



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y
MECÁNICA**

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

**TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO**

**“DISEÑO METODOLÓGICO DE UN PROCEDIMIENTO PARA LA
ELABORACIÓN Y EJECUCIÓN DE SOLDADURA MEDIANTE
EL PROCESO FSW ‘FRICTION STIR WELDING’ Y SU
APLICACIÓN EN ESTRUCTURAS INDUSTRIALES”**

AUTOR: ÉDISON BOLÍVAR CEDEÑO TAPIA

DIRECTOR: ING. BYRON CORTEZ

SANGOLQUÍ, 2017



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGIA Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

AUTORIZACIÓN

Yo, **ÉDISON BOLÍVAR CEDEÑO TAPIA**, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar en la biblioteca Virtual de la institución el presente trabajo de titulación "**DISEÑO METODOLÓGICO DE UN PROCEDIMIENTO PARA LA ELABORACIÓN Y EJECUCIÓN DE SOLDADURA MEDIANTE EL PROCESO F.S.W FRICTION STIR WELDING Y SU APLICACIÓN EN ESTRUCTURAS INDUSTRIALES**" cuyo contenido, ideas y criterios son de mi autoría y responsabilidad.

Sangolquí, 21 de Marzo del 2017

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Edison', is written over a horizontal line.

ÉDISON BOLÍVAR CEDEÑO TAPIA

C.C 171773845-2



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGIA Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Yo, **ÉDISON BOLÍVAR CEDEÑO TAPIA**, con cédula de identidad N°171773845-2, declaro que este trabajo de titulación "**DISEÑO METODOLÓGICO DE UN PROCEDIMIENTO PARA LA ELABORACIÓN Y EJECUCIÓN DE SOLDADURA MEDIANTE EL PROCESO F.S.W FRICTION STIR WELDING Y SU APLICACIÓN EN ESTRUCTURAS INDUSTRIALES**" ha sido desarrollado considerando los métodos de investigación existentes, así como también se ha respetado los derechos intelectuales de terceros considerándose en las citas bibliográficas. Consecuentemente declaro que este trabajo es de mi autoría, en virtud de ello me declaro responsable del contenido, veracidad y alcance de la investigación mencionada.

Sangolquí, 21 de Marzo del 2017



ÉDISON BOLÍVAR CEDEÑO TAPIA

C.C 171773845-2



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGIA Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, "*DISEÑO METODOLÓGICO DE UN PROCEDIMIENTO PARA LA ELABORACIÓN Y EJECUCIÓN DE SOLDADURA MEDIANTE EL PROCESO F.S.W FRICTION STIR WELDING Y SU APLICACIÓN EN ESTRUCTURAS INDUSTRIALES*" realizado por el señor *ÉDISON BOLÍVAR CEDEÑO TAPIA*, ha sido revisado en su totalidad y analizado por el software anti-plagio, el mismo cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, por lo tanto me permito acreditarlo y autorizar al señor *ÉDISON BOLÍVAR CEDEÑO TAPIA* para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 21 de Marzo del 2017

ING. BYRON HERNÁN CORTEZ PAZMIÑO
DIRECTOR

DEDICATORIA

En su gran mayoría dedico el presente a mi papito Rafael Efraín Tapia Cevallos que desde el cielo cuida de todos y dejó su mejor representante, al ser más valiente e incondicional que he tenido siempre, desde el vientre de mi madre hasta hoy mi Mamita Eugenia; ya que con solo su presencia puedo afirmar la existencia de Dios y agradecer por absolutamente todo en mi vida.

A mi madre Guadalupe, *Negríta*, por ser mi impulso en cada logro y experiencia, al ser quien me ha motivado para seguir adelante llenando de fortaleza mi mente, cuerpo y espíritu, demostrándome que la grandeza no refiere a la estatura sino a que tan grandes obstáculos logre vencer

A mi padre Bolívar, *Chino*, por enseñarme la manera de desafiar lo bueno y lo malo del mundo, por ser el mejor amigo y padre.

A mis hermanos Ricardo y Efraín, *Gato y Efra*, mis verdaderos mejores amigos, por llenar de dicha cada uno de mis días pero sobre todas las cosas por ser mi único apoyo cuando tuve que levantarme en las diversas circunstancias de mí destino.

A mi tío Oswaldo, *Ñatín*, por ocupar el lugar del hermano mayor que no tuve, porque siempre escuché frases alentadoras para enfrentar cada reto.

A mi compañera de vida Yanara por darme el título más grande que un hombre puede tener, el ser Papá, estar junto a mí en mi vida estudiantil y en los proyectos venideros.

Dedico con todas las fuerzas de mi corazón a hijo Maty ya que con su llegada detuvo mi caída libre, motivando mi respiración y las ganas de afrontar al mundo.

A mi tío Carlos por haberme apoyado en los momentos necesarios en mi vida, por compartir sus mejores consejos para direccionar mi carrera profesional.

AGRADECIMIENTOS

A mi mamita Eugenia, mis padres, mis hermanos y tíos por apoyarme incondicionalmente en mi vida personal, deportiva y profesional.

A la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE por permitir formarme profesional y deportivamente proveyéndome de los recursos para conseguir el título de Ingeniero Mecánico.

Agradezco especialmente a la Doctora Ximena Tapia por encaminar el inicio de mis estudios universitarios, su gran apoyo personal y profesional cuando ha sido necesario.

Agradecimiento a mi director de Proyecto Ingeniero Byron Cortez por su gran ayuda en la elaboración del presente Proyecto de Grado.

Al Ingeniero Santiago Proaño por abrirme las puertas de su empresa SEDEMI, y brindarme los recursos necesarios para la ejecución del presente.

Agradezco al Ingeniero Alexander Loya, buen amigo y Jefe del Departamento de Calidad, y su equipo de trabajo por su valiosa asesoría profesional, seguimiento y validación de la parte esencial del Proyecto.

Agradecimiento a mi gran amigo Galo Cabay, por ser partícipe directo en la ejecución y desarrollo de probetas de estudio.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

Contenido

CAPÍTULO 1.....	1
INTRODUCCION	1
1.1. Antecedentes.....	1
1.2. Justificación	2
1.3. Objetivos.....	3
1.3.1. General	3
1.3.2. Específicos.....	3
1.4. Alcance del Proyecto	3
CAPÍTULO 2.....	5
GENERALIDADES DE LA SOLDADURA	5
2.1. Introducción	5
2.2. Ventajas y desventajas de la soldadura FSW.....	7
2.3. Tipos de Soldadura.....	8
2.3.1. Soldadura de Filete	9
2.3.2. Soldadura de tapón o de ranura.....	9
2.3.3. Soldadura de punto.....	9
2.3.4. Soldadura de bisel.....	10
2.3.5. Soldadura de respaldo	11
2.4. Tipos de juntas.....	11
2.4.1. Junta a tope	12
2.4.2. Junta de esquina	13
2.4.3. Junta en T	13
2.4.4. Junta en traslape.....	14
2.5. Clasificación de la soldadura por fricción – FSW	14

2.5.2. Soldadura por Fricción para Unión Permanente	16
2.5.3. Soldadura por fricción para la obtención de depósitos superficiales.....	16
2.6. Clasificación de máquinas para soldadura FSW	17
2.6.1. Según su designación	18
2.7. Definición de variables del proceso FSW	21
2.7.1. Propiedades del material.....	21
2.7.2 Geometría de la herramienta	22
2.7.2. Temperaturas de operación	25
2.7.3. Otras variables del proceso FSW	27
2.8. Parámetros del proceso FSW.....	27
2.8.1. Velocidad de rotación o periferia.....	27
2.8.2. Tiempo de calentamiento.....	29
2.8.3. Tiempo De Transición	29
2.8.4. Tiempo De Soldadura	30
CAPÍTULO 3.....	31
MATERIALES.....	31
3.1. Compatibilidad De Materiales.....	32
3.2. Parámetros De Soldadura	34
3.3. Requerimientos De Calidad Del Material.....	37
3.3.1. Requerimientos de Inspección Visual	38
3.3.2. Requerimientos de inspección superficial - líquidos.....	38
3.3.3. Requerimientos de inspección volumétrica - ultrasonido	39
3.3.4. Dureza.....	39
3.4. Tratamiento térmico de elementos soldados por fricción.....	39
CAPÍTULO 4.....	43

DESARROLLO DE PRUEBAS PARA EL PROCEDIMIENTO	43
.....	43
4.1 Requerimientos Del Procedimiento	43
4.1.1. Presión de soldadura	44
4.1.2. Velocidad de desplazamiento	44
4.1.3. Velocidad de rotación.....	45
4.2. Partes Permisibles Del Procedimiento.....	45
4.3. Circunstancias Para La Recalificación.....	48
4.4. Requerimientos Para La Recalificación Del Procedimiento	48
4.5. Calificación del Operador de Soldadura	49
4.6. Requerimientos de Calificación del Operador.....	49
4.7. Requerimientos de recalificación del operador	50
CAPÍTULO 5.....	52
CALIDAD DE LAS SOLDADURAS	52
5.1. Discontinuidades	52
5.2. Discontinuidades de proceso y del procedimiento.....	55
5.3. Discontinuidades Metalúrgicas	57
5.4. Esfuerzos Residuales	60
5.5. Problemas De Corrosión.....	62
5.6. Distorsiones	64
5.7. Propiedades Mecánicas.....	66
5.8. Velocidad de Producción	67
CAPÍTULO 6.....	69
ANÁLISIS DE RESULTADOS	69
6.1. Ensayos No Destructivos De Probetas	69
6.1.1. Visual	69

6.1.2. Líquidos Penetrantes.....	72
6.1.3. Ultrasonido	73
6.1.4. Medición De Dureza	75
6.1.5. Ensayos de Metalografía.....	78
6.2. Ensayos Destructivos de Probetas.	79
6.2.1. Dimensiones de los cupones de prueba	85
6.2.2. Análisis de Resultados de Doblado.....	86
6.2.3. Análisis de Resistencia Mecánica de Cupones	88
6.3. Criterios de aceptación de Juntas Soldadas.....	89
6.4. Criterios de Rechazo de Juntas Soldadas.....	89
6.5. Elaboración de Documento de Procedimiento.....	90
CAPÍTULO 7.....	91
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	91
7.1. Conclusiones	91
7.2. Recomendaciones	92
Bibliografía.....	93

TABLAS

Tabla 1. Parámetros de soldadura para diferentes materiales.	31
Tabla 2. Técnicas de Examinación no Destructiva Defectos	38
Tabla 3. Tipos de discontinuidades en soldadura por fricción rotativa FSW Discontinuidades relacionadas con el proceso de soldadura o con el procedimiento.....	53
Tabla 4 Tipos de discontinuidades en soldadura por fricción rotativa FSW Discontinuidades metalúrgicas	54
Tabla 5 Comparación del Proceso FWS y Proceso de fusión SMAW	67
Tabla 6 Propiedades mecánicas para el material ASTM A572 grado 50.....	70
Tabla 7 Requerimientos de composición química para el material ASTM A572 Gr. 50	70
Tabla 8 Resultados de la dureza en escala Brinell obtenida de la probeta de calificación del procedimiento para la soldadura FSW	76
Tabla 9 Porcentaje de variación de dureza de la zona de la soldadura FSW respecto de la zona del metal base.....	77
Tabla 10 Tabla de Resultado de Pruebas.....	80
Tabla 11 Ensayo de Doblado.....	86
Tabla 12. Requerimientos de propiedades mecánicas para un acero ASTM A572 Grado 50	88
Tabla 13 Valores de resistencia obtenidos para la soldadura y comparados en función de los requerimientos del material base ASTM A 572 Gr. 50.....	88

FIGURAS

Figura 1 Identificación de los componentes de una soldadura FSW	6
Figura 2 Representación de un proceso de soldadura FSW, instalaciones de la empresa auspiciante del proyecto	6
Figura 3 Sistema de sujeción o anclaje para el proceso de soldadura FSW, imagen en las instalaciones de la empresa auspiciante	8
Figura 4 (a) Soldadura transversal; (b) Soldadura longitudinal	9
Figura 5 (a) Soldadura de tapón; (b) Soldadura de ranura	9
Figura 6 Soldadura de puntos	10
Figura 7 Forma de bisel en la soldadura	11
Figura 8 Soldadura de respaldo	11
Figura 9. Junta a tope	12
Figura 10 Apertura de raíz para una junta a tope	12
Figura 11 Junta a tope utilizada en el proceso de soldadura FSW espesor del material de 8 mm	12
Figura 12 Armado de la Plancha con una junta a tope sin preparación de bisel para una prueba en un espesor de 8 mm	13
Figura 13 Junta de esquina	13
Figura 14 Junta de esquina	13
Figura 15 Junta en traslape	14
Figura 16 Chequeo de la alineación antes de soportar sobre la máquina herramienta	14
Figura 17 (1) Soldadura por fricción (FRW) parte rotatoria, sin contacto; (2) establecimiento de contacto entre las partes para generar calor por fricción; (3) rotación detenida y presión axial aplicada; y (4) soldadura terminada	15
Figura 18 Soldadura por fricción inercial	16
Figura 19 Soldadura por fricción para unión permanente	16

Figura 20 Soldadura por fricción inercial para la obtención de depósitos superficiales	17
Figura 21 Máquina para soldadura FSW	18
Figura 22 Máquina de soldar FSW para investigación.....	19
Figura 23 Husillo para aumentar la torsión en el rendimiento de la herramienta, aplicación de soldadura de titanio.....	20
Figura 24 Husillo con sistema de enfriamiento	22
Figura 25 Hombro (Shoulder) y Punta Roscada (Pin threaded).....	23
Figura 26 Tipos de herramientas para FSW	24
Figura 27 Fuerza de compresión de acción perpendicular sobre las superficies a soldarse.....	25
Figura 28 Diagrama Hierro Carbono y temperatura de transformación de fase alrededor de 720 °C para un estado isotérmico	26
Figura 29 Diseños básicos de juntas utilizadas en proceso FSW.....	27
Figura 30 Velocidad de Rotación o periférica	28
Figura 31 Fuerzas F_x , F_y , F_z que actúan sobre la herramienta durante la soldadura	30
Figura 32 Sección transversal de la herramienta de soldadura por fricción y la pieza de trabajo	31
Figura 33 Combinación de materiales soldables por soldadura de fricción	34
Figura 34 Temperatura (°K) perfiles de distribución de temperatura para una soldadura FSW de un aluminio AA6061 en (A) plano XZ, (B) Plano YZ y (C) Plano XY	36
Figura 35 Identificación de la plataforma del usillo	36
Figura 36 Áreas de la soldadura de fricción rotativa	37
Figura 37 Preparación de planchas para espesores de 8 y 10 mm.	43
Figura 38 Modo de aplicación del calentamiento por fricción	44
Figura 39 Velocidad de rotación de 3000 RPM para la máquina – herramienta utilizada.....	45
Figura 40 Identificación de la máquina herramienta para el proyecto.....	48
Figura 41 Soldadura de fricción rotativa en progreso de dos planchas	49
Figura 42 Entrenamiento al Operador para el control del precalentamiento...	50

Figura 43	Secuencia de identificación de defectos	52
Figura 44	Verificación de desalineación en la preparación de las planchas ...	55
Figura 45	Exceso de destello en soldadura FSW para una aleación de aluminio 6061-T6	56
Figura 46	Exceso de destello para la placa de 6 mm	56
Figura 47	Lazo de beso debido a la incompleta adherencia hacia la raíz.....	57
Figura 48	Cavidad interna (agujero de gusano) en una soldadura FSW de un material aluminio 6061-T6	58
Figura 49	Discontinuidad abierta a la superficie causada por una muy alta velocidad de rotación de la herramienta en un proceso FSW.....	59
Figura 50	Discontinuidad del tipo herida en una soldadura FSW	60
Figura 51	Distribución de esfuerzos residuales en una soldadura FSW para un aluminio AA6061-T6 variando las velocidades para A y B.	61
Figura 52	Diagrama Hierro Carbono.....	64
Figura 53	Esquema de esfuerzos residuales para la soldadura FSW	65
Figura 54	Esquema de representación de los esfuerzos residuales longitudinales.....	66
Figura 55	Zonas Metalúrgicas de una soldadura FSW (TMAZ Zona afectada termo-mecánicamente).....	67
Figura 56	Inspección Visual de la placa de 6mm.....	71
Figura 57	Inspección por líquidos penetrantes, técnica visible efectuada para la placa de 6mm	72
Figura 58	Secuencia de aplicación de la técnica.	73
Figura 59	Equipo de Ultrasonido para la inspección volumétrica del material soldado por proceso FSW.	73
Figura 60	Inspección volumétrica de placa de 6 mm	74
Figura 61	Zonas para una soldadura FSW	75
Figura 62	Esquema que ilustra la dureza en Vickers (VH) para varias regiones de la ZAC en una soldadura FSW para un acero AISI 1018	75
Figura 63	Dureza obtenida en los resultados de la soldadura FSW en plancha de 6 mm, material ASTM A572 Gr.50	76

Figura 64 Resultados del ensayo de metalografía para una magnificación de 100x.....	78
Figura 65 Resultados del ensayo de metalografía para una magnificación de 500x.....	79
Figura 66 Resultado para un espesor de 10 mm.....	79
Figura 67 Resultado para la octava prueba, espesor de 6 mm	79
Figura 68 Resultado para la décima segunda prueba para un espesor de 6 mm.....	80
Figura 69 Ubicación de las secciones para el corte de las probetas para los ensayos mecánicos en un espesor de 6 mm.	84
Figura 70 Dimensiones de las probetas para doblado de cara y de raíz para plancha	85
Figura 71 Dimensiones de las probetas para la prueba de tensión para plancha.....	86
Figura 72 Dimensiones de la matriz y punzón para ensayos mecánicos de doblado según los requerimientos de AWS B4.0: 2007	87

NOMENCLATURA

FSW	Friction Stir Welding (Soldadura de Fricción Rotativa)
Pin	Punta de una herramienta para torno o para una máquina herramienta
Austenita	Fase en el diagrama hierro – carbono correspondiente al inicio de un estado líquido del acero
α	Hierro Alfa, constituyente del acero que se encuentra en un estado sólido para el diagrama hierro carbono.
P.F.	Punto de fluencia o punto de cedencia (Yield Point), en el cual un material, empieza una deformación plástica o permanente.
UTS	Resistencia última a la tensión (Ultimate Tensile Strength), conocido también como resistencia a la tensión (TS) sobre la sección original del material.
Tenacidad	También especificada como (TOUGHNESS). Capacidad de absorber energía hasta su punto de ruptura.
Resiliencia	Capacidad de un material de absorber energías hasta su punto de cedencia P.F. También el área debajo de una curva de esfuerzo – deformación hasta el límite elástico.
Ferrita	Forma cristalográfica de estructura BCC que existe por debajo de temperaturas de 912°C (1674 °F) especificado como hierro alfa (α Fe).
Perlita	Es una estructura eutectoide de dos fases, la cual consiste de filamentos de cementita y ferrita.
Fuerza de Forja	Fuerza perpendicular a las caras del material a soldarse

ANEXOS

Índice de Anexos	Descripción, Contenido o Referencia
1	Variables y parámetros para el control del procedimiento
2	Configuración de parámetros para la soldadura FSW
3	Propiedades de la herramienta utilizada
4	Primera prueba del Proceso FSW
5	Resultados para la segunda prueba efectuada
6	Resultados para la octava prueba efectuada
7	Resultados para la décima cuarta prueba efectuada
8	Informe de inspección visual (VT) para la prueba final
9	Informe de resultados de la inspección superficial (líquidos penetrantes – PT) para la plancha de 6 mm
10	Informe de resultados de la inspección volumétrica (ultrasonido convencional – UT)
11	Resultados de doblado de cara y raíz, SEDEMI
12	Resultados de dureza, escala brinell, SEDEMI
13	Resultados de dureza, escala vickers, laboratorio ILPM
14	Resultados de ensayos de tensión, laboratorio ILPM
15	Resultados de ensayos metalográficos, laboratorio ILPM
16	WPS – Especificación del Procedimiento de Soldadura, WPS_FSW.001

- 17 PQR – Registro de Calificación del Procedimiento,
FSW.17PQR.001
- 18 WPQ – Calificación del Desempeño del Operador, Soldador
o Apuntalador, SED.17.W012-FSW
- 19 Tabla de Criterios de Aceptación de Inspección Visual y
superficial según AWS D1.1 2015.

RESUMEN

El siguiente proyecto tiene como objetivo mostrar los resultados para una soldadura de fricción rotativa (FSW) con material ASTM A 572 Gr. 50 que será soldada en las instalaciones de la empresa SEDEMI S.C.C. Los parámetros y variables del proceso serán modificados hasta obtener una soldadura sana. Se aplicará ensayos no destructivos para el control de la calidad de la soldadura por los métodos de inspección: visual, superficial y volumétrica. Los resultados obtenidos muestran que para el espesor soldado de 6 mm por el proceso FSW se ha obtenido una junta completa con propiedades mecánicas aceptables comparadas con un proceso de soldadura por fusión. El proceso es repetible para una soldadura de producción y puede ser utilizado por la empresa auspiciante.

PALABRAS CLAVE

SOLDADURA DE FRICCIÓN ROTATIVA

VARIABLES DEL PROCESO

ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS

INSPECCIÓN VISUAL

INSPECCIÓN VOLUMÉTRICA

ABSTRACT

The following project has as objective show the results for a friction stir welding (FSW) for an ASTM A 572 Gr. 50 material which will be welded in SEDEMI S.C.C. company. The parameters and process variables will be modified until get a completed weldment. It will be applied nondestructive testing for the quality control of weldments through visual, superficial and volumetric methods. The showed results for the welded of thickness 6 mm through FSW process present a complete weld with mechanical properties acceptable in comparison with fusion welding. The process is repeatable for a production welding and can be used by the sponsored company.

KEY WORDS

FRICTION STIR WELDING

VARIABLE OF THE PROCESS

NON DESTRUCTIVE TEST

VISUAL TEST

VOLUMETRIC TEST

CAPÍTULO 1

INTRODUCCION

1.1. Antecedentes

La soldadura de fricción rotativa (FSW – Friction Stir Welding), es un proceso de unión de dos piezas que se realiza en estado sólido, es decir la temperatura del proceso no supera los 720°C con lo cual no existe una transformación del material a un estado líquido y a través de una herramienta cilíndrica la cual a una determinada velocidad de rotación o de giro logra la unión de los materiales.

Una vez que la herramienta ha adquirido la velocidad especificada, ésta penetrará en la junta y empezará elevar la temperatura de esa zona, debido a la fricción y el material empezará a ablandarse, adquiriendo en cierto momento un estado plástico.

A pesar de no ser muy conocido en el País este proceso (FSW) como otros tipos de procesos de soldadura de fusión, tales como SMAW, FCAW; debido al alto costo de adquisición de su equipamiento y su difusión en los medios comerciales, la soldadura por fricción es un tipo de proceso tecnológico que debe ser del conocimiento de todos los estudiantes, inspectores, supervisores de soldadura. El presente proyecto de investigación se ha planteado debido al desconocimiento de los parámetros de soldabilidad asociados al proceso FSW por lo cual, documentar el procedimiento y verificar las ventajas ofrecidas por este proceso implica desglosar las siguientes particularidades propias del mismo y como principales:

- Minimizar el consumo energético ya que la potencia que se requiere de las instalaciones es considerablemente menor que en el caso de otros procesos de soldadura al arco eléctrico.

- El equipamiento tecnológico es muy sencillo y puede ser automático o semiautomático.
- Es un proceso ambientalmente limpio, no produce humos, gases, vapores residuales o calor excesivo hacia el medio circundante.
- Es factible en casi todos los tipos de acero así como en distintos metales y aleaciones no ferrosas.
- La resistencia de la unión soldada es igual o mayor que el material base.
- Al ser un proceso de estado sólido, preserva la microestructura y las propiedades del material forjado.
- No se necesita material de aporte ni fundente para realizar la unión soldada.
- No existe escoria acumulada debido a la utilización de fundentes o electrodos.

De forma general el proceso se desarrolla en dos etapas. La primera llamada de calentamiento en la que se eleva la temperatura en la zona de interface entre las piezas a unirse y la segunda etapa en donde la fuerza de forja (fuerza producida por la rotación y avance lineal) es proporcionada por una herramienta la cual une el material en estado plástico, expulsando el material remanente de la zona de interface a modo de rebaba consolidando la unión entre las piezas.

1.2. Justificación

Al ser un proceso de soldadura no desarrollado en el campo de soldadura en el País, el realizar una investigación sobre este proceso abrirá las puertas a la posibilidad que estos puedan ser un método de fabricación. Incrementando alternativas de trabajo y que al igual que los demás procesos de soldadura por fusión y por arco eléctrico como GMAW, FCAW, SMAW, SAW se requiera de un entrenamiento previo para el operador de soldadura, de igual manera la capacitación del ingeniero encargado del proceso tanto de producción como de calidad. Además se fomentará un nuevo uso de las fresadoras al ser utilizadas en un proceso adicional como herramientas de

unión ya que con un diseño y un estudio propio se pretende empezar una revolución en esta área, con lo que el desarrollo de la economía también sería considerada en su justificativa.

1.3. Objetivos

1.3.1. General

Diseñar un procedimiento metodológico para la elaboración y ejecución de soldadura mediante el Proceso FSW “Friction Stir Welding” y su aplicación en estructuras industriales.

1.3.2. Específicos

- Recolectar información técnica que servirá como soporte de conocimiento además de un fundamento teórico del proceso FSW.
- Plantear y establecer un procedimiento de soldadura como alternativa para sustituir material de aporte, utilizado en otros procesos típicos de soldadura.
- De acuerdo a los parámetros establecidos en el ítem anterior, seleccionar los componentes y variables de control que formarán parte de este procedimiento.
- Capacitar y calificar al operador para la ejecución de la soldadura con las variables del procedimiento de soldadura a ser establecidas.
- Proporcionar y garantizar al cliente un procedimiento de soldadura calificado acorde a sus necesidades para soldadura de producción.

1.4. Alcance del Proyecto

El diseño metodológico del procedimiento de soldadura para el proceso de soldadura FSW “Friction Stir Welding”, tendrá un alcance basado en documentos técnicos de la Sociedad Americana de Soldadura a través de su especificación de referencia AWS C 6.2 / C 6.2M: 2006 SPECIFICATION FOR FRICTION WELDING OF METALS y ANSI/AWS C6.1-89 (R2009)

RECOMMENDED PRACTICES FOR FRICTION WELDING, documentos que permitirán emitir documentos de control como WPS, PQR, WPQ.

El egresado quien está a cargo del proyecto deberá dar cumplimiento del procedimiento, verificar los certificados del material base, capacitar y calificar a el/los operador(es) y llevar registro de las calificaciones, generar los WPQ de los operadores calificados y no calificados.

Para la validación se deberá revisar y supervisar el trabajo ejecutado, generar y revisar registros generados en el proceso, gestionar el desarrollo y seguimiento de las probetas así como los ensayos realizados en la planta y por agentes o empresas externas.

CAPÍTULO 2

GENERALIDADES DE LA SOLDADURA

2.1. Introducción

Un proceso convencional de soldadura, de fusión específicamente, se define como la coalescencia de dos metales obteniéndose lo que se denomina una unión soldada. Este proceso se lleva a cabo bajo condiciones y parámetros controlados (con o sin presión, material de aporte, control de voltaje y corriente entre las principales variables de control), esto a su vez dependiendo del tipo de soldadura que se va a realizar.

La fuente de energía que comúnmente se utiliza para soldar dos materiales metálicos se obtiene a través de un arco eléctrico, pero existen diferentes fuentes de energía que son muy utilizadas en los procesos de soldadura, como son: flamas de gas, procesos de fricción, láser o haz de electrones.

La soldadura por fricción rotativa “FSW” (ver figura 1), es un proceso de soldadura de forja de estado sólido el cual comparte ciertas características y parámetros así como ventajas y desventajas respecto de otros procesos de soldadura de estado sólido particularmente para otros procesos de soldadura por forja tales como soldadura de fricción por inercia y de batido.

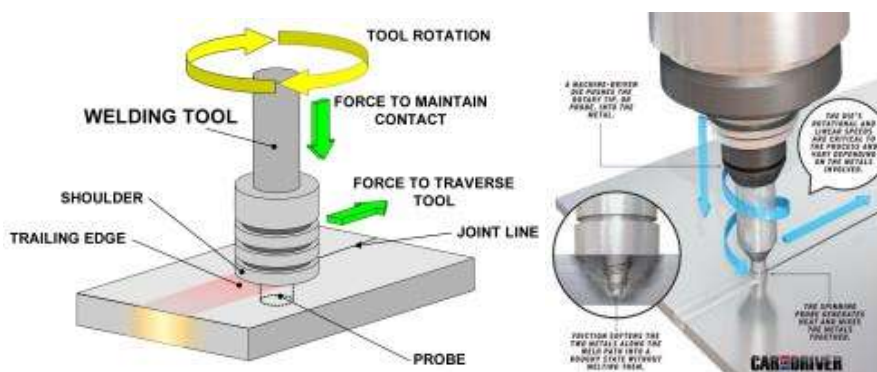


Figura 1 Identificación de los componentes de una soldadura FSW

Fuente: (Machinery, 2012)



Figura 2 Representación de un proceso de soldadura FSW, instalaciones de la empresa auspiciante del proyecto

La soldadura por fricción de rotación normalmente es ejecutada en un solo pase con penetración completa y con poca o ninguna preparación de bisel. Dependiendo del material a ser unido y de los espesores existe una mínima distorsión durante el proceso de soldadura en los materiales que previamente están anclados a la máquina que está siendo utilizada para la ejecución. Las juntas soldadas típicamente presentan mejores propiedades mecánicas con respecto a una soldadura por fusión.

Con posibles excepciones a la resistencia del material con altos esfuerzos de fluencia y materiales trabajados a altas temperaturas tales como aceros especiales y aleaciones de aluminio, la soldadura por fricción puede ser efectuada a una alta velocidad de soldeo.

La soldadura rotativa por fricción es un proceso de máquina con parámetros que facilitan la repetitividad de las uniones soldadas para aplicaciones de soldadura de producción con un limitado aporte del operador en cuanto al desarrollo de sus habilidades respecto, por ejemplo, de un proceso manual como SMAW o GTAW en donde la habilidad del soldador implica la oscilación y control de la penetración del material de aporte para ambas manos y con equipamiento de protección personal que, en las locaciones donde existe temperaturas superiores a 30°C, constituye un parámetro que afecta la habilidad del soldador.

2.2. Ventajas y desventajas de la soldadura FSW

Entre las principales ventajas del proceso de soldadura por fricción rotativa respecto de la soldadura por fusión son las siguientes:

- Habilidad de producir soldaduras en estado sólido con ninguna o poca distorsión del material base utilizado.
- Se evita la generación de humos y salpicaduras.
- Se eliminan las discontinuidades de proceso relacionadas con la solidificación y que se generan durante el enfriamiento de la junta soldada, tales como fisuras, porosidad, inclusiones, fisuración en caliente, entre las principales.
- El proceso es ambientalmente limpio
- Para la mayoría de las aplicaciones, soldaduras de alta calidad son obtenidas a un costo relativamente bajo utilizando una máquina herramienta simple.
- El proceso puede ser utilizado para una variedad de metales y aleaciones incluyendo aleaciones de aluminio, titanio, magnesio, cobre, aceros inoxidables y nickel entre los más comerciales.

- Un número de configuración de juntas puede ser utilizado, incluyendo a tope, a traslape, de esquina y en T.

Las desventajas del proceso FSW pueden ser consideradas las siguientes:

- Una de las principales limitaciones del proceso de soldadura FSW es que la junta no está auto soportada, ésta debe ser anclada adecuadamente, como se observa en la figura 3 a continuación.
- Si las piezas de trabajo están diseñadas de manera que requieran soporte en la junta, los costos de las herramientas podrían ser significantes. Sin embargo los costos del proceso de soldadura por fricción rotativa son similares a otros procesos de soldadura por forja.
- El alto costo inicial del equipamiento alcanza típicamente un rápido retorno de la inversión debido a la alta capacidad y nivel de producción del proceso.



Figura 3 Sistema de sujeción o anclaje para el proceso de soldadura FSW, imagen en las instalaciones de la empresa auspiciante

2.3. Tipos de Soldadura

Existen diversos tipos de soldadura que están ligados al tipo de junta y al proceso de soldadura, entre los más importantes tenemos:

2.3.1. Soldadura de Filete

Se usa comúnmente en juntas de traslape o de T, dependiendo de la orientación pueden ser soldaduras longitudinales o transversales. La diferencia entre estos dos tipos es la forma de aplicar la carga, en el tipo longitudinal la carga se aplica paralela a la longitud de la soldadura, mientras que en las transversales la carga se aplica perpendicularmente a la soldadura. En las figuras a continuación respectivamente se puede observar las configuraciones que tienen estas soldaduras.

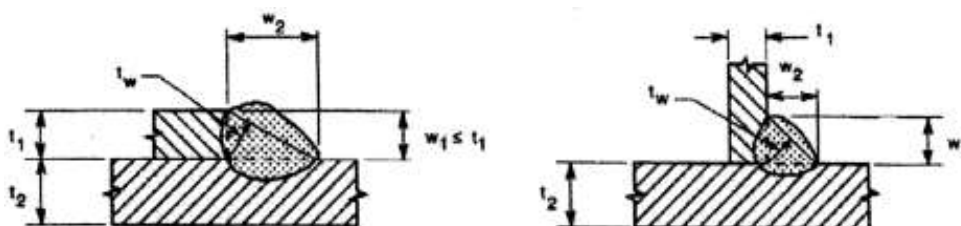


Figura 4 (a) Soldadura transversal; (b) Soldadura longitudinal

Fuente: (Tesis)

2.3.2. Soldadura de tapón o de ranura

La soldadura de tapón o de ranura, se usan frecuentemente en placas planas, como se muestra en la figura a continuación, este tipo de soldadura rellena los huecos que pueden ser redondos o ranurados con material de aporte del proceso de soldadura que se esté empleando. Este tipo de soldadura tiene como principal aplicación prevenir el pandeo o la separación de chapas soldadas.



Figura 5 (a) Soldadura de tapón; (b) Soldadura de ranura

Fuente: (Instituto técnico de la Estructura en Acero)

2.3.3. Soldadura de punto

La soldadura de puntos se aplica principalmente para uniones sobrepuestas como se observa en la figura a continuación. Este tipo de soldadura se utiliza en placas de espesores pequeños (chapas), su proceso

se efectúa por el paso de corriente a través de los electrodos que funden la pieza y la presión que ejercen los electrodos las mantiene juntas conformando un punto fundido. Normalmente se requieren varias soldaduras de puntos para unir las partes. Una línea de estos puntos genera la unión.

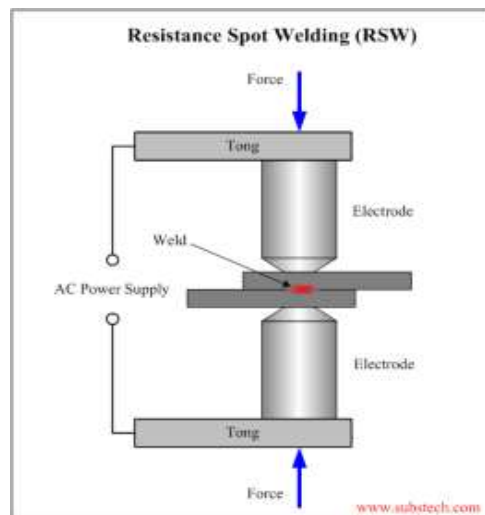


Figura 6 Soldadura de puntos

Fuente: (SubsTech)

2.3.4. Soldadura de bisel

Las soldaduras de bisel necesitan que se preparen las orillas de las partes con un bisel para facilitar la penetración de la soldadura. Las formas de los bisel varían de acuerdo a la utilidad y pueden ser: un cuadrado en un lado, bisel en "V", en U y en J, en lados sencillos o dobles, como se muestra en la figura 7.

En este tipo de soldadura para saturar la unión, se utiliza relleno generalmente mediante soldadura con arco eléctrico o con oxígeno y gas combustible. La soldadura de bisel se usa en todo tipo de unión con excepción de la sobrepuesta.

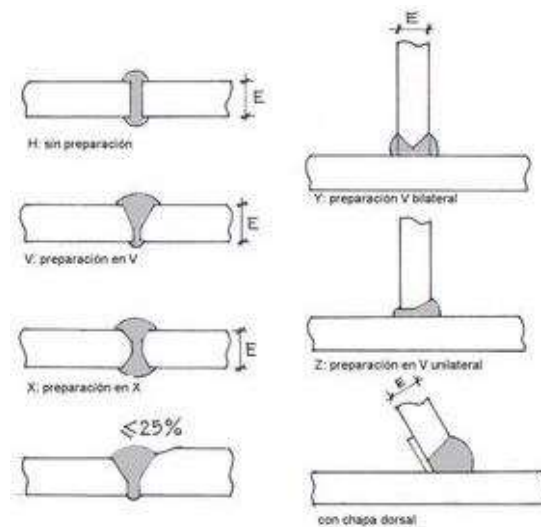


Figura 7 Forma de bisel en la soldadura

Fuente: (Blog Jose Cedeño)

2.3.5. Soldadura de respaldo

Se llama soldadura de respaldo porque utiliza un material que se coloca en la parte posterior de la junta soldada, y a su vez, soporte y retenga el metal fundido de la soldadura como se lo puede observar en la figura 8. La preparación de la raíz de la soldadura para aplicar este tipo de soldadura es importante ya que de esta manera se aumenta la calidad de la unión soldada y se garantiza una penetración completa.

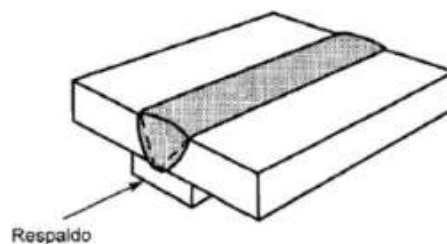


Figura 8 Soldadura de respaldo

Fuente: (SlideShare , 2012)

2.4. Tipos de juntas

Los tipos de juntas se refieren básicamente a la configuración que tendrán las piezas a soldar para efectuar un mejor proceso de soldadura.

Los principales tipos de juntas son:

2.4.1. Junta a tope

En este tipo de junta se unen las piezas que se encuentran alineadas en un mismo plano, como se representa en la figura 9.



Figura 9. Junta a tope

Fuente: (Tecnologia)

Este tipo de junta es el que ha sido considerado para este proyecto, el principal parámetro y característica de la junta es la apertura de raíz, alineamiento longitudinal y transversal, tal como se observa en la figura 10 que se muestra a continuación.

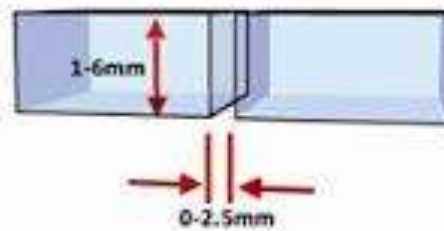
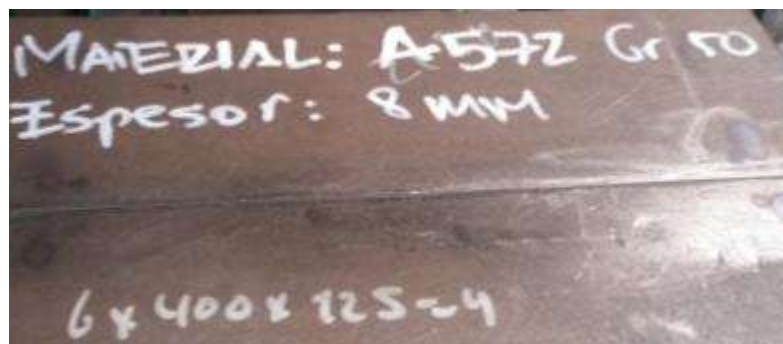


Figura 10 Apertura de raíz para una junta a tope

Fuente: (Blog Tianjin Anson)

La fotografía que se muestra a continuación muestra el tipo de junta utilizado para este proyecto, la unión de las caras de soldadura fueron sin ningún tipo de apertura de raíz para todos los casos. (Ver figura 11 y 12).



**Figura 11 Junta a tope utilizada en el proceso de soldadura FSW
espesor del material de 8 mm**



Figura 12 Armado de la Plancha con una junta a tope sin preparación de bisel para una prueba en un espesor de 8 mm

2.4.2. Junta de esquina

Este tipo de junta une dos piezas que se encuentran formando un ángulo de 90° en el extremo de una de las piezas, como se representa en la figura 13.



Figura 13 Junta de esquina

Fuente: (Repositorio de Universidad Veracruzana)

2.4.3. Junta en T

En este tipo de junta se unen las piezas que se encuentran en un ángulo recto formando una T, como se representa en la figura 14.

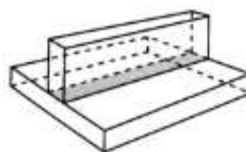


Figura 14 Junta de esquina

Fuente: ([Soldadura y Estructuras])

2.4.4. Junta en traslape

Este tipo de junta une dos piezas que se encuentran superpuestas (una pieza sobre otra), como se representa en la figura 15.



Figura 15 Junta en traslape

Fuente: (Tecnología)

2.5. Clasificación de la soldadura por fricción – FSW

El equipamiento utilizado en la soldadura por fricción rotativa incluye la máquina – herramienta, la herramienta de fricción rotativa y las combinaciones de ajuste para mantener el elemento anclado en la orientación correcta para la alineación correcta durante el proceso de soldadura, como se muestra en la figura 16.



Figura 16 Chequeo de la alineación antes de soportar sobre la máquina herramienta

La soldadura por fricción (ver figura 17) es un proceso que se realiza en estado sólido entre las piezas, produciendo una unión soldada bajo la acción de la fuerza compresiva de contacto de dos piezas de trabajo que giran o se mueve una respecto a otra generando calor y por esta acción desplazando plásticamente material de las superficies a soldar. Las características finales que presentan este proceso son: una zona térmica afectada muy angosta, presencia de material deformado plásticamente

alrededor de la soldadura y la ausencia de una zona de fusión.¹ Los principales procesos de fricción son los detallados a continuación.

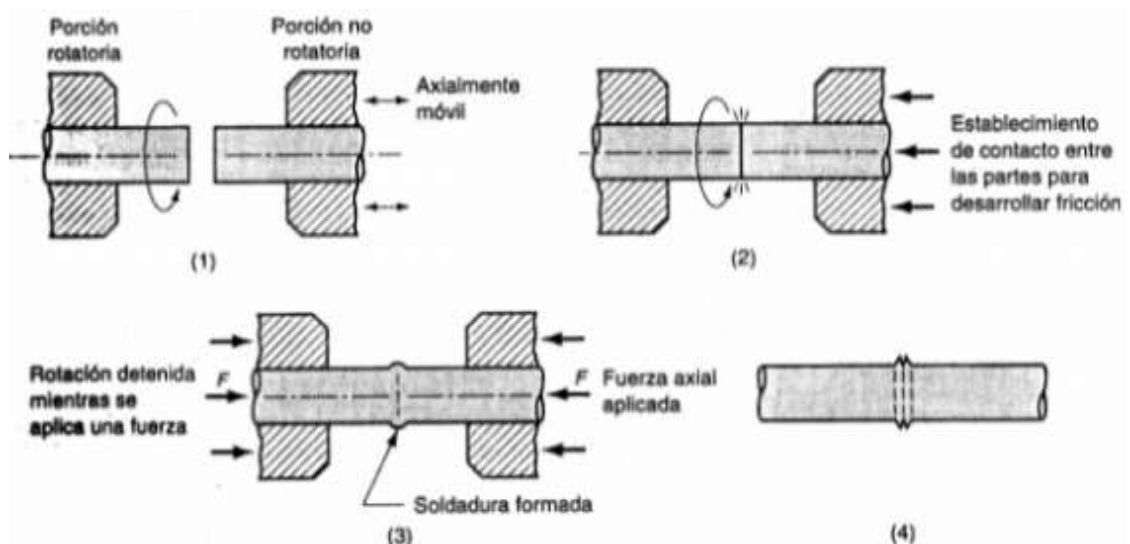


Figura 17 (1) Soldadura por fricción (FRW) parte rotatoria, sin contacto; (2) establecimiento de contacto entre las partes para generar calor por fricción; (3) rotación detenida y presión axial aplicada; y (4) soldadura terminada

Fuente: (Tecnología)

2.5.1. Soldadura por Fricción Inercial

En el proceso de soldadura por fricción inercial, “una de las piezas a soldar está sujeta a un volante y la otra pieza está restringida de modo que no puede girar. El volante se acelera hasta una velocidad de rotación predeterminada, almacenando la energía requerida. El motor impulsor se desconecta y las piezas de trabajo se juntan por la aplicación de una fuerza de soldadura. Esto hace que las superficies de empalme se froten bajo presión. La energía cinética almacenada en el volante giratorio se disipa como calor, por la fricción de la cara interna de la soldadura, al tiempo de que la velocidad del volante decrece. Se puede aplicar una fuerza de soldadura mayor (fuerza de forjado) antes de que se detenga la rotación. La fuerza de forjado se mantiene durante un tiempo previamente determinado después de que las piezas dejan de girar. La figura 18 muestra cómo

¹ AWS, Manual de Soldadura, Tomo 9, Capítulo 23, pág. 740.

interactúan los principales parámetros que rigen la soldadura por fricción inercial en función del tiempo que lleva cada proceso.



Figura 18 Soldadura por fricción inercial

Fuente: (REVISTA TOPE - TECNOLOGIA)

2.5.2. Soldadura por Fricción para Unión Permanente

La soldadura por fricción para unión permanente se caracteriza porque se busca utilizar el proceso de fricción para que la unión resultante sea permanente a diferencia del proceso de fricción superficial cuya finalidad no es la unión de dos piezas metálicas.



Figura 19 Soldadura por fricción para unión permanente

Fuente: (BoingBoing)

2.5.3. Soldadura por fricción para la obtención de depósitos superficiales

La soldadura por fricción para la obtención de depósitos superficiales (friction surfacing) es una técnica que se usa comúnmente para el depósito de materiales en la superficie de un tipo metálico y de esta manera mejorar el rendimiento y la calidad de la superficie.

El proceso implica la rotación de una barra consumible sólida con uno de sus extremos prensados con fuerza contra un material metálico como una placa, disco o cilindro. El calor se genera en la punta del consumible, produciendo una capa de plastificado. El movimiento lateral del material metálico permite los depósitos de esta barra consumible de rotación como se observa en la figura 20.

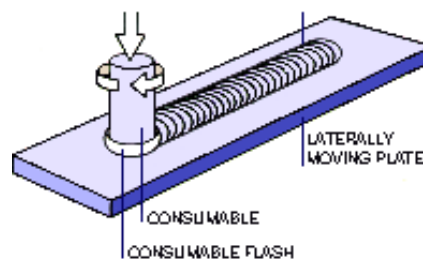


Figura 20 Soldadura por fricción inercial para la obtención de depósitos superficiales

Fuente: (TWI)

En este proceso no hay fusión del material metálico y por lo tanto no hay dilución del material metálico en el depósito. La composición del depósito es el mismo que el del material base. El depósito es homogéneo, tiene una buena resistencia mecánica y adherencia. La región de interfaz generalmente permanece intacta. Sin embargo, la calidad de la unión en los bordes del depósito es generalmente mala, y puede ser necesario retirar esta área. El aspecto de la superficie depende del material depositado, y de los parámetros utilizados.

2.6. Clasificación de máquinas para soldadura FSW

Para realizar el proceso de soldadura por fricción las máquinas deben cumplir cuatro operaciones básicas: avance longitudinal de la pieza y/o de la herramienta, ajuste vertical del husillo porta herramienta, giro del husillo sobre su eje e inclinación de este respecto a la pieza. Es necesario tener en cuenta que para poner en marcha este proceso la máquina debe permitir trabajar dentro de rangos grandes de velocidad de rotación y de traslación, además, es importante tomar en cuenta la rigidez estructural de la máquina

debido a los esfuerzos que se producen durante la soldadura, tal como se observa en la siguiente figura:

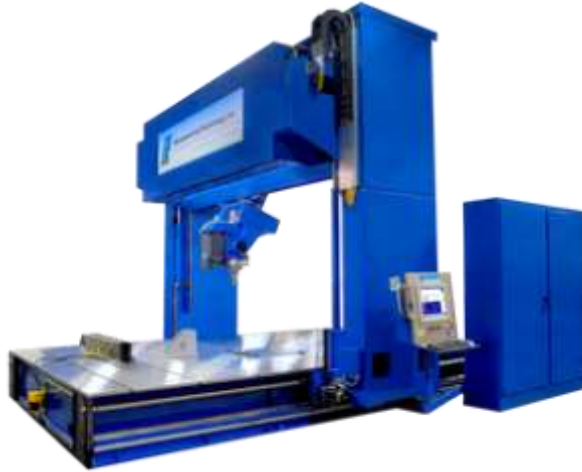


Figura 21 Máquina para soldadura FSW

Fuente: (Bond Technologies)

Las máquinas para realizar la soldadura por FSW se clasifican de la siguiente manera:

- Según su designación
- Según posición del husillo
- Según la movilidad del husillo con respecto a la bancada.

2.6.1. Según su designación

Según su designación las máquinas pueden clasificarse en:

2.6.1.1. Designación General

Las máquinas que entran en esta clasificación se caracterizan por la universalidad que tienen en la forma de sujeción de las piezas, también poseen un amplio rango para la aplicación de la fuerza axial que es un parámetro primordial para soldar los diferentes tipos de piezas (forma y dimensiones). La mayoría de las máquinas que entran en esta descripción son semiautomáticas.

2.6.1.2. Especializadas

Las máquinas especializadas se caracterizan porque pueden soldar piezas metálicas que cumplen una denominación o ciertas características específicas de forma o dimensional. Estas máquinas pueden ser automáticas o semiautomáticas. (ver figura22).

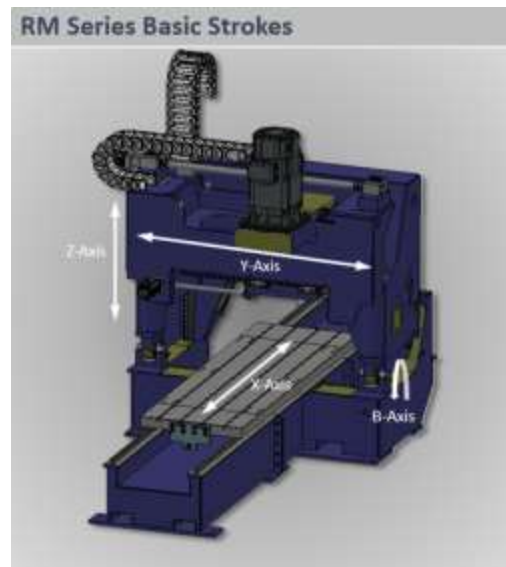


Figura 22 Máquina de soldar FSW para investigación

Fuente: (Bond Technologies)

2.6.1.3. Según Posición del Husillo

El husillo es una parte importante en las máquinas para realizar este proceso de soldadura, ya que permite acoplar la herramienta que hace el trabajo de soldadura. Ver figura 23. Según la posición que el husillo tenga se puede clasificar de la siguiente manera:

2.6.1.4. Husillo horizontal

Estas máquinas se caracterizan porque la posición del husillo que acopla a la herramienta se encuentra en posición horizontal y de esta manera puede realizar soldaduras en el plano vertical.

2.6.1.5. Husillo vertical

Las máquinas con husillo vertical se caracterizan porque la soldadura se realiza en un plano horizontal, esto es debido a la posición vertical del husillo en la máquina.



Figura 23 Husillo para aumentar la torsión en el rendimiento de la herramienta, aplicación de soldadura de titanio

Fuente: (KENNAMETAL)

2.6.1.6. Según movilidad del husillo con respecto a la bancada

Las máquinas que tienen la capacidad de mover el husillo respecto a la bancada, se clasifican de la siguiente manera:

2.6.1.7. Husillo inmóvil

Las máquinas con husillo inmóvil son muy comunes para realizar este proceso de soldadura, se caracteriza porque el husillo no se mueve ya que está configurado para que el movimiento lo dé la bancada en el cual se coloca la pieza a soldar.

2.6.1.8. Husillo móvil

Estas máquinas con husillo móvil se caracterizan porque tienen aplicación en las máquinas de doble vástago utilizadas para la soldadura de tres piezas al mismo tiempo. Durante el proceso la pieza que no rota se

coloca en el agarre central que es fijo y las que rotan en los husillos siendo oprimidas contra la que no rota.²

2.7. Definición de variables del proceso FSW

Comúnmente las principales variables a considerarse en un proceso de soldadura por fusión en donde prima la coalescencia se clasifica en esenciales, no esencial y suplementaria, sin embargo para el proceso FSW fundamentados en las recomendaciones de AWS C6.2/C6.2M:2006 podemos considerar que las variables para un procedimiento son las siguientes:

- a) Composición química
- b) Condición de las caras a soldarse
- c) Condición de tratamiento térmico
- d) Geometría de la junta y masa rotacional
- e) Dimensiones de las partes, y
- f) Para soldadura FSW las dimensiones y/o planos de la herramienta

Se ha efectuado sin embargo, en base a las condiciones de las herramientas disponibles para este proceso un desarrollo de los siguientes parámetros:

2.7.1. Propiedades del material

Las propiedades del material se caracterizan principalmente con sus propiedades térmicas, mecánicas y de composición química. Las propiedades térmicas están relacionadas con el gradiente de enfriamiento en el caso particular de que se tenga materiales disimiles como por ejemplo la soldadura de un acero inoxidable con un acero al carbono. Las propiedades mecánicas tienen relación directa con la selección del tipo de herramienta, si un material posee alta dureza será necesaria una herramienta de mayor dureza y en algunos casos se necesitará un sistema de enfriamiento en el husillo, tal como se observa en la siguiente figura 24. Respecto de la

²<http://monografias.umcc.cu/monos/2014/Facultad%20de%20Ciencias%20Tecnicas/mo1485.pdf>

composición química determinara la necesidad de efectuar o no un tratamiento térmico o un mejor control de velocidad tanto lineal como de rotación para conservar la menor cantidad de calor posible.



Figura 24 Husillo con sistema de enfriamiento

Fuente: (HBS ENGINEERING)

2.7.2 Geometría de la herramienta

La geometría de la herramienta es un aspecto influyente en el desarrollo del proceso ya juega un papel fundamental en el flujo de material y, a su vez regula la velocidad de desplazamiento a la que puede llevarse a cabo FSW. La herramienta de FSW consta de un hombro y un pasador (pin) como se muestra esquemáticamente en la figura 25.

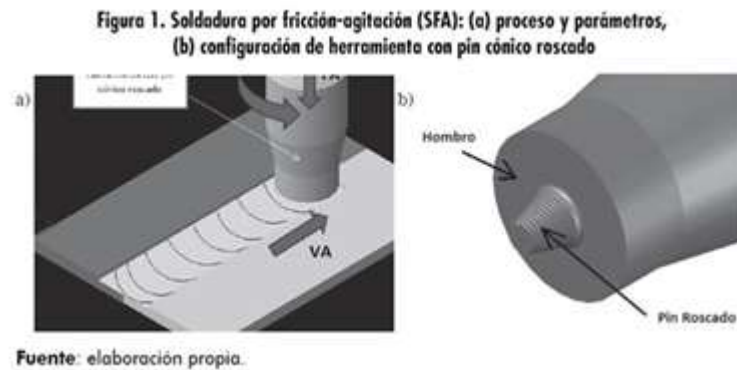
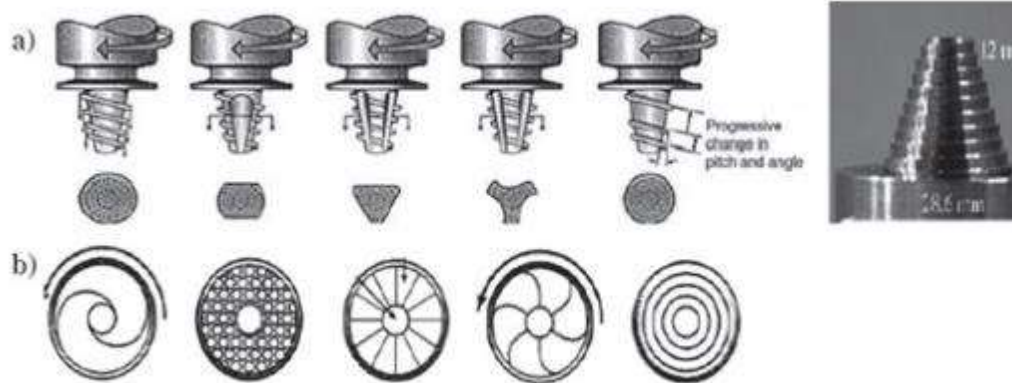


Figura 25 Hombro (Shoulder) y Punta Roscada (Pin threaded)

Fuente: (Vision Electronica, 2013)

Como se mencionó anteriormente, la herramienta tiene dos funciones principales: (a) calentamiento localizado, y (b) de flujo de material. En la etapa inicial, la herramienta se introduce en la junta, el calentamiento se debe principalmente a la fricción entre el pasador y la pieza de trabajo. La herramienta se hunde hasta que el hombro toca la pieza de trabajo. La fricción entre el hombro y la pieza de trabajo da como resultado un mayor incremento en la temperatura que permite llegar al estado plástico de las piezas a soldar. La segunda función de la herramienta es la "agitación" y "movimiento" del material. La uniformidad de la microestructura y propiedades, así como las cargas de procesos se rigen por el diseño de la herramienta. En general, se utiliza un hombro cóncavo y pasadores cilíndricos roscados como se observa en la siguiente figura 26:

Figura 2. Tipos de herramientas con pin cónico roscado: (a) formas del pin cónico roscado, (b) formatos de hombro.



Fuente: a [2], b [3].

Figura 26 Tipos de herramientas para FSW

Fuente: (Vision Electronica, 2013)

2.7.1.1. Velocidad de rotación

La velocidad de rotación es una variable esencial ya que es la encargada de producir calor hasta llegar al punto de plasticidad de las superficies del empalme. Se maneja un rango amplio de esta velocidad que desde (300-3000) RPM.

2.7.1.2. Presión de soldadura, fuerza de forja

La presión de soldadura regula la temperatura en la zona de soldadura. La presión específica depende de los metales que se van a unir y de la geometría de la unión. El intervalo de presiones que puede aplicarse para obtener buenas soldaduras es bastante amplio. En el caso de aceros dulces, son aceptables presiones de calentamiento de (76-152) MPa.

La fuerza de forja es una carga aplicada a compresión de las superficies de contacto después de que la fase de fricción del ciclo de soldadura está esencialmente completa. Ver figura 27

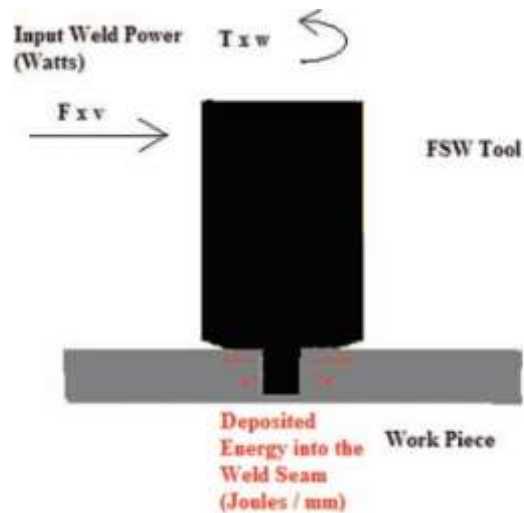


Fig. 17 FSW energy model

Figura 27 Fuerza de compresión de acción perpendicular sobre las superficies a soldarse

Fuente: (Longhurst)

2.7.1.3. Velocidad de desplazamiento

La velocidad de desplazamiento permite que exista una buena unión entre el material de las piezas a soldar. Su rango de trabajo dependiendo del tipo de material va desde 30 hasta 300 mm/min.

2.7.1.4. Ángulo de inclinación

El ángulo de inclinación permite que exista la agitación necesaria para que en estado plástico la unión de la junta se desarrolle correctamente. Su rango es relativamente pequeño pero de gran repercusión va de $(1-4^\circ)$. La utilización es para compensar gradientes térmicos en materiales disimiles o para soldadura de espesores disimiles.

2.7.2. Temperaturas de operación

Las temperaturas del proceso no superan los 720°C zona en la cual existe una transformación de fases del acero desde una microestructura de estado sólido hacia un cambio en estado líquido tal como se observa en la siguiente figura 28.

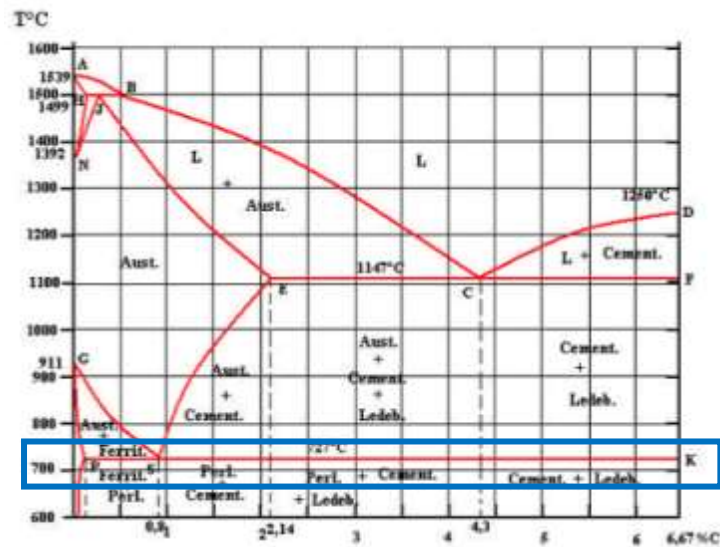


Figura 28 Diagrama Hierro Carbono y temperatura de transformación de fase alrededor de 720 °C para un estado isotérmico

Fuente: (Diagrama Fe-C, 2013)

2.7.2.1. Precalentamiento

El precalentamiento está fundamentalmente determinado por el espesor del material y por la composición química así como su relación de enfriamiento. Para el proceso FSW es mandatorio y dependerá a su vez de la velocidad de herramienta y de las capacidades de la máquina – herramienta utilizada. Para el caso particular de este proyecto las temperaturas de precalentamiento desde el inicio de las pruebas han superado los 250 °C.

2.7.2.2. Enfriamiento

El enfriamiento determinará para este proceso el grado de deformación térmica que se obtenga en la junta soldada. En espesores pequeños, valores inferiores a 20 mm y en soldaduras de acero al carbono no se ha observado un control del gradiente de enfriamiento para el proceso FSW, sin embargo en este proyecto se ha efectuado la observación de la temperatura en un rango hasta 120 segundos con los resultados de un enfriamiento progresivo.

2.7.3. Otras variables del proceso FSW

Se tienen otras variables para el proceso FSW identificando entre las principales las siguientes:

2.7.3.1. Tipo de junta

El tipo de junta influye en la unión que se quiera llevar a cabo, por esta razón es importante tener en cuenta para este proceso (FSW) que junta se va a llevar a cabo. (ver figura 29).

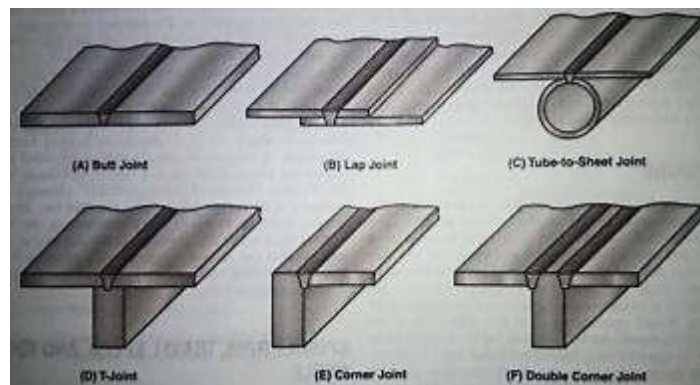


Figura 29 Diseños básicos de juntas utilizadas en proceso FSW

Fuente: (Welding Processes Part 2., 2007)

2.8. Parámetros del proceso FSW

2.8.1. Velocidad de rotación o periferia

La función de velocidad de rotación es producir calor hasta llegar al punto de fusión de las superficies del empalme. Desde el punto de vista de la calidad de la soldadura, la velocidad casi nunca es una velocidad crítica debido a que puede variar dentro de un rango de tolerancia bastante ancho y aun así producir soldaduras firmes. Por lo tanto, un aumento de la velocidad de rotación de la herramienta no hace que el coeficiente de fricción en la interfaz cambiara. (ver figura 30).

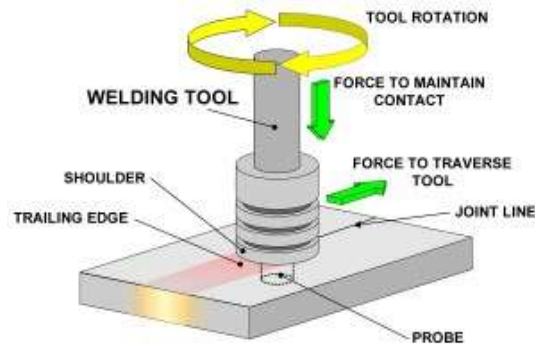


Figura 30 Velocidad de Rotación o periférica

Fuente: (Machinery, 2012)

Para el proceso FSW (Friction Stir Welding) se tiene dos parámetros importantes: velocidad de rotación de la herramienta (rpm) en sentido horario o anti horario y una velocidad de desplazamiento (mm/min) a lo largo de la línea de soldadura. El movimiento de la herramienta genera calor por fricción dentro de las piezas de trabajo, mientras que el material plastificado se va ablandando alrededor de ella con el fin de formar una unión sin fisuras de estado sólido.³

A medida que la herramienta gira y se mueve a lo largo de las superficies a ser soldadas, se genera calor en el hombro / pieza de trabajo y, en menor medida en las superficies del pin que sujeta a la herramienta de trabajo, como resultado de la disipación de fricción-energía.

La velocidad de soldadura depende de varios factores, como el tipo de aleación, velocidad de rotación, la profundidad de penetración, y tipo de unión. A mayor velocidad de rotación de la herramienta se generan una temperatura más alta debido a mayor calentamiento por fricción y el resultado será mayor intensidad de agitación y una mezcla de material. Durante el tiempo de soldadura, el material desde el borde delantero se mueve hacia la salida debido a la rotación y desplazamiento de la herramienta, y este material transferido, está consolidado en el borde de salida de la herramienta por la aplicación de una fuerza axial.⁴

³ Mishraa R.S., Maba Z.Y., Friction stir welding and processing", Materials Science and Engineering R 50 (2005), page 71–78.

⁴Kumar K., Kailas Satish V., On the role of axial load and the effect of interface position on the tensile strength of a friction stir welded aluminium alloy, Materials and Design 29 (2008) 791–797.

Para el acero, la velocidad de rotación de la herramienta debe estar en el rango de 1000-3000 rpm. Cuando se tiene menor velocidad producen pares de torsión muy altos que causan problemas en la sujeción de trabajo, desgarramiento metálico y poca fluidez de material. Mientras que cuando el tiempo de calentamiento es más largo, precalienta el metal y así controla la rapidez de enfriamiento para evitar agrietamiento por templeado.

2.8.2. Tiempo de calentamiento

Es difícil producir soldadura continua sin defectos. En estos casos, el precalentamiento o fuente de calor externa adicional puede ayudar al flujo de material y aumentar el proceso de producción, por lo que se determina durante la preparación o en base a una experiencia previa. Un tiempo de calentamiento excesivo limita la productividad y desperdicia material; un tiempo insuficiente en cambio puede producir calentamiento no uniforme así como el atrapamiento de óxidos y áreas no adheridas en la interfaz. El calentamiento no uniforme es típico de las soldaduras por fricción en barras. Cerca del centro de la barra en rotación, la velocidad superficial puede ser demasiada baja para generar un calentamiento friccional adecuado, de modo que debe haber difusión térmica desde la parte superficial del empalme para que la unión global sea firme.⁵

2.8.3. Tiempo De Transición

Aplicado solamente a la soldadura de tubería y soldadura inercial. Mientras la herramienta gira ejerciendo presión sobre el material se produce la etapa de calentamiento del material, una vez realizado este proceso comienza la etapa de transición, en la cual se desconecta el motor y se aplica el mecanismo de freno; en este proceso la velocidad desciende bruscamente a la vez que la fuerza axial se incrementa hasta el valor de forja donde el acortamiento de las piezas se incrementa.

⁵ Mishraa R.S., Maba Z.Y., Friction stir welding and processing“, Materials Science and Engineering R 50 (2005), page 7-8.

2.8.4. Tiempo De Soldadura

Una vez que la interfaz de la pieza de trabajo con la herramienta se calienta suficientemente hacia arriba, la herramienta es atravesada a lo largo de la dirección deseada para lograr la unión. Esta es la fase de soldadura real y se puede realizar bajo un modo controlado por desplazamiento, donde la posición de la herramienta con respecto a la superficie de la pieza se mantiene constante o el modo de fuerza controlada donde la fuerza normal aplicada por la herramienta a la pieza de trabajo se mantiene constante. Al término del proceso de unión, la herramienta finalmente se retira de la pieza. En la figura 31 se presenta un esquema de la fuerza en función del tiempo durante la soldadura por fricción (FSW).

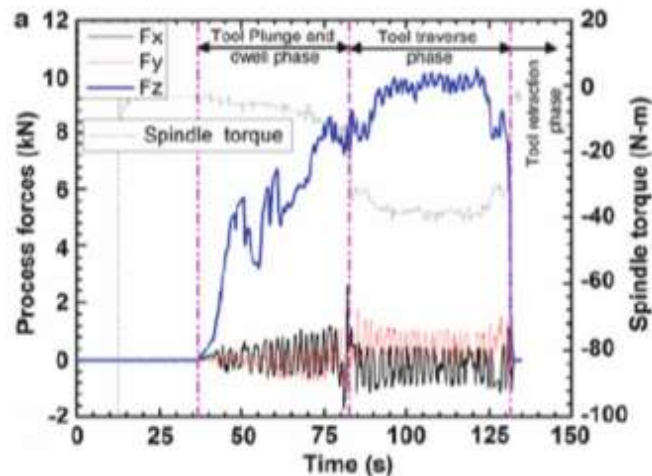


Figura 31 Fuerzas F_x , F_y , F_z que actúan sobre la herramienta durante la soldadura

Fuente: (R.S. Mishra et al., 2014)

En esta parte se considera los efectos físicos que se producen en las diferentes posiciones de la interfaz de la herramienta / pieza de trabajo durante la fase de desplazamiento. En la figura 32 se presenta el hombro de la herramienta giratoria la cual presiona sobre la pieza de trabajo (AB interfaz / A'B'), ocasionando plasticidad generado por el calor de fricción en el metal. Algunas fracciones del hombro de la herramienta se calientan debido al movimiento de rotación y este suaviza el metal adyacente a la clavija. El metal fluye alrededor de la clavija, lo que resulta en la unión de la costura de soldadura. El tiempo que dura este proceso dependerá del

material que se vaya a soldar y del desplazamiento longitudinal de la herramienta.

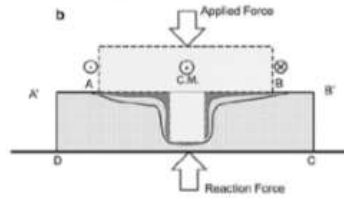


Figura 32 Sección transversal de la herramienta de soldadura por fricción y la pieza de trabajo

Fuente: (R.S. Mishra et al., 2014)

En la tabla 1 se presenta un cuadro con los parámetros de soldadura que garantiza un resultado satisfactorio considerando las propiedades del material y su diámetro.

Tabla 1.
Parámetros de soldadura para diferentes materiales.

Material	Diámetro	Velocidad	$P_{\text{calentamiento}}$	P_{forja}	Tiempo
	mm	rpm	Mpa	Mpa	S
Acero al carbono	12,7	3000	35	32	5
	25,4	1500	52	52	15
Acero inoxidable	12,7	3000	110	110	17
	25,4	8000	140	140	35
Acero inoxidable-Acero aleado	19	3000	52	104	10
Acero para herramientas	19	4000	104	208	10
Cobre	25,4	6000	34	65	18
Aluminio	19	2800	28	45	6
Acero aleado	9	2800	172	276	10
Acero aleado - Acero al carbono	44,5	3000	38	110	26

Fuente:

<http://monografias.umcc.cu/monos/2014/Facultad%20de%20Ciencias%20Tecnicas/mo1485.pdf>

CAPÍTULO 3

MATERIALES

La compatibilidad de materiales a ser soldados y materiales de la herramienta para el proceso FSW es de vital importancia debido a los gradientes de temperatura a los cuales son sometidos, esto permitirá la selección y adecuada aplicación de cada uno de ellos hasta obtener los mejores resultados deseados, esto evidentemente a partir de las propiedades del material base a ser soldado.

3.1. Compatibilidad De Materiales

Algunos factores pueden ser incluidos en la definición de soldabilidad para el proceso FSW, la utilización del proceso, la relación de producción, la cantidad de las fuerzas resultantes, la herramienta requerida. El proceso FSW es bien entendido cuando se lo observa desde el punto de vista de un proceso de trabajo que requiere un pre calentamiento del material base y acorde al código en referencia un tratamiento térmico post soldadura con el objetivo de obtener bajos esfuerzos de fluencia.

Aleaciones de aluminio y magnesio tienen relativamente buena soldabilidad debido a la velocidad rápida de soldadura y al uso de una máquina y herramienta de bajo costo y adicionalmente la baja temperatura de operación.

Las microestructuras en varias regiones de la soldadura FSW para aleaciones de aluminio se desarrollan y se presentan en concordancia con los ciclos termomecánicos localizados. En general las aleaciones de aluminio pueden ser fortalecidas mediante un proceso de endurecimiento por precipitación durante el envejecimiento y/o el trabajo en frío. La demanda de aleaciones de magnesio está incrementando en el mundo debido a la baja densidad, resistencia a la tensión y módulo de elasticidad de estas aleaciones. Estas aleaciones proveen buenas relaciones resistencia – peso y son importantes en la industria aeroespacial y de transporte para componentes críticos.

Aleaciones de cobre son más difíciles de soldar por el proceso FSW puesto que requieren mayores temperaturas y puesto que requieren de

herramientas hechas de tungsteno y aleaciones de nickel. En la zona de rotación se han reportado temperaturas de hasta 800°C con lo cual es muy importante seleccionar el material de la herramienta puesto que puede generar desgaste y fractura. Aceros de herramientas, carburos cementados, cerámicos, tungsteno, molibdeno y súper aleaciones de nickel han sido probados como herramientas para la soldadura de cobre con los siguientes resultados:

- Aceros de máquinas herramientas no son recomendadas para la soldadura FSW por cuanto se genera rápido y excesivo desgaste.
- Herramientas rotativas de carburos y cerámicos tienden a fracturarse fácilmente.
- Aleaciones de nickel son las mejores, particularmente el material nimónico 105 (un tipo de aleación especial patentada).

Titanio, acero, aceros inoxidable y aleaciones de nickel son más competitivos para soldar. Este tipo de materiales requieren herramientas de molibdeno (Mo), tungsteno – renio (W-Re) o nitruros de boro cúbicos (CBN) a velocidades transversales relativamente más lentas.

En aceros AISI 1018 mediciones de termocuplas y caracterización microestructural indicaron que los picos de temperaturas en la zona de rotación alcanzaron el campo de la zona austenítica. Picos de temperatura fueron estimados que excedieron 1100 °C (2012 °F) y pueden alcanzar alrededor de 1200 °C (2192 °F) con relaciones de enfriamiento aproximadas de 5 hasta 10 °C/s ($\Delta T_{8-5} = 50$ s a 60 s).

Aleaciones refractarias tales como aleaciones de molibdeno y tungsteno no han sido exitosamente soldados por cuanto no se cuenta con materiales más duros para la herramienta.

La figura 33, gráficamente lista la mayoría de combinaciones de materiales los cuales pueden ser unidos utilizando varios procesos FSW.

Algunas combinaciones no marcadas pueden también ser soldadas sin embargo los datos no han sido presentados en la figura.

THIS LIST WAS COMPILED FROM AVAILABLE FRICTION WELDING LITERATURE. EACH MANUFACTURER OF FRICTION WELDING EQUIPMENT HAS DIFFERENT KNOW-HOW AND EXPERIENCE IN WELDING SOME OF THESE MATERIALS.

	ZIRCONIUM ALLOYS	VALVE MATERIAL (AUTOMOTIVE)	VANADIUM	URANIUM	TUNGSTEN CARBIDE CEMENTED	TUNGSTEN	TITANIUM ALLOYS	TITANIUM	THORIUM	TANTALUM	STEEL — TOOL	STEEL — STAINLESS	STEEL — SINTERED	STEEL — MARAGING	STEEL — FREE MACHINING	STEEL — CARBON	STEEL — ALLOYS	SILVER ALLOYS	SILVER	NIObIUM ALLOYS	NIObIUM	NIMONIC	NICKEL ALLOYS	NICKEL	MONEL	MOLYBDENUM	MAGNESIUM ALLOYS	MAGNESIUM	LEAD	IRON SINTERED	COPPER NICKEL	COPPER	COLUMBIUM	COBALT	CERAMIC	CAST IRON	CARBIDES CEMENTED	BRONZE	BRASS	ALUMINIUM ALLOYS	ALUMINIUM									
ALUMINIUM																																																		
ALUMINIUM ALLOYS																																																		
BRASS																																																		
BRONZE																																																		
CARBIDES CEMENTED																																																		
CAST IRON																																																		
CERAMIC																																																		
COBALT																																																		
COLUMBIUM																																																		
COPPER																																																		
COPPER NICKEL																																																		
IRON SINTERED																																																		
LEAD																																																		
MAGNESIUM																																																		
MAGNESIUM ALLOYS																																																		
MOLYBDENUM																																																		
MONEL																																																		
NICKEL																																																		
NICKEL ALLOYS																																																		
NIMONIC																																																		
NIObIUM																																																		
NIObIUM ALLOYS																																																		
SILVER																																																		
SILVER ALLOYS																																																		
STEEL — ALLOYS																																																		
STEEL — CARBON																																																		
STEEL — FREE MACHINING																																																		
STEEL — MARAGING																																																		
STEEL — SINTERED																																																		
STEEL — STAINLESS																																																		
STEEL — TOOL																																																		
TANTALUM																																																		
THORIUM																																																		
TITANIUM																																																		
TITANIUM ALLOYS																																																		
TUNGSTEN																																																		
TUNGSTEN CARBIDE CEMENTED																																																		
URANIUM																																																		
VANADIUM																																																		
VALVE MATERIAL (AUTOMOTIVE)																																																		
ZIRCONIUM ALLOYS																																																		

■ FULL STRENGTH METALLURGICAL BOND. (IN SOME CASES IT MAY BE NECESSARY TO PERFORM AN APPROPRIATE POST WELD HEAT TREATMENT TO REALIZE THE FULL WELD STRENGTH.)

▣ CAN BE FRICTION WELDED, BUT WILL NOT PRODUCE A FULL STRENGTH BOND.

Figura 33 Combinación de materiales soldables por soldadura de fricción

Fuente: (Welding Processes Part 2., 2007)

3.2. Parámetros De Soldadura

Los parámetros de la soldadura por fricción están definidos en términos de la composición del material que será soldado. Un incremento en las medidas y parámetros especificados dentro del procedimiento

establecido requerirá un análisis ya que afectarían en las propiedades mecánicas y requerirá recalificación del mismo.

La dureza de los aceros puede requerir incrementar la energía de entrada, precalentamiento o tratamiento posterior a la soldadura para controlar las transformaciones de fase y evitar la fisuración. Otras manipulaciones térmicas pueden ser requeridas para controlar la microestructura de aleaciones endurecidas por precipitación.

Los ciclos térmicos experimentados por el material dentro y alrededor del área de la soldadura tienen una profunda influencia sobre la microestructura final, las propiedades mecánicas, los esfuerzos residuales y la distorsión de la unión soldada.

El campo térmico es inherentemente asimétrico respecto del centro de la línea de avance de la soldadura debido a las diferencias en la generación de calor entre los lados de avance y retroceso. Adicionalmente se tiene transferencia de calor conductiva y convectiva.

La figura 34, muestra los perfiles de temperatura en los planos X-Z, Y-Z y X-Y para un proceso de soldadura FSW de un material Aluminio AA6061 utilizando una herramienta H-13 con un usillo de radio 6 mm y un radio de cono de 23 mm, presión axial 12,7 MPa, velocidad de avance 1,59 mm/s y una velocidad de rotación del usillo de 344 RPM.

En algunas simulaciones efectuadas para la dirección de la herramienta de la soldadura de fricción rotativa han sido modelados. La fuente de calor ha sido modelada considerando la disipación viscosa de la energía mecánica. Los resultados sugieren que los siguientes regímenes de flujo existen como una función de la distancia desde la plataforma del usillo, ver figura 35:

1. Una región de rotación justo debajo de la plataforma donde el flujo ocurre en la dirección de la rotación de la herramienta.
2. Una región cerca de la base de la herramienta donde el material es extruido después de la punta, y
3. Un área de transición entre las dos regiones, donde el flujo es caótico. Ver la figura 36.

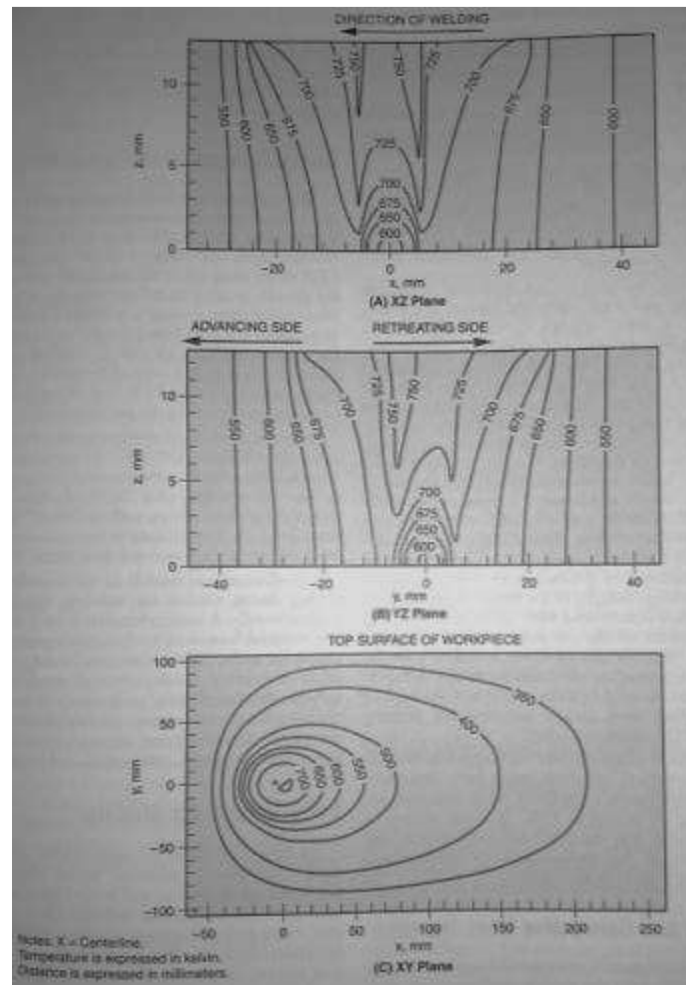


Figura 34 Temperatura ($^{\circ}$ K) perfiles de distribución de temperatura para una soldadura FSW de un aluminio AA6061 en (A) plano XZ, (B) Plano YZ y (C) Plano XY

Fuente: (Welding Processes Part 2., 2007)

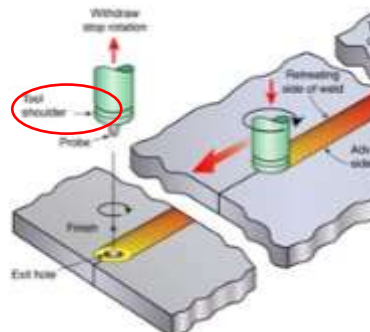


Figura 35 Identificación de la plataforma del usillo

Fuente: (TWI)

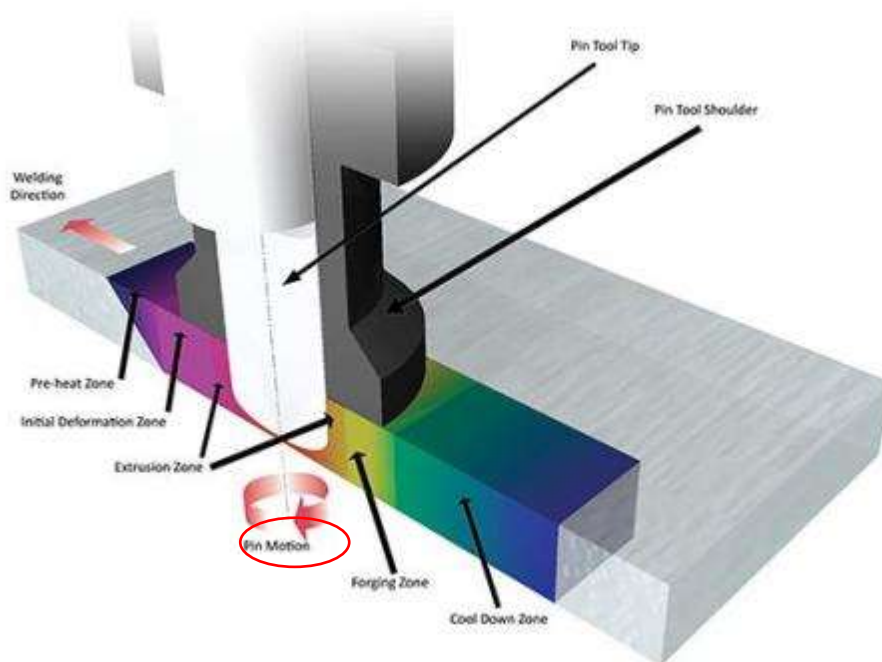


Figura 36 Áreas de la soldadura de fricción rotativa

Fuente: (PAR SYSTEMS)

3.3. Requerimientos De Calidad Del Material

Los materiales que son considerados difíciles de soldar con el proceso FSW son aquellos como los utilizados para rodamientos, hierros fundidos, aceros de maquinabilidad con alta concentración de sulfuros, plomo o telurio o materiales con altas propiedades de direccionales como por ejemplo el berilio.

La calidad de los materiales es muy importante tanto en la detección de discontinuidades propias del material base antes de iniciar el proceso de soldadura y las discontinuidades propias de este proceso de soldadura una vez completada la misma.

No existen estándares, especificaciones o códigos de construcción que hayan detallado discontinuidades visibles, superficiales y volumétricas propias para este proceso, sin embargo se han identificado discontinuidades. Mediante las siguientes técnica de examinación citadas en la tabla 2.

Tabla 2.
Técnicas de Examinación no Destructiva y Aplicabilidad de Defectos

Table 1
Nondestructive Examination Techniques and Defect Applicability

Inspection Technique	Detectable Friction Weld Defect or Characteristic						
	Crack	Incomplete Weld	Inclusion	Intermetallic Compound	Overlapping (Appendix D)	Hardness	Weld & HAZ Position
Ultrasonic	X	X	X				
Magnetic Particle	X	X	X				
Radiography	X	X			X		
Penetrant ^a	X	X	X				
Leak Test	X	X					
Visual	X	X			X		
Surface Etch ^a	X	X	X				X
Proof Test (Pressure or Load)	X	X					X
Acoustic Emission	X	X		X			
Hardness						X	
Eddy Current ^a	X	X	X				X
Dimensional					X		X

^aSurface only after upset removal

Fuente: AWS C6.1.

3.3.1. Requerimientos de Inspección Visual

Las discontinuidades típicas son fisuración debido a la presencia de un enfriamiento muy rápido de la junta soldada, la presencia de una microestructura frágil susceptible a la presencia de hidrógeno y cargas existentes de pretensión, de sujeción y residuales que pueda generar este tipo de defectos. La fusión incompleta de la junta se puede producir principalmente debido a una separación existente en la preparación de los materiales, esto se puede evitar verificando correctamente la separación o apertura del bisel plano. Finalmente se puede observar traslape debido a la desalineación de los materiales previo el inicio de la soldadura, en algunos casos para compensar esto se puede inclinar la herramientas hasta un ángulo de 4° con el objetivo de evitar este tipo de discontinuidades.

3.3.2. Requerimientos de inspección superficial - líquidos

Las discontinuidades típicas a ser detectadas por este método de ensayo no destructivo es la fusión incompleta e inclusiones. En cuanto a defectos se pueden observar fisuras por ambos lados. La aplicabilidad de éste método de inspección está limitado a la detección de discontinuidades superficiales solamente a través de un método C visible removible con solvente. En el caso de que sea necesario incrementar el nivel de sensibilidad se puede

aplicar como técnica alterna una inspección fluorescente con un nivel de sensibilidad 3 o 4 con el objetivo de descargar fisuras debido a cambios microestructurales por presencia de martensita en la zona afectada térmicamente por el calor.

3.3.3. Requerimientos de inspección volumétrica - ultrasonido

El método de inspección volumétrico conocido como ultrasonido aplicado en la técnica convencional de haz angular o por arreglo de fases permite la identificación de discontinuidades volumétricas tales como fisuras, fusión incompleta o inclusiones. La principal ventaja de éste método es la determinación exacta del posicionamiento de la indicación, al indicar vectorialmente el hallazgo en el espesor del material soldado se puede corregir los parámetros directamente en la soldadora sin necesidad de efectuar ensayos mecánicos que resultaren rechazados en su momento.

3.3.4. Dureza

Cuantificar los perfiles de dureza a lo largo de la sección transversal y longitudinal del cordón de soldadura permite determinar importantes propiedades del material tales como la ductilidad y la necesidad de efectuar o no un tratamiento posterior a la soldadura de ahí su importancia. El perfil de microdureza por otra parte permitirá directamente corregir los parámetros de velocidad de avance del usillo (velocidad longitudinal) y rotación como segunda variable debido a que al tener más puntos cercanos, sobre una misma sección, para la zona del material, zona afectada por el calor y zona de la soldadura se podrá corregir inclusive antes de la aplicación de un ensayo no destructivo superficial o volumétrico respectivamente.

3.4. Tratamiento térmico de elementos soldados por fricción

La soldadura de fricción causa un tipo de calentamiento localizado alrededor del eje de avance del usillo. La zona afectada térmicamente por el calor es susceptible a relaciones de enfriamiento muy rápidas [$\Delta T(\text{temperatura})/s(\text{tiempo})$] un efecto de masa conocido como, efecto de templado, esto principalmente por la rápida conductividad térmica del material con el metal base que se encuentra en un estado más frío.

La necesidad de un tratamiento térmico posterior a la soldadura es afectada directamente por algunas variables las cuales pueden incluir:

- Dureza del material
- Geometría de la junta
- Parámetros de soldadura

El calor residual de las operaciones de soldeo normalmente es considerado como beneficioso para el proceso puesto que evita el fenómeno de masa conocido como templado principalmente sobre aceros endurecidos, sin embargo, mucha concentración de calor puede reducir la dureza en áreas de alta concentración de esfuerzos que se encuentren cercanas a la soldadura.

Para los siguientes tipos de materiales: aceros al carbono, aleados, para herramientas, y algunos inoxidable, pueden sufrir enfriamientos bruscos que generen una microestructura martensítica. El alivio de tensiones o el revenido pueden ser requeridos para alivio de esfuerzos residuales o para reducir los niveles de dureza encontrados en la ZAC o en la zona de la soldadura. Esto es aplicable normalmente cuando se requiere ciertas propiedades mecánicas de la zona de la soldadura las cuales incluyen: resistencia, tenacidad, propiedades para la fatiga y ductilidad entre las principales.

Cuando los materiales antes mencionados son soldados por FSW la dureza de la zona de la soldadura y de la ZAC estará afectada por el contenido de carbono presente, los elementos aleantes, la geometría de la interface de la soldadura, superficies adjuntas y parámetros de soldadura.

Como una guía general, el alivio de tensiones o un revenido será necesario cuando el material supera las propiedades de dureza de un material AISI 1035.

Materiales con una muy alta dureza usualmente requieren un revenido inmediatamente después de completarse la soldadura. Un ejemplo de estos son por ejemplo el AISI 4140, AISI 8645 y aceros para herramientas, estos podrían ser considerados como posibles candidatos a un proceso de tratamiento térmico posterior a la soldadura. En términos generales la

mayoría de las aleaciones y los aceros para herramientas serán tratados térmicamente una vez que se haya completado la soldadura para obtener propiedades mecánicas deseadas tales como: resistencia a la tensión, resistencia a la fatiga, tenacidad y ductilidad.

Materiales endurecidos por envejecimiento son otra importante clase de materiales. Este tipo de materiales son suaves una vez completada la soldadura. Un tratamiento posterior a la soldadura normal para este tipo de materiales es aplicado para obtener una mayor resistencia con mejores propiedades de ductilidad que en muchas ocasiones inician con una solución de tratamiento térmico como por ejemplo (Temple al aire o en agua). Un subsecuente proceso de envejecimiento desarrolla resistencia y dureza.

Los siguientes materiales aleados se mencionan a continuación, se puede someter a un pre calentamiento y a tratamiento térmico post soldadura

- a) Aceros inoxidables endurecidos por precipitación.
- b) Aceros martensíticos
- c) Aleaciones de aluminio
- d) Aleaciones de nickel
- e) Aleaciones de titanio alfa – beta
- f) Aleaciones de magnesio

Ciertas aleaciones de este tipo de materiales antes mencionados pueden ser soldados antes y después de un tratamiento térmico, sin embargo en cualquiera de los casos, una porción de la zona afectada por la soldadura se encontrará en una microestructura blanda a ser tratada térmicamente para desarrollar resistencia a través de un envejecimiento posterior a la soldadura.

Cuando materiales disimiles son soldados, la geometría de la junta, la composición química y la conductividad térmica de todos los componentes deben ser considerados para determinar cuál material la necesidad del tratamiento térmico posterior a la soldadura. Cuando se suelda con combinaciones de materiales disimiles que pueden formar compuestos intermetálicos, debido al ciclo térmico de la soldadura de fricción y debido a

la contribución del tratamiento térmico en la formación de estos compuestos, se debe considerar el tiempo de exposición en las interfaces de la soldadura a temperaturas que formen estos compuestos, este tiempo debe ser el menor posible.

El tratamiento térmico de juntas de soldadura de fricción no está siempre limitado a un tratamiento posterior a la soldadura. Componentes o partes son comúnmente precalentados antes de la aplicación de la soldadura usualmente para disminuir el gradiente de enfriamiento reduciendo de esta forma el gradiente de masa después de la soldadura. Esta aplicación es considerable por ejemplo cuando se tiene espesores diferentes en donde la relación de masas produce un enfriamiento considerable del uno respecto del otro.

El uso de materiales para la herramienta de una máquina de proceso FSW permite temperaturas de hasta 800 °C y por debajo lo cual, una vez seleccionado, admite para un acero al carbono de las propiedades del material ASTM A572 Gr. 50 disipar la suficiente cantidad de calor que no genere discontinuidades del proceso. Controlada esta deformación térmica a través de materiales, el siguiente parámetro a considerarse son las velocidades de operación y los resultados del proceso a través de ensayos no destructivos que pueden ser aplicados para el control visual, superficial y volumétrico.

Para el acero ASTM A572 Gr. 50 el tratamiento térmico posterior a la soldadura es necesario para un alivio de tensiones y para espesores mayores a 20 mm, para la soldadura FSW de este proyecto no se ha considerado debido al espesor que se está soldando y a la administración de la temperatura de precalentamiento.

CAPÍTULO 4

DESARROLLO DE PRUEBAS PARA EL PROCEDIMIENTO

El desarrollo de un procedimiento de soldadura implica identificar todas aquellas variables que corresponden a la elaboración del mismo bajo los parámetros internacionales establecidos y que son parte de la caracterización de un proceso específico de la soldadura con resultados que tengan trazabilidad principalmente.

Las pruebas a efectuarse plantean probar diferentes espesores (ver figura 37) y combinaciones de parámetros del equipamiento que permitan consolidar resultados repetibles y que se puedan utilizar en una soldadura de producción. Las pruebas incluyen para un mismo material (ASTM A572 Gr. 50), espesores de 10, 8 y 6 mm y combinaciones de velocidades de giro y velocidades de avance hasta obtener una soldadura sana.

Los resultados de las pruebas iniciales y la modificación de sus parámetros serán planteados en formatos de reportes correspondientes a anexos que son parte de éste proyecto.



Figura 37 Preparación de planchas para espesores de 8 y 10 mm.

4.1 Requerimientos Del Procedimiento

Para generar calentamiento por fricción, debe existir rotación relativa y una fuerza normal entre las caras a ser soldadas. En prácticamente la mayoría de las máquinas de soldadura por fricción, el movimiento es rotativo

y la fuerza es aplicada axialmente o de manera perpendicular al plano de rotación (ver figura 38.)

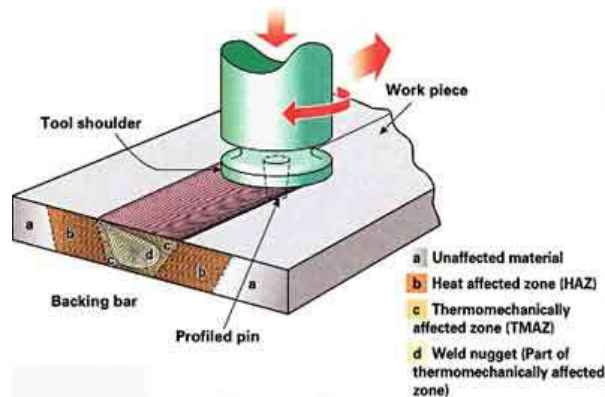


Figura 38 Modo de aplicación del calentamiento por fricción

Fuente: (TWI)

La velocidad de rotación y la fuerza para la soldadura deben ser lo suficientemente grandes para adquirir alta temperatura y generar la soldadura. Los parámetros específicos dependen de la composición, el tamaño y la geometría de las piezas a soldarse. Para la mayoría de las máquinas de soldadura FSW, éstas administran los siguientes parámetros:

4.1.1. Presión de soldadura

Es importante controlar la presión de soldadura ya que ésta influye en la temperatura de la zona de soldadura y en la forja al momento de la coalescencia de los materiales. Esta presión depende del tipo de acero del material a soldar y de la geometría de la unión, el intervalo presiones que puede aplicarse es de 76 a 152 MPa, este valor depende de la etapa de aplicación que puede ser calentamiento o forja, también depende de las propiedades del acero del material base y de su espesor.

4.1.2. Velocidad de desplazamiento

La velocidad de desplazamiento se debe controlar para efectuar una correcta unión al momento de la unión, las velocidades recomendadas están en el rango de 20 a 180 mm/min dependiendo del equipamiento con el que se cuente, se puede disponer de máquinas especialmente diseñadas para este proceso donde velocidad de soldeo mayores pueden ser alcanzadas o

se puede disponer de máquinas – herramientas donde se puede obtener menores valores de velocidad de desplazamiento.

4.1.3. Velocidad de rotación

La velocidad de rotación de la herramienta es otorgada por la máquina, es decir, la máquina debe tener la capacidad de controlar esta velocidad en un rango de 800 a 3600 rpm. Hay que tomar en cuenta que este parámetro varía de acuerdo a la dureza y espesor del acero a soldar. (Ver figura 39).



Figura 39 Velocidad de rotación de 3000 RPM para la máquina – herramienta utilizada.

4.2. Partes Permisibles Del Procedimiento

Las especificaciones del procedimiento proporcionan requerimientos mínimos que son dados para la soldadura por fricción rotatoria (FSW) tanto para soldadura de fricción continua lineal como soldadura de fricción rotativa inercial. Todas las instrucciones y especificaciones del procedimiento de soldadura deberán satisfacer los requerimientos de este proceso y los documentos de aplicación para el tipo específico de soldadura de fricción que se esté utilizando. Algunos parámetros no serán utilizados en este proyecto sin embargo se han señalado todas las partes permisibles especificados en la especificación AWS C 6.2 / 6.2M: 2006.

Dependiendo del proceso de soldadura por fricción en particular utilizado, los siguientes parámetros son parte del procedimiento de soldadura:

1. Material a ser soldado, especificación y composición química

2. Condición metalúrgica del material a ser soldado
3. Dimensiones de la pieza y las tolerancias requeridas
4. Procedimiento de preparación de superficies de contacto
5. Suspensión del componente en una pinza rotativa por extensión o longitud
6. Suspensión del componente en una pinza no rotativa o anclada
7. Tolerancias sobre el alineamiento axial
8. Área de la superficie de contacto
9. Precalentamiento
10. Energía de la soldadura
11. Volantes; para la inercia total
12. Velocidad de fricción
13. Fuerza de fricción para la soldadura
14. Tasa de retraso (aplicable para soldadura de tubería solamente)
15. Configuración de interrupción o tiempo de detenimiento con dimensiones y tolerancias
16. Velocidad de la forja
17. Fuerza de la forja
18. Tiempo de la forja
19. Longitud de la forja si un retraso limitado está siendo utilizado
20. Distancia al retrazador
21. Remoción del retrazador
22. Tratamiento térmico posterior a la soldadura
23. Requerimientos de inspección no destructiva
24. Atmósfera protectora

Al utilizar los parámetros mencionados, un suficiente número de soldaduras permitirían efectuar una inspección visual, metalúrgica y física. Los métodos y las técnicas de inspección deberían establecerse correctamente para determinar la integridad o sanidad de la junta soldada.

Los siguientes métodos pueden ser utilizados:

1. Inspección Visual
2. Inspección Dimensional

3. Monitoreo de parámetros
4. Inspección por Ultrasonido
5. Líquidos penetrantes, técnica visible o fluorescente
6. Partículas magnéticas, técnica visible o fluorescente
7. Corrientes de Eddy
8. Emisiones acústicas
9. Radiografía
10. Dureza
11. Examinación metalográfica
12. Pruebas mecánicas

Las partes utilizadas en el procedimiento con el objeto de calificar el procedimiento debe representativamente mostrar en producción los siguientes parámetros:

- a) Composición química
- b) Condición superficial de las superficies de contacto
- c) Condición de tratamiento térmico
- d) Geometría de la junta y masa rotacional
- e) Dimensiones de la pieza
- f) Plano dimensional de la herramienta para soldadura FSW

Las máquinas de fricción deberían ser capaces de unir materiales de soldabilidad conocida con un resultado de una sección uniforme hacia el material base. La calificación de las máquinas debería demostrar que las soldaduras efectuadas están dentro de los parámetros de diseño establecidos con las respectivas tolerancias en concordancia con los planos y especificaciones establecidas dentro de los requerimientos del fabricante del equipamiento de soldadura. (Ver figura 40).

Para la calificación del procedimiento referente al presente proyecto se especificarán variables que sean factibles acorde al apartado 6.2 de la especificación AWS C6.2/C6.2M:2006 citado en el Anexo 1.



Figura 40 Identificación de la máquina herramienta para el proyecto

4.3. Circunstancias Para La Recalificación

Un procedimiento de soldadura permanecerá calificado hasta que una de las siguientes variables sea modificada:

1. Modificaciones o reparaciones que afecten el desempeño de la soldadura en la máquina en la fue efectuada la junta soldada.
2. Dimensiones de los componentes que excedan las tolerancias establecidas en el procedimiento establecido (WPS_FSW.001).
3. Cambios en los materiales , en las condiciones de los materiales o en ambos respecto de los especificados en el procedimiento.
4. Cambios en las superficies de contacto diferentes a los especificados en el procedimiento de soldadura.
5. Cuando ocurra una no conformidad no explicada con los requerimientos de calidad aplicados para el WPS_FSW.001.

4.4. Requerimientos Para La Recalificación Del Procedimiento

Un WPS es desarrollado específicamente para una máquina de soldar y no debe ser utilizada para otra máquina sin una recalificación excepto por una aprobación entre el proveedor y el cliente.

La recalificación del procedimiento requiere de las mismas variables de un procedimiento nuevo.

4.5. Calificación del Operador de Soldadura

El proceso de soldadura FRW/FSW es una operación de soldadura controlada por una máquina automática por lo tanto los operadores no requieren de calificación, sin embargo el personal debe reunir los requerimientos de AWS C6.2/C6.2M:2006.

El personal que utiliza este tipo de maquinaria debe recibir entrenamiento previo provisto por el fabricante del equipo o por el entrenador en temas de seguridad para salvaguardar su integridad en la utilización del equipamiento de soldadura. Esto incluye la manipulación del equipamiento tanto eléctrica como mecánica incluyendo la manipulación de la herramienta y husillos de trabajo, ver figura 41.



Figura 41 Soldadura de fricción rotativa en progreso de dos planchas

4.6. Requerimientos de Calificación del Operador

Adecuadas instrucciones específicas deben ser orientadas hacia el Operador de la máquina de soldar por el Ingeniero, el supervisor de soldadura o cualquier operador que haya sido previamente calificado. Estas instrucciones deben incluir todos los temas del WPS sobre los cuales el Operador es responsable. En aquellos casos donde el operador necesita configurar la máquina, estos parámetros deben formar parte del entrenamiento previo a la calificación del operador. Después del entrenamiento el operador debe demostrar total seguridad para operar el

equipamiento y producir soldaduras sanas, los criterios de aceptación deben ser provistos por el departamento de ingeniería. El operador debe ser calificado para cada WPS específico de modo similar a los registros establecidos en la especificación AWS B2.1. Especificación para el procedimiento de soldadura y desempeño de la calificación. (Ver figura 42).



Figura 42 Entrenamiento al Operador para el control del precalentamiento

4.7. Requerimientos de recalificación del operador

Los requerimientos de recalificación del operador están a discreción del departamento de ingeniería responsable de la soldadura de éste proceso y debe estar fundamentado en la verificación de las variables que considere que cambien los resultados esperados. La evidencia de cada proceso debe ser registrada con el objetivo de analizar los resultados al variar el tipo de herramienta, velocidades y espesores entre los parámetros principales de control del proceso.

Los parámetros identificados en éste capítulo se han fundamentado en las recomendaciones de la normativa AWS (American Welding Society) para una soldadura FSW, se ha tomado los ensayos no destructivos disponibles en la empresa auspiciante y se ha elaborado la documentación correspondiente al procedimiento con la trazabilidad requerida y propia de este procedimiento.

Los registros de Calificación que sustentan la validación de los documentos pertenecientes al proyecto fueron testificados por un Inspector de Soldadura Certificado CWI.

El Inspector de soldadura está en potestad de restringir rangos de calificación y proponer re calificación acorde al código de fabricación o acuerdos contractuales.

CAPÍTULO 5

CALIDAD DE LAS SOLDADURAS

Los tipos de discontinuidades de soldadura encontradas en el proceso FSW son diferentes a aquellas encontradas en el proceso de soldadura por fusión. Debido a que el proceso FSW es un proceso unión en estado sólido, discontinuidades relacionadas con la solidificación del material tales como porosidad, inclusiones de escoria, fisuración en caliente son eliminadas. Sin embargo, otros tipos de discontinuidades pueden producirse.

5.1. Discontinuidades

Una discontinuidad se define como una interrupción en la continuidad del material, sobre su microestructura debido a una falta de homogeneidad en sus características físicas, metalúrgicas o mecánicas. Un defecto por otra parte es definido como una discontinuidad o como discontinuidades que por su naturaleza son perjudiciales en el funcionamiento de la pieza y que no cumplen los criterios mínimos de aceptación fundamentando en los estándares, códigos o especificaciones de diseño o construcción. Una discontinuidad no siempre es considerada un defecto. La terminología de defecto indica que la discontinuidad es rechazada, ver figura 43.


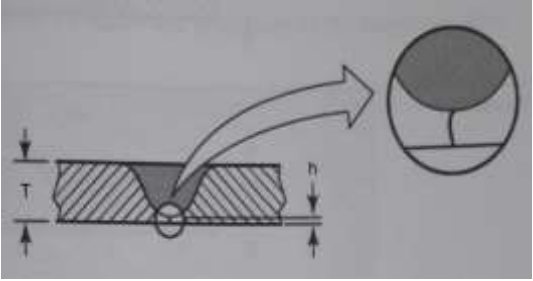
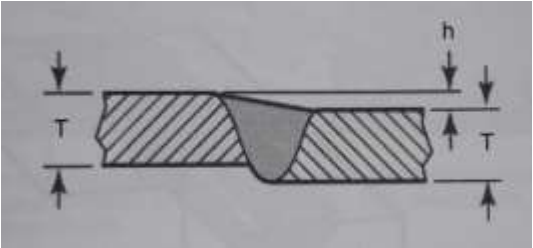
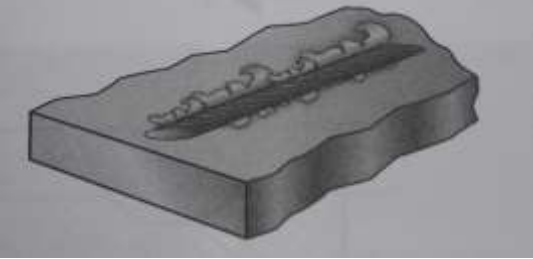


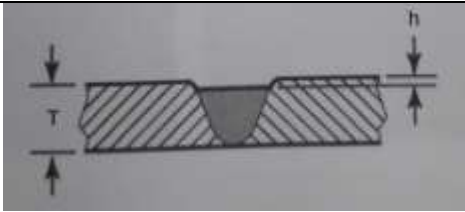
Figura 43 Secuencia de identificación de defectos

Fuente: (Ltda., 2016)

Algunos tipos de discontinuidades para el proceso FSW han sido identificados en la Tabla 3., en donde se especifica las discontinuidades asociadas al proceso.

Tabla 3.
Tipos de discontinuidades en soldadura por fricción rotativa FSW
Discontinuidades relacionadas con el proceso de soldadura o con el procedimiento

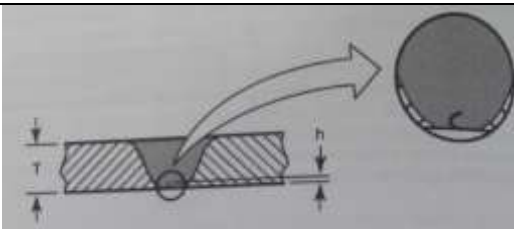
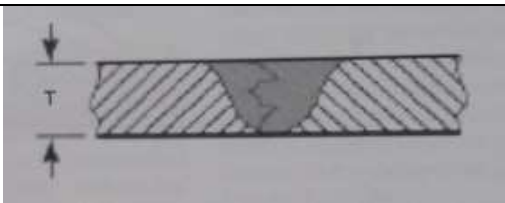
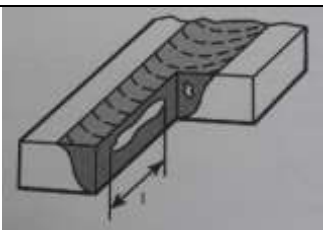
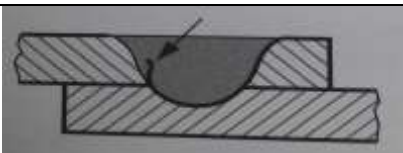
<p>(A) Penetración Incompleta. Se debe considerar si la junta es del tipo CJP (completa) o PJP (parcial)</p>	
<p>(B) Penetración Incompleta. No existe penetración de la soldadura hacia la raíz</p>	
<p>(C) Desalineamiento de la Junta. La elevación vertical durante la preparación de la junta</p>	
<p>(D) Destello excesivo de soldadura. Causado por un excesivo sobrecalentamiento del material o una velocidad lineal rápida</p>	

<p>(E) Falta de llenado. Debido al avance muy rápido y menor temperatura de precalentamiento</p>	
------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------

Fuente: (Welding Processes Part 2., 2007)

Por otra parte la tabla 4., muestra las discontinuidades metalúrgicas del proceso FSW.

Tabla 4
Tipos de discontinuidades en soldadura por fricción rotativa FSW
Discontinuidades metalúrgicas

<p>(A) Lazo tipo beso. Discontinuidad presente en la raíz de la junta, similar a un araño transversal</p>	
<p>(B) Línea conjunta remanente, debido a la inclinación de la herramienta respecto del plano</p>	
<p>(C) Cavidad. Debido a la diferencia entre las fuerzas de ataque y de retroceso en la parte posterior del avance</p>	
<p>(D) Enganche. Discontinuidad transversal en juntas del tipo traslape.</p>	

Nomenclatura:

T = espesor nominal del metal base

h = altura de la discontinuidad

l = longitud de la cavidad en la dirección longitudinal de la soldadura

Nota: Una cavidad puede ser también una rotura a través de la superficie

Fuente: (Welding Processes Part 2., 2007)

5.2. Discontinuidades de proceso y del procedimiento

Penetración incompleta de la raíz en una soldadura de fricción rotativa FSW como la que se muestra en las figuras A y B de la tabla 3 resulta de la insuficiente longitud de la base de la herramienta (pin) o de una insuficiente penetración de la herramienta. Como consecuencia una deformación en la zona de rotación no se extiende profundamente presentándose de esta manera regiones no adheridas hacia la raíz de la soldadura. Para este tipo de discontinuidades, la aplicación de los ensayos no destructivos volumétricos es difícil a menos que se complemente con un técnica pitch catch de ultrasonido convencional o escaneo por sectores con ultrasonido por arreglo de fases.

La desalineación de la figura C de la tabla 3 puede presentarse debido al inadecuado soporte de los materiales a soldarse, en algunos casos la presión de sujeción es demasiado débil o las planchas están pandeadas (ver figura 44).



Figura 44 Verificación de desalineación en la preparación de las planchas

El excesivo destello de soldadura hacia los lados como el que se muestra en la figura D de la tabla 3 sucede cuando la plataforma del usillo hace contacto con el material, ver figura 45 y 46.



Figura 45 Exceso de destello en soldadura FSW para una aleación de aluminio 6061-T6

Fuente: (Welding Processes Part 2., 2007)



Figura 46 Exceso de destello para la placa de 6 mm

La discontinuidad de falta de llenado como se muestra en la figura E de la tabla 3 a menudo ocurre de manera simultánea con el excesivo destello de soldadura puesto que el material al salir de la zona de rotación de la soldadura deja un espesor más delgado comparado con el espesor de los materiales que están siendo soldados.

5.3. Discontinuidades Metalúrgicas

La mayoría de las discontinuidades metalúrgicas están relacionadas con la adherencia completa de las superficies a unirse. Adherencia incompleta es de difícil detección con los ensayos no destructivos y pueden convertirse en puntos o áreas donde inicien fisuras de fatiga y principalmente corrosión.

La discontinuidad de la figura A de la tabla 4, conocida como lazo de beso, está relacionada con la incompleta adherencia a lo largo del alineamiento en la raíz de la junta, ver figura 47.

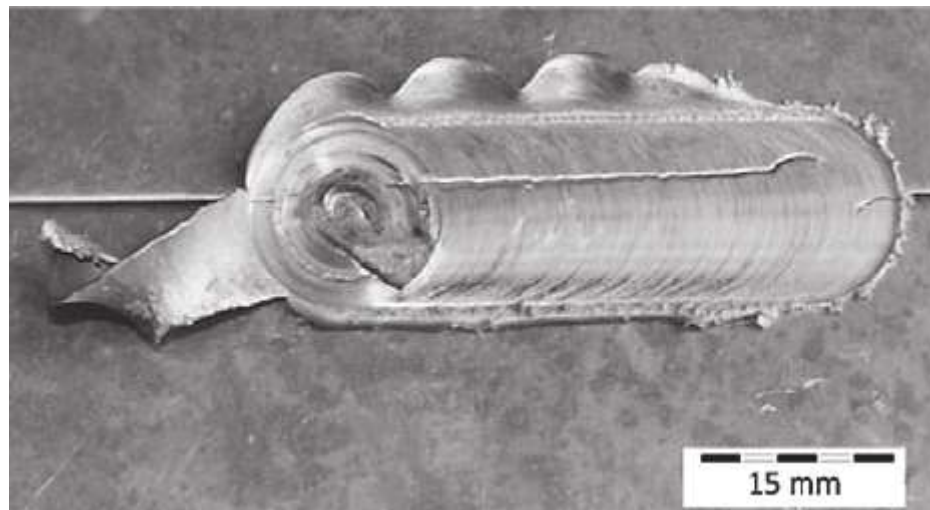


Figura 47 Lazo de beso debido a la incompleta adherencia hacia la raíz

Fuente: (zagreb, 2015)

Es importante señalar que la discontinuidad tipo lazo de beso es diferente de la penetración incompleta en que la herramienta puede ser lo suficientemente larga y la deformación en la zona de rotación se puede extender completamente a través del espesor de la plancha. Esto ocurre cuando existen capas o filamentos de óxidos desde la superficie de la junta que no son dispersados durante la soldadura generando como consecuencia una falta de adherencia intermitente a lo largo de la soldadura por las partículas de óxido intermitente presente.

Puede también ocurrir como resultado de una presión de forja inadecuada o insuficiente holgura lo que hace que la herramienta se flexione desde la línea central del junta dejando capas de óxido dispersas a lo largo del cordón.

Discontinuidades remanentes en la línea de la junta como se muestra en la figura B de la tabla 4, se refiere en muchas ocasiones como discontinuidades paradas en forma de S debido a su geometría. Esencialmente tienen las mismas causas que las discontinuidades del tipo lazo de beso. Estas discontinuidades del tipo remanentes pueden ser evitadas en el proceso por la remoción previa de óxidos en la superficie del material o por el cambio en el diseño de la herramienta.

Agujeros internos o socavaciones como se muestran en la figura C de la tabla 4 (algunas veces denominados agujeros de gusano) son discontinuidades causadas por la adherencia incompleta que refrena el avance, producto de la insuficiente presión de forja o el incorrecto diseño de la herramienta.

La figura 48 muestra una cavidad interna sobre la sección transversal



Figura 48 Cavidad interna (agujero de gusano) en una soldadura FSW de un material aluminio 6061-T6

Fuente: (Welding Processes Part 2., 2007)

En situaciones extremas, como la que se muestra en la figura 49., son debido a la excesiva velocidad de rotación de la herramienta y en cuyo efecto los agujeros de gusano se extienden hacia la superficie dejando una marca completa en la longitud.

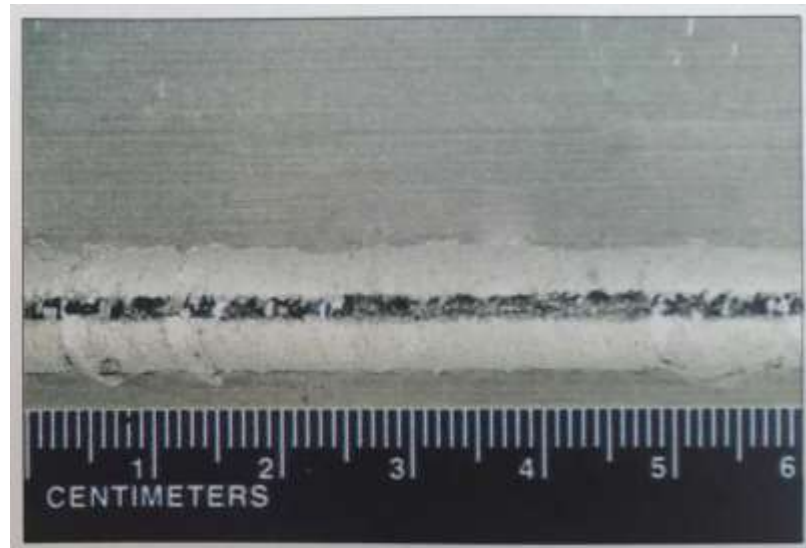


Figura 49 Discontinuidad abierta a la superficie causada por una muy alta velocidad de rotación de la herramienta en un proceso FSW

Fuente: (Welding Processes Part 2., 2007)

Las discontinuidades tipo enganche como la que se muestra en la figura D de la tabla 4 ocurre en juntas de traslape cuando la interface de la adjunta a las superficies en la zona de rotación en empujado hacia arriba o hacia abajo produciéndose un decrecimiento en el espesor efectivo de soldadura. Este efecto puede afectar en las propiedades mecánicas de la junta soldada.

Un tipo particular de discontinuidad es el denominado heridas superficiales, tal como se muestra en la figura 50 y ocurre en la soldadura de algunas aleaciones de aluminio de la serie 2XXX y 7xxx como resultado de una licuación parcial. Esta discontinuidad resulta del excesivo aporte de calor de entrada y puede ser eliminado disminuyendo la velocidad de rotación de la herramienta expresado en revoluciones por minuto.



Figura 50 Discontinuidad del tipo herida en una soldadura FSW

Fuente: (Welding Processes Part 2., 2007)

5.4. Esfuerzos Residuales

La soldadura de fricción rotativa normalmente está asociada a bajos niveles de calentamiento comparado con un proceso de fusión sin embargo se requiere mayores fuerzas de anclaje. Este proceso también asocia mayores problemas de deformación que un proceso de fusión.

Los esfuerzos residuales presentes son debidos principalmente al gradiente térmico existente generado por los ciclos que ocurren cuando avanza el usillo de trabajo. El anclaje de las piezas juega un rol importante porque de esto dependerá la presencia o no de esfuerzos residuales lo cual puede impactar sobre las propiedades mecánicas de la junta soldadura y sus propiedades de resistencia a la corrosión.

Principalmente se ha hecho la medición de esfuerzos residuales sobre aleaciones de aluminio a través de difracción de rayos X y de neutrones. Estos resultados han mostrado sobre la sección transversal de la soldadura dos picos (en forma de M) de mayores esfuerzos residuales y menor dureza sobre la zona ZAC.

En la figura 51, se muestra un ejemplo de estos esfuerzos residuales tanto para la sección longitudinal como para la sección transversal.

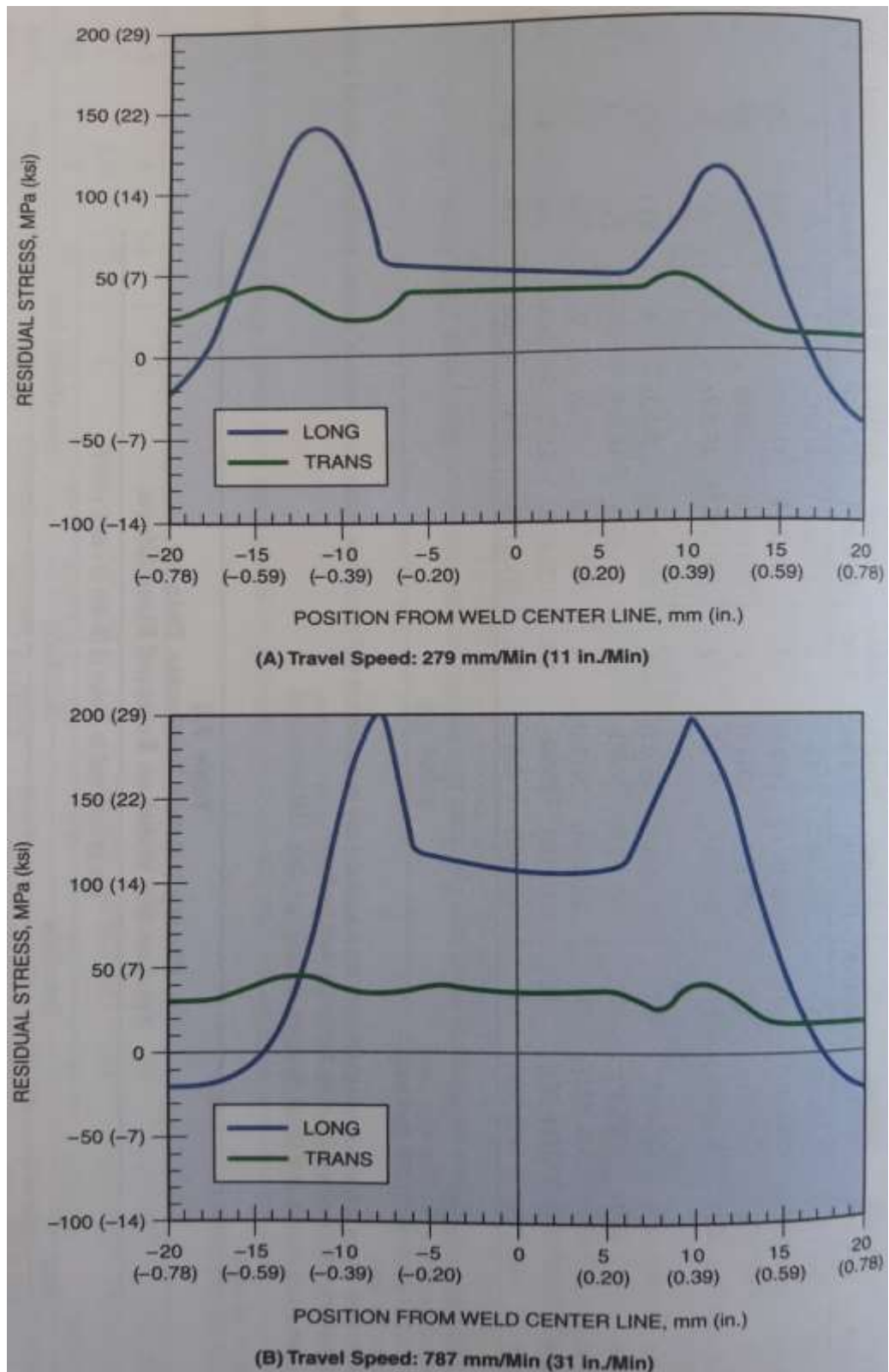


Figura 51 Distribución de esfuerzos residuales en una soldadura FSW para un aluminio AA6061-T6 variando las velocidades para A y B.

Fuente: (Welding Processes Part 2., 2007)

Para balancear estos esfuerzos de tensión, esfuerzos de compresión deben existir desde la soldadura hacia el metal base. Una menor magnitud o esfuerzos residuales de tensión o algunas veces esfuerzos de compresión de baja magnitud ocurren en la zona de rotación.

Los mayores esfuerzos residuales se desarrollan en la dirección longitudinal (paralelo a la dirección de la soldadura) y usualmente alcanzaron valores entre el 50% al 75% del esfuerzo de fluencia del material base a temperatura ambiente. Esta condición efectivamente contrasta con los esfuerzos residuales encontrados en la soldadura de fusión donde los esfuerzos longitudinales equivalen al esfuerzo de fluencia del material base a temperatura ambiente.

Esfuerzos residuales transversales en soldadura por fricción rotativa FSW (de dirección perpendicular a la soldadura) son típicamente menores que los esfuerzos longitudinales señalando la importancia de que los mayores esfuerzos están en la mitad del espesor de la soldadura.

La magnitud de los esfuerzos residuales está directamente asociado con los parámetros de soldadura enfatizando que mayores esfuerzos residuales son debido a un aporte de calor de entrada de baja magnitud.

Soldaduras con un alto aporte de calor de entrada (por ejemplo: bajas velocidades de avance y altas RPM) hacen que la zona ZAC sea más extensa causando una redistribución de esfuerzos con magnitudes menores para una cierta área localizada que haya sido analizada. Sin embargo estos esfuerzos son menores comparados con los esfuerzos generados por la soldadura por fusión donde si puede existir una alta probabilidad de fisuración por fatiga.

5.5. Problemas De Corrosión

Problemas de corrosión han sido reportados en aleaciones de aluminio de la serie 2xxx, 5xxx, 6xxx y 7xxxx para un proceso de soldadura FSW.

El volumen de ensayos no destructivos han sido incrementados principalmente en aleaciones de aluminio de la serie 7xxx debido a que este material es utilizado en componentes aeroespaciales.

Técnicas utilizadas para la evaluación de la corrosión incluyen:

- Fisuración por esfuerzos y corrosión SCC
- Corrosión por picaduras
- Corrosión por exfoliación
- Polarización
- Baños de sal
- Corrosión por fatiga

La resistencia a la corrosión de las soldaduras por proceso FSW es superior a la soldadura de fusión puesto que se evita el problema de la eliminación de las segregaciones de solidificación en donde el hidrógeno es el elemento más peligroso para desarrollar corrosión en sus diferentes formas.

La discontinuidad caracterizada como exceso de destello en la soldadura FSW para los parámetros probados fue una de las principales discontinuidades generadas en el proceso de prueba para diferentes espesores. Al ajustar los parámetros de la máquina de soldeo se disminuyó hasta obtener la sanidad total en el material seleccionado finalmente.

5.6. Distorsiones

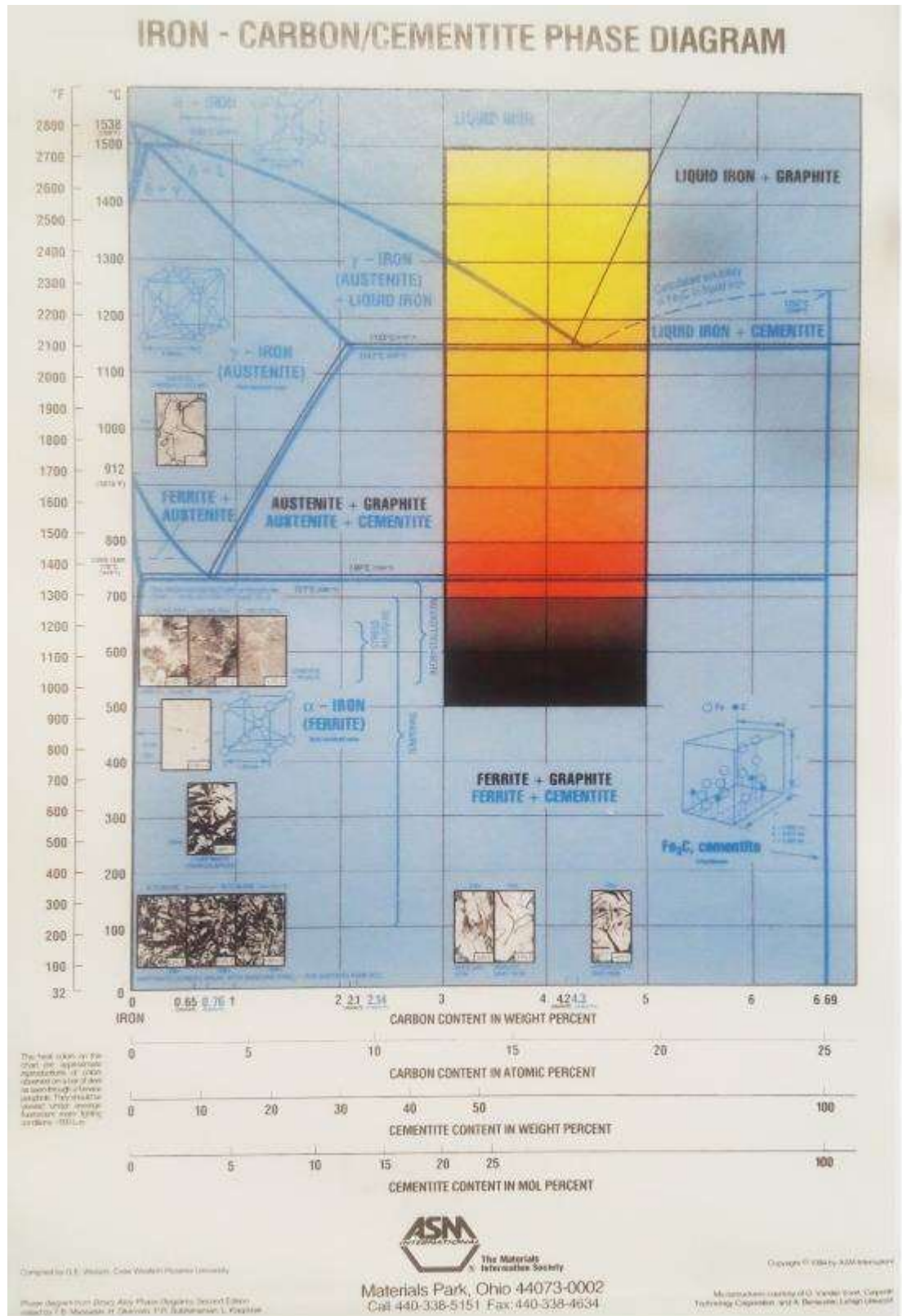


Figura 52 Diagrama Hierro Carbono

Fuente: (John., 2007)

Las distorsiones mecánicas o deformación térmica posterior al proceso de soldadura son considerablemente inferiores respecto de un proceso de fusión. En la figura 52 se muestra el diagrama hierro carbono y se observa que la temperatura al no superar los 700 °C no se produce una transformación metalúrgica del hierro alfa (ferrita α) en austenita.

Al encontrarse la temperatura, dentro de un valor promedio de 600° C, puede suceder, si se compara con un proceso de fusión, un fenómeno de alivio de tensiones, recristalización o revenido para un acero de bajo contenido de carbono sin embargo en todos los casos no se supera la temperatura de 700°C.

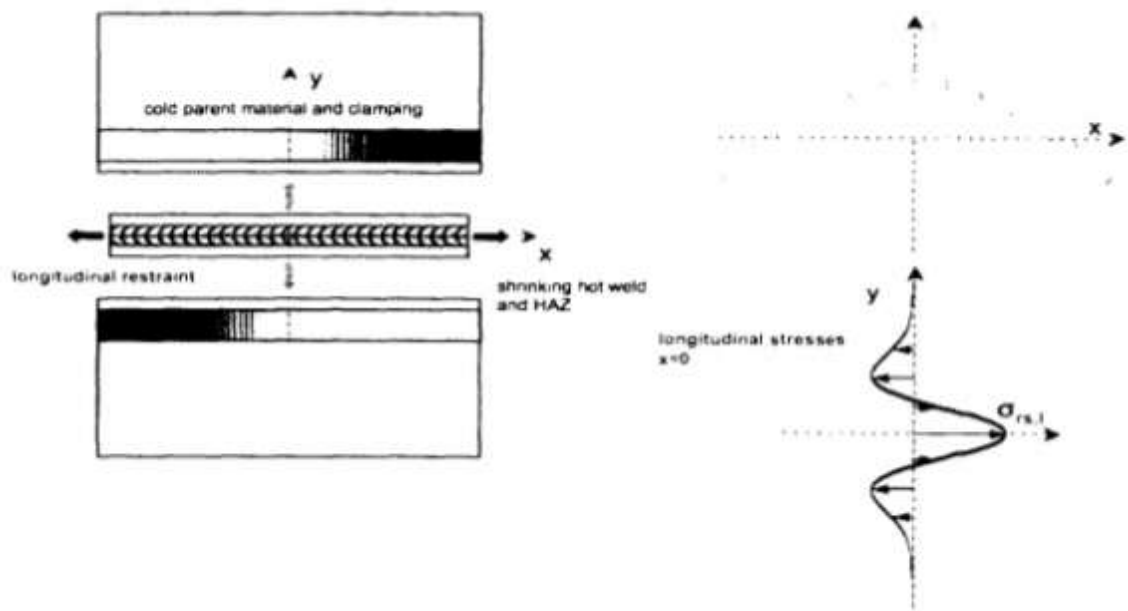


Figure 1.3: Schematic of typical residual stresses from FSW [Dalle (2001)]

Figura 53 Esquema de esfuerzos residuales para la soldadura FSW

Fuente: (Bach, 2012)

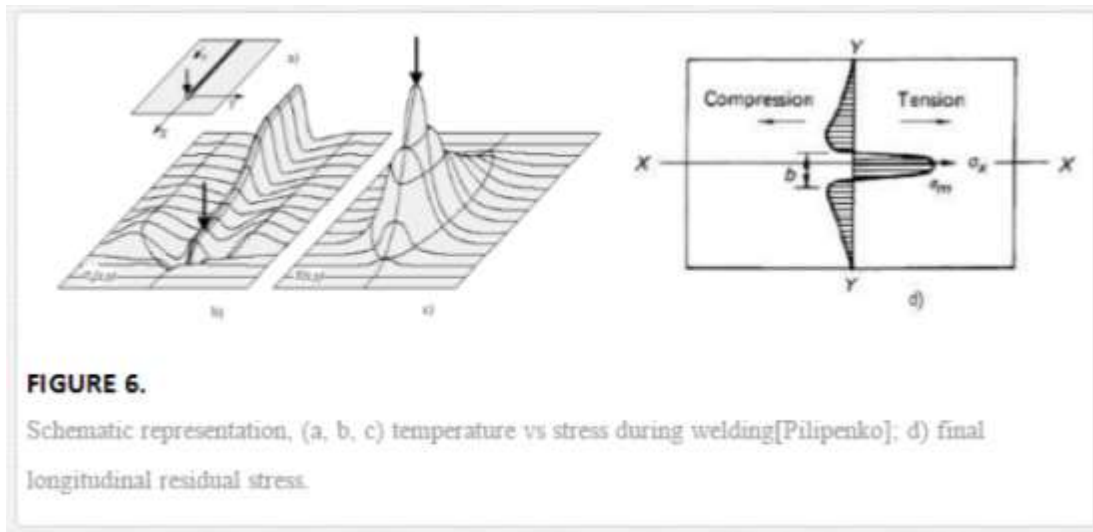


Figura 54 Esquema de representación de los esfuerzos residuales longitudinales.

Fuente: (Hamdy, 2012)

Los esfuerzos residuales de un proceso SMAW comparados con un proceso FSW son similares en el eje principal de avance de la soldadura. Por una parte para el proceso FSW se tiene mayores esfuerzos transversales debido a los soportes laterales que tiene el proceso en sí, sin embargo los esfuerzos son menores para las direcciones longitudinales y transversales comparados con un proceso de fusión. (Ver figura 53 y 54).

5.7. Propiedades Mecánicas

Las propiedades mecánicas del proceso FSW versus un proceso de fusión deben mejorar por cuanto no existe una transformación metalúrgica en el material de aporte.

Si no se aplica un correcto precalentamiento se podría obtener una microestructura de menor resiliencia (menor capacidad de absorber energía de impacto en la zona elástica) sin embargo en todos los casos debería superar el límite mínimo para la especificación del material soldado por cuanto no existe el cambio de ferrita a martensita y viceversa. (Ver figura 55).

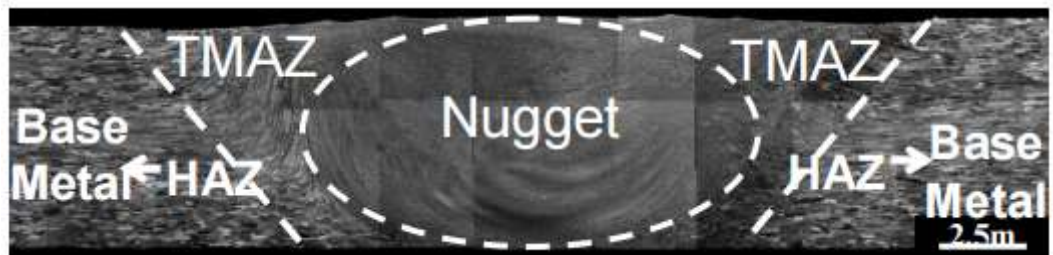



Figura 55 Zonas Metalúrgicas de una soldadura FSW (TMAZ Zona afectada termo-mecánicamente)

Fuente: (Denquin, 2012)

5.8. Velocidad de Producción

**Tabla 5
Comparación del Proceso FWS y Proceso de fusión SMAW**

Proceso por Fusión (SMAW)	Proceso FSW
Precalentamiento no siempre es necesario, dependerá del diseño de la junta y espesores a ser soldados	Precalentamiento necesario hasta un valor alrededor de 600 °C pero por debajo del punto de transformación metalúrgica de ferrita a austenita.
Se requiere la habilidad del soldador, el soldador debe dominar la técnica y su calificación implica mayor destreza especialmente con menores espesores	El operador controla los parámetros en el equipamiento, no se requiere el nivel de habilidad que un proceso de fusión
Velocidad de avance limitada al cambio de electrodo	Velocidad de avance constante hasta terminar la pieza
Se requiere de múltiples pasadas para espesores mayores a 2 o 3 mm	Una sola pasada dependiendo de la altura de la herramienta utilizada.
Mayor cantidad de discontinuidades volumétricas debido principalmente a la falta de limpieza entre pases	Menor cantidad de discontinuidades volumétricas, no existe cambio en la microestructura de ferrita a austenita y viceversa. 
Permite soldar en cualquier posición	Solamente permite en posición plana

en taller y en campo	para soldadura de taller
Menores propiedades mecánicas	Mayores propiedades mecánicas
Requiere un material de aporte seleccionado en base al tipo de material a ser soldado	No requiere un material de aporte, la selección de la herramienta está en función de la dureza del material a soldarse y espesor
ZAC susceptible de fisuración en caliente y en frío.	ZAC y TMAZ menos susceptible a fisuración en frío.

CAPÍTULO 6

ANÁLISIS DE RESULTADOS

6.1. Ensayos No Destructivos De Probetas

Los ensayos no destructivos definidos para la ejecución de este proyecto son los siguientes:

- a) Inspección Visual
- b) Inspección por Líquidos Penetrantes Visibles
- c) Inspección por Ultrasonido
- d) Medición de Dureza

Los ensayos antes descritos se han seleccionado debido a que en la empresa auspiciante se cuenta con todo el equipamiento para efectuar este tipo de pruebas, otras pruebas como ejemplo un análisis metalúrgico de la microestructura puede brindar mayores alcances a mejorar el proceso con otros espesores y materiales los cuales para éste proyecto se han considerado realizarlos en laboratorio proveedor de la institución.

La secuencia de aplicación de los END han sido en la misma secuencia descrita anteriormente cuya estructura está fundamentada en la secuencia de aplicación que indica el código de fabricación de estructuras de acero AWS D1.1. Edición 2015.

6.1.1. Visual

Caracterización del Material, soldadura y resultados obtenidos:

ASTM A572 Grado 50

Espesor del material: 6mm

Dimensión: 400 x 125

Diámetro del usillo incluyendo la plataforma: 22 mm

Diámetro de la base de la herramienta: 6 mm

Longitud efectiva de la herramienta: 6 mm

Rango de Temperatura de precalentamiento: 600 – 700 °C

Velocidad de rotación de la herramienta: 3000 RPM

Velocidad lineal de avance: 40 mm/min

Tabla 6
Propiedades mecánicas para el material ASTM A572 grado 50

A 572/A 572M

TABLE 1 Maximum Product Thickness or Size

Grade	Yield Point, min		Maximum Thickness or Size				
	ksi	(MPa)	Plates and Bars		Structural Shapes Groups ^a	Sheet Piling	Zees and Rolled Tees
			in.	(mm)			
42 [290] ^b	42	[290]	6	[150]	all	all	all
50 [345] ^b	50	[345]	4 ^c	[100] ^d	all	all	all
55 [390]	55	[390]	2	[50]	all	all	all
60 [415] ^b	60	[415]	1 1/4 ^e	[32] ^f	1, 2, and 3	all	all
65 [450]	65	[450]	1 1/4	[32]	1, 2, and 3	not available	all

^a See Specification A 572/A 572M.
^b In the above tabulation, Grades 42, 50, and 60 [290, 345, and 415], are the yield point levels most closely approximating a geometric progression pattern between 30 ksi [200 MPa], min, yield point steels covered by Specification A 36/A 36M and 100 ksi [690 MPa], min, yield strength steels covered by Specification A 514/A 514M.
^c Round bars up to and including 9 in. [225 mm] in diameter are permitted.
^d Round bars up to and including 3 1/2 in. [90 mm] in diameter are permitted.

Fuente: Estándar ASTM A572 Gr. 50

Tabla 7
Requerimientos de composición química para el material ASTM A572 Gr. 50

TABLE 2 Chemical Requirements^a
(Heat Analysis)

Diameter, Thickness, or Distance Between Parallel Faces, in. [mm] Plates and Bars	Structural Shapes Groups ^b	Grade	Carbon, max. %	Manganese, ^c max. %	Phosphorus, max. %	Sulfur, max. %	Silicon	
							Plates to 1 1/2 in. [40 mm] in Thickness, Shapes to 425 lb/ft ² [534 kg/m ²], Sheet Piling, Bars, Zees, and Rolled Tees ^d	Plates Over 1 1/2 in. [40 mm] in Thickness and Shapes Over 425 lb/ft ² [534 kg/m ²]
							max. %	range, %
6 [150]	all	42 [290]	0.21	1.35 ^e	0.04	0.05	0.40	0.15-0.40
4 [100] ^f	all	50 [345]	0.23	1.35 ^e	0.04	0.05	0.40	0.15-0.40
2 [50]	all	55 [390]	0.25	1.35 ^e	0.04	0.05	0.40	0.15-0.40
1 1/4 [32] ^g	1,2,3	60 [415]	0.26	1.35 ^e	0.04	0.05	0.40	"
>1/2 - 1 1/4 [13-32]	2,3	65 [450]	0.23	1.65	0.04	0.05	0.40	"
<1/2 [13] ^h	1 ⁱ	65 [450]	0.26	1.35	0.04	0.05	0.40	"

^a Copper when specified shall have a minimum content of 0.20 % by heat analysis (0.18 % by product analysis).
^b See Specification A 572/A 572M.
^c Manganese, minimum, by heat analysis of 0.80 % (0.75 % by product analysis) shall be required for all plates over 1/2 in. [10 mm] in thickness; a minimum of 0.50 % (0.45 % by product analysis) shall be required for plates 1/4 in. [10 mm] and less in thickness, and for all other products. The manganese to carbon ratio shall not be less than 2 to 1.
^d Bars over 1 1/2 in. [40 mm] in diameter, thickness, or distance between parallel faces shall be made by a killed steel practice.
^e For each reduction of 0.01 percentage point below the specified carbon maximum, an increase of 0.06 percentage point manganese above the specified maximum is permitted, up to a maximum of 1.50 %.
^f Round bars up to and including 9 in. [225 mm] in diameter are permitted.
^g Round bars up to and including 3 1/2 in. [90 mm] in diameter are permitted.
^h The size and grade is not described in this specification.
ⁱ An alternative chemical requirement with a maximum carbon of 0.21 % and a maximum manganese of 1.65 % is permitted, with the balance of the elements as shown in Table 2.

Fuente: Estándar ASTM A572 Gr. 50

Posición de Soldadura: Plana 1G
Soldador: W-012 (Sr. Cabay Sangucho Galo Efrén)
Tipo de Junta: Ranura cuadrada
Material de la herramienta: SAE 4043

Los resultados de la inspección visual muestran que existe fusión completa para la prueba efectuada en la plancha de 6 mm, para los

parámetros descritos anteriormente y que son parte del WPS y sus documentos anexos respectivos. Se observó una discontinuidad de longitud < 2 mm de un exceso de destello de soldadura hacia el lado izquierdo respecto de la posición de avance longitudinal generando a su vez una falta de llenado discontinuidad comparable con un poro si fuese un proceso de soldadura por fusión. Ver figura 56.



Figura 56 Inspección Visual de la placa de 6mm

La penetración total del espesor es determinante y se obtiene de la correcta selección en cuanto al diámetro y longitud de la herramienta utilizada. Una mayor longitud de la herramienta genera dispersión o destellos laterales y una longitud muy corta genera falta de fusión hacia la raíz.

Un valor de 55 milímetros por minuto generó excesivo destello de soldadura lateral con mayor desprendimiento hacia el lado de retroceso, hacia el lado de avance se observa una menor cantidad lo cual debe estar asociado también a un menor gradiente de temperatura sobre esta sección.

6.1.2. Líquidos Penetrantes

Una vez completada la inspección visual, se procedió a efectuar la inspección superficial a través del método de líquidos penetrantes (ver figura 57), con una técnica visible, método C removible con solvente. (Ver figura 58).

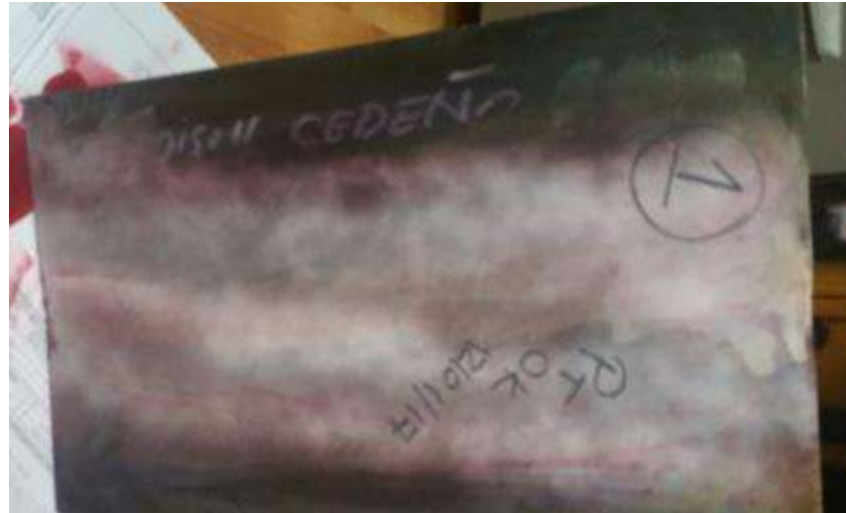


Figura 57 Inspección por líquidos penetrantes, técnica visible efectuada para la placa de 6mm

La característica y justificación de utilizar este tipo de penetrante es que debido al tipo de discontinuidades que se puede obtener en el proceso se utiliza el tipo de penetrante y posterior revelador, para este caso se utilizó un revelador forma d clase 2 no halogenado evitando con esto la formación de cualquier tipo de haluro que en el contacto con hidrógeno puede convertirse en un concentrador de hidrógeno que cause algún modo de conversión de corrosión a lo largo de la soldadura y en su sección transversal. Componentes más críticos ameritarían una técnica fluorescente sin embargo para éste tipo de material es suficiente y cumple con los requerimientos de construcción en las características y resultados presentados. Los resultados de la inspección se pueden observar en el reporte adjunto a este proyecto.



Figura 58 Secuencia de aplicación de la técnica.

Fuente: (Ltda., 2016)

6.1.3. Ultrasonido

El ensayo volumétrico de inspección por ultrasonido tiene como objetivo principal detectar cualquier tipo de discontinuidad inmersa dentro del espesor del material soldado, detectar cualquier tipo de cavidad interna o falta de llenado en una sección o secciones permitirá cuantificar la eficacia del proceso de soldadura. En principio se estableció identificar cualquier indicación que presente el equipo de ultrasonido a una amplitud de +6dB (decibelios) respecto del nivel de referencia, ver figura 59. Posterior a esto utilizar un criterio de aceptación y rechazo de un código estructural AWS D1.1 o D1.5 dependiendo de la aplicación a la cual va a ser sometido el material y evidentemente considerando si está sujeto a cargas estáticas o dinámicas en elementos primarios o secundarios y de esfuerzos transversales o longitudinales respecto de la sección transversal.



Figura 59 Equipo de Ultrasonido para la inspección volumétrica del material soldado por proceso FSW.

Fuente: Planta Sedemi S.C.C.

Características del equipamiento:

- Equipo de Ultrasonido Sonatest Modelo D-50
- Nivel de referencia: 55,3 dB
- Zapata angular de 70 grados
- Transductor de haz recto de 2,25 MHz Broadband, serial 134719
- Cable conexión Lemo 01 a Microdot
- Identificación probeta JC – 1 y JC – 2
- Bloque de calibración DSC en acero AISI 1018

Los resultados de la inspección volumétrica de la soldadura, a través de la técnica de haz angular convencional, indican que no existen discontinuidades relevantes que ameriten evaluación, no se observan amplitudes de señales que superen el 20% en amplitud de pantalla FSH y también con respecto al nivel de referencia. La integridad volumétrica indica que el proceso de soldadura cumplió volumétricamente su objetivo, la sanidad de la junta es completa. No se ha considerado dos pulgadas respecto de los bordes de la plancha que se ha inspeccionado ver figura 60. Cualquier indicación sobre esta sección no amerita reparación alguna o interpretación basado en cualquier especificación, estándar, norma o código asociado. Ver informe CS-001



Figura 60 Inspección volumétrica de placa de 6 mm

6.1.4. Medición De Dureza

El objetivo de medición de dureza es cuantificar el cambio microestructural en la ZAC con respecto al material base, de existir un considerable cambio se requeriría un tratamiento térmico posterior a la soldadura para ablandamiento o endurecimiento de la microestructura (ver figura 61).

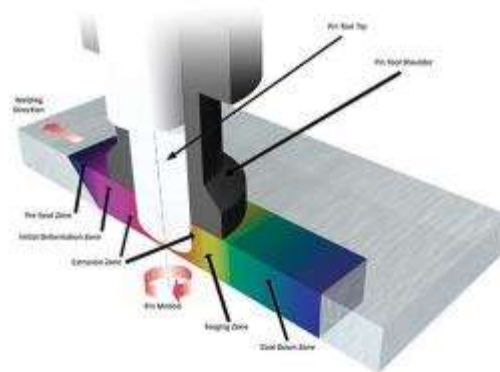


Figura 61 Zonas para una soldadura FSW

Fuente: (PAR SYSTEMS)

Una dureza promedio para este tipo de material está especificado en 135 HB para un material ASTM A572 Gr. 50, considerando que es un acero especial HSLA de alta resistencia.

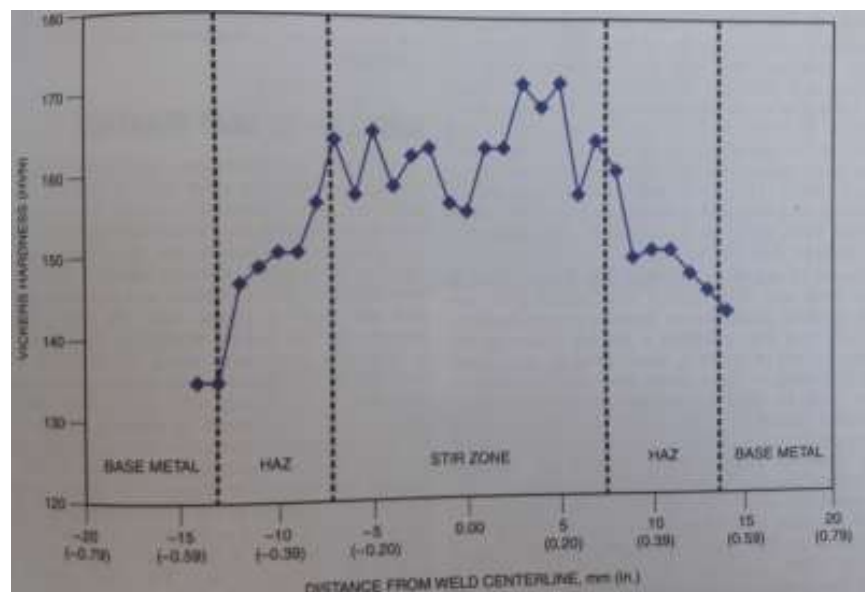


Figura 62 Esquema que ilustra la dureza en Vickers (VH) para varias regiones de la ZAC en una soldadura FSW para un acero AISI 1018

Fuente: (Welding Processes Part 2., 2007)

Tabla 8

Resultados de la dureza en escala Brinell obtenida de la probeta de calificación del procedimiento para la soldadura FSW

	ZMB	ZAC	ZS	ZAC	ZMB
	1	2	3	4	5
A	123	115	107	112	111
B	127	117	107	114	107
C	113	112	110	118	100
D	137	132	128	114	106
DUREZA BRINELL (HB)					

Nomenclatura: ZMB (Zona del metal base); ZAC (Zona afectada por el calor); ZS (Zona de la soldadura)

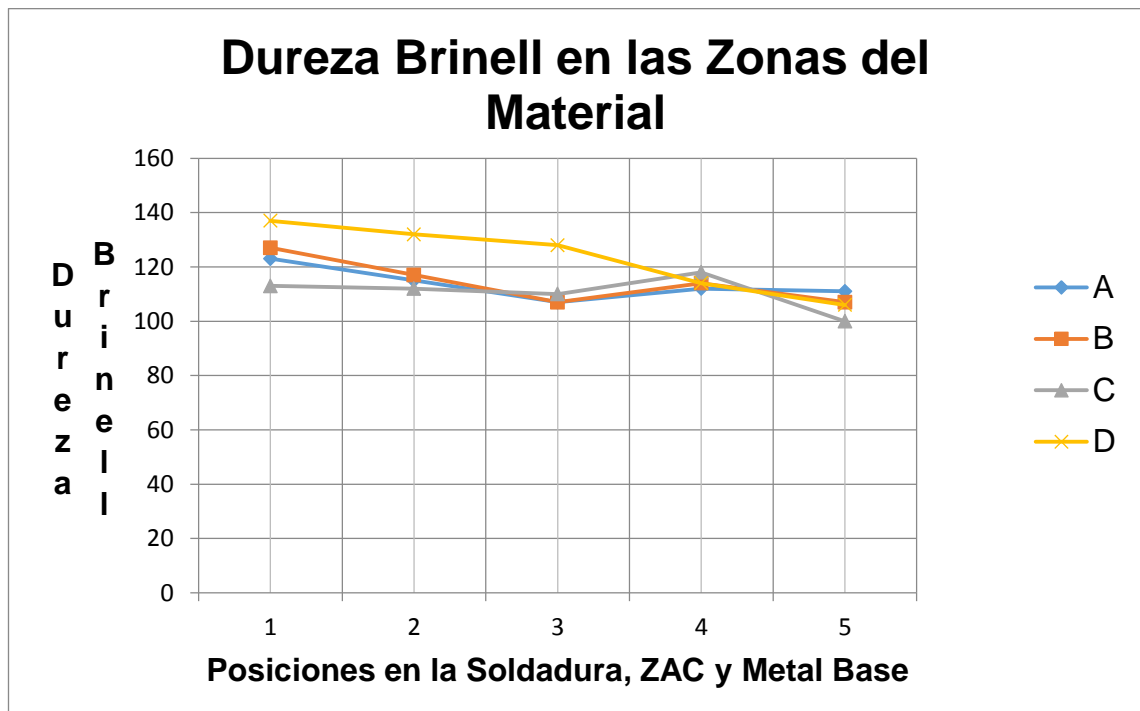


Figura 63 Dureza obtenida en los resultados de la soldadura FSW en plancha de 6 mm, material ASTM A572 Gr.50

La zona de la soldadura evidencia una disminución en la dureza lo que indica una microestructura más débil comparado con el material base, al

disminuir la dureza evidentemente disminuye la resistencia mecánica pero aumenta la ductilidad, cuyo comportamiento será analizado en la sección de ensayos mecánicos.

Los resultados de la variación de la dureza en promedio respecto de la dureza de la zona de la soldadura, como se detalla en la tabla 9, muestran una variación inferior al 9% para todos los puntos tomados, esto es un indicativo que de este proceso elimina, para el espesor ensayado, el requerimiento de un tratamiento térmico posterior a la soldadura para el alivio de tensiones.

Tabla 9
Porcentaje de variación de dureza de la zona de la soldadura FSW
respecto de la zona del metal base

PORCENTAJE DE VARIACIÓN DE LA DUREZA		
ZMB Promedio	ZS	Porcentaje
117	107	-8,55%
117	107	-8,55%
106,5	110	3,29%
121,5	128	5,35%

Si comparamos los valores absolutos de dureza de la figura 62 que corresponde a un acero de bajo contenido de carbono, con 0,18% de Carbono, con los de la figura 63., que corresponden a los resultados para un material de hasta 0,26% de Carbono podemos observar que existe una variación de la dureza de la soldadura respecto del material base, en el primer caso se presenta un gradiente de durezas que van desde un mayor valor en la zona de la soldadura hasta un menor valor en el material base en la zona específicamente donde termina la zona ZAC. Por otra parte para el material ASTM A572 Gr.50, se observa un comportamiento más lineal de

durezas respecto del material base, esto nos muestra que efectivamente disminuye en gradiente la dureza para las secciones (zona del metal base, zona ZAC y zona de la soldadura) cuyo resultado es un indicativo de que la microestructura en la ZAC no se ve tan afectada comparada con un proceso de soldadura de fusión. Esta menor disminución de la dureza entre las diferentes zonas de la soldadura, también está relacionada con el contenido de manganeso (Mn) puesto que este elemento actúa como un incrementador de la resistencia mecánica al aumentar la dureza directamente.

Adicional se realiza un ensayo de microdureza donde se especifica el análisis puntual de ZAC, Metal base y zona de soldadura. Ver Informe ILPM 2017-086 H.

6.1.5. Ensayos de Metalografía

Los ensayos de metalografía muestran una matriz ferrítica – perlítica no se observa una transformación de fase en la zona de la soldadura. La interpretación exacta es parte del informe de laboratorio, en la figura 64 y anexo de análisis de metalografía. Ver informe ILPM 2017-086.



Figura 64 Resultados del ensayo de metalografía para una magnificación de 100x

Los resultados de metalografía con una magnificación de 500x se muestran en la figura 65, la imagen se observa para la zona de la soldadura.



Figura 65 Resultados del ensayo de metalografía para una magnificación de 500x

6.2. Ensayos Destructivos de Probetas.

La ejecución del proceso de soldadura como se muestran en las figuras 66, 67 y 68 incluyeron la realización de un total de 14 pruebas detalladas en el siguiente resumen:



Figura 66 Resultado para un espesor de 10 mm




Figura 67 Resultado para la octava prueba, espesor de 6 mm



Figura 68 Resultado para la décima segunda prueba para un espesor de 6 mm


**Tabla 10
Tabla de Resultado de Pruebas**

Índice de Pruebas	Resumen de Resultados de Soldaduras de Prueba
1	<p>Primera Prueba (Anexo 4)</p> <p>Ejecución de la primera prueba, espesor 10 mm, velocidad de avance lineal 24 mm/min y rotación de 1500 RPM. Pre calentamiento 260°C. Altura de la punta de la herramienta 6 mm.</p> <p>No se observa ninguna penetración, el sobrecalentamiento de la herramienta no permite continuar con la prueba.</p>
2	<p>Segunda Prueba (Anexo 5) Figura 66</p> <p>Ejecución de la segunda prueba, espesor de 10 mm, velocidad de avance lineal 24 mm/min y rotación de 1500 RPM. Pre calentamiento 260°C. Altura de la punta de la herramienta 6 mm.</p> <p>Existe penetración inferior a 2 mm y desprendimiento lateral</p>

	del material.
3 (AWS, 2001) (Handbook, Materials and Applications Part 1., (1996))	<p>Tercera Prueba</p> <p>Espesor (t) = 8 mm</p> <p>Velocidad lineal = 24 mm/ min</p> <p>Velocidad de rotación = 3000 RPM</p> <p>Pre calentamiento = 350 °C</p> <p>No existe resultados la herramienta desbasta el material</p>
4	<p>Cuarta Prueba</p> <p>Espesor (t) = 8 mm</p> <p>Velocidad lineal = 30 mm/ min</p> <p>Velocidad de rotación = 3000 RPM</p> <p>Pre calentamiento = 350 °C</p> <p>No existe resultados, el desbaste lateral del material es más prominente respecto de la prueba anterior</p>
5	<p>Quinta Prueba</p> <p>Espesor (t) = 8 mm</p> <p>Velocidad lineal = 30 mm/ min</p> <p>Velocidad de rotación = 3000 RPM</p> <p>Pre calentamiento = 500 °C</p> <p>El aumento en la temperatura de pre calentamiento no incide mayormente en la penetración, el desbaste se mantiene y la altura de la punta (pin) de la herramienta se sobrecalienta a una temperatura mayor a 750 °C.</p>
6	<p>Sexta Prueba</p> <p>Espesor (t) = 6 mm</p> 

	<p>Velocidad lineal = 24 mm/ min</p> <p>Velocidad de rotación = 1500 RPM</p> <p>Pre calentamiento = 250 °C</p> <p>Se ha cambiado el espesor a 6 mm así como la altura de la punta de la herramienta se mantiene en 6 mm.</p>
7	<p>Séptima Prueba</p> <p>Espesor (t) = 6 mm</p> <p>Velocidad lineal = 30 mm/ min</p> <p>Velocidad de rotación = 1500 RPM</p> <p>Pre calentamiento = 250 °C</p> <p>Se observa un desbaste prominente más pronunciado respecto de la prueba anterior (prueba 7), el sobrecalentamiento de la herramienta en apenas 20° mayor que la prueba anterior.</p>
8	<p>Octava Prueba (Anexo 6) Fotografía 67</p> <p>Espesor (t) = 6 mm</p> <p>Velocidad lineal = 24 mm/ min</p> <p>Velocidad de rotación = 1500 RPM</p> <p>Pre calentamiento = 282 °C</p> <p>La penetración de la herramienta genera desbaste en el material, la profundidad se mide hasta 2 mm</p>
9	<p>Novena Prueba</p> <p>Espesor (t) = 6 mm</p> <p>Velocidad lineal = 30 mm/ min</p> <p>Velocidad de rotación = 1500 RPM</p> <p>Pre calentamiento = 300 °C</p>



	El aumento de la velocidad lineal desprende rebabas hacia la zona frontal
10	<p>Novena Prueba</p> <p>Espesor (t) = 6 mm</p> <p>Velocidad lineal = 37,5 mm/ min</p> <p>Velocidad de rotación = 1500 RPM</p> <p>Precalementamiento = 400 °C</p> <p>El aumento de la temperatura de precalementamiento decrece el desprendimiento de material hacia las zonas frontal y lateral.</p>
11	<p>Décima Primera Prueba</p> <p>Espesor (t) = 6 mm</p> <p>Velocidad lineal = 24 mm/ min</p> <p>Velocidad de rotación = 3000 RPM</p> <p>Precalementamiento = 300 °C</p> <p>El aumento de las RPM genera una menor distorsión lateral de la rebaba, ésta es más fina y en menor cantidad</p>
12	<p>Décima Segunda Prueba</p> <p>Espesor (t) = 6 mm</p> <p>Velocidad lineal = 30 mm/ min</p> <p>Velocidad de rotación = 3000 RPM</p> <p>Precalementamiento = 500 °C</p> <p>Se aumenta el precalementamiento y la velocidad lineal de avance, se observa un ligero desprendimiento de rebabas laterales ya no se presenta frontalmente.</p> 

13	<p>Décima Tercera Prueba</p> <p>Espesor (t) = 6 mm</p> <p>Velocidad lineal = 37.5 mm/ min</p> <p>Velocidad de rotación = 3000 RPM</p> <p>Pre calentamiento = 500 °C</p> <p>No se logra eliminar las rebabas aunque finas aún persisten</p>
14	<p>Décima Cuarta (Anexo 7) Figura 68</p> <p>Prueba en 6 mm, velocidad de rotación 3000 RPM, temperatura de pre calentamiento 600°C, velocidad de avance 40 mm/min, altura de la punta 6 mm.</p> <p>Se observa dos indicaciones en la longitud total de soldadura</p>

Un mínimo de 2 probetas serán sometidas para ensayo de doblado de cara y dos probetas para doblado de raíz, los resultados se verificarán de acuerdo a los requerimientos del estándar AWS B4.0:2007 Métodos estándares para la prueba mecánica de soldadura. De manera opcional se puede realizar 2 doblados laterales en lugar de los doblados de cara y raíz.



Figura 69 Ubicación de las secciones para el corte de las probetas para los ensayos mecánicos en un espesor de 6 mm.

Los ensayos mecánicos de tracción solicitados son en cantidad 2 para la calificación o validación del procedimiento de soldadura establecido. Estos ensayos deberán ser efectuados en un laboratorio independiente y para este caso se presentará un informe del porcentaje de elongación que se tenga en las uniones soldadas.

Las pruebas mecánicas totales a efectuarse serán (ver figura 69):

- Dos ensayos de doblado de cara (Ver figura 70)
- Dos ensayos de doblado de raíz (ver figura 70)
- Dos ensayos de tensión en placa (ver figura 71)

6.2.1. Dimensiones de los cupones de prueba

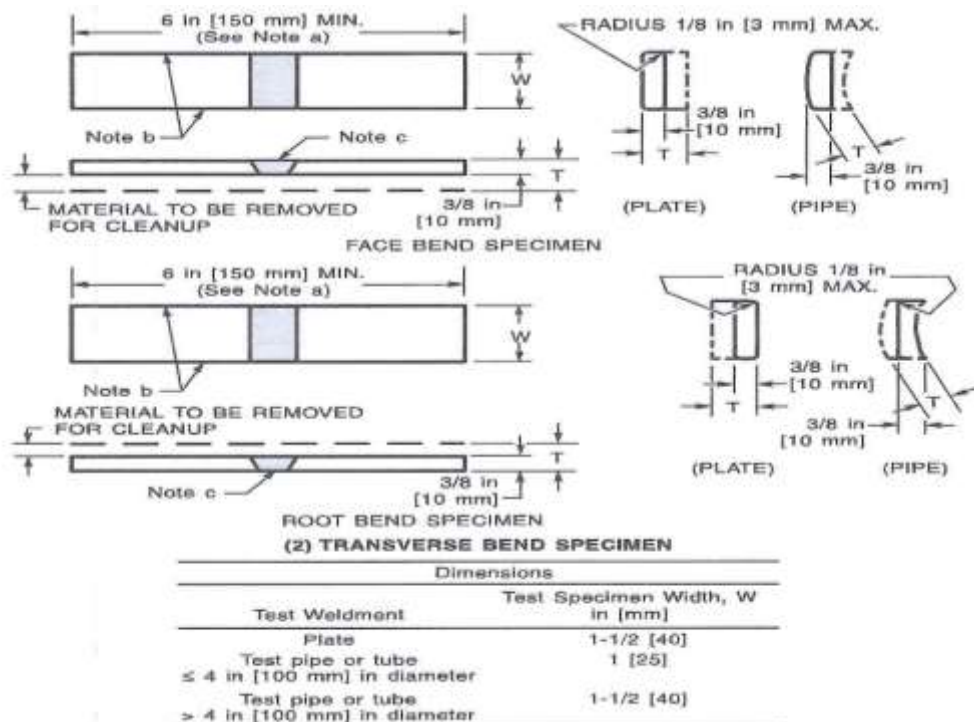


Figura 70 Dimensiones de las probetas para doblado de cara y de raíz para plancha

Fuente: ((AWS), 2015)

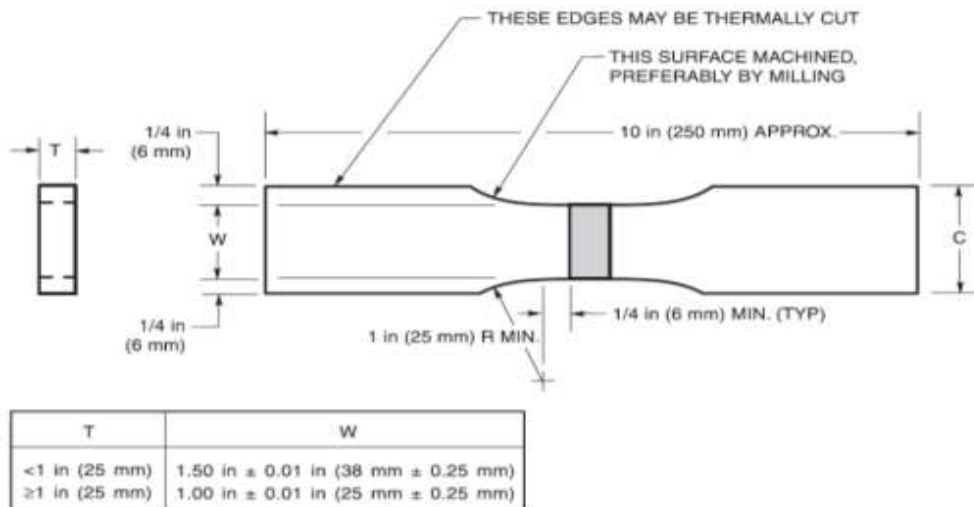
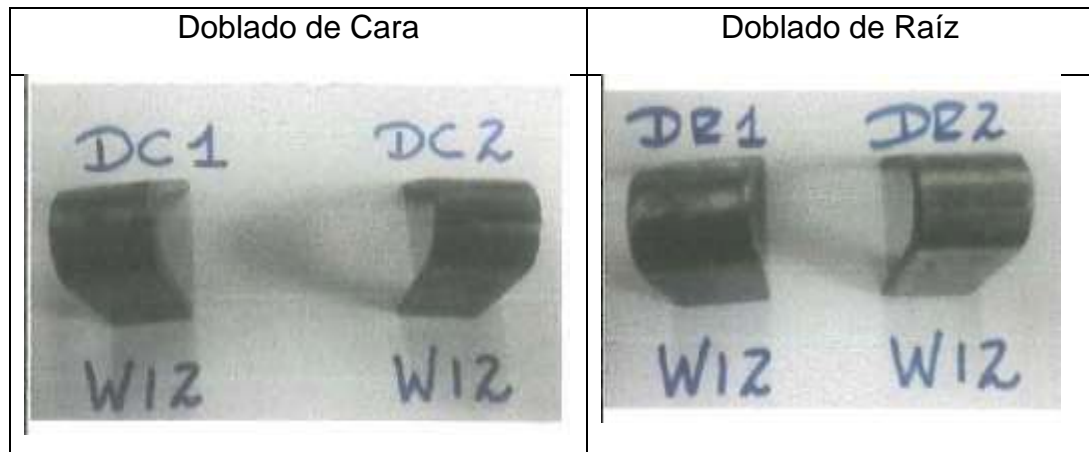


Figura 71 Dimensiones de las probetas para la prueba de tensión para plancha

Fuente: ((AWS), AWS B4.0 Standard Methods for Mechanical Testing of Welds., 2007)

6.2.2. Análisis de Resultados de Doblado

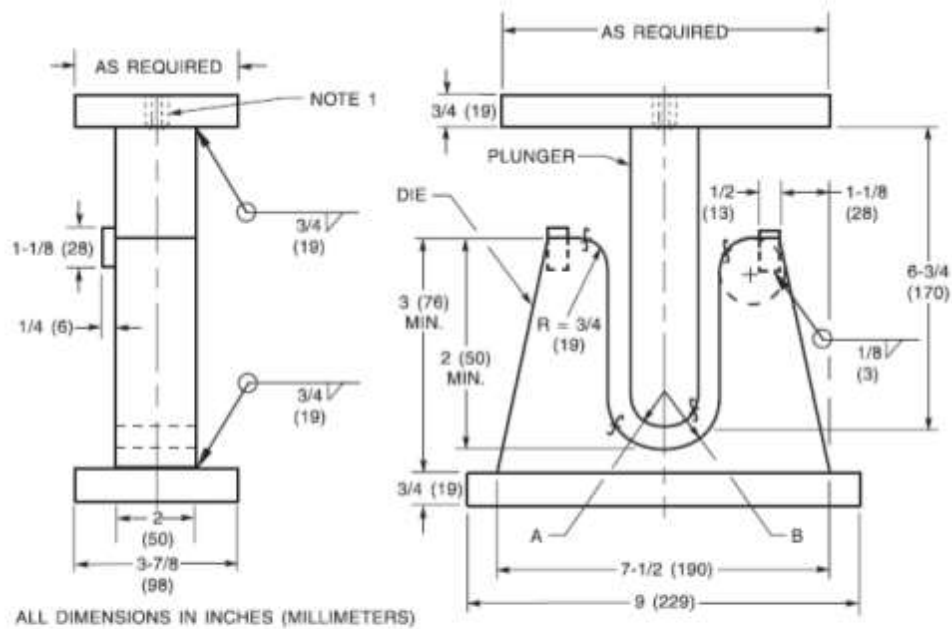
Tabla 11 Ensayo de Doblado



Las probetas dobladas tanto para el ensayo de doblado de cara como de raíz no presentan ningún tipo de discontinuidad relevante ni hacia los bordes ni hacia la sección interna para los doblados de cara y de raíz.

El doblado efectuado hasta una geometría de 180° cumple en concordancia con los requerimientos de AWS D1.1. Edición 2015. Se ha

considerado las dimensiones de la matriz y punzón en función de los requerimientos de AWS B4.0. 2007. Ver informe RD – 001



Fixture Dimensions for 20% Elongation of Weld		
Specimen Thickness, T in (mm)	Plunger Radius, A in (mm)	Die Radius, B in (mm)
3/8 (10)	3/4 (19)	1-3/16 (32)
T	2T	A + T + 1/16 (1.6)

Figura 72 Dimensiones de la matriz y punzón para ensayos mecánicos de doblado según los requerimientos de AWS B4.0: 2007

Fuente: AWS B4.0 2007

6.2.3. Análisis de Resistencia Mecánica de Cupones

Tabla 12. Requerimientos de propiedades mecánicas para un acero ASTM A572 Grado 50

TABLE 4 Tensile Requirements^a

Grade	Yield Point, min		Tensile Strength, min		Minimum Elongation, % ^{b,c,d}	
	ksi	[MPa]	ksi	[MPa]	in 8 in. [200 mm]	in 2 in. [50 mm]
42 [290]	42	[290]	60	[415]	20	24
50 [345]	50	[345]	65	[450]	18	21
55 [380]	55	[380]	70	[485]	17	20
60 [415]	60	[415]	75	[520]	16	18
65 [450]	65	[450]	80	[550]	15	17

^a See specimen Orientation under the Tension Tests section of Specification A 572 6M.

^b Elongation not required to be determined for floor plate.

^c For wide flange shapes over 426 lb/ft [634 kg/m], elongation in 2 in. [50 mm] of 19 % minimum applies.

^d For plates wider than 24 in. [600 mm], the elongation requirement is reduced two percentage points for Grades 42, 50, and 55 [290, 345, and 380], and three percentage points for Grades 60 and 65 [415 and 450]. See elongation requirement adjustments in the Tension Tests section of Specification A 572 6M.

Fuente: ASTM 572 GR50

Tabla 13

Valores de resistencia obtenidos para la soldadura y comparados en función de los requerimientos del material base ASTM A 572 Gr. 50

	Resistencia a la Fluencia		Resistencia a la Tensión	
	Requerido	Ensayado	Requerido	Ensayado
Prueba 1	50	64,61	65	89,69
Prueba 2	50	63,98	65	87,9
Las unidades se encuentran en Ksi [Kilo libra / pulg ²]				

Fuente: ASTM 572 GR50

Los valores obtenidos de la resistencia mecánica son superiores a los requeridos por la especificación ASTM A572 Gr. 50, la resistencia mecánica a la tensión y la cedencia (fluencia) superan en gran medida a los valores mínimos solicitados. En ambos casos (prueba 1 y prueba 2) se ha efectuado cortes de la sección transversal de la soldadura FSW efectuada para un espesor de 6 mm. Ver Informe ILPM 2017 – 025 – T

6.3. Criterios de aceptación de Juntas Soldadas

Criterios de inspección visual han sido considerados anteriormente como los tipos de discontinuidades visuales asociados a este procedimiento de soldadura. Se registra en el informe SED HA 10-EC-FSW001

El método de inspección superficial especificado como tintas penetrantes técnica visible se fundamenta en los mismos criterios de inspección visual y cualquier indicación relevante será evaluada en función de los tamaños del código estructural AWS D1.1. Edición 2015 cuya tabla se adjunta en el Anexo 19.

Al no existir criterios de aceptación y rechazo para los tamaños y longitudes de discontinuidades volumétricas para el proceso FSW como tal sin embargo se han considerado los criterios de aceptación y rechazo del código estructural AWS D1.1. Edición 2015 para la sección de ultrasonido convencional, y se realiza con un inspector nivel II, quien emite el informe correspondiente CS-001

6.4. Criterios de Rechazo de Juntas Soldadas.

Todas las juntas que no muestren unión completa en todo su espesor serán rechazadas. Cuando las juntas contengan indicaciones relevantes las cuales sean interpretadas como discontinuidades, se utilizarán los criterios de inspección visual y volumétrica para reparar, rechazar o aceptar las juntas soldadas por proceso FSW. Ensayos mecánicos adicionales a los expuestos en este proyecto serán considerados complementarios y no serán considerados como criterios de aceptación y/o rechazo. Estos resultados permitirán en todo momento mejorar el proceso sin embargo como parte de este proyecto se ha establecido que hasta este punto se completa el análisis de la metodología.

Por una parte se ha considerado la especificación AWS C6.2. / C6.2M:2006 para desarrollar los requerimientos propios del procedimiento y dentro de este documento se ha considerado el volumen de inspección especificado en el informe CS-001. Por otra parte se ha considerado los criterios de aceptación de AWS D1.1. Edición 2015 para la dimensión de las

indicaciones que se obtengan como parte de éste proceso de soldadura para la inspección visual, superficial y volumétrica. Criterios ECA (Engineering Critical Assessment) fundamentados en tamaños de discontinuidades establecerían criterios propios de aceptación y rechazo relacionados al tamaño de las discontinuidades sin embargo se ha considerado que al ser un proceso de estado sólido se disminuye la probabilidad de discontinuidades volumétricas tales como fisuras que son de condición crítica para una soldadura.

6.5. Elaboración de Documento de Procedimiento

Son parte de la elaboración de este proyecto los siguientes documentos sobre los cuales se ha plasmado todas las variables utilizadas para el desarrollo de este proyecto. Constituyen parte del mismo la empresa auspiciante, el laboratorio de ensayos mecánicos, el personal de inspección no destructiva de la planta entrenad, calificado y certificado, así como todo el soporte externo el cual ha permitido culminar con el desarrollo de éste proyecto.

Los documentos siguientes han sido especificados:

- Procedimiento de soldadura: WPS_FSW.001
- Registro de Calificación del Procedimiento: FSW.17/PQR.001
- Registro de Calificación del Operador: SED.17.W012-FSW
- Reporte de Inspección Visual: SEDHA10-EC-FSW-001
- Reporte de Inspección por Líquidos Penetrantes: 014 – CS
- Reporte de Medición de Dureza: 100 – CS
- Reporte de Inspección por Ultrasonido: CS – 001
- Registro de Ensayos de Doblado: RD – 001
- Reporte de Ensayos de Tensión: ILPM 2017 – 025 – T
- Registro de Dureza Vickers: ILPM 2017-086- H
- Registro de Ensayos Metalográficos: ILPM 2017-086

CAPÍTULO 7

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1. Conclusiones

El proceso de soldadura FSW para el material y espesor seleccionado (ASTM A572 Gr. 50, 6 mm) muestra propiedades mecánicas aceptables para dureza y resistencia mecánica, los valores obtenidos a través de los ensayos mecánicos muestran que existe sanidad de la junta y cumple con los requerimientos de ASTM A572 Gr. 50.

Los perfiles de dureza (tabla 8) obtenidos sobre los diferentes puntos de las secciones transversales a lo largo de la longitud soldada muestran que existe una ligera disminución en su valor numérico comparado con la zona del material base. El gradiente del perfil de dureza presenta una disminución inferior al 10% en la zona ZAC respecto del material base, lo cual nos da como resultado final la eliminación de un proceso de tratamiento posterior a la soldadura para la eliminación de esfuerzos residuales.

En el avance lineal de la herramienta para valores mayores a 45 mm/min se observó un excesivo destello hacia el lado del retroceso. Hacia el lado del avance frontal se observó en todos los casos menor cantidad de discontinuidades, esto debido al menor gradiente de temperatura entre la herramienta y el material.

Con valores de rotación de la herramienta de 3000 RPM no se obtienen valores de temperatura mayores a 690 °C. La combinación entre velocidad de rotación y velocidad de avance brindó una junta sana para un espesor de 6 mm finalmente soldado después de las pruebas efectuadas.

Es importante considerar que el acero soldado es una aleación con requerimiento máximo de manganeso de alrededor del 1,35%, la variación

en aceros con diferentes valores de Mn dará mayores o menores resultados en base a los reportes presentados como parte de este proyecto.

La función principal del manganeso en este proyecto ha sido mejorar los resultados de resistencia mecánica cuyos valores se evidencian en los resultados de laboratorio obtenidos y considerando también que su microestructura se mantiene puesto que la temperatura no supera los 710 °C en donde se podría estimar un cambio de microestructura con respecto de este elemento.

7.2. Recomendaciones

Una herramienta con una velocidad mayor de disipación de calor sería la mejor opción para disminuir el gradiente térmico a mayores espesores en futuras pruebas para un proceso FSW.

El uso de perfiles de ataque de la herramienta y la combinación de secciones rectas e inclinadas podrían mejorar la velocidad en una soldadura de producción y con mayores espesores a soldarse.

Incorporar una medición de microdureza mejoraría la capacidad en soldaduras de producción al incrementar la velocidad de avance sin necesidad de un exceso de calentamiento que pueda provocar discontinuidades del proceso y debilitamiento del material.

BIBLIOGRAFÍA

Bibliografía

- (AWS), A. W. (2007). *AWS B4.0 Standard Methods for Mechanical Testing of Welds*. Miami United States of America: AWS B4 Committee for Mechanical Testing of Welds.
- (AWS), A. W. (2015). *AWS D1.1./D1.1.M: 2015 Structural Welding Code – Steel*. Miami United States of America: AWS D1 Committee on Structural Welding.
- [*Soldadura y Estructuras*]. (s.f.). Obtenido de <http://soldadurayestructuras.com/terminologia-de-las-juntas-soldadas.html>
- Arthur, R. C. ((2011)). *Metallurgy for Non-Metallurgist*. . Ohio United States of America: ASM International.
- AWS. (2001). *Welding Science & Technology*. . Miami United States of America: (AWS) Welding Handbook Committee.
- Bach, M. (2012). *Carleton University*. Obtenido de https://curve.carleton.ca/system/files/etd/bd38dc7e-71e4-4fd6-963b-6a9872a3f3fb/etd_pdf/bb42ad1799b32e749fa0b84efc6c710d/bach-determinationofresidualstressprofilesinafriction.pdf
- Blog Jose Cedeño*. (s.f.). Obtenido de <http://soldaduratecnologica.blogspot.com/2012/07/las-juntas-las-juntas-de-tope-pueden.html>
- Blog Tianjin Anson*. (s.f.). Obtenido de <http://octgproducts.blogspot.com/2016/07/pipeline-welded-joint-design-in.html>
- BoingBoing*. (s.f.). Obtenido de <http://boingboing.net/2017/01/02/these-inertia-friction-welding.html>
- Bond Technologies*. (s.f.). Obtenido de <http://www.bondtechnologies.net/gimbaled-gantry-gg.html>

- Denquin, A. (2012). *Onera*. Obtenido de https://metallurgie2012.sciencesconf.org/conference/metallurgie2012/pages/FSW_A_Denquin.pdf
- Diagrama Fe-C*. (13 de enero de 2013). Obtenido de http://ivegarod.blogspot.com/2013_01_01_archive.html
- George., L. E. (1994). *Welding Metallurgy Carbon and Alloy Steels*. South Carolina United States of America.: American Welding Society .
- Hamdy, F. S. (21 de Noviembre de 2012). *Intech*. Obtenido de <http://www.intechopen.com/books/welding-processes/numerical-simulation-of-residual-stress-and-strain-behavior-after-temperature-modification>
- Handbook, W. ((1996)). *Materials and Applications Part 1*. Miami United States of America: (AWS) Welding Handbook Committee.
- HBS ENGINEERING*. (s.f.). Obtenido de <http://www.hbse.dk/FSW.html>
- Instituto técnico de la Estructura en Acero* . (s.f.). Obtenido de Tomo 13: https://www.uclm.es/area/ing_rural/Acero/Textos/TOMO13.pdf
- John., V. D. (2007). *Steel Metallurgy for Non-Metallurgist*. Ohio United States of America: ASM International. .
- K. Kumar, S. V. (2008). *The role of friction stir welding tool on material flow and weld formation*. Materials Science and Engineering A 485.
- KENNAMETAL*. (s.f.). Obtenido de http://www.kennametal.com/es/about-us/news/new-km4x_-spindle-connection--from-kennametal-delivers-maximum-s.html
- Longhurst, S. G. (s.f.). *Investigation* . Obtenido de <http://research.vuse.vanderbilt.edu/vuwal/Publications/Longhurst%20force-controlled%20FSW.pdf>
- Ltda., A. C. (2016). Manual de entrenamiento del curso de inspección visual . *Acesilicon Cía. Ltda.*, 35.
- Machinery*. (27 de 04 de 2012). Obtenido de <http://www.machinery.co.uk/machinery-news/friction-stir-weld-china-ptg-heavy-industries/41945/>

<http://www.caranddriver.com/features/two-metals-enter-one-metal-leaves-the-miracle-of-friction-stir-welding-tech-dept>

PAR SYSTEMS. (s.f.). Obtenido de <http://www.par.com/technologies/friction-stir-welding/>

R.S. Mishra et al. (2014). *Friction Stir Welding and Processing: Science and Engineering*. Switzerland : Springer International.

Repositorio de Universidad Veracruzana. (s.f.). Obtenido de <https://core.ac.uk/download/files/605/16296707.pdf>

REVISTA TOPE - TECNOLOGIA. (s.f.). Obtenido de http://www.revistatope.com/164_art_FICEP_Soldadura.html

SlideShare . (19 de abril de 2012). Obtenido de <http://es.slideshare.net/kortizeg/5-uniones-soldadas-y-tecnicas-de-soldeo>

SubsTech. (s.f.). Obtenido de http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=resistance_welding_rw

Tecnologia, F. d. (s.f.). *Capitulo IV Procesos de Union y ensamble por soldadura* . Obtenido de <http://materias.fcyt.umss.edu.bo/tecnologia/II/PDF/cap-41.pdf>

Tesis. (s.f.). *Biblioteca Central Universitaria* . Obtenido de <http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/12258/Capitulo3.pdf>

TWI. (s.f.). Obtenido de <http://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/process-faqs/faq-what-is-friction-surfacing/>

Vision Electronica. (2013). Obtenido de <http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/visele/rt/printerFriendly/5519/8101>

(2007). *Welding Processes Part 2*. En W. Handbook, *Welding Processes Part 2* (págs. Página 220, Fig 7.9). Miami: AWS Committee.

Welding, A. (2009). *Handbook Procesos*. miami: AWS.

Welding., A. C. (2006). *AWS C6.2/C6.2M:2006, Specification for Friction Stir Welding of Metals*. Miami United States of America: American Welding Society (AWS).

Welding., A. C. (2009). *ANSI/AWS C6.1.-89 (R2009), Recommended Practices for Friction Stir Welding*. Miami United States of America. : American Welding Society (AWS).

zagreb, S. t. (abril de 2015). *ResearchGate* . Obtenido de https://www.researchgate.net/figure/281924100_fig1_Figure-8-A-micrograph-of-FSW-weld-root-in-aluminium-alloy-5083-with-a-kissing-bond-caused

(George., (1994)) (Arthur, (2011)) (K. Kumar, 2008) (Welding., 2009)
(Welding., AWS C6.2/C6.2M:2006, Specification for Friction Stir Welding of Metals, 2006)