

CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



**REDUCCIÓN DEL DEFECTO DE FALTA DE FUSIÓN EN SOLDADURA PARA
EL PROCESO GMAW EN ACERO HARDOX 450 EN LA FABRICACIÓN DE
CAJAS PARA CAMIÓN**

POR

JULIO ADRIÁN VÉLEZ CHAVIRA

REPORTE DE PROYECTO

**EN OPCIÓN COMO ESPECIALISTA
EN TECNOLOGÍA DE LA SOLDADURA INDUSTRIAL**

SALTILLO, COAHUILA 14 DE OCTUBRE DE 2016

CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



**REDUCCIÓN DEL DEFECTO DE FALTA DE FUSIÓN EN SOLDADURA PARA
EL PROCESO GMAW EN ACERO HARDOX 450 EN LA FABRICACIÓN DE
CAJAS PARA CAMIÓN**

JULIO ADRIÁN VÉLEZ CHAVIRA

REPORTE DE PROYECTO

**EN OPCIÓN COMO ESPECIALISTA
EN TECNOLOGÍA DE LA SOLDADURA INDUSTRIAL**

SALTILLO, COAHUILA 14 DE OCTUBRE DE 2016

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la compañía Caterpillar México S.A. de C.V. por proveerme los recursos para cursar la especialidad, además por preocuparse e impulsar el desarrollo continuo de sus colaboradores en general para poder seguir creciendo profesionalmente y a su vez poder crear más oportunidades de atraer producto y así poder hacer crecer el negocio. A mi familia y mi novia por estar siempre apoyándome en el transcurso de la especialidad y por motivarme a afrontar los retos adquiridos durante el periodo de estudio.

También agradezco a COMIMSA por tener los docentes con alto grado de profesionalismo y conocimientos para desarrollar recursos humanos para la industria. Agradezco a la Dra. Rocio Saldaña por el apoyo para la realización de este trabajo.

DEDICATORIA

A Dios por ponerme a las personas y en el camino correcto.

A mis padres Perfecto Vélez (†) y María Chavira, por sus enseñanzas a lo largo de mi vida, por no dejarme ir por el mal camino, por sus consejos y por confiar siempre en mi en cada cosa que me propongo.

A mis hermanos Rocío Vélez y Mario Vélez por su apoyo y por enseñarme que la armonía de la familia es un motor que nos impulsa a lograr todas nuestras metas.

A Daniela Martez por darme su cariño, apoyo y comprensión, por sus consejos para poder seguir y terminar en la especialidad y sobre todo por estar a mi lado en todo momento.

Contenido

CAPÍTULO 1.....	2
INTRODUCCIÓN	2
1.1 Antecedentes	2
1.2 Objetivos	5
1.2.1 Objetivo General.....	5
1.2.2 Objetivos específicos.....	5
1.3 Justificación.....	6
1.4 Planteamiento del problema.....	6
1.5 Alcance	7
1.6 Aportación Industrial.....	7
CAPÍTULO 2	8
MARCO TEÓRICO.....	8
2.1 Aceros	8
2.1.1. Generalidades	8
2.1.2 Clasificación General	9
2.1.3 Aceros Hardox.....	10
2.1.4 Aplicaciones.....	14
2.2 Proceso de Soldadura GMAW	14
2.2.1 Principio de Operación	14
2.2.2 Modos de Transferencia	16
2.2.3 Variables del Proceso	19
2.2.4 Tipos de corriente.....	20
2.2.5 Tipos de fuente de poder	21
2.2.6 Alimentador de Alambre	21
2.2.7 Electrodo y materiales de aporte	23
2.2.8 Gases protectores para GMAW	26
2.3 Diseño de unión de soldadura para el proceso GMAW.....	30
2.3.1 Especificaciones para la ranura utilizada	32
2.3.2 Posiciones de soldaduras en ranura.....	32

2.3.3 Anexo A – Uniones precalificadas de soldadura del código D14.3/D14.3M:2010	34
2.4 Precalificación de la ranura en doble V de acuerdo al código D14.3	36
2.4.1 Análisis de fusión de soldadura	36
2.4.2 Factores ayudan a lograr una buena fusión de soldadura	38
2.4.3 Calidad de soldadura	40
2.4.4 Discontinuidades de soldadura	44
2.4.5 Pruebas no destructivas	52
2.4.6 Inspección con Ultrasonido en soldaduras	54
CAPITULO 3	60
ESTADO DEL ARTE	60
3.1 Propiedades mecánicas de los Aceros Hardox 400 resistentes a la abrasión y sus uniones soldadas (16).....	60
3.2 El impacto del electrodo de soldadura en las propiedades mecánicas de las uniones soldadas (17).....	62
3.3 Mejora de las propiedades de operación de los elementos de la maquinaria para la minería de carbón (18)	65
3.4 Características estructurales y de resistencia de los aceros martensíticos resistentes a la abrasión (19).....	68
3.5 Cambios en la estructura y dureza de las uniones soldadas de los aceros Hardox (20).....	70
CAPÍTULO 4.	74
DESARROLLO DEL PROYECTO	74
4.1 Desarrollo experimental	74
CAPITULO 5.	85
RESULTADOS, ANALISIS y PRUEBAS	85
5.1	85
5.1 Resultados en base a experimentación y evaluación.....	85
5.1.1. Inspección de ultrasonido	85
5.1.2 Macro y micrografía	86
5.1.3 Análisis de perfil de microdureza	89
5.1.4 Propiedades Mecánicas.....	93

5.2 Resultados y análisis de la probeta con cara de raíz en la unión de cero milímetros.	95
5.2.1 Inspección de ultrasonido.....	95
5.2.2 Macro y Micrografía	96
5.2.3 Análisis de perfil de microdureza.....	97
5.2.4 Propiedades Mecánicas	98
5.2.5 Resumen de los resultados de las propiedades mecánicas y ultrasonido	99
CAPITULO 6.	100
CONCLUSIONES.....	100
REFERENCIAS	102
Índice de figuras	104
Índice de tablas.....	107

SÍNTESIS

En la industria minera ha tomado mucha fuerza el uso de aceros de alta resistencia a la abrasión y con alta dureza, esto debido a la diversidad de minerales que existen y que en su mayoría poseen propiedades mecánicas muy elevadas, tal es el caso del diamante, el hierro entre otros.

Un diseño de junta eficiente que ayude a generar una unión libre de defectos es muy importante debido a que las cargas aplicadas en una soldadura con defectos puede originar una fractura lo que ocasionaría horas de paro en reparación, tiempo y dinero perdido, es por eso que este trabajo se enfoca en el análisis de la unión para lograr reducir o eliminar el defecto de falta de fusión, el cual, su aparición ha sido constante a la hora de la realización de la inspección, debido a que se presenta por diversos factores como el tamaño de cara de raíz, soldabilidad de material, limpieza y preparación de material, parámetros de la máquina soldadora, entre otros.

Debido a la recesión por la que la compañía de fabricación de camiones mineros está atravesando, se busca realizar proyectos de mejora para reducir los gastos en re-trabajos de soldadura y en la optimización de las uniones para hacerlas más resistentes y con la cantidad de depósito de soldadura adecuado.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

En la industria minera se requieren componentes que estén fabricados con materiales altamente resistentes al impacto y además que tengan durabilidad, es decir, que tengan un difícil desgaste y así poder proporcionar a los clientes un producto que no tendrá que reemplazarse continuamente, lo cual le traerá beneficios a su negocio. Para que esto se lleve a cabo, se utilizan materiales como el acero Hardox 450, el cual presenta características tales como alta resistencia al desgaste, resistencia al impacto, alta dureza, por lo cual este material se comenzó a utilizar en una compañía dedicada a la fabricación de las cajas para camión minero y el proceso utilizado para unir estas placas en la Planta es mediante soldadura de arco metálico protegido con gas (GMAW por sus siglas en inglés) el cual es un proceso que ayuda a que se tenga una penetración completa, que se presente un menor índice de salpicaduras y emisión de gases en comparación con otros procesos. Sin embargo, durante la fabricación de estos

ensambles a la hora de hacer la unión de los pisos, se presentan defectos de falta de fusión en los cordones que son revisados por ultrasonido por requerimiento del diseño. Debido a esto, se está incrementando el costo de consumibles, gasto en gases y tiempo de ciclo debido al incremento en los re-trabajos de estas uniones que son alrededor de 7m de largo. Es por eso que esta investigación tiene la finalidad de recopilar información necesaria para disminuir considerablemente los defectos de falta de fusión que se presentan en dicha unión.

A partir del uso del acero Hardox 450 en la fabricación de las cajas para camión, se han presentado un cúmulo de defectos dando como resultado 2,103 pulgadas defectuosas a lo largo de 2 años, lo que genera mayor costo e inversión de tiempo en la operación de soldadura. La unión de soldadura para el caso de estudio ha presentado defectos de falta de fusión en el mismo tiempo, en el cual ha tenido una variación no uniforme a lo largo de los meses, tal como se presenta en las gráficas (**Figura 1. 1** y **Figura 1. 2**) lo cual ayuda a identificar que tan lejos se está del objetivo en defectos, ya que se requiere de procesos estables y repetitivos para evitar re-trabajos innecesarios y por lo tanto aumento en los costos de operación.

Las cajas para camión tienen uso de trabajo muy pesado para lo cual la exigencia del cliente es muy alta en cuanto a resistencia y abrasión, por eso es muy importante que la unión de soldadura vaya completamente libre de defectos para que no falle en el campo.



Figura 1. 1 Gráfica de defectos por millón de falta de fusión detectados por Ultrasonido de la Caja Oil Sand 2013 (Cortesía de la compañía fabricante de cajas para camión)



Figura 1. 2 Gráfica de defectos por millón de falta de fusión detectados por Ultrasonido Caja Oil Sand 2014. (Cortesía de la compañía fabricante de cajas para camión)

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

Implementar modificaciones dimensionales a la junta para la reducción o eliminación del defecto de falta de fusión en uniones de placas de acero Hardox 450 de 25 mm de espesor mediante el proceso de soldadura GMAW empleados en la fabricación de cajas para camión.

1.2.2 Objetivos específicos

- Realizar el estado del arte de los diferentes diseños de juntas para placas Hardox 450 mediante el proceso GMAW.
- En base a los parámetros del proceso de soldadura utilizados en las pruebas realizadas, utilizar los que sean adecuados para el nuevo dimensionamiento de la junta, partiendo de los establecidos en el proceso de unión.
- Desarrollar un caso de estudio elaborando uniones de placas Hardox 450 con la nueva junta propuesta. Con el fin de compararlo con el establecido.
- Analizar la unión mediante ultrasonido para verificar presencia de defectos principalmente de falta de fusión.
- Evaluar la microestructura y propiedades mecánicas (dureza, y tensión) para ser establecer un análisis comparativo del efecto de las modificaciones de las nuevas dimensiones de la junta con el previamente usado.

1.3 Justificación

La realización de este trabajo surge a partir del incremento del defecto de falta de fusión que se ha estado manifestando en las uniones de soldadura cajas para camión minero que utilizan acero Hardox 450 de 25 mm y bisel en doble V, el cual es un producto de nueva introducción y debido a su aplicación, es importante que tengan una soldadura de calidad, ya que la generación de defectos puede ocasionar fracturas en el ensamble y por ende un tiempo de vida más corta, contrario a lo que el cliente requiere que es una alta durabilidad de los mismos. Por eso es importante conocer qué efectos tiene el diseño de la junta de la soldadura y su influencia en la generación de las faltas de fusión para poder mitigarlas y en el mejor de los casos eliminarlas al 100%.

1.4 Planteamiento del problema

El presente proyecto fue planteado por una empresa fabricante de maquinaria para la industria metalmecánica, con el objetivo de ampliar el área de investigación en sus procesos operativos y de calidad en la soldadura para la fabricación de cajas para camión minero.

Uno de los problemas con los que se enfrenta la compañía es en la unión de la soldadura en doble bisel en las placas de piso de acero Hardox 450 con espesor de 25 mm, uniones en las cuales por especificación se deben revisar con prueba de ultrasonido al 100% para asegurar que las soldaduras tienen la calidad óptima para operar en campo. Con estas inspecciones se están detectando y registrando un alto índice de defectos de faltas de fusión en la raíz, lo cual representa una mayor inversión en el costo de operación y el tiempo de ciclo a la hora de hacer el re-trabajo de la misma, lo cual no es rentable para el negocio. Es debido a esto que es importante que se analice este problema y así poder determinar qué variables en el diseño de la junta se tienen que ajustar para reducir o en el mejor

de los casos eliminar la aparición de los mismos y cumplir con las expectativas del cliente en el primer intento al momento de fabricar el ensamble.

1.5 Alcance

El presente proyecto tiene como alcance el estudio de los efectos del cambio dimensional de la unión para reducir o eliminar el defecto de falta de fusión, empleando placas de acero Hardox 450 de 25 mm de espesor, utilizando el proceso de soldadura por arco metálico con protección de gas (GMAW por sus siglas en inglés).

1.6 Aportación Industrial

En el presente trabajo se busca la configuración favorable del diseño de la junta en las placas de acero Hardox 450 utilizando el proceso de soldadura GMAW llevado a cabo en la empresa de manufactura de ensambles para maquinaria pesada, en donde se desea disminuir o eliminar en su totalidad los defectos de falta de fusión, conservando las propiedades mecánicas requeridas para soportar los impactos de cargas de material y la abrasión que genera el mismo.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

2.1 Aceros

2.1.1.Generalidades

Los aceros son definidos primeramente por su composición química, es decir, aquellos aleados, compuestos por hierro y otros elementos. Los aceros al carbono son tradicionalmente agrupados por contenido de carbono, desde 0.008 hasta un 2% en peso, pero este límite es desafiado por la capacidad de la fabricación moderna de acero para producir aceros ultra bajos o intersticialmente libres de carbono, con niveles de carbono en partes por millón.

Los aceros forman parte del grupo de materiales metálicos industrialmente más utilizado, ya que se pueden fabricar en grandes cantidades y con costes relativamente bajos. Además, sus propiedades en general y las mecánicas en particular abarcan un intervalo muy amplio, que van desde productos con

resistencias moderadas (200-300 MPa), hasta aquellos caracterizados por una de las resistencias mecánicas mayores en la gama de las aleaciones metálicas (2000 MPa).

Los aceros son materiales basados en las aleaciones de hierro y carbono, a las que también se adicionan otros elementos de aleación con el propósito, muchas veces, de endurecerlos, ya que el metal hierro poli cristalino con una muy alta pureza (60 ppm de impurezas) es un material muy blando: su límite elástico ronda los 150 MPa (1).

2.1.2 Clasificación General

Los aceros están clasificados sistemáticamente dentro de grupos basados en algunas características comunes, como composición química, la práctica de desoxidación, método de acabado, o forma del producto. La composición química es incluso la más usada básicamente para identificar y asignar designaciones estándar para los aceros forjados. Los aceros estándar pueden ser divididos en tres grupos principales: aceros al carbono, aceros aleados y aceros inoxidable (2).

2.1.3 Definición

- **Aceros al carbono:** un acero es clasificado de esta manera cuando su contenido de manganeso es limitado a 1.65 % (máx.), silicio a 0.60% (máx.), y cobre a 0.60% (máx.). Con la excepción de los desoxidantes y de boro cuando se especifica, otros aleantes no deben ser agregados intencionalmente, pero pueden estar presentes como residuos. Si alguno de estos elementos incidentalmente es considerado perjudicial para aplicaciones especiales, los límites máximos aplicables pueden ser especificados.

- **Aceros aleados:** Los aceros aleados comprenden no solo los grados que exceden los límites de contenido del elemento de carbono, si no también cualquier grado para los diferentes elementos que son añadidos para hacer alguna modificación a sus propiedades mecánicas. Bajo esta definición, los aceros de aleación comprenden todos los otros aceros a parte de los aceros al carbono, sin embargo por convención, los aceros que contienen arriba de 3.99% de cromo son considerados “tipos especiales” de aceros aleados, los cuales incluyen los aceros inoxidables y muchos de los aceros grado herramienta.
- **Aceros Inoxidables:** Los aceros inoxidables son aceros de alta aleación y tienen una resistencia superior a la corrosión que los aceros al carbono y los aceros convencionales de baja aleación porque estos contienen relativamente más cantidad de cromo. Aunque otros elementos pueden también incrementar la resistencia a la corrosión, su uso en este sentido es limitado. Los aceros inoxidables generalmente contienen por lo menos 10% de cromo, con o sin otros elementos.
- **Aceros grado herramienta:** son los aceros para formar y maquinar otros materiales y por lo tanto son diseñados para tener alta dureza y durabilidad bajo severas condiciones de servicio (2).

2.1.3 Aceros Hardox

- **Propiedades**

El acero Hardox 450 es un acero que se caracteriza porque posee una elevada resistencia a la abrasión, además de una dureza nominal de 450 HB, que en realidad oscila entre los 425 a 475 HB. Debido a esto, está diseñado para aplicaciones donde es necesario mantener dichas propiedades. Es un material anti desgaste con alta dureza, concebido para productos y aplicaciones que requieren resistencia al desgaste de la mano de buenas propiedades para el

conformado en frío; un rasgo característico de este material es la excepcional combinación de tenacidad y dureza.

Las temperaturas de trabajo de los aceros Hardox van directamente relacionadas al espesor tal como se indica en la **Figura 2. 1 (3)**.

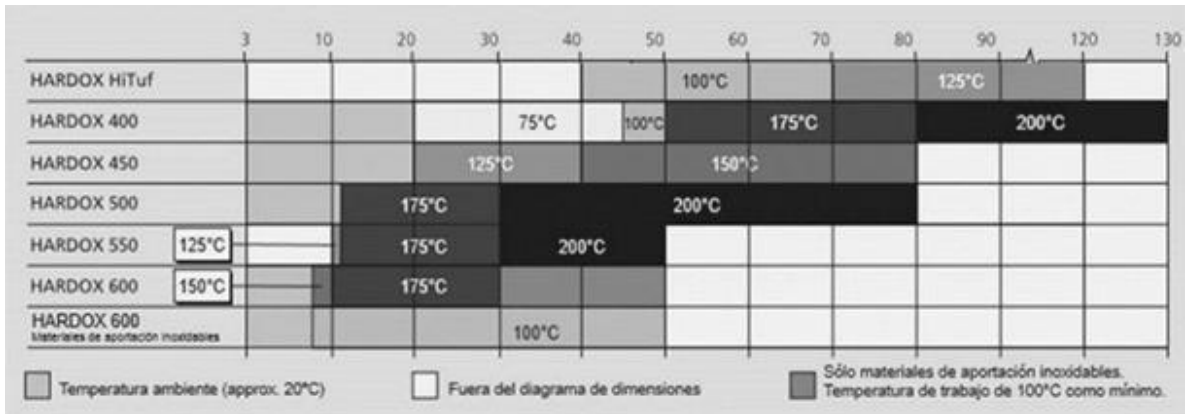


Figura 2. 1 Temperaturas de trabajo de los aceros Hardox de acuerdo a su espesor (3)

Así mismo, el cordón de soldadura intermedio debe alcanzar una temperatura recomendada como se muestra en la **Tabla 2. 1**

Tabla 2. 1 Temperaturas de cordón intermedio recomendada para los diferentes tipos de acero Hardox (3)

Temperatura de cordón intermedio recomendada	
HARDOX HiTuf (Alta dureza)	300 °C
HARDOX 400	225 °C
HARDOX 450	225 °C
HARDOX 500	225 °C
HARDOX 550	225 °C
HARDOX 600	225 °C

- **Composición química**

Las propiedades que posee este material son debido a su composición química, donde el Mn juega un papel muy importante para lograr las propiedades que caracterizan a este acero, ya que está previsto para utilizarse donde se requiera resistencia a la abrasión combinada con otras propiedades. En la **Tabla 2. 2** se muestra la composición química del acero Hardox 450 de acuerdo al espesor de la placa (3).

Tabla 2. 2 Composición química (%e.p) del acero Hardox 450 de acuerdo a su espesor (3)

Espesor de Placa (mm)	%C (máx.)	%Si (máx.)	%Mn (máx.)	%P (máx.)	%S (máx.)	%Cr (máx.)	%Ni (máx.)	%Mo (máx.)	%B (máx.)	CEV Valores
3 -(8)	0.21	0.7	1.60	0.025	0.010	0.25	0.25	0.25	0.004	0.41
(8) – 20	0.21	0.7	1.60	0.025	0.010	0.50	0.25	0.25	0.004	0.47
(20) – 40	0.23	0.7	1.60	0.025	0.010	1.00	0.25	0.25	0.004	0.57
(40) – 50	0.23	0.7	1.60	0.025	0.010	1.40	0.25	0.60	0.004	0.59
(50) -80	0.26	0.7	1.60	0.025	0.010	1.40	1.00	0.60	0.004	0.72

- **Propiedades Mecánicas**

El acero Hardox 450 es un material que tiene alta resistencia a la abrasión, diseñado para aplicaciones donde las demandas sobre ésta resistencia en combinación con buenas propiedades son demasiado importantes. Este acero presenta muy buena soldabilidad. Un rasgo característico de este material es su excepcional combinación de tenacidad y dureza, lo que prolonga considerablemente la duración del producto final. Estas propiedades se muestran a continuación en la **Tabla 2. 3 (3)**.

Tabla 2. 3 Propiedades mecánicas para un acero Hardox 450 con espesor de placa de 25 mm (3)

Propiedades mecánicas			
Valor típico de placa de 25 mm de espesor	Limite elástico	Carga de rotura	Alargamiento
	R_e	R_m	A_s
	MPa	MPa	%
	1200	1400	10
Resiliencia			
Valor típico de placa de 25 mm de espesor	Ensayo de temperatura	Energía de impacto Charpy -V probeta longitudinal	
	°C	J	
	-40	40	

2.1.4 Aplicaciones

El acero Hardox 450 tiene muchas aplicaciones en la industria gracias a su resistencia a la abrasión, durabilidad, tenacidad, entre otras características. Dentro de sus aplicaciones más destacadas se encuentran cajas de volteo, contenedores, trituradoras, cribas, tolvas, alimentadores dosificadores, elevadores volcadores para minas, cucharas, cuchillas para cucharas, transportadores, cuchillas de corte, piñones y poleas para cadenas, máquinas cargadoras, camiones, máquinas de movimiento de tierras, excavadoras, tuberías sometidas a desgaste, transportadores de tornillo sin fin, prensas, etc. En la **Figura 2. 2** se muestran algunos ejemplos de dichas aplicaciones (4).

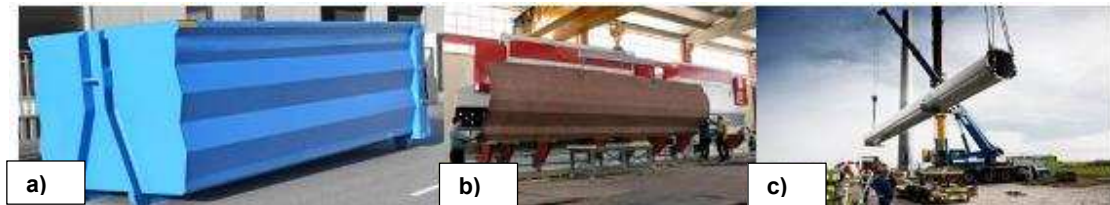


Figura 2. 2 Ejemplos de aplicaciones del acero Hardox 450, a) contenedores, b) prensas y c) tuberías (4)

2.2 Proceso de Soldadura GMAW

2.2.1 Principio de Operación

El proceso de soldadura por arco metálico protegido con gas (GMAW, por sus siglas en inglés) integra la alimentación automática de un electrodo consumible continuo que es recubierto por un gas suministrado externamente, el proceso es ilustrado en la **Figura 2. 3**. Después de los ajustes iniciales realizados por el operador, el equipo provee una regulación automática de las características eléctricas del arco. Por consiguiente, los únicos controles requeridos por el soldador para una operación semiautomática son la velocidad de desplazamiento y la dirección, y la posición de la pistola. Cuando se tiene el equipo apropiado al

igual que los parámetros, la longitud de arco y la corriente son automáticamente mantenidas (5).

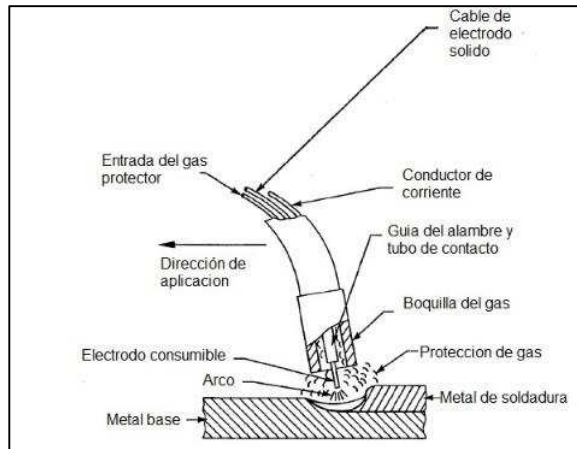


Figura 2. 3 Proceso de soldadura de arco metálico protegido con gas (5)

Los componentes básicos del equipo requerido para el proceso GMAW mostrado en la **Figura 2. 3**, son la pistola de soldadura y el cable de ensamble, la unidad de alimentación del electrodo, la fuente de poder y el alimentador de gas de protección.

El electrodo consumible es guiado por la pistola y además ésta conduce la corriente eléctrica y el gas de protección hacia donde se realiza el trabajo, por lo tanto, provee la energía para mantener y estabilizar el arco y fusiona el electrodo tan bien como se necesite la protección de la atmósfera ambiental.

Existen dos combinaciones de unidades de alimentación de electrodo y fuentes de poder que son usadas para alcanzar la deseable autorregulación de la longitud de arco. Comúnmente esta regulación consiste de una potencia constante (voltaje) proveedora de energía en conjunción de una unidad de alimentación de electrodo de velocidad constante. Alternativamente, una fuente de poder de corriente constante provee una curva de caída de voltaje –amperaje, y la unidad de alimentación del electrodo es de arco de voltaje controlado. En la **Figura 2. 4** se muestra el equipo utilizado en el proceso GMAW (5).

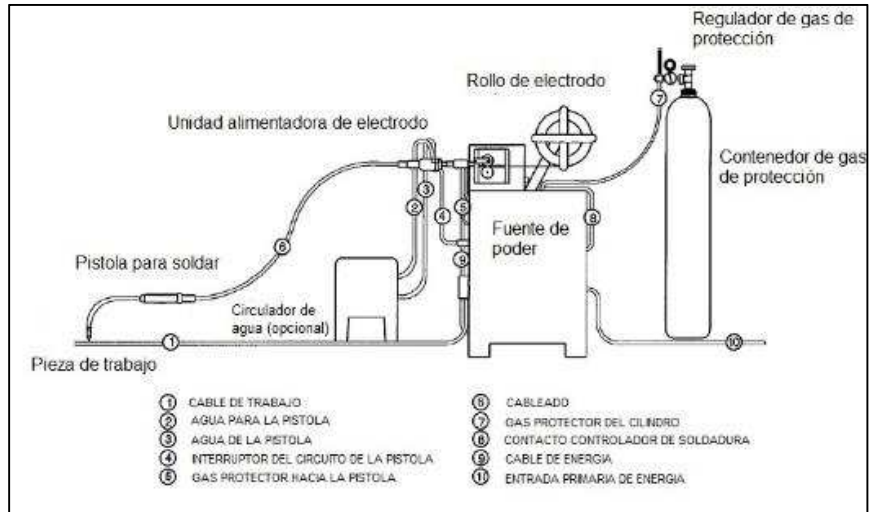


Figura 2. 4 Diagrama del equipo utilizado en el proceso GMAW (5)

2.2.2 Modos de Transferencia

Las características del proceso GMAW son mejor descritas en términos de tres medios básicos por el cual el metal es transferido del electrodo a la pieza de trabajo los cuales se mencionan a continuación:

- **Transferencia de cortocircuito**

El cortocircuito comprende el rango más bajo de corrientes de soldadura y diámetros de electrodo asociados con GMAW. Este tipo de transferencia produce un pequeño charco que se enfría rápido, generalmente empleado para uniones de sección delgada, para soldadura fuera de posición y para puentear grandes aperturas de raíz (5).

El metal es transferido del electrodo hacia la pieza de trabajo solo durante un periodo cuando el electrodo está en contacto con el charco de soldadura, no existe

metal transferido a través del gap del arco, este proceso se representa en la **Figura 2. 5 (5)**.

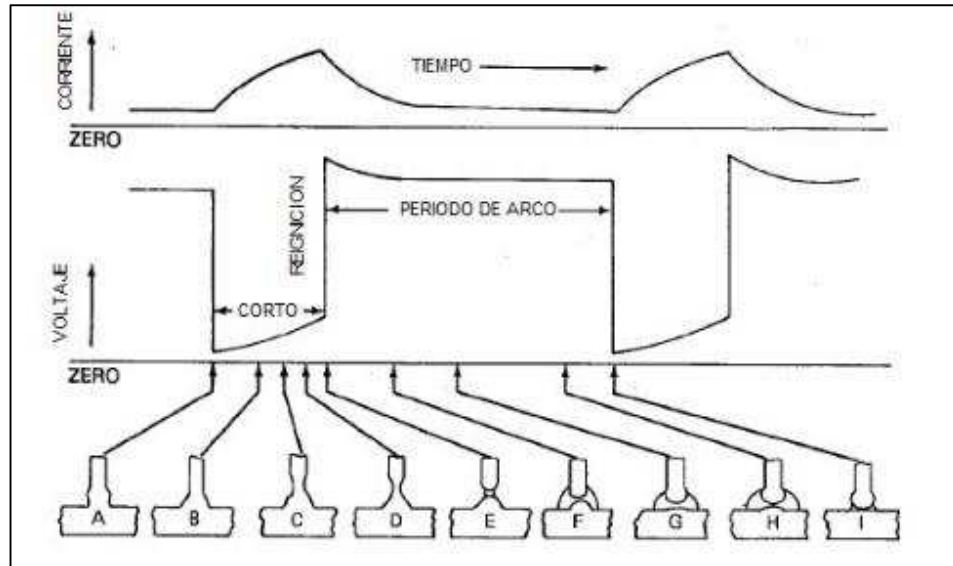


Figura 2. 5 Representación esquemática de la transferencia de metal por cortocircuito (5)

- **Transferencia Globular**

Con un electrodo positivo (DCEP), la transferencia globular toma lugar cuando la corriente es relativamente baja, independientemente del tipo de gas de protección. Sin embargo, con dióxido de carbono y helio, este tipo de transferencia toma lugar en todas las corrientes empleadas de soldadura. La transferencia globular es caracterizada por un tamaño de gota con un diámetro más grande que el del electrodo. La gota grande es fácilmente manejada por la gravedad, generalmente limitando exitosamente la transferencia a la posición plana. En corrientes promedio, solo ligeramente más altas que las usadas en la transferencia de corto circuito, la transferencia globular axialmente direccionada puede ser alcanzada substancialmente por un gas inerte protegido (5).

Si la longitud de arco es muy corta (bajo voltaje), la caída de la gota puede ser más pequeña que la pieza de trabajo, se sobrecalienta, y desintegra, produciendo considerables salpicaduras. Este proceso se muestra en la **Figura 2. 6 (5)**.

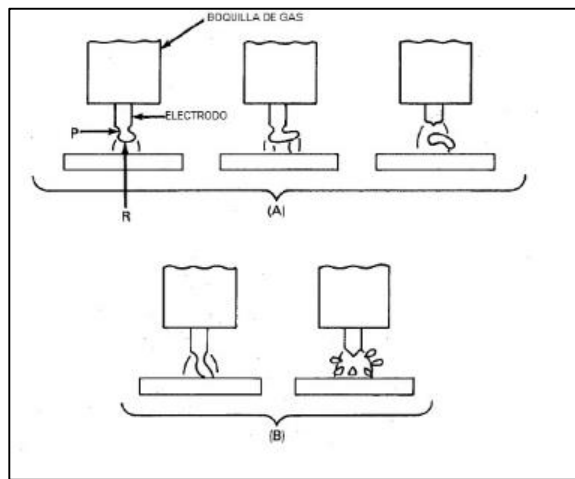


Figura 2. 6 Transferencia globular no axial (5)

- **Transferencia por spray**

Con protección rica en argón es posible producir transferencia de “spray axial” muy estable y libre de salpicaduras como es ilustrado en la **Figura 2. 7**. Esto requiere el uso de corriente directa y un electrodo positivo (DCEP), y un nivel de corriente arriba del valor crítico llamado corriente de transición. Bajo esta corriente, la transferencia ocurre en el modo globular, en razón de pocas gotas por segundo (5).

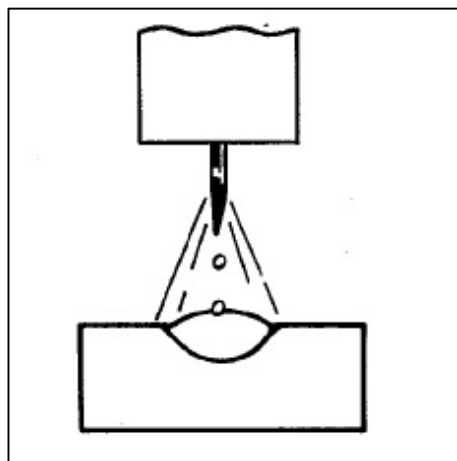


Figura 2. 7 Transferencia axial en spray (5)

Sobre la corriente de transición, la transferencia ocurre en la forma de gotas muy pequeñas que son formadas y separadas en razón de cientos por segundo. Estas son aceleradas axialmente a través del estrecho del arco. La relación entre la razón de transferencia es graficada en la **Figura 2. 8**, donde se muestra que a medida que el amperaje aumenta, la cantidad de gotas de soldadura aumenta el volumen transferido hacia la unión o material base, por lo tanto hay una mayor tasa de deposición (5).

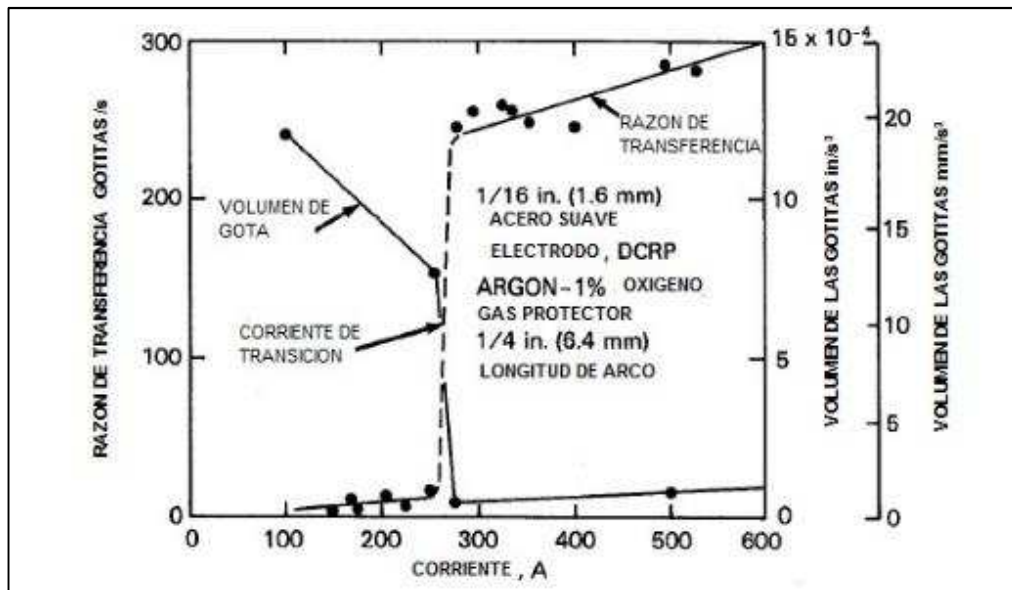


Figura 2. 8 Variación en volumen y razón de transferencia de gotas con corriente de soldadura (5)

2.2.3 Variables del Proceso

Las siguientes son algunas de las variables que afectan la penetración, geometría y en general la calidad de la soldadura (6):

- a) Corriente de soldadura
- b) Polaridad
- c) Voltaje

- d) Velocidad de avance
- e) Extensión del electrodo
- f) Orientación del electrodo (ángulo de desplazamiento)
- g) Posición de la unión
- h) Diámetro del electrodo
- i) Composición y tasa de flujo del gas protector

El conocimiento y control de estas variables es indispensable para producir soldaduras de buena calidad. Estas variables son parcialmente independientes, ya que cuando se modifica alguna, en la mayoría de los casos, se modifica una o más de las otras para obtener los resultados deseados. Se requiere una considerable habilidad y experiencia para seleccionar los valores óptimos para cada aplicación.

Esos valores óptimos son afectados por el tipo de metal base, composición del electrodo, la posición y los requisitos de calidad. Por lo tanto, no hay un conjunto único de parámetros que produzcan resultados óptimos en todos los casos.

2.2.4 Tipos de corriente

La mayoría de la soldadura por arco metálico con gas es realizada usando corriente directa estable. Esta puede ser conectada en una o dos maneras las cuales son electrodo al positivo (polaridad inversa) y electrodo al negativo (polaridad directa). Las partículas cargadas eléctricamente fluyen entre la punta del electrodo y la pieza de trabajo como se muestra en la **Figura 2**. . La conexión del electrodo al positivo es usada para casi todos las aplicaciones de soldadura de estos procesos. Esto proporciona una mejor penetración que el electrodo al negativo y puede ser usado para soldar metales. El electrodo al negativo es algunas veces usado cuando una menor cantidad de penetración.

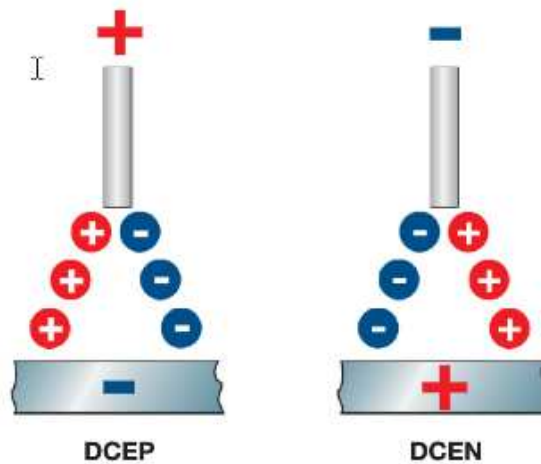


Figura 2. 9 Flujo de partículas para corriente directa al positivo y al negativo (7)

2.2.5 Tipos de fuente de poder

Muchos tipos de fuentes de poder de corriente directa pueden ser usadas para soldadura de arco metálico con gas, incluyendo motores generadores de conducción (rotativos) y transformadores rectificadores (estáticos). Los inversores son incluidos en la categoría estática.

2.2.6 Alimentador de Alambre

El alimentador de alambre conduce el alambre del electrodo desde el carrete a través del cable y la pistola hacia el arco de soldadura. El sistema de alimentación de alambre debe estar ligado al tipo de fuente de poder.

El alimentador de alambre de velocidad constante es usado con la fuente de poder de voltaje constante. En este sistema, la relación entre fusión del electrodo y la corriente debe ser mantenida para producir un arco estable. La corriente es establecida por el control de alimentación de alambre. Durante la soldadura, la fuente de poder provee la cantidad propia de corriente para mantener la razón de

fusión del electrodo. Desde que la velocidad de alambre es constante, las fluctuaciones de corriente mantienen una fusión uniforme para producir una longitud de arco consistente.

Normalmente, un alimentador de alambre de velocidad variable es usado con una fuente de poder de corriente constante. En este sistema, el alimentador de alambre varía para mantener una longitud de arco uniforme. Un dispositivo sensor de voltaje es incorporado dentro del sistema para detectar cambios en el voltaje (longitud de arco). Basado en esto, la velocidad del alimentador de alambre sube o baja para corregir el cambio de voltaje (longitud de arco).

La **Figura 2. 910** y la **Figura 2. 10** describen la relación entre el amperaje y la velocidad de alimentación de alambre por varios tipos y tamaños de electrodo de alambre (7).

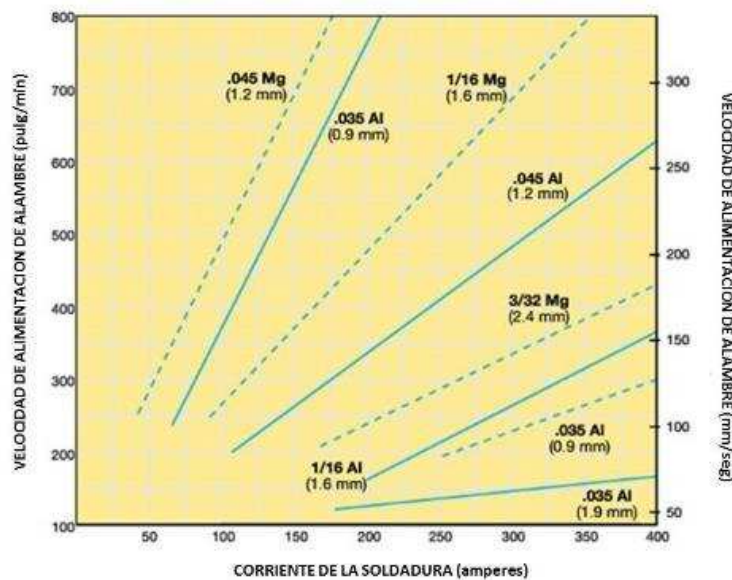


Figura 2. 90 Velocidad de alimentación de alambre contra corriente de soldadura para diversos electrodos de metal (7).

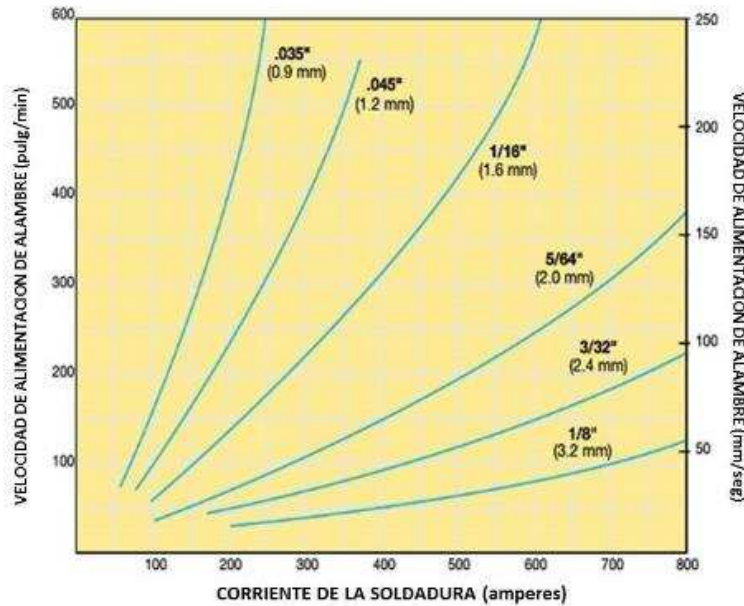


Figura 2. 101 Velocidad de alimentación de alambre contra corriente de soldadura para un electrodo de alambre de acero (7).

2.2.7 Electrodo y materiales de aporte

El electrodo, alambre o metal de aporte es clasificado por diversas especificaciones de la Sociedad Americana de la Soldadura, (AWS por sus siglas en inglés) ver **Tabla 2. 4** (8). En general, para aplicaciones de unión, la composición del electrodo es similar a la del metal base.

Los electrodos usados en el proceso GMAW son por lo general de diámetros muy pequeños. Dichos diámetros varían comúnmente de 0.9 mm a 1.6 mm (0.035 a 0.062 in), pero pueden usarse electrodos con diámetro tan pequeño como 0.5 mm (0.020 in) y tan grande como 3.2 mm (1/8 in). Cuando los diámetros de los electrodos son pequeños y las corrientes relativamente altas, las velocidades de alimentación del alambre en el proceso GMAW son altas, desde unos 40 hasta 340 mm/s (100 a 800 in/min) para la mayor parte de los metales.

Tabla 2. 4 Especificación para diversos electrodos GMAW (8)

Tipo de material base	Especificación de la AWS
Acero al carbono	A5.18
Acero de baja aleación	A5.28
Aleaciones de aluminio	A5.10
Aleaciones de cobre	A5.7
Magnesio	A5.19
Aleaciones de níquel	A5.14
Aceros inoxidable de la serie 300	A5.9
Aceros inoxidable de la serie 400	A5.9
Titanio	A5.16

- **Selección del electrodo**

En la ingeniería de ensamblajes soldados, el objetivo es seleccionar los metales de aporte que producirán un depósito de soldadura con dos características básicas:

- 1) Un depósito que se asemeja mucho al metal base en sus propiedades mecánicas y físicas o que lo mejore, por ejemplo confiriéndole resistencia a la corrosión o al desgaste.
- 2) Un depósito de soldadura íntegro, libre de discontinuidades.

En el primer caso, el depósito de soldadura, aunque tenga una composición casi idéntica a la del metal base, tiene características metalúrgicas únicas. Esto depende de factores tales como el aporte de energía y la configuración de la franja de soldadura. La segunda característica generalmente se logra empleando un electrodo de metal formulado, por ejemplo uno que contenga desoxidantes para producir un depósito relativamente libre de defectos.

Composición. El electrodo debe satisfacer ciertas demandas del proceso en cuanto a estabilidad del arco, comportamiento de transferencia de metal y

características de solidificación. También debe producir un depósito de soldadura compatible con una o más de las siguientes características del metal base:

- a) Química
- b) Resistencia mecánica y tenacidad
- c) Ductilidad

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

La AWS ha establecido especificaciones para los metales de aporte de uso común. La **Tabla 2. 5** ofrece una guía básica para seleccionar los tipos de metal de aporte apropiados para los metales base que se listan, junto con todas las especificaciones AWS de metal de aporte aplicables.

Tabla 2. 5 Electrodo recomendados para GMAW (8)

Metal base		Electrodo	
Tipo	Clasificación	Clasificación	Especificación de la AWS
Aluminio y aleaciones de aluminio (normas ASTM volumen 2.02)	1100 3003, 3004 5052, 5454 5083, 5086, 5446 6061, 6063	ER4043 ER5356 ER5554, ER5556 o ER5183 ER5556 o ER5356 ER4043 o ER5356	A5.10
Aleaciones de magnesio (normas ASTM volumen 2.02)	AZ10A AZ31B, AZ61A, AZ80A ZE10A ZK21A, AZ63A, AZ81A AZ91C AZ92A, AM100A, HK31A, HM21A HM31A LA141A	ERAZ61A, ERAZ92A ERAZ61A, ERAZ92A ERAZ61A, ERAZ92A ERAZ92A ERAZ33A ERAZ33A ERAZ33A ERAZ33A	A5.19
Cobre y aleaciones de cobre (normas ASTM volumen 2.02)	Comercialmente puro Latón Aleaciones Cu-Ni Bronce de manganeso Bronce de aluminio Bronce	ERCu ERCuSi-A, ERCuSn-A ERCuNi ERCuAl-A2 ERCuAl-A2 ERCuSn-A	A5.7
Níquel y Aleaciones de níquel (normas ASTM volumen 2.04)	Comercialmente puro Aleaciones Ni-Cu Aleaciones Ni-Cr-Fe	ERNi ERNiCu-7 ERNiCrFe-5	A5.14
Titanio y aleaciones de titanio (normas ASTM volumen 2.04)	Comercialmente puro Ti-6AL-4V Ti-0.15 Pd Ti-5Al-2.5Sn Ti-13V-11Cr-3AL	ERTi-1, -2,-3,-4 ERTi-6Al-4V ERTi-0.2Pd ERTi-5Al-2.5Sn ERTi-13V-11Cr-3AL	A5.16
Aceros inoxidables austeníticos (normas ASTM volumen 1.04)	Tipo 201 Tipos 301, 302, 304 y 308 Tipo 304L Tipo 310 Tipo 316 Tipo 321 Tipo 347	ER308 ER308 ER308L ER310 ER316 ER321 ER347	A5.9
Aceros al carbono	Aceros al carbono ordinario rodados en caliente y en frío	E70S-3, o E70S-1 E70S-2, E70S-4 E70S-5, E70S-6	A5.18

2.2.8 Gases protectores para GMAW

El gas protector proporciona una función secundaria adicional a la protección del metal fundido. Ajustando la composición del gas protector (el cual puede ser argón, helio o una mezcla de ambos), provee algún control sobre la distribución del calor de la soldadura, influye en la forma de la sección transversal del metal soldado y la velocidad de la soldadura. El ajuste de la sección transversal por modificación de la composición del gas protector puede controlar la penetración sin cambiar la razón de fundición del electrodo para facilitar la evolución de gas

de metal de aporte. Sin embargo, el uso de helio como gas protector usualmente resulta en un arco inestable y es raramente usado por esa razón.

Las secciones transversales de soldaduras de respaldo que se ejemplifican en la **Figura 2. 11** son usando argón, helio, y mezclas de helio-argón (8).

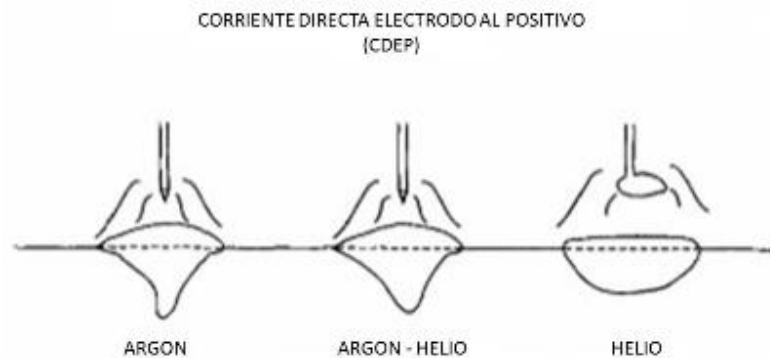


Figura 2. 112 Influencia de gas protector en el perfil de soldadura (8)

La función primaria del gas protector es impedir que la atmósfera entre en contacto con el metal de soldadura fundido. Esto es necesario porque la mayor parte de los metales al calentarse hasta su punto de fusión en aire, presentan una marcada tendencia a formar óxidos y, en menor grado, nitruros. Además, el oxígeno reacciona con el carbono del acero fundido para formar monóxido y dióxido de carbono. Estos diversos productos de reacción pueden causar deficiencias de la soldadura, como escoria atrapada, porosidad y pérdida de ductilidad del metal de soldadura. Los productos de reacción mencionados se forman con facilidad en la atmósfera si no se toman precauciones para excluir el oxígeno y el nitrógeno. Además de proporcionar un entorno protector, el gas protector y la tasa de flujo tienen un efecto importante sobre lo siguiente (8):

- (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.

En la **Tabla 2. 6** se muestran los principales gases que se usan con GMAW. Casi todas son mezclas de gases inertes que también pueden contener pequeñas cantidades de oxígeno o CO₂. El empleo de nitrógeno al soldar cobre es una excepción. En la **Tabla 2. 7** se da una lista de los gases que se emplean para GMAW con transferencia en cortocircuito.

Tabla 2. 6 Gases protectores para transferencia por aspersión en GMAW (8).

Metal	Gas Protector	Espesor de placa	Ventajas
Aluminio	100% argón	25 mm (0 a 1 pulg)	Transferencia de metal y estabilidad del arco óptimas ; mínimo de salpicaduras
	35% argón -65% helio	76 mm (1 a 3 pulg)	Más alto aporte de calor que sólo con argón; mejores características de fusión helio con aleaciones Al-Mg de la serie 5XXX
	25% argón -75% helio	76 mm (3 pulg)	Máximo aporte de calor; minimiza la porosidad.
Magnesio	100% argón	-	Excelente acción limpiadora.
Acero al carbono	95% argón + 3.5% oxígeno	-	Mejora la estabilidad del arco; produce un charco de soldadura más fluido y controlable; buena coalescencia y perfil de franja; minimiza el socavamiento; permite velocidades más altas que el argón puro.
	90% argón + 8/10% dióxido de carbono	-	Soldadura mecanizada de alta velocidad; soldadura manual de bajo costo
Acero de baja aleación	98% Argón 2% oxígeno	-	Minimiza el socavamiento; confiere buena tenacidad.
Acero inoxidable	99% Argón -1 % oxígeno	-	Mejora la estabilidad del arco; produce un charco de soldadura más fluido y controlable; buena coalescencia y perfil de franja; minimiza el socavamiento en aceros inoxidables gruesos.
	98% Argón 2% oxígeno	-	Ofrece mejor estabilidad de arco, coalescencia y velocidad de soldadura que de oxígeno para piezas de acero inoxidable delgadas.
Níquel , cobre y sus aleaciones	100% Argón	Hasta 3.2 mm (1/8 pulg)	Ofrece buen mojado; y sus aleaciones reduce la fluidez del metal de soldadura.
	Argón Helio	-	Mayor aporte de calor que con mezclas con 50 y 75% de helio lo que compensa la elevada disipación de calor de los calibres más gruesos.
Titanio	100% Argón	-	Buena estabilidad del arco; contaminación mínima de la soldadura; se requiere respaldo con gas inerte para evitar la contaminación con aire de la parte de atrás del área de soldadura.

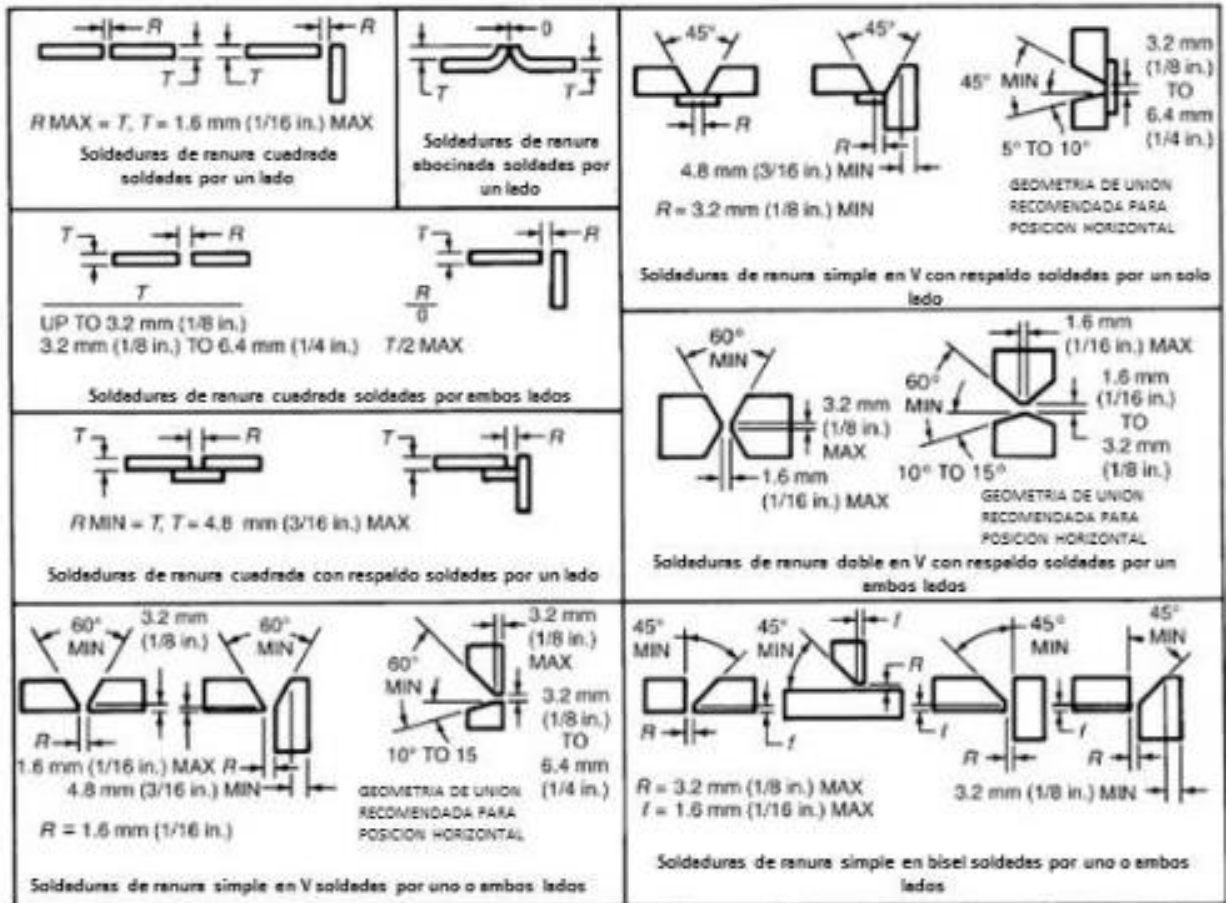
Tabla 2. 7 Gases protectores para transferencia en cortocircuito en GMAW (8)

Metal	Gas Protector	Espesor de placa	Ventajas
Aceros al carbono	75% argón + 25% CO ₂	Menos de 3.2 mm (1/8 pulg)	Altas velocidades de soldadura sin perforación; mínimo de distorsión y salpicaduras
	75% argón + 25% CO ₂	Más de 3.2 mm (1/8 pulg)	Mínimo de salpicaduras; aspecto limpio de la soldadura; buen control del charco en las posiciones vertical y central.
	Argón con 5-10% de CO ₂	-	Penetración más profunda; más altas velocidades de soldadura.
Acero inoxidable	90% helio + 7.5% argón + 2.5% CO ₂	-	Ningún efecto sobre la resistencia a la corrosión; zona térmicamente afectada pequeña; sin socavamiento; mínima distorsión.
Acero de baja aleación	60-70% helio + 25-35% argón + 4.5% CO ₂	-	Reactividad mínima; excelente arco, características de mojado y perfil de franja; pocas salpicaduras.; excelentes estabilidad del
	75% argón + 25% CO ₂	-	Buena tenacidad; excelentes estabilidad del arco, características de mojado y perfil de franja; pocas salpicaduras.
Aluminio, cobre, magnesio, níquel y sus aleaciones	Argón y argón + helio	Más de 3.2 mm (1/8 pulg)	El argón es satisfactorio para lámina; se prefiere argón-helio para material base

2.3 Diseño de unión de soldadura para el proceso GMAW

La soldadura de arco metálico con protección de gas puede ser usada para soldar una amplia variedad de metales y configuraciones. Las geometrías y dimensiones típicas de una unión para este proceso de soldadura de arco metálico con protección de gas comúnmente son utilizadas en la soldadura de acero, que se muestran en la **Figura 2. 12**. Las dimensiones mostradas normalmente producen una penetración completa en la unión y un refuerzo de cara aceptable o un refuerzo de raíz cuando los procesos adecuados de soldadura son utilizados.

Las características de la penetración completa de la transferencia por spray en la soldadura por arco metálico protegido con gas puede permitir el uso de ángulos más pequeños en la ranura. Esto reduce la cantidad de metal de aporte requerido y horas laborales necesarias para fabricar soldaduras (8).



Claves:
 α = Angulo de ranura, radianes (grados)
 f = Cara de raíz, mm (pulg.)
 r = Radio de bisel, mm (pulg.)
 R = Abertura de raíz, mm (pulg.)
 T = Espesor

Figura 2. 123 Tipos de uniones de soldadura para el proceso GMAW (8)

Mientras se está diseñando una unión de soldadura, se debe tener cuidado en asegurar que exista el suficiente espacio para un acceso adecuado para el soldador, y así permitir la manipulación del electrodo sostenido para obtener una fusión adecuada de la cara de la ranura y la adición del metal de aporte.

La limpieza de las herramientas usadas por los fabricantes y soldaduras para la preparación de la unión es importante. Cualquier contaminación con partículas abrasivas o fluidos de corte pueden causar defectos. Ambos, el metal de aporte y el metal base deben ser limpiados para remover todos los restos de aceite, grasa, suciedad del taller, pintura, marcas de crayón, y corrosión de óxido (9).

2.3.1 Especificaciones para la ranura utilizada

La ranura con la que se está trabajando en este reporte de proyecto está regida por el Código D14.3/D14.3M:2010 de la Sociedad Americana de Soldadura D14.3/D14.3M:2010, especificación para equipo de movimiento de tierra, construcción y agricultura.

2.3.2 Posiciones de soldaduras en ranura

Existen diferentes posiciones de soldadura para las uniones en ranura como lo son la posición 1G (plana, **Figura 2.**), la posición 2G (horizontal, **Figura 2. 13**) y la posición 3G (vertical, **Figura 2.**)



Figura 2. 14 Posición de prueba 1G (10)

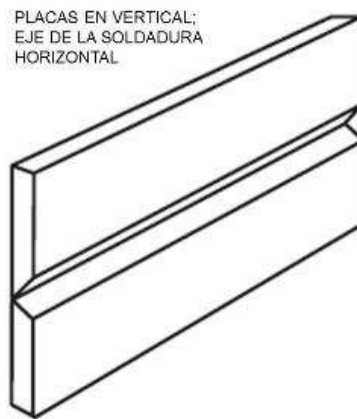


Figura 2. 135 Posición de prueba 2G (10)

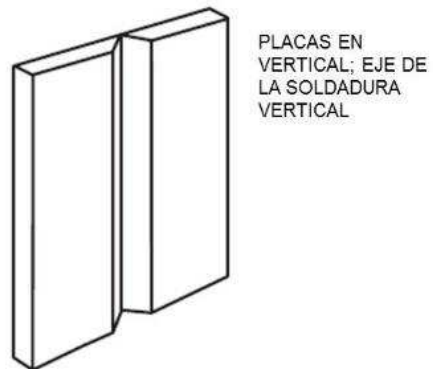


Figura 2. 16 Posición de prueba 3G (10)

2.3.3 Anexo A – Uniones precalificadas de soldadura del código D14.3/D14.3M:2010

La ranura con la que se está trabajando en este reporte de proyecto está regida por el Código D14.3/D14.3M:2010 de la Sociedad Americana de Soldadura D14.3/D14.3M:2010, especificación para equipo de movimiento de tierra, construcción y agricultura, Anexo A – Uniones precalificadas de soldadura el cual la compañía fabricante de cajas para camión ha adoptado como especificaciones obligatorias para el diseño de sus uniones de soldadura.

En la **Figura 2. 17** se presentan los parámetros para el diseño de la ranura utilizada en este reporte de proyecto de acuerdo al Anexo A del código D14.3.

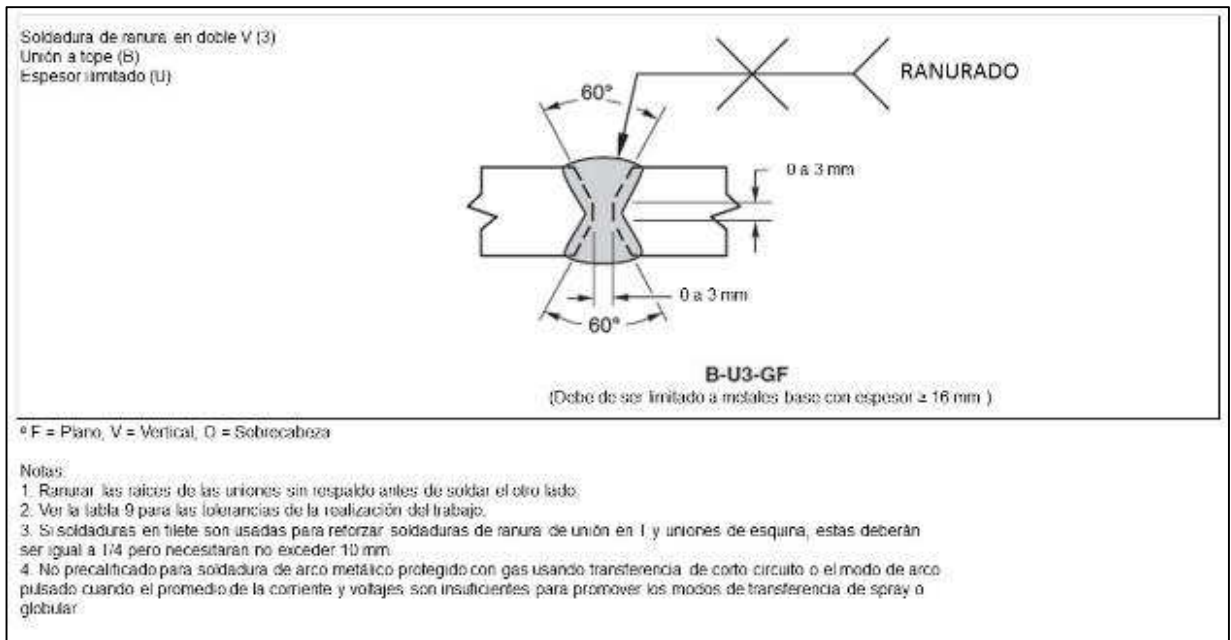
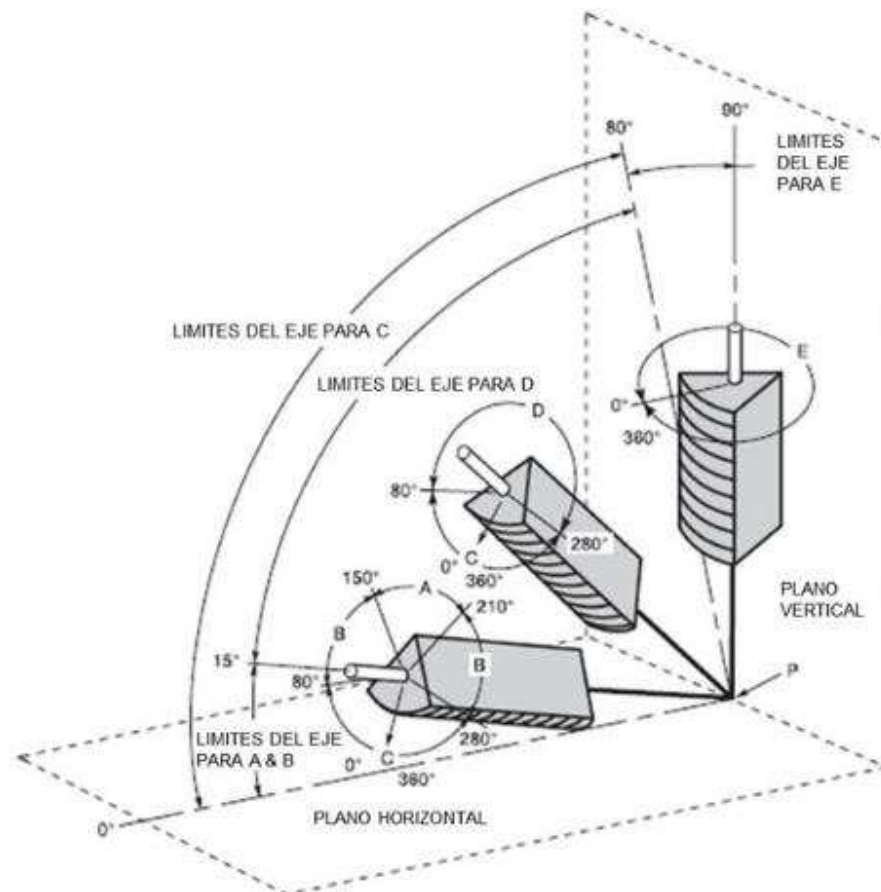


Figura 2. 17 Unión en doble V precalificada para penetración completa de soldadura- Proceso de soldadura por arco metálico protegido con gas (10)

Posiciones de la soldadura de prueba en ranura

Todas las soldaduras encontradas en construcción actual deben ser clasificadas como (1) planas, (2) horizontales, (3) verticales o (4) sobre cabeza de acuerdo a las definiciones de soldadura, en la **Figura 2.** se encuentran esquematizadas las posiciones de soldadura para una unión en ranura.



Tabulación de posiciones de soldadura en ranura			
Posición	Referencia del diagrama	Inclinación del eje	Rotación de cara
Plana	A	0° to 15°	150° to 210°
Horizontal	B	0° to 15°	80° to 150°
			210° to 280°
Sobre cabeza	C	0° to 80°	0° to 80°
			280° to 360°
Vertical	D	15° to 80°	80° to 280°
			E

Figura 2. 18 Posiciones de soldadura en ranura (10)

2.4 Precalificación de la ranura en doble V de acuerdo al código D14.3

Existen ciertos parámetros para la precalificación de las ranura en doble V de acuerdo al código D14.3/D14.3M:2010 de la Sociedad Americana de Soldadura, especificación para equipo de movimiento de tierra, construcción y agricultura, los cuales se revisaron para su aplicación en el diseño de la ranura utilizada en este reporte de proyecto(11).

2.4.1 Análisis de fusión de soldadura

- **Componentes de una unión soldada**

Una unión soldada comprende la soldadura, la zona afectada por el calor (HAZ por sus siglas en ingles) y el metal base, las cuales pueden observarse en la **Figura 2. .**

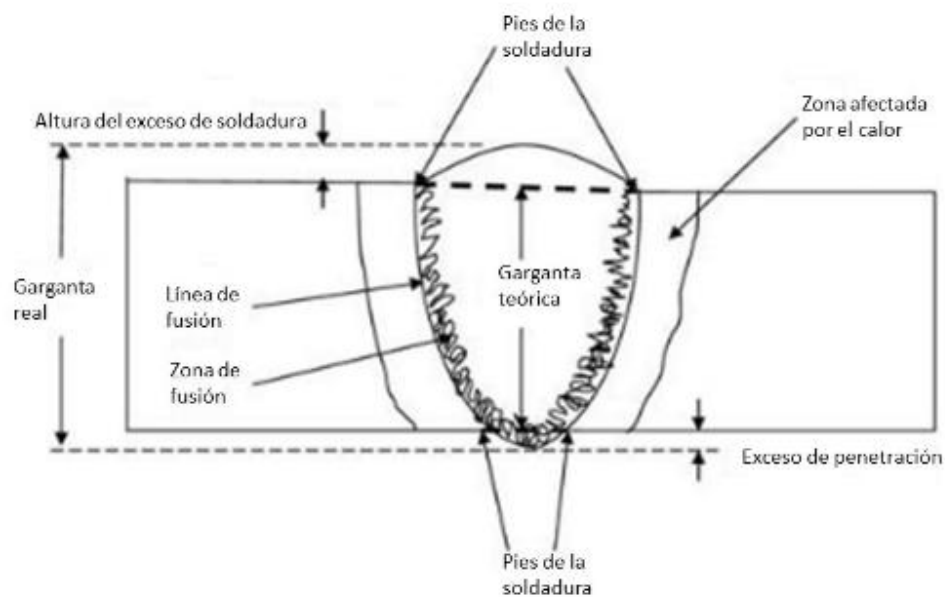


Figura 2. 19 Componentes de una unión soldada (12)

- **Pies de la soldadura**

Estos son los puntos donde la soldadura colinda con el metal base, aquí serán normalmente cuatro pies de soldadura en una soldadura a tope con penetración completa (dos en la cara y dos en la raíz) y dos en un filete de soldadura. El ángulo más grande en el pie de la soldadura es el riesgo más grande de una falla por fatiga si el componente está sujeto a cargas cíclicas.

- **Línea de fusión**

Aquí es donde la fusión toma lugar entre el material fundido y el sólido. Es comúnmente referido como la frontera de fusión o la unión de la soldadura.

- **Zona de fusión**

La zona de fusión es la región dentro de la soldadura que contiene la dilución más grande de metal de aporte con el metal base fundido. Esta región de dilución más alta puede contener defectos debido a las impurezas o contaminantes contenidos en el metal base siendo depositadas dentro de la soldadura. El centro de la soldadura será el área de la dilución más baja y puede consistir solo en metal de aporte.

- **Zona afectada por el calor**

Esta es la región del metal base que no ha sido fundido pero ha sido afectado por el calor y ha tenido un cambio en su estructura de grano. Las fracturas pueden ocurrir en la zona afectada por el calor después de que la soldadura ha tomado lugar debido a haber sido endurecido por la formación de una estructura de grano martensítico al enfriarse.

- **Penetración excesiva**

Es el exceso de metal de soldadura formado en la raíz de la soldadura. Algunos códigos pueden especificar un límite de la penetración debido a la mezcla de los pies y/o la restricción del agujero causado en tubería.

- **Espesor de garganta teórica**

La garganta es donde el esfuerzo está concentrado dentro de la soldadura. Es igual en tamaño al más delgado de los materiales base que han sido unidos.

- **Espesor de garganta real**

Esta es la actual medición realizada desde la cara de la soldadura a la raíz. El esfuerzo actual de la soldadura puede ser calculado usando esta medición de la garganta actual (pero cualquier medición en exceso de la garganta teoría de la garganta es ignorada). Esto es más relevante para soldaduras de penetración parcial o donde la concavidad en la raíz se presenta.

2.4.2 Factores ayudan a lograr una buena fusión de soldadura

Existen cuatro factores que deberán satisfacerse para producir una buena fusión de soldadura. Si alguno de estos factores no se logra entonces el resultado será una soldadura que probablemente no se ajuste al propósito. Los cuatro factores son los siguientes.

- **Calor de entrada:** Es el calor que funde el material base y el metal de aporte (si es requerido) para dar la fusión requerida entre las partes a ser unidas. El calor puede ser desde un arco eléctrico, un láser, un haz de electrones o una mezcla de gas oxiacetilénico. El proceso más común es la soldadura de arco.

Este factor, para los procesos de soldadura por arco, se calcula con la siguiente formula:

$$HI = E \cdot I \frac{60}{S}$$

Donde:

- HI: es la energía de entrada en Joules por medida lineal de soldadura.
 - E: es el voltaje del arco eléctrico en volts
 - I: Es la corriente de la soldadura en amperes
 - S: Es la velocidad de desplazamiento (medida lineal) por minuto
-
- **Protección de la atmósfera:** si es expuesto, un arco de soldadura puede atraer gases como oxígeno, nitrógeno o hidrógeno desde la atmósfera y adentrarlo al charco de soldadura. Estos gases pueden tener un efecto perjudicial en la soldadura final por lo que el arco necesita ser protegido de estos. Los métodos comunes de protección atmosférica usados en los proceso de soldadura de arco incluye el uso de:
 - Uso de gases protectores
 - Electrodo con fundente protector
 - Una capa de fundente en polvo suministrado externamente
 - Una combinación de gases protectores con electrodos con fundente

 - **Protección de contaminantes internos y externos (limpieza):** El metal de la soldadura puede atraer contaminantes de la superficie del material así que es importante que el material esté libre de incrustaciones, óxido, pintura, grasa, humedad y otros posibles contaminantes de la soldadura. Contaminantes internos como el sulfuro u óxidos pueden estar presentes dentro del material y pueden ser incluso removidos o neutralizados durante la soldadura. En efecto, el proceso

debe ser capaz de limpiar el material y el charco de soldadura para proporcionar la protección correcta. La protección de contaminantes puede ser alcanzada por:

- Limpieza mecánica del componente (pulido, cepillo de alambre, abrasión, etc.)
 - Limpieza química del componente y metal de aporte de alambre/barras (ácido, acetona, etc.)
 - Uso de fundente (que contengan desoxidantes)
 - Uso de la polaridad correcta (corriente directa o corriente alterna cuando se está soldando aleaciones de Al o Mg para remover la capa superficial de óxido, llamada limpieza catódica).
- **Propiedades mecánicas adecuadas:** La unión soldada final deberá tener las propiedades adecuadas de resistencia, tenacidad, dureza y ductilidad en el material base (incluyendo la zona afectada por el calor) y el metal de soldadura. Estas propiedades son alcanzadas (dependiendo del proceso de soldadura) por:
 - Uso correcto de los materiales base
 - Uso de los consumibles correctos (electrodos tratados térmicamente de una manera correcta, etc.)
 - Empleando el correcto precalentamiento y/o tratamientos térmicos post soldadura
 - Utilizando los valores correctos de calor de entrada (voltaje, corriente y velocidades de desplazamiento), (12).

2.4.3 Calidad de soldadura

La calidad de soldadura es un área que requiere atención en cada fase de la manufactura y ciclo de vida de servicio de ensambles unidos con soldadura, soldadura fuerte y soldadura blanda. El proceso inicia con un diseño que cumple apropiadamente los requerimientos de vida para el producto así bien los

requerimientos de manufactura. A continuación los factores de construcción y manufactura deben ser considerados, los cuales incluyen la selección de procesos de unión, materiales y metales de aporte; el establecimiento de una calificación de desempeño de un soldador y operador; y la selección de los métodos y frecuencia de inspección y la examinación no destructiva.

Debido al incremento de las expectativas de los componentes en servicio, los esfuerzos para fabricar soldaduras que sean más fuertes y ligeras y que tengan más alto desempeño alcanzando los límites están en primer plano en la industria. Los riesgos asociados con la disminución del servicio, mantenimiento y reparación, reemplazo, y otras obligaciones son tan grandes que un adecuado programa de control de calidad es últimamente muy barato.

En consecuencia, en el corazón de la calidad de la soldadura está el entendimiento de la ocurrencia de discontinuidades, su significancia, métodos de examinación, detección y corrección.

• **Definiendo calidad de soldadura**

La calidad de soldadura se relaciona directamente con la integridad de las soldaduras. Si una soldadura tiene una confiabilidad requerida a través de su vida, esta debe mostrar un nivel suficiente de calidad y ajuste para el propósito. La calidad incluye consideraciones del diseño, lo cual significa que cada soldadura debería estar:

1. Adecuadamente diseñada para cumplir el servicio a la que está destinada para la vida requerida.
2. Fabricada con materiales especificados en acuerdo con los estándares de diseño; e
3. Instalada, operada y mantenida dentro de los esfuerzos, fatiga, y límites de corrosión de diseño.

Calidad es ambas cosas un término cualitativo y cuantitativo que es regularmente usado como una manera relativa de referenciar la necesidad percibida para mejorar un producto. Para requerir estándares más altos de los que se necesitan para una aplicación no es solo innecesario sino que también es económicamente imprudente. Por lo tanto, a los niveles de calidad se les permite variar entre diferentes soldaduras múltiples y soldaduras individuales, dependiente de los aspectos de sus requerimientos de diseño.

La mayoría de los estándares de fabricación de soldadura definen requerimientos de calidad para asegurar la operación en el servicio destinado. Las estipulaciones en estos estándares son consideradas como requerimientos mínimos, y los criterios de aceptación para las soldaduras no deberán ser incumplidos sin el beneficio de los criterios de ingeniería. Para aplicaciones críticas, serán necesarios requerimientos más estrictos que los especificados en el estándar de fabricación para asegurar la seguridad.

La calidad de soldadura puede ser verificada por inspección no destructiva (NDE por sus siglas en inglés). Los estándares de aceptación para soldaduras son generalmente relacionadas con el método de NDE usado en su inspección. Todas las desviaciones de los límites de aceptación requieren una evaluación. La aceptación o rechazo de una soldadura está basada en las condiciones de aceptación definidas. La reparación de una condición inaceptable o defectuosa es normalmente permitida si la calidad de la soldadura puede ser si está por encima de los estándares de aceptación. Los requerimientos de calidad son especificados por códigos, estándares, especificación y regulaciones que son basadas en evaluaciones racionales, referencias económicas, desempeño y seguridad. Es importante tener en cuenta que muchos estándares relacionados con la calidad de soldadura no regulan el uso del producto.

La óptima calidad requerida para una soldadura es determinada considerando los siguientes factores:

1. Costo del diseño, materiales, fabricación, y aseguramiento de la calidad.
2. Costo de una posible falla multiplicada por la probabilidad de falla.
3. Costos de mantenimiento y reparación.

- **Determinación de los requerimientos de soldadura**

Los criterios primarios afectan la selección de los requerimientos de calidad son el diseño, la fabricación, la inspección, la operación, mantenimiento y la economía. La determinación de los requisitos generales para soldaduras, soldaduras fuertes, o soldaduras blandas es una mayor consideración involucrar a los equipos de diseño y grupos de calidad. Especificar calidad excesiva con llevar a elevar los costos con pocos beneficios, pero especificar soldaduras de baja calidad puede llevar a incrementar los costos de mantenimiento y un excesivo número de fallas. Por lo tanto, el objetivo es especificar las características que lleven a la aptitud para el servicio.

Afortunadamente, la orientación valiosa en la determinación del nivel deseado de la calidad de soldadura se proporciona en los códigos y estándares de fabricación. Estos incluyen indicar los niveles permisibles de discontinuidades y esfuerzos. Estos códigos y estándares están basados en las propiedades del material, experiencia en la fabricación, resultados de pruebas no destructivas, fallas, e investigación. En conjunto, estas han demostrado la promoción de la producción segura, soldaduras confiables (13).

2.4.4 Discontinuidades de soldadura

Las discontinuidades de soldadura son condiciones no intencionales que ocurren durante el proceso de soldadura y resultan en condiciones indeseables en la soldadura o en el metal base adyacente. Si se espera que las discontinuidades de soldadura sean perjudiciales para el servicio, estas deben ser evaluadas. Todas las condiciones de soldadura no intencionales que posiblemente pudieran afectar la utilidad de la soldadura, y que son causadas por el proceso de soldadura son llamadas discontinuidades. Estas discontinuidades que no cumplen con los estándares de aceptación impuestos por el ingeniero/dueño o son razonablemente esperadas para tener efectos perjudiciales en el servicio son llamados defectos.

- **Estándares de aceptación de soldadura**

Los estándares de aceptación de soldadura son usualmente escritos para los peores casos. Estos pueden no ser razonables en todos los casos. La evaluación de ingeniería y el juicio puede ser necesario para prevenir gastos innecesarios de recursos para reparar un defecto que pudiera no afectar el servicio de una soldadura. El diseñador/dueño que impone los estándares de aceptación deberá siempre tener en mente que en algunos casos una reparación de soldadura que solo cumple los puede hacer que un componente reduzca su utilidad, o en algunos casos lo haga inutilizable. Un poro o porosidad que no cumpla los estándares de aceptación y es profundo dentro de la pared de un forjado podría frecuentemente ser mejor dejarlo como se encontró a buscar realizar la reparación. La razón para estos es que cuando un forjado es reparado, este tendrá una estructura metalúrgica no uniforme (cuando metal de forja ha sido reemplazado con metal de soldadura); altos esfuerzos residuales; menor resistencia a la fatiga; micro contracciones en el metal forjado adyacente podrían desarrollarse en micro fisuras del forjado;

serios problemas de distorsión podrían desarrollarse; y frecuentemente; las propiedades de la resistencia a la corrosión disminuyen.

- **La causa de los defectos de soldadura**

Existen muchas causas específicas de las discontinuidades de soldadura, sin embargo estas pueden ser generalmente categorizadas en los siguientes grupos:

- Habilidades y experiencia del personal
- Las características del proceso de soldadura
- Selección y propiedades del metal base
- Ambiente de soldadura

- **Discontinuidades de soldadura comunes**

Las discontinuidades comunes encontradas en soldaduras completas son:

- Craters
- Fracturas en la cara de la soldadura
- Fracturas en la zona afectada por el calor
- Desgarres laminares
- Fracturas longitudinales
- Fracturas en la raíz
- Fracturas superficiales de la raíz
- Fracturas en la garganta de la soldadura
- Fracturas en el pie de la soldadura
- Fracturas transversales
- Fracturas debajo del cordón
- Fracturas en la cara interna de la soldadura

- Fracturas en el metal de soldadura
- Laminación

En la **Tabla 2. 8** se muestran los diferentes tipos de discontinuidades y su localización para una mejor identificación en las figuras mostradas a continuación para tener una ejemplificación más clara (14).

Tabla 2. 8 Tipos de discontinuidades en la soldadura (14)

Tipo de discontinuidad	ID de la discontinuidad	Localización	Observaciones
Porosidad uniformemente dispersa	1 ^a	S	
Agrupación	1b	S	
Lineal	1c	S	
Tubular	1d	S	
Inclusiones de escoria	2 ^a	S	
Fusión incompleta	3	S	En los límites de la unión o entre pases
Penetración inadecuada en la junta	4	S	Raíz de la preparación de la soldadura
Socavaciones	5	ZAC	Unión de la soldadura y metal base en la superficie
Relleno incompleto	6	S	Afuera de la superficie de la preparación de la soldadura
Traslape	7	S/ZAC	Unión de la soldadura y el metal base en la superficie
Laminaciones	8	MB	Metal base, generalmente cerca de la mitad del espesor de la sección
De laminación	9	MB	Metal base, generalmente cerca de la mitad del espesor de la sección

Fisuras y traslapes	10	MB	Superficie del metal base, casi siempre longitudinal
Desgarres laminares	11	MB	Metal base, cerca de la ZAC
Fracturas longitudinales (incluye fracturas en caliente y en frio)	12a	S, ZAC, MB	Soldadura o metal base adyacente a la frontera de fusión de la soldadura
Transversal	12b	S, ZAC, MB	En la soldadura que se puede propagar a la ZAC y al metal base
Cráter	12c	S	Soldadura, en el punto donde el arco termina
Garganta	12d	S	Eje de la soldadura
Pie	12e	ZAC	Unión entre la cara de la soldadura y el metal base
Raíz	12f	S	Metal de soldadura, raíz
Bajo el cordón y en la zona afectada por el calor	12g	ZAC	Metal base y ZAC
Fisuras		S	Metal de soldadura

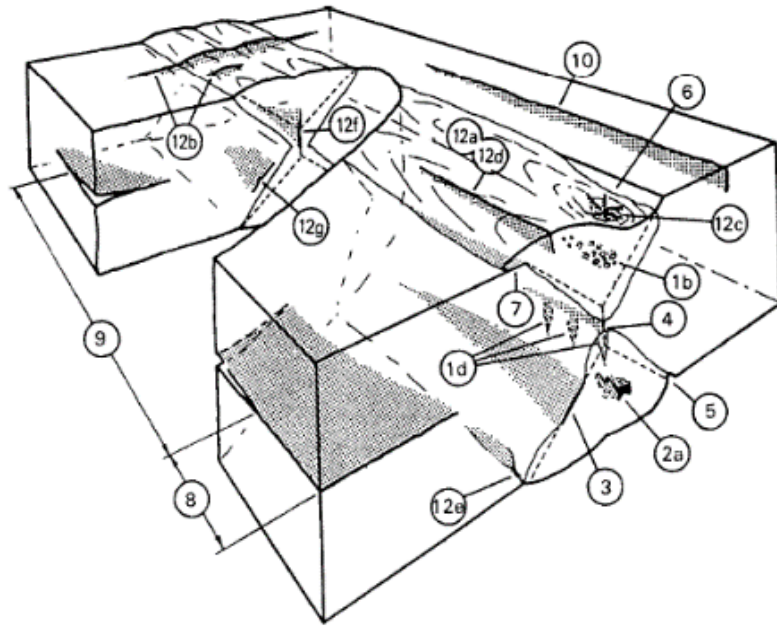


Figura 2. 14 Soldadura ranura en doble V con unión a tope (14)

- **Penetración inadecuada y fusión incompleta de la unión en el proceso GMAW**

La penetración inadecuada de la unión ocurre cuando la profundidad a la que la soldadura penetra, **Figura 2. 15**, es menor que la necesaria para fusionar a través de la placa o dentro de la soldadura que le precede. Un defecto generalmente ocasiona en que pudiera reducir el área de la sección transversal de la unión o se convierte en un punto de concentración de esfuerzos que llevará a una falla por fatiga. La importancia de tales defectos depende de la sensibilidad de la ranura del metal y el factor de seguridad al cual la soldadura ha sido diseñada. A continuación se mencionan las causas mayores de una penetración inadecuada de la unión:

- **Técnica inapropiada de soldadura:** La causa más común es un arco mal dirigido. Además, la técnica de soldadura puede requerir que ambos el inicio y la

corrida de cordones sean usadas de tal modo que el charco de soldadura sea bien puesto antes de que se solidifique. Algunas ocasiones, una falla al realizar la preparación de la raíz provee una cara de raíz más profunda de la permitida, **Figura 2. 16.**

- **Corriente de soldadura insuficiente:** Los metales que son gruesos o tienen una alta conductividad térmica son además precalentados para que el calor de la soldadura no se disperse rápidamente del metal y que este no pueda penetrar en la unión.
- **Unión inapropiada:** Este problema resulta cuando las uniones de soldaduras no son preparadas o ajustadas correctamente. Una pequeña apertura de raíz o una cara de raíz muy grande mantendrán la soldadura penetrando inadecuadamente.
- **Diseño inapropiado de la unión:** Cuando las uniones son accesibles por ambos lados, el ranurado por la parte posterior es usado con frecuencia para asegurar la fusión en la raíz al 100%.

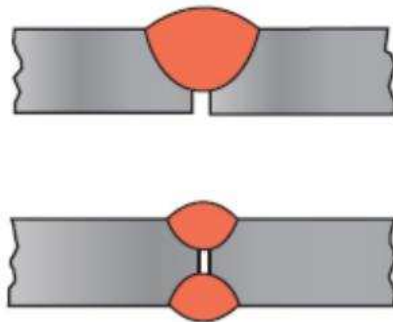


Figura 2. 15 Penetración inadecuada de la unión (14)

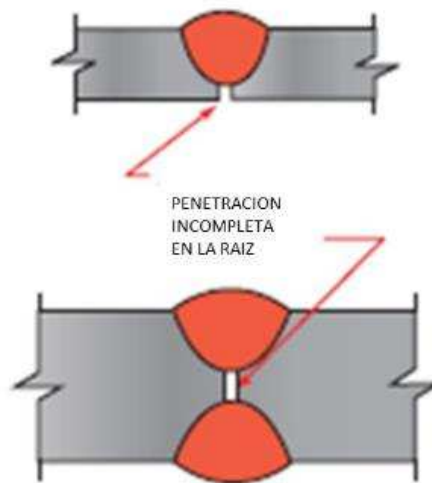


Figura 2. 16 Penetración incompleta en la raíz (14)

- **Fusión incompleta**

La fusión incompleta es la falta de coalescencia entre el metal de aporte fundido y el metal de aporte previamente depositado y/o el metal base, **Figura 2. 17**. La falta de fusión entre el metal de aporte y el metal de soldadura previamente depositado es llamado traslape de interfase en frío. La falta de fusión entre el metal de soldadura y la cara de la unión es llamada falta de fusión en la pared lateral. Ambos de estos problemas usualmente se presentan a lo largo de la mayoría de las longitudes de la soldadura.

A continuación se encuentran algunas de las causas mayores de la falta de fusión:

- **Agitación inadecuada:** Es la falta de agitación de la soldadura para romper las capas de óxido. El metal o el metal de aporte se puede fundir, pero una capa delgada de óxido podría evitar la ocurrencia de la coalescencia.
- **Técnicas inapropiadas de soldadura:** Pobre manipulación, tales como mover muy rápido o usar inapropiadamente el ángulo del electrodo.

- **Proceso de soldadura equivocado:** Por ejemplo, el uso de la transferencia por corto circuito con GMAW para soldar una placa más gruesa que 6 mm puede causar el problema porque este proceso tiene un calor de entrada limitado en la soldadura.
- **Preparación inapropiada del perfil:** Cualquier muesca o socavación en el perfil de la unión de la soldadura como se muestra en la **Figura 2. 18** deberá ser removido. Por ejemplo, si una placa con corte a flama tiene muescas a lo largo del corte, este podría resultar en una falta de fusión en cualquier muesca.
- **Diseño inapropiado de la junta:** La fusión incompleta puede también resultar de calor insuficiente para fundir el metal base, o un espacio muy pequeño debido al diseño de la junta para permitir la correcta manipulación del charco de soldadura.
- **Limpieza inapropiada de la unión:** Fallar en la limpieza de óxidos de las superficies de la unión que resultan del uso de una antorcha de oxigas para cortar la placa, o fallar al remover escoria de una soldadura previa. La fusión incompleta puede ser encontrada en soldaduras realizadas por la mayoría de los procesos (14).

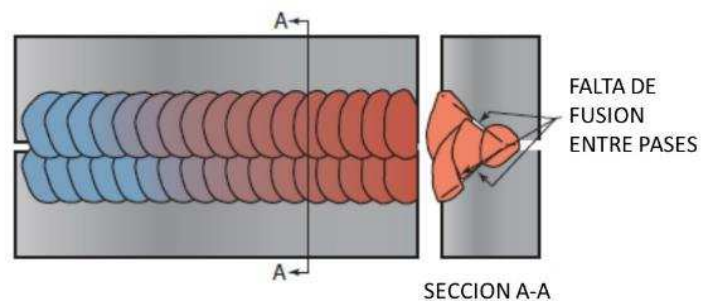


Figura 2. 17 Fusión incompleta (14)

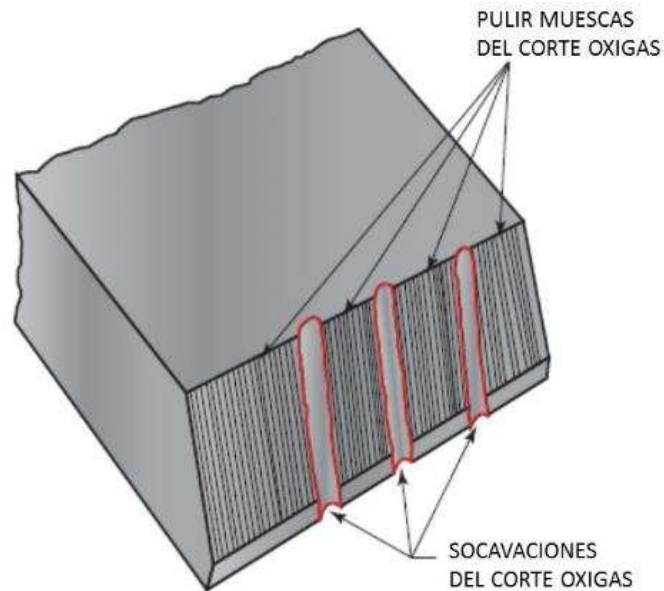


Figura 2. 18 Remoción de las socavaciones y muescas a lo largo de la unión antes de soldar (14)

2.4.5 Pruebas no destructivas

Un ingeniero de soldadura realiza diseños que cumplan con los rigores de las condiciones de fabricación y uso. A parte de las simulaciones de diseño y modelado matemático, existen solo dos maneras para determinar objetivamente si el diseño realmente trabajará. Una de estas es poner siempre el producto diseñado en pruebas reales de durabilidad en campo, pero estas tienen muchas serias implicaciones, como costos altos, tiempo invertido entre otros factores.

Las pruebas reales de durabilidad en campo pueden ser prohibitivamente muy caras, además podrían destruir las soldaduras y por consiguiente no podrían ser sometidas a cargas completas.

Una segunda opción es poner la soldadura a través de un régimen de prueba de simulaciones por computadora y modelos matemáticos. Esto puede ser complementado por una prueba selectiva de propiedades de material durante el

proceso de producción, involucrando inspección de materiales y soldaduras vía métodos de prueba no destructivos. En algunos casos, tales como los recipientes a presión, tubos y líneas de tuberías, se realiza una prueba adicional de presión con la finalidad de probar el diseño de la misma.

El término general de prueba no destructiva (NDT por sus siglas en inglés) o algunas veces examinación no destructiva (NDE por sus siglas en inglés) es usado para identificar todos aquellos métodos de inspección que permiten la evaluación de materiales y soldadura sin destruirlos.

Los elementos comunes de casi todas las pruebas no destructivas son:

- a) Una fuente de energía de sondeo
- b) Un espécimen de prueba que es apropiado para la fuente de energía que está siendo usada, es importante para que las discontinuidades puedan ser detectadas.
- c) Un detector que pueda medir con precisión la distribución y cambio de energía
- d) Una técnica para registrar y mostrar la información recibida del detector
- e) Un operador entrenado y calificado para inspeccionar e interpretar la retroalimentación de una unidad de detección

Las bases fundamentales de seleccionar un tipo particular de prueba no destructiva dependen de la energía disponible, el tipo de material a ser probado, el objetivo de la inspección y el grado de precisión requerido. La habilidad de los ingenieros para tomar una decisión correcta para usar un solo método de prueba no destructiva o un grupo de ellas, es afectado no solo por sus conocimientos de varias pruebas disponibles, sino también por sus conocimientos de los límites y ventajas de ellas, y su habilidad para usarlas para complementar limitaciones interdisciplinarias. Los ingenieros pueden diseñar un protocolo de prueba más efectivamente usando su conocimiento de los procesos de manufactura primarios y secundarios involucrados en la producción y fabricación, su secuencia, incluyendo claro un gran conocimiento de procesos como soldadura, forjado,

vaciados, maquinado, etc. Este será ayudado además por un profundo conocimiento en los ciclos de calentamiento y enfriamiento usado en varios materiales.

En la **Tabla 2. 9** se muestran los métodos de pruebas no destructivas y sus abreviaciones aceptadas (15):

Tabla 2. 9 Listado de pruebas no destructivas (15)

Métodos no destructivos (NDT)	Nombre del NDT	Abreviaciones aceptadas
1	Inspección visual	VT
2	Radiografía	RT
3	Prueba de partículas magnéticas	MT
4	Líquidos penetrantes	PT
5	Prueba de ultrasonido	UT
6	Prueba de corriente de Eddy	ET
7	Prueba de emisión acústica	AET
8	Prueba de ferrita	FT
9	Prueba de fugas	LT
10	Pruebas de calidad	PRT

2.4.6 Inspección con Ultrasonido en soldaduras

El ultrasonido es uno de los métodos de inspección no destructiva más ampliamente utilizados. Este método utiliza ondas de sonido con frecuencias en rangos de megahertz (MHz). En la técnica, ondas de sonido de alta frecuencia son transmitidas a través del material que está siendo inspeccionado. Estas viajan

a través del material con algunas pérdidas de energía (atenuación) y son reflejadas en interfaces o discontinuidades como fracturas, imperfecciones, inclusiones, y fisuras. El haz de sonido reflejado de las imperfecciones o interfaces es detectado y analizado para definir la presencia y localización de discontinuidades o el espesor del material.

También es especialmente utilizado para determinar las características de ingeniería de los materiales como su módulo de elasticidad, estudio de la estructura metalúrgica, tamaño de grano, y la variación de la densidad. La **Figura 2. 19** muestra un método convencional de ultrasonido y la **Figura 2. 20** muestra una técnica de arreglo de fases.

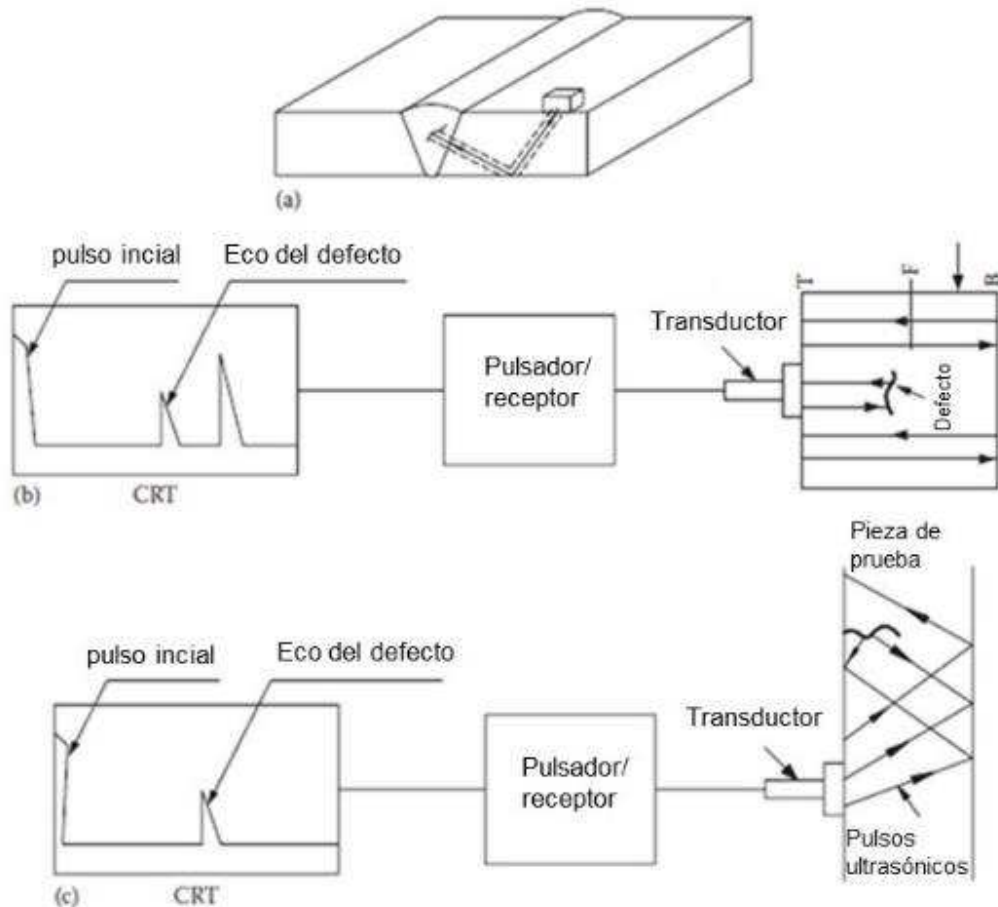


Figura 2. 19 Principio de ultrasonido – Método convencional (15)

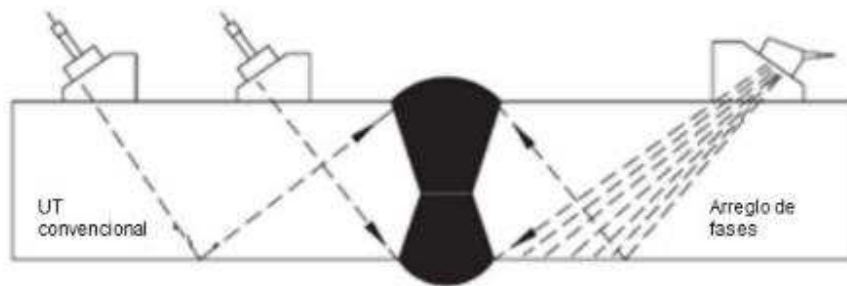


Figura 2. 20 Técnica de arreglo de fases comparada con el método convencional (15)

- **Método de Prueba**

Las técnicas de ultrasonido básicas y sus aplicaciones son las siguientes:

1. Eco de impulsos: más efectivo para fracturas, inclusiones, y mediciones de espesor.
2. A través de la transmisión: más efectiva para porosidad, tamaño de grano, y mediciones de densidad.
3. Resonancia: más efectiva para la detección de espesor y discontinuidades laminares.

Existen tres modos de vibraciones ultrasónicas que son frecuentemente usadas en el ultrasonido de materiales. Estas son (1) ondas longitudinales, (2) ondas transversales, y (3) ondas superficiales o rayleigh. La mayoría de las pruebas de soldadura con ultrasonido son realizadas manualmente por un operador que manipula un aparato de ultrasonido sobre el objeto de prueba y monitoreando visualmente la pantalla de un osciloscopio. El método eco de impulsos con un escáner A de presentación de datos es más comúnmente usado para inspeccionar soldaduras. Este sistema utiliza una pantalla de tubo de rayos catódico (CRT por sus siglas en inglés) para mostrar la información de la prueba.

- **Placa de prueba para ultrasonido:** Las placas de prueba para ultrasonido (**Figura 2. 21**) están disponibles para llevar a cabo la prueba de borde a borde antes de las operaciones de corte o soldadura para revisar rápidamente la presencia de laminaciones, discontinuidades internas como poros, rupturas, o inclusiones de escoria.
- **Examinación ultrasónica de soldaduras de boquillas:** El ultrasonido es de primera importancia para examinar la unión de soldaduras de boquillas y ramales donde el espesor de pared involucrado está en las dimensiones de 25 mm o más. Varios equipos automáticos y semiautomáticos han sido desarrollados para soldadura de tipo doble filete a través de las boquillas. La soldadura de ramal es normalmente sujeta a una examinación al 100% antes y después del tratamiento térmico. El equipo más invariable emplea una prueba de onda longitudinal operada desde el diámetro de la boquilla.

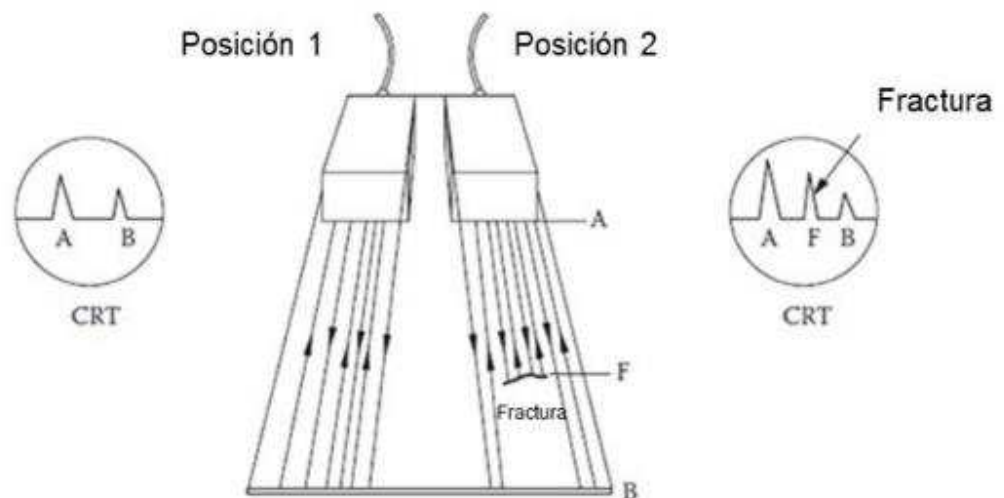


Figura 2. 21 Placa de prueba de ultrasonido (15)

- **Procedimiento escrito**

La información mínima requerida para el procedimiento escrito para ultrasonido es detallado en el código ASME sección V.

A continuación se muestra una lista parcial de información que debe estar contenida en un procedimiento escrito de Ultrasonido:

1. Alcance: materiales y tipo de producto (pieza fundida, forja, placa, etc.
2. Preparación de la superficie
3. Acoplante
4. Técnica (haz recto, haz angular, contacto o inmersión)
5. Ángulos y modos de propagación de la onda en el material
6. Detalle de la unidad de búsqueda
7. Detalle de los instrumentos de ultrasonido como frecuencia, tamaño de pantalla, control de la lineamiento de la amplitud
8. Blocks de calibración y referencia
9. Extensión de escaneo, máxima velocidad de escaneo, y patrón de escaneo
10. Descripción de la demostración o calificación del procedimiento usado para detectar y dimensionar los defectos
11. Evaluación
12. Criterios de aceptación
13. Post limpieza
14. Reporteo

- **Deficiencias del procedimiento de examinación ultrasónica**

Estos pueden incluir insuficiente examinación, sensibilidad incorrecta de escaneo contra sensibilidad de calibración, falla para describir la recalibración, registro, y falla para verificar la linealidad del instrumento.

- **Ventajas de una inspección ultrasónica**

El detector de defectos ultrasónico convencional es bien conocido por su portabilidad, simplicidad de operación, poder superior de penetración, y alta sensibilidad, y permite hacer pruebas desde una superficie. El método provee indicaciones de discontinuidades casi instantáneas. El método de ultrasonido es particularmente sensible para la detección de defectos en 2D como fracturas finas y defectos de tipo laminar, los cuales no son fáciles de encontrar con otros métodos incluyendo la radiografía.

- **Limitaciones de la inspección de ultrasonido**

Algunas limitaciones de este método incluyen lo siguiente:

1. La precisión y reproducibilidad de este método depende en mayor parte de la habilidad del operador.
2. Todos los resultados son basados en una evaluación subjetiva, y registros objetivos no son posibles de obtener.
3. Las discontinuidades que están presentes en una capa superficial inmediatamente debajo de la superficie pueden no ser detectables.
4. Señales erróneas debido al tamaño de grano.
5. El fondo de la señal de ultrasonido que surge de la interface revestida/metálica de una placa revestida puede hacer difícil detectar defectos arriba de 10 mm de profundidad.
6. Una geometría no favorable de la unión y barras de respaldo algunas veces crea indicaciones falsas o no relevantes que pueden ser confundidas con una soldadura defectuosa.
7. Problemas en la raíz de la soldadura.
8. Los estándares de referencia hecho de un material similar como está siendo probado son requeridos para la calibración.
9. El ultrasonido es menos adecuado que la radiografía para determinar porosidad en las soldaduras (15).

CAPITULO 3

ESTADO DEL ARTE

3.1 Propiedades mecánicas de los Aceros Hardox 400 resistentes a la abrasión y sus uniones soldadas (16).

En el año 2003 los investigadores Henryk Buglacki y Monika Smajdor de la Universidad de Tecnología de Gdansk de la Facultad de Ingeniería Oceánica y Tecnología Naval realizaron un análisis sobre las propiedades mecánicas del material base y las uniones soldadas de los aceros Hardox resistentes a la abrasión presentando resultados de las propiedades mecánicas; además de predecir las propiedades mecánicas de dicho material mediante un análisis de regresión.

El objetivo principal fue comparar los resultados de las propiedades mecánicas básicas obtenidas en las pruebas de laboratorio con los resultados de acuerdo a las ecuaciones de correlación.

Emplearon la placa Hardox 400 de 15 mm para obtener las propiedades mecánicas, las pruebas llevadas a cabo de acuerdo a las sociedades de clasificación naval, en el cual se obtuvo una dureza Vickers entre 388.6 y 392.4 HV10. En las uniones soldadas se presentaron resistencias a la tensión entre 710 y 730 MPa y los ensayos de dobléz con resultados positivos.

Para estimar las propiedades mecánicas del material base y las uniones soldadas, las ecuaciones de correlación, las cuales ayudan a obtener la resistencia a la tensión R_m , el punto de cedencia R_e , elongación A_5 , la reducción de área en la fractura y la resistencia al impacto dependen de los siguientes factores:

- Endurecimiento de la cementita
- Endurecimiento de la solución
- Endurecimiento de grano
- Endurecimiento del precipitado

En los pronósticos de la simulación de las pruebas mecánicas se obtuvo como resultado en la resistencia a la tensión (R_m) entre 688 y 739 MPa entre las 4 uniones, resultado del punto de cedencia (R_e) entre 622 y 675 MPa, una elongación A_5 de entre 27 y 28 % y una reducción de área de entre 148 y 185%.

La estimación obtenida en la simulación de las propiedades mecánicas muestra diferencias en los valores debido a la falta de una base de datos adecuada y conectada con su dificultad de cálculo de los factores de correlación. La composición química y R_m y HV están dadas dentro de especificación.

Al final de la investigación se llegó a las siguientes conclusiones:

- Existe buena concordancia de los resultados de laboratorio y los resultados obtenidos por las ecuaciones de correlación para las propiedades mecánicas del material base y las uniones soldadas.
- La mejor evaluación de las propiedades mecánicas del acero Hardox 400 necesita tener pruebas de laboratorio y análisis teórico.

3.2 El impacto del electrodo de soldadura en las propiedades mecánicas de las uniones soldadas (17).

En el año 2014 los investigadores Madgalena Mazur, Robert Ulewicz de la Universidad de Tecnología de Czestochowa, Polonia y Otakar Bokůvka de la Universidad de Žilina, Univerzita de la República Eslovaca, realizaron un análisis acerca de las propiedades mecánicas de las uniones soldadas de los aceros Hardox 450, en donde las uniones de soldadura fueron realizadas de acuerdo a especificaciones de procedimiento de soldadura (WPS). Los metales de aporte fueron provistos por electrodos de soldadura G4Si1 con 2 diámetros diferentes uno de 1.0 mm y otro de 1.2 mm respectivamente. El objetivo de este estudio fue examinar si el espesor del electrodo de soldadura tiene un efecto directo en las propiedades de las uniones soldadas. Las probetas fueron realizadas con los mismo parámetros del proceso de soldadura y usando como única variable el diámetro del electrodo. Estos fueron sujetos a examinación macroscópica, resistencia a la tensión, resistencia al impacto y prueba de dureza.

Dos probetas de placa de 8 mm de acero Hardox 450 fueron preparadas en configuración en V, con una a posición PF (vertical desde abajo hacia arriba) y soldadas en 4 pases por el método de arco metálico protegido con gas (GMAW por sus siglas en inglés).

Durante las pruebas se obtuvieron resultados de punto de cedencia de entre 525 y 1250 MPa, una resistencia a la tensión de entre 595 y 1450 MPa, una elongación de 8% y 26% para el electrodo y el acero respectivamente, una dureza HB de 425 a 475 para el acero, y una resistencia al impacto de 25 J (-40 °C) para el acero y 70 J (-30 °C) para el electrodo.

El valor de calor de entrada fue usado para ambos diámetros de metales de aporte. El gas de protección fue una mezcla M21 (PN EN 439), que es una mezcla que contiene helio de 33 a 66%, CO₂ del 0 al 5% y el resto de Argón para balancear.

Basado en las examinaciones visuales y macroscópicas de las uniones soldadas, la calidad obtenida de las uniones soldadas fue evaluada de acuerdo al estándar PN-EN ISO 5817, en base a esto se determinó que ambos tipos de soldadura cumplen con los requerimientos de la soldadura clase B (altos requerimientos).

Las probetas fueron sometidas a prueba no destructiva de rayos X el cual no reveló fracturas o cavidades y se excluyeron de falta de fusión, lo único que mostraron fue penetración excesiva pero las mediciones demostraron que esto estaba dentro de tolerancia del estándar.

Esta prueba se realizó con dos tipos de soldadura, el primero con soldaduras “reforzadas” el cual no llevaba pulido en la unión o alguna otra operación y el segundo tipo las no reforzadas las cuales fueron pulidas después de la soldadura para dejar el cordón coplanaria con la superficie de la placa soldada. Usualmente las soldaduras no pulidas tienen mayor resistencia a la tensión que las que fueron pulidas.

Se realizó la prueba Charpy de muesca V con probetas de 10 x 6 mm (área superficial de 48 mm²) de dimensión. Las pruebas fueron colocadas perpendicularmente a la dirección de la soldadura. La prueba de impacto fue llevada a cabo a una temperatura de -40 °C para estudiar las propiedades de las uniones soldadas en las condiciones de fractura frágil, de acuerdo al fabricante el valor específico de la resistencia al impacto para el acero Hardox 450 es 25J a -40 °C, lo que equivale a 32 J/cm² (para el material base). En las pruebas realizadas se obtuvo que el diámetro del electrodo no afecta en la resistencia al impacto para ninguna de las 4 localizaciones de la muesca. Todas ellas muestran altos valores de resistencia al impacto. Esto mismo sucedió en la prueba para el metal de soldadura realizado a 70 J y -40 °C.

El estudio experimental de este artículo nos llevó a las siguientes conclusiones:

- El perfil de dureza para la soldadura completa reduce su dureza de 350 a 200 HV3 como era de esperarse debido a la contribución del calor de entrada el cual causa un revenido del metal base.
- Un incremento de dureza en la zona de fusión de 200 a 300 HV se pudo observar probablemente por la alta tasa de enfriamiento después de la fundición del metal durante el proceso de soldadura
- La resistencia al impacto es muy alta en las uniones con refuerzo (800 Mpa) comparado con las que no tienen. La menor resistencia al impacto se encontró en el metal de soldadura (700 MPa), pero es igual o mayor que la típica resistencia al impacto del metal de aporte.

3.3 Mejora de las propiedades de operación de los elementos de la maquinaria para la minería de carbón (18)

En el año 2013 los investigadores Artur Czupryński, Jacek Górka, Jarosław Ślosarczyk, analizaron la posibilidad de mejora en las propiedades de operación de las palas mecánicas de minería, fabricadas con acero S355, mediante la soldadura de elementos de forro de acero Hardox 450 para colocarlos en los lugares más expuestos a la degradación por abrasión dinámica.

Uno de los problemas ha sido la necesidad de cambiar constantemente los componentes de maquinaria para minería que están expuestos a la abrasión y cargas dinámicas por lo cual es importante sustituirlos por materiales que se caractericen por tener más alta resistencia a la abrasión que los usados previamente y que se constituyen de acero estructural S355. Los elementos de reemplazo deben contar con buena soldabilidad para poder unirse con el acero S355. Debido a que el precio del acero Hardox 450 es tres veces mayor que el acero S355 por el hecho de ser un acero martensítico de baja aleación y con alta resistencia a la abrasión, es justificable usarlo solo como forro en los componentes de las excavadoras.

Las tecnologías de soldadura que se utilizaron para la unión de las placas de acero Hardox 450 (200 x 400 x 8 mm) con las placas hechas de acero S355J0 fueron el de arco metálico con electrodo revestido (SMAW por sus siglas en ingles) y el de arco metálico protegido con gas (GMAW por sus siglas en ingles). El acero Hardox 450 cuenta con una resistencia a la tensión de 1430 MPa, un punto de cedencia de 1210 MPa, una elongación de 10% mientras que el acero S355J0 muestra una resistencia a la tensión de 595 MPa, un punto de cedencia de 365 MPa y una elongación de 22%.

Para el proceso de arco metálico con electrodo recubierto (SMAW) se utilizaron electrodos bajo-hidrógeno OK 48.00, mientras que para el proceso de arco metálico protegido con gas (GMAW) se utilizó un electrodo sólido de baja aleación de cobre OK Autrod 13.25.

Los perfiles de las placas a ser soldadas fueron biselados con una ranura en unión en V con un ángulo de 55°. Las placas fueron soldadas sin precalentamiento, en posición vertical (PF), sin exceder una temperatura de interfase de 150°C, usando técnica de multipase.

Posteriormente las probetas se sometieron a prueba radiográfica, después de que se completó el proceso de soldadura, donde solo se encontraron algunos poros dentro de la unión de nivel B.

En las pruebas de tensión estática las probetas soldadas mediante SMAW obtuvieron resultados de 590.3 MPa y una elongación de 19.7%. Mientras que para las del proceso GMAW se obtuvo una resistencia a la tensión de 585.41 y una elongación de 20.8%.

Los resultados de la prueba de impacto para el proceso SMAW fueron de entre 28 y 73 J donde en la zona afectada por el calor fue donde se utilizó la mínima energía de trabajo entre 28 y 39 J. Para el proceso GMAW los resultados de la prueba de impacto fueron de entre 22 y 74 J donde también la mínima energía de trabajo se presentó en la zona afectada por el calor dando resultados de entre 22 y 23 J.

En microscopía se mostraron microestructuras martensíticas altamente revenidas, y estructuras ferríticas perlíticas.

La tasa de abrasión del material fue de 335 g/min a 600 revoluciones. Los resultados del cálculo relativo de la resistencia a la abrasión relativa para el acero S355J0 fue de 82.47 % mientras que para el acero Hardox fue de 100%

En base a los resultados encontrados se llegó a las siguientes conclusiones:

1. La prueba de resistencia de abrasión metal-mineral de la unión a tope soldada con SMAW con el electrodo bajo en hidrógeno OK 48.00 y la unión soldada mediante GMAW con electrodo OK Autrod

13.25 constituye aproximadamente un 70% de la resistencia relativa a la abrasión del acero Hardox 450.

2. La cantidad de calor de entrada asegura la producción de uniones de alta calidad en el método SMAW y muy similar al valor límite de la energía lineal de soldadura siendo 1.0 kJ/mm, de acuerdo a las recomendaciones del fabricante para el acero Hardox 450 para placas de 8 mm de espesor el cual no debe ser excedido.
3. Los resultados de la prueba obtenidos indicaron la posibilidad de mejorar las propiedades de la pala excavadora fabricada con acero S355J0 proveyendo elementos de forro hechos con acero Hardox 450 en las áreas más expuestas a la abrasión dinámica.

3.4 Características estructurales y de resistencia de los aceros martensíticos resistentes a la abrasión (19).

En el año 2008 los investigadores W.Dudziński, L. Konat y G. Pękański de la Universidad de Tecnología de Wrocław, Polonia realizaron un análisis sobre las características de aceros estructurales de su fuerza y resistencia al impacto de un grupo de materiales de construcción. Estos aceros de estructura martensítica de baja aleación muestran un módulo de alta resistencia, alta resistencia al impacto en condiciones de carga dinámica, y buena soldabilidad. Los grupos de aceros más comunes que han sido objeto de estudio son los aceros Hardox (Hardox 400 y 500), así bien como sus versiones polacas (HTC 700 y HTK 900), en los cuales hay similitud en sus composiciones químicas y procesos de producción salvo que difieren en su estructura lo cual influye en sus propiedades mecánicas

En los análisis de micrografía se presentaron microestructuras de martensita revenida para el acero Hardox 500. Ferrita depositada con perlita, bainita y martensita para el acero HTK 700H, y el acero arnotec 500 una estructura ferrítica martensítica.

Los resultados para el acero HTK 700H fueron de una dureza brinell de 251 HB y un coeficiente de resistencia a la abrasión de 0.94 K, para el acero HTK 900H fue dureza Brinell de 370 HB y coeficiente de 1.10 K, para el acero Hardox 400 una dureza de 418 HB y un coeficiente de 1.11 K y para el acero Hardox 500 una dureza de 507 HB y un coeficiente de 1.06 K.

Conclusiones

- Los aceros bajo la prueba en el estado tal como se entregaron por el proveedor son caracterizados por complejas estructuras con orientación post-martensíticas con numerosas fases de separaciones de carburos, los más cercanos entre uno y otro en similitud son: Hardox 400 y 500, HTK 900H, los aceros Armox y Compass. En el caso de los aceros HTK 700H y Armotec, se mostraron diferencias significativas en la estructura que los constituye. En el estado como se entregaron por el proveedor estos tienen estructura ferrítica - perlítica, así bien como ferrítica - martensítica.
- Las pruebas de las uniones soldadas de los materiales en cuestión mostraron que durante la aplicación con la tecnología recomendada y los parámetros de la junta, tuvo una desintegración de las estructuras martensíticas iniciales.
- La influencia del chorro de fluido de alta energía con abrasión no produjo cambios identificables de la estructura en los aceros examinados, solo deformaciones plásticas y en el caso del acero Hardox 500 hubo numerosas microfracturas.
- La prueba en campo usando aceros Hardox 400 y 500 indicó que fue la opción correcta para forrar las placas de la pala de la dragalina de la excavadora de carbón.

3.5 Cambios en la estructura y dureza de las uniones soldadas de los aceros Hardox (20)

En el año 2008 los investigadores S. Frydman, L. Konat, G y Pekalski de la Universidad de Tecnología de Wrocław, Wybrzeże Wyspiańskiego, realizaron un artículo en donde se muestran la estructura y los cambios en dureza de las soldaduras en aceros Hardox 400 y 500.

Los aceros Hardox, así como los aceros HTK son materiales con buena soldabilidad, con baja o dependiendo de las condiciones, susceptibilidad a las fracturas. Las estructuras para el acero Hardox 400, 500, HTCK 900H y AR400 son de tipo martensítica y para el HTK 700H de tipo martensítica – bainítica.

Los siguientes objetivos de los estudios actuales surgen en el contexto de la siguiente información:

- Identificación de la estructura microscópica en las uniones de soldadura del acero Hardox 400 y 500 en su estado inicial sin sufrir algún proceso y la determinación de la estructura y dureza causados por la aplicación de soldadura.
- Introducción de las transformaciones estructurales en las uniones por el tratamiento térmico para eliminar los cambios en lo mayor posible.

Las uniones de soldadura en los aceros Hardox han sido realizadas usando tecnología de arco sumergido (SAW por sus siglas en inglés). Como material de soldadura se utilizó el electrodo Multimet IMT9 \varnothing 3 mm (contenido de carbono de 0.09%) y el fundente Lincoln Electric FX 780-25. Las pruebas fueron hechas con placas de acero Hardox de dimensiones de 500 x 300 mm (espesor de 8 mm) unidos con soldadura por ambos lados con los siguientes parámetros proveídos para la correcta penetración del material:

- Corriente mínima para el primer cordón de soldadura $I_1 = 300$ A,
- Corriente mínima para el primer cordón de soldadura $I_2 = 500$ A,
- Voltaje del arco eléctrico para ambos cordones de soldadura $U = 30$ V,
- Velocidad constante de la soldadura $v = 0.35$ m/min,

- Energía lineal máxima= 2.57 Kj/mm.

Los resultados del límite de temperatura de 300 °C de dureza y la prueba estructural realizada para los aceros Hardox 400 y 500, está dentro del rango de temperatura de 200°C a 700°C. Arriba de la temperatura de 300°C los aceros conservan un promedio de dureza de: 363 HV10 – Hardox 400 y 428 HV10 Hardox 500. Para la temperatura de revenido de 400°C su dureza disminuye muy rápido, lo cual los excluye de su uso en condiciones de abrasión.

La microestructura del acero Hardox 500 sin sufrir tratamiento térmico resultó en martensita revenida sin un orden claro de los granos de austenita.

La estructura soldada de la unión del acero hardox 500 en la zona de la soldadura muestra un contorno en el área de fusión con orientación post martensítica con áreas de bainita, en la zona afectada por el calor troostita y estructura Widmanstatten, típica para el significativo enfriamiento.

En los análisis también se detectaron cambios de dureza en la unión soldada del acero Hardox 400 sin aplicar tratamiento térmico donde este fue de alrededor de 35 mm de distancia del centro de la unión soldada y una dureza de la soldadura de aproximadamente 210 HV10.

Para el acero Hardox 500 sin aplicar tratamiento térmico una diferencia de dureza de 45 mm de distancia del centro de la unión soldada con una dureza de la soldadura de 230 HV10

Los resultados de la prueba de resistencia de la unión soldada en la placa sin realizar algún proceso han mostrado un promedio de resistencia en la unión del acero Hardox 400 igual a 615 MPa, y para el Hardox 500 la resistencia fue de 634 MPa. Estos son valores muy altos y estos constituyen alrededor del 60% del punto de cedencia del Hardox 400 y alrededor del 50% para el acero Hardox 500.

Una vez realizadas las pruebas, se hizo un análisis comparativo de los resultados:

1. Para la unión de soldadura sin procesos aplicados:
 - a. **Hardox 400:** dureza de 210 HV en la soldadura, dureza máxima 375 HV y dureza en la zona de fusión de 250 HV, con un ancho de la zona con disminución de dureza de 35 mm.
 - b. **Hardox 500:** dureza de 230 HV en la soldadura, dureza máxima 440 HV y dureza en la zona de fusión de 280 HV, con un ancho de la zona con disminución de dureza de 45 mm.
2. Para la unión de soldadura endurecida:
 - a. **Hardox 400:** dureza de 340 HV en la soldadura, dureza máxima 410 HV y dureza en la zona de fusión de 395 HV, con un ancho de la zona con disminución de dureza de 10 mm.
 - b. **Hardox 500:** dureza de 430 HV en la soldadura, dureza máxima 503 HV y dureza en la zona de fusión de 503 HV, con un ancho de la zona con disminución de dureza de 8 mm.
3. Para la unión de soldadura endurecida y revenida a una temperatura de 200 °C:
 - a. **Hardox 400:** dureza de 330 HV en la soldadura, dureza máxima 416 HV y dureza en la zona de fusión de 410 HV, con un ancho de la zona con disminución de dureza de 8 mm.
 - b. **Hardox 500:** dureza de 440 HV en la soldadura, dureza máxima 523 HV y dureza en la zona de fusión de 523 HV, con un ancho de la zona con disminución de dureza de 10 mm.
4. Para la unión de soldadura endurecida y revenida a una temperatura de 300 °C:
 - a. **Hardox 400:** dureza de 363 HV en la soldadura, dureza máxima 393 HV y dureza en la zona de fusión de 393 HV, con un ancho de la zona con disminución de dureza de 12 mm.
 - b. **Hardox 500:** dureza de 385 HV en la soldadura, dureza máxima 500 HV y dureza en la zona de fusión de 417 HV, con un ancho de la zona con disminución de dureza de 60 mm.

Con estas afirmaciones se puede establecer que los aceros Hardox, y sus equivalentes Polacos –aceros HTK, pueden ser usados en amplias aplicaciones además de la construcción de máquinas básicas de minería de carbón.

CAPÍTULO 4.

DESARROLLO DEL PROYECTO

4.1 Desarrollo experimental

Los problemas de falta de fusión en la unión están directamente relacionados con el diseño de la junta y otras variables como los parámetros de soldadura, técnica del colaborador, limpieza de material, etc. Es por eso que se decidió dar seguimiento a este proyecto con la experimentación utilizando las uniones de las placas después de ser cortadas en las camas de plasma (real) y que se estaban utilizando durante el proceso antes de este estudio, para poder compararla contra la unión que proporciona el diseño (especificada) y así poder determinar la unión ideal para obtener la fusión ideal entre las placas. Esto para validar que tan apegado está el proceso contra la especificación.

4.1.1 Análisis de la unión real

Para determinar la magnitud del área de oportunidad se decidió revisar las condiciones del material que estaban arrojando el proceso de corte (plasma) para

compararlo con las nuevas dimensiones de la unión especificada por el dibujo de ingeniería (ver, **Figura 4. 1**).

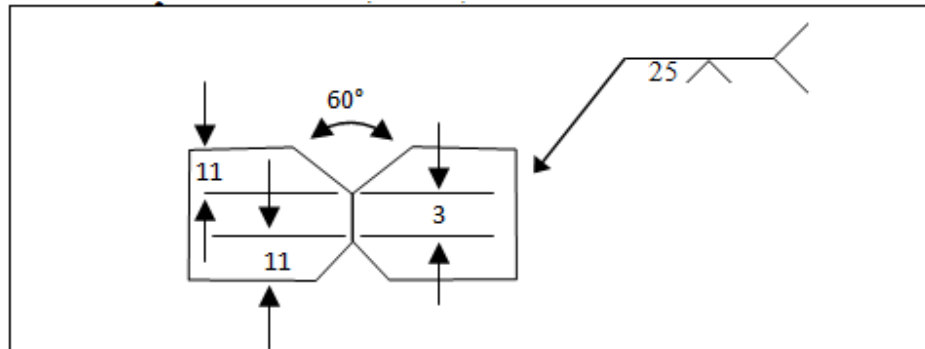


Figura 4. 1 Dibujo ingenieril de la unión de placas base de las cajas para camión minero (Cortesía de la compañía fabricante de cajas para camión)

Este se comparó en físico con los componentes que se estaban procesando en las camas de corte a plasma para lo cual se encontró que estas estaban saliendo con 5 a 7 mm de cara de raíz como se puede observar en la imagen de la **Figura 4. 2**.



Figura 4. 2 Cara de raíz de 5 mm detectada en el muestreo de las placas resultantes en las camas de corte a plasma (cortesía de la compañía fabricante de cajas para camión minero)

Esto a su vez se comparó contra el Anexo A – Uniones precalificadas de soldadura del código D14.3/D14.3M:2010 mostrada en la **Figura 4. 3** , que es una especificación que la compañía fabricante de cajas para camión minero adoptó como mandatoria para las uniones en doble bisel en V, especificación en la cual indica que la cara de raíz debe oscilar entre los 0 y 3 mm en magnitud, realizando la comparación con la cara de raíz que el proceso de corte a plasma estaba arrojando, se definió que la unión de cara de raíz de 5 mm se encontraba fuera de especificación.

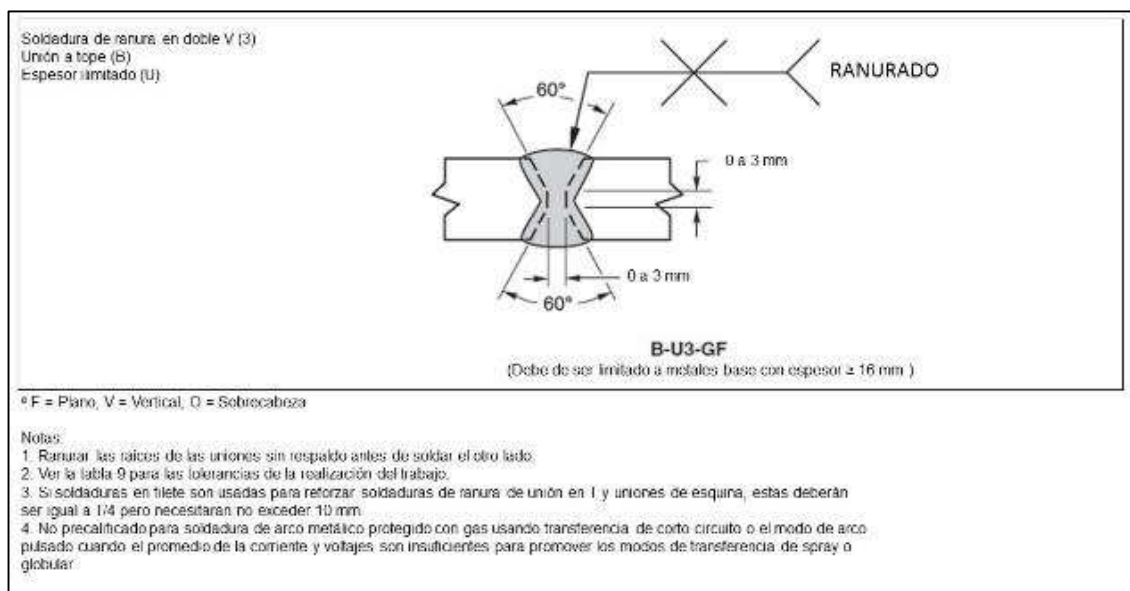


Figura 4. 3 Unión en doble V precalificada para penetración completa de soldadura- Proceso de soldadura por arco metálico protegido con gas (14).

4.2.2 Realización de las probetas para pruebas destructivas y no destructivas

Con lo anterior se decidió realizar un estudio de la ranura con cara de raíz del tamaño que estaban arrojando las camas de corte a plasma (5 a 7 mm) y con la ranura con cara de raíz como lo especifica el diseño de ingeniería (3 mm),

adicionalmente se agregó un análisis con una ranura con cara de raíz ajustada (0mm) para verificar la variación entre uniones y, así determinar cuáles son las mejores dimensiones en la unión que permita reducir o eliminar el defecto de falta de fusión que ha estado impactando en los indicadores de costo en la línea de soldadura de la compañía fabricante de cajas para camión.

Primeramente se fabricaron las 3 probetas con placa de acero Hardox 450 de 25 mm como se muestra en la **Figura 4. 4**, **Figura 4. 5** y **Figura 4. 6**, cada con dimensiones de 7 pulgadas de ancho por 14 pulgadas de largo y con su unión correspondiente.



Figura 4. 4 Configuración de la unión de cara de raíz de 5 mm resultante del proceso de corte a plasma (Cortesía de la compañía fabricante de cajas para camión)



Figura 4. 5 Configuración de la unión de cara de raíz de 3 mm resultante del proceso de corte a plasma y desbaste adicional con pulidor (Cortesía de la compañía fabricante de cajas para camión)

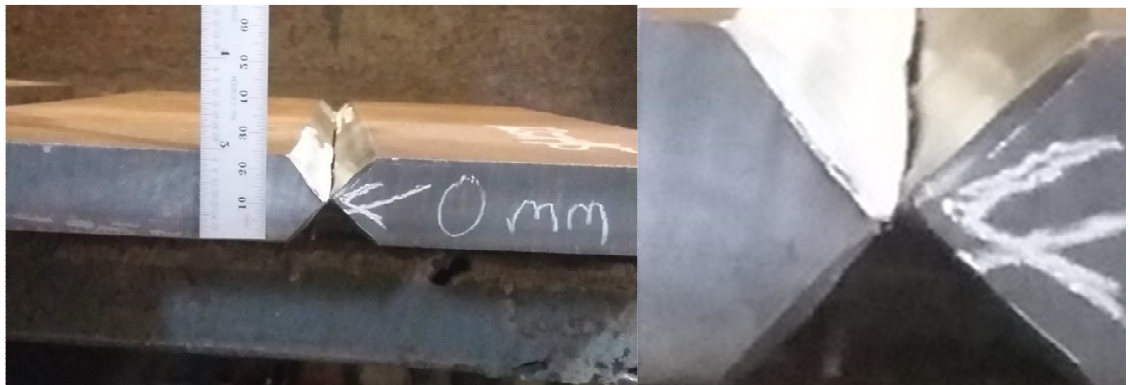


Figura 4. 6 Configuración de la unión de cara de raíz de 0 mm resultante del proceso de corte a plasma y desbaste adicional con pulidor (Cortesía de la compañía fabricante de cajas para camión)

4.2.3 Aplicación de soldadura con parámetros especificados por la compañía fabricante de cajas para camión minero

Posteriormente, se procedió a aplicar soldadura de acuerdo a los parámetros especificados por la compañía fabricante de cajas para camión minero: velocidad de alambre de 13 mpm, diámetro de alambre de 1.1 mm, voltaje de 32 Volts en

promedio, gas de protección mezcla (90% Ar /10 CO₂), sobresaliente de tobera de 19 a 25 mm, flujo de gas de 45 pies³/hora y corriente directa con electrodo al positivo (DCEP por sus siglas en inglés) utilizando una máquina de soldar marca Miller modelo Axxess 675, que se muestra en la **Figura 4. 7**.



Figura 4. 7 Máquina de soldar Miller Axxess 675 (Cortesía de la compañía fabricante de cajas para camión)

Para realizar el análisis de los parámetros de las máquinas de soldar que se estaban manejando físicamente en la línea de soldadura contra los que ya están establecidos en los estándares de trabajo de la compañía, se realizaron las evaluaciones correspondientes en la máquina de soldadura para determinar si no tenía alguna falla técnica.

En la **Tabla 4. 1** se muestran los resultados obtenidos en las evaluaciones y los parámetros especificados con los cuales el equipo debe de cumplir para su correcto funcionamiento y apego a los estándares de calidad.

Tabla 4. 1 Reporte de revisión de la máquina de soldar Miller Axxess 675 (Cortesía de la compañía fabricante de cajas para camión)

Parámetros especificados	Tolerancia	Real en maquina
Velocidad de alambre en cada secuencia	13 +/- 10 % mpm	12.5
Voltaje estipulado en cada secuencia	32 +/- 7% Volts	30
Gas de protección GMAW	Mezcla 90 Ar /10 CO ²	Cumple
Flujo de Gas	45 Pies ³ /hora +/- 10%	50 Pies ³ /hora
Sobresaliente de tobera	19 – 25 mm	25 mm
Polaridad	Invertida (DCEP)	Cumple
Diámetro de alambre solido	0.045" (1.1 mm)	Cumple

Después de descartar que la máquina tuviera alguna falla con los parámetros, se procedió a soldar las probetas con los parámetros especificados por la compañía fabricante de cajas para camión minero. En la **Figura 4. 8** se muestran los pasos principales para el punteo de los pisos de acero Hardox 450 con espesor de 25 mm y unión en doble bisel para la fabricación de las cajas para camión minero, donde destacan los siguientes puntos:

- Separación de las placas de 2 mm
- Pre calentamiento a 125 °C
- Electrodo ER70S-3

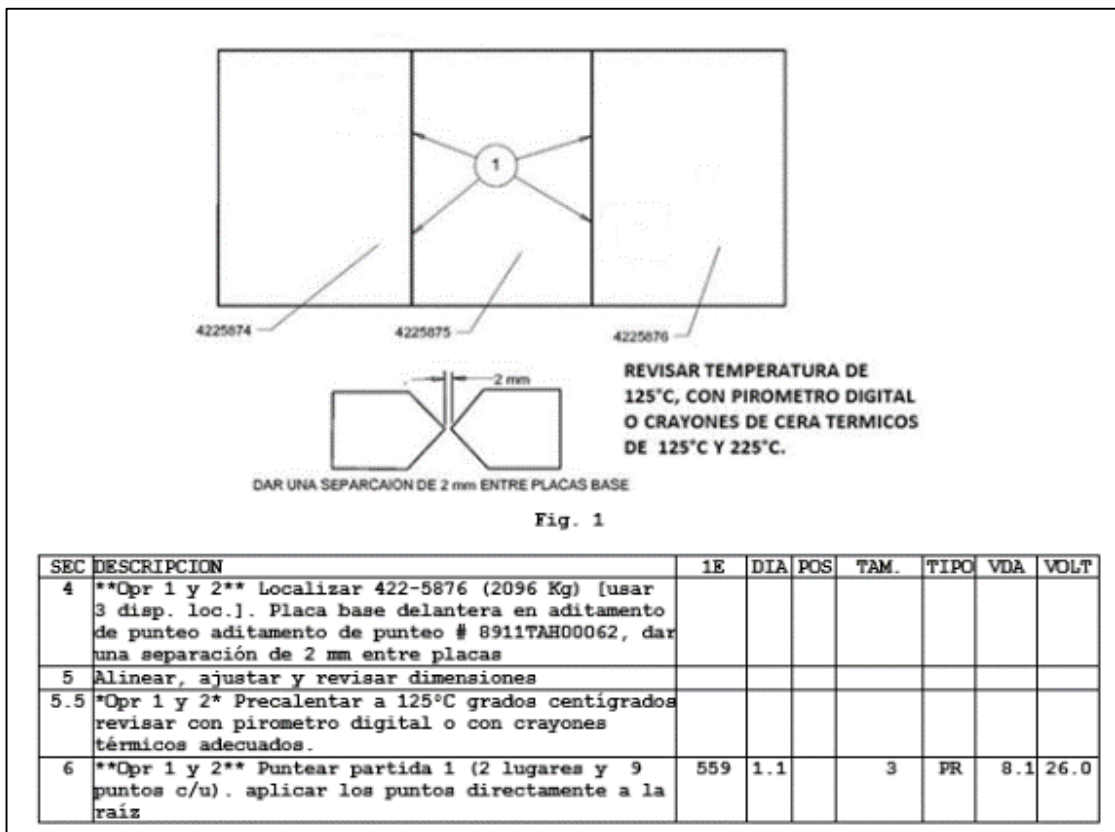


Figura 4. 8 Procedimiento de punteo de pisos Hardox 450 de caja para camión minero (cortesía de la compañía fabricante de cajas para camión)

Posteriormente en la **Figura 4. 9**, se muestra el procedimiento de soldadura final que se siguió para el primer lado donde se indica la aplicación del fondeo, el pase intermedio y el pase de vista de la soldadura, donde nuevamente se indica el precalentamiento a 125 °C y las soldaduras que se deben ir aplicando y en que magnitud con los parámetros de velocidad de alambre y voltaje.

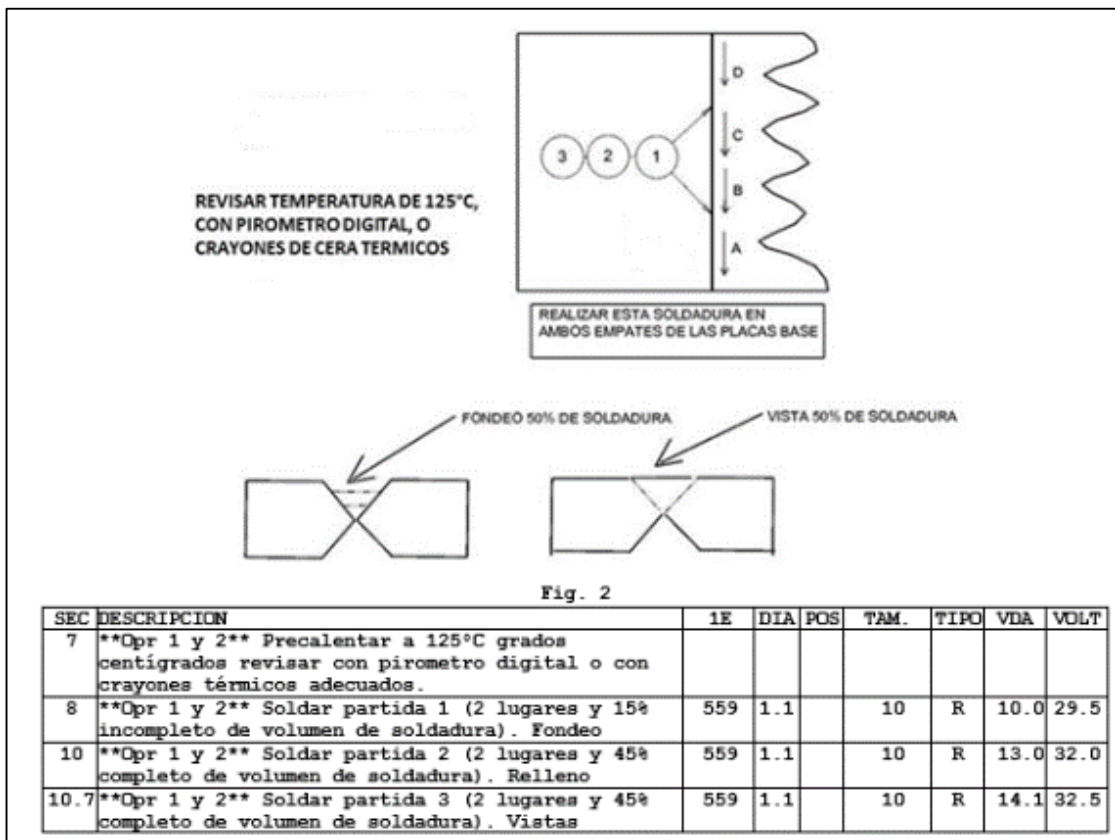


Figura 4. 9 Procedimiento de soldadura final del primer lado de pisos Hardox 450 de caja para camión minero (cortesía de la compañía fabricante de cajas para camión).

Finalmente se realizaron los últimos pasos de la operación en cada unión de los pisos que es el de la soldadura final por el segundo lado en la cual inicialmente se muestra un paso clave para lograr una buena fusión en la unión que es el saneo de la misma en el total de la longitud por el segundo lado, esta operación se muestra en la **Figura 4. 10**. La parte más importante de esta secuencia de pasos es la indicación de realizar un ranurado con profundidad de 1 mm, esto es fundamental para que se logre una buena fusión, además se agrega la revisión de la unión después del uso del arco aire para verificar que no existan residuos y se indica el uso del disco de pasta para remover cualquier impureza recalando la importancia de tener la unión limpia al 100%.

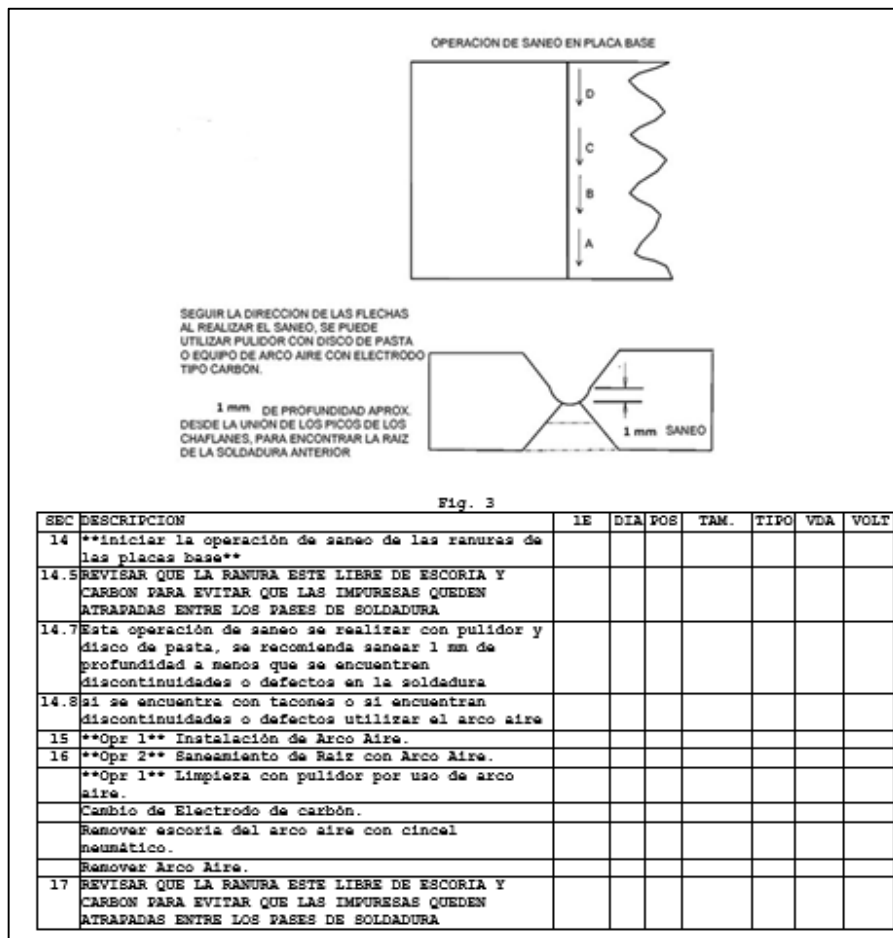


Figura 4. 10 Pasos del saneo de soldadura por el segundo lado en la operación de soldadura final de la unión de los pisos (Cortesía de la compañía fabricante de cajas para camión).

Para finalizar la secuencia de pasos se indica nuevamente realizar el precalentamiento antes de soldar, aplicación de soldadura y por último la limpieza del cordón, todo esto se encuentra en la **Figura 4. 11**.

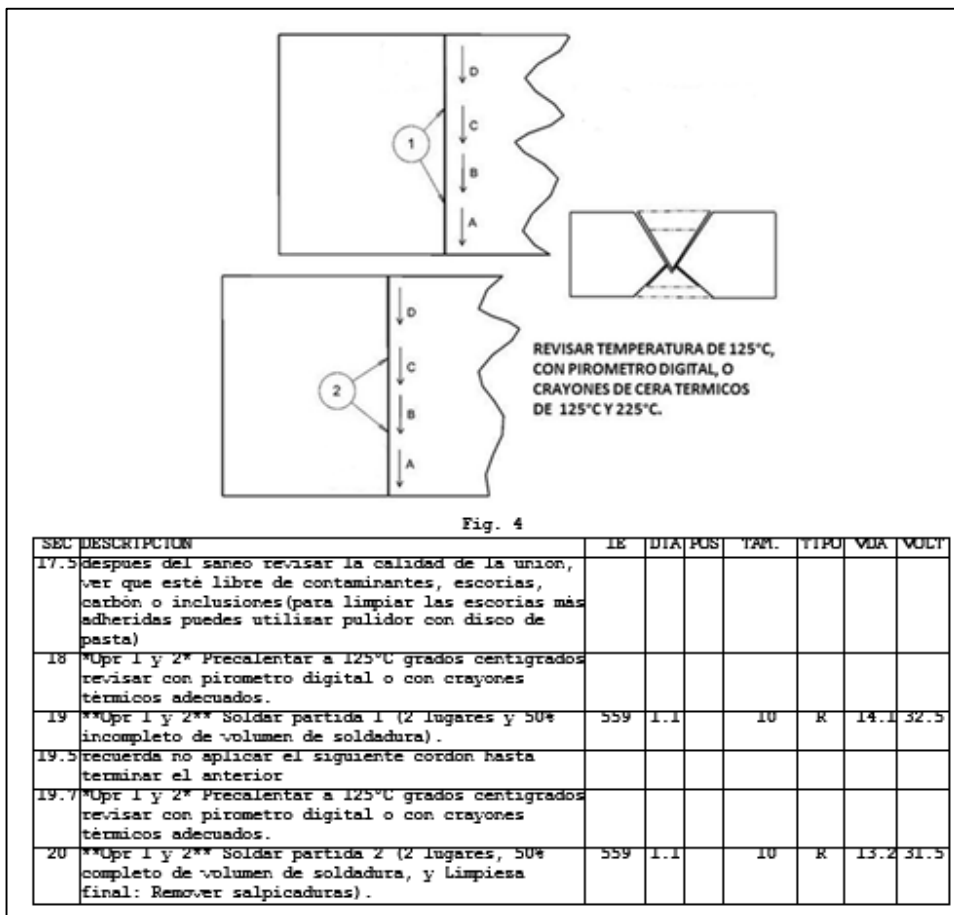


Figura 4. 11 Últimos pasos de la operación de soldadura final de los pisos (cortesía de la compañía fabricante de cajas para camión).

Una vez teniendo las 3 probetas de placas de acero Hardox 450 con espesor de 25mm soldadas se procedió a realizar las siguientes pruebas destructivas y no destructivas:

1. Inspección de Ultrasonido con equipo marca General Electric USM Go +
2. Macro y micrografía, atacado con Nital al 5%.
3. Análisis de perfil de Microdureza
4. Propiedades Mecánicas (Cedencia, esfuerzo, elongación, reducción de área)

CAPITULO 5.

RESULTADOS, ANALISIS y PRUEBAS

5.1 Resultados en base a experimentación y evaluación

Primeramente se realizaron las pruebas destructivas y no destructivas a las uniones con cara de raíz de 5 mm y 3 mm para ver la diferencia entre ellos y así poder realizar una mejora en dichas uniones.

5.1.1. Inspección de ultrasonido

A estas uniones se les realizó la prueba de ultrasonido resultando con falta de fusión a una profundidad de entre 11 y 12 mm en ambos casos en longitudes de 3 a 6 pulgadas en la longitud total de 14 pulgadas. En esta prueba se utilizó un equipo de medición de la marca General Electric Modelo USM Go+ como el que se muestra en la **Figura 5. 1**.



Figura 5. 1 Equipo de ultrasonido marca General Electric USM Go + (Cortesía de la compañía fabricante de cajas para camión)

5.1.2 Macro y micrografía

Como segunda prueba se cortaron las probetas de placas de acero Hardox 450 con espesor de 25 mm con chorro de agua y disco de tungsteno y se pulieron para para su análisis metalográfico.

- **Probeta de cara de raíz de 5 mm**

En la macrografía de la unión con cara de raíz de 5 mm se puede apreciar que no hubo fusión en la raíz de soldadura y que la penetración fue de 1 mm aproximadamente, como se muestra en la **Figura 5. 2**.



Figura 5. 2 Macrografía de la unión con cara de raíz de 5 mm con falta de fusión en la raíz

En la micrografía a 500X de la placa con unión con cara de raíz de 5 mm se observa una estructura martensítica para el metal base (a), la zona afectada por el calor estructura martensítica con bainita (b) y en la soldadura se puede observar ferrita Widmanstätten primaria y poca ferrita acicular (c).

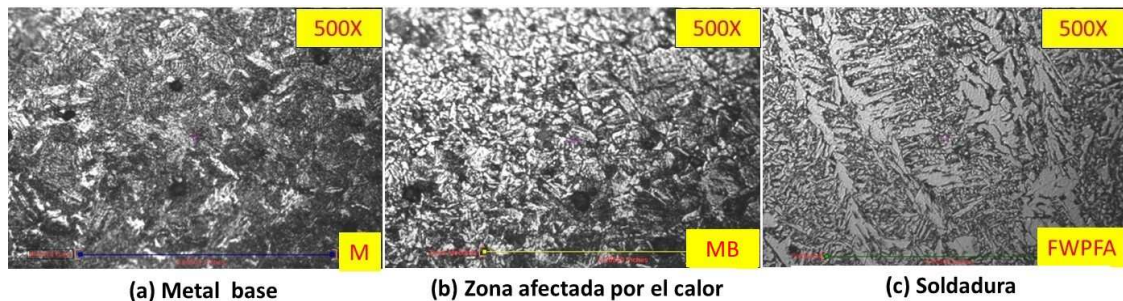


Figura 5. 3 Micrografías del a) metal base (M: Martensita), b) zona afectada por el calor MB: Martensita con bainita y c) soldadura de la unión (FWPFA: Ferrita widmanstätten primaria y ferrita acicular) de placas Hardox de 25 mm en doble bisel con cara de raíz de 5 mm

- **Probeta de cara de raíz de 3 mm**

En la macrografía de la unión con cara de raíz de 3 mm se aprecia que no hubo fusión en la raíz de soldadura y que la penetración solo fue de 1 mm aproximadamente, como se muestra en la **Figura 5. 4**

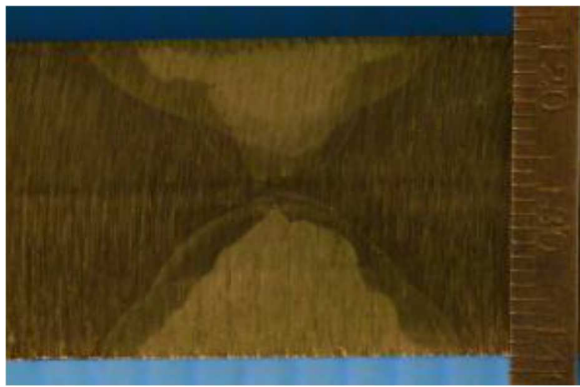


Figura 5. 4 Macrografía de la unión con cara de raíz de 3 mm con falta de fusión en la raíz

En la micrografía **Figura 5. 5a** 500X de la placa con unión con cara de raíz de 3 mm se observa que hay una estructura martensítica para el metal base (a), para la zona afectada por el calor una estructura martensítica con austenita retenida (b) y en la soldadura se puede observar una estructura de ferrita Widmanstätten primaria y ferrita acicular (c), como se muestra en la **Figura 5. 5**.

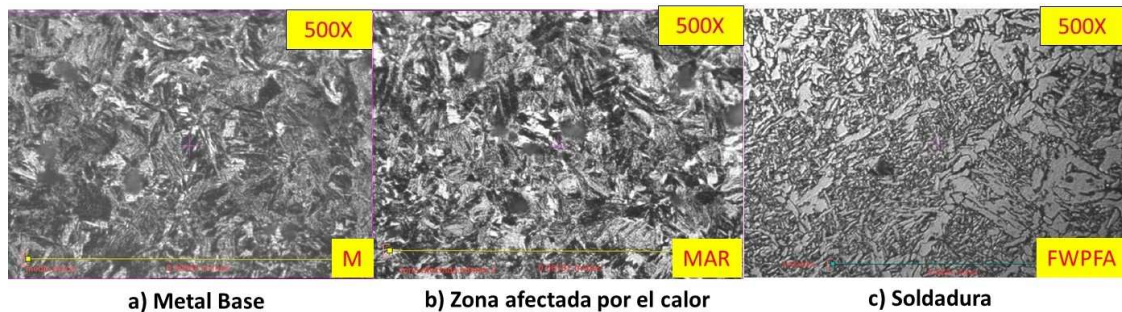


Figura 5. 5 Micrografías del a) metal base (M: Martensita), b) zona afectada por el calor (MAR: Martensita con Austenita retenida) y c) soldadura de la unión (FWPFA: Ferrita Widmanstätten primaria con Ferrita Acicular) de placas Hardox de 25 mm en doble bisel con cara de raíz de 3 mm

5.1.3 Análisis de perfil de microdureza

- **Probeta de cara de raíz de 5 mm**

En el perfil de dureza se muestran las indentaciones realizadas en las zonas superior, inferior y central de la probeta y los resultados se muestran en la **Figura 5. 6** y **Figura 5. 7** respectivamente.

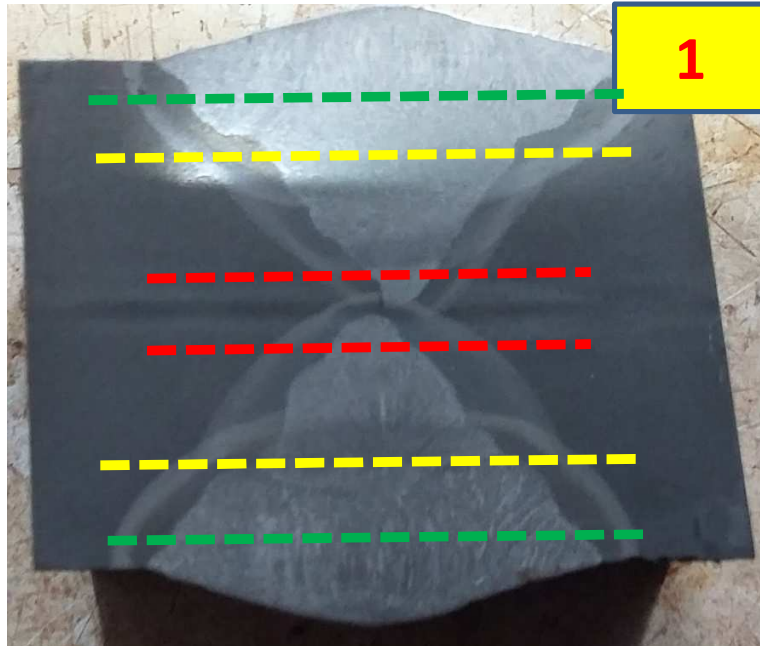


Figura 5. 6 Esquema de la toma de datos de la microdureza en la unión de cara de raíz de 5 mm

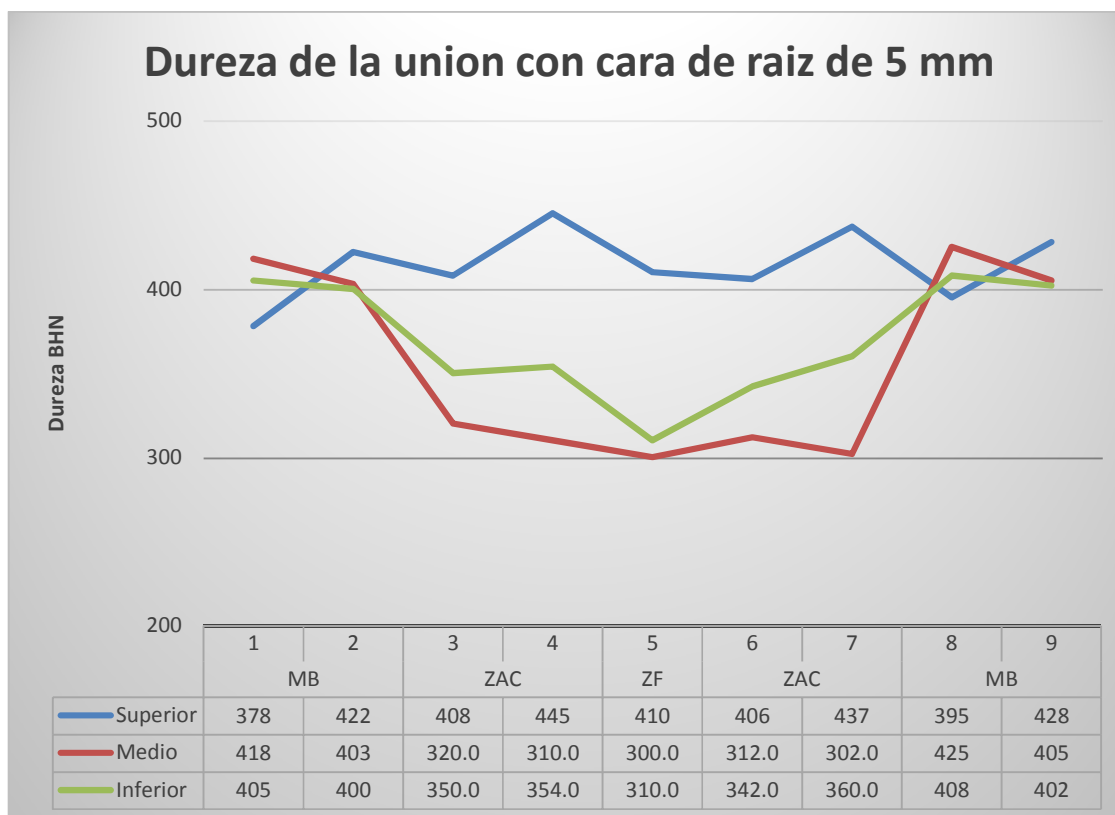


Figura 5. 7 Resultados de microdureza de la unión de cara de raíz de 5 mm

En los resultados de dureza de la unión con cara de raíz de 5 mm se aprecia que la dureza metal base oscila entre (380 a 439 BHN) y posteriormente se mantiene o disminuye ligeramente (300 – 420 BHN) en la zona afectada por el calor, en la zona de fusión (302 a 430 BHN), el rango del acero Hardox 450 es de 425 a 475, lo cual el que haya durezas debajo de 400 se da naturalmente debido a la interacción del calor del arco de soldadura con el material, pero en sí, esto no afecta significativamente ya que estas reducciones ayudan a que la unión sea algo flexible y evita que se presenten fracturas de forma prematura.

- **Probeta de cara de raíz de 3 mm**

En el perfil de dureza se muestran las zonas superior, inferior y central de la probeta y los resultados se muestran en la **Figura 5. 8** y **Figura 5. 9** respectivamente.

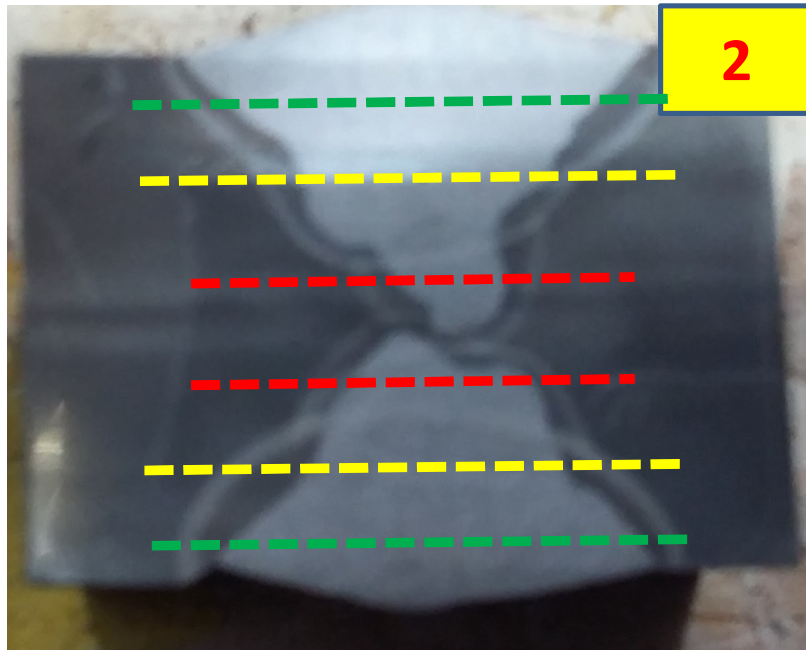


Figura 5. 8 Esquema de la toma de datos de la microdureza en la unión de cara de raíz de 3 mm

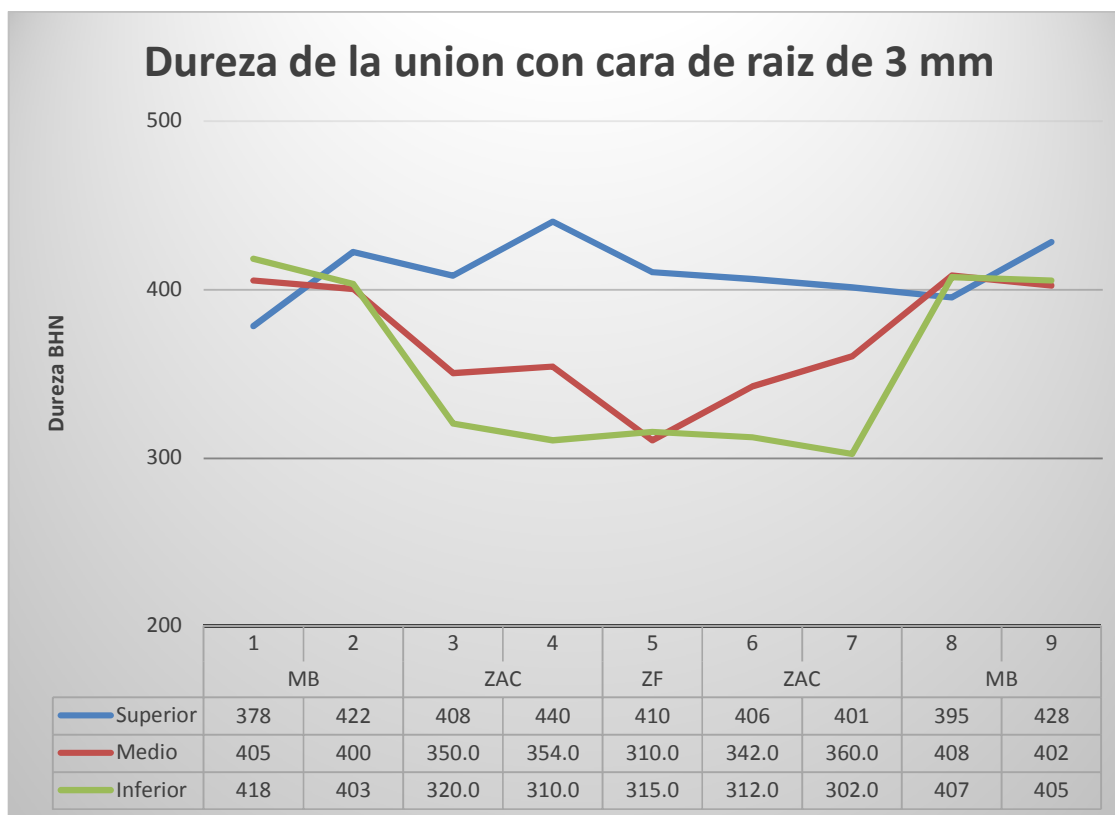


Figura 5. 9 Resultados de microdureza de la unión de cara de raíz de 3 mm

En los resultados de dureza de la unión con cara de raíz de 3 mm se aprecia que la dureza metal base oscila entre (378 a 422 BHN) y posteriormente se mantiene o disminuye ligeramente (310 – 410 BHN) en la zona afectada por el calor, en la zona de fusión (302 a 406 BHN), el rango del acero Hardox 450 es de 425 a 475, tal es el mismo caso que la unión anterior en cuanto a la disminución de la dureza, en este caso se aprecia también que hay una reducción en la dureza del metal base esto debido a que la cara de raíz es más pequeña, por ende mayor depósito de soldadura en la unión y presencia de calor por más tiempo.

5.1.4 Propiedades Mecánicas

Para las propiedades mecánicas se fabricaron 2 probetas de dimensiones de 14 x 2" de acuerdo al código AWS D1.1, respectivamente, a continuación se muestran los resultados:

- **Probeta de cara de raíz de 5 mm**

Los resultados de la probeta (**Figura 5. 10**) de cara de raíz de 5 mm se presentan en la **Error! Reference source not found.** en la cual se muestran los resultados del esfuerzo de cedencia, esfuerzo máximo, % de elongación y % de reducción de área.

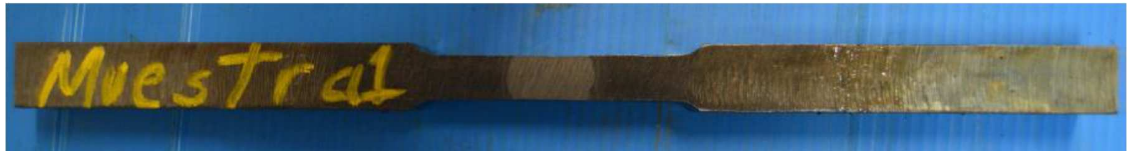


Figura 5. 10 Fotografía de la probeta maquinada de la soldadura con cara de raíz de 5 mm

Tabla 5. 1 Resultados de las propiedades mecánicas de la probeta de soldadura con cara de raíz de 5 mm

<i>Propiedades Mecánicas</i>	<i>Resultado</i>
Esfuerzo de cedencia (MPa)	392
Esfuerzo máximo (MPa)	545
% Elongación (En 2 in)	8
% Reducción de área	14

- **Probeta de cara de raíz de 3 mm**

Los resultados de la probeta (**Figura 5. 11**) de cara de raíz de 5 mm se muestran en la **Error! Reference source not found.** en la cual se presentan

los resultados del esfuerzo de cedencia, esfuerzo máximo, % de elongación y % de reducción de área.

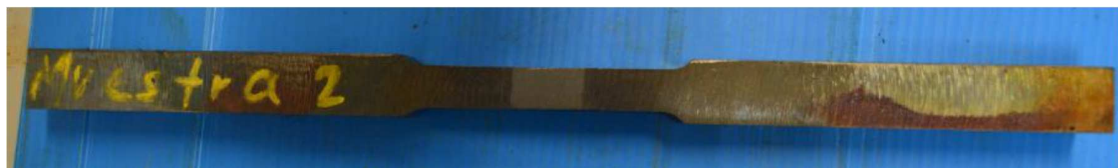


Figura 5. 11 Fotografía de la probeta maquinada de la soldadura con cara de raíz de 3 mm

Tabla 5. 2 Resultados de las propiedades mecánicas de la probeta de soldadura con cara de raíz de 3 mm

Propiedades Mecánicas	Resultado
Esfuerzo de cedencia (MPa)	589
Esfuerzo máximo (MPa)	643
% Elongación (En 2 in)	6
% Reducción de área	14

Debido a los resultados no satisfactorios de las uniones con cara de raíz de 5 y 3 mm, basados principalmente en la falta de fusión en las 2 probetas, y tomando como referencia que la penetración en ambas fue de 1 mm, se decidió hacer una prueba con una unión con cara de raíz de 0 mm y dar 1 mm de separación entre placas con la finalidad de verificar que se tenga una penetración completa en la unión y sin discontinuidades en el 100% de la longitud y una vez obtenidos los resultados establecer la mejora en el área de trabajo.

5.2 Resultados y análisis de la probeta con cara de raíz en la unión de cero milímetros.

Como en los casos anteriores se siguió la misma secuencia en relación a las pruebas, primero se inspeccionó por ultrasonido, luego la macro y micrografía, perfil de microdureza y por último el análisis de las propiedades mecánicas.



Figura 5. 12 Configuración de la unión de cara de raíz de 0 mm resultante del proceso de corte a plasma y desbaste adicional con pulidor

5.2.1 Inspección de ultrasonido

A esta unión se le realizó la prueba de ultrasonido resultando con cero faltas de fusión, cumpliendo con la penetración completa requerida como se muestra en la **Error! Reference source not found.**

5.2.2 Macro y Micrografía

Como se mencionó anteriormente la macrografía de la unión con cara de raíz muestra que hubo una penetración completa y libre de discontinuidades como lo reveló también la prueba de ultrasonido.



Figura 5. 13 Macrografía de la unión con cara de raíz de cero milímetros

En la micrografía **Figura 5. 5a** 500X de la placa con unión con cara de raíz de 0 mm se observa que hay una estructura martensítica para el metal base (a), para la zona afectada por el calor una estructura de martensita con ferrita acicular (b) y en la soldadura se puede observar una estructura de ferrita Widmanstätten primaria y ferrita acicular (c) como se muestra en la **Figura 5. 14**.

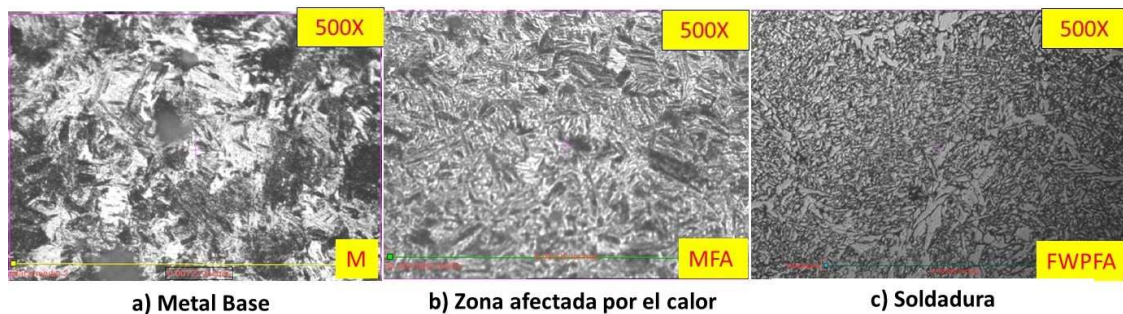


Figura 5. 14 Micrografías del a) metal base (M: Martensita), b) zona afectada por el calor (MFA: Martensita con Ferrita Acicular) y c) soldadura de la unión (FWPFA: Ferrita Widmanstätten primaria con Ferrita Acicular) de placas Hardox de 25 mm en doble bisel con cara de raíz de 0 mm

5.2.3 Análisis de perfil de microdureza

En los resultados de dureza de la unión de cara de raíz de 0 mm se aprecia que la dureza en el metal base oscila en un rango de (400 – 450 BHN), en la zona afectada por el calor (310 – 445 BHN) y en la zona de fusión (300 – 430 BHN), se observa que hubo una disminución en las durezas del metal base debido a que hubo un mayor depósito de soldadura y por ende calor de entrada por un mayor lapso de tiempo que en las uniones anteriores, a su vez también se observa que la dureza se mantiene un poco más estable debido a que la soldadura no tuvo que fundir gran cantidad de material base en la raíz como se presentó en los casos anteriores, los resultados de las durezas se muestran en la **Figura 5. 15**.

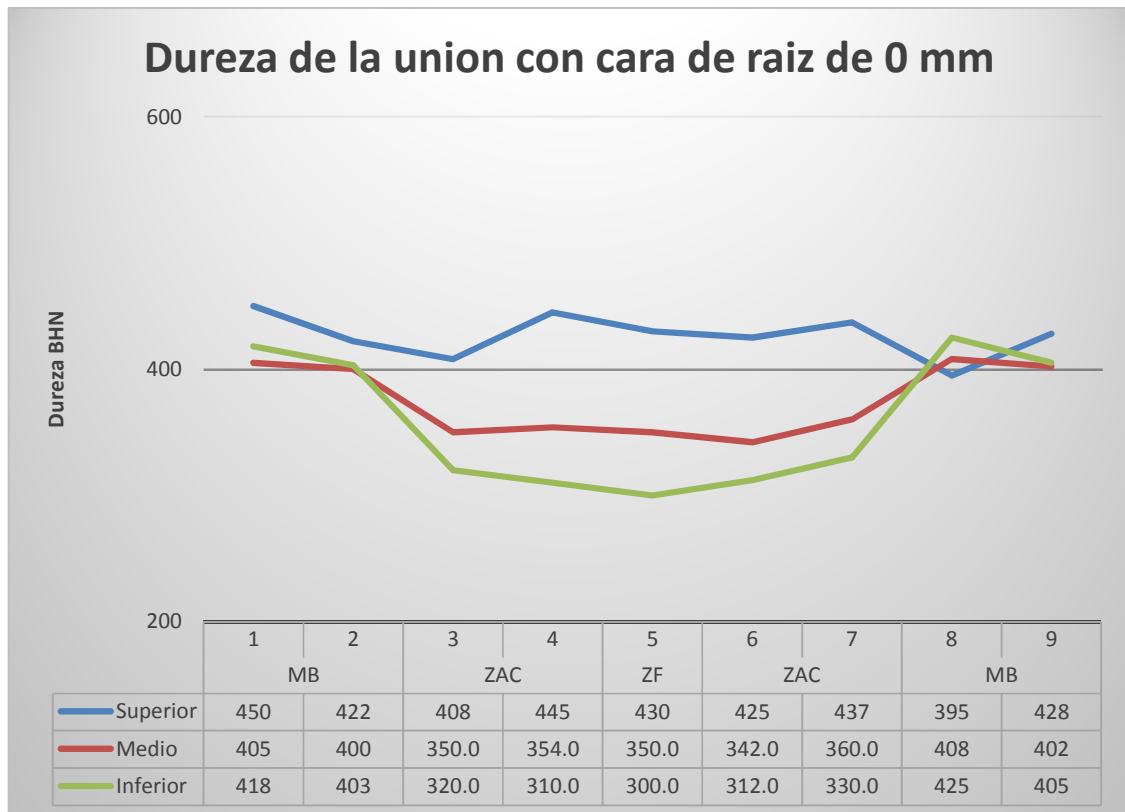


Figura 5. 15 Resultados de microdureza de la unión de cara de raíz de 0 mm

5.2.4 Propiedades Mecánicas

Los resultados de la probeta (**Figura 5. 16**) de cara de raíz de 0 mm se muestran en la **Error! Reference source not found.** en la cual se muestran los resultados del esfuerzo de cedencia, esfuerzo máximo, % de elongación y % de reducción de área.



Figura 5. 16 Fotografía de la probeta maquinada de la soldadura con cara de raíz de 0 mm

Tabla 5. 3 Resultados de las propiedades mecánicas de la probeta de soldadura con cara de raíz de 0 mm

Propiedades Mecánicas	Resultado
Esfuerzo de cedencia (MPa)	502.5
Esfuerzo máximo (MPa)	632
% Elongación (En 2 in)	13
% Reducción de área	44.5

5.2.5 Resumen de los resultados de las propiedades mecánicas y ultrasonido

En resumen la dureza no se afecta considerablemente para tomar la decisión de cambiar parámetros en el amperaje o voltaje en el proceso de soldadura, las características que cambian considerablemente son las propiedades mecánicas y la comparativa de la presencia de falta de fusión en las diferentes uniones como se muestra en la **Tabla 5. 4**.

Tabla 5. 4 Comparativo de propiedades mecánicas, resultado de ultrasonido y calor de entrada aplicado.

<i>Propiedades Mecánicas y Resultado de ultrasonido</i>	<i>Cara de Raíz 5 mm</i>	<i>Cara de Raíz 3 mm</i>	<i>Cara de Raíz 0 mm</i>
Esfuerzo de cedencia (MPa)	392	589	602.5
Esfuerzo máximo (MPa)	545	643	652
% Elongación (En 2 in)	8	6	13
% Reducción de área	14	14	44.5
Resultado de ultrasonido	FF a 10 mm	FF a 12 mm	Sin falta de fusión
Calor de Entrada	51,200 Joules/min	47,169 Joules/min	41,891 Joules/min

CAPITULO 6.

CONCLUSIONES

Con los resultados antes obtenidos se puede concluir lo siguiente:

- La unión especificada por el diseño tiene área de oportunidad ya que su tolerancia permite que exista una cara de raíz muy grande, lo que impide que haya una penetración completa debido a que la soldadura solo tiene penetración de 1 mm.
- Los parámetros de soldadura especificados no deben tener modificación alguna para evitar otras transformaciones en el material base y la zona afectada por el calor, a excepción de la velocidad de desplazamiento por la reducción de material que existe debido a la modificación de cara de raíz, por lo tanto, el aumentar el amperaje para lograr mayor penetración no es una opción debido a la estructura martensítica del material utilizado.
- La unión formada en las 3 probetas permite tener las estructuras y durezas en rangos similares y de manera estable lo que ayuda al diseño a resistir mejor las cargas. En la prueba en la última probeta con cara de raíz de 0 mm y separación de 1 mm hay una penetración completa y una mejora en las

propiedades mecánicas del material ya que tiene mejor elongación y reducción de área lo que lleva a que la unión resiste más tiempo a la cedencia.

- La separación en la raíz es parte importante para lograr una penetración completa y asegurar que la cara de raíz tenga dimensión de 0 a 1 mm.
- Los cambios en la dureza a través de la soldadura en las partes superiores de la cara de la soldadura oscilan entre 400 y 450 HB lo que contribuye a que la unión de soldadura sea resistente a la abrasión que es el propósito de usar el acero Hardox 450, en las partes media e inferior oscila entre 300 HB a 400 HB lo que ayuda a que la unión mantenga una flexibilidad y no haya fracturas en la misma de manera prematura.
- El esfuerzo de cedencia en la prueba de tensión se mejoró con la reducción de la cara de raíz en la unión de la soldadura de 392 MPa en la cara de raíz de 5 mm a 602.5 MPa en la cara de raíz de cero mm, lo que hace más resistente a la unión con los cambios implementados.

REFERENCIAS

- 1 **Krauss G.**, Steels – processing, structure, and performance, 2015, ASM International, Second edition, 651 pages, Ohio, USA.
- 2 **Oberg E., Jones F., Horton H., Ryffel H.**, Machinery's Handbook, 2000, Industrial Press Inc, 26th edition, 2556 pages, New York, USA
- 3 Ficha técnica Hardox 450, SSAB Oxelösund AB, versión 2010-02-01, 4 pages, Sweden.
- 4 **Belzunce F.J.**, Aceros y fundiciones: estructuras, transformaciones, tratamientos térmicos y aplicaciones, 2001, Universidad de Oviedo, 215 pages, Oviedo, España.
- 5 **O'Brien A.**, Welding Handbook, Welding processes, part 1, 2004, American Welding Society, Ninth Edition, Volume 2, 699 pages, Miami, FL, USA.
- 6 **Thomsen J.**, Advanced control methods for optimization of arc welding, 2005 Ph.D. Thesis. Department of control engineering, Aalborg University, Aalborg East, Denmark.
- 7 **Hobart Institute of Welding Technology**, Gas Metal Arc Welding, 2012, Hobart Institute of Welding, 106 pages, Ohio, USA.
- 8 **Escalona García R.**, American Welding Society. Manual de Soldadura. [ed.] R. L. O'Brien. [trad.]. Octava. Naucalpan: Prentice-Hall Hispanoamérica, S.A., 1996. págs. 1-49. Vol. I., Mexico.
- 9 **Shingh R.**, Applied Welding Engineering: Processes, Codes and Standards, 2012, Elsevier Inc., 347 pages, United Kingdom.
- 10 **American Welding Society (AWS) D14 Committee on Machinery and Equipment**, AWS D14.3/D14.3M:2010 Specification for Welding Earthmoving, Construction, and Agricultural Equipment, 6th Edition, 2010, American Welding Society, 92 pages, Miami, FL, USA.

- 11 **Hughes S.**, A Quick Guide to Welding and Weld Inspection, 2009, Matthews Engineering Training Limited, 135 pages, United Kingdom.
- 12 **Jenney C., O'Brien A.**, Welding Handbook, Welding science and technology, American Welding Society, Ninth Edition, Volume 1, 894 pages, FL, USA.
- 13 **American Welding Society**, Design and planning manual for Cost-Effective Welding, 1999, American Welding Society, 133 pages, Miami, FL, USA.
- 14 **Lefus L.**, Welding and Metal Fabrication, 2012, Delmar Cengage learning, 800 pages, NY, USA.
- 15 **Thulukkanam K.**, Heat Exchanger Design Handbook, 2013, CRC Press, Second Edition, 1186 pages, FL, USA.
- 16 **Buglacki H., Smajdor M.** Mechanical properties of abrasion-resistant Hardox 400 steel and their welded joints, 2001, University of Technology, Faculty of Ocean Engineering and Ship Technology, 4 pages, Poland.
- 17 **Mazur M., Ulewicz R., Bokůvka O.**, The impact of welding wire on the mechanical properties of welded joints, 2014, Czestochowa University of Technology, Institute of Production Engineering, Department of Materials Engineering, Faculty of Mechanical Engineering, University of Žilina, Univerzita Žilina, 7 pages, Slovak Republic.
- 18 **Czupryński A., Górka J., Ślosarczyk J.**, Improving the operating properties of coal mining machinery elements, 2013, Biuletyn Instytutu Spawalnictwa, 6 pages, Polish.
- 19 **Konat D, Pękalski G.**, Structural and strength characteristics of wear-resistant martensitic steels, 2008, Wrocław University of Technology, Smoluchowskiego, 7 pages, Wrocław, Poland.
- 20 **Frydman S., Konat L., Pękalski G.**, Structure and hardness changes in welded joints of Hardox steels, 2008, Wrocław University of Technology, Wybrzeże Wyspiańskiego, 13 pages, Wrocław Poland.

Índice de figuras

Figura 2. 1 Temperaturas de trabajo de los aceros Hardox de acuerdo a su espesor (3) ...	11
Figura 2. 2 Ejemplos de aplicaciones del acero Hardox 450, a) contenedores, b) prensas y c) tuberías (4)	14
Figura 2. 3 Proceso de soldadura de arco metálico protegido con gas (5).....	15
Figura 2. 4 Diagrama del equipo utilizado en el proceso GMAW (5).....	16
Figura 2. 5 Representación esquemática de la transferencia de metal por cortocircuito (5)	17
Figura 2. 6 Transferencia globular no axial (5)	18
Figura 2. 7 Transferencia axial en spray (5).....	18
Figura 2. 8 Variación en volumen y razón de transferencia de gotas con corriente de soldadura (5)	19
Figura 2. 10 Velocidad de alimentación de alambre contra corriente de soldadura para diversos electrodos de metal (7).....	22
Figura 2. 11 Velocidad de alimentación de alambre contra corriente de soldadura para un electrodo de alambre de acero (7).....	23
Figura 2. 12 Influencia de gas protector en el perfil de soldadura (8)	27
Figura 2. 13 Tipos de uniones de soldadura para el proceso GMAW (8)	31
Figura 2. 15 Posición de prueba 2G (10).....	33
Figura 2. 24 Soldadura ranura en doble V con unión a tope (14).....	48
Figura 2. 30 Penetración inadecuada de la unión (14)	49
Figura 2. 31 Penetración incompleta en la raíz (14).....	50
Figura 2. 32 Fusión incompleta (14)	51
Figura 2. 33 Remoción de las socavaciones y muescas a lo largo de la unión antes de soldar (14).....	52
Figura 2. 34 Principio de ultrasonido – Método convencional (15).....	55
Figura 2. 35 Técnica de arreglo de fases comparada con el método convencional (15).....	56
Figura 2. 36 Placa de prueba de ultrasonido (15)	57
Figura 4. 1 Dibujo ingenieril de la unión de placas base de las cajas para camión minero (Cortesía de la compañía fabricante de cajas para camión)	75
Figura 4. 2 Cara de raíz de 5 mm detectada en el muestreo de las placas resultantes en las camas de corte a plasma (cortesía de la compañía fabricante de cajas para camión minero)	75
Figura 4. 3 Unión en doble V precalificada para penetración completa de soldadura- Proceso de soldadura por arco metálico protegido con gas (14).	76

Figura 4. 4 Configuración de la unión de cara de raíz de 5 mm resultante del proceso de corte a plasma (Cortesía de la compañía fabricante de cajas para camión).....	77
Figura 4. 5 Configuración de la unión de cara de raíz de 3 mm resultante del proceso de corte a plasma y desbaste adicional con pulidor (Cortesía de la compañía fabricante de cajas para camión).....	78
Figura 4. 6 Configuración de la unión de cara de raíz de 0 mm resultante del proceso de corte a plasma y desbaste adicional con pulidor (Cortesía de la compañía fabricante de cajas para camión).....	78
Figura 4. 7 Máquina de soldar Miller Axxess 675 (Cortesía de la compañía fabricante de cajas para camión)	79
Figura 4. 8 Procedimiento de punteo de pisos Hardox 450 de caja para camión minero (cortesía de la compañía fabricante de cajas para camión).....	81
Figura 4. 9 Procedimiento de soldadura final del primer lado de pisos Hardox 450 de caja para camión minero (cortesía de la compañía fabricante de cajas para camión).....	82
Figura 4. 10 Pasos del saneo de soldadura por el segundo lado en la operación de soldadura final de la unión de los pisos (Cortesía de la compañía fabricante de cajas para camión).	83
Figura 4. 11 Últimos pasos de la operación de soldadura final de los pisos (cortesía de la compañía fabricante de cajas para camión).	84
Figura 5. 1 Equipo de ultrasonido marca General Electric USM Go + (Cortesía de la compañía fabricante de cajas para camión)	86
Figura 5. 2 Macrografía de la unión con cara de raíz de 5 mm con falta de fusión en la raíz	87
Figura 5. 3 Micrografías del a) metal base (M: Martensita), b) zona afectada por el calor MB: Martensita con bainita y c) soldadura de la unión (FWPFA: Ferrita widmanstätten primaria y ferrita acicular) de placas Hardox de 25 mm en doble bisel con cara de raíz de 5 mm	87
Figura 5. 4 Macrografía de la unión con cara de raíz de 3 mm con falta de fusión en la raíz	88
Figura 5. 5 Micrografías del a) metal base (M: Martensita), b) zona afectada por el calor (MAR: Martensita con Austenita retenida) y c) soldadura de la unión (FWPFA: Ferrita Widmanstätten primaria con Ferrita Acicular) de placas Hardox de 25 mm en doble bisel con cara de raíz de 3 mm.....	88
Figura 5. 6 Esquema de la toma de datos de la microdureza en la unión de cara de raíz de 5 mm.....	89
Figura 5. 7 Resultados de microdureza de la unión de cara de raíz de 5 mm.....	90
Figura 5. 8 Esquema de la toma de datos de la microdureza en la unión de cara de raíz de 3 mm.....	91

Figura 5. 9 Resultados de microdureza de la unión de cara de raíz de 3 mm	92
Figura 5. 10 Fotografía de la probeta maquinada de la soldadura con cara de raíz de 5 mm	93
Figura 5. 11 Fotografía de la probeta maquinada de la soldadura con cara de raíz de 3 mm	94
Figura 5. 12 Configuración de la unión de cara de raíz de 0 mm resultante del proceso de corte a plasma y desbaste adicional con pulidor	95
Figura 5. 13 Macrografía de la unión con cara de raíz de cero milímetros	96
Figura 5. 14 Micrografías del a) metal base (M: Martensita), b) zona afectada por el calor (MFA: Martensita con Ferrita Acicular) y c) soldadura de la unión (FWPFA: Ferrita Widmanstätten primaria con Ferrita Acicular) de placas Hardox de 25 mm en doble bisel con cara de raíz de 0 mm	96
Figura 5. 15 Resultados de microdureza de la unión de cara de raíz de 0 mm	97
Figura 5. 16 Fotografía de la probeta maquinada de la soldadura con cara de raíz de 0 mm	98

Índice de tablas

Tabla 2. 1 Temperaturas de cordón intermedio recomendada para los diferentes tipos de acero Hardox (3)	12
Tabla 2. 2 Composición química (%e.p) del acero Hardox 450 de acuerdo a su espesor (3)	13
Tabla 2. 3 Propiedades mecánicas para un acero Hardox 450 con espesor de placa de 25 mm (3)	13
Tabla 2. 4 Especificación para diversos electrodos GMAW (8)	24
Tabla 2. 5 Electrodo recomendados para GMAW (8)	26
Tabla 2. 6 Gases protectores para transferencia por aspersion en GMAW (8)	29
Tabla 2. 7 Gases protectores para transferencia en cortocircuito en GMAW (8)	30
Tabla 2. 8 Tipos de discontinuidades en la soldadura (14)	46
Tabla 2. 9 Listado de pruebas no destructivas (15)	54
Tabla 4. 2 Reporte de revisión de la máquina de soldar Miller Axxess 675 (Cortesía de la compañía fabricante de cajas para camión)	80
Tabla 5. 1 Resultados de las propiedades mecánicas de la probeta de soldadura con cara de raíz de 5 mm	93
Tabla 5. 2 Resultados de las propiedades mecánicas de la probeta de soldadura con cara de raíz de 3 mm	94
Tabla 5. 3 Resultados de las propiedades mecánicas de la probeta de soldadura con cara de raíz de 0 mm	98
Tabla 5. 4 Comparativo de propiedades mecánicas, resultado de ultrasonido y calor de entrada aplicado	99