

CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACION EN MATERIALES

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



**EFFECTO DEL CONTROL DE LA TRAYECTORIA SOBRE LA GENERACIÓN
DE DEFECTOS EN EL PROCESO SAW EN EL ENSAMBLE DEL EJE
FRONTAL DE ACERO A633 E PARA CAMIONES DE MINERÍA**

POR

ING. MICHEL JESÚS CABODEVILA SANTELICES

TESIS

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

CD. ACUÑA, MAYO DE 2012

CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



**EFFECTO DEL CONTROL DE LA TRAYECTORIA SOBRE LA GENERACIÓN
DE DEFECTOS EN EL PROCESO SAW EN EL ENSAMBLE DEL EJE
FRONTAL DE ACERO A633 E PARA CAMIONES DE MINERÍA**

POR

ING. MICHEL JESÚS CABODEVILA SANTELICES

TESIS

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

CD. ACUÑA, MAYO DE 2012

Corporación Mexicana de Investigación en Materiales, S.A. de C.V.

Gerencia del Desarrollo Humano

División de Estudios de Posgrado

Los miembros del comité tutorial recomendamos que la tesis "**EFFECTO DEL CONTROL DE LA TRAYECTORIA SOBRE LA GENERACIÓN DE DEFECTOS EN EL PROCESO SAW EN EL ENSAMBLE DEL EJE FRONTAL DE ACERO A633 E PARA CAMIONES DE MINERÍA**" realizada por el alumno **MICHEL JESÚS CABODEVILA SANTELICES** con número de matrícula **10MS-020**, sea aceptada para su defensa como Maestro en Tecnología de la Soldadura Industrial.

El Comité Tutorial

Tutor Académico

Dr. Mauricio Alberto Garza Castañón

Tutor en planta

MC. Roberto Magallanes

Asesor

MT. Fernando Macías López

Vo. Bo.

Coordinador de Posgrado

MC. Claudia A. González Rodríguez

Corporación Mexicana de Investigación en Materiales, S.A. de C.V.

Gerencia del Desarrollo Humano

División de Estudios de Posgrado

Los abajo firmantes, miembros del Jurado del Examen de Grado del alumno **MICHEL JESÚS CABODEVILA SANTELICES**, una vez leída y revisada la Tesis titulada tesis "**EFFECTO DEL CONTROL DE LA TRAYECTORIA SOBRE LA GENERACIÓN DE DEFECTOS EN EL PROCESO SAW EN EL ENSAMBLE DEL EJE FRONTAL DE ACERO A633 E PARA CAMIONES DE MINERÍA**", aceptamos que la referida Tesis revisada y corregida, sea presentada por el alumno para aspirar al grado de Maestro en Tecnología de la Soldadura Industrial durante el Examen de Grado correspondiente.

Y para que así conste firmamos la presente a los 22 días del mes de junio del 2012.

Dr. Santos Morales Rodríguez

Presidente

MC. Víctor Hugo López Cortez

Secretario

**Dr. Mauricio Alberto Garza
Castañón**

Vocal

Extiendo mi más profundo agradecimiento por todo el apoyo obtenido durante el desarrollo de este proyecto, agradezco a los maestros de COMIMSA quienes me permitieron ampliar mis horizontes en el ámbito de la soldadura, a mis compañeros de trabajo quienes me apoyaron tanto en el desarrollo experimental como en la generación de ideas, y a la compañía Equipos de Acuña (Caterpillar) por permitirme utilizar los recursos necesarios para lograr el objetivo de desarrollar un proyecto de mejora para dar un paso más hacia la excelencia como fabricantes líderes en soldadura...

ÍNDICE

SÍNTESIS.....	1
----------------------	----------

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES	2
--	----------

1.1	Introducción.....	2
1.2	Planteamiento del Problema	3
1.2.1	Descripción del Problema	4
1.3	Preguntas de Investigación	5
1.4	Hipótesis	7
1.5	Objetivos.....	7
1.6	Justificación.....	8
1.7	Delimitaciones.....	8

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO	10
----------------------------	-----------

2.1	A633 Gr E Acero de Alta Resistencia Baja Aleación.	10
2.1.1	Normalizado en Aceros de alta Resistencia y Baja Aleación (HSLA).....	12
2.1.2	Acero ASTM A 633	12
2.2	Soldadura por Arco Sumergido SAW.....	13
2.2.3	Efecto de las variables esenciales sobre el cordón de soldadura:.....	16
2.2.4	Avances en Soldadura por Arco Sumergido.....	20
2.3	Proceso Tándem	23
2.4	Software de simulación	24
2.5	Automatización de procesos de soldadura	27

2.5.1	Opciones de Automatización.....	29
2.5.2	Soldadura Robotizada	29
2.5.2.1	Sistemas de Manipulación Mecánica.....	30
2.5.2.2	Sistemas de movimiento	33
2.5.2.3	Equipos para soldadura por arco.....	33
2.5.2.4	Sistemas de Visión.....	34
2.5.2.5	Simulación y programación fuera de línea:.....	37
2.6.	Innovaciones en Arco Eléctrico.....	38

CAPÍTULO 3

METODOLOGÍA 46

3.1	Diseño Experimental.....	46
3.1.2	Simulación (SimulationWorks, 2011)	50
3.3	Diseño experimental 2^k.....	54

CAPÍTULO 4

DISCUSIÓN DE RESULTADOS 59

CONCLUSIONES 64

BIBLIOGRAFÍA 66

LISTADO DE FIGURAS..... 69

LISTADO DE TABLAS 73

Anexo 1 74

Anexo 2 75

RESUMEN AUTOBIOGRÁFICO.....76

SÍNTESIS

El enfoque de este proyecto está directamente ligado al proceso de soldadura por arco sumergido (SAW, por sus siglas en inglés), aplicado mediante la asistencia de un sistema de censado inductivo siendo este sistema comparado mediante un diseño de experimentos con un nuevo diseño de junta, ambos con el objetivo de garantizar la repetitividad en los requerimientos de calidad que demanda la unión de las tapas de refuerzo de acero A633 en el eje frontal de los camiones de minería los cuales se mantienen inalcanzables mediante las condiciones actuales de operación.

Los robots actuales de soldadura utilizados en aplicaciones industriales se programan a través de los métodos de enseñar y reproducir. Esto hace que la puesta en marcha de estos sistemas sea muy costosa en tiempo y dinero. Para hacer la soldadura robótica más flexible a diferentes lugares y formas de las piezas de soldadura, los sistemas de visión se están introduciendo en la soldadura robotizada, estas alternativas se analizan y se presentan en el presente trabajo como alternativas de solución al problema planteado en esta investigación.

Simulación de procesos de fabricación, tales como la soldadura, con el método de elementos finitos se está volviendo más y más común en la práctica de la ingeniería.

En el presente trabajo se muestra la aplicación de estas herramientas mediante la simulación del comportamiento térmico con un análisis transitorio y los esfuerzos mecánicos a los que está sometido el producto por el cual se desarrolla el análisis de esta investigación.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

1.1 Introducción

Caterpillar Acuña es una planta ubicada en la ciudad de Acuña, Coahuila, actualmente cuenta con 580 empleados, y su giro principal es la manufactura de camiones de carga para minería con capacidades desde 150 a 400 toneladas, teniendo como procesos principales: corte, formado, maquinado, soldadura, pintura y ensamble. Actualmente el reto más importante se encuentra en el área de soldadura donde los requerimientos de calidad y tiempo de entrega especificados por nuestros clientes implican un alto nivel de control en los procesos.

En la actualidad existe una gran demanda tecnológica en busca del mejoramiento de la productividad en las áreas de soldadura.

Parte de las nuevas tecnologías se han enfocado en la creación de nuevas herramientas y maquinaria que ayudan a mejorar los procesos de soldadura en general, aumentando la calidad de los ensambles y la productividad. El enfoque de este proyecto está directamente ligado al proceso de soldadura por arco sumergido (SAW, por sus siglas en inglés), aplicado mediante la asistencia de un sistema autónomo controlando la trayectoria para garantizar la repetitividad en los requerimientos de calidad que demanda la unión de las tapas de refuerzo de acero A633 en el eje frontal de los camiones de minería los cuales se mantienen inalcanzables mediante el uso de soldadores humanos (Anexo 1).

La robótica, una de las tecnologías más utilizadas actualmente, está siendo aprovechada por las industrias de alto volumen como la automotriz, gracias a su gran flexibilidad para el ensamble de diferentes componentes logrando una repetitividad difícil de alcanzar por el recurso humano.

La demanda de robots está aumentando gracias a su flexibilidad en las diferentes operaciones, las máquinas inteligentes pueden desarrollar tareas a costos y calidad en niveles aceptables. Los robots soldadores son esenciales en las industrias que utilizan automatización para sus procesos de soldadura, siendo utilizados en 25% para estas aplicaciones. (1)

1.2 Planteamiento del Problema

En el área de fabricación de ejes frontales para los camiones de minería se ha presentado de manera repetitiva, la necesidad de re trabajar los ensambles soldados por la aparición de discontinuidades que rebasan los estándares de calidad.

1.2.1 Descripción del Problema

“Front Axle” es un área dedicada a la fabricación de ensambles soldados de ejes frontales para los camiones de minería de Caterpillar México. Uno de los principales retos es la falta de repetitividad en el cumplimiento de los estándares de calidad relacionados a las discontinuidades provocadas por la unión de las tapas de refuerzo de acero A633 que actualmente son llevadas a cabo mediante un proceso mecanizado de Arco Sumergido (SAW, por sus siglas en inglés).

Este proceso trabaja con una eficiencia de entre el 15% y 30% mostrándose como una de las áreas más ineficientes de la planta, en su mayor parte, debido a la gran cantidad de recursos asignados al re-trabajo de las partes que no cumplen con los requerimientos de calidad especificados por el cliente.

El recurso humano se ha visto imposibilitado para lograr la repetitividad en el cumplimiento de los estándares de calidad como lo muestran estudios estadísticos que se han llevado a cabo en este proceso (Anexo 1). Se requiere de una evaluación a fondo sobre el efecto resultante de la correlación del factor humano con la aparición de defectos en el proceso.

Un buen análisis para la resolución de esta problemática permitiría, mediante la correcta aplicación de las técnicas de investigación, aportar en el desarrollo tecnológico de nuestra industria; definiendo cuáles son los factores que impiden que este proceso trabaje de manera robusta, así como la distribución efectiva de los recursos los cuales representan pérdidas económicas para la compañía.

Encuestas a industrias metal-mecánicas (4), de equipo pesado para minería, aplicadas por asociaciones de prestigio como AWS han demostrado que en los últimos 10 años, la búsqueda de tecnología en Robótica para procesos de soldadura ha aumentado considerablemente, describiéndola como

una solución económicamente viable para aumentar productividad y cumplir con sus estándares de calidad lo que conlleva a una confrontación entre la dependencia actual de mano de obra calificada contra la futura dependencia de robots soldadores.

1.3 Preguntas de Investigación

- ¿Qué condiciones de operación se pueden considerar normales al momento de soldar las tapas de refuerzo de acero A633 mediante el proceso SAW?
- ¿Qué discontinuidades se pueden presentar cuando se suelda un acero A633 mediante el proceso SAW en condiciones normales de operación?
- ¿Cuáles son las variables esenciales para un proceso SAW mecanizado según el código aplicable o especificado por el cliente de camiones de minería?
- ¿Cuáles son las discontinuidades que se presentan comúnmente en la unión de tapas de refuerzo de acero A633 del eje frontal mediante el proceso SAW mecanizado?
- ¿Las discontinuidades generadas en el proceso de soldadura de las tapas de refuerzo del eje frontal están directamente relacionadas con el equipo de soldadura SAW mecanizado?
- ¿Cuáles son las velocidades y la tasa de depósito en un proceso SAW mecanizado durante la soldadura de las tapas de refuerzo del eje frontal?
- ¿Se puede incrementar la velocidad y tasa de depósito, optimizando el proceso con el uso de un sistema automático?

- ¿Las discontinuidades presentes en las uniones de las tapas de refuerzo del eje frontal generadas por las características propias del proceso SAW pueden eliminarse con un sistema autónomo?
- ¿Las propiedades mecánicas en la unión de la tapa de refuerzo resultantes del proceso SAW cumplen con las especificaciones marcadas por el código aplicable?
- ¿Se puede estimar y controlar la distorsión generada al aumentar la velocidad y la tasa de depósito en el ensamble de las tapas de refuerzo al utilizar el Robot?
- ¿Es demostrable estadísticamente que las discontinuidades presentes en el proceso SAW para la unión de las tapas de refuerzo de acero A633 del eje frontal son debidas al factor humano?

1.4 Hipótesis

Un control de la trayectoria en el proceso de soldadura SAW minimizará la generación de discontinuidades que se encuentran fuera de especificación, así como garantizará repetitividad durante la unión de las tapas de refuerzo de acero A633 del eje frontal.

1.5 Objetivos

Estudiar el efecto del proceso SAW mecanizado al controlar de manera precisa la trayectoria del electrodo, en la generación de discontinuidades en soldadura en las tapas de refuerzo de acero A633 del eje frontal.

- Describir los factores que generan discontinuidades en la unión de las tapas de refuerzo de eje frontal durante la aplicación del proceso SAW.
- Identificar los avances tecnológicos en los procesos de soldadura que permiten un control de la trayectoria y que están al alcance de una industria de bajo volumen.
- Registrar las relaciones que existen en la aplicación de la soldadura mediante un proceso mecanizado SAW sin control de la trayectoria contra un proceso con control de trayectoria en la unión de la tapas de refuerzo del eje frontal del camión de minería Caterpillar utilizando un acero A633.

1.6 Justificación

Las proyecciones a futuro para las ventas de camiones de minería Caterpillar se muestran muy prometedoras, por lo que las diferentes áreas de manufactura tendrán que estar preparadas para cumplir en tiempo y forma con la calidad especificada por el cliente. Parte de esto implica realizar estudios a fondo para determinar los factores que impiden la mejora de los procesos así como realizar investigaciones de alto nivel tecnológico que encausen los problemas a soluciones de raíz aplicando los fundamentos teórico prácticos necesarios para el mejoramiento de los procesos actuales.

Haciendo énfasis en los retos en las áreas de soldadura se pretende iniciar un proyecto a nivel de investigación tecnológica que permita demostrar que las tecnologías en soldadura están cada vez más accesibles para los diferentes niveles de industria y a su vez muestran resultados positivos que se verán reflejados en los diferentes indicadores de la compañía.

Considerando el problema específico en el área del eje frontal, se pretende demostrar que la tecnología y el conocimiento científico son las vías más acertadas para la solución de problemas de soldadura que se presentan diariamente en nuestra industria.

1.7 Delimitaciones

El presente trabajo se enfoca en la investigación de la tecnología de robots soldadores aplicada a un problema de soldadura en la industria donde los problemas de calidad no pueden ser eliminados mientras se siga dependiendo del factor humano.

Se expondrán los efectos que se presentan en la unión de las tapas de refuerzo de acero A633 del eje frontal mediante la aplicación del proceso SAW. Se expondrá estadísticamente cómo este proceso se mantiene con variaciones que no permiten determinar las condiciones ideales para lograr un producto de calidad.

Se demostrará estadísticamente y con evidencia experimental cómo las propiedades mecánicas de la unión y materiales se mantienen o mejoran mediante el cambio en el proceso SAW mecanizado a un proceso SAW automatizado, así como evidenciar que la tasa y velocidades de depósito aumentan significativamente como resultado de este cambio de proceso.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

2.1 A633 Gr E acero de alta resistencia baja aleación

Los aceros de alta resistencia baja aleación (HSLA, por sus siglas en inglés) están diseñados para proporcionar mejores propiedades mecánicas y/o mayor resistencia a la corrosión atmosférica que los aceros al carbono convencionales. No se consideran aceros de aleación en el sentido normal ya que están diseñados para cumplir con determinadas propiedades mecánicas en lugar de una composición química (los aceros HSLA tienen límites de cedencia de más de 275 MPa, o 40 kpsi). La composición química de un acero HSLA puede variar para diferentes espesores del producto para cumplir con las propiedades mecánicas requeridas. Los aceros HSLA tienen bajo contenido de carbono (0,50% C ~ 0,25) para mantener conformabilidad y soldabilidad adecuada; tienen contenidos de manganeso hasta 2,0% y pequeñas cantidades

de cromo, níquel, molibdeno, cobre, nitrógeno, vanadio, niobio, titanio, circonio los cuales se utilizan en diversas combinaciones.

Los aceros HSLA comúnmente se prestan en el estado de rolado. También pueden ser suministrados en un entorno de normalizado, o condición de precipitación-endurecido para satisfacer las propiedades específicas requeridas. Las aplicaciones primarias para los aceros HSLA incluyen pipas de gas y aceite, buques y recipientes a presión (6).

Los tipos de aceros HSLA comúnmente utilizados son:

- Aceros para desgaste, diseñado para exhibir una resistencia superior a la corrosión.
- Aceros de rolado controlado, laminados en caliente de acuerdo con un control predeterminado de rolado diseñado para desarrollar una muy deformada estructura de austenita que va a transformar a una estructura muy fina de ferrita equiaxial durante el enfriamiento.
- Aceros con perlita reducida, reforzada por una microestructura de ferrita de grano fino y endurecimiento por precipitación, pero con bajo contenido en carbono y por lo tanto poco o nada de perlita en la microestructura.
- Aceros microaleados, con pequeños agregados (generalmente <0,10% de cada uno) de elementos como el niobio, vanadio, y / o titanio para el refinamiento del tamaño de grano y / o endurecimiento por precipitación.
- Acero de ferrita acicular, aceros con muy bajo contenido de carbono pero con la capacidad de endurecimiento suficiente para transformar al enfriarse a una muy fina ferrita acicular de alta resistencia (bainita de bajo carbono) en lugar de la estructura habitual de ferrita poligonal.

2.1.1 Normalizado en aceros de alta resistencia y baja aleación (HSLA)

Al igual que con los aceros al carbono, el normalizado se puede utilizar para refinar el tamaño de grano de ferrita y perlita en aceros HSLA.

Los aceros normalizados al niobio como el A 633 tienen un grano de ferrita más fino que los aceros normalizados al manganeso, a pesar de esto, cuando la resistencia es de primordial importancia, un rolado controlado es preferible ya que ofrece un endurecimiento por precipitación más controlable. Por otra parte, el vanadio resulta en un endurecimiento por precipitación más marcado aún con el normalizado ya que prácticamente todo el vanadio se encuentra en solución a las temperaturas de normalizado.

2.1.2 Acero ASTM A 633

El acero A 633 según la Asociación Americana de Pruebas de Materiales (ASTM, por sus siglas en inglés) es especialmente adecuado para aplicaciones a bajas temperaturas de -45°C y más altas donde la tenacidad es mejor que la esperada en un material en condición de rolado cuando los niveles de resistencia son comparados.

Este acero debe ser normalizado a una temperatura adecuada la cual produzca una estructura austenítica, pero sin exceder los 925°C , manteniéndola el tiempo necesario para que alcance una temperatura uniforme a través de todo el material y después enfriarlo al aire.

Tabla 2.1 Propiedades mecánicas y composición química del acero A633
(Standard Specification for Normalized High-Strength Low-Alloy Structural Steel Plates, ASTM 2006)

Propiedades físicas	Metrico	Ingles	Comentarios	Composicion Quimica	Comentarios
Densidad	7.87 g/cc	0.284 lb/in ³	TIPICA DEL ACERO	Carbon, C	<= 0.20 %
Propiedades mecánicas	Metrico	Ingles	Comentarios	Iron, Fe	97.7 - 98.7 %
	Resistencia a la tensión	483 - 621 MPa 70000 - 90000 psi	Mínimo; Varía según tamaño y forma	Manganese, Mn	1.15 - 1.50 %
Resistencia a la cedencia	≥ 345 MPa	≥ 50000 psi	Varía según tamaño y forma	Niobium, Nb (Columbium, Cb)	0.010 - 0.050 %
% Elongación	≥ 18.0 %	≥ 18.0 % in 200 mm (8 in.); Varía según tamaño y forma		Phosphorous, P	<= 0.040 %
Modulo de elasticidad	≥ 23.0 %	≥ 23.0 % in 50 mm (2 in.); Varía según tamaño y forma		Silicon, Si	0.15 - 0.50 %
Radio de Poisson	205 GPa	29700 ksi		Sulfur, S	<= 0.050 %
Modulo de Young	0.28	0.28			
	80.0 GPa	11600 ksi			

2.2 Soldadura por arco sumergido SAW

Soldadura por arco sumergido es un proceso en el que se blindo el arco por una escoria fundida y la atmósfera del arco se genera por la descomposición de la escoria. El material de relleno es un alambre de alimentación continuo y de punto de fusión muy alto, y los índices de depósito se logran mediante el uso de elevadas corrientes (por ejemplo, 1000 A) con los electrodos de diámetro relativamente pequeños (por ejemplo, 4 mm). (Fig.2.1)

Los aspectos relevantes del proceso son:

- Altos índices de depósito
- Su funcionamiento puede ser mecanizado u automatizado
- Ninguna radiación visible del arco
- Gama flexible de combinaciones de materiales de aporte
- Difícil de posicionar
- Normalmente se utiliza para espesores superiores a 6 mm

Las principales aplicaciones de soldadura de arco sumergido de carbono están en la sección de aceros al carbono y aceros de baja aleación, se ha utilizado en plantas de generación de energía, estructuras de acero pesadas, plataformas petroleras y la construcción naval.

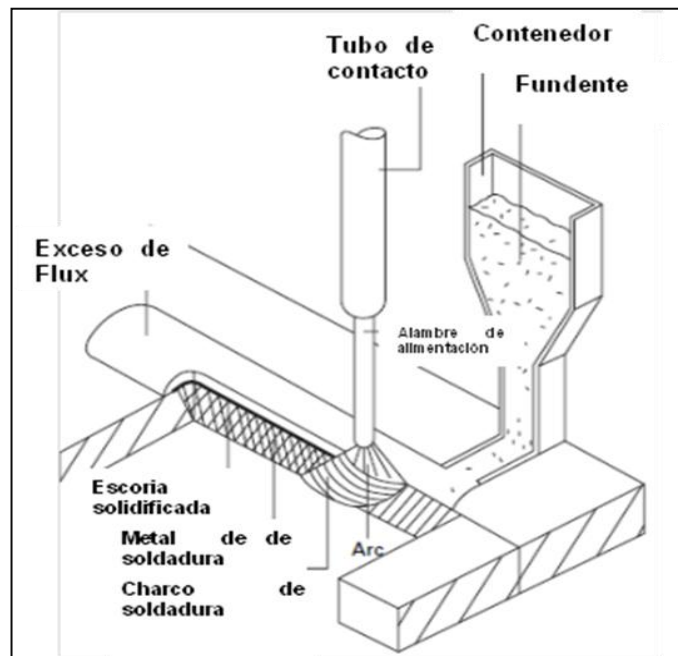


Fig. 2.1 Soldadura por arco sumergido (SAW, por sus siglas en inglés)(2)

El proceso también se utiliza para soldar en alta velocidad las costuras de geometrías simples en secciones más delgadas, por ejemplo en la fabricación de recipientes a presión para el combustible de petróleo líquido. Como soldadura de arco metálico protegido, con las adecuadas combinaciones de material de aporte y fundente, el proceso también puede ser utilizado para revestimiento.

Las discontinuidades que se pueden presentar durante la aplicación de este proceso son:

- Grietas por solidificación
- Grietas por hidrógeno
- Falta de fusión
- Alimentación de alambre irregular
- Poros
- Inclusiones de escoria
- Socavaciones

Las variables esenciales del proceso son:

- Corriente
- Voltaje
- Velocidad de avance
- Tamaño del electrodo
- Distancia del electrodo a la pieza de trabajo
- Espesor de la placa
- Calor de entrada

2.2.3 Efecto de las variables esenciales sobre el cordón de soldadura

a) Corriente: Al incrementar la corriente, se incrementa la penetración y la cantidad de material fundido. Una excesiva cantidad de corriente produce errores en el arco, socavados así como un cordón muy alto y estrecho. Por el contrario, una baja cantidad de corriente produce un arco inestable. (18)

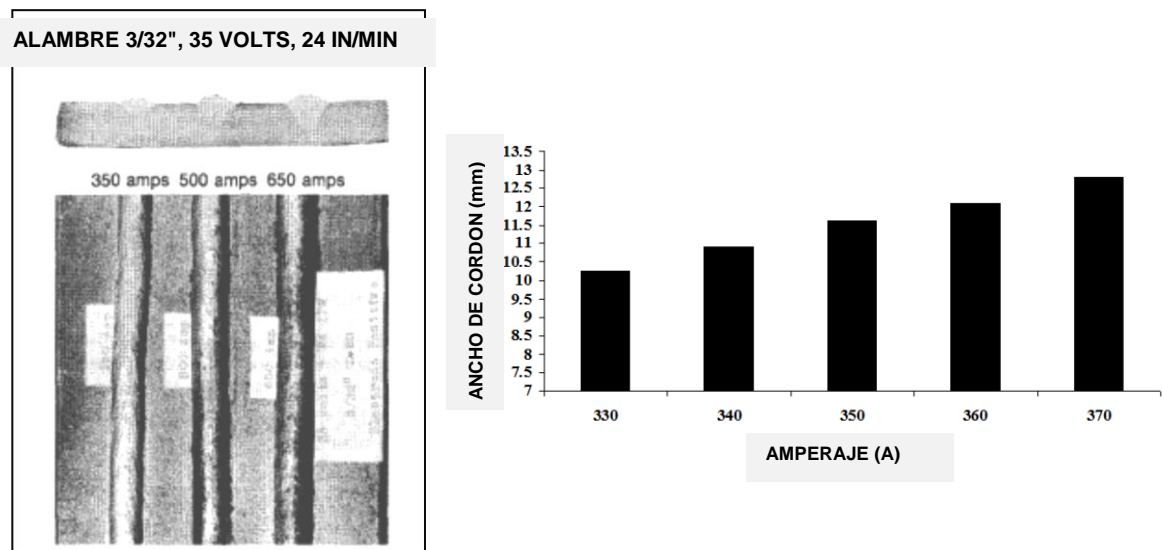


Fig 2.2 Efecto de la variación de corriente sobre la forma del cordón.
(18)(19)

b) Velocidad de avance: Una excesiva velocidad de avance disminuye la acción de fundir los metales, aumenta la posibilidad de generar socavados, golpes de arco, poros y formas irregulares en el cordón de soldadura. Velocidades más lentas de avance dan tiempo a los gases a escapar del charco de soldadura, reduciendo el riesgo de generar poros.

Velocidades excesivamente bajas producen cordones “forma de sombrero” los cuales son propensos a la formación de grietas, un gran charco de soldadura que fluye alrededor de la junta y que produce un cordón de apariencia rugosa, salpicaduras e inclusiones de escoria. De igual manera, bajo esta condición, la soldadura penetra menos. (18)

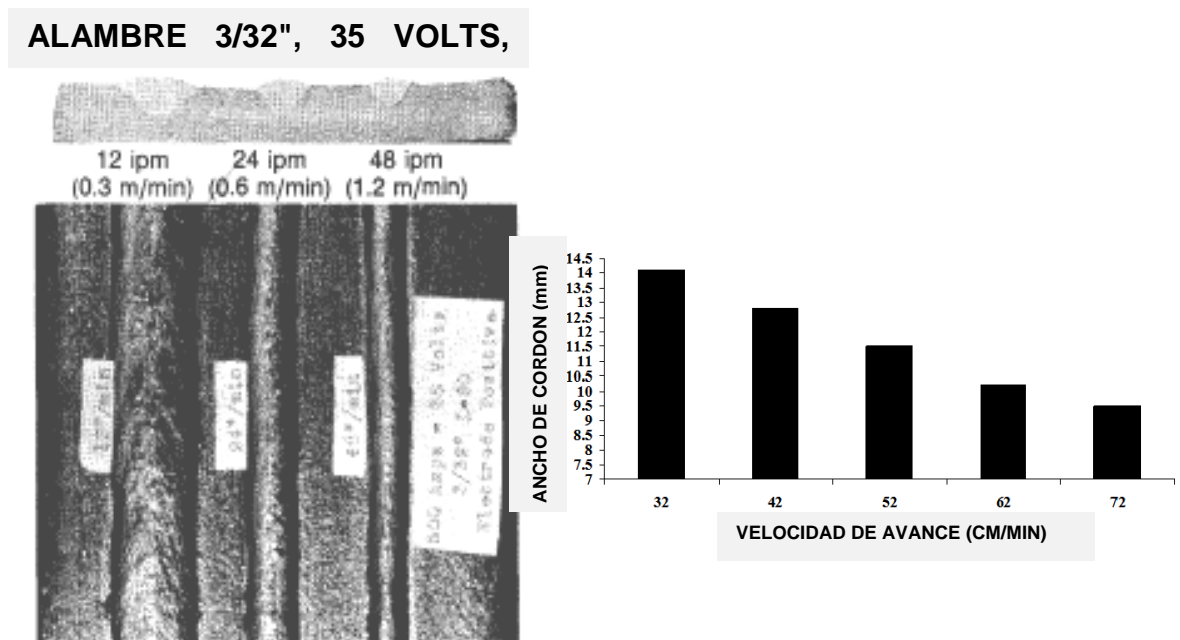


Fig 2.3 Efecto de la variación de velocidad de avance sobre la forma del cordón. (18)(19)

c) Tamaño del electrodo: Electrodo muy grandes consumen grandes cantidades de corriente. Grandes electrodos a bajas corrientes ayudan a cerrar las aberturas que se encuentran por un mal posicionamiento de los componentes a soldar. A determinadas corrientes, si se reduce el diámetro del electrodo se puede aumentar la penetración y mejora la estabilidad del arco. (18)

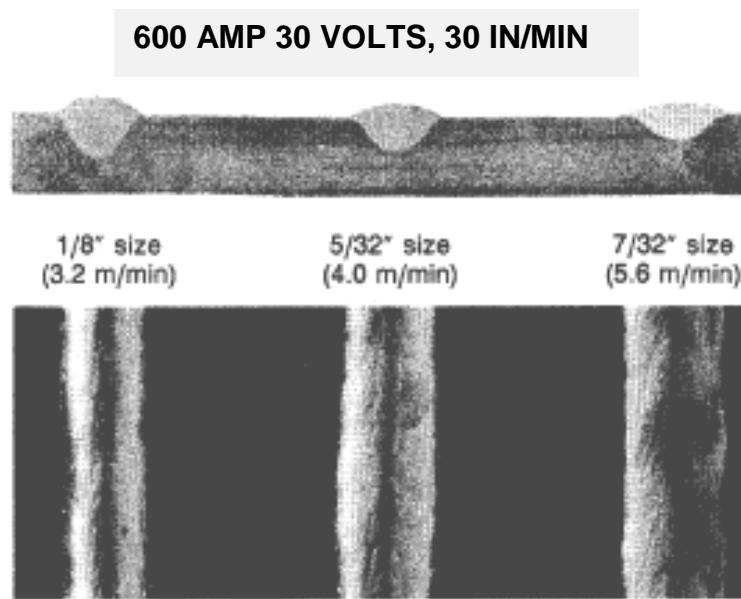


Fig 2.4 Efecto del tamaño del electrodo sobre la forma del cordón (18)

d) Voltaje: Es la variable principal para el control de la forma del cordón. Incrementando el voltaje se produce un cordón mas plano y amplio, mejora la eliminación de escoria de los filos de las juntas a tope, aumenta el consumo del fundente, reduce la probabilidad de generar poros por óxidos, ayuda a llenar los espacios cuando la posición de las piezas es incorrecta, aumenta la absorción de los elementos de aleación del fundente. (18)

ALAMBRE 3/32", 500 AMP, 24

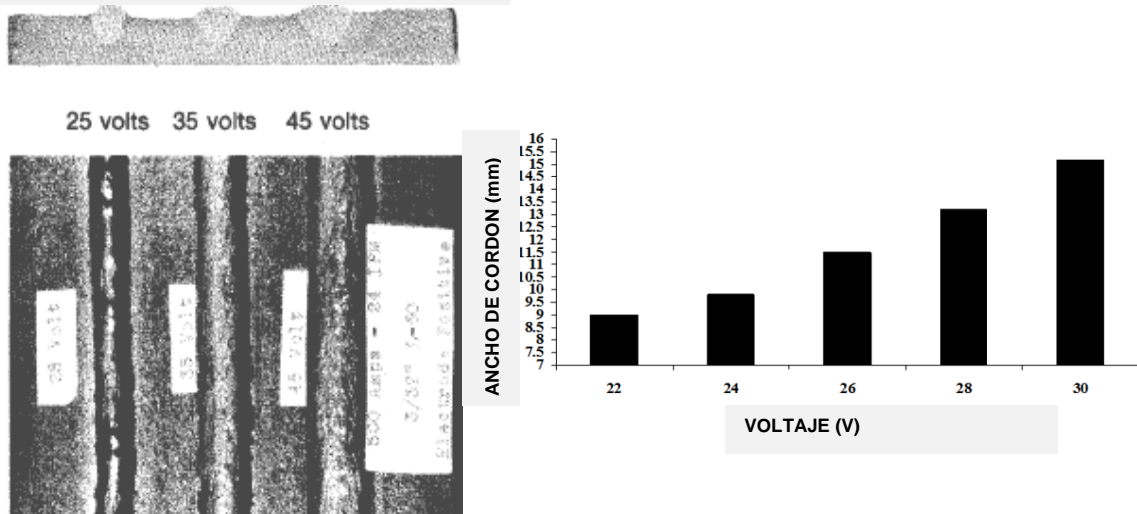


Fig 2.5 Efecto del voltaje sobre la forma del cordón (18)(19)

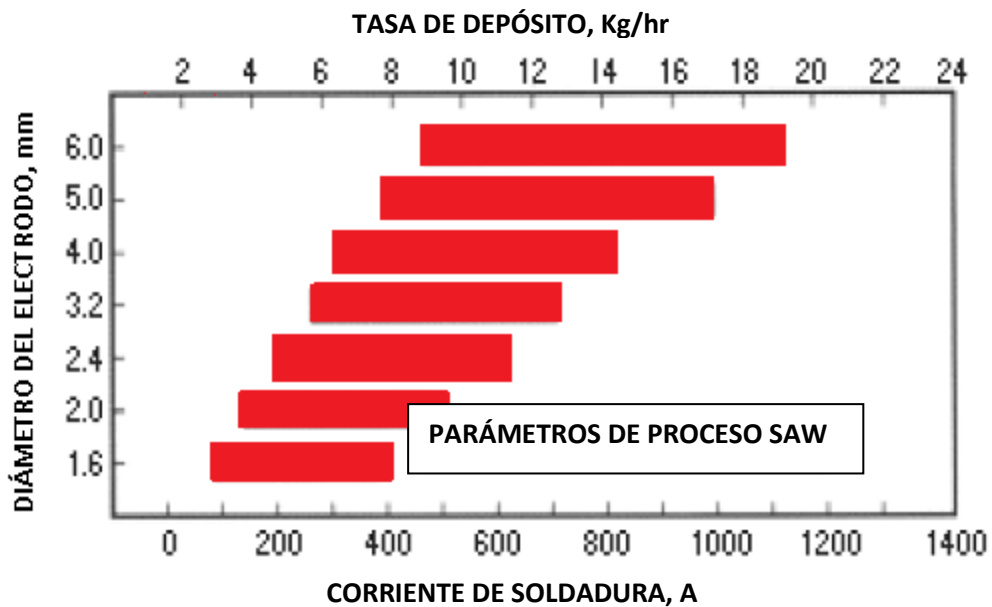


Fig. 2.6 Efecto de las variables del proceso en la tasa de depósito (18)

2.2.4 Avances en soldadura por arco sumergido

Uno de los avances que se pueden encontrar con respecto al proceso de arco sumergido va relacionado al incremento de la tasa de depósito sin modificar las propiedades o microestructura de los elemento soldados. Un ejemplo de esto lo muestra Shigeo Oyama (2007) en su artículo “Alta velocidad en soldadura por arco sumergido de un solo lado” donde mediante la utilización de un cuarto electrodo agregado a un proceso convencional de 3 electrodos, demuestra la capacidad del proceso para incrementar de manera sustantiva la tasa de depósito sin modificar significativamente las propiedades del componente soldado.

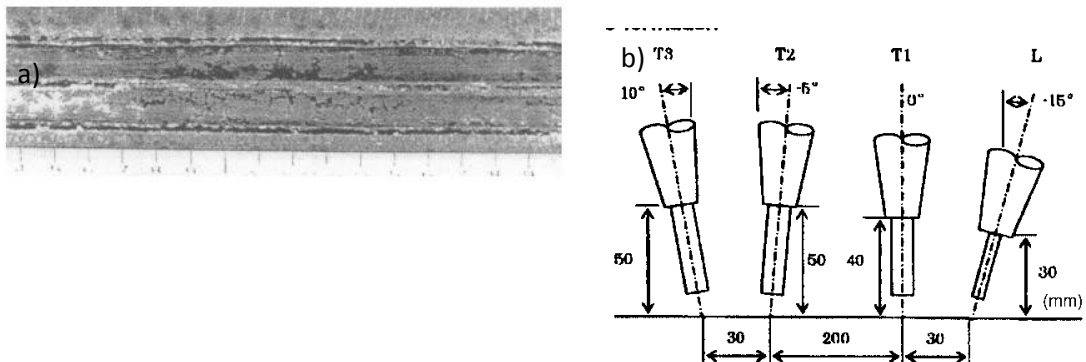


Fig. 2.7 a) Apariencia del cordón de soldadura después de ser aplicada con 4 electrodos. B) Configuración de los 4 electrodos de Arco Sumergido. (16)

Mediante el uso de esta tecnología, la unión permite ser soldada logrando una penetración completa sin necesidad de utilizar barra de respaldo, sino por el contrario utilizando una cara de raíz para respaldar la soldadura

permitiendo que la energía producida por el proceso penetre completamente esta cara de raíz permitiendo alcanzar la penetración completa.

Algunos de sus resultados nos permiten comprobar que se puede incrementar la tasa de depósito incrementando el número de electrodos, sin modificar la microestructura y sin ocasionar un incremento significativo en la distorsión de la pieza (16).

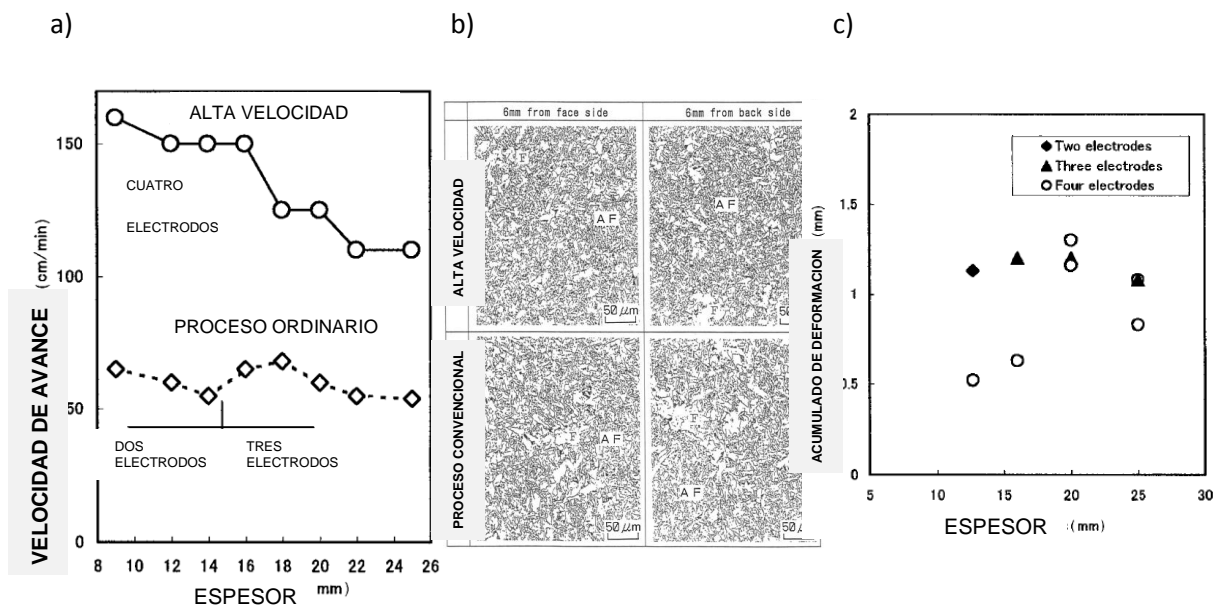


Fig. 2.8 a) Comparación en el incremento de la velocidad entre el proceso ordinario y el de 4 electrodos. B) Comparación de microestructuras encontradas entre los dos procesos, Ferrita Alotriomórfica con trazas de ferrita en ambos procesos aunque presenta una mayor concentración de ferrita alotriomórfica en el proceso de 4 electrodos. C) Cumulo de distorsión en milímetros comparando los diferentes procesos. (16)

Otro avance importante es el desarrollo de modelos de predicción de la calidad en soldadura, diferentes alternativas han sido desarrolladas de manera

que permiten monitorear y establecer predicciones que permitan detectar con anticipación los resultados que se obtendrán al mover las variables o parámetros utilizados en un proceso de soldadura. Dhas y Kumanan (2010) en su artículo “Predicción de la calidad de soldadura en proceso de Arco Sumergido utilizando un sistema híbrido de reemplazo de función” muestran cómo fue posible desarrollar un modelo que permitiera determinar la geometría de la soldadura utilizando redes neuronales a partir de un diseño de experimentos utilizando los principios de Taguchi(17).

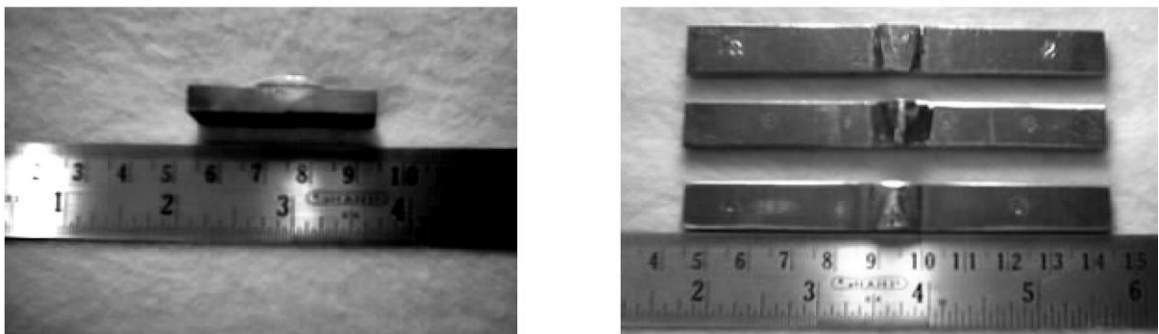


Fig 2.9 Probetas obtenidas del diseño de experimentos. (17)

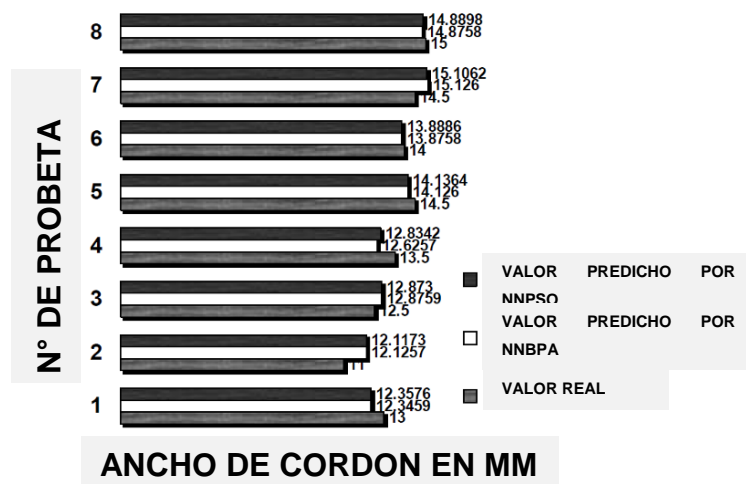


Fig 2.10 Comparación de ancho del cordón entre valores predichos y valores obtenidos. (17)

2.3 Proceso Tándem

Como su nombre lo indica, dos electrodos son complementados utilizándose conjuntamente para producir soldaduras. Los dos electrodos son aislados uno del otro en este proceso tándem, por lo tanto el modo de transferencia puede ser ajustado de manera independiente, en contraste con la soldadura de doble alambre.

En consecuencia, este proceso GMAW, SAW modificado permite una gran flexibilidad y adicionalmente un gran incremento en la velocidad de avance, mayores tasas de depósito así como menores salpicaduras.

Las desventajas incluyen la necesidad de utilizar equipo de alta complejidad así como la necesidad de automatización. Un sistema guiado puede que sea requerido. Este sistema emplea dos fuentes de voltaje, dos alimentadores de alambre y un controlador.

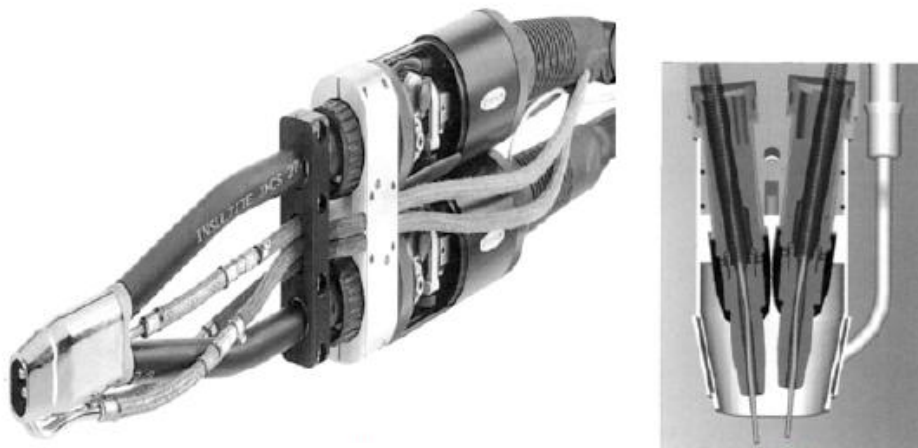


Fig 2.11 Ejemplo de antorcha de soldadura Tándem. (3)

Esta variante del proceso GMAW es capaz de lograr altas velocidades de avance, de 1.5 a 2 veces la velocidad de un proceso con un solo electrodo. Algunas velocidades de avance pueden llegar a las 3.75 metros por minuto.

Las tasas de deposición pueden llegar a los 19 kilogramos por hora para soldadura de placas gruesas.

Los modos de transferencia utilizados para el proceso tándem son aspersion y arco pulsado. Las combinaciones de los modos popularmente utilizados incluyen:

- **Aspersion-Pulsado:** El modo de transferencia aspersion en el arco principal seguido por arco pulsado en el electrodo guía.
- **Pulsado-Pulsado:** Arco pulsado en ambos.
- **Aspersion-Aspersion:** Transferencia por aspersion en ambos arcos.

2.4 Software de Simulación

Algunos de los avances tecnológicos para la simulación de los componentes soldados se han enfocado en la generación de software que permiten predecir los comportamientos de los materiales a través de la distribución del calor conforme la soldadura está siendo aplicada.

Software de elementos finitos como el Cosmos Works o Simulation Works, ANSYS, Comsol, entre otros, están siendo utilizados para predecir el comportamiento de la temperatura sobre una pieza en una secuencia de soldadura dada, estos sistemas permiten predecir, mediante la localización de gradientes de temperatura muy altos, donde pueden ocurrir deformaciones o distorsiones durante la aplicación de la soldadura. (Ver figura 2.12)



Fig 2.13 Software de simulación de secuencias de soldadura y distorsión por calor. (5)

2.5 Automatización de procesos de soldadura

La soldadura automatizada es una de las más exitosas aplicaciones de los robots industriales. Un gran número de productos requieren de soldadura en sus procesos de ensamble. Los procesos de soldadura son complejos, difíciles de parametrizar, de monitorear y de controlar su efectividad. De hecho la mayoría de las técnicas de soldadura no han sido completamente entendidas, están basadas en modelos empíricos obtenidos de experiencias en condiciones específicas. Ver figura (2.14)



Fig 2.14 Robot Soldador (1)

Los efectos sobre las superficies soldadas no se conocen completamente. La soldadura en la mayoría de los casos expone a altas temperaturas concentradas en pequeñas zonas. Físicamente esto provoca que el material esté sometido a ciclos de expansión y contracción térmica, cuando estos cambios ocurren, los efectos en las propiedades mecánicas provocan deformaciones plásticas. Estos cambios deben ser entendidos con el fin de minimizar sus efectos.

La mayoría de las aplicaciones de soldadura industrial se han visto beneficiadas con la introducción de robots manipuladores, dado que las deficiencias en los procesos, atribuidas al factor humano, han sido reducidas gracias a las ventajas de los robots, y éstos se han ido introduciendo en mayor medida a los procesos (3).

Esto conduce a una disminución de los costos de los productos ya que la calidad y productividad aumentan, mientras que los costos de mano de obra disminuyen.

El empleo de robots que realizan operaciones de soldadura, permite controlar las variables que son influenciadas con la antorcha del equipo de soldadura; éstas son: ángulo de avance, velocidad de avance, distancia de la punta de contacto al metal base, y por supuesto, la trayectoria del cordón, lo que permite utilizar diferentes secuencias de soldadura. Una vez programado es repetible dentro de un margen de error muy estrecho. Esto permite realizar la misma operación con muy poca variación una vez tras otra. (2)

Lograr repetitividad, reproducir la calidad en los productos suele ser difícil con las técnicas de soldadura manual, sobre todo cuando se involucran materiales avanzados y configuraciones de uniones complejas. Aumentando el nivel de automatización en los procesos se puede mejorar la consistencia, aumentar el rendimiento y reducir los costos de inspección y rechazo.

2.5.1 Opciones de automatización

La soldadura automatizada puede variar desde simples posicionadores hasta sistemas completamente integrados. Varias opciones existen:

- Simple mecanizado
- Automatización para propósitos especiales
- Soldadura robotizada
- Automatización modular
- Controles programables
- Sistemas a control remoto

2.5.2 Soldadura robotizada

Los robots industriales no son soldadores humanoides, la definición de la asociación británica de robot industrial es:

“Un robot industrial es un dispositivo re-programable tanto para transportar como manipular piezas, herramientas o instrumentos especializados a través de la programación de movimientos para la realización de tareas específicas en manufactura” (2)

En el caso de los robots soldadores las herramientas o instrumentos especializados consisten en la pistola de soldar, sistema de alimentación de alambre y dispositivos de seguimiento. (Ver figura 2.15)

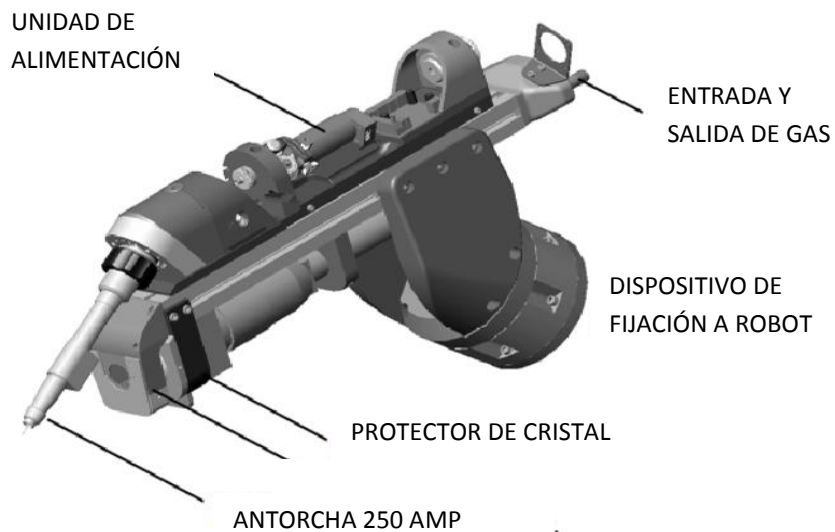


Fig. 2.15 Representación esquemática de la pistola de soldar híbrida para robot soldador (3)

Un sistema de robot soldador industrial consiste principalmente de:

- Un manipulador mecánico
- Equipo de soldadura (según proceso)
- Sistema de control

2.5.2.1 Sistemas de manipulación mecánica

La configuración más común utilizada en los robots industriales seis o más ejes de movimiento.

Las ventajas de un brazo articulado son la flexibilidad y la habilidad de llegar a zonas de difícil acceso. Estos han sido desarrollados para aplicaciones que requieren una gran precisión y aplicaciones que requieren largas horas de funcionamiento.

Pueden usarse para diferentes configuraciones, como soldar grandes longitudes al adaptarse un riel que mueva al Robot a lo largo de la pieza. (Ver figura 2.16)

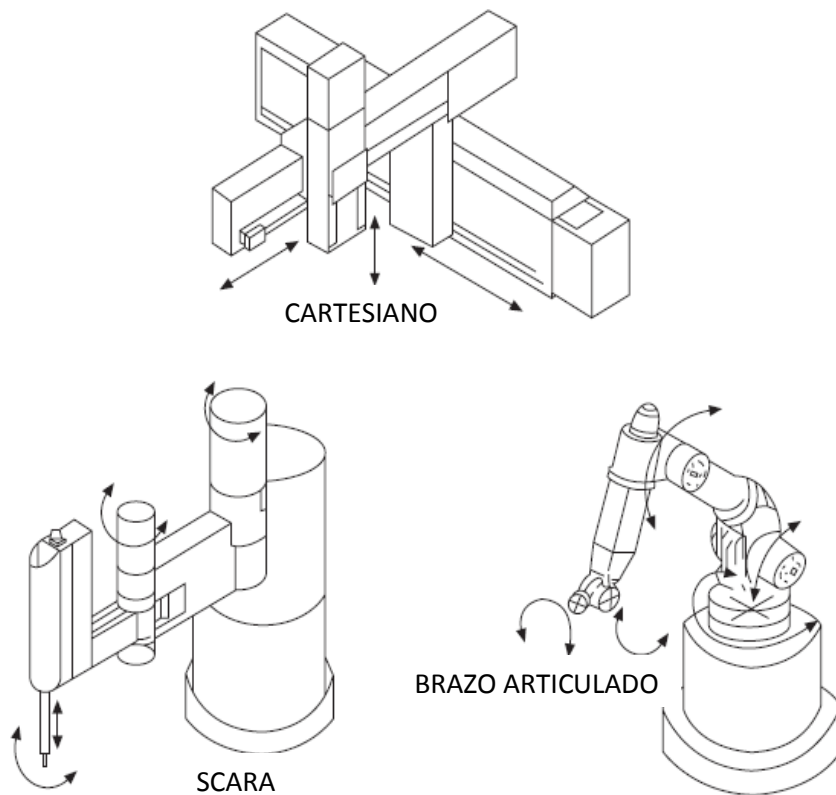


Fig. 2.16 Configuraciones típicas de Robots soldadores.

Robot Cartesiano

En un robot móvil, el manipulador casi siempre trabaja más allá del borde del chasis y debe ser capaz de alcanzar desde el suelo hasta por encima de la altura del cuerpo del robot. Esto significa que el brazo manipulador trabaja desde el interior o desde un lado del campo de trabajo. Algunos manipuladores gantry industriales trabajan fuera de su área de trabajo, y sería realmente difícil de utilizar sus diseños de un robot móvil. Los manipuladores gantry son cartesianos o rectangulares. Esta geometría parece un sistema de coordenadas XYZ tridimensional. De hecho, así es como se controla y cómo los de trabajo se mueven en torno a finales de la superficie de trabajo. Hay dos modelos básicos que se fundamentan en cómo los segmentos del brazo son compatibles, cartesiano y en voladizo. Montado en la parte delantera de un robot, los dos primeros grados de libertad de un manipulador cartesiano voladizo puede mover hacia la izquierda / derecha y arriba / abajo, el eje Y no es necesariamente necesitan de un robot móvil debido a que el robot puede moverse hacia atrás / adelante. La Figura muestra un diseño en voladizo con tres grados de libertad éste tiene la ventaja de exigir un algoritmo de control muy sencillo. (10) (Ver figura 2.17)

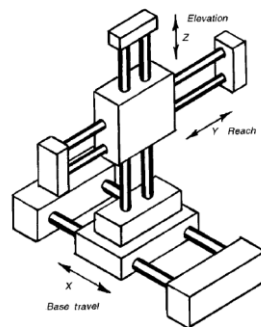


Fig. 2.17 Robot manipulador cartesiano. (10)

2.5.2.2 Sistemas de movimiento

El sistema puede ser impulsado por actuadores neumáticos, hidráulicos o eléctricos. Los sistemas hidráulicos de potencia son adecuados para aplicaciones que requieren alta capacidad de carga.

La mayoría de los robots soldadores están equipados con servomotores de corriente directa, ya que permiten tener un control de la velocidad y mantener el torque a diferentes voltajes. Los motores de pasos son utilizados en sistemas que no requieren alta precisión, ya que son fáciles para retroalimentar el sistema en su posicionamiento, pero, sufren de falta de potencia.

2.5.2.3 Equipos para soldadura por arco

El equipo de soldar que se va a utilizar en el robot depende del proceso que se va a utilizar, algunas características de estos equipos deben estar identificadas.

Para estas aplicaciones se requiere una fuente de poder para controles remotos y la estabilización de la señales de salida. El control por computadora es fundamental en el funcionamiento, el control por microprocesadores permite comunicarse con un equipo "host" (ordenador de la transferencia de datos) utilizando protocolos de comunicación estándar como RS232 y USB; lo que permite que los parámetros de soldadura puedan ser descargados a los equipos, así como facilitar el control remoto y supervisión. Este control garantiza que ocurra la repetitividad.

Se puede utilizar un carrusel con antorchas intercambiables de forma automática para evitar problemas cuando la antorcha requiera limpieza. (Ver figura 2.18)



Fig. 2.18 Robot Soldador con equipo de control.

2.5.2.4 Sistemas de visión

Los robots actuales de soldadura utilizados en aplicaciones industriales se programan a través de los métodos de enseñar y reproducir. Las trayectorias de soldadura para este tipo de robots deben ser manualmente programadas y

re-programadas para diferentes piezas de trabajo, ya que este tipo de programación no permite la auto-rectificación de compensaciones en el proceso de soldadura. Esto hace que la puesta en marcha de estos sistemas sea muy costosa en tiempo y dinero. Para hacer la soldadura robótica más flexible a diferentes lugares y formas de las piezas de soldadura, los sistemas de visión se están introduciendo en la soldadura robotizada. Recientes investigaciones han reportado que los sistemas de visión por ordenador se utilizan para detectar y localizar las costuras de soldadura. Además, los sistemas de visión también se están utilizando para controlar la calidad de la soldadura mediante el control de la dinámica del charco de fusión.

La detección y seguimiento de la junta de soldadura de manera automática es un tema importante en la soldadura automatizada. Es un área de gran interés y un importante paso en la realización de procesos de soldadura completamente autónomos. Dado que los sistemas de visión pueden adquirir información sin interferir con los procesos de soldadura, son normalmente utilizados para el seguimiento de la unión. Existe una gran variedad de enfoques adoptados para la detección y seguimiento de la soldadura robótica.

Existen dispositivos de visión que no necesariamente tienen que actuar en conjunto con un Robot, para aplicaciones donde se desea observar y grabar el desarrollo del charco de soldadura durante la aplicación de la misma, se pueden utilizar cámaras las cuales cuentan con filtros que permiten enfocar el charco de soldadura filtrando la luz emitida por el electrodo y permitiendo ver con alta calidad el desarrollo del proceso.

Esta aplicación puede ser aprovechada en dispositivos de soldadura que no necesariamente requieran tener una interfaz de comunicación entre el equipo de soldadura y la inspección de la misma. Un sistema mecanizado puede adaptarse con un sistema de visión de este tipo y verificar el desarrollo del proceso de manera remota.

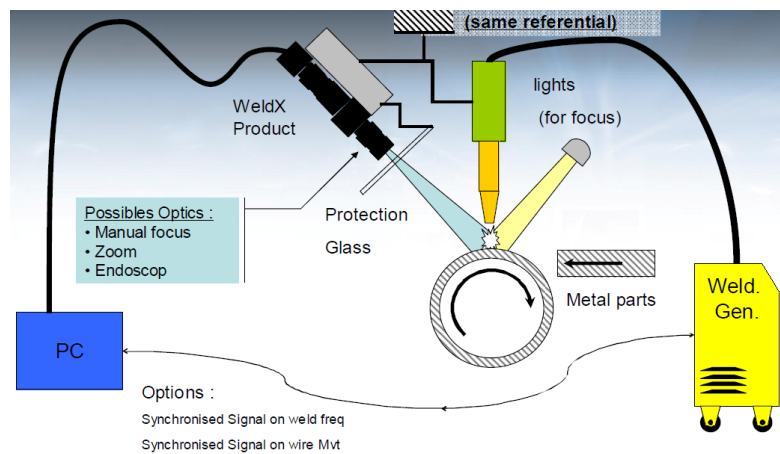
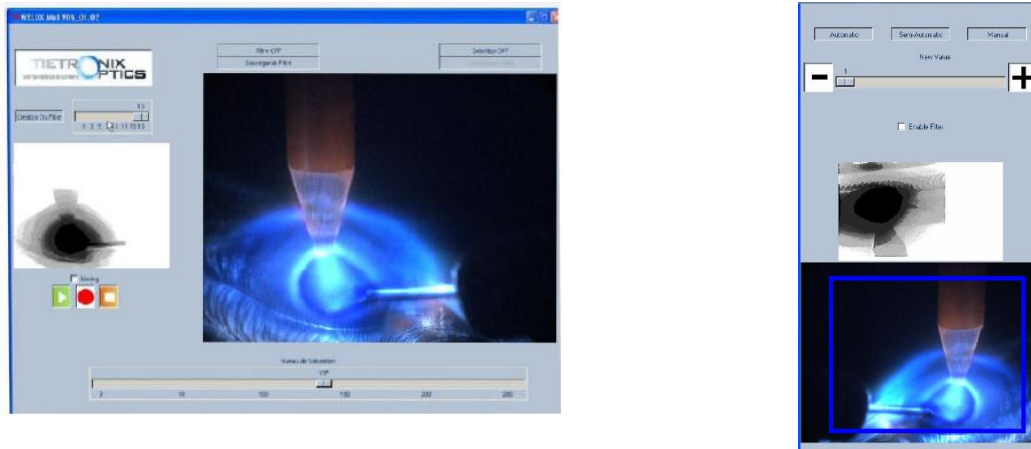


Fig. 2.19 WeldX System Sistema de visión para seguimiento del charco de soldadura de manera remota. (www.tietronix-optics.com, 2009)

2.5.2.5 Simulación y programación fuera de línea

La programación de los sistemas robóticos pueden tomar una cantidad significativa de tiempo y esto resulta en la pérdida de producción. La programación fuera de línea permite que la programación del robot se realice en una estación de trabajo remota y se traslade al controlador del robot de manera instantánea.

Diversos sistemas están disponibles para la programación fuera de línea (por ejemplo, GRASP, IGRIP, ROBCAD, V5 Robotics, SolidWorks, Catia, entre otros). Estos comparten las siguientes características (Ver figuras 2.20 y 2.21):

- Un modelo gráfico y cinemático del robot desde una librería del software
- La pieza de trabajo y la junta pueden ser cargadas en el programa y la operación de soldadura se puede simular mediante la selección del Robot
- La simulación completa puede traducirse al lenguaje de control y ser enviado directamente al control del robot a través de un enlace de datos



Fig. 2.20 Línea de producción FrontAxle Trucks con modelación de Robot Soldador. *Michel Cabodevila* (2009)



Fig. 2.21 Ejemplo de programación fuera de línea para producción de chasis Volvo.

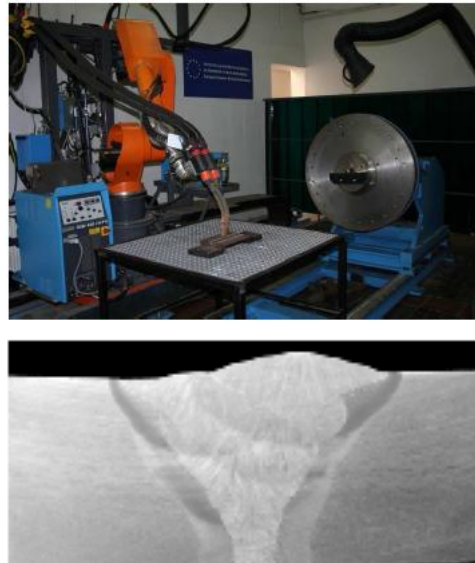
2.6. Innovaciones en arco eléctrico

Soldadura con el uso de dos cables de electrodos (tándem) se aplicó por primera vez para soldadura por arco sumergido. A principios de los años noventa con éxito esta solución se transfirió al proceso GMAW. La acción del metal fundido en dos arcos de soldadura es proveído de alimentadores de alambre por separado. Ambos circuitos de corriente de soldadura están separados eléctricamente, por lo que los parámetros se puede establecer de forma independiente e individual para cada electrodo de soldadura. Esto se traduce en la posibilidad de controlar el charco de soldadura y por consiguiente la forma de la soldadura.

La aplicación de la soldadura en tándem en vez de las convencionales GMAW, especialmente en las estaciones de soldadura automática y robotizada, permite que la velocidad de desplazamiento aumente incluso hasta varios metros por minuto, dependiendo del grosor de los elementos y configuración de la junta soldada. La velocidad de soldadura Tándem es imposible de alcanzar

por el proceso semiautomático, por lo tanto la soldadura en tándem se aplica generalmente en los procesos de mecanizado o robótica.

Tándem es uno de los métodos más eficaces de mejorar la productividad de la soldadura.



PARAMETROS DE SOLDADURA						
CORRIDA	N° ALAMBRE	AMPERAJE	VOLTAJE	VELOCIDAD ALAMBRE (M/min)	VELOCIDAD AVANCE (cm/min)	AMPLITUD DE LA ONDA (mm)
1	1	130	26	4.2	35	16
	2	125	26	4		
2	1	150	25	5	40	0
	2	145	25	4.9		
3	1	150	25	5	40	0
	2	145	25	4.9		
4	1	185	27	6.2	37	0
	2	180	27	6		
5	1	185	27	6.2	37	0
	2	180	27	6		

Fig. 2.22 Parámetros utilizados en el proceso Tándem en cada pase de soldadura mediante la aplicación por un robot soldador. (7)

Como conclusión en el artículo se identificaron los siguientes aspectos:

1. La aplicación del proceso Tándem con la misma intensidad de corriente que en el caso del método convencional GMAW hace posible incrementar la velocidad de soldadura y reducir salpicaduras para uniones a tope y filetes.
2. La aplicación de proceso de soldadura TANDEM permite reducir los costos de la soldadura de juntas de 1 m de largo, incluso en un 35% en comparación con el GMAW convencional.
3. La soldadura Tándem asegura buenas propiedades mecánicas de las uniones soldadas de aceros no aleados y aceros tratados termo mecánicamente (7).

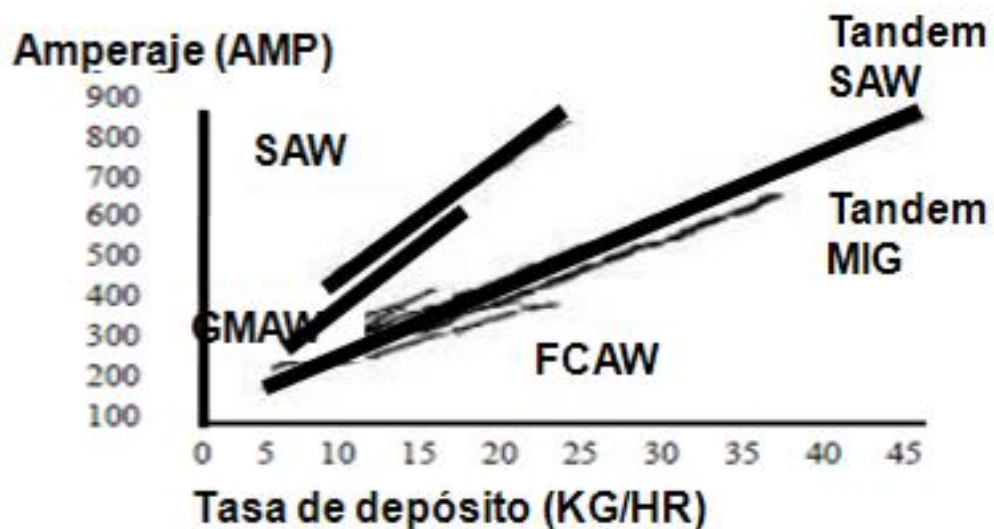


Fig. 2.23 Comparativa de procesos de soldadura, amperaje vs tasa de depósito. (7)

El Dr. R J Beattie (2004), presenta en su artículo *Applications of Láser Seam Tracking In Welding Thick Wall Vessels* como el sistema de seguimiento láser para juntas de soldadura es un método bien probado y establecido de la orientación de soldadura para los sistemas de soldadura automatizados. Fue desarrollado por primera vez cerca de 1980 para aplicaciones de soldadura robótica. A medida que la tecnología maduro, esta tecnología se aplicó a otros tipos de automatización de soldadura. Este trabajo presenta una visión general de las aplicaciones de soldadura en los tanques o cilindros de pared gruesa. Estas aplicaciones son utilizadas en la fabricación de recipientes a presión, estructuras en el mar, tuberías, etc.

La principal ventaja el sistema de seguimiento láser para juntas de soldadura son los resultados del hecho de que se trata de un método sin contacto para controlar la posición de una antorcha de soldadura que se basa en la detección de la geometría de la unión soldada. No se ve afectada significativamente por la apariencia de la superficie de las piezas a soldar o por el proceso de soldadura en sí.

Las partes principales del sistema son:

1. Sensor láser
2. Sistema de control del sensor
3. Algún método de posicionamiento del cabezal de soldadura por el sistema de control.

El láser se utiliza porque es conveniente para dar forma a una banda y porque hace que sea fácil para filtrar la luz de arco y otros efectos de luz ambiental. El diseño de la cabeza del sensor utiliza el principio de triangulación

para que la forma de la raya en la imagen de la cámara codifique la estructura tridimensional de la unión soldada. La imagen de video resultante se envía al sistema de control del sensor. La figura 2.24 ilustra el principio de triangulación para una medición de un solo punto de distancia. El rayo láser se proyecta hacia abajo y se muestra en la figura de las superficies en tres distancias diferentes. El resultado de tres posiciones de la imagen también se muestra y está claro que la posición de la imagen es una función de la distancia desde el sensor hasta la superficie.

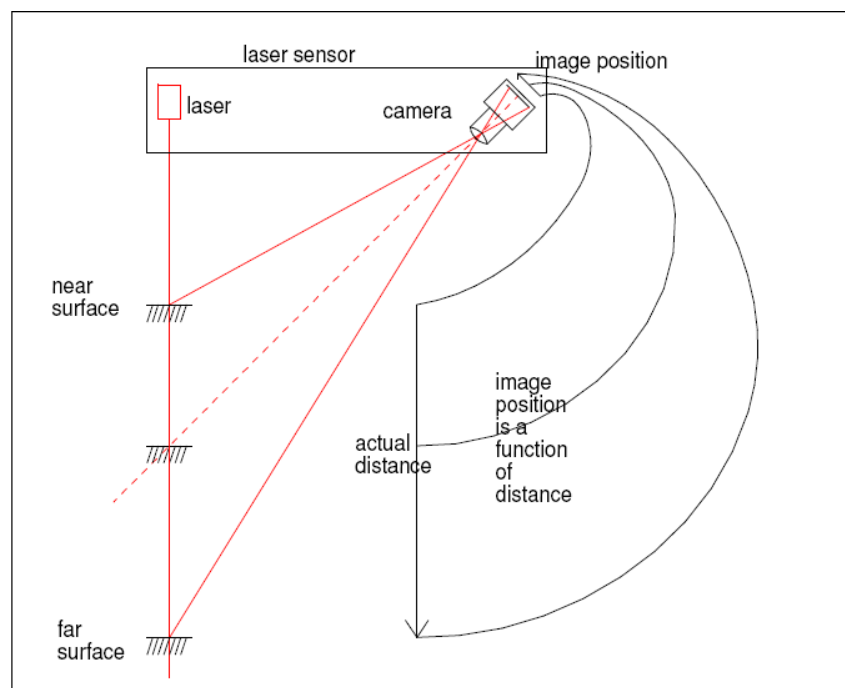


Fig. 2.24 Principio de triangulación. (14)

El sistema de control extrae la banda de la imagen y es capaz de analizar su forma para determinar la estructura de la articulación y su posición respecto a la cabeza del sensor. Conociendo la relación entre la cabeza del sensor y la antorcha de soldadura, la unidad de control puede entonces posicionar la

antorcha de soldadura y asegurarse de que los electrodos están en el lugar correcto en la articulación durante la operación de soldadura.

Hay dos tipos de sistema de control. El primer tipo se basa en una propiedad de una sola placa equipo RISC incluyendo procesamiento de imágenes y i / o funciones en el mismo tablero. Esto proporciona una solución potente a bajo costo. La desventaja de este enfoque es el carácter no estándar del sistema de control. El segundo tipo de control se basa en un estándar, tales como el bus PCI convencional de ordenador personal Pentium con un sistema operativo basado en Windows. Esto tiene la ventaja de la utilización de hardware, principalmente fuera de la plataforma y componentes de software, proporciona una interfaz de usuario gráfica altamente informativa, conexiones de red, etc, pero es mucho más caro. También es bien sabido que los sistemas PC basados en Windows habitual no se consideran tiempo real, por lo tanto, algunas de las medidas especiales que deben tomarse para asegurarse de que el rendimiento general del sistema es adecuado en la operación en tiempo real.

Para aplicaciones de soldadura de espesor grueso de pared, la posición del cabezal de soldadura se controla normalmente por un par de guías lineales. Las líneas están controladas directa o indirectamente por el controlador de sistema de visión.

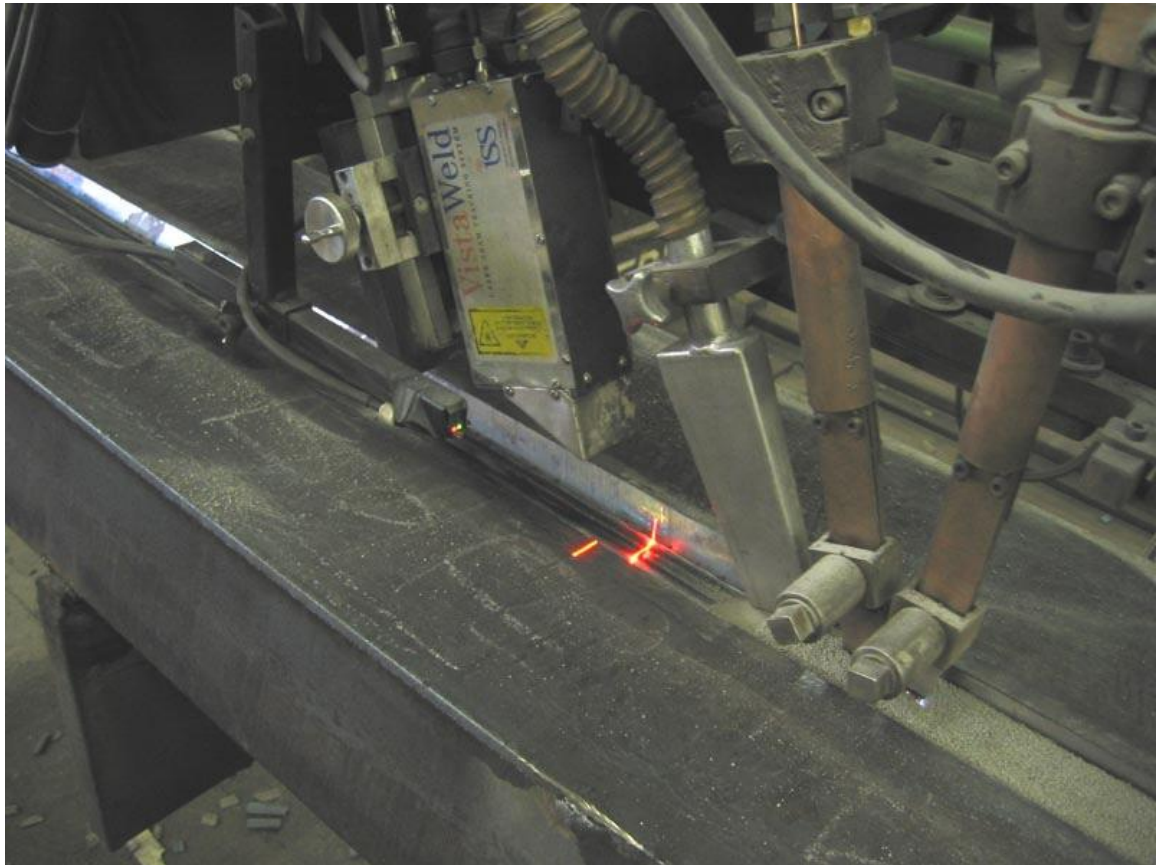


Fig. 2.25 Sistema Láser en una unión de placas de espesor de pared grueso. (14)

En la operación, el operador posiciona la antorcha de soldadura correctamente al inicio de cada pase de soldadura y almacena esta posición de referencia mediante una sencilla operación de un solo toque en el sistema del consola portátil. A continuación, puede comenzar a soldar inmediatamente con el sistema de visión y mantener la posición correcta a lo largo de la soldadura.

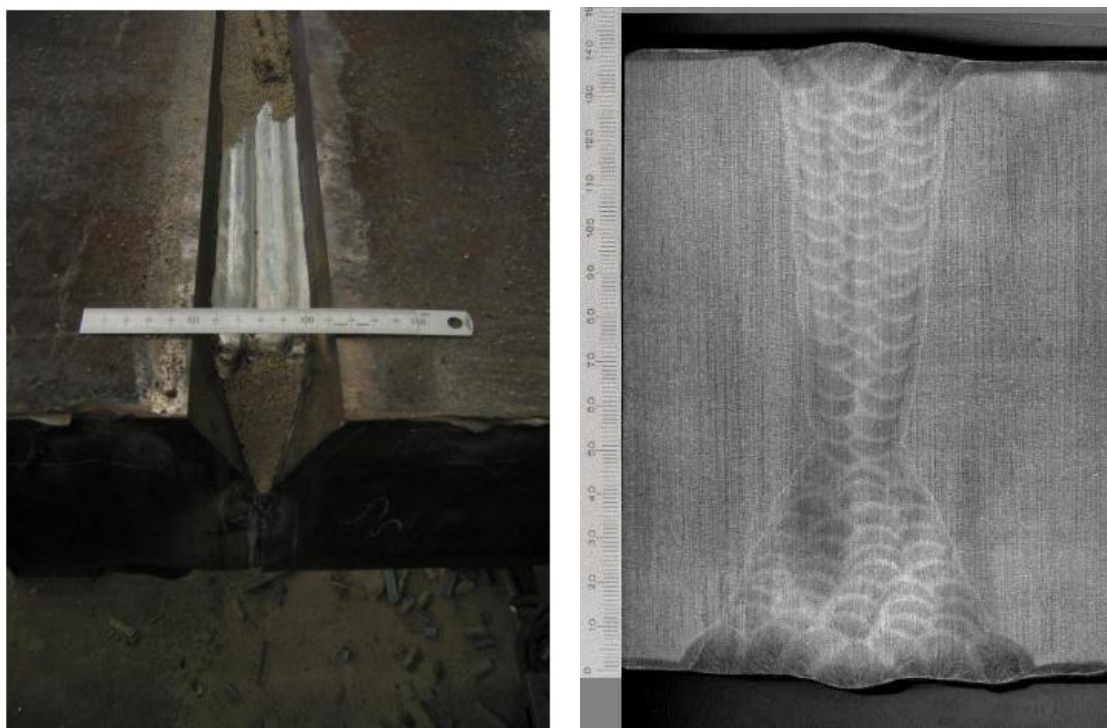


Fig. 2.26 Sistema láser en una unión de placas de espesor de pared grueso, ejemplo de piezas terminadas. (14)

Sus conclusiones fueron las siguientes:

El sistema de seguimiento láser para juntas de soldadura está bien establecido en la soldadura de pasos múltiples para estructuras de pared gruesa. Se ofrece beneficios significativos en términos de calidad y productividad. Hay dos enfoques principales, y la selección del mejor enfoque para una empresa en particular y la aplicación depende de muchos factores, incluyendo el volumen y la gama de la producción, el operador y los niveles de habilidad de mantenimiento, experiencia con la tecnología, apoyo a la gestión para avanzar con los nuevos métodos, así como la base de cálculo de ROI (Retorno de inversión, por sus siglas en inglés) (14).

CAPÍTULO 3

METODOLOGÍA

3.1 Diseño Experimental

Debido a que el recurso humano en CAT Acuña no ha sido capaz de lograr la repetitividad en el cumplimiento con los estándares de calidad, como muestran los estudios estadísticos que se han llevado a cabo en el proceso SAW, se requiere una evaluación exhaustiva de los efectos derivados de la correlación factor humano con la aparición de defectos.(Fig.3.1)

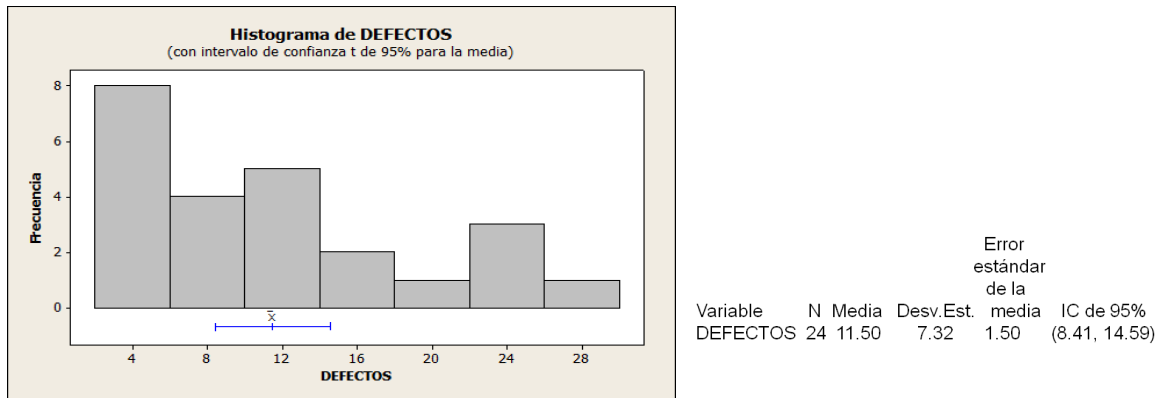


Fig. 3.1 Histograma de defectos en proceso de soldadura SAW en tapas de refuerzo de eje frontal.

Procesos de soldadura, al igual que la mayoría de los procesos de fabricación, consiste en el establecimiento de muchos parámetros de la máquina, y el rendimiento del producto es a menudo afectado por muchos factores. Para optimizar los procedimientos y definir cuáles son los factores más influyentes puede implicar muchos experimentos. Los procedimientos experimentales requieren un enfoque estructurado para lograr los resultados más fiables con desperdicio mínimo de tiempo y dinero. El diseño experimental, basado en principios estadísticos, se puede utilizar con gran efecto para dar una visión global de un proceso de fabricación mediante un reducido número de experimentos. La información obtenida se puede utilizar para optimizar un proceso y definir los parámetros que necesitan ser colocados bajo el máximo control para mantener la capacidad de repetición de un proceso. Un modelo matemático del proceso puede ayudar a predecir qué resultados se esperan cuando se cambian los parámetros. (13)

Se han realizado ya experimentos tratando de encontrar los parámetros óptimos para la aplicación del proceso SAW en las tapas de refuerzo del eje frontal.

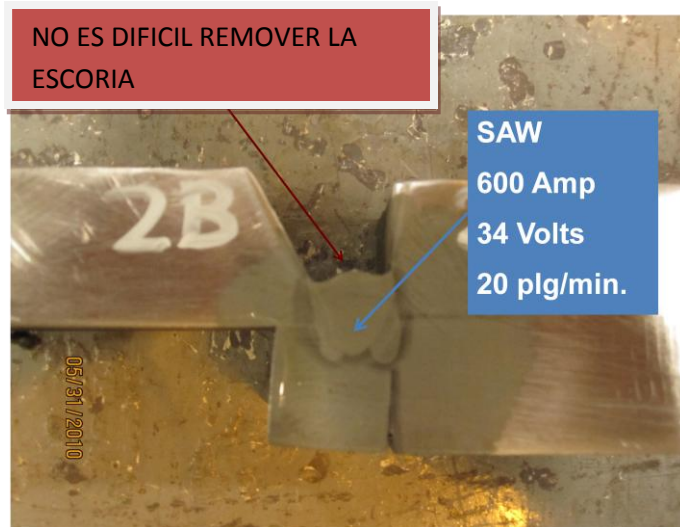


Fig. 3.2 Parámetros utilizados en las pruebas. (Bucyrus 2010)

Los parámetros óptimos fueron encontrados evaluando las propiedades obtenidas, sin embargo las discontinuidades siguen presentes en el proceso de soldadura por Arco Sumergido.

Se realizó una metalografía y mediante el microscopio óptico se pudieron observar las diferentes microestructuras presentes en el metal base, zona afectada por el calor y soldadura con los parámetros óptimos (Figura 3.3).

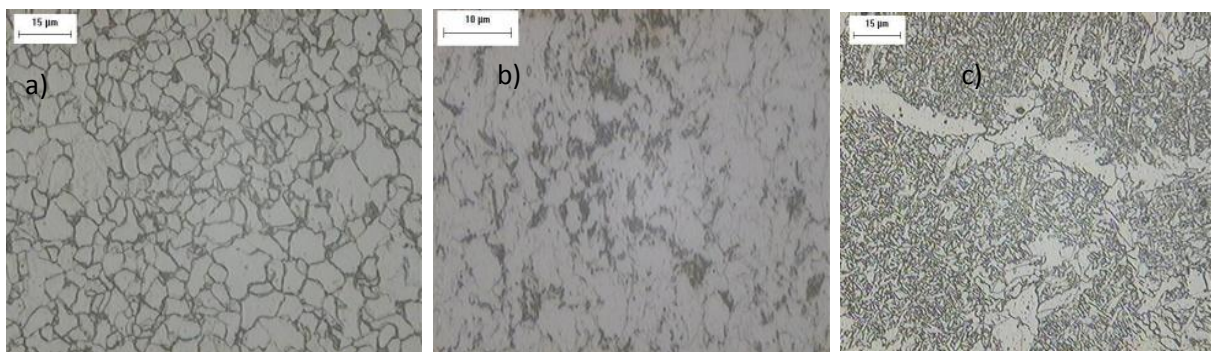


FIG.3.3 a) Material Base, 1000X, Ferrita-Perlita grano equiaxial, b) ZAC, 500 X, Ferrita refinada con trazas de perlita, c) ZF, 500X, Ferrita Alotriomórfica.

Un punto importante dentro de cualquier proyecto es conocer cuál sería el impacto de la solución sobre los gastos operativos, para esto se hizo un desglose de los gastos debido a los re trabajos en el eje frontal.

Tabla 3.1 Ahorros previstos eliminando los defectos en el Eje Frontal

AHORROS ELIMINANDO LOS DEFECTOS EN EL EJE FRONTAL							UNIDADES PREVISTAS POR AÑO			
N°	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	HORAS	UNIDAD	COSTO UNITARIO	SUB-TOTAL	2012	2013	2014	2015
1	HORAS DE RETRABAJO POR DEFECTO	12	1.84	EA	\$ 35.00	\$ 772.80	\$ 64,915.20	\$ 73,416.00	\$ 77,280.00	\$ 85,008.00
2	TIEMPO DE REINSPECCIÓN	1	1.5	EA	\$ 35.00	\$ 35.00	\$ 2,940.00	\$ 3,325.00	\$ 3,500.00	\$ 3,850.00
3	TIEMPO DE ESPERA PARA ENFRIAMIENTO	1	1.5	EA	\$ 35.00	\$ 52.50	\$ 4,410.00	\$ 4,987.50	\$ 5,250.00	\$ 5,775.00
4	CONSUMIBLES PARA SANEADO	12	N/A	EA	\$ 1.00	\$ 12.00	\$ 1,008.00	\$ 1,140.00	\$ 1,200.00	\$ 1,320.00
5	PREPARACION DEL EQUIPO DE SOLDAR	2	1.5	EA	\$ 35.00	\$ 105.00	\$ 8,820.00	\$ 9,975.00	\$ 10,500.00	\$ 11,550.00
6	REDUCCION DE HORAS DE SOLDADURA	1	7.2	EA	\$ 35.00	\$ 252.00	\$ 21,168.00	\$ 23,940.00	\$ 25,200.00	\$ 27,720.00
7	30% DE RE-RETRABAJO	4	2	EA	\$ 35.00	\$ 280.00	\$ 23,520.00	\$ 26,600.00	\$ 28,000.00	\$ 30,800.00
TOTAL COMP.						\$ 1,509.30	\$ 126,781.20	\$ 143,383.50	\$ 150,930.00	\$ 166,023.00



Fig. 3.4 Ahorros graficados eliminando los defectos en el eje frontal.

Para esta experimentación se utilizó el mismo material del producto en cuestión, un acero A633 el cual pertenece a la familia de los aceros HSLA (Alta resistencia baja aleación, por sus siglas en inglés) el cual es especialmente adecuado para aplicaciones a bajas temperaturas de -45° C y más altas donde

la tenacidad es mejor que la esperada en un material en condición de rolado cuando los niveles de resistencia son comparados [7].

Se propone simular las condiciones ideales para la trayectoria del equipo SAW utilizando un sistema mecanizado LE7 (Ver Fig.3.3)



Fig. 3.5 Sistema mecanizado para desarrollo experimental.

El material de aporte es un Lincoln LA-100 con un fundente 880M.

3.1.2 Simulación (SimulationWorks, 2011)

Mediante las herramientas de simulación por computadora se representan algunas características que demuestran la importancia de controlar adecuadamente el proceso de soldadura para evitar la aparición de defectos (20). La figura 3.5 muestra cuales son las áreas de mayor concentración de esfuerzos en el ensamble, las cuales coinciden con la posición de los defectos encontrados en el proceso de fabricación actual.

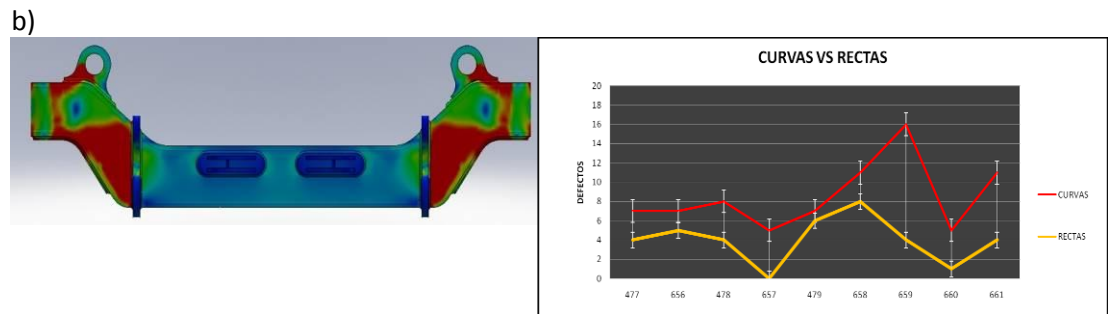
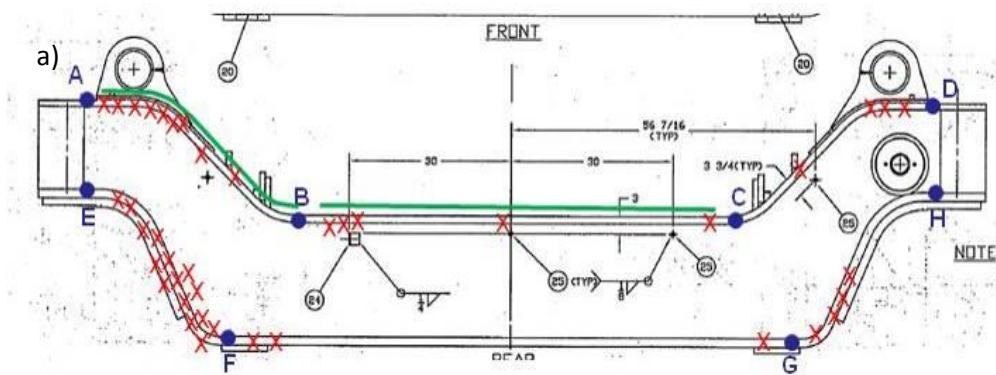
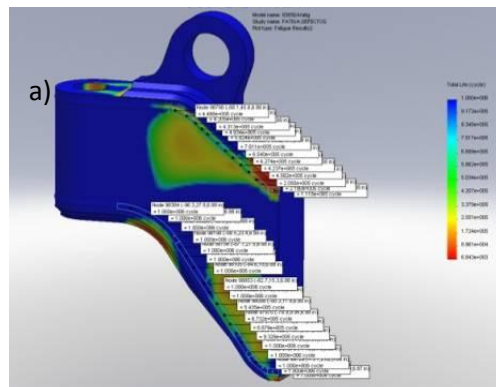


Fig. 3.6 a) Áreas de mayor concentración de esfuerzos en el ensamble del eje frontal. b) Aparición de discontinuidades en el proceso actual (x rojas).

Una vez encontradas las áreas de mayor concentración de esfuerzos, se procedió a hacer una simulación del efecto de algunos defectos en la unión de las tapas de refuerzo del eje considerando solo una parte del modelo para simplificar su solución. El modelo fue preparado en dos configuraciones distintas, con defectos (simulando una falta de fusión en la soldadura) y sin defectos.



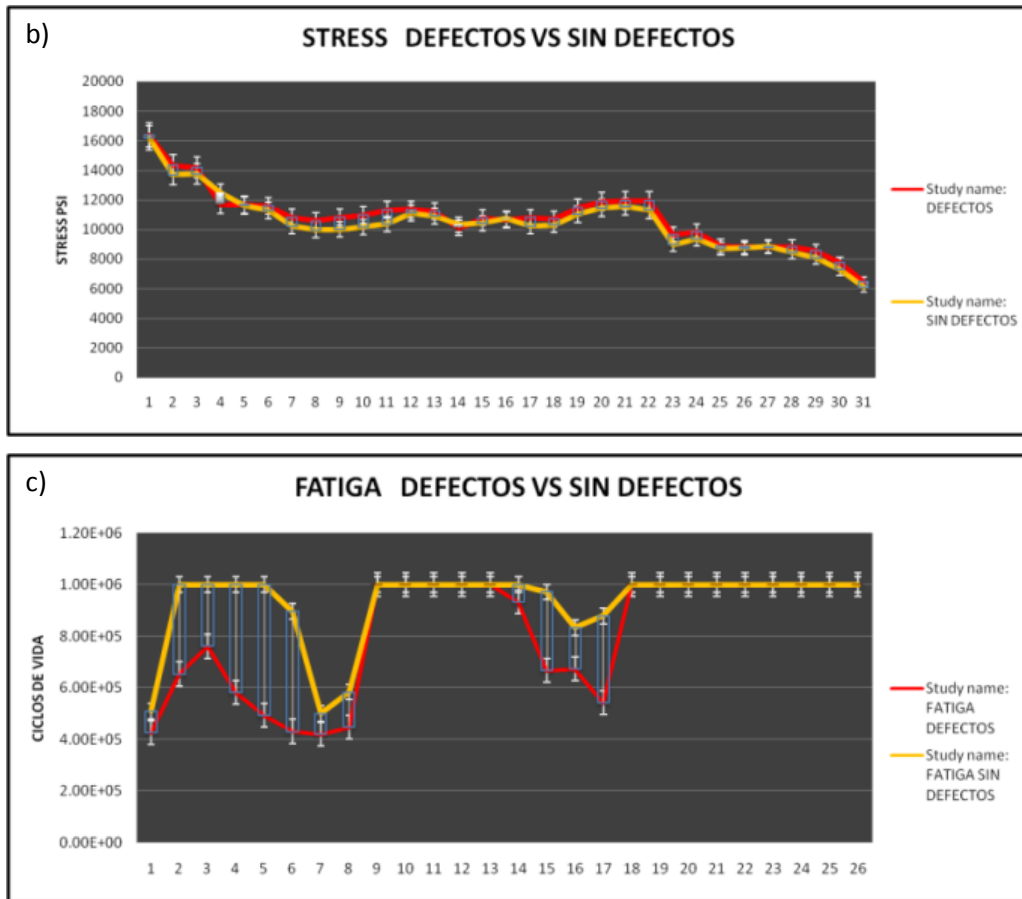


Fig. 3.7 a) Sensores de estrés y fatiga en unión soldada de tapas de refuerzo. b) Efecto de los defectos VS sin defecto en análisis estático. c) Efecto de los defectos VS sin defectos en los ciclos de vida.

Debido a la geometría de la pieza se dedujo que la concentración de discontinuidades en las zonas curvas se debe principalmente a que se vuelve más complejo manipular el tractor SAW manualmente, aunado a esto, la posición de la pieza al momento de soldar no permite que la junta de bisel sencillo (figura 3.8a) se coloque en posición plana para que el proceso se realice en las condiciones recomendadas [6], se realizó un análisis térmico transitorio para analizar la distribución de temperaturas comparando la junta actual con una junta en v propuesta como posible solución (figura 3.8b).

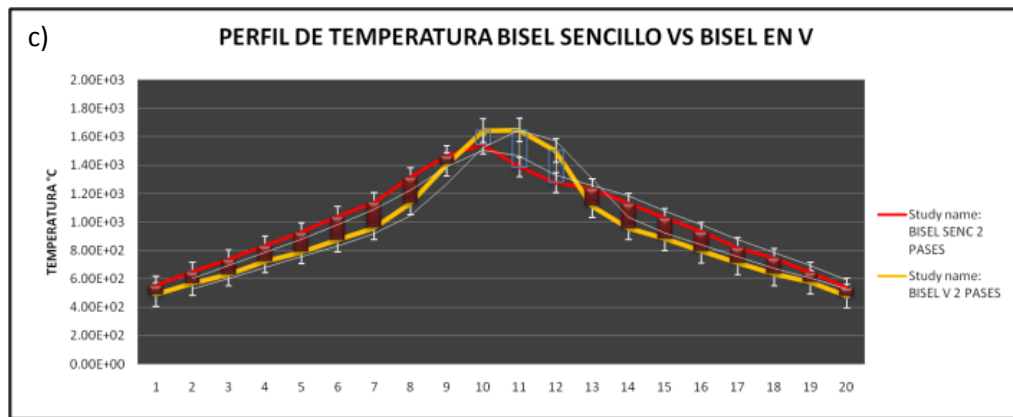
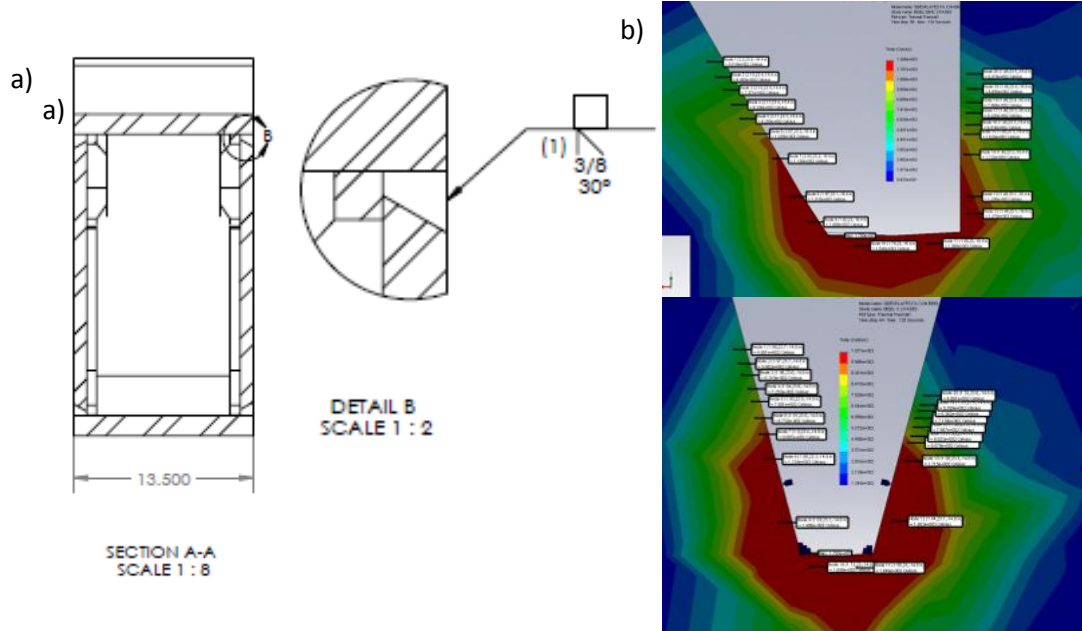


Fig. 3.8 a) Diseño actual de junta de soldadura (bisel sencillo). b) Distribución de temperaturas entre bisel sencillo VS bisel en V a 132seg.

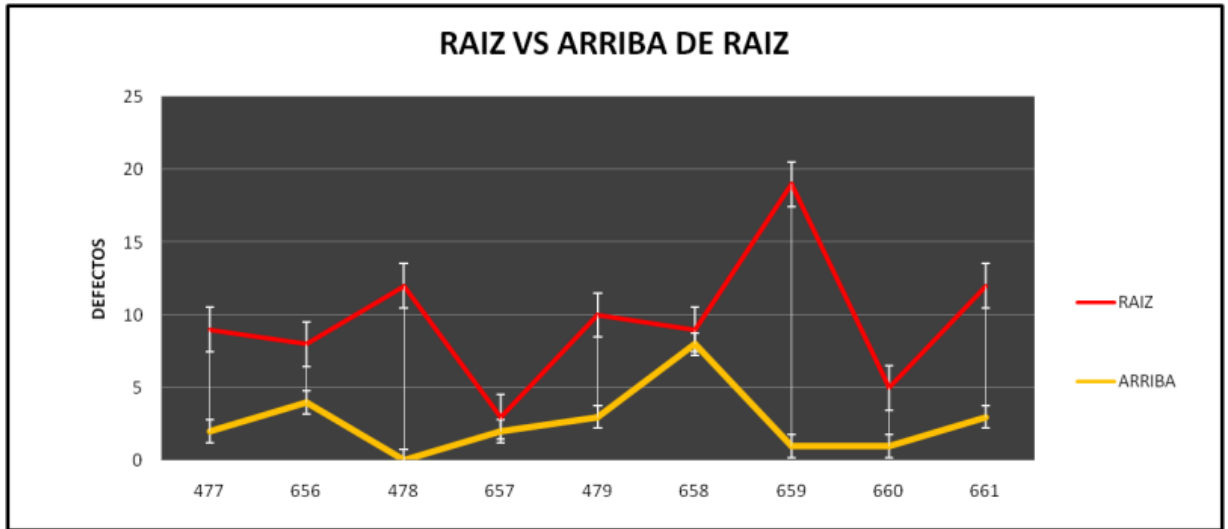


Fig. 3.9 Relación en la presencia de defectos entre la raíz y el resto de la junta (EL 75% DE LOS DEFECTOS APARECEN EN LA RAIZ)

3.3 Diseño experimental 2^k

Un diseño factorial fue realizado con el fin de analizar las interacciones entre el proceso manual vs automático, así como las interacciones con un nuevo diseño de junta y la velocidad de avance (Figura 3.10).

Tabla 3.2 Diseño de experimentos 2^k

OrdenEst	Orden Corrida	PtCentral	Bloques	A	B	C	A	B	C
							MANUAL VS AUTOMATIC	SINGLE BEVEL VS V BEVEL	VA 1 VS VA 2
7	1	1	1	-1	1	1	AUTOMAT.	BISEL SENC.	VA 1
4	2	1	1	1	1	-1	MANUAL	BISEL SENC.	VA 2
3	3	1	1	-1	1	-1	AUTOMAT.	BISEL SENC.	VA 2
1	4	1	1	-1	-1	-1	AUTOMAT.	BISEL V	VA 2
6	5	1	1	1	-1	1	MANUAL	BISEL V	VA 1
8	6	1	1	1	1	1	MANUAL	BISEL SENC.	VA 1
2	7	1	1	1	-1	-1	MANUAL	BISEL V	VA 2
5	8	1	1	-1	-1	1	AUTOMAT.	BISEL V	VA 1

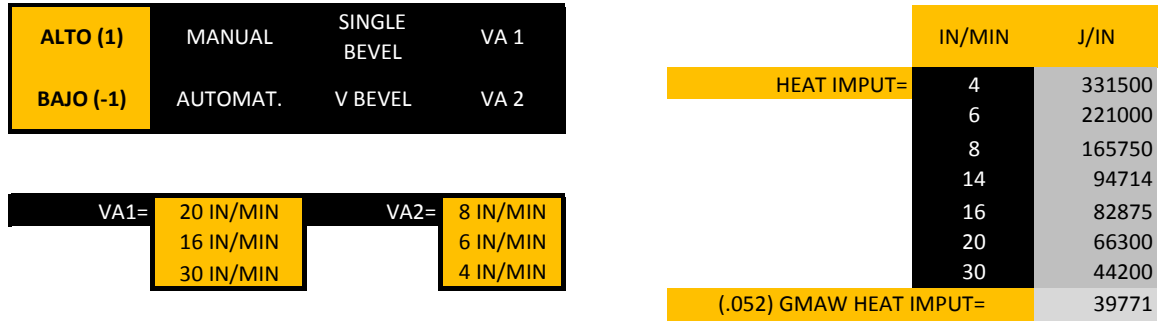


Fig. 3.10 Diseño 2k de 3 factores, 2 niveles, para análisis de interacciones entre factores.

Se fabricaron 2 cajones con 4 juntas cada uno completando 4 juntas de bisel sencillo y 4 juntas en V, las especificaciones fueron tomadas de AWS D.1.1 [22]. (Figura 3.11 y 3.12)

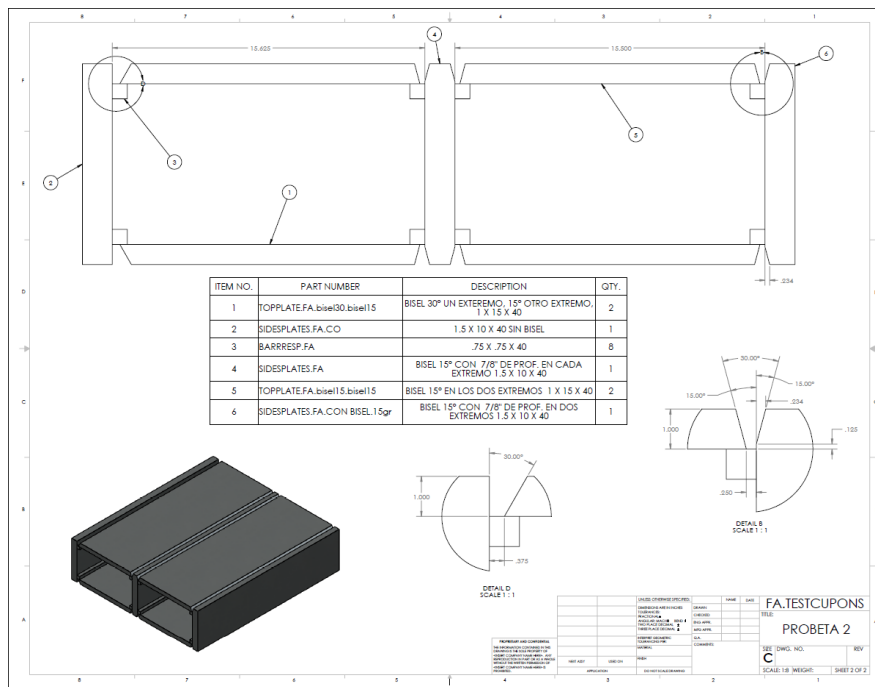


Fig. 3.11 Plano de probetas para desarrollo del diseño de experimentos

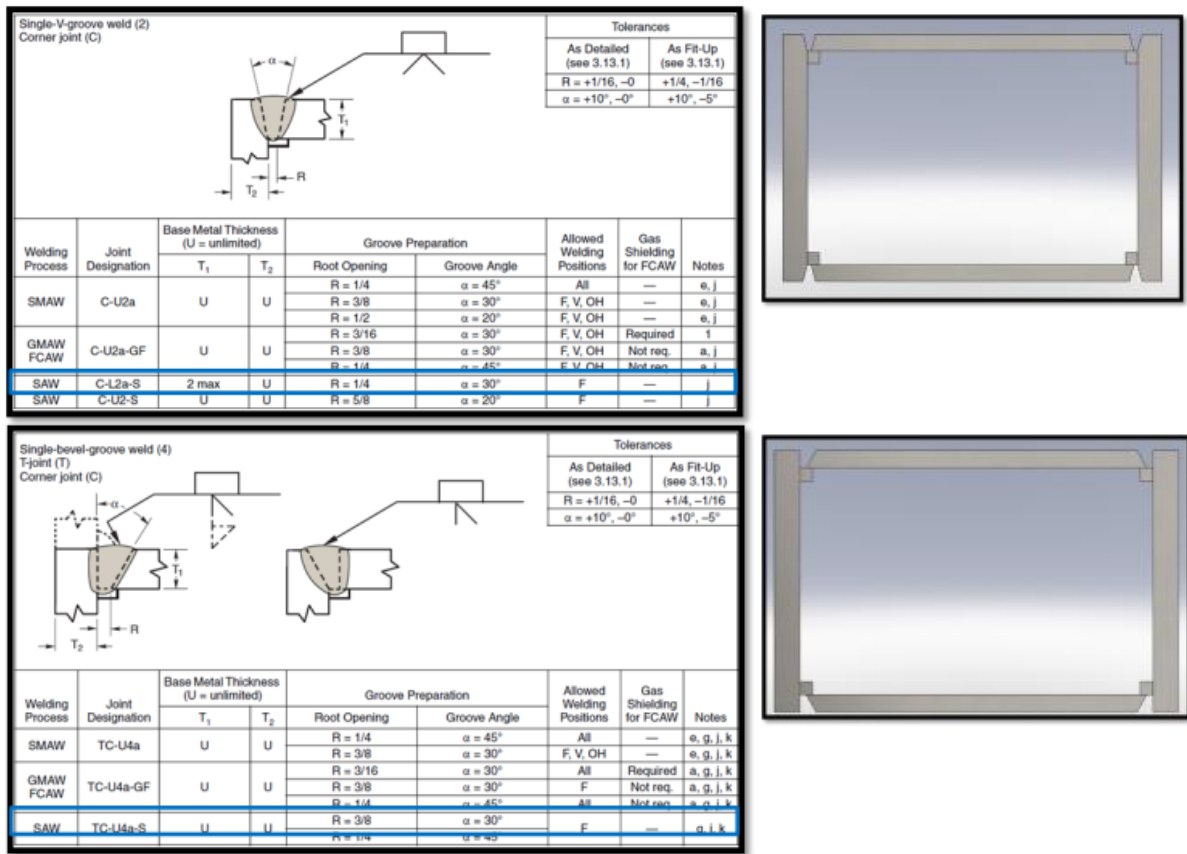


Fig. 3.12 Diseño de junta para desarrollo experimental acorde a AWS (Sociedad Americana de Soldadura, por sus siglas en inglés)

Para esto, se diseñó un sistema automático con la asistencia de sensores inductivos de 5mm y 6 mm, los cuales son relativamente compactos, robustos y no se ven afectados por la radiación del arco ni las temperaturas generadas en la posición de censado en esta aplicación, se han utilizado con éxito para GMAW en aplicaciones de seguimiento de junta a tope, traslape y filetes en aplicaciones de Robots soldadores [2], se pretende comprobar su utilidad en un sistema SAW.

Para el movimiento de la antorcha se colocó un actuador electromecánico controlado mediante dos relevadores los cuales son accionados cuando $dS1 > 6\text{mm}$ y $dS2 < 5\text{mm}$, donde $dS1$ y $dS2$ representan la distancia del sensor a la pieza de trabajo (Figura 3.13).

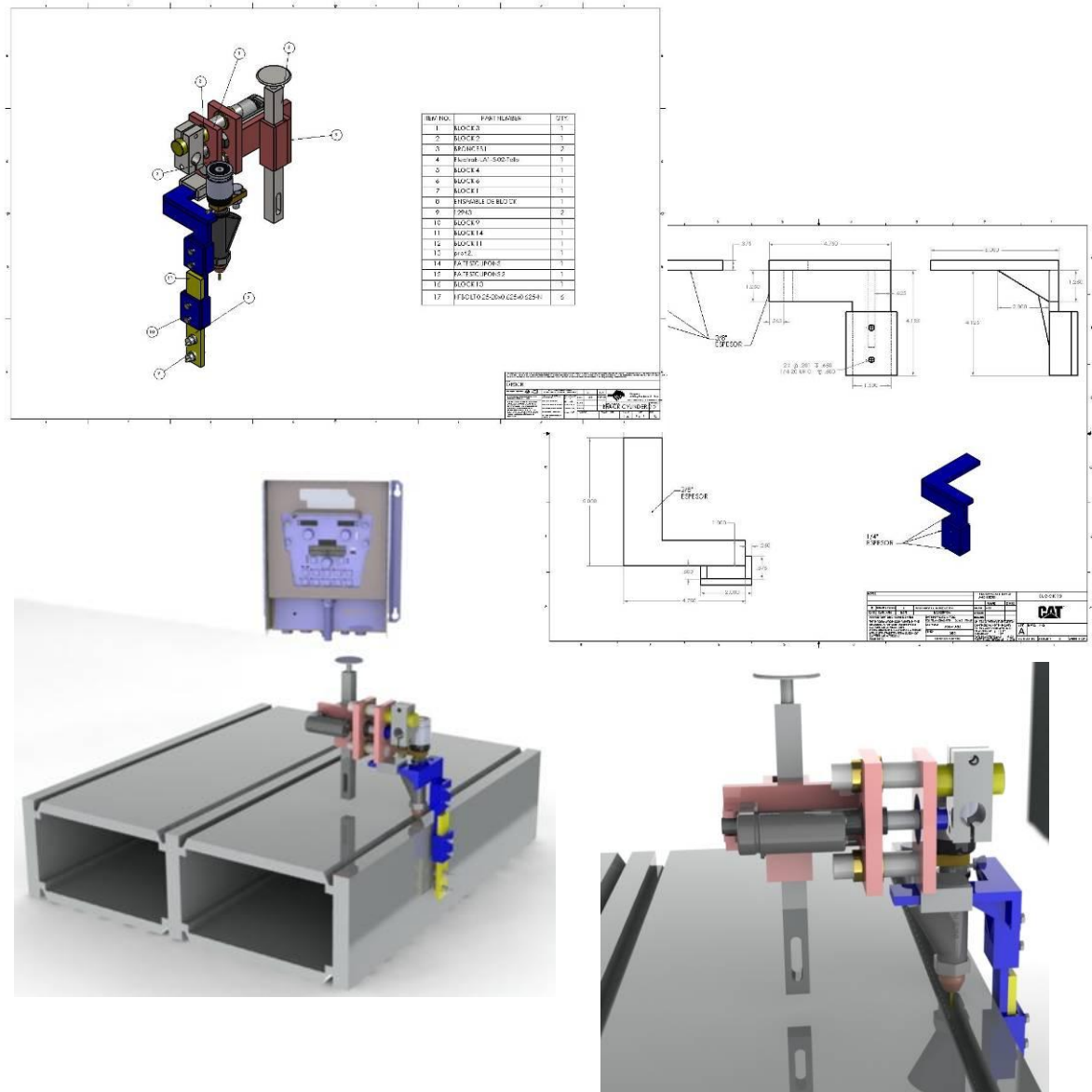


Fig. 3.13 Diseño de dispositivo automático para seguimiento de junta.

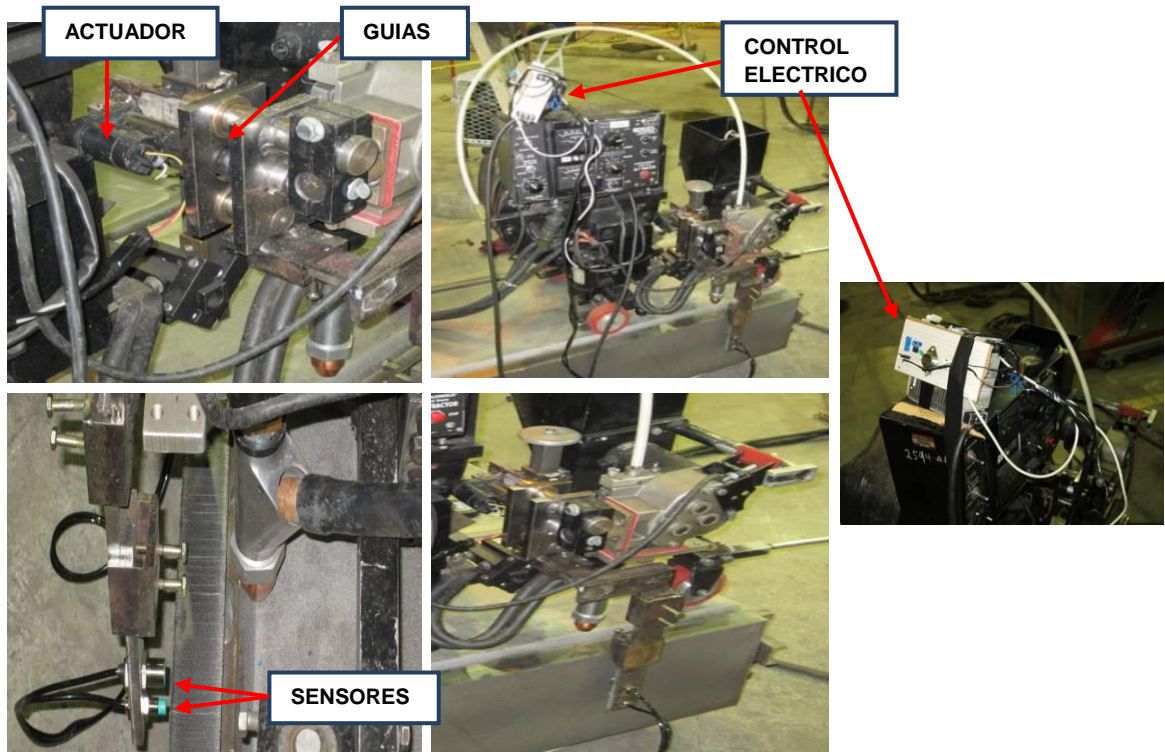


Fig. 3.14 Sistema automático fabricado.

Para las corridas manuales se definió que la trayectoria debía oscilar $3/8''$ a partir del centro para simular la falta de control en la trayectoria por parte del operador. (Figura 3.14)

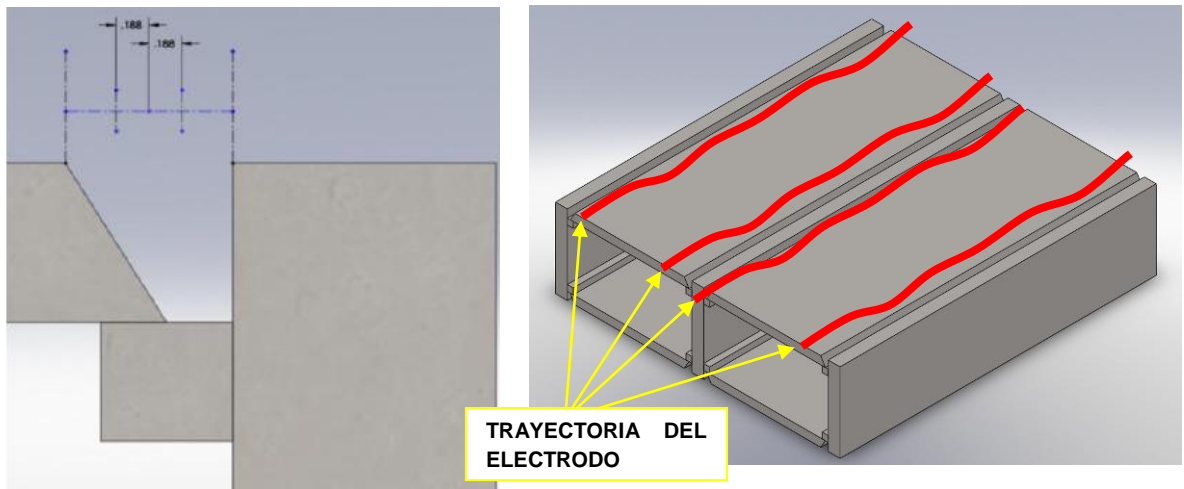


Fig. 3.15 Simulación de trayectoria manual.

CAPÍTULO 4

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En las gráficas se muestra que en condiciones de cargas estáticas no existe un aumento considerable en los esfuerzos sobre la zona soldada, sin embargo, en el análisis de fatiga existe una reducción de hasta un 25% en los ciclos de vida en la zona donde la condición de falta de fusión fue simulada. (Figura 3.6).

Mediante el análisis térmico transitorio se pudo observar que existe una distribución de temperatura más uniforme con el diseño de la junta en V, sin embargo, este tipo de análisis son complejos y es necesario verificar si existe una correlación con la aparición de falta de fusión en la soldadura.

En la tabla 4.1 se muestran los resultados del diseño de experimentos seguido por la gráfica de interacciones obtenida. También, se muestran los resultados con la mejor combinación que permite garantizar la calidad de salida, así como optimizar el tiempo de proceso, disminuyendo el tiempo de soldadura.

Tabla 4.1 Valores obtenidos durante el desarrollo experimental.

PROBETA 1	PS1	PS 2	PS 3	PS 4	PS 5	PS 6	PS 7	PS 8	PS 9	UT	TIME
TEMP INIC.	50	120	150	190	130	180	30	80	130		
VEL. AVAN.	22	16	16	16	16	15	15	15	15		
VOLTS	34	34	34	34	34	34	34	34	34		
AMP	650	650	650	650	650	650	650	650	650		
	166-167	168-169		172		173-174	177	178	179-180	2	22.19
	276										
PROBETA 2	PS1	PS 2	PS 3	PS 4	PS 5	PS 6	PS 7	PS 8	PS 9	UT	TIME
TEMP INIC.	50			190	130	180					
VEL. AVAN.	16	15	13	13	11	11					
VOLTS	34	34	34	34	34	34					
AMP	650	650	650	650	650	650					
	192-197		208	209-211						11	27.34
	270-275										
PROBETA 3	PS1	PS 2	PS 3	PS 4	PS 5	PS 6	PS 7	PS 8	PS 9	UT	TIME
TEMP INIC.	50	120	150	190	130						
VEL. AVAN.	18	12	12	12	12						
VOLTS	34	34	34	34	34						
AMP	650	650	650	650	650						
	184-185	186-187			188-191					0	15.15
PROBETA 4	PS1	PS 2	PS 3	PS 4	PS 5	PS 6	PS 7	PS 8	PS 9	UT	TIME
TEMP INIC.											
VEL. AVAN.	12	11	11	11	9	9					
VOLTS											
AMP											
HEAT IMPUT										0	22.86
PROBETA 5	PS1	PS 2	PS 3	PS 4	PS 5	PS 6	PS 7	PS 8	PS 9	UT	TIME
TEMP INIC.	60	70	140	180	180						
VEL. AVAN.	20	16	16	16	15						
VOLTS	34	34	34	34	34						
AMP	650	650	650	650	650						
	fotos: 151-153			154-155	159					3	12.05
	277										
PROBETA 6	PS1	PS 2	PS 3	PS 4	PS 5	PS 6	PS 7	PS 8	PS 9	UT	TIME
TEMP INIC.	40	85	150	170	190	215	215				
VEL. AVAN.	18	17	16	16	14	14	14				
VOLTS	34	34	34	34	34	34	34				
AMP	650	650	650	650	650	650	650				
	216-227		228-232		236-240	241-242				3	17.98
PROBETA 7	PS1	PS 2	PS 3	PS 4	PS 5	PS 6	PS 7	PS 8	PS 9	UT	TIME
TEMP INIC.	60	70	140	180	180	230					
VEL. AVAN.	12	11	11	11	9	9					
VOLTS	34	34	34	34	34	34					
AMP	650			650	650	650					
		fotos: 148-150								0	22.86
PROBETA 8	PS1	PS 2	PS 3	PS 4	PS 5	PS 6	PS 7	PS 8	PS 9	UT	TIME
TEMP INIC.	40	85	150	170	190						
VEL. AVAN.	21	16	16	16	15						
VOLTS	34	34	34	34	34						
AMP	650	650	650	650	650						
			fotos: 148-150							0	11.90

Algunas inconsistencias fueron detectadas durante el proceso tales como, porosidad cilíndrica, grietas y faltas de fusión principalmente, sin embargo donde se localizaron estas indicaciones no se encontró nada al final del proceso cuando la inspección por ultrasonido fue realizada. (Ver figura 4.1, 4.2 y 4.3)

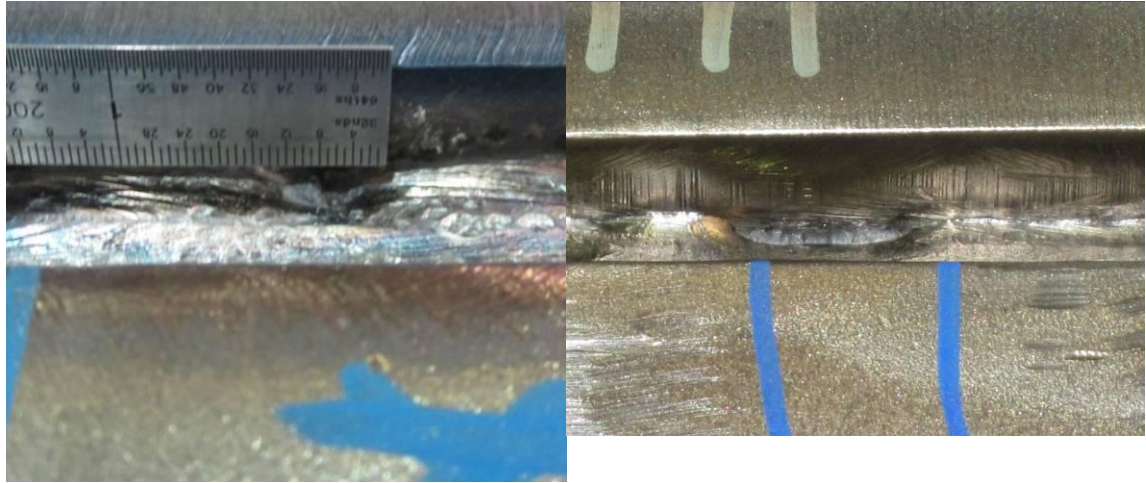


Fig. 4.1 Falta de fusión en tercer pase de Arco sumergido por falta de control en la trayectoria.

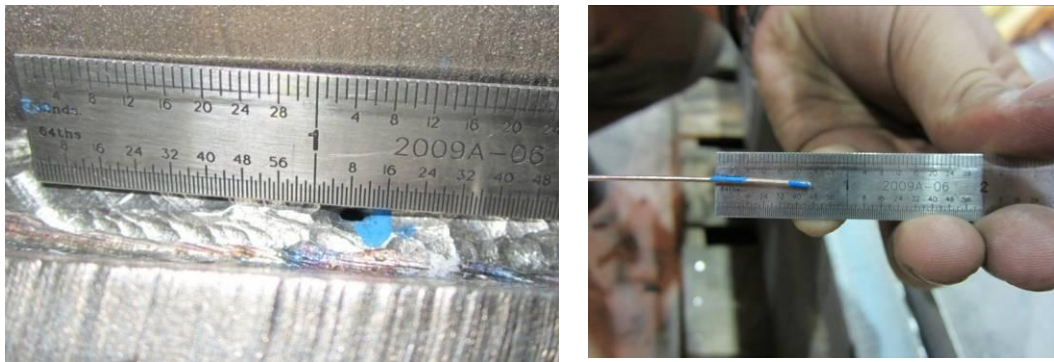


Fig. 4.2 Porosidad cilíndrica debida a contaminación en el fundente.

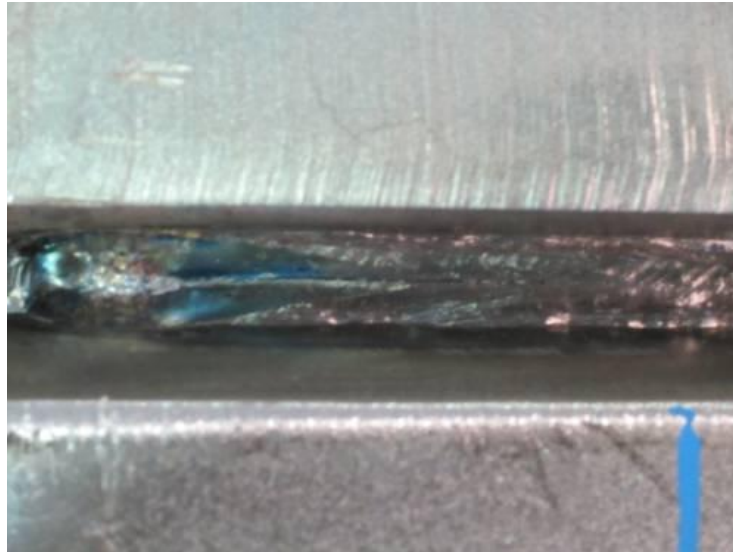


Fig. 4.3 Grieta debida a la falta de precalentamiento y abertura de raíz muy cerrada.

La tabla 4.2 muestra los resultados obtenidos durante la experimentación, longitud de defectos, número de pases y tiempo total expresan las características buscadas en esta investigación, tales como la disminución de las discontinuidades presentes en el proceso así como la reducción del tiempo de proceso.

Tabla 4.2 Longitud de defectos, N° de pases y tiempo de soldadura resultantes.

PROBETA	A		B		C		LONGITUD DEFECTOS (IN)	N° DE PASES	TIEMPO TOTAL (MIN)
	MANUAL VS AUTOMATICO		BISEL SENCILLO VS BISEL V		VA 1 VS VA 2				
P1	AUTOMAT.		BISEL SENC.		VA 1		2	7	22.19
P2	MANUAL		BISEL SENC.		VA 2		11.25	6	27.34
P3	AUTOMAT.		BISEL SENC.		VA 2		0	5	15.15
P4	AUTOMAT.		BISEL V		VA 2		0	6	22.86
P5	MANUAL		BISEL V		VA 1		2.5	5	12.05
P6	MANUAL		BISEL SENC.		VA 1		3.375	7	17.98
P7	MANUAL		BISEL V		VA 2		0	6	22.86
P8	AUTOMAT.		BISEL V		VA 1		0	5	11.90

Mediante la gráfica de interacciones mostrada en la figura 4.4 se muestra en impacto de los factores sobre los resultados obtenidos en la prueba.

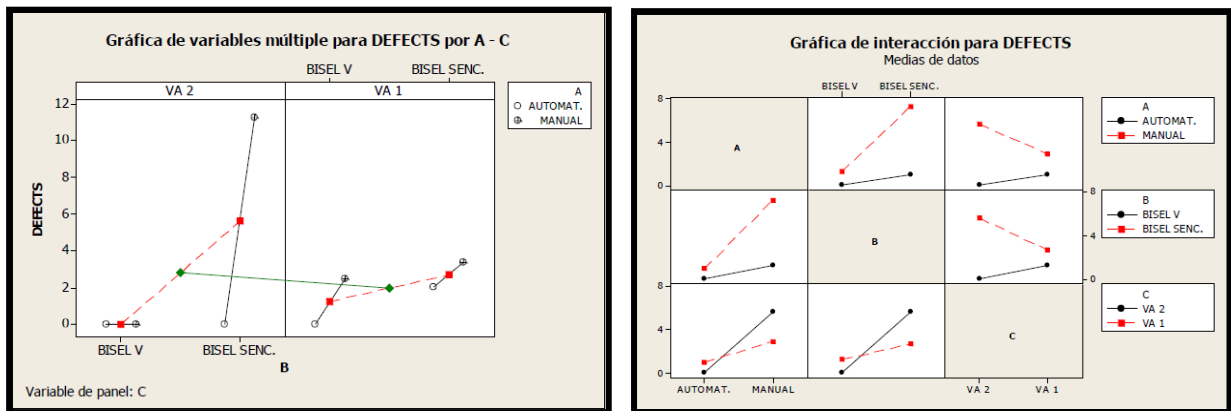


Fig. 4.4 Gráfica de interacciones entre factores

La tabla 4.3 muestra el proceso óptimo con la combinación de factores que da el mejor resultado en disminución de discontinuidades y mejora en el tiempo de proceso, el cual se ve reflejado en un ahorro significativo en costo cumpliendo con las expectativa mostrada en la figura 3.3 previamente mostrada en el Capítulo 3.

Tabla 4.3 Proceso óptimo

PROCESO PROPUESTO, BISEL V, AUTOMATICO 912.24 PULGADAS DE SOLDADURA TOTALES									
ACT	PS1	PS 2	PS 3	PS 4	PS 5	PS 6	PS 7	UT	TIME
VEL. AVAN.	20	16	16	16	15				
VOLTS	34	34	34	34	34				
AMP	650	650	650	650	650				
HEAT IMPUT	66300	82875	82875	82875	88400			0	274.77
PROMEDIO DE HI	80665.00		KJ/MIN						
MINUTOS POR PASE (AVG)	13.73855422		MIN						
HORAS POR ENSAMBLE	4.579518072		HOURS						

CONCLUSIONES

El diseño de experimentos se ha desarrollado y con los resultados se concluye que el bisel V es menos sensible a la falta de control sobre la trayectoria, la junta de bisel sencillo muestra claramente cómo su configuración es sensible a generar faltas de fusión e inclusiones de escoria. La velocidad de avance no es de gran importancia en la generación de discontinuidades, pero es importante mantenerse dentro del rango del WPS (especificación de procedimiento de soldadura, por sus siglas en inglés) por el alto impacto en la cantidad de aporte de calor que pasa a través de la pieza de trabajo. El sistema automático en combinación con el nuevo diseño de junta, demuestran que son capaces de garantizar la calidad en la soldadura, además representan ahorros en tiempo optimizando la cantidad de soldadura que es aplicada a la pieza de trabajo. También fue concluyente que el control de las variables esenciales como voltaje, amperaje, velocidad de avance, temperatura de precalentamiento así como cuidados en el fundente, permite evitar la generación de defectos tales como grietas y poros.

Hablando específicamente de la automatización de procesos, se demuestra que es factible desarrollar controles automáticos de bajo costo que impacten en la calidad del producto y en la productividad, sin embargo estas opciones deben ser evaluadas de manera profunda para garantizar que permanezcan integras durante su uso dentro de un proceso productivo. También se demuestra con la combinación de los fundamentos teóricos, investigaciones y prácticas experimentales, la mejor opción hasta el momento en el control de una trayectoria de soldadura es que esta sea llevada a cabo mediante seguimiento en tiempo real de la configuración de la junta a soldar, esto debido principalmente a que las simulaciones fuera de línea plantean escenarios idóneos los cuales son difíciles de alcanzar en la realidad de un proceso de soldadura.

También se demuestra como las simulaciones de procesos térmicos y esfuerzos mecánicos ayudan a crear escenarios que abren una mejor perspectiva al momento de profundizar en un problema para llegar a su solución, estas herramientas nos permiten de manera visual y con baja complejidad analizar fenómenos que permitan enfocarnos a que la experimentación se haga en el fenómeno de mayor importancia que atiende al problema que se pretende solucionar.

BIBLIOGRAFÍA

- 1.- Pires J.N., Loureiro A., Bolmsjo G. (2006). *Welding Robots, Technology, Systems Issues and Applications*; Springer; Coimbra, Portugal.
- 2.- Norrish J., (2006). *Advanced Welding Processes Technologies and process control*. The institute of Materials, Minerals & Mining. Cambridge, England
- 3.- Ahmed N., (2005). *New developments in advanced welding*. The institute of Materials, Minerals & Mining. Cambridge, England.
- 4.- AWS; (2002); *Welding-Related Expenditures, Investments, and Productivity Measurement in U.S. Manufacturing, Construction, and Mining Industries*.
- 5.- Elise Lavoue. "ESI Group announces WELD PLANNER" Documento web (2009) <http://www.esi-group.com/corporate/news-media/press-releases/2008-english-pr/esi-group-announces-weld-planner> Consultado el 3-AGO-09
- 6.- *ASM International Handbook Committee*; (1998). *Metals Handbook Desk Edition, Second Edition* ; USA
- 7.- Tobias Rosado¹, Pedro Almeida¹, Inês Pires^{1,2}, Rosa Miranda^{2,3(*)} and Luísa Quintino^{1,2} ;(2008); *INNOVATIONS IN ARC WELDING*; 5º Congresso Luso-Moçambicano de Engenharia; Brasil.
- 8.- GLáser A., (2009), *Robotics, How to Implement The right System For Your Plant*. Industrial Press, Inc. New York.

- 9.- Tzyh J., Zhou C.; (2004). *Robotic Welding Intelligence and Automation*. Springer ; Shanghai Jiao Tong University Institute of Welding Engineering, Shanghai.
- 10.- GORDON McCOMB (2001). *THE ROBOT BUILDER'S*. McGraw-Hill. United States.
- 11.- A. Barrientos, L. F. Peñin, C. Balaguer, R. Aracil. (1997) *Fundamentos de robótica*. Mc Graw Hill
- 12.- Raúl Martínez Juárez, Richar Suni Llanos, Renzo Martínez Fajardo (2009). *Modelado Y Control Dinámico De Un Manipulador Robótico Cartesiano De 3 Grados De Libertad*. UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA - INGENIERÍA MECATRÓNICA; Lima, Perú.
- 13.- Ian Jones (2008). *Experimental Design*. <http://www.twi.co.uk/content/ksiaj002.html>. The welding Institute.
- 14.- Dr R J Beattie (2004). *APPLICATIONS OF LÁSER SEAM TRACKING IN WELDING THICK WALL VESSELS*. Meta Vision Systems Ltd, UK
- 15.- Zengwen Xiao(2010). *RESEARCH ON A TRILINES LÁSER VISION SENSOR FOR SEAM TRACKING IN WELDING* School of mechanical Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing, SPRINGER
- 16.- Shigeo OYAMA, Tadashi KASUYA, Kouichi SHINADA (2007). *HIGH-SPEED ONE-SIDE SUBMERGED ARC WELDING PROCESS "NH-HISAW"* Nippon Steel Technical Report N°95

- 17.- Dhas, J.,E.,R. and Kumanan, S.(2010). *WELD QUALITY PREDICTION OF SUBMERGED ARC WELDING PROCESS USING A FUNCTION REPLACING HYBRID SYSTEM*. Department of Mechanical Engineering, Noorul Islam University, Thuckalay, India.
- 18.- *Submerged Arc Welding Guide*; (2008). The Lincoln electric Company; USA
- 19.- Hamid Reza Ghazvinloo (2010). *Experimental Study on Bead Width Changes of St 52-2 Carbon Steel Welds Produced by Submerged Arc Welding Process*. Islamic Azad University of Semnan Branch, Semnan, Iran
- 20.- Lundback A. (2010). *Modeling and Simulation of Welding and Metal Deposition*; Universitetstryckeriet, Luleå, Sweden.
- 21.- Goldak J. A. (2005). *Computational Welding Mechanics*; Springer; USA
- 22.- *Structural Welding Code-Steel D.1.1*; (2006). American Weld

LISTADO DE FIGURAS

- Fig. 2.1** Soldadura por arco sumergido (SAW, por sus siglas en inglés)
- Fig. 2.2** Efecto de la variación de corriente sobre la forma del cordón. (18)(19)
- Fig. 2.3** Efecto de la variación de velocidad de avance sobre la forma del cordón. (18)(19)
- Fig. 2.4** Efecto del tamaño del electrodo sobre la forma del cordón.
- Fig. 2.5** Efecto del voltaje sobre la forma del cordón. (18)(19)
- Fig. 2.6** Efecto de las variables del proceso en la tasa de depósito.
- Fig. 2.7** a) Apariencia del cordón de soldadura después de ser aplicada con 4 electrodos. B) Configuración de los 4 electrodos de Arco Sumergido.
- Fig. 2.8** a) Comparación en el incremento de la velocidad entre el proceso ordinario y el de 4 electrodos. B) Comparación de microestructuras encontradas entre los dos procesos, Ferrita alotriomórfica con trazas de ferrita en ambos procesos aunque presenta una mayor concentración de ferrita alotriomórfica en el proceso de 4 electrodos. C) Cumulo de distorsión en milímetros comparando los diferentes procesos.
- Fig. 2.9** Probetas obtenidas del diseño de experimentos
- Fig. 2.10** Comparación de ancho del cordón entre valores predichos y valores obtenidos
- Fig. 2.11** Ejemplo de antorcha de soldadura Tándem

- Fig. 2.12** Ejemplo de distribución de calor mediante software de análisis de elementos finitos
- Fig. 2.13** Software de simulación de secuencias de soldadura y distorsión por calor (5)
- Fig. 2.14** Robot Soldador
- Fig. 2.15** Representación esquemática de la pistola de soldar híbrida para robot soldador (3)
- Fig. 2.16** Configuraciones típicas de Robots soldadores.
- Fig. 2.17** Robot manipulador cartesiano
- Fig. 2.18** Robot Soldador con equipo de control
- Fig. 2.19** WeldX System. www.tietronix-optics.com Sistema de visión para seguimiento del charco de soldadura de manera remota
- Fig. 2.20** Línea de producción FrontAxle Trucks con modelación de Robot Soldador. *Michel Cabodevila* (2009)
- Fig. 2.21** Ejemplo de programación fuera de línea para producción de chasis Volvo
- Fig. 2.22** Parámetros utilizados en el proceso Tándem en casa pase de soldadura mediante la aplicación por un robot soldador
- Fig. 2.23** Comparativa de procesos de soldadura, amperaje vs tasa de depósito
- Fig. 2.24** Principio de triangulación
- Fig. 2.25** Sistema Láser en una unión de placas de espesor de pared grueso
- Fig. 2.26** Sistema Láser en una unión de placas de espesor de pared grueso, ejemplo de piezas terminadas.
- Fig. 3.1** Histograma de defectos en proceso de soldadura SAW en tapas de refuerzo de eje frontal.

- Fig. 3.2** Parámetros utilizados en las pruebas.(Bucyrus 2010)
- Fig. 3.3** a) Material Base, 1000X, Ferrita-Perlita grano equiaxial, b) ZAC, 500 X, Ferrita refinada con trazas de perlita, c) ZF, 500X, Ferrita Alotriomórfica
- Fig. 3.4** Ahorros graficados
- Fig. 3.5** Sistema mecanizado para desarrollo experimental
- Fig. 3.6** a) Áreas de mayor concentración de esfuerzos en el ensamble del eje frontal. b) Aparición de discontinuidades en el proceso actual (x rojas)
- Fig. 3.7** a) Sensores de estrés y fatiga en unión soldada de tapas de refuerzo. b) Efecto de los defectos VS sin defecto en análisis estático. c) Efecto de los defectos VS sin defectos en los ciclos de vida
- Fig. 3.8** a) Diseño actual de junta de soldadura (bisel sencillo). b) Distribución de temperaturas entre bisel sencillo VS bisel en V a 132seg
- Fig. 3.9** Relación en la aparición de defectos entre la raíz y el resto de la junta (EL 75% DE LOS DEFECTOS APARECEN EN LA RAÍZ)
- Fig. 3.10** Diseño 2k de 3 factores, 2 niveles, para análisis de interacciones entre factores
- Fig. 3.11** Plano de probetas para desarrollo del diseño de experimentos
- Fig. 3.12** Diseño de junta para desarrollo experimental acorde a AWS (Sociedad Americana de Soldadura, por sus siglas en ingles)
- Fig. 3.13** Diseño de dispositivo automático para seguimiento de junta
- Fig. 3.14** Sistema automático fabricado
- Fig. 3.15** Simulación de trayectoria manual
- Fig. 4.1** Falta de fusión en tercer pase de Arco sumergido por falta de control en la trayectoria
- Fig. 4.2** Porosidad cilíndrica debida a contaminación en el fundente

Fig. 4.3 Grieta debida a la falta de precalentamiento y abertura de raíz muy cerrada

Fig. 4.4 Gráfica de interacciones entre factores

LISTADO DE TABLAS

Tabla 2.1 Propiedades mecánicas y composición química del acero A633

Tabla 3.1 Ahorros previstos eliminando los defectos en el Eje Frontal

Tabla 3.2 Diseño de experimentos 2^k

Tabla 4.1 Valores obtenidos durante el desarrollo experimental

Tabla 4.2 Longitud de defectos, N° de pases y tiempo de soldadura resultantes

Tabla 4.3 Proceso óptimo

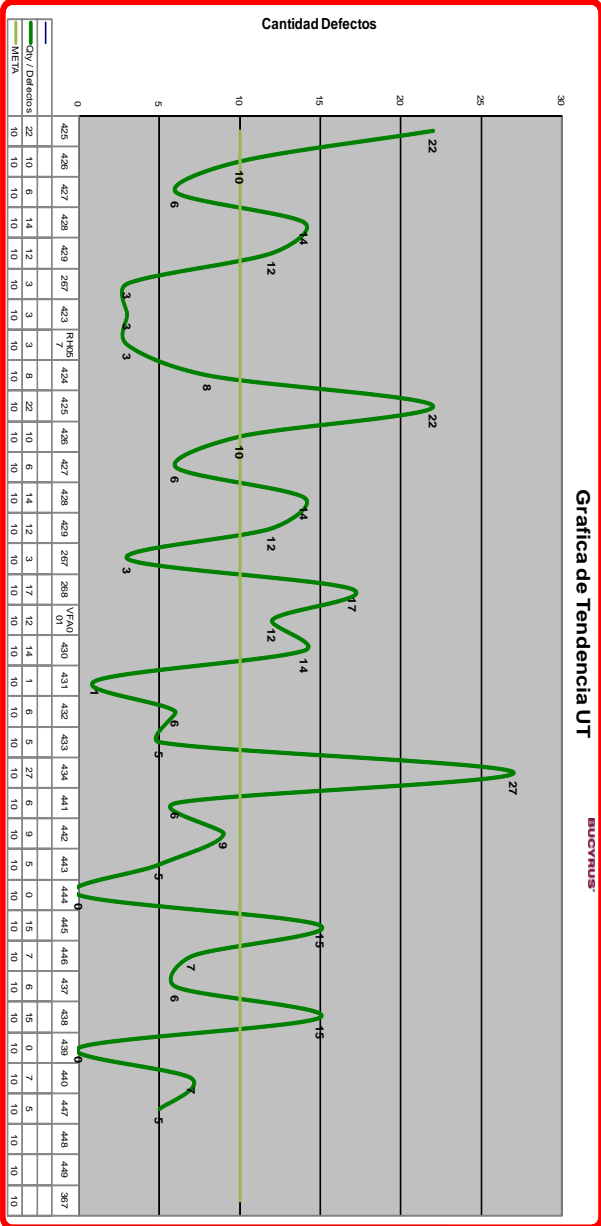
Anexo 1

Defectos por Unidad Front Axle

NIS	Modelo	CV / Distancia	MEJA	Tiempo de entrega	Fecha
425	4400	22	10		
426	4400	10	10		
427	4400	10	10		
428	4400	10	10		
429	3700	14	10		
430	3700	12	10		
431	3700	12	10		
432	4400	3	10		
433	4400	3	10		
434	4400	8	10		
435	4400	22	10		
436	4400	6	10		
437	3700	14	10		
438	3700	14	10		
439	3700	12	10		
440	3700	17	10		
441	3700	17	10		
442	4400	12	10		
443	4400	12	10		
444	4400	6	10		
445	4400	6	10		
446	4400	5	10		
447	4400	7	10		
448	4400	5	10		
449	4400	7	10		
450	4400	7	10		
451	4400	7	10		
452	4400	7	10		
453	4400	7	10		
454	4400	7	10		
455	4400	7	10		
456	4400	7	10		
457	4400	7	10		
458	4400	7	10		
459	4400	7	10		
460	4400	7	10		
461	4400	7	10		
462	4400	7	10		
463	4400	7	10		
464	4400	7	10		
465	4400	7	10		
466	4400	7	10		
467	4400	7	10		
468	4400	7	10		
469	4400	7	10		
470	4400	7	10		
471	4400	7	10		
472	4400	7	10		
473	4400	7	10		
474	4400	7	10		
475	4400	7	10		
476	4400	7	10		
477	4400	7	10		
478	4400	7	10		
479	4400	7	10		
480	4400	7	10		
481	4400	7	10		
482	4400	7	10		
483	4400	7	10		
484	4400	7	10		
485	4400	7	10		
486	4400	7	10		
487	4400	7	10		
488	4400	7	10		
489	4400	7	10		
490	4400	7	10		
491	4400	7	10		
492	4400	7	10		
493	4400	7	10		
494	4400	7	10		
495	4400	7	10		
496	4400	7	10		
497	4400	7	10		
498	4400	7	10		
499	4400	7	10		
500	4400	7	10		

Gráfica de Tendencia UT

BUCCYRUS



Anexo 2

Búsqueda activa de automatización para sus procesos en industrias pesadas

Industrial Group		Not At All	Minimally	Moderately	Extensively
Boiler/Heat Exchanger/Tank Mfg.	(n=42)	12%	44%	27%	17%
Ag. Machinery & Equipment	(n=32)	32%	32%	8%	28%
Construction & Mining Machinery	(n=27)	20%	48%	20%	12%
Oil & Gas Field Machinery	(n = 9)	22%	11%	45%	22%
Industrial Machinery	(n=27)	81%	8%	11%	0%
Engine/Turbine/Power Trans. Equip.	(n = 9)	12%	12%	63%	12%
Shipbuilding	(n=21)	42%	37%	0%	21%
Railroad Rolling Stock	(n = 4)	0%	25%	25%	50%
Armored Vehicles & Tanks	(n = 3)	0%	33%	33%	33%
Sector Averages	(n=174)	37%	31%	18%	14%

Se requieren mejores oportunidades de educación en el ámbito de la soldadura, ya que es un factor clave que limita la productividad de las industrias. Por ejemplo, soldadores con conocimientos limitados son más propensos a producir soldaduras defectuosas, lo que se traduce en disminución de la productividad. Para las empresas que utilizan técnicas más avanzadas de soldadura, la falta de técnicos que entienden el proceso de soldadura, obstaculiza el uso óptimo de procesos avanzados. Por último, la falta de ingenieros con experiencia en soldadura y aplicaciones de proceso de soldadura se ha traducido en la adopción del diseño y de prácticas de fabricación que limitan, en lugar de aumentar, la productividad de la soldadura y la capacidad de agregar valor al producto final.

Mover el proceso de soldadura manual a automático permitirá hacer importantes mejoras en la productividad de la soldadura.

Resumen Autobiográfico

Michel Jesús Cabodevila Santelices nace un 06 de Junio de 1983 en la ciudad de Tijuana Baja California Norte, sus padres Jesús Luis Cabodevila Pérez y Silvia Luz Santelices Ponce.

Realizó sus estudios profesionales en la Universidad Tecnológica de la Laguna logrando su titulación por promedio como Ingeniero en Mecatrónica en septiembre del 2007. Durante sus estudios recibió reconocimientos por su participación en las semanas académicas de las especialidades de Mecánica y Mecatrónica realizando talleres de diseño asistido por computadora. También participo en la creación del Capítulo Estudiantil de la especialidad incorporándose a la Asociación Mexicana de Mecatrónica.

Adquirió el grado de especialista en Tecnología de la Soldadura Industrial en 2011 como primer paso hacia la obtención del grado de Maestría en Ciencia y Tecnología en la misma especialidad. Como especialista presento su primer artículo científico en el Octavo Foro en Materiales CAC en el Instituto de Investigaciones Metalúrgicas de la UMSNH, Morelia Michoacán en Diciembre del 2011, **ISBN 970-9798-07-3.**

En el ámbito industrial su principal experiencia se ha llevado a cabo en la compañía Equipos de Acuña (Caterpillar Acuña) desde febrero del 2008, comenzó como Ingeniero de Diseño desarrollando herramientas y nuevas líneas de producción, después como responsable del área de diseño y fabricación de herramientas. Con la introducción de un nuevo producto se le asignó la responsabilidad como Líder de proyecto para desarrollar y coordinar la implementación de un sistema de manufactura para la fabricación de las cabinas de mando de los camiones de minería Unit Rig. Actualmente se desarrolla en Ingeniería de Manufactura con el desarrollo de procedimientos estandarizados en soldadura, desarrollo e implementación de nuevas tecnologías, desarrollo de nuevos productos, servicio técnico y coordinación en campo para reparación de componentes estructurales de camiones de minería Unit Rig.