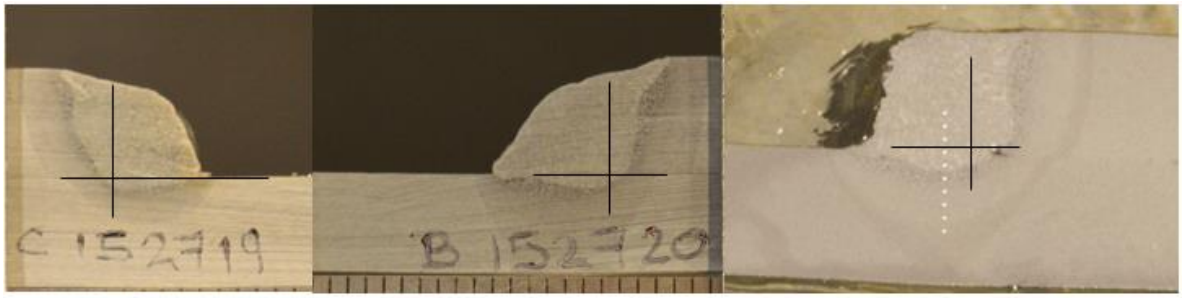


Figura 4. 15 Perfiles de soldadura mostrando falta de fusión e inclusiones, principalmente en la muestra #3 del proceso LSC.

4.8.2.3 Macroataque (fusión y penetración de soldadura)

Los cortes y preparación de muestras muestran una buena fusión de soldadura y buena penetración, esta última debido al tipo de unión traslapada es difícil medir, ya que las referencias del perfil de soldadura fusionado se pierden por el contorno fundido. Sin embargo teniendo en cuenta que la aplicación de soldadura se ha realizado bajo el proceso GMAW de corto circuito, este tipo de características es aceptable en términos de especificación (16). A continuación se puede observar estos perfiles de ambos procesos en la Figura 4. 16, representando estas 2 características.



Proceso Convencional Proceso LSC

Figura 4. 16 Perfiles de soldadura mostrando fusión y penetración.

4.8.3 Prueba de dureza.

Los ensayos de dureza practicados tienen como finalidad determinar el cambio de propiedades mecánicas que sufre la unión de soldadura a través de las regiones generadas con el cambio o gradiente de temperatura que estas zonas experimentan con la fusión y solidificación de la unión soldada. La microdureza practicada es en escala Knoob (HK), con la cual ayuda a verificar y confirmar el tipo de estructura y constituyentes que se forman durante el enfriamiento de la unión. Los resultados se pueden observar en la Tabla 4.8.

Tabla 4.8 Mapeo de dureza de los 2 procesos analizados.

ZONA DE LA UNION - Dureza Knoop (HK)										
PROCESO	MATERIAL BASE			ZAC			Soldadura			
Convencional -Hztal	175	185	186	196	219	205	208	211	199	213
Convencional -Vert.	158	166	158	175	179	197	239	208	192	197
LSC -Hztal	183	177	193	190	212	213	224	206	162	206
LSC -Vert.	118	133	139	137	165	175	172	181	177	188

Estas lecturas se interpretan mejor en la gráfica de la Figura 4. 17, mostrando el comparativo entre los dos procesos en investigación.

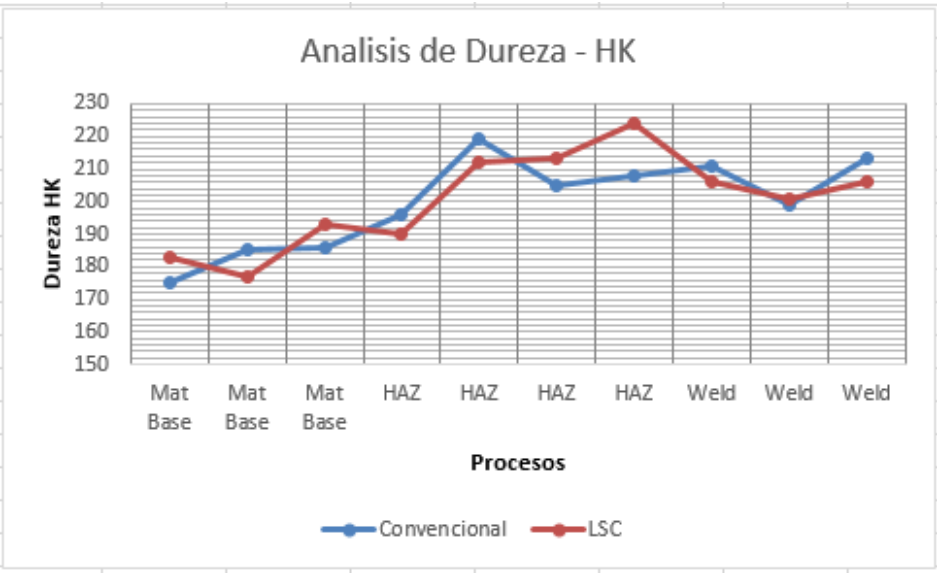


Figura 4. 17 Comparativo de durezas entre los dos procesos de estudio

Capítulo 5: CONCLUSIONES

Después de haber realizado la investigación bibliográfica referente a la utilización de acero HSLA A572-50, en aplicación del proceso de soldadura de arco metálico por corto circuito, proceso GMAW y de haber concluido con el caso de estudio relacionado a las características físicas, químicas y funcionales de estas dos aplicaciones, se concluye lo siguiente.

1. Dentro de la investigación bibliográfica referente tanto al proceso convencional como al proceso de baja salpicadura, se concluye que la información existente dentro de las instituciones relacionadas al ramo de la soldadura (véase bibliografía consultada) solo cuentan con la información de procesos convencionales y no aún con lo relacionada a desarrollos de alta tecnología como lo es el caso en el que se está analizando un nuevo proceso con cambio de características de transferencias de soldadura motivados por el uso de ondas rectificadas, que le dan estabilidad y mejoran el desarrollo y aplicación de los electrodos convencionales.
2. Uno de los puntos importantes a evaluar en el comparativo de los dos procesos, es el caso del tipo de gas utilizado. Tradicionalmente se utiliza la

mezcla de gas para lograr una transición de perfil suave y proporcionar una buena calidad. El reto del análisis fue la investigación y experimentación de utilizar solamente un gas reactivo como lo es el CO_2, el cual en teoría mejora las propiedades de penetración, es más barato, pero a la vez, por su naturaleza oxidante, genera pérdida de material por la generación de salpicadura. Esto por la inestabilidad del arco que se genera en el proceso convencional. Además de que se incrementa el tiempo de ciclo por la limpieza que se invierte en la remoción de las salpicaduras. Sin embargo el planteamiento fue usarlo con un proceso de nueva tecnología llamada "Proceso de baja salpicadura".

Se puede concluir que, con el uso de la nueva tecnología del proceso LSC, se puede utilizar gas CO_2, en lugar de la mezcla de gas Ar-CO_2, la cual es más costosa en relación de 4/1.

3. Respecto a la caracterización de las microestructuras obtenidas en ambos procesos, se puede concluir lo siguiente. El comportamiento entre los dos procesos, en materia de estructura interna es muy similar, dentro de la zona afectada por el calor y la zona de soldadura su estructura en ambos casos de Ferrita y Perlita con variaciones en el tipo de ferrita de forma acicular, Widmanstätten e Idiomórfica, este tipo de formación y efecto en la estructura tiene una relación directa entre el calor ingresado, la velocidad de enfriamiento y el tipo de gas de protección utilizado. Basado en los resultados evaluados en el capítulo 4, muestra una mejoría en el tipo de estructura el proceso de baja salpicadura "Nueva tecnología" lo cual nos acerca a la posibilidad de utilizar el gas CO_2 para este tipo de aplicación a un costo menor.
4. En cuanto a las propiedades mecánicas de tensión a esfuerzos cortantes y de dureza, se puede concluir lo siguiente:

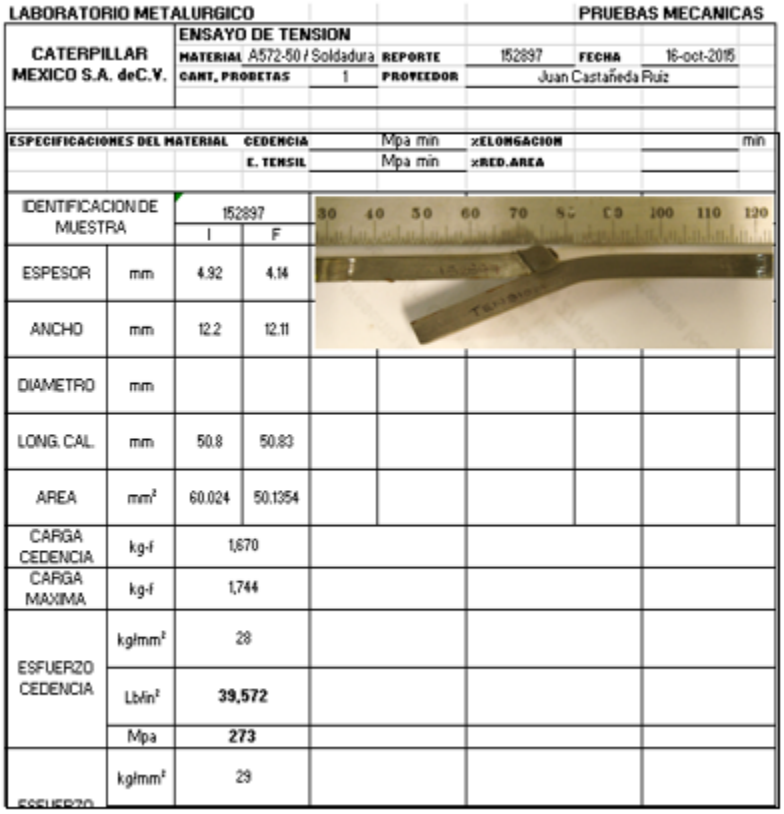
   Pruebas de tensión de esfuerzo cortante; aún y que las pruebas fallaron en ambos casos en la ZAC, debido básicamente por la mala aplicación de ángulo sobre placa vertical de ambos procesos, las propiedades más altas

se encontraron en las muestras de baja salpicadura, esto debido a un mejor tipo de estructura observado durante la caracterización. Las diferencias observadas tienen un comportamiento directo al tipo de estructura formado en cada proceso.

Ensayo de dureza: Los resultados de esta prueba han ayudado para la definición del tipo de microestructura y constituyentes que integran la unión de soldadura. Las durezas más altas se encuentran tanto en la zona afectada por el calor como en la zona de soldadura, esto para el proceso de soldadura convencional 219 HK y 175 HK para el de baja salpicadura. Lo observado brinda una relación directa entre la microestructura, su dureza y resultados de los esfuerzos cortantes en cada uno de los procesos que explica el comportamiento de los resultados.

5. Perfil de soldadura y características internas. En cuanto al perfil de soldadura, aspecto muy importante en las propiedades de las uniones soldadas, el mejor perfil se obtuvo para el proceso convencional, aún que se destaca que esta característica se puede mejorar con la técnica y parámetros utilizados y determinados en los procedimientos PQR´s y WPS´s. En cuanto a la penetración, ambos procesos mostraron una buena penetración y fusión de acuerdo al tipo de junta utilizado en la experimentación, la cual es una junta traslapada con la aplicación de filete. Respecto a la salpicadura generada y con el reto mayor en el proceso de nueva tecnología por el uso de gas reactivo $CO_{2,}$ se puede concluir lo siguiente: aún y cuando no se pudo medir la eficiencia en peso de metal perdido por generación de salpicadura en los dos procesos, se puede decir que la generación y pérdida de salpicadura con el uso de gas CO_2 comparado con el proceso convencional es menor la pérdida en el proceso LSC, lo que garantiza un rendimiento similar en cuanto a limpieza comparado con el proceso tradicional.

Anexos



LABORATORIO METALURGICO — PRUEBAS MECANICAS

CATERPILLAR MEXICO S.A. deC.V.

ENSAYO DE TENSION

MATERIAL A572-50 / Soldadura — REPORTE 152897 — FECHA 16-oct-2015

CANT. PROBETAS 1 — PROVEEDOR Juan Castañeda Ruiz

ESPECIFICACIONES DEL MATERIAL — CEDENCIA Mpa min — %ELONGACION min

E. TENSIL Mpa min — %RED.AREA

IDENTIFICACION DE MUESTRA		152897 I	152897 F
ESPESOR	mm	4.92	4.14
ANCHO	mm	12.2	12.11
DIAMETRO	mm		
LONG. CAL.	mm	50.8	50.83
AREA	mm²	60.024	50.1354
CARGA CEDENCIA	kg-f	1,670	
CARGA MAXIMA	kg-f	1,744	
ESFUERZO CEDENCIA	kg/mm²	28	
	Lb/in²	**39,572**	
	Mpa	**273**	
ESFUERZO	kg/mm²	29	

Anexo 1. Fotografías y registro de parametrización y maquina Fronius

Bibliografía

1. **AWS.** *Welding Journal.* 2015.

2. —. *Manual de soldadura.* 1996 Tomo II.

3. **Kou, Sindo.** *Welding Metallurgy.* s.l. : Second Edition, Copyright 2003 by John Willey & Sons, Inc All Rights resrved, 2003.

4. **Welding Handbook, Volume 2.** *Welding Processes, Part I.* s.l. : 9TH Edition, American Welding Society. Retrieved from www.knovel.com, 2004.

5. **pal, S. Mukhopadhyay. T.K.** *Effect of shielding gas mixture on gas metal arc welding of HSLA steel using solid and flux-cored wires.* Springer-Verlag London Limited 2005 : Int J Adv Manuf Technol (2006) 29: 262–268, 2005. DOI 10.1007/s00170-005-2510-7.

6. **Irina Boiko, Didzis Avisans.** *STUDY OF SHIELDING GASES FOR MAG WELDING.* s.l. : Riga Technical University, Institute of Mechanical Engineering, Ezermalas 6k, LV-1006, Riga, Latvia, 2013.

7. **Ing. Juan Antonio Torre Marina.** *American Welding Society/Manual de soldadura Tomo I, pág. 127.* México : Octava edición, Prentice hall, Pearson education, Addison Wesley, 2006. ISBN-0-87171-354-3.

8. *Fundamentals of the LSC process.* **GmbH, Martin Willinger - Fronius International.** 2014.

9. *The effect of metal transfer stability (spattering) on fume generation,morphology and composition in short-circuit MAG welding.* **Valter Alves de Menesesa, João Fernando Pereira Gomes, Américo Scotti.** Brazil : Journal of Materials Processing Technology, 2014. 214 (2014) 1388–1397.

10. **American Welding Society / Welding Handbook, Volume 4.** *Materials & Aplications, part I.* s.l. : 9th, edición. Douglas E, Williams Consulting Engineer, 2011.

11. **DAVID LEROY OLSON, THOMAS A. SIEWERT, STEPHEN LIU,.** *WELDING, BRAZING, AND SOLDERING. ASM, VOLUME 6.* s.l. : THE ASM HANDBOOK COMMITTEE, 1993.

12. **B.A Graville, Welding of HSLA (microalloyed) Structural Steel.** *Cold Cracking in Welds in HSLA steel .* s.l. : American Society for Metals, November 1976.

13. **N. YURIOKA.** *MODERN HIGH STRENGTH STEEL IN JAPAN.* TOKYO : FIFTH INTERNATIONAL, SYMPOSIUM, JAPAN WELDING SOCIETY, 1990.

14. **American Welding Society, Welding Handbook Volume 1.** *Welding Inspection And Non Destructive Examination chapter 14.* s.l. : D. E. Williams, 2001.

15. **WELDING HANDBOOK, VOLUME 1- J. M. Gerken, Sr.** *Chapter Committee on Design For Welding - Chapter 5.* Miami : WELDING SCIENCE AND TECHNOLOGY (9TH EDITION), 2001.

16. **American Welding Society (AWS), Structural Welding Code_Steel, AWS D1.1.** *STeel Construction Joint Design.* Miami : American Welding Society.

17. *AWS A5.18/A5.18M:2005 Specification for Carbon Steel Electrodes and Rods for Gas Shielded Arc Welding.* **SOCIETY, AMERICAN WELDING.** Miami, FL 33126. 550 N.W. LeJeune Road : Printed in the United States of America, 2005. International Standard Book Number: 0-87171-014-5.

18. **Committee, ASM Handbook.** *Metals Handbook Ninth Edition.* December 1985. United States of America : Library of Congress Cataloging in Publication Data, 1985. pp. 33-34. Vol. Ninth Edition. ISBN 0-87170-007-7.

19. *Effect of Shielding Gas Oxygen Activity on Weld Metal Microstructure of GMA Welded Microalloyed HSLA Steel.* **R. E. FRANCIS, J. E. JONES AND D. L. OLSON.** Golden Colorado : s.n., NOVEMBER 1990.

20. **Society, American Welding.** *AWS B4.0M:2000: Standard Methods for Mechanical Testing of Welds.* 1st. Edition. 550 N.W. LeJeune Road, Miami, FL 33126 : s.n., August 10, 2010. 0-87171-622-4.

21. **Welding, Prepared by the Welding Handbook Chapter Committee on Design for.** *WELDING HANDBOOK - WELDING SCIENCE AND TECHNOLOGY .* 9TH EDITION. s.l. : American Welding Society, 2001. p. 192. Vol. Volume I.

22. **AWS.** *Reprinted from Gibbs.*

Lista de figuras

Figura 2. 1 Soldadura por arco metálico con gas. Proceso general (3)..... 11
Figura 2. 2 Soldadura por arco metálico con alambre y protección gaseosa (4)... 11
Figura 2. 3 Perfiles de soldadura y penetración para diversos gases de protección. (4)..... 13
Figura 2. 4 a-d. a) Microestructura de metal base, b) Muestra S1 de metal de soldadura, c) Muestra de S4, d) Muestra F1. (5)..... 16
Figura 2. 5 Resistencia de cedencia y tensión máxima de una unión de soldadura. (6)..... 20
Figura 2. 6 Microestructura del metal de soldadura utilizando diferentes gases de protección: a) Misión 18, b) Misión 25, c) Corgon 3, d) Misión 8, e) CO_2. (6) 21
Figura 2. 7 Vista de la penetración de soldadura usando diferentes gases de protección: a) Misión 18, b)Misión 25, c) Corgon 3, d) Misión 8, e) CO2. (6)..... 22
Figura 2. 8 Típico Voltaje - Amperaje característico de una fuente de caída de potencia, con un voltaje ajustable de circuito abierto. (7)..... 25
Figura 2. 9 Relación de salida Voltaje - Amperaje para una fuente de poder de voltaje constante. (7)..... 27
Figura 2. 10 Técnica LSC avanzada: Diámetro de la bobina de hilo: 1.2mm, avance de hilo: 4m/min. (8)..... 28
Figura 2. 11 Fundamentos del proceso LSC Root. Fronius International. (8) 34
Figura 2. 12. Mecanismo inicial de la formación inicial de goteo. (8) 35
Figura 2. 13. La corriente se incrementa y forma el cuello de la gota en el alambre. (8)..... 35
Figura 2. 14. Formación del cuello en el alambre, al incrementar la corriente. (8) 36
Figura 2. 15. La transferencia ocurre a un mínimo de corriente. (8)..... 36
Figura 2. 16. La corriente aumenta a un pico más alto y empuja a la soldadura. (8) 37
Figura 2. 17 Diagrama de Graville muestra la susceptibilidad de los aceros al agrietamiento en frio por hidrógeno inducido relativo al contenido de carbono

equivalente. La susceptibilidad al agrietamiento en frio aumenta progresivamente a medida que los aceros emigran de las zonas I y II, a la III. (12)..... 42
Figura 2. 18 Calibradores típicos para la medición de tamaño y forma de la soldadura: (a) Calibrador multipropósito y (b) Calibrador tipo regla para tamaño de soldadura de filete. (14)..... 45
Figura 2. 19 Tipos de juntas. (16)..... 48

Figura 4. 1 Unión de placas tipo traslape con dimensión de 150mm X 300mm X 6mm, acero ASTM A572-50 54
Figura 4. 2 Detalle de uniones utilizadas en el proceso de experimentación. (16) 56
Figura 4. 3 Eficiencia de fuentes de calor en varios procesos de soldadura. (3) .. 57
Figura 4. 4 Desarrollo de la estructura en la unión de soldadura (Convencional). 59
Figura 4. 5 Desarrollo de la estructura en la unión de soldadura (LSC). 60
Figura 4. 6 Estructura perlítica, típica de un acero HSLA A572-50, placa de acero rolado en caliente, 6 mm espesor, con ataque químico nital 3%, 500X. 61
Figura 4. 7 Estructura de ZAC tomada a 500X, a) Proceso convencional, Perlita y Ferrita con una falta de granos equidistantes. b) Proceso de baja salpicadura (LSC). Ferrita y perlita Widmastatten 62
Figura 4. 8 Estructura de aplicación de soldadura compuesta de perlita y ferrita tomada a 500X. a) Proceso convencional. Ferrita y Perlita, con estructura widmanstatten. B) Proceso Baja Salpicadura (LSC). Ferrita y Perlita, con estructura idiomorfica 62
Figura 4. 9 Estructura de aplicación de soldadura compuesta de perlita y ferrita tomada a 500X del proceso convencional y de baja salpicadura 64
Figura 4. 10 Cálculo del esfuerzo cortante o Cizalla. (20) 65
Figura 4. 11 Gráfica de esfuerzo cortante de los 2 procesos analizados 66
Figura 4.12 Fotografía mostrando la forma de falla en probetas del proceso LSC. 66
Figura 4. 13 Fotografía del ensayo de tensión en la unión de soldadura, acero ASTM A572-50 para ambos procesos estudiados. 67
Figura 4. 14 Perfiles de soldadura de filete en los dos procesos analizados. 68

Figura 4. 15 Perfiles de soldadura mostrando falta de fusión e inclusiones, principalmente en la muestra #3 del proceso LSC. 68
Figura 4. 16 Perfiles de soldadura mostrando fusión y penetración. 69
Figura 4. 17 Comparativo de durezas entre los dos procesos de estudio 70

Lista de tablas

Tabla 2. 1 Composición química del acero S235 y alambre de soldadura Autrod 12.51. (7) 18
Tabla 2. 2 Composición química y nombre de las mezclas de gases, suministrados por compañía AGA y utilizados en este estudio. (7) 18
Tabla 2. 3 Parámetros de soldadura MAG, usando diferentes gases de protección. (6) 19
Tabla 2. 4 Parámetros de experimentación utilizados para definir condiciones diferentes de estabilidad en la transferencia de metal (corriente promedio de 150 +/- 2ª). (9) 31
Tabla 2. 5 Comparativo de parámetros de soldadura entre proceso convencional manual y nueva tecnología LSC. (8) 33
Tabla 2. 6 Clasificación y soldabilidad de aceros al carbono. (10) 37

Tabla 4. 1 Descripción de actividades para el desarrollo de experimentación 53
Tabla 4. 2 Composición química (% e.p.) de acero A572-50 utilizado en la experimentación. 54
Tabla 4. 3 Propiedades mecánicas de acero utilizado ASTM A572-50. 54
Tabla 4. 4 Composición química (% e.p.) para electrodos y varillas sólidos. 55
Tabla 4. 5 Parámetros de soldadura utilizados en el caso de estudio. 56
Tabla 4. 6 Calor de entrada aplicado en los distintos cordones de los diferentes procesos estudiados. 58
Tabla 4. 7 Pruebas de esfuerzo cortante de los 2 procesos analizados 65
Tabla 4.8 Mapeo de dureza de los 2 procesos analizados. 70

RESUMEN AUTOBIOGRÁFICO

Juan Castañeda Ruiz, nació en Saltillo, Coahuila el 27 de diciembre de 1959, es Ingeniero Metalúrgico graduado del Instituto Tecnológico de Saltillo y Maestro en Ciencias en Administración de Negocios por Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Monterrey Campus Saltillo.

Cuenta con 30 años de experiencia en la industria de manufactura de maquinaria pesada y actualmente se encuentra concluyendo sus estudios en Tecnología de la Soldadura Industrial.