



POSGRADO INTERINSTITUCIONAL DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA

CIENCIA Y TECNOLOGIA

**“EFECTO DEL DAÑO POR FATIGA EN EL COMPORTAMIENTO
CUASI-ESTÁTICO Y DINÁMICO DE UNIONES SOLDADAS DE
ALUMINIO POR LOS PROCESOS DE FUSIÓN Y FRICCIÓN”**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE

MAESTRO EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA

EN LA ESPECIALIDAD DE

DISEÑO Y DESARROLLO DE SISTEMAS MECÁNICOS

PRESENTA

ING. CHRISTIAN FÉLIX MARTÍNEZ

ASESOR

DR. CARLOS RUBIO GONZÁLEZ

006026

Santiago de Querétaro, Qro., Octubre 2010.



CIENCIA Y TECNOLOGÍA

Director de Posgrado
PICYT – CIDESI
Querétaro

Él abajo firmante, miembro del Comité Tutorial del alumno **Christian Félix Martínez**, una vez leída y revisada la Tesis titulada “ **Efecto del daño por fatiga en el comportamiento cuasi-estático y dinámico de uniones soldadas de aluminio por los procesos de fusión y fricción** ”, acepto que la referida tesis revisada y corregida sea presentada por el alumno para aspirar al grado de Maestro en Ciencia y Tecnología en la opción terminal de **Diseño y Desarrollo de Sistemas Mecánicos** durante el Examen de Grado correspondiente.

Y para que así conste firmo la presente a los 2 días del mes de SEPTIEMBRE del año dos mil 10 .

Dr. Carlos Rubio González
Tutor Académico



CIENCIA Y TECNOLOGÍA

Director de Posgrado
PICYT – CIDESI
Querétaro


Los abajo firmantes, miembros del Jurado del Examen de Grado del alumno **Christian Félix Martínez**, una vez leída y revisada la Tesis titulada “ **Efecto del daño por fatiga en el comportamiento cuasi-estático y dinámico de uniones soldadas de aluminio por los procesos de fusión y fricción** ”, aceptamos que la referida tesis revisada y corregida sea presentada por el alumno para aspirar al grado de Maestro en Ciencia y Tecnología en la opción terminal de **diseño y desarrollo de sistemas mecánicos** durante el Examen de Grado correspondiente.


Y para que así conste firmamos la presente a los 27 días del mes de Septiembre del año dos mil 10.


Dr. José Luis Ortiz Rosales
Presidente


Dr. Víctor Manuel Sánchez Cabrera
Secretario


Dr. Joaquín Pérez Meneses
Vocal


Dr. Ulises Sánchez Santana
Vocal


Dr. Carlos Rubio González
Vocal

RESUMEN

Hoy en día uno de los aspectos que ha tomado gran importancia es el estudio de los materiales, y uno muy importante es la determinación de su comportamiento a través de ensayos dinámicos.

En muchas aplicaciones, tales como en la industria aeronáutica, automotriz, en la marina, en la construcción, etc., las estructuras soldadas pueden ser sujetas a cargas dinámicas, por ejemplo, bajo cargas de impacto o de explosión. Por lo tanto, es importante entender las propiedades mecánicas de los materiales estructurales a altas velocidades de deformación a la que los componentes pueden ser sometidos durante el servicio. Sin embargo, hasta la fecha, las propiedades mecánicas determinadas a partir de pruebas a velocidades de deformación cuasi-estáticas se han utilizado en los cálculos para determinar la resistencia y respuesta mecánica de las estructuras soldadas cuando están sujetas a cargas de impacto.

Muchos investigadores han estudiado y comparado los procesos de soldadura TIG y FSW mediante pruebas mecánicas cuasi-estáticas, durezas, microestructuras, etc. [21,22], pocos investigadores han estudiado el comportamiento dinámico de las uniones FSW [23], sin embargo, en la actualidad, en nuestro país es un tema casi no estudiado.

El objetivo de este trabajo es investigar el efecto a altas velocidades de deformación y el daño previo por fatiga en el comportamiento a tensión de muestras obtenidas de las uniones soldadas de la aleación de aluminio AISI 6063. Se aplicaron dos procesos de soldadura, el método convencional TIG (Electrodo de tungsteno y protección de gas inerte, o también conocido como Soldadura de Arco por Tungsteno, GTAW) en algunas muestras y la soldadura por fricción para otras muestras. El comportamiento cuasi-estático y dinámico son investigados, para el primer caso usando la máquina MTS 810 y para el segundo, usando la Barra Hopkinson. Las mediciones realizadas mediante la Barra Hopkinson se derivan de la teoría de propagación de ondas en un medio elástico continuo. Diferentes tipos de carga y diferentes tipos de daño son considerados. El daño por fatiga fue inducido en los especímenes por la aplicación de carga cíclica bajo

la condición de control de esfuerzo. Se han comparado las respuestas cuasi-estática y dinámica de las uniones soldadas por ambos procesos de soldadura y el material base. También en el presente trabajo se implementó el método de contorno para la determinación de esfuerzos residuales en soldaduras.

Los resultados logrados en la experimentación muestran como se comportan las uniones soldadas por ambos procesos a altas velocidades de deformación, como afecta la respuesta cuasi-estática con cierto daño aplicado a la unión soldada, y por último que proceso de soldadura ofrece mejores propiedades mecánicas bajo diferentes condiciones y diferentes pruebas realizadas.

Un punto muy importante en este trabajo, es que en un futuro, se conozca la respuesta dinámica de las uniones soldadas, y que se pueda utilizar la curva esfuerzo-deformación dinámica para el cálculo de la resistencia de las estructuras que lleguen a estar bajo condiciones de impacto.

ÍNDICE

	Página
Lista de figuras	vii
Lista de tablas	xii
CAPÍTULO I. Introducción	
1.1. Introducción	2
1.2. Antecedentes	3
1.3. Definición del problema	9
1.4. Justificación	9
1.5. Objetivos	10
1.6. Hipótesis	10
1.7. Organización de la Tesis	11
CAPÍTULO II. Procesos de Soldadura	
2.1. Introducción a la soldadura	13
2.1.1. Aplicaciones de la soldadura	13
2.1.2. Tipos de soldaduras	13
2.1.3. Selección del tipo de junta	14
2.1.4. Geometría de la junta	15
2.2. Proceso de soldadura por fusión (TIG)	16
2.2.1. Ventajas y Desventajas	17
2.2.2. Fundamentos del proceso	18
2.2.3. Equipamiento	18
2.2.3.1. Soplete	18
2.2.3.2. Electroodos	19
2.2.3.3. Fuente de poder	20
2.2.3.4. Corriente continua	21
2.2.3.5. Corriente alterna	22
2.2.4. Gas de protección	22
2.2.4.1. Argón	23
2.2.4.2. Helio	23
2.2.5. Material de aporte	23
2.2.6. Generación de calor	24
2.2.7. Zonas Afectadas por el Calor	25
2.2.8. Esfuerzos residuales en el proceso TIG	26

2.2.9. Defectos y fallas	28
2.3. Proceso de soldadura por Fricción con Batido “Friction Stir Welding” (FSW)	29
2.3.1. Introducción	29
2.3.2. Ventajas y desventajas	31
2.3.3. Aplicaciones	32
2.3.4. Equipo	32
2.3.5. Herramienta	33
2.3.5.1. Geometría de la herramienta	33
2.3.5.2. Propiedades de la herramienta	34
2.3.6. Parámetros del proceso	35
2.3.7. Generación de calor	36
2.3.8. Zonas Afectadas por el Calor	37
2.3.9. Esfuerzos residuales en el proceso FSW	38
2.3.10. Defectos y fallas	39

CAPÍTULO III. Pruebas de Fatiga y Dinámicas

3.1.1. Fatiga basada en el Esfuerzo	42
3.1.2. Descripción de cargas cíclicas	42
3.1.3. Esfuerzos Puntuales vs. Esfuerzo Nominales	43
3.1.4. Curva Esfuerzo-Ciclos de vida (S-N)	44
3.1.5. Origen de la carga cíclica	46
3.1.6. Prueba de Fatiga	47
3.1.7. La naturaleza física del daño por fatiga	47
3.1.8. Cargas de amplitud variable	49
3.1.8.1. La Regla de Palmgren-Miler	49
3.1.9. Fatiga en Soldaduras	50
3.1.9.1. Nomenclatura y discontinuidades de la soldadura	50
3.1.9.2. Curva Esfuerzo-Ciclos de vida para uniones soldadas (S-N)	53
3.1.9.3. Mejora de la resistencia a la fatiga en soldadura	54
3.1.9.4. Estimación de Vida a la Fatiga en Soldadura	55
3.2. Pruebas Dinámicas	55
3.2.1. Comportamiento de los metales a velocidades altas de deformación	55
3.2.2. Pruebas uniaxiales a velocidades altas de deformación	56
3.2.3. Propagación de ondas en sólidos	56
3.2.3.1. Propagación de ondas elásticas en barras cilíndricas	56
3.2.3.2. Velocidad de propagación	58

3.2.4. Incidencia, Reflexión y Transmisión de ondas en una barra cilíndrica	59
3.2.5. Determinación de Esfuerzo, deformación y strain rate	60
3.3. Barra Hopkinson a Tensión	62
3.3.1. Elementos de la Barra Hopkinson	63
3.3.1.1. Barras y proyectil	63
3.3.1.2. Cámara de presión	64
3.3.1.3. Elementos de alineación y soporte	65
3.3.2. Instrumentación	66
3.3.2.1. Strain gages	66
3.3.2.2. Velocímetro	67
3.3.2.3. Amplificadores de señal y Osciloscopio	68
3.3.3. Procesamiento de datos	69

CAPÍTULO IV. Material y Desarrollo Experimental

4.1. Material	73
4.2. Espécimen	74
4.3. Unión soldada por el proceso TIG	75
4.3.1. Parámetros del proceso por fusión	75
4.4. Unión soldada por el proceso FSW	76
4.4.1. Herramienta	77
4.4.2. Selección de los parámetros para el proceso FSW	79
4.5. Pruebas cuasi-estáticas	80
4.6. Pruebas de fatiga	81
4.7. Ensayos dinámicos	82
4.8. Microindentación	85
4.9. Metalografías	86
4.10. Fractografías	87
4.11. Medición de Esfuerzos Residuales	87
4.11.1. Método de Contorno	88
4.11.2. Elemento Finito	89

CAPÍTULO V. Resultados Experimentales

5.1. Pruebas cuasi-estáticas	94
5.1.1. Especímenes sin daño por fatiga	94
5.1.2. Especímenes con daño por fatiga	95
5.2. Pruebas de Fatiga por control de esfuerzo	97
5.3. Ensayos dinámicos	97

5.4. Perfiles de microindentación	99
5.5. Metalografías	100
5.6. Fractografías	101
5.7. Esfuerzos Residuales	104
5.8. Soldadura por fricción hecha en CIDESI en la aleación Al6061-T6	106
CONCLUSIONES	110
APÉNDICES	
BIBLIOGRAFÍA	

Lista de Figuras

Figura	Título	Página
2.1.	Representación esquemática de los tipos de soldaduras.	14
2.2.	Representación esquemática de la geometría de las juntas(a) abertura adecuada, (b) abertura excesiva, (c) separación correcta y (d) talón adecuado.	16
2.3.	Esquema del proceso TIG.	16
2.4.	Esquema del equipo para la soldadura TIG.	18
2.5.	Tipos de corriente.	22
2.6.	Representación esquemática del calor generado durante el proceso por fusión.	24
2.7.	(a) Representación esquemática de la sección transversal de una unión soldada por TIG, y (b) zonas identificadas en una unión soldada de un acero al carbono.	25
2.8.	Efecto del calor de entrada por unidad de longitud de la soldadura, (a) ancho de ZAT (sombreado), (b) ciclos térmicos cerca la frontera de fusión, y (c) perfil de resistencia o dureza.	26
2.9.	Cambios de temperatura y esfuerzos durante el proceso de soldadura.	27
2.10.	Típica distribución de esfuerzos residuales longitudinal σ_x y transversal σ_y .	28
2.11.	Ilustración esquemática del proceso FSW.	30
2.12.	Fresadora convencional.	32
2.13.	Herramienta para FSW.	33
2.14.	Dibujo esquemático de la herramienta FSW.	34
2.15.	Inclinación de la herramienta FSW.	35
2.16.	a) Esquema de la sección transversal de una soldadura FSW típica mostrando las zonas A) metal base, B) zona afectada térmicamente (ZAT), C) zona afectada termo mecánicamente (ZATM) y D) zona del "nugget", y b) macrografía de una unión soldada de la aleación 7075Al-T651.	37
3.1.	Ciclos con amplitud constante y sus respectivas nomenclaturas. (a) Esfuerzos	

	completamente invertidos, $\sigma_m=0$, (b) Esfuerzo medio $\sigma_m \neq 0$, (c) Esfuerzo de cero a tensión, $\sigma_{min}=0$.	43
3.2.	Esfuerzos actual o nominal para (a) tensión simple, (b) flexión, y (c) miembro muescado. Las distribuciones de esfuerzos actuales σ_y vs. x se muestran como líneas solidas, y las distribuciones hipotéticas asociadas con el esfuerzo nominal S como líneas interrumpidas. En (c), se muestra con líneas punteadas la distribución de esfuerzo que ocurrirá si no hubiera fluencia.	44
3.3.	Curvas S-N de pruebas de flexión rotativa en especímenes no muescados de una aleación de aluminio. Usando la misma escala lineal en esfuerzo, pero en el número de ciclos en escala lineal (a), y logarítmica en (b).	45
3.4.	Curva S-N en flexion rotativa de especímenes no muescados de un acero con diferente límite de fatiga.	45
3.5.	Registros de esfuerzos en el brazo de dirección de un motor de vehículo, incluyendo la historia original esfuerzo-tiempo (a), y la separación de este en las cargas vibratorias debidas a la rugosidad del camino (b), y la carga de trabajo debida a la maniobrabilidad del vehículo (c).	47
3.6.	Secuencia fotográfica de la aparición y el crecimiento de una grieta durante una carga cíclica. Se aprecia que hasta $N=1.4 \times 10^5$ aparece la entonces microgrieta.	48
3.7.	Uso de la regla Palmgren-Miner para la predicción de vida para una amplitud variable de carga completamente invertida.	49
3.8.	Predicción de vida para una historia de esfuerzos repetidos con cambio de valor medio.	50
3.9.	Tipos de soldadura y puntos de fatiga para acero estructural.	51
3.10.	Nomenclatura de la soldadura e iniciación de grieta por fatiga y/o sitios de crecimiento. (a) Penetración completa, (b) penetración parcial.	53
3.11.	Influencia de la forma de reforzamiento en la resistencia a la fatiga de soldaduras transversales a tope.	54
3.12.	Curvas S-N para soldaduras transversales a tope de acero al carbono Q&T,	

	$S_u=785$ MPa, $R=0$.	54
3.13.	Aspectos dinámicos de las pruebas mecánicas.	56
3.14.	Propagación de una onda en una barra cilíndrica. (a) Antes del impacto, (b) después del impacto, y (c) elemento diferencial.	57
3.15.	Barra Hopkinson para material dúctil.	60
3.16.	(a) Representación esquemática de la barra Hopkinson, (b) barra Hopkinson Laboratorio Mecánica Experimental CIDESI .	62
3.17.	Ilustración esquemática de la cámara de presión.	64
3.18.	Elementos externos de la cámara de aire.	65
3.19.	Ilustración esquemática del desplazamiento de los elementos internos de la cámara para la propulsión del proyectil.	65
3.20.	(a) Placa que detiene deslizamiento de la barra y, (b) soportes de la barra.	66
3.21.	Instrumentación para la medición y registro en la barra Hopkinson.	66
3.22.	Circuito eléctrico del puente de Wheatstone.	67
3.23.	Velocímetro.	67
3.24.	Amplificadores de señal.	68
3.25.	Osciloscopio.	68
3.26.	Amplitudes de los pulsos ϵ_i , ϵ_R y ϵ_T .	69
3.27.	(a) Señales originales (pulsos sin filtrar), (b) señales filtradas.	70
4.1.	Ilustración esquemática del espécimen usado en los ensayos cuasi-estáticos, fatiga y dinámicos. Dimensiones en mm.	74
4.2.	Representación esquemática de la unión soldada.	75
4.3.	(a) Fresadora TOS OMOLOUC, (b) fresadora ARSENAL.	77
4.4.	Herramienta utilizada para hacer FSW en Al6063.	77
4.5.	Herramienta A para FSW CIDESI. Dimensiones en mm.	78
4.6.	Herramienta B para FSW CIDESI. Dimensiones en mm.	78
4.7.	Herramientas utilizadas para FSW en CIDESI. (a) perno cuadrado,	

	(b) perno circular.	79
4.8.	(a) Máquina MTS 810, y (b) probeta con extensómetro puesto.	80
4.9.	Probetas ensayadas a tensión en la MTS, (a) material base,(b) unión soldada.	81
4.10.	Probeta montada para ensayo de fatiga.	82
4.11.	Forma final de los extremos de las barras.	82
4.12.	Probeta colocada y sujeta en las barras.	83
4.13.	Pulsos de las probetas (a) TIG y (b) FSW obtenidos a una velocidad de impacto del proyectil de 15m/s.	83
4.14.	Probetas TIG ensayadas a diferentes velocidades de impacto del proyectil.	84
4.15.	Probetas FSW ensayadas a diferentes velocidades de impacto del proyectil.	84
4.16.	Gráficas obtenidas por el procesamiento de datos en el programa de MatLab. (a) Pulsos filtrados, (b) reacomodo de datos en $t=0$, y (c) strain rate-tiempo llevado a $t=0$.	85
4.17.	Microindentador FUTURE-TECH.	86
4.18.	Montadora Leco.	86
4.19.	Estereoscopio Leica Zoom 2000.	87
4.20.	Representación esquemática de la superficie cortada medida en la máquina de coordenadas. (a) Muestra TIG, (b) muestra FSW.	88
4.21.	Mallado de la pieza en ANSYS para el análisis de los esfuerzos residuales.	91
4.22.	Desplazamientos generados en MatLab, inducidos en ANSYS, para el análisis De los esfuerzos residuales.	92
5.1.	Curvas esfuerzo-deformacion cuasi-estáticas material base y uniones soldadas, Al6063.	94
5.2.	Fotografía de la sección transversal de la unión TIG mostrando poros.	95
5.3.	Curva esfuerzo-deformación cuasi-estáticas con daño y sin daño de especímenes FSW, Al6063.	96
5.4.	Curvas dinámicas esfuerzo-deformación de (a) uniones TIG y (b) uniones FSW a diferentes velocidades de deformación, Al6063. En ambos casos	

las probetas estan libres de daño.	98
5.5. Perfil de microdureza de la union soldada TIG.	99
5.6. Perfil de microdureza de la union soldada FSW.	100
5.7. Metalografías de las secciones transversales de las muestras (a) TIGy (b) FSW. Fotos tomadas a 0.8x y 2.5x, respectivamente.	101
5.8. Uniones soldadas por fusión ensayadas en la barra Hopkinson a una velocidad del proyectil de $v=15\text{m/s}$.	102
5.9. Fractografías de uniones soldadas por fusión ensayadas en la barra Hopkinson a velocidades de impacto de (a) $v=18\text{m/s}$ y (b) $v=25\text{m/s}$.	102
5.10. Uniones soldadas por fricción ensayadas en la barra Hopkinson a una velocidad de impacto de $v=15\text{m/s}$.	103
5.11. Uniones soldadas por fricción ensayadas en la barra Hopkinson a una velocidad de impacto de $v=18\text{m/s}$.	103
5.12. Uniones soldadas por fricción ensayadas en la barra Hopkinson a una velocidad de impacto de $v=25\text{m/s}$.	104
5.13. Distribución de esfuerzos residuales, (a) muestras TIG, (b) muestras FSW.	105
5.14. Distribucion esfuerzos residuales a lo largo del perfil de las uniones Soldadas, Al6063.	105
5.15. Nube suavizada de puntos de la superficie deformada, muestras (a) TIG, muestras (b) FSW.	106
5.16. Curvas esfuerzo-deformación de la aleación Al6061-T6, material base y uniones soldadas por fricción usando la herramienta de perno cuadrado.	107
5.17. Perfiles microdureza uniones soldadas por fricción, 1000rpm, 1200rpm, 1400rpm, Al6061-T6	108
5.18. Fotografías de las diferentes regiones en las uniones FSW, (a) 1000rpm,(b) 1200rpm, (c) 1400rpm. Aumento de 0.8x.	109

Lista de Tablas

Tabla	Título	Página
2.1.	Boquillas para soldadura TIG.	19
2.2.	Código de color y elementos de aleación.	20
2.3.	Rangos típicos de corrientes para electrodos de tungsteno.	21
2.4.	Selección del tipo de corriente para soldaduras TIG.	22
3.1.	Constantes para la curva S-N para varios metales dúctiles de ingeniería, de pruebas a especímenes no muescados a esfuerzo medio axial igual a cero.	46
3.2.	Velocidades de propagación en distintos medios.	59
3.3.	Propiedades del acero Maranging-300, especificación AISI 18Ni(300). Referencias UNS K93120, ASTM A538(C), ASTM A579.	63
4.1.	Composición química de la aleación de aluminio 6063.	73
4.2.	Composición química de la aleación de aluminio 6061-T6	74
4.3.	Composición química del metal de aporte ER4043. Clasificación y Especificación AWS.	75
4.4.	Parámetros del proceso de soldadura TIG.	76
4.5.	Características principales de las herramientas para FSW en CIDESI.	78
4.6.	Parámetros empleados en las soldaduras hechas en CIDESI, usando las herramientas A y B.	80
4.7.	Propiedades mecánicas de las muestras TIG y FSW utilizadas para el análisis de los esfuerzos residuales.	90
5.1.	Propiedades mecánicas cuasi-estáticas sin daño, Al6063.	95
5.2.	Propiedades mecánicas de las unionesFSW. Condición cuasi-estática con daño, Al6063.	96
5.3.	Propiedades mecánicas material base y uniones soldadas, Al 6061-T6	107

Capítulo I

Introducción

1.1 Introducción

Las estructuras soldadas de aleación de aluminio cada vez son más utilizadas en la construcción y en aplicaciones industriales, tal como en la industria automotriz, aeronáutica, etc.

La soldadura de aluminio y sus aleaciones siempre han representado un gran reto para los diseñadores y tecnólogos, porque se consideran aleaciones insoldables o difíciles de soldar. Las aleaciones de aluminio, especialmente las aleaciones tratadas térmicamente, son difíciles de unir por medio de técnicas de soldadura por fusión, ya que algunos defectos de soldadura tales como grietas y porosidades se forman durante la solidificación de la soldadura; y también, debido a que estas técnicas convencionales por fusión aportan una gran cantidad de energía para fundir el material de aporte (si es utilizado) y al material base, este aporte térmico tiene una repercusión muy importante en las propiedades mecánicas y microestructurales de las uniones soldadas. Y además, las técnicas convencionales a menudo conducen a un deterioro significativo en la fuerza de la unión a causa de las transformaciones de fase y el ablandamiento inducido en la aleación.

La Soldadura por Fricción con batido "Friction Stir Welding" es un nuevo y prometedor método que produce juntas de bajo costo y alta calidad. Este proceso es adecuado para la unión de aleaciones de aluminio especialmente para las que son consideradas como insoldables. Es un proceso en fase sólida en el que el metal a ser soldado no es fundido durante el proceso de soldadura; esta técnica consiste en una herramienta cilíndrica rotatoria no consumible que se mueve entre las orillas de las placas a tope y las fricciona juntas.

El propósito de este trabajo es investigar el comportamiento cuasi-estático en uniones soldadas sin y con diferentes niveles de daño inducidos por fatiga bajo la condición de control de esfuerzo, así como investigar el comportamiento dinámico a tensión de las uniones soldadas de la aleación de aluminio 6061-T6. Sólo se conoce un trabajo [23] que ha estudiado el comportamiento dinámico a compresión de uniones soldadas por fricción. Los procesos de soldadura usados en este trabajo son el proceso por fusión

TIG (“Tungsten Inert Gas”) y el proceso por fricción con batido FSW (“Fricción Stir Welding”).

1.2. Antecedentes

R. Nandan [1] realizó un estudio completo para entender el proceso de fricción y sus consecuencias metalúrgicas, principalmente en aleaciones de aluminio, en aceros y otras aleaciones no ferrosas. El trabajo se enfocó más en el estudio de la generación de calor, la transferencia de calor y el flujo plástico durante el proceso de soldadura y los elementos del diseño de la herramienta para entender la formación de defectos, la estructura y las propiedades de los materiales soldados.

Sato Y. S. [2] realizó un estudio sobre la distribución microestructural obtenida por el proceso de fricción de la aleación de aluminio 6063 asociada al perfil de dureza, realizando análisis de Microscopia Óptica, Microscopia Electrónica de Transmisión y perfiles de microdureza. En este trabajo se obtuvo que la dureza se disminuye en la zona soldada, también se muestra que la estructura de grano en la soldadura hay tres diferentes regiones, granos finos recristalizados alrededor del centro de la soldadura, granos equiaxiales gruesos del material base y granos recuperados entre las dos regiones. También explica que el perfil de dureza depende ligeramente del tamaño de grano, pero fuertemente de la distribución de precipitados.

Lui HJ. [3] llevó a cabo un estudio sobre las propiedades mecánicas cuasi-estáticas y localización de fractura en uniones soldadas por el proceso de fricción en la aleación de aluminio 2017-T351. Obtuvo que las propiedades a tensión de las uniones son más bajas que las del material base y se fracturan en el centro de la soldadura cuando la velocidad de avance es grande; y cuando la velocidad de avance es menor, las propiedades a tensión son un poco más altas y las uniones se fracturan cerca o en la interface entre la soldadura del “nugget” y la zona afectada termo-mecánicamente (TMAZ). Estableció que las propiedades a tensión y localización de fractura dependen de los defectos de la soldadura, la distribución de dureza de las uniones y de los parámetros de la soldadura.

Lui G. [4] llevó a cabo un estudio sobre la microestructura obtenida en el proceso de soldadura por fricción en la aleación de aluminio 6061-T6 realizando análisis de Microscopía Óptica, Microscopía Electrónica de Transmisión y perfiles de microdureza de las uniones soldadas. Establece que existe una porción de grano fino en la zona de la soldadura considerablemente menor a la del metal base, también explica que existe una distribución homogénea de los precipitados y más pequeños en el metal base que en la zona de la soldadura.

Kumar K. [5] realizó un estudio sobre el efecto de la carga axial y la posición de la interface en la resistencia de tensión de las uniones soldadas de aleación de aluminio 7020-T6 por el proceso de fricción. Observó que con una carga axial de 8.1kN la unión soldada se mantenía libre de defectos y con una carga axial de 8.8kN, obtuvo la máxima resistencia de la soldadura. Y también estableció que cuando la herramienta se desvía del rango seguro, la resistencia de tensión disminuye bruscamente.

Sato Y. S. [6] hizo un estudio sobre los factores microestructurales que rigen las propiedades de tensión de las uniones soldadas por el proceso de fricción, en la aleación de aluminio 6063 mediante la estimación de las propiedades a tensión locales en la junta, incluyendo regiones de la zona batida a la región de la zona del material base no afectada. Estableció que la microestructura local y la dureza son los factores que rigen las propiedades a tensión, también estimó que la fractura a tensión se produjo en la región de dureza mínima en una junta con dureza heterogénea.

H. Aydin [7] se centró en estudiar las propiedades a tensión de las uniones por el proceso de fricción de la aleación de aluminio 2024 con diferentes tratamientos térmicos; le dio énfasis a la microestructura, microdureza, las propiedades a tensión y a la localización de fractura en las juntas. Observó que varias aleaciones de aluminio con diferentes tratamientos térmicos poseen mayor resistencia a la tensión y mayor esfuerzo de fluencia y menor elongación que la aleación 2024-O, pero esta aleación 2024-O fue la única que exhibió mayores valores de microdureza y las mismas propiedades a tensión de la unión soldada comparada con el material base. También estableció que las uniones soldadas por fricción de la aleación de aluminio 2024 con

diferente estado de tratamiento térmico, tienen diferentes características de fractura y la zona de localización donde ocurre ésta.

D. M. Rodríguez [8] estudió la influencia de los parámetros del proceso por fricción en juntas soldadas con placas de 1 mm de espesor de la aleación de aluminio 6014-T4 comparando la microestructura y las propiedades mecánicas, utilizando dos herramientas diferentes. Obtuvo el esfuerzo de fluencia similar para ambas uniones y el material base, pero menos ductilidad para las uniones respecto al material base. Comprobó que para una unión realizada por un tipo de herramienta, disminuía más la dureza respecto a la otra unión, y que este decremento de la dureza se daba en el área del hombro. También estableció que una unión mostraba un tamaño de grano más largo en el “nugget” con pocos precipitados gruesos, mientras tanto la otra unión mostraba un tamaño de grano más pequeño pero con más precipitados gruesos.

C. Leita [9] estudió el comportamiento a la tensión de juntas similares y desiguales soldadas por fricción, en placas de 1 mm de espesor de dos aleaciones de aluminio (AA5182-H111, AA6061-T4), haciendo pruebas de microdureza, análisis microestructurales y pruebas a tensión. Estableció que el comportamiento a tensión y microdureza para la unión de AA5182-H111 depende principalmente del tamaño de grano en la zona afectada termomecánicamente, y para la unión de AA6061-T4 depende principalmente de la distribución de precipitados. Encontró que la unión de la aleación AA5182-H111 presenta incremento en la dureza y en el esfuerzo de fluencia, y para la unión de AA061-T4 una caída en la dureza y en el esfuerzo de fluencia.

R. M. Leal [10] estudió la influencia de la geometría de la herramienta en el flujo del material durante el proceso de fricción en placas de 1 mm de espesor de las aleaciones AA5182-H111 y 6061-T4 mediante análisis microestructural y pruebas de microdureza. Encontró que dependiendo de la geometría de la herramienta, el pin o el hombro de esta misma tienen mayor influencia en las propiedades mecánicas de la unión. También concluyó que el perno o el hombro de la herramienta determina las características del “nugget” y estructura de la soldadura.

G. Buffa [11] estudió la influencia de los parámetros en las propiedades mecánicas y metalúrgicas mediante análisis experimental y numérico de uniones traslapadas por el proceso de fricción en la aleación AA2198-T4, usando diferentes geometrías de la herramienta y variando la velocidad de rotación. Concluyó que para producir uniones traslapadas efectivas por fricción con suficientes propiedades mecánicas y metalúrgicas, se debe obtener un área o zona del “nugget” lo más amplia que se pueda y que el flujo del material sea bueno. Estableció que modelos numéricos son capaces de predecir el efecto de la geometría de la herramienta sobre la distribución de las principales variables de campo.

A. Scialpi [12] estudió el efecto de la geometría del hombro en las propiedades mecánicas y microestructura en juntas soldadas por el proceso de fricción en la aleación de aluminio 6082-T6, utilizando tres diferentes geometrías del hombro. Los resultados los obtuvo mediante pruebas de tensión, microdureza y macrografías. Observó que no hubo una variación notable en la dureza entre las uniones, en las pruebas de tensión obtuvo buenos esfuerzos y diferencias no considerables, pero si observó una gran diferencia en la elongación. También determinó una ligera influencia de la geometría del hombro observando las dimensiones del grano en el “nugget”, esto, debido al diferente calor generado por los diferentes hombros.

K. Elangovan [13] investigó el efecto de los perfiles de la herramienta y el diámetro del hombro en la zona formada por el proceso de fricción. Relacionó las propiedades a tensión y la zona formada por fricción en uniones soldadas de la aleación AA6061. Obtuvo las mejores propiedades mecánicas (tensión, microdureza) utilizando una herramienta que tuviera una relación de diámetros igual a 3 ($D/d=3$), y también la región de la zona formada por el proceso de fricción quedó libre de defectos. Y estableció que la región de la zona formada por el proceso de fricción queda libre de defectos en función del perfil de la herramienta y el diámetro del hombro.

G. Buffa [14] estudió los cambios metalúrgicos examinados a través de simulación numérica y experimentos para distinguir los efectos de las cargas mecánicas y térmicas; pero se enfocó más a los esfuerzos residuales generados durante el proceso de fricción en la aleación AA7075-T6. Concluyó que los esfuerzos residuales que

ocurren en el proceso son principalmente debido al flujo térmico generado entre el trabajo hecho por las fuerzas de fricción descompuestas en calor, en particular la interface hombro-pieza de trabajo que es la fuente más relevante de calor activa. También estableció que la acción mecánica ejercida por el pin de la herramienta y el flujo de calor generado, son responsables de la evolución metalúrgica que ocurre en la sección transversal del espécimen, y en particular para el fenómeno de recristalización dinámica observada en el “nugget”.

M. Peel [15] estudió la microestructura, propiedades mecánicas y esfuerzos residuales en función de la velocidad de avance del proceso por fricción en la aleación AA5083. Mediante la difracción de neutrones para los esfuerzos residuales observó que los esfuerzos longitudinales incrementan conforme incrementa la velocidad de avance debido a los gradientes térmicos y al tiempo reducido de la relajación de esfuerzos. También estableció que los esfuerzos transversales no muestran una dependencia de la velocidad de rotación y que en la zona de soldadura hay esfuerzos a tensión y el material de la pieza de trabajo tiene de compresión.

J. T. Assis [16] analizó la distribución de esfuerzos residuales en la zona soldada mediante la técnica de Difracción de Rayos-X en juntas soldadas por procesos de fusión. Las componentes transversales y longitudinales de los esfuerzos los midió en el cordón de soldadura, en la zona afectada térmicamente y en el material base cerca de la región soldada. Utilizó dos muestras diferentes, soldadura lineal y soldadura circular. Concluyó que la distribución de esfuerzos en la soldadura lineal es caracterizada por esfuerzos de compresión en la superficie y esfuerzos de tensión en la zona afectada térmicamente y el material base. Y estableció que la distribución de esfuerzos en la soldadura circular son más complicados.

V. Monin [17] estudió la distorsión geométrica causada por los esfuerzos residuales derivados durante el proceso de soldadura por fusión en placas de acero y también analizó la distribución de estos esfuerzos mediante la técnica de difracción de Rayos-X y análisis de elemento finito. Obtuvo que la distribución de esfuerzos residuales longitudinales y transversales obtenidos por análisis de elemento finito son muy parecidos a la distribución de esfuerzos medidos por difracción de Rayos-X.

B. Prime [18, 19, 20] implementó el método de contorno para determinar la distribución los esfuerzos residuales en soldaduras.

J. Zhao [21] comparó el efecto de los procesos de soldadura por fusión y fricción en las propiedades mecánicas cuasi-estáticas de uniones soldadas de la aleación Al-Mg-Sc. Observó que las propiedades mecánicas de las juntas por fricción son mucho mejores que las de las juntas por fusión. Estableció que las excelentes propiedades mecánicas de las juntas por fricción son debidas a la excelente estabilidad térmica y a la baja temperatura generada durante el proceso de fricción. También estableció que las propiedades mecánicas y microestructura de las juntas por fricción son asimétricas y las de las juntas por fusión son simétricas a lo largo de la línea central de la soldadura.

A. Muñoz [22] comparó las propiedades mecánicas cuasi-estáticas y microestructura de uniones soldadas por fricción y fusión de la aleación Al-4.5Mg-0.26Sc tratada térmicamente. Observó que para las juntas de aleación sin tratar térmicamente, la de fricción muestra mejores propiedades a tensión y en microdureza que la de fusión; pero para las juntas de aleación tratadas térmicamente, ambas incrementaron sus propiedades a tensión, también ambas incrementaron su dureza en la zona afectada térmicamente pero en la zona de metal soldado mostró un mayor ablandamiento la junta por fusión. Estableció que las propiedades mecánicas son más afectadas en las juntas por fusión que por fricción debido al endurecimiento por precipitados.

Y. J. Chao [23] evaluó los cambios en las propiedades mecánicas a compresión debido al proceso de soldadura por fricción mediante pruebas cuasi-estáticas y dinámicas en las aleaciones AA2024-T3 y AA7075-T7351, las pruebas se hicieron en una máquina hidráulica y en la barra Hopkinson, respectivamente. Concluyó que para el material base y unión soldada de la aleación AA2024-T3 el límite de elasticidad exhibió sensibilidad a la velocidad de deformación. También obtuvo que para el material base de la aleación AA7075-T7351 tiene alguna dependencia a la velocidad, sin embargo, encontró que a una velocidad de deformación mayor de 500/s no hay ningún efecto en la unión soldada. Y por último, encontró que el límite de elasticidad de las uniones soldadas de ambas aleaciones se redujo tanto en condiciones cuasi-estáticas como dinámicas.

U. Sánchez-Santana [24] estudió el efecto del daño previo por fatiga debido a cargas cíclicas bajo control de deformación en el comportamiento dinámico a tensión mediante la barra Hopkinson en muestras de aleación de aluminio 6061-T6 y de acero AISI 4041T, también evaluó la respuesta cuasi-estática en muestras con diferentes niveles de daño. Para las pruebas cuasi-estáticas a tensión, obtuvo que para el aluminio el esfuerzo de fluencia y el esfuerzo último disminuían muy poco cuando incrementaba el nivel de daño, mientras que, el acero exhibía una respuesta diferente. En las pruebas dinámicas, obtuvo que el esfuerzo de fluencia no es afectado significativamente por la velocidad de deformación o la velocidad del proyectil en muestras de aluminio con diferentes niveles de daño, mientras que en el acero el esfuerzo de fluencia disminuyó más conforme el nivel de daño incrementaba. También obtuvo diferentes modos de falla con diferentes niveles de daño y diferentes velocidades del proyectil, se notaron más los diferentes modos de falla en el acero que en el aluminio.

1.3. Definición del Problema

Los efectos que causan los procesos de soldadura en las propiedades mecánicas de las uniones soldadas pueden ser benéficos o perjudiciales y variables según el proceso; es por eso que en diferentes aplicaciones de la ingeniería, como en la aeronáutica, automotriz, marina, construcción, es necesario conocer la respuesta de las estructuras (formadas por uniones soldadas) cuando están sujetas bajo cargas de impacto. Una combinación óptima de la estructura del cuerpo y el material es altamente requerida y una evaluación a altas velocidades de deformación de los materiales han sido demandadas. Sin embargo en todos los casos, se asume un material libre de daño. Es conocido como el daño de la fatiga inducido durante servicios puede afectar la respuesta dinámica de los materiales.

1.4. Justificación

En la actualidad, en muchas aplicaciones, las estructuras soldadas pueden estar sometidas a cargas dinámicas tales como cargas de impacto o explosión. Es por eso, que es necesario entender y conocer la respuesta mecánica de las estructuras soldadas a altas velocidades de deformación a la que los componentes pueden estar

sometidos durante su servicio. Sin embargo, hasta la fecha, las propiedades mecánicas determinadas a partir de pruebas a velocidades de deformación cuasi-estáticas se han utilizado en los cálculos para determinar la resistencia y respuesta mecánica de las estructuras soldadas cuando están sujetas a cargas de impacto.

1.5. Objetivos

Objetivo General.

- Determinar y comparar el efecto del daño por fatiga en el comportamiento cuasi-estático y dinámico de las uniones soldadas de aluminio 6063 por los procesos de fusión y fricción con batido.

Metodología.

- Propuesta y diseño del espécimen a ser ensayado.
- Diseño y fabricación de las barras para las pruebas de tensión en la barra Hopkinson.
- Evaluar las propiedades mecánicas cuasi-estáticas y dinámicas de las uniones soldadas por los diferentes procesos de soldadura, TIG y FSW.
- Medición y análisis de esfuerzos residuales, microdureza.
- Análisis microestructurales, como metalografías y fractografías para los modos de falla.

1.6. Hipótesis

El proceso de soldadura por fricción ofrece mejores propiedades mecánicas y mejor calidad que el proceso de soldadura por fusión.

Altas velocidades de deformación no afectan la respuesta dinámica de uniones soldadas de aleaciones de aluminio.

La soldadura por fusión presenta más distorsión durante el proceso que la soldadura por fricción.

1.7. Organización de la Tesis

En el Capítulo I se da una explicación de lo que han realizado algunos autores sobre los procesos de soldadura por fusión y por fricción, y también se da una breve explicación de lo realizado en este trabajo.

En el Capítulo II se da una explicación detallada de los procesos de soldadura mencionados anteriormente, así como los fundamentos del proceso, ventajas y desventajas, el equipamiento, parámetros, etc.

En el Capítulo III se presenta una explicación de los conceptos básicos del daño por fatiga, los orígenes de las cargas cíclicas, fatiga basada en el esfuerzo, la curva S-N y el efecto de la fatiga en soldaduras así como la curva S-N de éstas. También, en este mismo capítulo, se estudian los principios y conceptos básicos de las pruebas dinámicas para que nos ayuden a entender este fenómeno de la propagación de ondas en sólidos, la propagación de ondas elásticas en barras cilíndricas, el comportamiento a altas velocidades de deformación de los metales y la determinación del esfuerzo, deformación y el "strain rate"; y una descripción detallada del aparato de la barra Hopkinson para hacer las pruebas dinámicas, los elementos que la componen y su instrumentación.

En el Capítulo IV se explica el desarrollo experimental que se llevó a cabo para obtener las propiedades mecánicas de las uniones soldadas, desde el material utilizado, selección de los parámetros de los procesos hasta la realización de las pruebas cuasi-estáticas, dinámicas, microdureza, metalografías, esfuerzos residuales.

En el Capítulo V se muestran los resultados experimentales obtenidos, se dan las conclusiones y los comentarios del trabajo realizado.

Capítulo II

Procesos de soldadura

2.1. Introducción a la soldadura

Soldadura es el procedimiento por el cual dos o más piezas de metal se unen por medio de aplicación de calor, presión, o una combinación de ambos, con o sin aporte de otro metal, llamado metal de aportación, cuya temperatura de fusión es inferior a la de las piezas que se han de soldar [25]. La soldadura es fundamental para la expansión y productividad de las industrias. Actualmente es uno de los principales medios de fabricación y reparación de productos metálicos. Es casi imposible citar una industria, grande o pequeña, que no utilice algún tipo de soldadura. La industria ha encontrado en la soldadura un procedimiento eficiente, seguro y económico para la unión de metales en operaciones de fabricación y en la mayoría de las construcciones [26].

2.1.1. Aplicaciones de la soldadura

En la actualidad la soldadura es muy utilizada en:

- Industria automotriz
- Industria aeronáutica
- Industria de la construcción
- La marina
- Procesos de manufactura
- Reparación de maquinaria

2.1.2. Tipos de soldaduras

Sobre las distintas uniones (a tope, a solape, en ángulo interior, en ángulo exterior y uniones cantos), que se muestran en la Figura 2.1, se pueden realizar los siguientes tipos de soldaduras:

Soldadura de recargue: consiste en depositar una o más capas de material de aporte, mediante cordones o pasadas, sobre una superficie continua, con vistas a conseguir unas dimensiones o características superficiales específicas.

Soldadura mediante cordones en ángulo: es la que se emplea para conseguir uniones a solape en ángulo interior y exterior. El cordón presenta una sección aproximadamente triangular y se deposita entre dos superficies formando ángulo recto.

Soldadura a tope: es la que se deposita en el espacio que queda entre las piezas a soldar, que están dispuestas una en prolongación de la otra. Según la preparación de los bordes se pueden distinguir las siguientes soldaduras a tope: con bordes rectos, en U, en doble U, en J, etc.

Soldadura de entalla o de tapón: se emplean para enlazar piezas solapadas mediante el depósito de cordones en el interior de ranuras o agujeros realizados sobre alguna de las piezas. Tanto por su disposición como su comportamiento, son muy parecidas a los remaches.

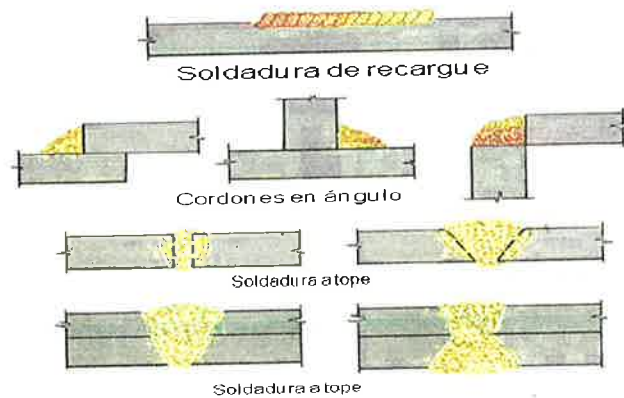


Fig. 2.1. Representación esquemática de los tipos de soldaduras.

2.1.3. Selección del tipo de junta

En la elección del tipo de junta más adecuada para cada trabajo, se deben de tener en cuenta numerosos factores. En general, se pueden citar cinco consideraciones básicas para la selección de cualquier junta soldada [26]:

1. Tener en cuenta si el esfuerzo es de tensión, compresión, flexión, fatiga o de choque.
2. Considerar si la carga es estática, de impacto o variable.
3. Dirección de la carga en relación a la junta.

4. Espesor de las piezas.
5. Costo de preparación de la junta.

2.1.4. Geometría de la junta

La geometría adecuada de la junta se basa en los siguientes principios:

1. La preparación debe ser uniforme a lo largo de toda la junta. En las uniones a solape y en la mayor parte de uniones en ángulo, las piezas deben acoplarse firmemente, sin separación, en toda su longitud. En las uniones a tope, debe vigilarse la uniformidad de chaflanes y separaciones.
2. Es fundamental trabajar con un ángulo de chaflán suficiente, como se muestra en la Figura 2.2(a). Un ángulo insuficiente dificulta la entrada del electrodo hasta el fondo de la junta. Una junta profunda y estrecha puede quedar con falta de penetración, siendo además muy sensible a la fisuración.
3. Una abertura excesiva, como se muestra en la Figura 2.2(b), desperdicia material de aportación. Dado que el material de aportación, tanto en forma de electrodos como de alambres, es relativamente caro, cualquier aumento de ángulo de los bordes supone un aumento en el consumo del material de aportación y mayor tiempo para depositarlo.
4. Para conseguir una penetración completa es necesario dejar una separación suficiente, como se ve en la Figura 2.2(c). Una junta soldada sin una penetración adecuada no será capaz de soportar las cargas que se la apliquen. Aunque la penetración completa depende en gran medida de la habilidad del soldador, es siempre fundamental el preparar los bordes con una separación adecuada.
5. Para conseguir una unión de calidad con una buena velocidad de soldeo, deben prepararse los bordes con un talón de unos 3 mm o, en caso contrario, utilizar un soporte por el reverso, como se muestra en la Figura 2.2(d). Los preparativos sin talón hacen más lenta y costosa la ejecución del cordón de penetración. Sin embargo, en las uniones a tope con bordes X, se puede facilitar la preparación

prescindiendo del talón y compensándolo con una separación de bordes algo menor [26].

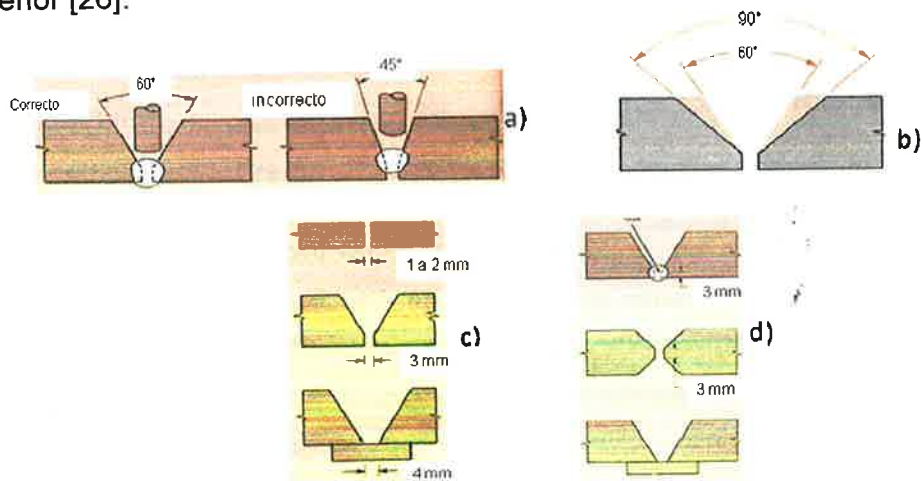


Fig. 2.2. Representación esquemática de la geometría de las juntas (a) abertura adecuada, (b) abertura excesiva, (c) separación correcta y (d) talón adecuado.

2.2. Proceso de soldadura por fusión (TIG)

En el proceso TIG se genera un arco eléctrico entre un electrodo de tungsteno virtualmente no consumible y la pileta fundida de metal base. En este proceso se usa un gas de protección suministrado externamente y sin la aplicación de presión. La adición de metal de aporte es opcional y se realiza en forma externa. La Figura 2.3 muestra esquemáticamente el proceso de soldadura TIG: Este, ha recibido el nombre de Soldadura de Arco por tungsteno y protección de gas inerte (TIG), pero la terminología empleada por ASW es GTAW ("Gas Tungsten Arc Welding") porque en algunas aplicaciones es posible usar mezclas de gases protectores que no son inertes [27].

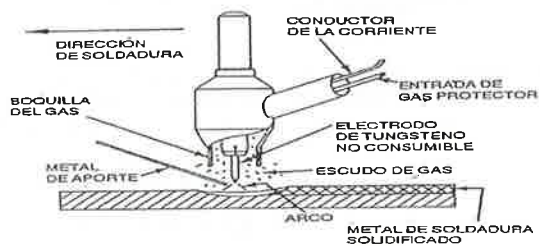


Fig. 2.3. Esquema del proceso TIG.

2.2.1. Ventajas y Desventajas

Los beneficios más importantes de este proceso son:

1. Produce soldaduras de buena calidad, generalmente libre de defectos.
2. Está libre de salpicaduras que ocurren con otros procesos de arco.
3. Puede utilizarse con metal de aporte o sin él, según requiera la aplicación específica.
4. Ofrece un control excelente de la penetración en la pasada de raíz.
5. Puede producir soldaduras económicas a altas velocidades.
6. Las fuentes de potencia tienen costos relativamente bajos.
7. Permite controlar de manera precisa las variables de soldadura.
8. Sirve para soldar casi todos los metales incluso aleaciones disímiles.
9. Permite controlar en forma independiente la fuente de calor y la adición de metal de aporte.

Algunas de las limitaciones y desventajas del proceso son:

1. Para espesores mayores de 10 mm (3/8") resulta más costoso que los procesos con electrodo consumibles.
2. Es difícil proteger la zona de soldadura en lugares donde hay corrientes de aire.
3. Puede haber inclusiones de tungsteno.
4. Una inadecuada posición del metal de aporte podrá producir contaminación del mismo.
5. Puede haber contaminación o porosidad causada por fuga del refrigerante en el caso de torchas refrigeradas por agua.

6. Puede haber golpe, o desviación del arco, al igual que en los otros procesos por arco.

2.2.2. Fundamentos del proceso

El proceso TIG se basa en el uso de un electrodo de tungsteno (o una aleación de tungsteno) no consumible sostenido en una torcha (soplete). Se alimenta un gas de protección para proteger el electrodo, la pileta líquida y el metal de soldadura durante la solidificación de la contaminación atmosférica. El arco eléctrico se produce por el paso de la corriente a través del gas de protección ionizado, que conduce la electricidad. El arco establece entre la punta del electrodo y la superficie de trabajo. El calor generado funde el metal base. Una vez establecido el arco y el charco de soldadura, el soplete se mueve a lo largo de la unión y el arco funde progresivamente las superficies de empalme.

2.2.3. Equipamiento

Todos los sistemas de soldadura TIG tienen en común cuatro componentes básicos, los cuales se muestran en las Figuras 2.3 y 2.4. Soplete o torcha, electrodo, fuente de poder, sistema de alimentación del gas de protección.

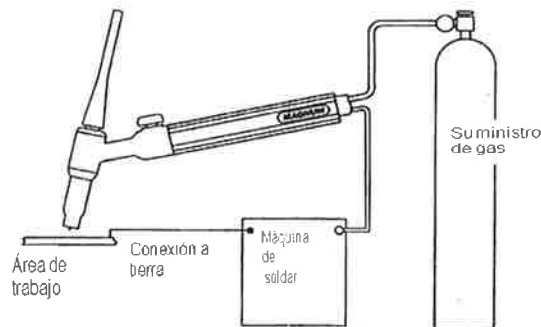


Fig. 2.4. Esquema del equipo para la soldadura TIG.

2.2.3.1. Soplete

Los sopletes de TIG sostienen el electrodo de tungsteno que transporta la corriente de soldadura y conducen el gas protector a la zona de soldadura. La elección de un soplete se basa en la corriente máxima de soldadura que pueden transportar sin recalentarse. La mayoría de los sopletes permiten manejar electrodos de distintos

tamaños para un intervalo dado de boquillas. En función de la corriente máxima de trabajo los sopletes podrán ser refrigerados con agua o con gas, estos últimos eliminan el calor por medio del gas de protección y están limitados a una corriente de soldadura de 200A. Los accesorios que usa el soplete son el mandril y la boquilla, estos sirven para sujetar el electrodo y para dirigir el gas de protección a la zona de la soldadura respectivamente [27]. La Tabla 2.1 muestra algunos tamaños de la boquilla según el diámetro del electrodo [26].

Tabla 2.1. Boquillas para soldadura TIG [26].

ELECTRODO DE TUNGSTENO Diámetro (mm)	BOQUILLA Diámetro (mm)
1.5	6 a 10
2.5	10 a 12
3	12 a 14
5	14 a 20

2.2.3.2. Electrodo

Por definición, los electrodos utilizados en soldadura de arco con electrodo refractario son no consumibles. Se impone, la utilización de un metal con un punto de fusión muy elevado, capaz de soportar temperaturas del orden de 4000°C que aparecen en el arco. Por otra parte, la naturaleza, el diámetro y la limpieza del electrodo y la naturaleza de la corriente utilizada, tienen una gran influencia sobre la calidad del trabajo y la estabilidad del arco. El tungsteno responde perfectamente a la exigencia de soportar temperaturas elevadas, a la vez de que tiene la ventaja de poseer una emisión termoiónica importante. Por este motivo, todos los electrodos que se utilizan son de tungsteno. Se puede incluso reforzar la emisión electrónica de los electrodos añadiendo al tungsteno óxidos de torio, circonio, lantano o de cerio en cantidades que van del 0.15 al 4.2% según los electrodos y el elemento a adicionar. La Tabla 2.2 muestra la composición química y el sistema de clasificación por código de color que es ampliamente utilizado para los electrodos de tungsteno. Estos activantes de emisión facilitan el cebado del arco, mejoran la estabilidad, aumentan la duración de vida de los electrodos y reducen riesgos de contaminación de la soldadura por inclusiones de tungsteno. Por otra parte,

a diámetro igual, los electrodos conteniendo óxidos permiten soportar una intensidad de corriente más elevada que la del tungsteno puro [25].

Tabla 2.2. Código de color y elementos de aleación [25].

Clasificación AWS	Color ^a	Elemento de aleación	Óxido de aleación	Porcentaje de óxido
EWP	Verde	--	---	-----
EWCe-2	Anaranjado	Cerio	CeO ₂	2
EWTh-1	Rojo	Torio	ThO ₂	2
EWZr-1	Marrón	Zirconio	ZrO ₂	0.25
EWG	Gris	No se especifica	----	-----

Las varillas de tungsteno puro funden a 3400°C, y es necesario que el extremo de la varilla sea redondeado, se utiliza fundamentalmente con corriente alterna en la soldadura del aluminio y sus aleaciones. El tungsteno aleado con torio tiene un punto de fusión de 4000°C, y es necesario que el extremo de la varilla esté afilado, se utiliza en la soldadura con corriente continua de aceros al carbono, baja aleación, inoxidable, cobre, titanio, etc. El tungsteno aleado con circonio funde a 3800°C, y es válido para la soldadura tanto en corriente continua como alterna, se utiliza para soldar metales ligeros como aluminio y magnesio, donde es necesario evitar la contaminación del metal de aporte.

2.2.3.3. Fuente de poder

La fuente de poder utilizadas en TIG son las de corriente constante. La potencia requerida para soldar pueden obtenerse de fuentes transformador rectificador o rotatorias CA o CC. Casi todas las fuentes disponen de rampas de ascenso y descenso de arco, programas para pulso de arco, etc. Las fuentes de potencia para TIG suelen tener características estáticas de caída o de corriente prácticamente constante. La Tabla 2.3 muestra los rangos típicos de corrientes para los electrodos de tungsteno.

Tabla 2.3. Rangos típicos de corrientes para electrodos de tungsteno [27].

DIAMETRO DEL ELECTRODO		CORRIENTE CONTINUA (A)		CORRIENTE ALTERNA (A)						
		POLARIDAD NEGATIVA	POLARIDAD POSITIVA	ONDA NO BALANCEADA			ONDA BALANCEADA			
				EWP EWTh-1 EWTh-2 EWTh-3	EWP EWTh-1 EWTh-2 EWTh-3	EWP	EWTh-1 EWTh-2 EWZr	EWTh-3	EWP	EWTh-1 EWTh-2 EWZr
In	mm									
0.010	0.26	up to 15	∞	up to 15	up to 15	∞	up to 15	up to 15	∞	up to 15
0.020	0.51	5-20	∞	5-15	5-20	∞	10-20	5-20	∞	10-20
0.040	1.02	15-80	∞	10-60	15-80	∞	20-30	20-60	∞	20-60
$\frac{1}{16}$	1.59	70-150	10-20	50-100	70-150	∞	30-80	60-120	∞	30-120
$\frac{3}{32}$	2.38	150-250	15-30	100-160	140-235	∞	60-130	100-180	∞	60-180
$\frac{1}{8}$	3.18	250-400	25-40	150-210	225-325	∞	100-180	160-250	∞	100-250
$\frac{3}{16}$	3.97	400-500	40-55	200-275	300-400	∞	160-240	200-320	∞	160-320
$\frac{3}{8}$	4.76	500-750	55-80	250-350	400-500	∞	190-300	290-390	∞	190-390
$\frac{1}{2}$	6.35	750-1000	80-125	325-450	500-630	∞	250-400	340-525	∞	250-525

2.2.3.4. Corriente continua

Si se usa CC el electrodo puede conectarse al terminal positivo o negativo. En casi todos los casos se elige que el electrodo sea negativo (cátodo). Con esta polaridad los electrones fluyen del electrodo al trabajo y los iones positivos se transfieren del trabajo al electrodo. Cuando el electrodo es polo positivo (ánodo), las direcciones de los electrones e iones se invierte, como se muestra en la Figura 2.5.

Cuando el electrodo se conecta a la terminal negativo y es termoiónico como el tungsteno, aproximadamente el 70% de calor se genera en el ánodo y el 30% en el cátodo. Esta polaridad produce una mayor penetración, y es la configuración más común empleada en TIG, y se usa con argón, helio o una mezcla de ambos para soldar la mayor parte de los metales. Cuando el electrodo de tungsteno se conecta a la terminal positiva, se crea una acción de limpieza catódica en la superficie de trabajo. Esta acción ocurre en todos los metales pero es más importante cuando se suelda aluminio o magnesio porque se elimina la capa de óxido refractario que inhibe la soldadura. Esta polaridad calienta además la punta del electrodo lo que requiere del uso de electrodos de mayor diámetro. La capacidad de transporte de corriente de un electrodo conectado a la terminal positiva es de aproximadamente la décima parte de la de un electrodo conectado a la terminal negativa. En general el uso de la polaridad positiva está limitado a la soldadura de piezas en láminas.

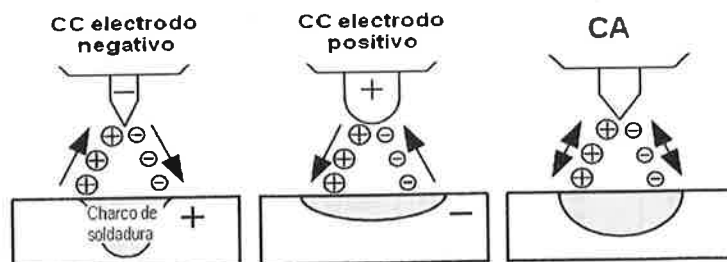


Fig. 2.5. Tipos de corriente

2.2.3.5. Corriente alterna

Es una corriente eléctrica que alternativamente toma valores positivos y negativos. Por tanto puede combinar la acción limpiadora del trabajo de la polaridad inversa (electrodo positivo) con la penetración profunda característica de la polaridad directa (electrodo negativo). La Tabla 2.4 muestra los tipos de corriente para soldaduras TIG.

Tabla 2.4. Selección del tipo de corriente para soldaduras TIG [26].

METAL A SOLDAR	CORRIENTE ALTERNA Con estabilización por alta frecuencia		CORRIENTE CONTINUA Polaridad directa		CORRIENTE CONTINUA Polaridad Inversa	
	1	2	1	2	1	2
Magnesio, hasta 3 mm espesor	1		NR		2	
Magnesio, espesores de 4 mm o más	1		NR		NR	
Magnesio (piezas fundidas)	1		NR		2	
Aluminio	1		NR		2	
Fundición de aluminio	1		NR		NR	
Acero inoxidable (hasta 1,5 mm)	1		2		NR	
Acero inoxidable (1,5 mm o más)	2		1		NR	
Latón	2		1		NR	
Plata	2		1		NR	
Hastelloy	2		1		NR	
Metales placrados con plata	1		NR		NR	
Recargues duros	1		2		NR	
Fundición de hierro	2		1		NR	
Acero suave (0,3 a 0,7 mm espesor)	2		1		NR	
Acero suave (0,7 a 3 mm espesor)	NR		1		NR	
Acero duro (0,3 a 0,7 mm espesor)	2		1		NR	
Acero duro (0,7 mm o más)	2		1		NR	
Cobre desoxidado (hasta 2,5 mm)	NR		1		NR	

2.2.4. Gas de protección

El soplete dirige el gas hacia el arco y la piqueta líquida con el fin de proteger el electrodo y el metal fundido de la contaminación atmosférica. También suele utilizarse gas purgante de respaldo para proteger el lado debajo de la soldadura y las superficies de metal base adyacente contra la oxidación durante la soldadura. El argón y el helio o la mezcla de ambos, son los gases inertes más utilizados en soldadura.

2.2.4.1. Argón

El argón (Ar) es un gas monoatómico inerte con peso molecular 40, se obtiene de la atmosfera por separación del aire licuado. Para la soldadura se refina hasta 99.95%, esto es aceptable para la mayor parte de los metales excepto los reactivos y refractarios para los cuales se requiere una pureza mínima de 99.97%. Algunas características del Ar son:

- Menor penetración.
- Acción de limpieza al soldar materiales como aluminio y magnesio.
- Buena protección con menores caudales.
- Más fácil iniciación del arco.
- Es más denso que el Helio.

2.2.4.2. Helio

El helio (He) es un gas monoatómico inerte muy ligero con peso molecular 4. Se obtiene por separación a partir del gas natural. Para su uso en soldaduras se refina hasta 99.99%. El He transfiere más calor al trabajo que el Ar, lo que lo hace ventajoso para soldar metales de elevada conductividad térmica y aplicaciones mecanizadas a alta velocidad. También se prefiere para soldar placas gruesas. El He como es más ligero tiende a elevarse alrededor de la boquilla, lo que requiere dos o tres veces más caudal de He para igual protección comparada con el Ar [27].

2.2.5. Material de aporte

Normalmente, la soldadura TIG de espesores finos puede realizarse sin material de aporte. Sin embargo, al aumentar el espesor, es necesario aportar material para rellenar la junta. En algunos casos, cuando se quiere reforzar la junta, también se aporta material en la soldadura de espesores finos. El metal de aporte debe ser de la misma composición química que el metal base. Así, para la unión de aceros al carbono, se utilizan varillas de acero al carbono; para la unión de aluminio, varillas de aluminio, y así sucesivamente. En algunos casos, puede utilizarse satisfactoriamente como

material de aportación una tira obtenida de las propias chapas a soldar. Con vistas a conseguir soldaduras sanas y para reducir las proyecciones, las varillas de aporte para el procedimiento TIG llevan mayores cantidades de sustancias desoxidantes. En general, el diámetro de la varilla debe ser aproximadamente igual al espesor de las piezas a soldar.

2.2.6. Generación de calor

En la soldadura por fusión, el calor es generado por un arco eléctrico producido entre la pieza y el electrodo de tungsteno. El método utilizado para aplicar calor en un proceso de soldadura puede afectar significativamente las propiedades de la unión. En la Figura 2.6, se representa la vista plana de dos placas metálicas que son unidas mediante el proceso de soldadura por fusión y el calor generado en el proceso, mostrado mediante las líneas de colores.

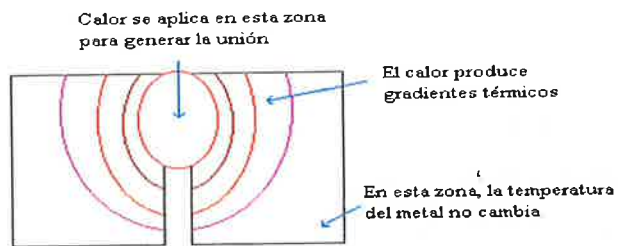


Fig. 2.6. Representación esquemática del calor generado durante el proceso por fusión.

Aunque el calor generado Q durante el proceso de soldadura se puede medir mediante un calorímetro [28], también puede ser calculado a través de la potencia eléctrica generada en el arco eléctrico P , mediante las siguientes ecuaciones:

$$P = V \cdot I \quad (2.1)$$

$$Q = P/v \quad (2.2)$$

donde V , I y v son parámetros del proceso de la soldadura por fusión, voltaje, corriente y velocidad de soldeo, respectivamente.

2.2.7. Zonas Afectadas por el Calor

En las Figuras 2.7 (a) y (b), se muestra las zonas que se pueden identificar en una unión soldada mediante el proceso TIG, y las zonas identificadas en una unión de acero al carbono soldada por TIG.

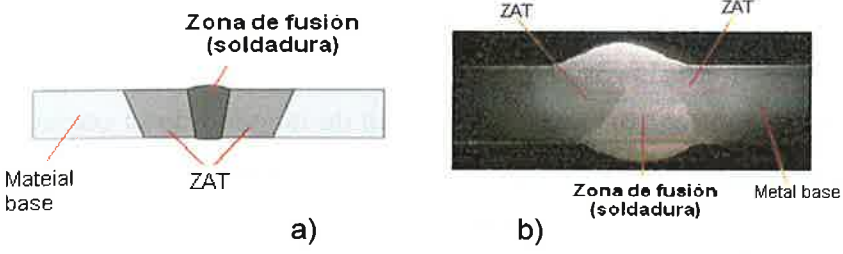


Fig. 2.7. (a) Representación esquemática de la sección transversal de una unión soldada por TIG, y (b) zonas identificadas en una unión soldada de un acero al carbono.

La resistencia de los metales puede incrementarse de varias maneras, incluyendo el endurecimiento por solución, endurecimiento por trabajo, endurecimiento por precipitación, y el endurecimiento por transformación. La efectividad de los últimos tres métodos puede ser reducida significativamente por el calentamiento de la soldadura en la zona llamada zona afectada térmicamente (ZAT), donde las temperaturas máximas son demasiado bajas para producir la fusión, pero lo suficientemente altas como para causar que la microestructura y las propiedades mecánicas de los materiales cambien significativamente. El efecto de los parámetros de la soldadura en la resistencia de ZAT se explica en la Figura 2.8. Tanto el tamaño de grano del ZAT y el tiempo de retención por encima de la temperatura efectiva de recristalización T_x incrementan conforme incrementa la entrada de calor por unidad de longitud de la soldadura, es decir, la relación entrada de calor a velocidad de soldadura. En consecuencia, la pérdida de resistencia en la ZAT se vuelve más grave ya que el calor de entrada por unidad de longitud de la soldadura se incrementa [28].

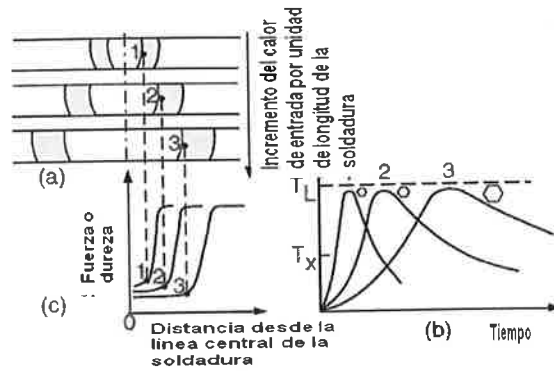


Fig. 2.8. Efecto del calor de entrada por unidad de longitud de la soldadura, (a) ancho de ZAT (sombreado), (b) ciclos térmicos cerca la frontera de fusión, y (c) perfil de resistencia o dureza.

2.2.8. Esfuerzos residuales en el proceso TIG

Los esfuerzos residuales son esfuerzos que existen en un cuerpo si todas las cargas externas fueron retiradas. A veces son llamados esfuerzos internos. Los esfuerzos residuales que existen en un cuerpo que ha sido sujeto previamente a cambios de temperatura no uniformes, tales como aquellos durante la soldadura, son a menudo llamados esfuerzos térmicos. La Figura 2.9 es una representación esquemática del cambio de temperatura ΔT y esfuerzos en la dirección de la soldadura σ_x durante el proceso de soldadura. El área rayada M-M' es la región donde la deformación plástica ocurre. Si se considera un esfuerzo inducido térmicamente a lo largo de la dirección longitudinal σ_x . Donde la sección A-A es no afectada por el calor de entrada, σ_x es cero. A lo largo de la sección B-B, σ_x es cercano a cero en la región por debajo de la fuente de calor, donde la junta soldada no tiene ningún esfuerzo para soportar cualquier carga. En las regiones un poco lejos de la fuente de calor, los esfuerzos son a compresión (σ_x es negativo) porque la expansión de estas zonas es restringido por el metal que rodea de temperaturas más bajas. Debido al bajo esfuerzo de fluencia de metal de alta temperatura en estas zonas, σ_x alcanza el esfuerzo de fluencia del metal base a la temperatura correspondiente. En las zonas más alejadas de la soldadura σ_x está a tensión, y σ_x es equilibrado con esfuerzos a compresión en zonas cercanas a la soldadura. A lo largo de la sección C-C del metal de soldadura y el metal base adyacente se han enfriado y por lo tanto tienen una tendencia a contraerse, lo que

produce esfuerzos de tensión (σ_x es positivo). En las zonas adyacentes σ_x está a compresión. Finalmente a lo largo de la sección D-D el metal de soldadura y el material base adyacente se han enfriado y contraído aún más, produciendo esfuerzos de tensión más altos en regiones cercanas a la soldadura y esfuerzos de compresión en regiones alejadas de la soldadura. Donde la sección D-D esta atrás de la fuente de calor, la distribución de esfuerzo no cambia significativamente más allá de esta, y esta distribución de esfuerzo es la distribución de esfuerzo residual [28].

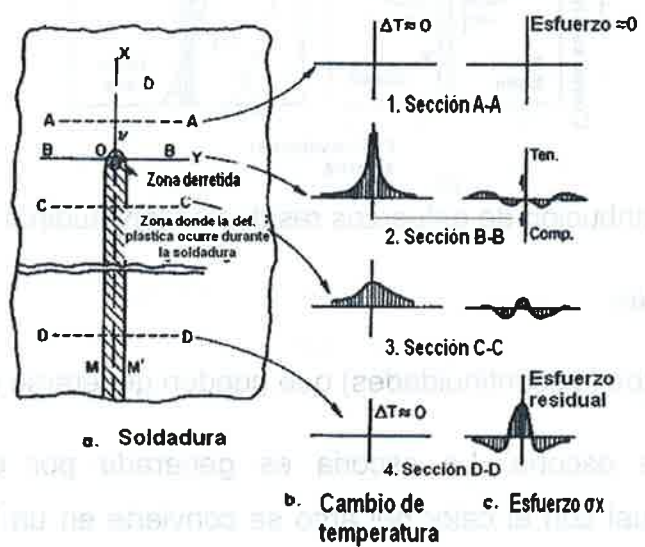


Fig. 2.9. Cambios de temperatura y esfuerzos durante el proceso de soldadura.

La Figura 2.10 muestra la típica distribución de esfuerzos residuales en una unión soldada a tope. La distribución longitudinal del esfuerzo residual σ_x puede ser aproximado por la ecuación [28]

$$\sigma_x(y) = \sigma_m \left[1 - \left(\frac{y}{b} \right)^2 \right] \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{y}{b} \right)^2 \right] \quad (2.3)$$

donde σ_m es el esfuerzo residual máximo, el cual es usualmente más alto que el esfuerzo de fluencia del metal de soldadura. El parámetro b es el ancho de la zona de tensión de σ_x , Figura 2.10(a). La distribución del esfuerzo residual transversal σ_y a lo largo de la longitud de la soldadura se muestra en la Figura 2.10(b). Como se muestra, los esfuerzos a tensión de magnitud relativamente baja son producidos en la parte media de la soldadura, donde la contracción térmica en la dirección transversal es

restringida por el material base mucho más frío que está más alejado de la soldadura. Los esfuerzos a tensión en la parte media de la soldadura son equilibrados por esfuerzos de compresión en el final de la soldadura.

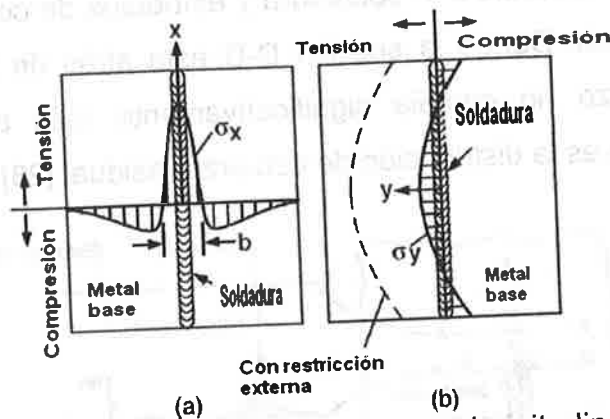


Fig. 2.10. Típica distribución de esfuerzos residuales longitudinal σ_x y transversal σ_y .

2.2.9. Defectos y fallas

Los principales defectos (discontinuidades) que pueden generarse en este proceso son:

1. Inclusiones de escoria. La escoria es generada por el recubrimiento del electrodo, el cual con el calor del arco se convierte en un líquido menos denso que el metal. A medida que este líquido flota hacia la superficie, sus ingredientes retiran óxidos y sales del pozo metálico por medio de reacciones químicas. Cuando la escoria queda atrapada dentro del pozo en vez de flotar hasta la superficie, genera inclusiones que degradan la resistencia de la unión.
2. Porosidad. La porosidad puede formarse en una soldadura debido a la contaminación de la superficie del metal base, a la presencia de hidrogeno debido a la humedad excesiva en el recubrimiento del electrodo, excesivo calor generado por la excesiva corriente eléctrica, por la excesiva rapidez de avance del electrodo.
3. Socavación. Cuando no se aplica suficiente material de aporte, o cuando éste se aplica incorrectamente, el bisel del cordón queda parcialmente lleno. Este defecto puede ser causado por una corriente excesiva, por el tamaño del

electrodo o ángulo del mismo incorrectos, por la velocidad del electrodo inadecuada.

4. Grietas. Pueden generarse en el cordón, o en el metal base cercano al cordón. Las grietas pueden ocurrir a medida que el cordón se enfría hasta la temperatura ambiente. El agrietamiento puede deberse a la contaminación térmica del metal por el enfriamiento, lo cual puede ocasionar esfuerzos en el cordón. También pueden generarse grietas varios días después de realizado el cordón. Estas grietas se forman generalmente en la ZAT, y sus posibles causas son la presencia de hidrogeno en metales base endurecibles, falta de holgura en la unión para compensar la contracción térmica lo cual originaria esfuerzos residuales y posteriormente las grietas.
5. Fusión incompleta. El metal de aporte no llena completamente el espacio entre las piezas a unir. La fusión incompleta puede ser debida a la velocidad excesiva del electrodo.
6. Distorsión y esfuerzos residuales. La distorsión es causada por el enfriamiento del cordón después de realizar la soldadura. Cuando las piezas soldadas son delgadas y no pueden soportar los esfuerzos que se generan, éstas pierden su geometría original. Cuando las piezas a unir son suficientemente grandes, de tal forma que los esfuerzos generados durante el enfriamiento del cordón pueden ser absorbidos sin provocar deformaciones significativas, se generan esfuerzos internos en el cordón en el metal base, a estos esfuerzos se les llama esfuerzos residuales.

2.3. Proceso de Soldadura por Fricción con Batido “Fricción Stir Welding” (FSW)

2.3.1. Introducción

“Friction Stir Welding” (FSW) es una novedosa técnica de soldadura inventada por el Instituto de Soldadura (TWI, por sus siglas en ingles) en 1991. FSW es en realidad un proceso de unión en estado sólido que es una combinación de extrusión y forja y no es un verdadero proceso de soldadura. FSW es un derivado de la soldadura por fricción

convencional. El proceso FSW implica la traslación de una herramienta cilíndrica rotatoria a lo largo de la interface entre las dos placas. La soldadura se forma por la deformación del material a temperaturas por debajo de la temperatura de fusión. FSW usa una herramienta cilíndrica, con hombros con un pequeño perno, que es rotada y sumergida lentamente en la línea de unión entre las dos piezas de lámina o placas de material, que son unidas a tope. Las placas que incluye la pieza de trabajo se llevan a cabo en compresión y están fijas rigidamente a la bancada de la máquina durante el proceso de soldadura. FSW usa una herramienta no consumible, rotatoria de forma cilíndrica con un perno cilíndrico de menor diámetro que se extiende desde el hombro de la herramienta. Inicialmente, la herramienta rotatoria se hunde entre la interface de las placas hasta que el hombro hace contacto con la superficie de la pieza de trabajo. El calentamiento es causado por la fricción de las caras de la herramienta contra la pieza de trabajo y por la disipación visco-plástica de la energía mecánica desarrollada a altas velocidades de deformación a través de interacciones con la herramienta. Durante la soldadura, el material a lo largo de la articulación se calienta a una condición de suavizado, transferido alrededor de la periferia de la herramienta, y posteriormente unidas a lo largo de la superficie posterior del pin para producir la soldadura. La Figura 2.11 muestra una ilustración esquemática del proceso FSW. El calor por fricción es generado entre la herramienta resistente al desgaste y la pieza de trabajo. Este calor causa que el material de la pieza de trabajo se suavice sin alcanzar su punto de fusión y permite que la herramienta atraviese la línea de soldadura. Mientras lo hace, el material plastificado se transfiere desde el borde de ataque de la herramienta para el borde de salida del hombro de la herramienta y pin [1, 29].

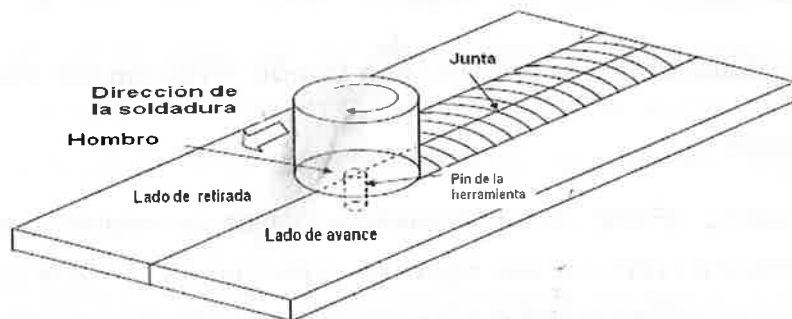


Fig. 2.11. Ilustración esquemática del proceso FSW.

2.3.2. Ventajas y desventajas

En general, FSW se utiliza para producir soldaduras más fuertes, más ligeras y más eficientes que otros procesos de unión, con la capacidad para unir distintos materiales, y materiales que previamente se pensaba son insoldables o no recomendados para la soldadura por fusión. Algunas ventajas del proceso son [29, 30]:

- Baja distorsión y bajos esfuerzos residuales.
- Excelentes propiedades mecánicas.
- Alta integridad de las soldaduras con baja contracción y poca porosidad.
- Proceso relativamente simple, con bajo costo de producción y alta productividad.
- Herramienta no consumible.
- Microestructura de grano fino en la zona de soldadura.
- Proceso con ausencia de humo y salpicaduras.
- No requiere gas de protección.

Las limitaciones comunes del proceso FSW son:

- Velocidades de soldadura más lentas que de algunos procesos por fusión.
- Las piezas de trabajo requieren una sujeción rígida.
- Producción de hueco residual al final de cada soldadura.
- Aplicación limitada a piezas planas o de gran radio de curvatura.

Las limitaciones del proceso se están abordando en las investigaciones actuales y programas de desarrollo, particularmente en lo que respecta a las velocidades de la soldadura [29].

2.3.3. Aplicaciones

TWI ha compilado una lista de las industrias a las que el proceso FSW sería particularmente atractivo, y en muchos casos el proceso ha sido adoptado. Los sectores identificados son:

- Construcción naval y la marina.
- Industria aeroespacial y automotriz.
- Transporte terrestre (carretera y ferrocarril).
- Construcción.
- Industria eléctrica.

2.3.4. Equipo

En principio el equipo debe ser capaz de ejecutar 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 éste respecto a la pieza. En particular cuando se emplea para la puesta a punto de procedimientos debe además permitir operar dentro de rangos suficientemente amplios de velocidades de giro y translación. Debido a los grandes esfuerzos que se producen durante la soldadura la rigidez estructural es otro requerimiento fundamental. En general para muchas aplicaciones dichas características se pueden encontrar en máquinas herramientas convencionales o ligeramente modificadas, la Figura 2.12 muestra una máquina herramienta convencional [31].



Fig. 2.12. Fresadora convencional.

2.3.5. Herramienta

La herramienta constituye la parte fundamental del proceso, se compone de dos cuerpos cilíndricos concéntricos, el de menor diámetro denominado “perno” es el que actúa en la interface de la junta y produce la plastificación, agitación y mezcla del metal, el de mayor diámetro u “hombro” trabaja sobre la superficie de la junta y es el que precalienta y consolida el material plastificado. La combinación de ambos efectos produce la recristianización y coalescencia de las piezas. La forma y tamaño de la herramienta tiene una gran influencia sobre la sanidad de la unión. Durante el proceso la misma es sometida a altas sollicitaciones mecánicas a temperaturas próximas al punto de fusión del metal base, por lo cual el material y tratamiento empleado para su fabricación son fundamentales en lo concerniente a su vida útil [31], la Figura 2.13 muestra una herramienta por FSW.



Fig. 2.13. Herramienta para FSW.

2.3.5.1. Geometría de la herramienta

La geometría de la herramienta es el aspecto más influyente del desarrollo del proceso [32]. La geometría de la herramienta juega un papel crítico en el flujo del material y a su vez regula la velocidad transversal en la que FSW se puede realizar. Una herramienta de FSW consiste de un hombro y un pin como el que se muestra en la Figura 2.13. La herramienta tiene dos funciones principales: calentamiento local y flujo del material. En la etapa inicial de inmersión de la herramienta, el calentamiento resulta principalmente de la fricción entre el pin y la pieza de trabajo. La herramienta se introduce hasta que el hombro toca la pieza de trabajo, aquí se genera la componente de calor más grande, por la fricción de la pieza de trabajo y el hombro. La uniformidad de la microestructura y

propiedades, así como las cargas del proceso se rigen por el diseño de la herramienta. Con una mejor experiencia y una cierta mejora en la comprensión del flujo del material, la geometría de la herramienta ha evolucionado de manera significativa. La Figura 2.14 muestra un dibujo esquemático de diferentes tipos de geometrías de herramientas patentadas para FSW [32].

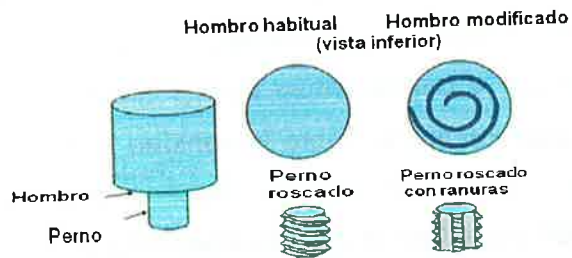


Fig. 2.14. Dibujo esquemático de la herramienta FSW.

2.3.5.2. Propiedades de la herramienta

Los materiales de la herramienta, además de tener que soportar de manera satisfactoria el proceso FSW, afectan el coeficiente de fricción, por lo tanto la generación de calor [33]. El desgaste de la herramienta es un asunto importante para el proceso FSW, particularmente para aleaciones de altas temperaturas y más duras. Titanio, el cual tiene un punto de fusión de 1941° K, se ha logrado la soldadura por fricción usando herramientas de TiC sinterizadas. La predicción cuantitativa de las fuerzas que experimenta la herramienta es particularmente útil en el diseño de la herramienta para materiales duros como el acero. Tales predicciones idealmente deberían incluir una consideración del flujo plástico en un modelo térmico. El conocimiento preciso de la temperatura es importante para el buen funcionamiento del proceso FSW [1]. Otros materiales utilizados para la fabricación de la herramienta son aceros de alto carbono, aceros como el H13, M2, aceros X38CrMoV5-3, aceros 56NiCrMoV7 [7, 12, 32].

2.3.6. Parámetros del proceso

Los parámetros de soldadura, geometría de la herramienta, y el diseño de la junta ejercen un efecto significativo en el patrón del flujo del material y distribución de temperaturas, lo que influye la evolución microestructural del material.

Para FSW, dos muy importantes parámetros son: velocidad de rotación de la herramienta (ω , rpm) en sentido de las manecillas del reloj o en sentido contrario y la velocidad transversal de la herramienta (v , mm/min) a lo largo de la línea de la junta. Velocidades de rotación más altas de la herramienta generan mayor temperatura debido a un calentamiento por fricción más alto. Sin embargo, debería ser notado que el acoplamiento por fricción de la superficie de la herramienta con la pieza de trabajo va a gobernar el calentamiento. Por lo tanto, un aumento monótonico en el calentamiento con el incremento de la velocidad de rotación de la herramienta no se espera que el coeficiente de fricción en la interface cambiara con el incremento de la velocidad de rotación de la herramienta. Algunos rangos de velocidades de rotación de la herramienta utilizados para el proceso FSW son: 300-800rpm, 1120-1810rpm, 2140-4500rpm. Como también algunos rangos de la velocidad de avance utilizada son: 40-80mm/min, 100-400mm/min, 460-1200mm/min.

Además de la velocidad de rotación de la herramienta y la velocidad transversal, otro parámetro importante del proceso es el ángulo de inclinación del eje o de la herramienta respecto a la superficie de la pieza de trabajo [32], como se muestra en la Figura 2.15.

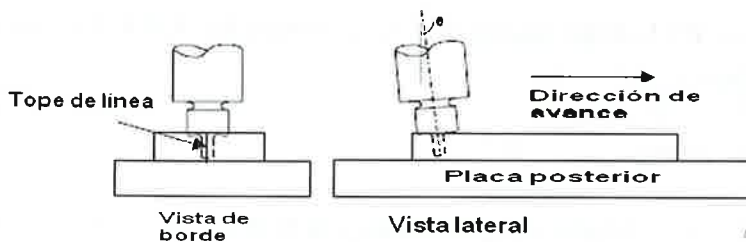


Fig. 2.15. Inclinación de la herramienta FSW.

Durante el proceso FSW, el torque depende de muchas variables como la presión vertical aplicada, el diseño de la herramienta, el ángulo de inclinación, los esfuerzos

cortantes locales en la interface del material de la herramienta, el coeficiente de fricción y el alcance del deslizamiento entre la herramienta y el material. Los valores de medición del torque pueden proporcionar alguna idea del esfuerzo de fluencia promedio cerca de la herramienta y el grado de deslizamiento entre la herramienta y la pieza de trabajo para ciertas condiciones de la soldadura, cuando otras variables se mantienen constantes. El torque disminuye con el incremento de la velocidad de rotación de la herramienta debido al incremento de la velocidad de la generación de calor y temperatura cuando otras variables se mantienen constantes. Esto llega a ser más fácil para el flujo del material a altas temperaturas y velocidades de deformación. Sin embargo, el torque no es afectado significativamente por el cambio de la velocidad de soldadura.

La velocidad relativa entre la herramienta y el material es influenciado principalmente por la velocidad de rotación. Por lo tanto, la velocidad de generación de calor no es afectado significativamente por la velocidad de soldadura. Las velocidades transversales altas tienden a reducir el calor de entrada y la temperatura. El torque incrementa solo ligeramente con el incremento en la velocidad de rotación debido a que el flujo del material se convierte en algo más difícil a temperaturas ligeramente inferiores. El torque sobre la herramienta puede ser usado para calcular la potencia necesaria $P=\omega M$, donde M es el torque total sobre la herramienta. La presión axial también afecta la calidad de la soldadura. Presiones muy altas producen un sobrecalentamiento y adelgazamiento de la junta mientras presiones muy bajas producen insuficiente calentamiento y poros [1]. Algunas fuerzas axiales entre la herramienta y la pieza de trabajo reportadas van desde los 4.4 kN hasta los 25 kN [10, 13].

2.3.7. Generación de calor

Durante el proceso FSW, el calor es generado por la fricción entre la herramienta y la pieza de trabajo y vía deformación plástica. Una fracción de la energía de la deformación plástica es almacenada dentro de la zona termomecánicamente procesada en la forma de aumento de la densidad de defectos. En la soldadura, una mezcla de recuperación y un fenómeno de recristalización ocurren simultáneamente. La

deformación no solo aumenta la densidad de dislocaciones sino también la cantidad de superficie de grano y el borde de grano por unidad de volumen y mediante la reducción de precipitados puede obligar a que se disuelvan. Cuando el material de la pieza de trabajo se pega a la herramienta, el calor se genera en el contacto herramienta-pieza de trabajo debido a la deformación cortante. La deformación plástica también ocurre lejos de la interface herramienta-pieza de trabajo.

Por ejemplo, excepto para los periodos inicial y final de la soldadura, durante la inserción y extracción del pin de la herramienta la generación de calor ocurre a una velocidad constante si la herramienta rota y avanza a una velocidad constante.

Por el calor generado en la interface hombro de la herramienta-pieza de trabajo, algo se transporta en el material de la herramienta mientras el resto entra a la pieza de trabajo. El calor total generado en la interface hombro-pieza de trabajo puede ser dividido entre la pieza de trabajo y la herramienta, basado en sus propiedades termofísicas [1].

2.3.8. Zonas Afectadas por el Calor

La contribución de intensa deformación plástica, exposición a altas temperaturas dentro de la zona agitada durante el proceso FSW resulta en recristalización y el desarrollo de la textura dentro de la zona agitada, disolución de precipitados, aspereza dentro y alrededor de la zona agitada. En base a la caracterización microestructural de granos y precipitados se han identificado tres zonas: zona del “nugget”, zona afectada termo mecánicamente (ZATM), y la zona afectada térmicamente (ZAT), como se muestra en la Figura 2.16.

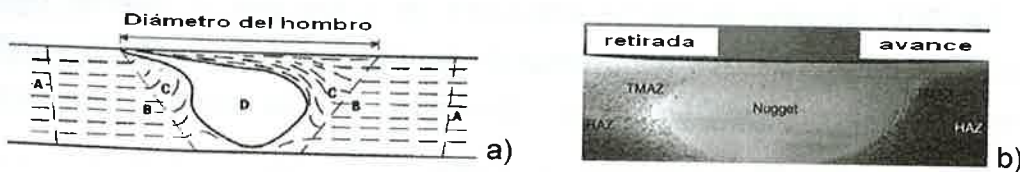


Fig. 2.16. a) Esquema de la sección transversal de una soldadura FSW típica mostrando las zonas A) metal base, B) zona afectada térmicamente (ZAT), C) zona afectada termo mecánicamente (ZATM) y D) zona del “nugget”, y b) macrografía de una unión soldada de la aleación 7075Al-T651.

Zona del "nugget". Es usualmente referida a la zona donde ocurre la intensa deformación plástica y el calentamiento por fricción durante el proceso FSW resultando en la microestructura la generación de granos finos recristalizados dentro de la zona agitada, o también es referida como la zona recristalizada dinámicamente. Bajo algunas condiciones de FSW, estructura anillada es observada en esta zona del "nugget", como se muestra en la Figura 2.16. La interface entre la zona recristalizada del "nugget" y el material base es relativamente difusa del lado de regreso de la herramienta, pero muy fuerte en el lado de avance de la herramienta.

Zona Afectada Termomecánicamente (ZATM). Única al proceso FSW es la creación de la zona afectada termomecánicamente (ZATM) de la transición entre el material base y la zona del "nugget", como se muestra en la Figura 2.16. La ZATM experimenta temperatura y deformación durante el proceso FSW. La ZATM es caracterizada por una estructura altamente deformada. Los granos alargados del material base fueron deformados en un patrón que fluía de manera ascendente alrededor de la zona del "nugget". Aunque la ZATM experimentara la deformación plástica, la recristalización no ocurrió en esta zona debido a la tensión de deformación insuficiente. Sin embargo, se presenta la disolución de algunos precipitados en la ZATM, debido a la exposición de altas temperaturas durante el proceso FSW. El grado de la disolución, por supuesto, depende del ciclo térmico experimentado por la ZATM. Por otra parte, los granos en la ZATM usualmente contienen una alta densidad de sub-límites.

Zona Afectada Térmicamente (ZAT). Más allá de la ZATM hay una zona afectada por el calor (ZAT). Esta zona experimenta un ciclo térmico, pero no sufre ninguna deformación plástica. La ZAT conserva la misma estructura de grano que el material base. Sin embargo, la exposición térmica por encima de los 250°C ejerce un efecto significativo en la estructura de precipitado. La Figura 2.16 muestra la zona afectada térmicamente.

2.3.9. Esfuerzos residuales en el proceso FSW

Durante el proceso de fusión, esfuerzos mecánicos y térmicos complejos se desarrollan en la soldadura y regiones aledañas debido a la aplicación localizada de calor. A raíz de la soldadura por fusión, los esfuerzos residuales suelen acercarse al esfuerzo de

fluencia del material base. Se cree que mayoritariamente los esfuerzos residuales son bajos en las soldaduras por fricción debido a la baja temperatura de estado sólido del proceso FSW. Sin embargo, en comparación con las abrazaderas más utilizadas para la fijación de las piezas de trabajo en los procesos de soldadura convencional, la sujeción utilizada en el proceso FSW es más rígida ya que ejerce una restricción mucho mayor en las piezas soldadas. Estas restricciones impiden la contracción del “nugget” de la soldadura y la zona afectada por el calor durante el enfriamiento en ambas direcciones longitudinal y transversal, con lo que resulta la generación de esfuerzos longitudinales y transversales. La existencia de un valor alto de esfuerzo residual ejerce un efecto significativo en las propiedades mecánicas post-soldadura, particularmente las propiedades de fatiga. La distribución y magnitud de los esfuerzos residuales en las soldaduras por fricción son diferentes para las aleaciones de aluminio y acero. Es probable que esto esté relacionado con la dependencia de la temperatura del esfuerzo de fluencia y la influencia de la deformación final por el borde de salida del hombro de la herramienta. Por lo tanto, es de gran importancia investigar la distribución de esfuerzos residuales en las soldaduras por fricción [32].

2.3.10. Defectos y fallas

Defectos comunes en las soldaduras por fricción son la porosidad y defectos en la superficie. A una velocidad de giro constante, un incremento en la velocidad de avance lleva a la iniciación de agujero de gusano en la parte inferior de la soldadura [1]. Además, el tamaño de los agujeros de gusano se incrementa con la velocidad de avance, debido al flujo inadecuado de materiales hacia la parte inferior de la soldadura. Hay indicios que la relación velocidad de avance-velocidad de rotación es una importante variable en la formación del defecto agujero de gusano. La mayoría de la generación de calor ocurre en la interface entre el hombro de la herramienta y la pieza de trabajo. Heterogeneidad significativa en la generación de calor en esta interface puede conducir a la formación de defectos en la forma de flash debido al sobrecalentamiento de la superficie. La propensión a las grietas o poros incrementa con la velocidad de soldadura aunque existe una dependencia de aleación. Los defectos tienden a ocurrir en el lado de avance donde una abrupta transición microestructural

ocurre desde la zona del "nugget" muy refinado a la ZATM mientras la transición fue gradual en el lado de regreso relativamente libre de defecto [1].

Capítulo III

Pruebas de Fatiga y Dinámicas

3.1.1. Fatiga basada en el Esfuerzo [34]

Los esfuerzos cíclicos debidos a las cargas cíclicas a las que están sujetos los componentes de máquinas pueden conducir a daños microscópicos en el material involucrado. A veces a esfuerzos muy por debajo de la resistencia última del material dado, este daño microscópico puede acumularse con la continuidad de los ciclos hasta desarrollarse en grietas u otro daño macroscópico que lleva a la falla del material. La aproximación tradicional para analizar las fallas por fatiga fue desarrollada de la siguiente forma desde 1955, basándose el análisis en los esfuerzos nominales (promedio) en la zona donde el componente es analizado. El esfuerzo nominal que puede resistir bajo las cargas cíclicas es determinado por consideraciones del esfuerzo medio y por ajustes hechos por efectos de aumento de esfuerzos, tales como ranuras, agujeros, filetes, etc.

3.1.2. Descripción de cargas cíclicas

Algunas aplicaciones prácticas y también muchas pruebas de fatiga de materiales, involucran esfuerzos cíclicos entre los niveles máximos y mínimos que son constantes. Esto es llamado *amplitud de esfuerzo constante*, y se muestra en la Figura 3.1. El *rango de esfuerzos*, $\Delta\sigma$, es la diferencia entre los valores máximo y mínimo. Promediando los valores máximo y mínimo da el *esfuerzo medio*, σ_m . El esfuerzo medio puede ser cero, como se muestra en la Figura 3.1(a), pero no es frecuente como en (b). La mitad del rango es llamado *amplitud de esfuerzo*, σ_a , así que ésta es la variación del medio. Las expresiones básicas para estas definiciones son:

$$\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min}, \quad \sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2}, \quad \sigma_a = \frac{\Delta\sigma}{2} \quad (3.1)$$

El término *esfuerzo alternante* es usado por algunos autores y tiene el mismo significado que amplitud de esfuerzo. Y también es usual notar que:

$$\sigma_{max} = \sigma_m + \sigma_a, \quad \sigma_{min} = \sigma_m - \sigma_a \quad (3.2)$$

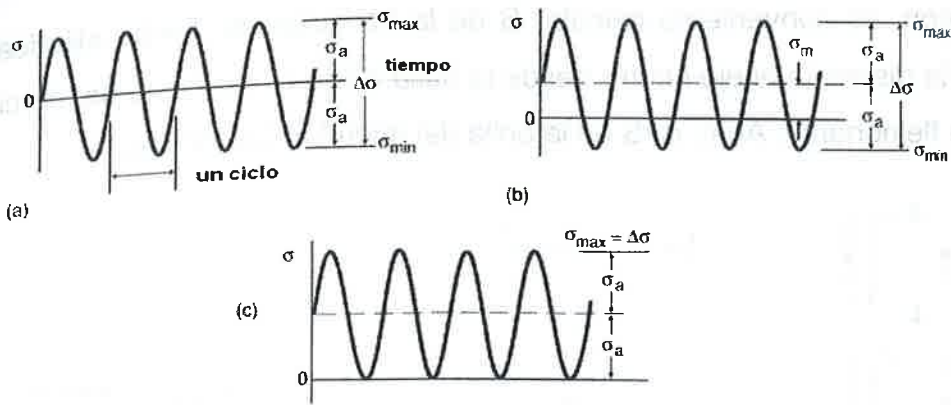


Fig. 3.1. Ciclos con amplitud constante y sus respectivas nomenclaturas. (a) Esfuerzos completamente invertidos, $\sigma_m=0$, (b) Esfuerzo medio $\sigma_m \neq 0$, (c) Esfuerzo de cero a tensión, $\sigma_{min}=0$.

Los signos de σ_a y $\Delta\sigma$ siempre son positivos, ya que $\sigma_{max} > \sigma_{min}$, donde tensión es considerado positivo. Las cantidades σ_{max} , σ_{min} y σ_m pueden ser también positivas o negativas. Algunas razones de ciertos pares de variables son a veces usadas.

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}, \quad A = \frac{\sigma_a}{\sigma_r} \quad (3.3)$$

Donde R es llamada *razón de esfuerzos* y A *razón de amplitud*. Algunas relaciones adicionales derivadas de las ecuaciones anteriores también son usadas:

$$\Delta\sigma = 2\sigma_a = \sigma_{max}(1-R), \quad \sigma_m = \frac{\sigma_{max}}{2}(1+R) \quad (a, b) \quad (3.4)$$

$$R = \frac{1-A}{1+A}, \quad A = \frac{(1-R)}{(1+R)} \quad (c, d)$$

3.1.3. Esfuerzos Puntuales vs. Esfuerzos Nominales

Es importante distinguir entre el esfuerzo en un punto, σ' , y el esfuerzo nominal o promedio, S, y por esta razón usamos dos símbolos diferentes. El esfuerzo nominal es calculado con la carga o momento o su combinación como una materia de conveniencia y solo es igual a σ en ciertas situaciones. Considere los tres casos de la Figura 3.2. Para carga axial simple (a), el esfuerzo σ es el mismo en todo y también es igual al valor promedio $S=P/A$, donde A es el área de sección transversal.

Para la flexión, es conveniente calcular S de la ecuación de flexión elástica, $S=Mc/I$, donde c es la distancia al eje neutro desde la orilla e I es el momento de inercia de área sobre el eje flexionante. Aquí, $\sigma=S$ en la orilla del miembro flexionado.

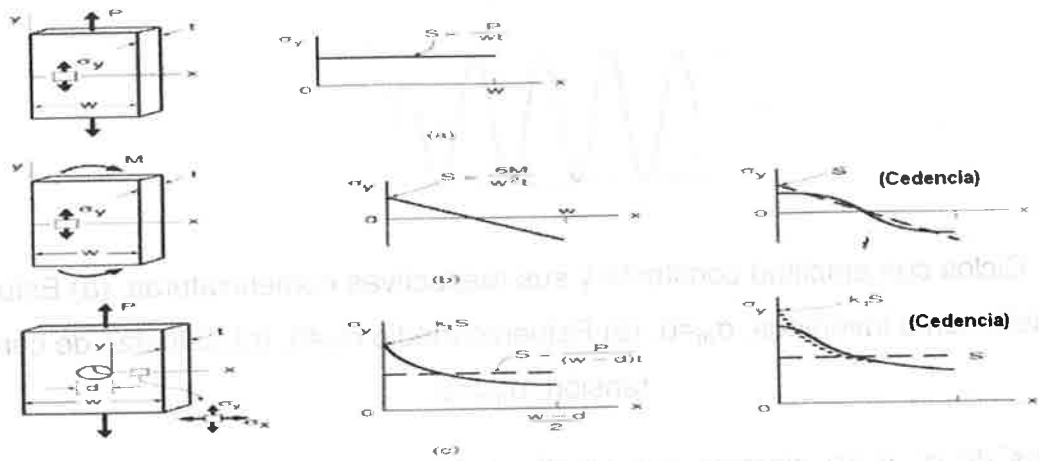


Fig. 3.2. Esfuerzos actual o nominal para (a) tensión simple, (b) flexión, y (c) miembro muescado. Las distribuciones de esfuerzos actuales σ_y vs. x se muestran como líneas sólidas, y las distribuciones hipotéticas asociadas con el esfuerzo nominal S como líneas interrumpidas. En (c), se muestra con líneas punteadas la distribución de esfuerzo que ocurrirá si no hubiera fluencia.

3.1.4. Curva Esfuerzo-Ciclos de vida (S-N)

Si un espécimen de prueba de un material o un componente de ingeniería es sujeto a varios ciclos de esfuerzo, se desarrollará una grieta por fatiga u otro daño, llevando a la falla completa del miembro. Si la prueba se repite a altos niveles de esfuerzos pueden ser graficados para obtener la curva Esfuerzo-Ciclos de Vida (Stress-Life), también llamada curva S-N. La amplitud de esfuerzo o esfuerzo nominal, σ_a o S_a , es graficada comúnmente contra el número de ciclos a la falla N_f , como se muestra en las Figuras 3.3 y 3.4. Un grupo de tales pruebas de fatiga dando una curva S-N pueden ejecutarse todas a esfuerzo medio de cero, o a algún esfuerzo específico diferente de cero, σ_m . También son comunes las curvas S-N para un valor constante de razón de esfuerzo, R . Aunque los esfuerzos usualmente graficados como amplitudes, en lugar de $\Delta\sigma$ o σ_{max} . En las ecuaciones 3.2 y 3.3 pueden usarse para convertir las curvas S-N graficadas de una forma u otra.

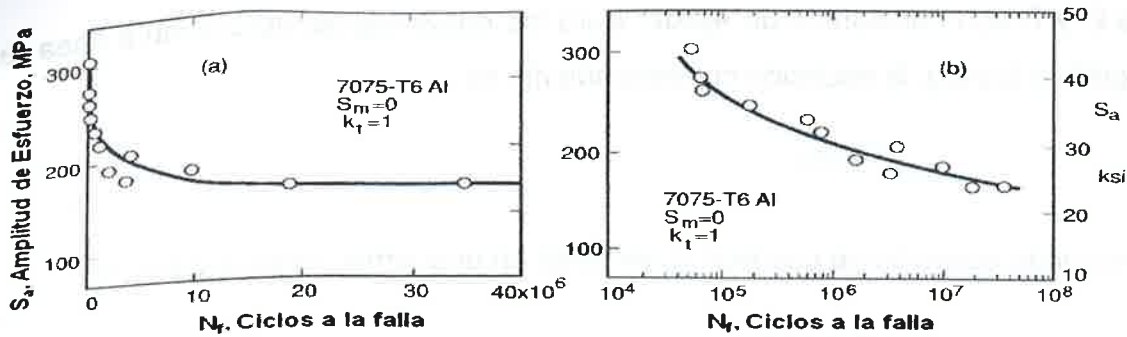


Fig. 3.3. Curvas S-N de pruebas de flexión rotativa en especímenes no muescados de una aleación de aluminio. Usando la misma escala lineal en esfuerzo, pero en el número de ciclos en escala lineal (a), y logarítmica en (b) [34].

El número de ciclos a la falla cambia rápidamente con el nivel de esfuerzos y puede ir encima de varios órdenes de magnitud. Por esta razón, los números de ciclos usualmente son graficados en escala logarítmica. La dificultad con la gráfica lineal se muestra en la Figura 3.3, donde los mismos datos de S-N son graficados en ambas escalas de N_f . en la gráfica lineal, los números de ciclos para vidas cortas no puede leerse con precisión. Una escala logarítmica también se usa frecuentemente en el eje de esfuerzos. Si los datos de S-N se encuentran aproximadamente en línea recta en la gráfica log-lineal, la siguiente ecuación puede ser apropiada para obtener la representación matemática de la curva:

$$\sigma_a = C \cdot D \log N_f \quad (3.5)$$

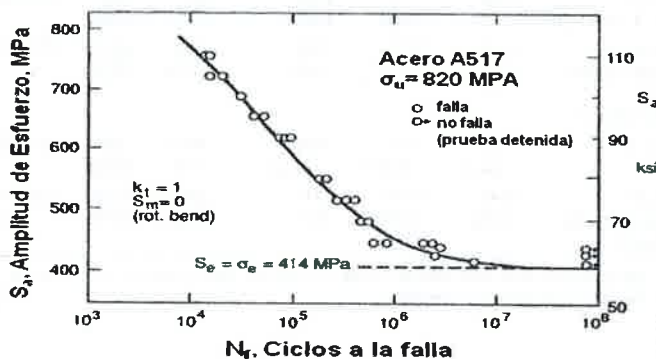


Fig. 3.4. Curva S-N en flexión rotativa de especímenes no muescados de un acero con diferente límite de fatiga [34].

donde C y D son constantes de ajuste. Para los datos que se aproximan a línea recta en la gráfica log-log, la ecuación correspondiente es:

$$\sigma_a = AN_f^B \quad (3.6)$$

Esta segunda ecuación se usa frecuentemente en una forma un poco diferente.

$$\sigma_a = \sigma'_f (2N_f)^b \quad (3.7)$$

Estas constantes de ajuste para las dos formas son relacionadas por

$$A = 2^b \sigma'_f, \quad B = b \quad (3.8)$$

Las constantes para las ecuaciones 3.6 y 3.7 están dadas en la Tabla 3.1 para varios metales de ingeniería.

Tabla 3.1. Constantes para la curva S-N para varios metales dúctiles de ingeniería, de pruebas a especímenes no muescados a esfuerzo medio axial igual a cero [34].

Material	Esfuerzo de fluencia	Esfuerzo último	Esfuerzo verdadero a la fractura	$\sigma_a = \sigma'_f (2N_f)^b = AN_f^B$		
	σ_o	σ_u	$\bar{\sigma}_{fR}$	σ'_f	A	$b = B$
<i>(a) Steels</i>						
AISI 1015 (normalized)	227 (33)	415 (60.2)	725 (105)	976 (142)	886 (128)	-0.14
Man-Ten (hot rolled)	322 (46.7)	557 (80.8)	990 (144)	1089 (158)	1006 (146)	-0.115
RQC-100 (roller Q & T)	683 (99.0)	758 (110)	1186 (172)	938 (136)	897 (131)	-0.0648
AISI 4142 (Q & T, 450 HB)	1584 (230)	1757 (255)	1998 (281)	1937 (266)	1837 (266)	-0.0762
AISI 4340 (aircraft quality)	1103 (160)	1172 (170)	1634 (237)	1758 (255)	1643 (238)	-0.0977
<i>(b) Other Metals</i>						
2024-T4 Al	303 (44.0)	476 (69.0)	631 (91.5)	900 (131)	839 (122)	-0.102
Ti-6Al-4V (solution treated and aged)	1185 (172)	1233 (179)	1717 (249)	2030 (295)	1889 (274)	-0.104

Notes: The tabulated values have units of MPa(ksi) except for dimensionless $b = B$. See Table 14.1 for sources and additional properties.

3.1.5. Origen de la carga cíclica

Algunas aplicaciones prácticas involucran cargas cíclicas a una amplitud constante pero las historias de cargas irregulares contra el tiempo son las encontradas más

comúnmente. Ejemplos de estas están dados en las Figura 3.5. Las cargas en componentes de máquinas, vehículos y estructuras pueden ser divididas en cuatro categorías dependiendo de su origen. Las cargas estáticas no varían y son continuas. Las cargas de trabajo cambian con el tiempo y son incurridas como resultado de la función realizada por el componente. Cargas vibratorias son cargas cíclicas a relativamente altas frecuencias que surgen del ambiente o como un efecto secundario de la función del componente. Cargas accidentales son eventos raros que no ocurren bajo circunstancias normales.

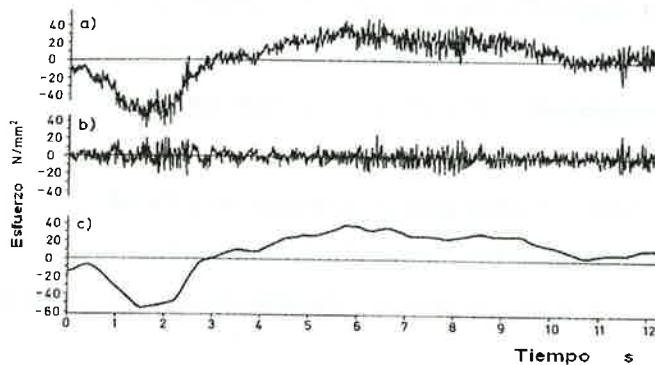


Fig. 3.5. Registros de esfuerzos en el brazo de dirección de un motor de vehículo, incluyendo la historia original esfuerzo-tiempo (a), y la separación de este en las cargas vibratorias debidas a la rugosidad del camino (b), y la carga de trabajo debida a la maniobrabilidad del vehículo (c) [34].

3.1.6. Prueba de Fatiga

Los materiales probados para obtener las curvas S-N es una práctica extensa. Varias normas ASTM dirigen las pruebas de fatiga basada en el esfuerzo para metales, especialmente la norma ASTM E466 [37]. Los datos y las curvas resultantes son evaluados ampliamente en literaturas publicadas. Un entendimiento de la base de estas pruebas es útil empleando sus resultados efectivamente para propósitos de ingeniería.

3.1.7. La naturaleza física del daño por fatiga

Cuando examinamos a una escala suficientemente pequeña, todos los materiales son anisotrópicos y no homogéneos. Por ejemplo, los metales de ingeniería están

compuestos de un agregado de granos de cristal pequeños. Dentro de cada grano el comportamiento es anisotrópico debido a los planos cristalográficos, y si un límite de grano es cruzado, la orientación de esos granos cambia. Existen no homogeneidades no solo debido a la estructura granular, pero también de pequeñas vacancias o partículas de una composición química diferente dentro del material, tales como inclusiones de silicato o alúmina duros en el acero. Fases múltiples, involucrando granos u otras regiones de mayor composición química. Como resultado de tales microestructuras no uniformes, los esfuerzos son distribuidos de manera no uniforme cuando observamos a pequeña escala esta estructura. Regiones donde los esfuerzos son usualmente los puntos donde los daños por fatiga empiezan. Una pequeña grieta se desarrolla en las vacancias, inclusiones, bandas de deslizamiento, límites de grano, o rasguños, o pueden ser defectos agudos inicialmente presentes que son esencialmente unas grietas. Estas grietas crecen en planos generalmente normales a los esfuerzos de tensión hasta que causan la falla, a veces se unen con otras grietas en el proceso. Fotografías del daño progresivo de este tipo se muestra en la Figura 3.6.

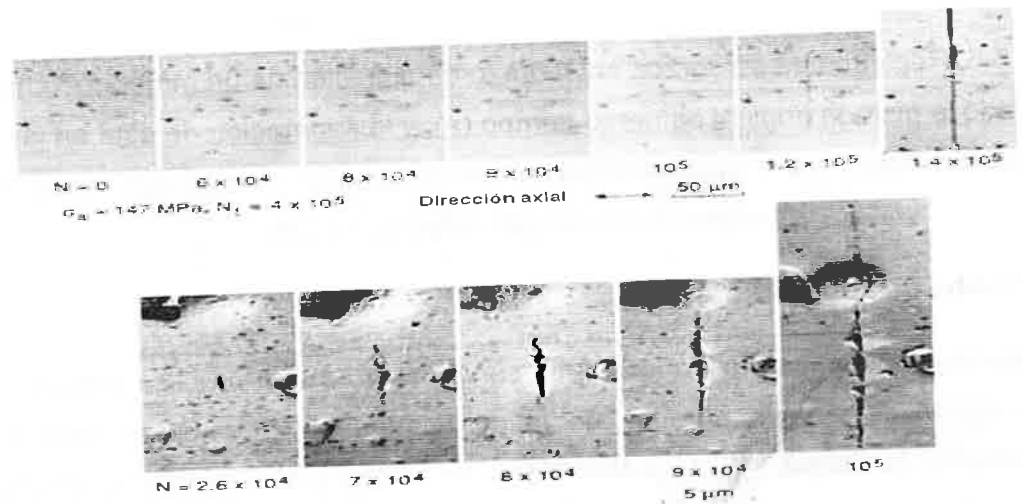


Fig. 3.6. Secuencia fotográfica de la aparición y el crecimiento de una grieta durante una carga cíclica. Se aprecia que hasta $N=1.4 \times 10^5$ aparece la entonces microgrieta.

3.1.8. Cargas de amplitud variable

Las cargas por fatiga en aplicaciones prácticas usualmente involucran amplitudes que cambian de manera irregular. Ahora se considerarán métodos para estimar la vida para tales cargas.

3.1.8.1. La Regla Palmgren-Miner

Considere una situación de carga de amplitud variable como se ilustra en la Figura 3.7. Una cierta amplitud de esfuerzo σ_{a1} es aplicado para un número de ciclos N_1 , donde el número de ciclos a la falla de la curva S-N para σ_{a1} es N_{f1} . La fracción de la vida es entonces N_1/N_{f1} . Ahora consideremos otra amplitud de esfuerzo σ_{a2} , correspondiendo a N_2 en la curva S-N, se aplicó para N_2 ciclos. Entonces se usa una fracción adicional de la vida N_2/N_{f2} . La regla Palmgren-Miner simplemente establece que la falla por fatiga se espera cuando tales fracciones de vida suman la unidad, esto es, cuando el 100% de la vida es agotada.

$$\frac{N_1}{N_{f1}} + \frac{N_2}{N_{f2}} + \frac{N_3}{N_{f3}} + \dots = \sum \frac{N_j}{N_{fj}} = 1 \quad (3.9)$$

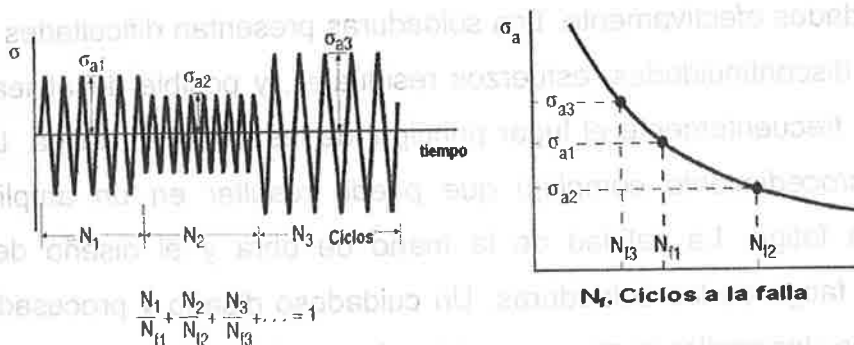


Fig. 3.7. Uso de la regla Palmgren-Miner para la predicción de vida para una amplitud variable de carga completamente invertida.

Frecuentemente, una secuencia de cargas de amplitud variable se repite un número de veces. Bajo estas circunstancias, es conveniente sumar razones de ciclo sobre una repetición de la historia, y multiplicando ésta por el número de repeticiones requeridas para que la suma alcance la unidad.

$$B_f = \left[\sum \frac{N_j}{N_{fj}} \right] \text{one rep.} = 1 \quad (3.10)$$

Donde B_f es el número de repeticiones a la falla. Esto se muestra en la Figura 3.8.

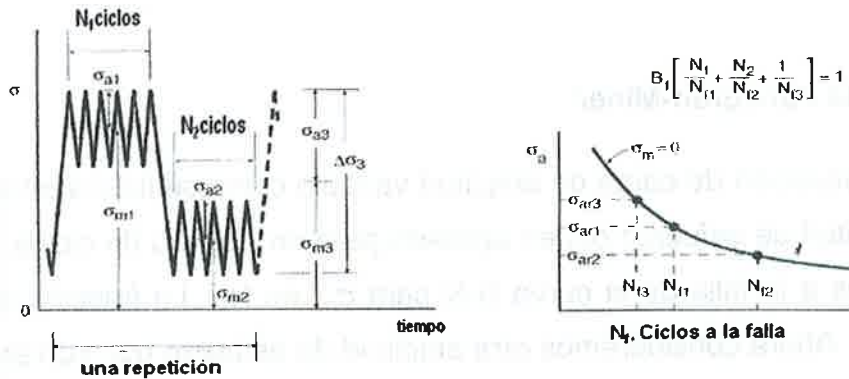


Fig. 3.8. Predicción de vida para una historia de esfuerzos repetidos con cambio de valor medio.

3.1.9. Fatiga en soldaduras [35]

Partes y estructuras son soldadas a menudo entre si de alguna manera, usualmente debido al costo y a la eficacia de peso. Aceros, seguido por las aleaciones de aluminio, son los metales soldados con mayor frecuencia, mientras que algunos metales no pueden ser soldados efectivamente. Las soldaduras presentan dificultades debido a las macro y micro discontinuidades, esfuerzos residuales, y posible desalineamiento. Las soldaduras son frecuentemente el lugar principal de las fallas por fatiga. La soldadura en sí es un procedimiento complejo que puede resultar en un amplio rango de resistencia a la fatiga. La calidad de la mano de obra y el diseño determinan la resistencia a la fatiga de las soldaduras. Un cuidadoso diseño y procesado de piezas soldadas pueden desarrollar la misma resistencia a la fatiga como una parte forjada y mecanizada de una pieza, y a un costo mucho menor.

3.1.9.1. Nomenclatura y discontinuidades de la soldadura

Varias soldaduras típicas se muestran esquemáticamente en la Figura 3.9, con el acompañamiento de los puntos de fatiga para el acero estructural a 2×10^6 ciclos con $R=0$. Estas juntas soldadas están bastante simplificadas, pero representan muchas partes y estructuras reales. En general hay soldaduras a tope, con filete, y puntos con

muchas formas y configuraciones de soldadura diferentes. Las soldaduras a tope transversal y longitudinal son comunes.

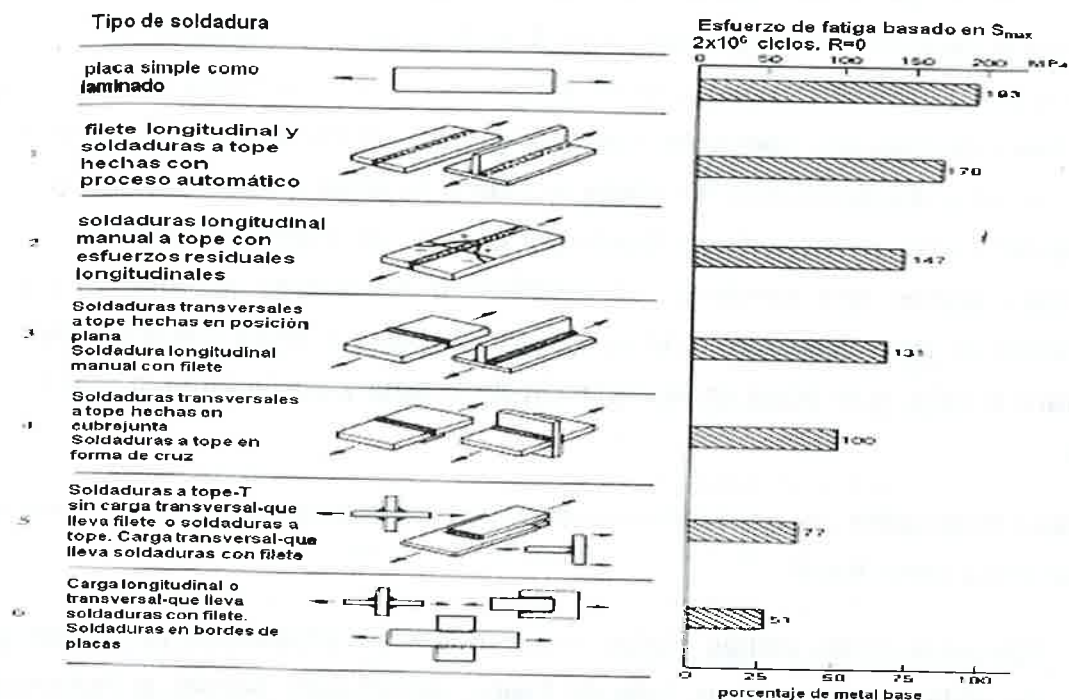


Fig. 3.9. Tipos de soldadura y puntos de fatiga para acero estructural [35].

Las soldaduras con filete, sin embargo, son más comunes y como se muestra en la Figura 3.9, puede ser cargada, como en la fila 6, o sin carga como en la fila 5. Los puntos de fatiga limitados, dados en la Figura 3.9 oscilan entre 25 y 90 por ciento de la resistencia a la fatiga de las placas base sin muescas de laminado y proporcionan una guía razonable para la variación real en puntos de fatiga de la soldadura, dependiendo de la soldadura. El rango de 25 a 90 por ciento indica una significativa diferencia en puntos de fatiga de soldadura. Los perfiles de esfuerzos residuales y sus magnitudes son difíciles de cuantificar. La fila 2 de la Figura 3.9 muestra una típica distribución longitudinal de los esfuerzos residuales en la sección transversal. Los esfuerzos residuales son a tensión en la zona soldada, la cual debe estar balanceada por esfuerzos residuales a compresión lejos de la soldadura. Los esfuerzos a tensión pueden alcanzar valores iguales al esfuerzo de fluencia y puede contribuir a la baja resistencia a la fatiga de algunas soldaduras. La Figura 3.10 muestra una sección

transversal de penetración completa y parcial en soldaduras a tope y filete. Siempre hay macro y/o micro discontinuidades en soldaduras que proporcionan los sitios para la iniciación de la grieta. Algunas de estas discontinuidades puede ser en realidad plana, como en el caso de fisuras (grietas), y por lo tanto la vida a la fatiga en la iniciación de la grieta puede ser cero o pequeña en este caso. Vida a la fatiga en soldaduras se considera entonces que involucran sólo a la fatiga por el crecimiento de grieta. Cuando la grieta como discontinuidad no existe, la vida a la fatiga de la soldadura puede ser considerado como la iniciación de fisuras por fatiga y crecimiento de grieta por fatiga de pequeñas grietas que conducen al crecimiento de grietas grandes. Un aspecto importante de las soldaduras es la reducción de macro y micro discontinuidades que mejorará la vida a la fatiga en la iniciación de la grieta y por lo tanto la vida total a la fatiga.

Las discontinuidades de la soldadura pueden ser clasificadas como plana, volumétrica, o geométrica como sigue:

- Discontinuidades planas. Solidificación de grietas, contracción de grietas, grietas inducidas por hidrogeno, falta de fusión, penetración parcial, o inclusiones de óxidos.
- Discontinuidades volumétricas. Porosidad o inclusiones de escoria.
- Discontinuidades geométricas. Lugares intermitentes, ondas de superficie, reforzamiento, cambio de secciones, desalineamiento, solapamientos, salpicaduras.

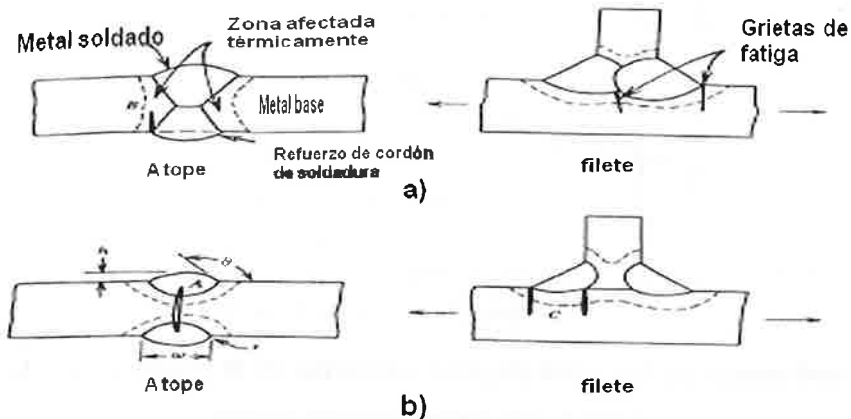


Fig. 3.10. Nomenclatura de la soldadura e iniciación de grieta por fatiga y/o sitios de crecimiento. (a) Penetración completa, (b) penetración parcial.

3.1.9.2. Curva Esfuerzo-Ciclos de vida para uniones soldadas (S-N)

La mayoría de los aceros usados en soldaduras tienen resistencia a la fluencia por debajo de 700 MPa. Aún con fuerzas por encima de este valor, mucha información indica que para una soldadura transversal a tope o con filete, como soldados los puntos de fatiga a amplitud constante de 10^6 ciclos o más son bastante independientes de la última resistencia a la tensión del material. La geometría de la muesca de la soldadura, esfuerzos residuales que pueden o no relajarse, otras discontinuidades, pérdida de calor, y el ablandamiento o endurecimiento cíclico son las causas de este comportamiento. Las concentraciones geométricas del esfuerzo tienen un efecto significativo en la resistencia a la fatiga de la soldadura. La influencia del ángulo de reforzamiento para soldaduras transversales a tope se muestra en la Figura 3.11. Aquí se ve que un factor de casi 2 existe para la resistencia a la fatiga en 2×10^6 ciclos como el ángulo de reforzamiento varía de 100° a 150° . El decremento de altura h de la soldadura transversal a tope reforzada mejora continuamente la resistencia a la fatiga da la resistencia última a la tensión del acero, como se muestra en la Figura 3.12. La influencia del esfuerzo medio en la resistencia a la fatiga de soldaduras es similar a la de otros componentes con muescas.

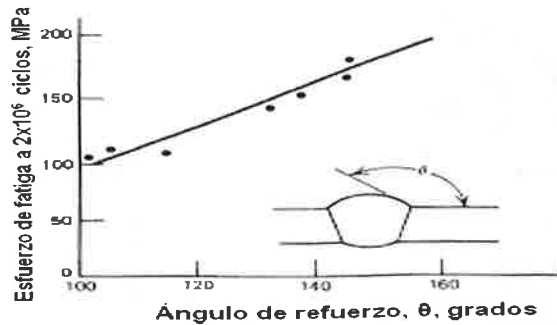


Fig. 3.11. Influencia de la forma de reforzamiento en la resistencia a la fatiga de soldaduras transversales a tope.

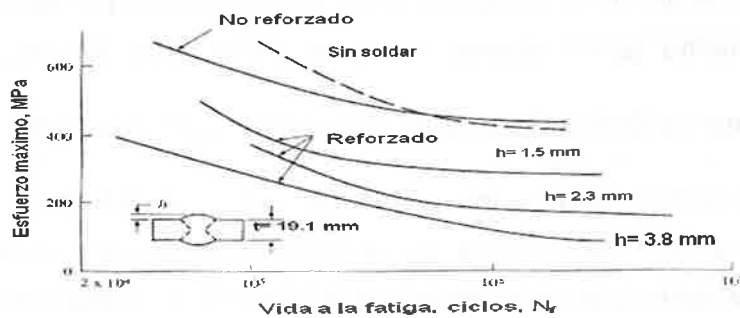


Fig. 3.12. Curvas S-N para soldaduras transversales a tope de acero al carbono Q&T, $S_u=785$ MPa, $R=0$ [35].

3.1.9.3. Mejora de la resistencia a la fatiga en soldadura

Hay esencialmente 4 formas básicas de mejorar la resistencia a la fatiga en las soldaduras:

1. Mejorar el procedimiento de soldadura actual.
2. Modificar la microestructura del material.
3. Reducir las discontinuidades geométricas.
4. Inducir esfuerzos residuales a compresión en la superficie.

Estos cuatro métodos en realidad se superponen, desde la mejora del proceso de soldadura se puede mejorar la microestructura, reducir la concentración de esfuerzos, y

alterar los esfuerzos residuales. Por lo tanto, en la mejora de la resistencia a la fatiga en soldadura, el mayor énfasis es en reducir las discontinuidades geométricas y el uso de esfuerzos residuales a compresión.

3.1.9.4. Estimación de vida a la fatiga en soldadura

Existen varios métodos para estimar la vida a la fatiga en uniones soldadas, un método involucra el uso del comportamiento de la curva S-N y el diagrama de Haigh o el diagrama modificado de Goodman para esfuerzos medios. Otro método usa el comportamiento de la curva ϵ -N con un análisis de modelo muesca deformación y el modelo Morrow o SWT para esfuerzos medios. Un tercer método involucra la integración $da/dN-K\Delta$ con Forman, Walker, u otros modelos para esfuerzos medios. El enfoque de la curva S-N desarrollada de las pruebas de fatiga de las soldaduras es históricamente, y en la actualidad, el método de diseño más común para fatiga en soldaduras.

3.2. Pruebas Dinámicas [36]

El comportamiento dinámico de los materiales es un área de estudio en la confluencia de muchas disciplinas científicas. Los procesos que ocurren cuando cuerpos son sometidos a rápidos cambios de carga pueden diferir significativamente de lo que ocurre en situaciones estáticas o cuasi-estáticas.

3.2.1. Comportamiento de los metales a velocidades altas de deformación

El diagrama de la Figura 3.13 muestra el método de carga, régimen de la velocidad de deformación, y los eventos dinámicos importantes necesarios para ser considerados para pruebas en el régimen especificado. Para velocidades de deformación superiores a $1s^{-1}$, que puede ser considerado como un punto inicial de partida para evaluar los efectos de la carga dinámica en relación a la sensibilidad del material, los tipos de prueba que han sido utilizados se muestran en la Figura 3.13.

Cada uno de estos métodos de prueba pueden ser usados para describir un cierto rango carga-velocidades de deformación y cada técnica puede ser usada para obtener información particular de la respuesta dinámica y el comportamiento de los materiales.

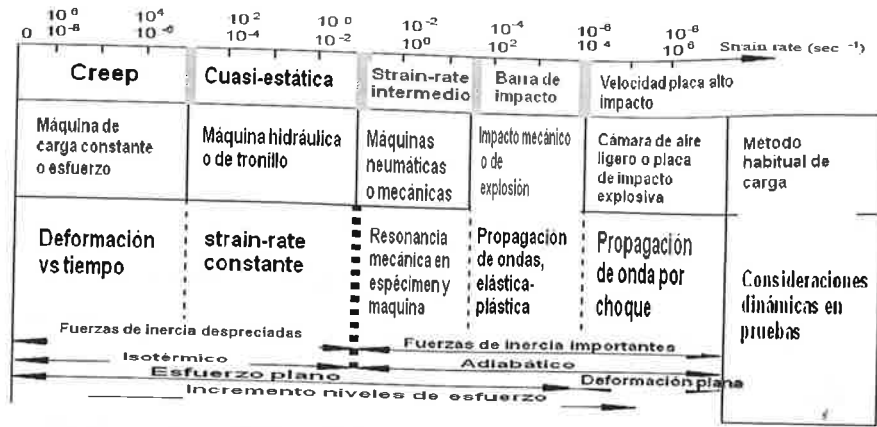


Fig. 3.13. Aspectos dinámicos de las pruebas mecánicas.

3.2.2. Pruebas uniaxiales a velocidades altas de deformación

El método más sencillo para determinar información sobre la sensibilidad de la velocidad de deformación de un material es incrementar la velocidad de una prueba uniaxial a tensión o compresión. Máquinas hidráulicas y neumáticas han sido desarrolladas con capacidad para controlar el incremento de la velocidad. Pruebas de tensión o compresión parecen ser ideales debido a que el estado de esfuerzo es puramente axial, o al menos es asumido. La cuestión más importante que debe ser respondida es que tan rápido una prueba axial puede ser realizada antes que seamos incapaces de obtener una curva esfuerzo-deformación válida para un material.

3.2.3. Propagación de ondas en sólidos

La propagación de ondas en uno de los aspectos más importantes en la realización de ensayos en la barra Hopkinson. En los sólidos se pueden propagar distintos tipos de ondas elásticas, que dependen de la manera en que se relaciona el movimiento de las partículas del sólido con la dirección de propagación de la onda en sí y de las condiciones de frontera que se tenga.

3.2.3.1. Propagación de ondas elásticas en barras cilíndricas

En la Figura 3.14(a), se observa la alineación de un proyectil con una barra previo a un impacto. Una vez producido el impacto, una onda de esfuerzo a compresión se propaga

de izquierda a derecha por toda la barra; en un tiempo t , el frente de la perturbación se encuentra a una distancia x , posterior al impacto. La sección AB se desliza una distancia δx , según se muestra en la Figura 3.14(b), mientras que la Figura 3.14(c) muestra un elemento diferencial AB-A'B' que representa el estado de compresión después del impacto, esto a fin de determinar la deformación que sufre la barra. Finalmente, la velocidad del proyectil está representada por V_p , A representa en área de la sección trnsversal, σ el esfuerzo y u es la componente en x del vector de desplazamientos.

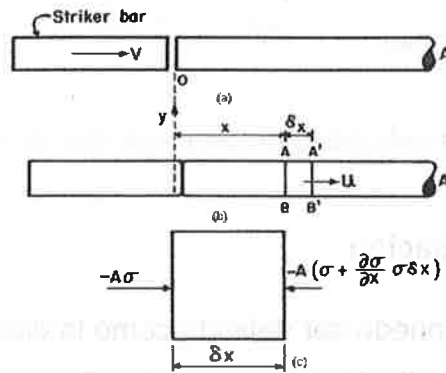


Fig. 3.14. Propagacion de un aonda en una barra cilíndrica. (a) Antes del impacto, (b) después del impacto, y (c) elemento diferencial.

Aplicando la segund aley de Newton al segmento AB, A'B' se tiene que:

$$F=ma \tag{3.11}$$

$$-\left[A\sigma - A\left(\sigma + \frac{\partial\sigma}{\partial x} \delta x \right) \right] = A\rho\delta x \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \tag{3.12}$$

$$\frac{\partial\sigma}{\partial x} = \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \tag{3.13}$$

Puesto que la deformación es elástica se utiliza la ley de Hooke:

$$\frac{\sigma}{\varepsilon} = E \tag{3.14}$$

donde ϵ es la deformación definida como $\partial u/\partial x$ y E , el módulo de elasticidad de las barras; el signo negativo se omite, debido a que se trata de un esfuerzo a compresión. Sustituyendo en la ecuación (3.13):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[E \frac{\partial u}{\partial x} \right] = \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (3.15)$$

y

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{E}{\rho} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad \text{o bien} \quad \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{1}{C_0^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (3.16)$$

donde $C_0 = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$ representa la velocidad de propagación de la onda.

3.2.3.2. Velocidad de propagación

La velocidad de propagación puede ser definida como la distancia que recorre una onda a través de un medio en un tiempo determinado. Esta velocidad varía conforme el medio por el que viaja, de modo que existen distintas velocidades de propagación. Para las ondas elásticas la velocidad de propagación C_0 , puede ser definida en términos del módulo de elasticidad, E , y de la densidad ρ , del sólido, como se muestra en la ecuación (3.17):

$$C_0 = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (3.17)$$

La ecuación anterior solo representa una de las formas en que la velocidad de propagación puede ser determinada, ya que también puede ser medida mediante equipos de ultrasonido. La Tabla 3.2 muestra algunas velocidades de propagación en diversos medios:

Tabla 3.2. Velocidades de propagación en distintos medios [40].

Material	Velocidad de la onda longitudinal (m/seg)
Acero al carbono	5050
Aluminio	5080
Zinc	3810
Cobre	3710

Para este trabajo se empleo como medio de propagación las barras de acero maraging 300, por lo que fue necesario determinar la velocidad de propagación de onda a través de este medio.

3.2.4. Incidencia, reflexión y transmisión de ondas en una barra cilíndrica

Una onda puede incidir en la frontera entre un cuerpo y otro con cierto ángulo, pero cuando la incidencia es normal, ($\theta=0$, como en el caso del impacto en la barra Hopkinson), las interacciones que se presentan en la interface son más simples, puesto que la onda longitudinal producida transmite y refleja ondas longitudinales. La reflexión y refracción de las ondas son fenómenos que se presentan cuando la onda se encuentra con un medio de diferente impedancia sónica. La impedancia sónica se define como la razón de la fuerza F , con respecto a la velocidad de la partícula U_p , en un punto de la estructura o como el producto de la densidad media por la velocidad de la onda elástica, según se muestra en la ecuación (3.18):

$$Z = \frac{F}{U_p} = s\rho C_0 \quad (3.18)$$

Donde s , ρ y C_0 representan el área de la sección transversal, la densidad del material y la velocidad de propagación, respectivamente.

3.2.5. Determinación de Esfuerzo, deformación y strain rate

Consideremos que tenemos un espécimen metálico con impedancia más baja que la barra: $\rho_0 A_0 C_0 > \rho A C$. En la Figura 3.15 se considera L como la distancia decreciente con el tiempo cuando el espécimen sufre una deformación plástica, V_1 como la velocidad de la interface barra-especimen y V_2 como la velocidad en la interface espécimen-barra, de manera que $V_1(t) > V_2(t)$.

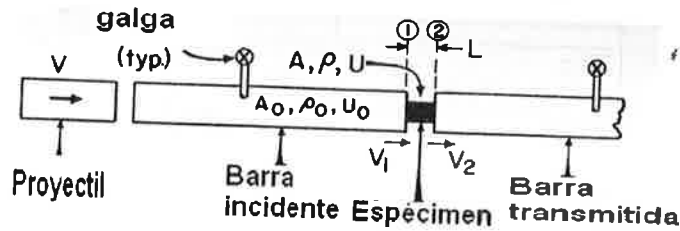


Fig. 3.15. Barra Hopkinson para material dúctil.

El strain rate se representa como una función del tiempo mediante la siguiente ecuación

$$\dot{\varepsilon} = \frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{V_1(t) - V_2(t)}{L} \quad (3.19)$$

Si pueden expresar las velocidades como una función de las deformaciones en las strain gages, tenemos:

$$\sigma = \rho U_p C = \frac{1}{2} \rho C V \quad (3.20)$$

$$\frac{\sigma}{E} = \varepsilon$$

$$C\varepsilon = U_p$$

Donde ε representa la deformación, de manera que en las interfaces se tiene:

$$V_1 = C_0 \varepsilon_I \quad (\text{en } t=0) \quad (3.21)$$

$$V_2 = C_0 \varepsilon_T$$

$\varepsilon_I, \varepsilon_T$ representan las deformaciones causadas por el pulso incidente y el transmitido, respectivamente. En $t > 0$, V_1 decrece debido a la onda reflejada:

$$V_1 = C_0 (\varepsilon_I - \varepsilon_R) \quad (3.22)$$

Donde ε_R representa la deformación causada por el pulso reflejado. Sustituyendo (3.21) y (3.22) en (3.19), se tiene:

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{C_0 (\varepsilon_I - \varepsilon_R) - C_0 \varepsilon_T}{L} \quad (3.23)$$

Acomodando la ecuación (3.23) se tiene:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{C_0}{L} (\varepsilon_I - \varepsilon_R - \varepsilon_T) \quad (3.24)$$

De manera que la deformación se obtiene integrando el strain rate de 0 a un tiempo t:

$$\varepsilon(t) = \frac{C_0}{L} \int_0^t [\varepsilon_I(t) - \varepsilon_R(t) - \varepsilon_T(t)] dt \quad (3.25)$$

Y el esfuerzo en el espécimen se obtiene:

$$\sigma = \frac{P_1(t) + P_2(t)}{2A} \quad (3.26)$$

Donde $P_1(t)$ y $P_2(t)$ son las fuerzas que actúan en las interfaces, dichas fuerzas se describen como:

$$P_1(t) = A_0 E_0 (\varepsilon_I + \varepsilon_R) \quad (3.27)$$

$$P_2(t) = A_0 E_0 \varepsilon_T \quad (3.28)$$

Por lo tanto la ecuación del esfuerzo queda de la siguiente manera:

$$\sigma = \frac{A_0 E_0}{2A} [\varepsilon_I(t) + \varepsilon_R(t) + \varepsilon_T(t)] \quad (3.29)$$

Donde E_0 es el módulo elástico de las barras y A_0 su area de la sección transversal.

También por equilibrio $P_1(t) = P_2(t)$ y $(\varepsilon_I + \varepsilon_R) = \varepsilon_T$:

Por lo tanto el esfuerzo, el strain rate y la deformación quedan representados de la siguiente manera, respectivamente:

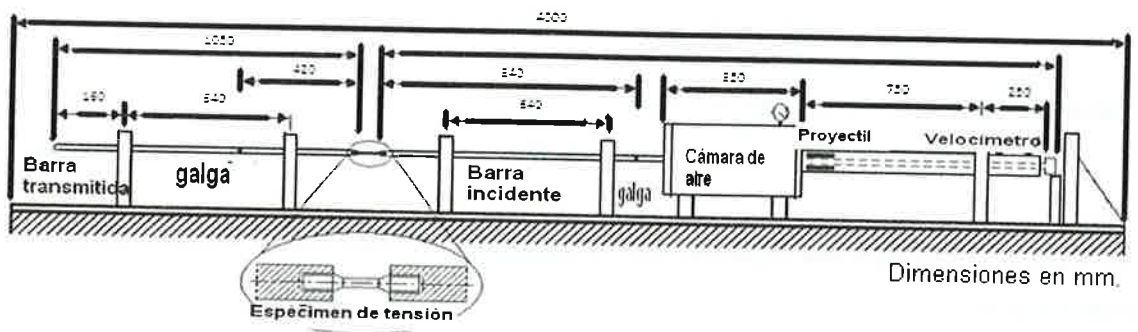
$$\sigma(t) = E_0 \frac{A_0}{A} \varepsilon_T(t) \quad (3.30)$$

$$\dot{\varepsilon}(t) = \frac{2C_0}{L} \varepsilon_R \quad (3.31)$$

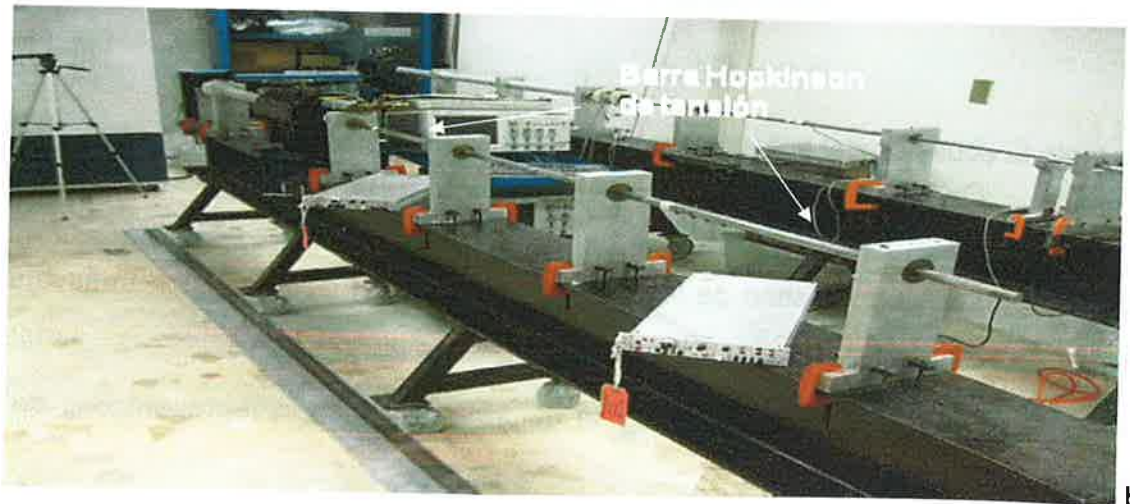
$$\varepsilon(t) = \frac{2C_0}{L} \int_0^t \varepsilon_R dt \quad (3.32)$$

3.3. Barra Hopkinson a tensión

La barra Hopkinson construida en CIDESI está equipada para la caracterización a rangos altos de strain rate (velocidad de deformación) de diferentes materiales metálicos, suaves y duros, como el aluminio y acero. La Figura 3.16 muestra un esquema del equipo. En los siguientes apartados, se describen los elementos, consideraciones y arreglos necesarios para la operación del equipo.



a)



b)

Fig. 3.16. (a) Representación esquemática de la barra Hopkinson [39], (b) Barra Hopkinson de tensión Laboratorio Mecánica Experimental CIDESI.

3.3.1. Elementos de la barra Hopkinson

3.3.1.1 Barras y proyectil

La alta relación longitud-diámetro permite obtener mejores condiciones para la propagación de la onda longitudinal. En este caso las longitudes de las barras incidente y transmitidas son de 2470 y 1050 mm de largo, respectivamente, ambas con un diámetro de 19.05 mm, con una relación longitud-diámetro de 143.83 en la barra incidente. El proyectil, del mismo material que las barras con un diámetro externo de 31.85mm, diámetro interno de 19.15 mm y una longitud de 105 mm, es montado sobre una guía fabricada de Nylamid® cuya función es alinear el proyectil en el interior del cañón, puesto que su diámetro es menor al del cañón, el cual tiene un diámetro de 50.7mm, así como permitir que el proyectil se deslice libremente por el cañón una vez que se produce el disparo de la cámara de presión. El material seleccionado para las barras y el proyectil fue un acero Maranging-300, ya que este material es capaz de resistir altos niveles de esfuerzo y deformación, las propiedades del material se muestran en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3. Propiedades del acero Maranging-300, especificación AISI 18Ni(300). Referencias UNS K93120, ASTM A538(C), ASTM A579.

COMPOSICION QUIMICA %		PROPIEDADES	
Niquel	18.50	Esfuerzo de Tensión Último	1655 MPa
Cobalto	9.00	Esfuerzo de Fluencia a Tensión	1570 MPa
Molibdèno	4.80	Esfuerzo de Fluencia a Compresión	2.1856 GPa
Titanio	0.60	Módulo de Elasticidad (E)	190 GPa
Aluminio	0.10	Densidad (ρ)	8000 Kg/m ³
Silicio	0.10 max.	Dureza Rockwell "C"	50/55
Manganeso	0.10 max.		
Carbón	0.03 max.		
Sulfuro	0.01 max		
Fósforo	0.01 max		
Circonio	0.01		
Boro	0.003		

3.3.1.2. Cámara de presión

La cámara de presión es alimentada con aire comprimido para realizar el disparo del proyectil. Los componentes internos de la cámara de presión se muestran en la Figura 3.17.

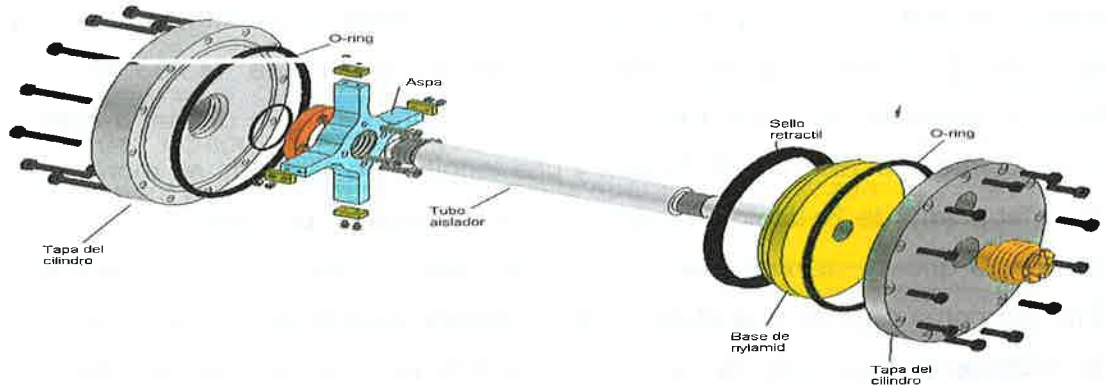


Fig. 3.17. Ilustración esquemática de la cámara de presión.

El funcionamiento de la cámara de presión empieza con la carga del proyectil en el cañón, verificando previamente que todas las válvulas se encuentren cerradas. La válvula (1) de la Figura 3.18 es abierta para que inicie la entrada de aire a la cámara de presión. El aire empuja el interior del sistema hasta cerrarlo, es decir, para producir el sellado del barril, y de esta manera presurizar las cámaras a la misma presión. La velocidad del proyectil depende de la presión en la cámara de aire, la cual es controlada mediante la válvula de desfogue (3) y el manómetro (4) de la Figura 3.18, estos elementos se encuentran en la parte exterior del cilindro. Una vez que se tiene la presión deseada, se puede realizar el disparo, la válvula de disparo (2) de la Figura 3.18, se abre rápida y totalmente, formándose una diferencia de presión en el interior de cámara, provocando el retroceso inmediato del conjunto interior hacia la parte posterior de la cámara, produciendo la ruptura del sellado, y de inmediato se ejerce una presión sobre el proyectil, esta presión acelera el proyectil en dirección contraria y viaja a través del cañón para que al final impacte el extremo libre de la barra incidente. La Figura 3.19 muestra esquemáticamente las posiciones principales de los elementos internos de la cámara de presión.

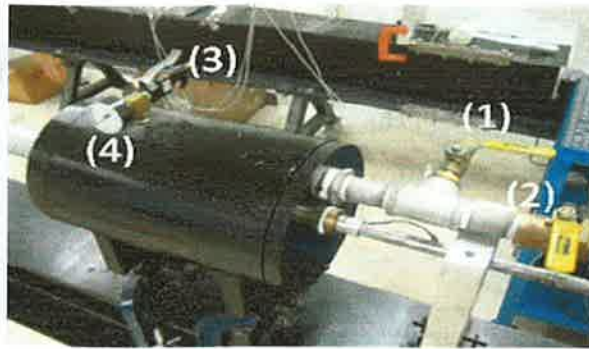


Fig. 3.18. Elementos externos de la cámara de aire.

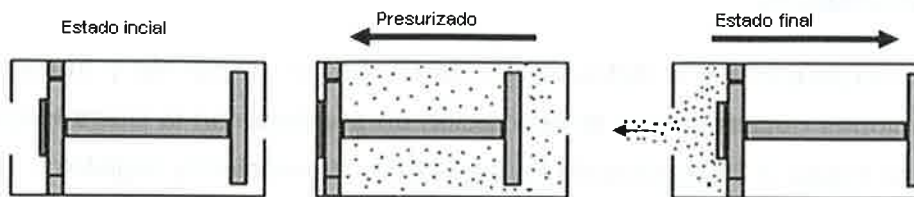


Fig. 3.19. Ilustración esquemática del desplazamiento de los elementos internos de la cámara para la propulsión del proyectil.

3.3.1.3. Elementos de alineación y soporte

La alineación, colocación correcta de las barras y de la interface del espécimen es algo muy importante, ya que de esto depende la generación de una buena propagación de ondas unidimensional y garantice la carga uniaxial a tensión sobre los especímenes. Los soportes de las barras, fabricados de aluminio, se distribuyeron adecuadamente para eliminar los problemas de flexión provocada por el peso de las barras y por la alta relación longitud-diámetro de las mismas. En el extremo opuesto de la barra hay una placa que detiene el deslizamiento de la barra incidente una vez que el proyectil halla impactado el tope en el extremo de esta misma barra, como se muestra en la Figura 3.20(a). Considerando que la alineación no debe ser forzada, los soportes incluyen bujes de bronce, como se muestra en la Figura 3.20(b), con un ajuste para que las barras puedan deslizarse sin problemas durante en impacto.

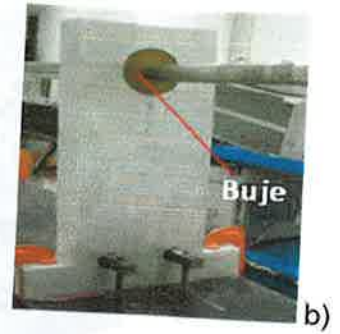


Fig. 3.20. (a) Placa que detiene deslizamiento de la barra y, (b) soportes de la barra.

3.3.2. Instrumentación

La velocidad del proyectil y la deformación de las barras (incidente y transmitida) son las dos mediciones necesarias en la realización de pruebas con la Barra Hopkinson. El esquema de la Figura 3.21 representa los elementos de medición, registro y tratamiento de datos utilizados para la obtención de las deformaciones elásticas después del impacto del proyectil.

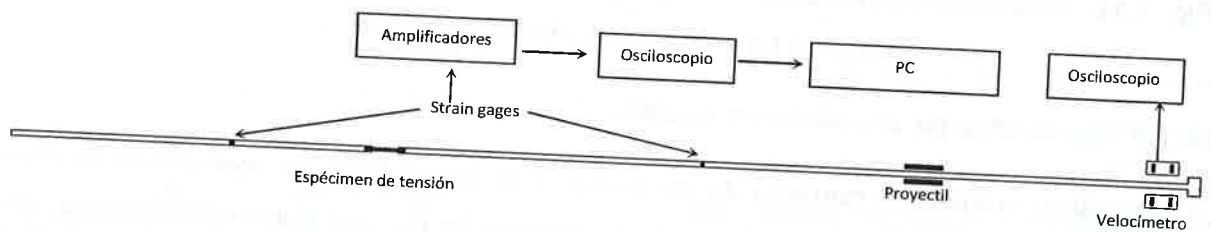


Fig. 3.21. Instrumentación para la medición y registro en la barra Hopkinson.

3.3.2.1. Strain gages

La strain gage o galga extensométrica es un instrumento que sirve para medir pequeñas deformaciones en los materiales. Su principio de funcionamiento obedece a un cambio de resistencia eléctrica de un conductor cuando se somete a una deformación, este cambio de resistencia generalmente se mide mediante el puente de Wheatstone, este se relaciona con la deformación por la cantidad conocida como el factor de galga (GF, por sus siglas en ingles), el cual se define como:

$$GF = \frac{\Delta R / R_G}{\varepsilon}$$

donde R_G es la resistencia de la galga sin deformar, ΔR es el cambio de resistencia causada por la deformación, y ε es la deformación. Las relaciones entre la deformación medida ε_l y la resistencia R de la galga es:

$$\varepsilon_l = \frac{dR/R}{S} \approx \frac{\Delta R}{SR} \quad (3.34)$$

Para convertir el cambio en resistencia a deformación, el factor de sensibilidad S del material de la galga extensométrica primero debe ser determinado. En este caso se utilizaron las strain gages VISHAY CEA-06-062UW-120.

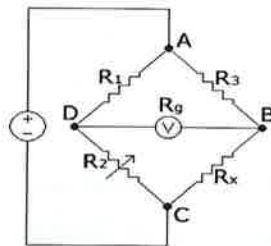


Fig. 3.22. Circuito eléctrico del puente de Wheatstone.

3.3.2.2. Velocímetro

Para la obtención de la velocidad del proyectil, se utilizan dos pares de sensores fototransmisores. Tanto el sensor transmisor como el receptor se sostienen en unos aros de plástico como se muestra en la Figura 3.23, una vez que el proyectil pasa por el haz de los sensores infrarrojos, se genera una señal y se registra en el osciloscopio. La variación en tiempo de una señal con respecto a la otra y la distancia que hay entre los pares de sensores hace posibles la medición de la velocidad del proyectil.



Fig.3.23. Velocímetro.

3.3.2.3. Amplificadores de señal y osciloscopio

La energía de una señal decae con la distancia, por lo que hay que asegurarse que la señal sea captada por el circuito del receptor. Para mantener la señal, se utilizan ya sea amplificadores o receptores, cuya función es aumentar o amplificar la magnitud de una señal (en este caso las variaciones de voltaje que salen del circuito cuarto de puente de la galga extensométrica). Para el desarrollo de las pruebas se utilizaron dos amplificadores operacionales, VISHAY 2311, los que se muestran en la Figura 3.24. Cada uno de estos conectado a un strain gage, de ellos se obtiene un voltaje de salida (ΔV_0), el cual es dado por:

$$\Delta V_0 = V_i \times A \times \frac{S_g}{4} \times \varepsilon \quad (3.35)$$

Donde V_i , A , representan el voltaje de excitación y la ganancia del amplificador, respectivamente. Una vez amplificada la señal ésta se registra mediante un osciloscopio de cuatro canales, INFINIUM DE AGILENT 54831B, el cual se muestra en la Figura 3.25, en el que se grafican los pulsos obtenidos mediante pares X-Y donde el eje horizontal (X) representa el tiempo y el eje vertical (Y) representa el voltaje.



Fig. 3.24. Amplificadores de señal.



Fig. 3.25. Osciloscopio.

3.3.3. Procesamiento de datos

Para el procesamiento de los datos se puede observar que para la determinación del esfuerzo, el strain rate y la deformación en el espécimen, ecuaciones (3.30-3.32) respectivamente, se requiere obtener el registro de la deformación de las barras con respecto al tiempo a partir de los pulsos incidente, reflejado y transmitido, ϵ_I , ϵ_R , y ϵ_T , respectivamente. La Figura 3.26 muestra las amplitudes de estos pulsos y son registrados al cruzar por la sección donde se encuentran colocados cada uno de los strain gage los cuales captan la señal, luego la envían al amplificador y posteriormente al osciloscopio. En la implementación numérica para los datos experimentales con el fin de facilitar el manejo de los datos para lograr adquirir los resultados, se desarrollo un programa por medio del software comercial MatLab®.



Fig. 3.26. Amplitudes de los pulsos ϵ_I , ϵ_R y ϵ_T .

El **Preproceso** inicia con la obtención de los registros de los pulsos obtenidos de las strain gages, ya que cada canal registra una gran serie de puntos (canal 1 pulsos incidente-reflejado, canal 2 pulso transmitido), estos datos obtenidos del osciloscopio son datos tiempo-voltaje, los cuales después de obtenerlos del osciloscopio pasan a una hoja de Excel para poder acomodar estos datos y por ultimo guardarlos como un archivo de texto (.txt) para poder cargarlos en el programa. El programa inicia con la

lectura de los archivos de texto que contienen las columnas de datos, tiempo y voltaje respectivamente. En esta etapa como primer paso se hace el filtrado de las señales, ya que los datos obtenidos del osciloscopio durante las pruebas tienen ruido, y es necesario eliminar este ruido de las señales, ver Figura 3.27(a,b). Para el filtrado de las señales se usó un filtro que ya viene establecido en programa MatLab®, este tipo de filtro es el más sencillo, ya que también se pueden usar otros tipos de filtros, como la transformada rápida de Fourier. El filtrado es necesario para disminuir los errores en la etapa de cálculo de la curva esfuerzo-deformación dinámica.

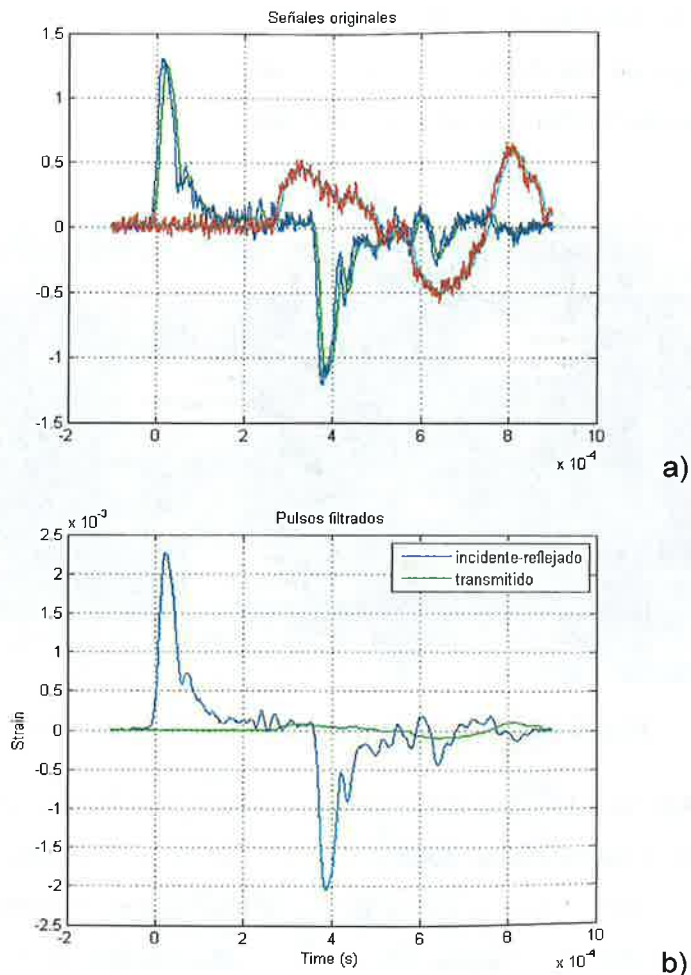


Fig. 3.27. (a) Señales originales (pulsos sin filtrar), (b) señales filtradas.

Una vez filtradas las señales, se procede a representar los valores de voltaje en unidades de deformación, esto se logra despejando ε de la ecuación (3.36):

$$\varepsilon = \frac{4}{S_g} \frac{\Delta V_0}{V_i A} \quad (3.36)$$

Donde V_i y A representan el voltaje de excitación y la ganancia del amplificador y V_0 el voltaje de salida en los strain gages.

La **Implementación Numérica** contiene las ecuaciones (3.30-3.32) las cuales representan el esfuerzo, el strain rate y la deformación, respectivamente. En el programa fue necesario hacer uso de comandos y/o funciones del software utilizado, ya que las ecuaciones implican realizar operaciones con cada uno de los datos que forman a los pulsos. Para la determinación de la deformación, se requirió hacer una integración bajo la curva del pulso reflejado con respecto al tiempo, en el desarrollo del programa esta integración se realizó empleando el método trapezoidal.

El **Postproceso** que es la parte final del procesamiento de los datos, consiste en representar y comparar gráficamente el comportamiento de los especímenes de cada ensayo realizado, bajo diferentes condiciones, esta comparación y representación es principalmente mediante las curvas esfuerzo-deformación y strain rate-tiempo.

Capítulo IV
Material y Desarrollo
Experimental

En este capítulo se analizará y explicará la metodología experimental y los procedimientos empleados en el análisis del comportamiento de los materiales utilizados en las pruebas dinámicas, en las pruebas de fatiga y en las pruebas cuasi-estáticas; así como los parámetros para llevar a cabo los procesos de soldadura.

La experimentación consistirá en obtener los especímenes soldados por los procesos TIG y FSW, caracterizar los materiales (pruebas cuasi-estáticas), aplicar fatiga para poder obtener la curva S-N de ambos especímenes obtenidos por los procesos de soldadura, aplicar pre-daño por fatiga a diferentes niveles de daño 25%, 50% y 100% del límite de fatiga. Para los especímenes pre-dañados realizar las pruebas cuasi-estáticas y las pruebas dinámicas en la Barra Hopkinson a tensión, y hacer el análisis con los datos obtenidos de los ensayos dinámicos en la Barra Hopkinson para obtener la respuesta dinámica y la curva esfuerzo-deformación dinámica de los especímenes soldados.

También se obtendrán los perfiles de microindentación, metalografías, fractografías y se calcularán los esfuerzos residuales de ambas uniones soldadas implementando el "método de contorno", en el cual se utiliza el análisis por medio de Elemento Finito.

4.1. Material

Los materiales utilizados para la experimentación son las aleaciones de aluminio 6063 6061-T6. La condición T6 consiste de un tratamiento de solución y envejecimiento artificial. La composición química de estas aleaciones fue determinada mediante un Espectrómetro de emisión de chispa Mod. Spectra 220, marca Analysis Instrument, y se muestran en las Tablas 4.1 y 4.2 respectivamente.

Tabla 4.1. Composición química de la aleación de aluminio 6063.

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Cr	Ti
0.33	0.15	0.02	0.0	0.66	0.008	0.009	0.009

Tabla 4.2. Composición química de la aleación de aluminio 6061-T6

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Cr	Ti
0.52	0.27	0.13	0.03	0.46	0.011	0.27	0.022

La aleación Al6063 fue la que se utilizó para obtener uniones soldadas por ambos procesos de soldadura y comparar las propiedades mecánicas bajo condiciones cuasi-estáticas y dinámicas, así como los perfiles de microdureza, fractografías, esfuerzos residuales.

La aleación Al6061-T6 sólo se utilizó para realizar el proceso FSW en el CIDESI, como ensayos de prueba, preliminares para en un futuro realizar este proceso de soldadura en CIDESI, y para estas uniones soldadas obtenidas se compararán solamente las propiedades mecánicas cuasi-estáticas.

4.2. Espécimen

El diseño y selección de la geometría adecuada para el espécimen fue lo primero que se hizo. Se seleccionó una sola geometría del espécimen para las diferentes pruebas a realizar: cuasi-estáticas, fatiga y dinámicas. El diseño y selección de la geometría del espécimen se basaron en la investigación bibliográfica donde usan diferentes geometrías (planas y cilíndricas) de especímenes [24, 41]. La geometría final del espécimen, que se muestra en la Figura 4.1, fue la seleccionada para realizar los diferentes ensayos.

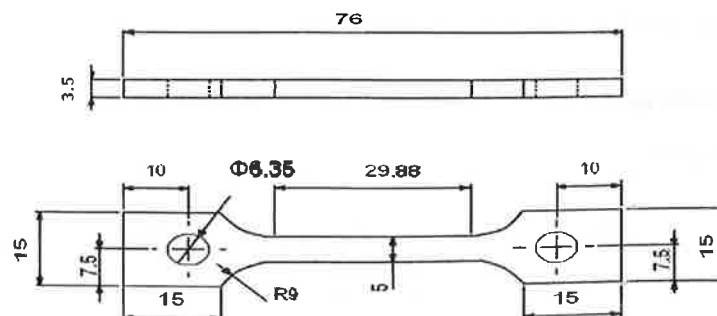


Fig. 4.1. Ilustración esquemática del espécimen usado en los ensayos cuasi-estáticos, fatiga y dinámicos. Dimensiones en mm.

Los especímenes obtenidos del centro de las placas soldadas, se maquinaron en dirección perpendicular a la soldadura en ambas placas, con el fin de que esta misma quedará a la mitad de la probeta.

4.3. Unión soldada por el proceso TIG

Para llevar a cabo la soldadura por fusión, dos placas (cada una con un bisel de 30°) a tope usando un metal de aporte ER4043. Este metal de aporte es usado para varios grados de aluminio, en la Tabla 4.3

Tabla 4.3. Composición química del metal de aporte ER4043. Clasificación y Especificación AWS [38].

Si	Mn	Ti	Cu	Fe	Zn	Be	Mg
5.0	0.05	0.20	0.30	0.80	0.10	0.0008	0.05

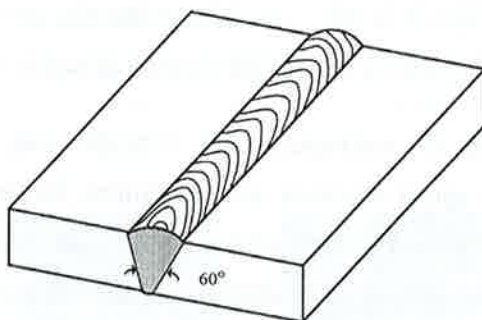


Fig. 4.2. Representación esquemática de la unión soldada.

La Figura 4.2 representa un diagrama esquemático de la configuración de la unión soldada, en la que se observa que dos placas son soldadas entre ellas con una distancia de separación de 2mm de la raíz y una ranura conjunta en forma de V formando un ángulo de 60° entre ambas placas.

4.3.1. Parámetros del proceso por fusión

La unión soldada se llevó a cabo utilizando un total de tres pasadas (dos pasadas por la cara de arriba y una pasada por la cara de abajo). En la Tabla 4.4 se presentan los parámetros adoptados para realizar la soldadura por fusión. Donde Q es calculado

mediante la ecuación (2.2). Como se mencionó anteriormente, una vez terminado el proceso de soldadura, los especímenes se obtuvieron del centro de la junta soldada cortando perpendicular a la dirección de la soldadura.

Tabla 4.4. Parámetros del proceso de soldadura TIG.

Pasada	Corriente (A)	Voltaje (V)	Electrodo	Calor generado (Q)(KJ/mm)
1	172-200	16	ER4043	1.54
2	167-180	16	ER4043	1.23
3	140-190	16	ER4043	0.97

4.4. Unión soldada por el proceso FSW

Para la aleación Al6063 la soldadura por fricción fue hecha en el ITESM Campus Querétaro, estas soldaduras se realizaron en una máquina fresadora convencional de la marca TOS OLOMOUC modelo FA 4A, con una potencia de motor de 10.2HP. En la Figura 4.3(a) se muestra la fresadora donde se realizó la soldadura por fricción.

Para la aleación Al6061-T6 la soldadura por fricción fue hecha en CIDESI, las soldaduras se realizaron de igual manera una máquina fresadora convencional de la marca ARSENAL modelo FPV 321M, con una potencia de motor de 5HP. En la Figura 4.3(b) se muestra la fresadora donde se realizó la soldadura por fricción.

La dirección de la soldadura en ambos casos coincidió con la dirección del laminado. También como para la soldadura por fusión, las probetas fueron cortadas y maquinadas perpendicular a la dirección de la soldadura.

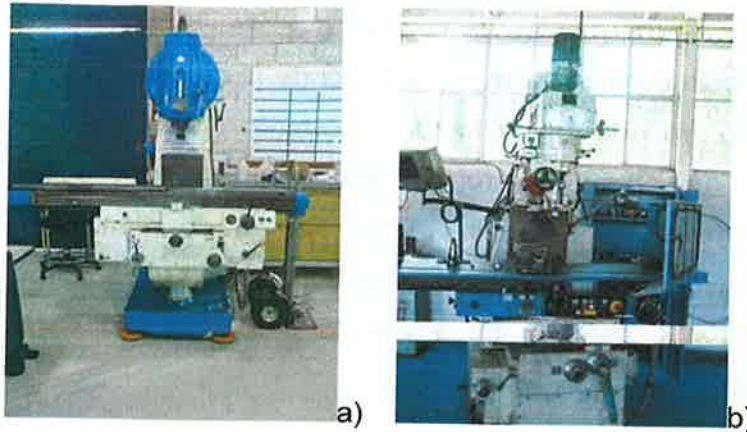


Fig. 4.3. (a) Fresadora TOS OMOLUC, (b) fresadora ARSENAL.

4.4.1. Herramienta

En el caso de las uniones soldadas de Al6063 se usó la herramienta que se muestra en la Figura 4.4. Es una herramienta con pin y hombro circulares, por cuestiones de confidencialidad solo se proporcionaron los diámetros de ambos, para poderlos mostrar como datos. El perno y el hombro cuentan con un diámetro de 8mm y 20.8mm respectivamente. El material con el que se fabricó esta herramienta es el acero AISI H13, el cual es para trabajo en caliente.



Fig. 4.4. Herramienta utilizada para hacer FSW en Al6063.

En el caso de la soldadura por fricción realizada en CIDESI en Al6061-T6, se diseñaron dos diferentes herramientas, cada una con diferente geometría. El diseño de las herramientas y la selección del material para fabricarlas se basó en la investigación bibliográfica hecha anteriormente [1,10,12,13]. En las Figuras 4.5 y 4.6 se muestran de forma esquemática los planos de las herramientas diseñadas. En la Tabla 4.5 se dan

las descripciones más importantes de las herramientas. El diseño de las herramientas se basó en la relación de diámetros, $R=D/d$, donde D es el diámetro del hombro y d el diámetro del perno, ya que es un factor importante a considerar para que la unión soldada quede sin defectos y las propiedades mecánicas no resulten tan bajas. En el caso de la herramienta A, se utilizó una relación de diámetros $R=3$, y para la herramienta B se tuvo una $R=2.35$. El material con el que se fabricaron las herramientas fue un acero AISI M2, este es un acero de alta velocidad o rápido y tiene alta resistencia al desgaste.

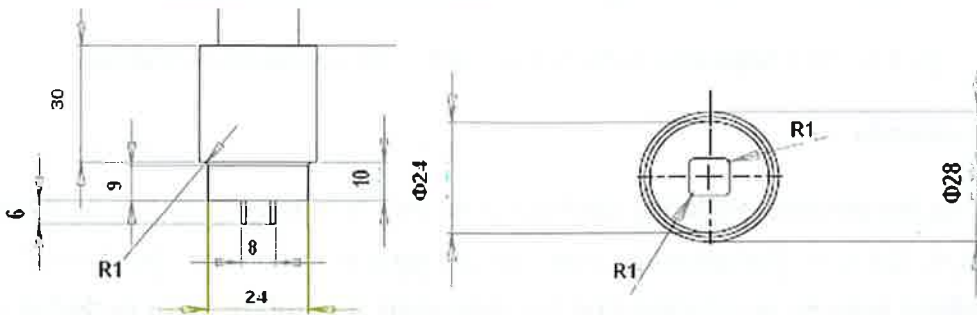


Fig. 4.5. Herramienta A para FSW CIDESI. Dimensiones en mm.

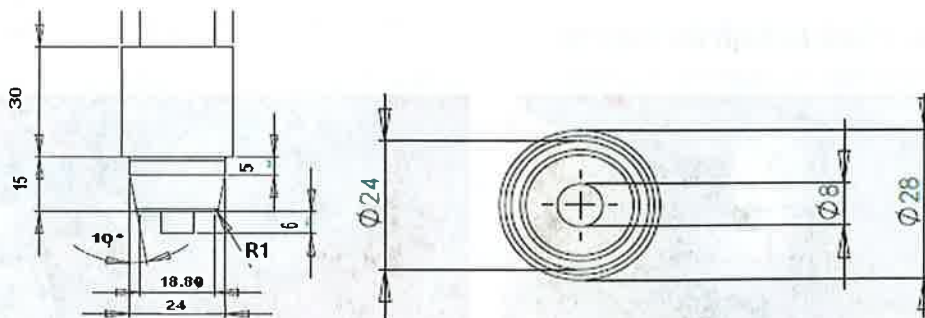


Fig. 4.6. Herramienta B para FSW CIDESI. Dimensiones en mm.

Tabla 4.5. Características principales de las herramientas para FSW en CIDESI.

Herramienta	Perno	Diámetro perno (mm)	Longitud perno (mm)	Hombro	Diámetro hombro (mm)
A	Cuadrado	8	6	Circular	24
B	Circular	8	6	Cóncavo	18.8

4.4.2. Selección de los parámetros para el proceso FSW

La selección de los parámetros para realizar el proceso de soldadura por fricción son muy importantes, tales son la velocidad de avance y la velocidad de rotación de la herramienta. En el caso para la aleación Al6063 la soldadura por fricción se realizó con una velocidad de avance de $80\text{mm}/\text{min}$ y una velocidad de rotación de 1000rpm , y una penetración del pin sobre las piezas de trabajo de 5.5mm ; en este caso la soldadura se llevó a cabo sin inclinación del cabezal donde se coloca la herramienta ($\theta=0^\circ$). Para este proceso en la herramienta se generó un torque $M= 72.663\text{Nm}$. La fuerza de penetración de la herramienta en las piezas de trabajo no se pudo obtener, en mucha de la bibliografía revisada, usan dinamómetros para la medición de dicha fuerza. Se consiguió un dinamómetro de 2kgf de capacidad, pero no fue posible emplearlo.

Para la soldadura por fricción llevada a cabo en CIDESI, se realizaron diferentes soldaduras variando los parámetros del proceso y usando ambas herramientas diseñadas, A y B, que se muestran en la Figura 4.7. En la Tabla 4.6 se muestran los parámetros empleados para las diferentes soldaduras hechas en CIDESI usando las herramientas A y B. Con cada herramienta se soldaron 4 pares de placa (A-D), usando la misma nomenclatura para cada par de placas soldadas con los mismos parámetros pero diferente herramienta. La selección de los parámetros usados, se basó en los procesos de soldadura realizados en el ITESM, y en la revisión bibliográfica [8,9,12,13]. Por ejemplo, en la mayoría de artículos, publicaciones, se recomienda una inclinación del cabezal entre 2° y 4° , esto con el propósito de que la soldadura sea perfecta y no se presenten imperfecciones, tales como poros.

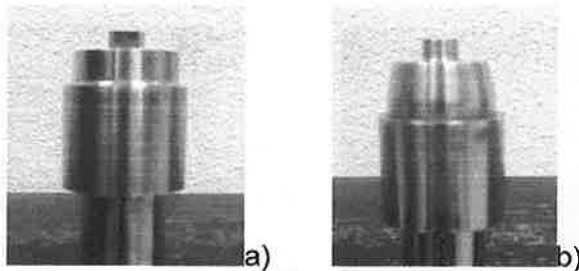


Fig. 4.7. Herramientas utilizadas para FSW en CIDESI. (a) perno cuadrado, (b) perno circular.

Tabla 4.6. Parámetros empleados en las soldaduras hechas en CIDESI, usando las herramientas A y B.

Soldadura	Velocidad avance, v (mm/min)	Velocidad rotación, ω (rpm)	Penetración perno (mm)	Inclinación cabezal, θ (°)	Torque generado en hta., M (Nm)
A	32	1400	6	2	25.442
B	32	1200	6	2	29.682
C	32	1000	6	2	35.619
D	32	1400	6	0	25.442

El torque M fue medido y calculado por medio de la potencia de la máquina fresadora (P) y la velocidad de rotación de la herramienta (ω), a través de la formula $P=\omega M$.

4.5. Pruebas cuasi-estáticas

Las pruebas cuasi-estáticas a tensión para caracterizar los materiales obteniendo las propiedades mecánicas de estos, se hicieron en una máquina universal servo hidráulica MTS 810, la cual tiene una capacidad de hasta 100kN (10 toneladas), para obtener la deformación de las probetas se usó un extensómetro marca MTS, modelo 634.11F-25. En la Figura 4.8(a) se muestra una imagen completa la máquina MTS 810 y en (b) la probeta montada con el extensómetro puesto. Las pruebas se realizaron aplicando una carga monotónica a una velocidad constante de 1 mm/min.

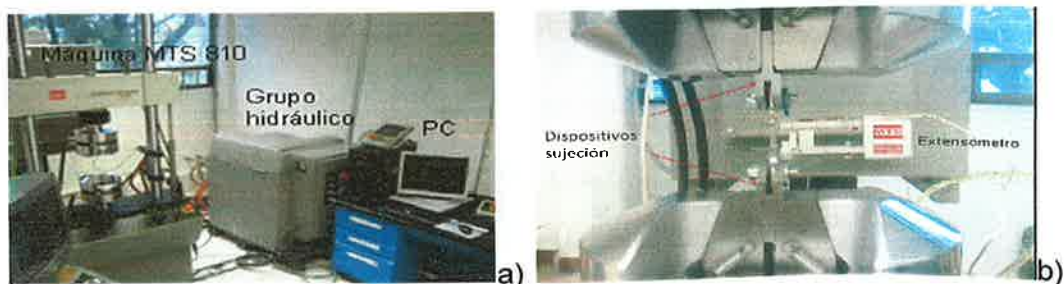


Fig. 4.8. (a) Máquina MTS 810, y (b) probeta con extensómetro puesto.

Para que las probetas pudieran ser ensayadas en la MTS se diseñó y fabricó un dispositivo que se adaptará a los grips de la máquina y permitiera ensayar las probetas a tensión y a fatiga, el dispositivo se muestra en la Figura 4.8(b). En la Figura 4.9 se muestran las probetas ensayadas a tensión en la MTS.

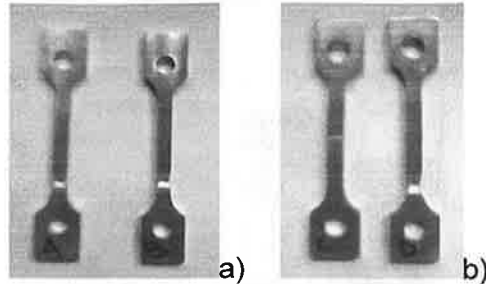


Fig. 4.9. Probetas ensayadas a tensión en la MTS, (a) material base,(b) unión soldada.

Para determinar el módulo de elasticidad se calculó la pendiente de la parte lineal del diagrama o curva esfuerzo-deformación obtenido; esto es, desde el primer punto donde se empieza aplicar carga hasta antes donde el material empieza a ceder. Y para determinar el esfuerzo de fluencia se usó el método de la línea compensada (0.2%).

4.6. Pruebas de fatiga

Para poder aplicar pre-daño o prefatigar a un material, primero es necesario determinar el límite de fatiga, y una vez conocido este límite, a las probetas a ser ensayadas se les aplica un porcentaje del número del número de ciclos del límite de fatiga. En este trabajo, el daño por fatiga solo fue inducido en los especímenes de FSW ya que, como se mostrará más adelante, las probetas de TIG exhibieron una dispersión significativa de la resistencia a la fatiga, debido a la presencia de defectos en la unión soldada, por consiguiente, no se pudo obtener la curva S-N y tampoco el Límite de Fatiga de las probetas TIG.

Las pruebas de fatiga por control de esfuerzo realizadas en la máquina MTS 810 en las probetas de FSW se aplicó una carga cíclica de amplitud constante con una forma de onda senoidal a una frecuencia de 35 Hz. Para las pruebas de fatiga y pre-daño en las probetas de FSW se usó una razón de esfuerzos de $R=\sigma_{min}/\sigma_{max}=0.2$. La carga cíclica

aplicada a las probetas FSW fue entre $\sigma_{\min}=17.1$ MPa y $\sigma_{\max}=85.6$ MPa. El daño por fatiga fue inducido a las probetas a diferentes niveles de daño, 250 000, 500 000 y 1 000 000 de ciclos. Se aplicaron estos niveles de daño debido a que no se obtuvo el límite de fatiga, porque las probetas ensayadas para encontrar este límite, rebasaron el 1 000 000 de ciclos. En la Figura 4.10 se muestra la probeta montada para la prueba de fatiga.



Fig. 4.10. Probeta montada para ensayo de fatiga.

4.7. Ensayos dinámicos

Los ensayos dinámicos se realizaron mediante la barra Hopkinson, para ésto, las barras (incidente y transmitida) tuvieron que ser maquinadas en un extremo para que las probetas de forma rectangular pudieran ser colocadas entre ambas barras y poder ser ensayadas a tensión; la Figura 4.11 muestra la forma final en los extremos de las barras donde se colocan las probetas. La probeta se coloca en cada extremo de las barras, como se muestra en la Figura 4.12, se sujeta y alinea por medio de un tornillo que traspasa el diámetro de las barras y a la probeta.



Fig. 4.11. Forma final de los extremos de las barras.

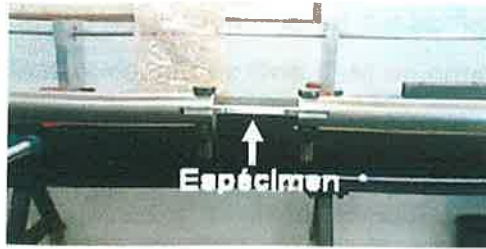


Fig. 4.12. Probeta colocada y sujeta en las barras.

Una vez que la probeta se coloca (sujeta y alineada), se dispara el proyectil que impacta el tope colocado en el extremo final de la barra incidente, provocando un pulso a tensión que se propaga a través de la barra que llega hasta la frontera con la probeta y a través de esta pasa y se propaga en la barra transmitida. El resto del pulso se refleja en la barra incidente como un pulso a compresión. La Figura 4.13 muestra los pulsos obtenidos en una probeta TIG y en una probeta FSW. Las pruebas se realizaron a diferentes velocidades de impacto del proyectil, lo que hace que cambie la velocidad de aplicación de cargas sobre el espécimen. Las velocidades de impacto del proyectil que se aplicaron fueron 15 m/s, 18 m/s, 25 m/s.

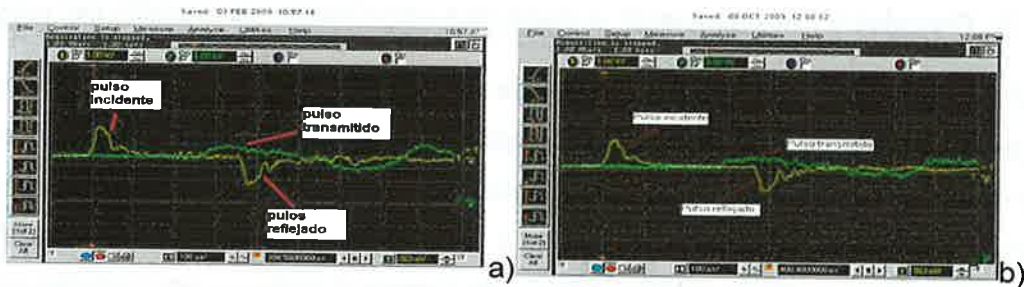


Fig. 4.13. Pulsos de las probetas (a) TIG y (b) FSW obtenidos a una velocidad de impacto del proyectil de 15m/s.

En las Figuras 4.14 y 4.15 se muestran las probetas tanto TIG como FSW, ensayadas en la barra Hopkinson a diferentes velocidades de impacto del proyectil.

Una vez realizada la prueba, los datos obtenidos que proporciona el osciloscopio son recopilados para tratarlos y procesarlos en el programa desarrollado en MatLab. En el

Apéndice A se da el “set up” de los amplificadores de señal de cada barra, el “set up” del osciloscopio; y el programa de MatLab® se muestra en el Apéndice B.

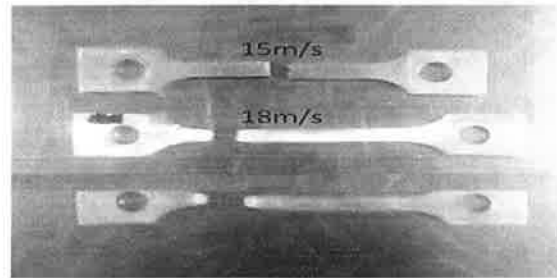


Fig. 4.14. Probetas TIG ensayadas a diferentes velocidades de impacto del proyectil.

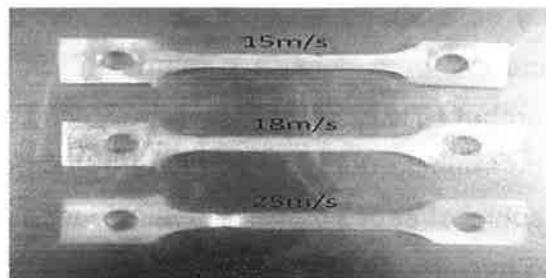
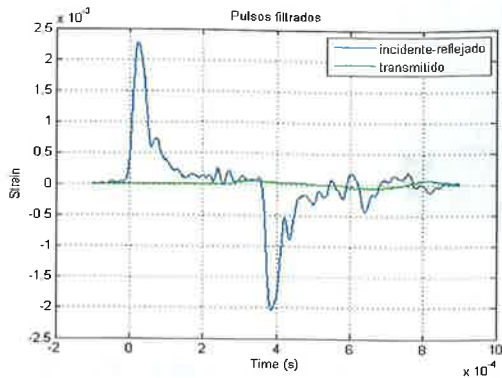
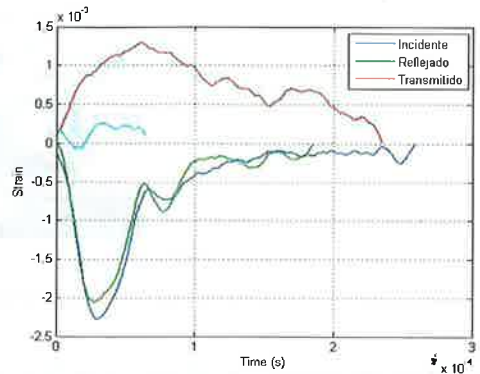


Fig. 4.15. Probetas FSW ensayadas a diferentes velocidades de impacto del proyectil.

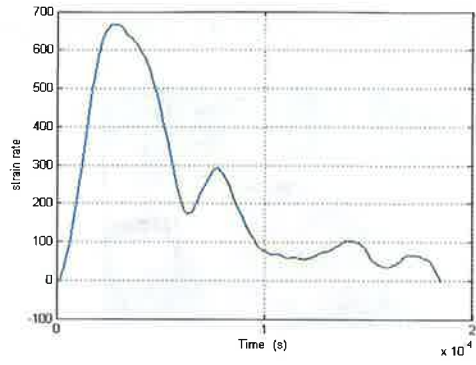
En el programa los datos son filtrados para eliminar el ruido y la dispersión que se pueda generar en la prueba, como se muestra en la Figura 4.16(a), también como se mencionó en capítulo anterior, en el programa los datos son transformados de voltaje a deformación. Después, se llevan los datos a un tiempo $t=0$, es decir, aquí se trata de acomodar el inicio de cada pulso a cero, ver Figura 4.16(b), y por consiguiente, de manera automática la gráfica strain rate-tiempo, ver Figura 4.16(c) es llevada a $t=0$. Y una vez que los datos son reacomodados en $t=0$, en el programa se determinan los historiales de carga que afectan a las probetas a través del tiempo de incidencia de la carga, esto es, obteniendo la curva esfuerzo-deformación dinámica de cada probeta ensayada.



a)



b)



c)

Fig. 4.16. Gráficas obtenidas por el procesamiento de datos en el programa de MatLab®. (a) Pulsos filtrados, (b) reacomodo de datos en t=0, y (c) strain rate-tiempo llevado a t=0.

4.8. Microindentación

La medición del perfil de microindentación se hizo en un Microindentador de la marca FUTURE-TECH, modelo FM-7 que se muestra en la Figura 4.17. La medición del perfil se midió en dirección perpendicular a la soldadura, se preparó una muestra de cada unión soldada para la medición de la microdureza. Se aplicó una carga de 100 gf y un tiempo de 11s para cada muestra.



Fig. 4.17. Microindentedor FUTURE-TECH.

Las muestras se prepararon en una Montadora de la marca Leco, modelo PR-32, que se muestra en la Figura 4.18. Una vez que se obtiene las muestras, pasan por todo un proceso de pulido, para dejar las piezas con un acabado espejo y poder ser medidas.



Fig. 4.18. Montadora Leco.

4.9. Metalografías

De las mismas muestras preparadas para la medición del perfil de microdureza, una vez realizadas las mediciones en ambas, las muestras se vuelven a pulir hasta lograr el acabado espejo y que no tengan rayas para que puedan ser observadas en los microscopios. El reactivo químico que se utilizó para revelar las diferentes zonas en la unión soldada que se generaron por los procesos fue HF (ácido fluorhídrico, 1 ml HF, 20 ml H₂O). Mediante un Estereoscopio de la marca Leica, modelo Z30V, que se muestra en la Figura 4.19, se observaron las diferentes zonas reveladas en ambas muestras.



4.19. Estereoscopio Leica Zoom 2000.

4.10. Fractografías

Las fractografías de la superficie de fractura de las especímenes ensayados en la Barra Hopkinson fueron obtenidas mediante un Microscopio Electrónico de Barrido (SEM, por sus siglas en inglés). A través de las fractografías se pueden observar los diferentes modos o mecanismos de fallas por los que una pieza, probeta, etc., pueden fallar y fracturarse.

4.11. Medición de esfuerzos residuales

Los esfuerzos residuales se midieron en la dirección longitudinal en ambas muestras (TIG y FSW) mediante el método de contorno. Esto se llevó a cabo cortando las muestras a lo largo del plano de medición mediante una electroerosionadora de hilo. Antes de que las muestras fueran cortadas, se fijaron a una placa de soporte rígido para minimizar el movimiento de estas durante el proceso. La forma de la superficie deformada, resultante de la relajación de los esfuerzos residuales, se midió en la superficie de corte mediante una máquina de coordenadas [39]. En la Figura 4.20 se muestran de forma esquemática los planos como fue medida la superficie cortada en la máquina de coordenadas.

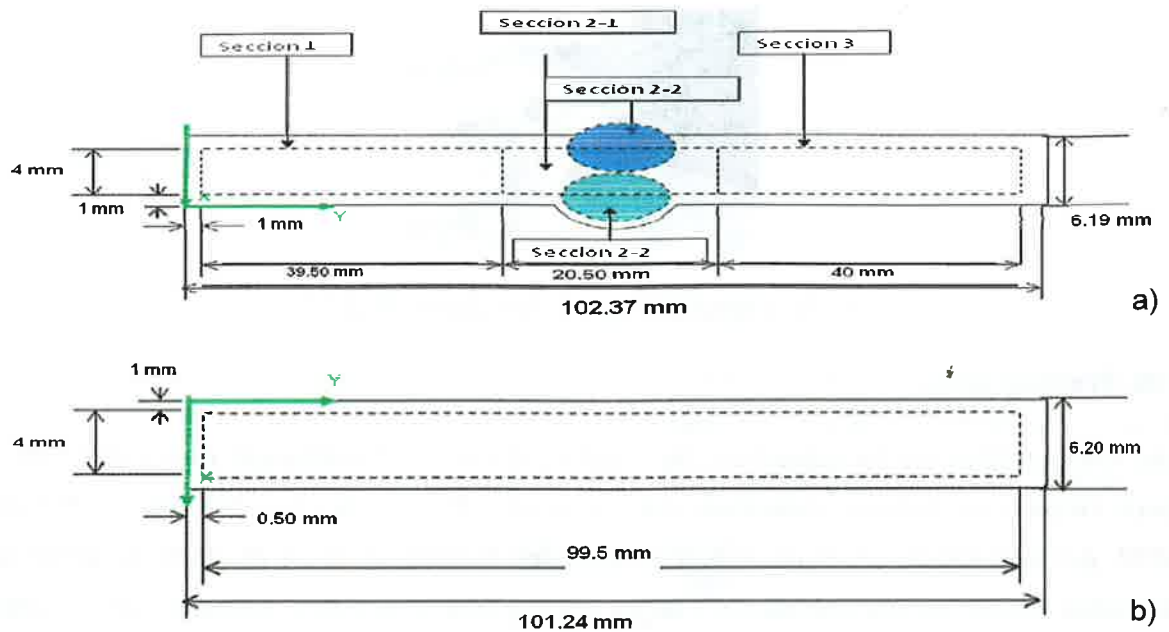


Fig. 4.20. Representación esquemática de la superficie cortada medida en la máquina de coordenadas. (a) Muestra TIG, (b) muestra FSW.

4.11.1. Método de contorno

El método de contorno, es un nuevo y poderoso método para la medición de esfuerzos residuales en soldaduras [18,19,20,39]. En el Apéndice C se muestran los programas, desarrollados en MatLab®, para cada unión soldada (TIG y FSW). De los datos obtenidos (x,y,z) de la superficie cortada y medida en la máquina de coordenadas, se organizan y acomodan en Excel, después de que son acomodados, se guardan como archivo .csv, de aquí se abren en una hoja de texto y se guardan finalmente como archivo .txt, el cual se carga en el programa. También se carga otro archivo de texto con el número de nodos de la superficie (el mallado), en este caso, en el programa el mallado de la superficie fue de "x" 199 nodos y en "y" 25 nodos. En la primera parte del programa se genera la superficie deformada de la muestra, la cual sufre cierta deformación y/o distorsión durante el proceso de soldadura, la superficie es generada a través de los archivos de texto cargados.

Esta primera parte incluye el mallado y suavizado de la superficie. En el suavizado de la superficie se eliminan todos los picos de la superficie original, es decir, se suaviza y se

hace más fina. En este caso, el suavizado de la superficie se hizo utilizando una aproximación cuadrática, mediante el uso de "splines". La finura del mallado y suavizado de la superficie también depende de la densidad de puntos de la nube, es decir, entre más densa sea la nube de puntos, más fino es el mallado y el suavizado de la superficie. Como se mencionó anteriormente la densidad de la nube de puntos fue (199, 25).

En la segunda parte del programa se generan los desplazamientos de la superficie los cuales son guardados en una hoja de Excel, estos desplazamientos más adelante son agregados a ANSYS®. Los desplazamientos son generados a través de un código introducido en el programa, éste código incluye códigos de ANSYS® con el fin de que los desplazamientos se pueden agregar para el análisis de los esfuerzos residuales en el elemento finito.

4.11.2. Elemento Finito

El Método de Elemento Finito (MEF) es uno de los pocos métodos prácticos para realizar análisis de estructura y modelos tridimensionales. El análisis de modelos en 3D conlleva un mayor uso de recursos computacionales y toma mayor cantidad de tiempo que un análisis bidimensional; por esto, resulta importante simplificar al máximo el análisis que se realiza por Elemento Finito. El punto de partida del MEF es la subdivisión en sub dominios pequeños llamados elementos. Las formas básicas de los elementos para modelado en 3D son el tetraedro y el hexaedro.

Para éste análisis se utilizó un elemento SOLID45, el cual se utiliza en la discretización de elementos tridimensionales. Éste elemento se define a partir de ocho nodos, cada uno de los nodos tiene tres grados de libertad, que corresponden a las tres direcciones de los desplazamientos.

Para el cálculo de los esfuerzos residuales se consideró un análisis estructural, con el cual se determinará la distribución de esfuerzos bajo la aplicación de los desplazamientos generados previamente en el programa de MatLab®. Para el análisis se consideró un material isotrópico y linealmente elástico. Las propiedades mecánicas utilizadas para el análisis se muestran en la Tabla 4.7. Se puede observar, en la Tabla

4.7, que la muestra TIG tiene un módulo de elasticidad diferente a la muestra FSW. Estos valores del módulo de elasticidad de ambas muestras, empleados en el análisis para el cálculo de los esfuerzos residuales, fueron obtenidos al caracterizar ambas uniones soldadas mediante las pruebas cuasi-estáticas realizadas, mientras que Poisson se tomó el valor común para los aceros.

Tabla 4.7. Propiedades mecánicas de las muestras TIG y FSW utilizadas para el análisis de los esfuerzos residuales.

Muestra	TIG	FSW
Módulo de elasticidad, E (GPa)	58.8	62
Módulo de Poisson, ν	0.3	0.3

Después de haberse elegido el tipo elemento, definirse las propiedades mecánicas del material, se procedió a generar la geometría. Se generó un rectángulo con las dimensiones de 99.5x4mm, estas dimensiones son obtenidas de los planos de la Figura 4.20, las cuales representan las superficies medidas por la máquina de coordenadas. Después de generarse el área del rectángulo, se hizo un extruido de 2mm en dirección normal a la cara de éste.

Una vez hecha la geometría, se realizó el mallado en la pieza, como se muestra en la Figura 4.21. El mallado se realizó de la siguiente manera: 199 divisiones en las líneas superior e inferior del rectángulo, 25 divisiones en las líneas laterales del rectángulo, y elementos de 1mm en las líneas del extruido generado. Ya que se hizo el mallado a la pieza, se seleccionó la cara frontal para ver la numeración de todos los nodos generados por el mallado. Entonces, los números de los nodos de esa área, se pasaron a una hoja de Excel (acomodados por filas y columnas) para que se generara el archivo de texto con el nombre de Nodos que es cargado en el programa de MatLab®.

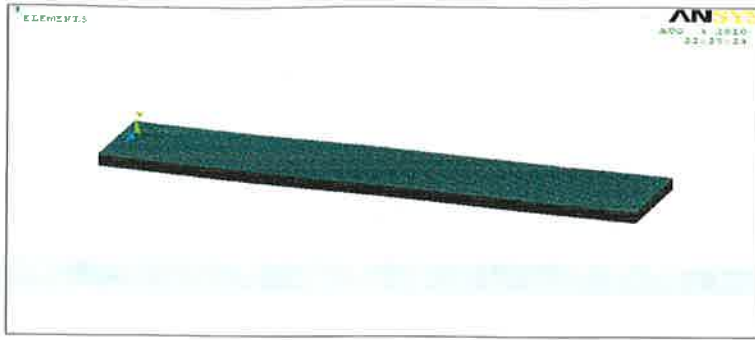


Fig. 4.21. Mallado de la pieza en ANSYS® para el análisis de los esfuerzos residuales.

Posteriormente, todo lo hecho en ANSYS® (tipo de elemento, propiedades mecánicas, geometría, mallado) se guardó como archivo .log, para después pegar en el archivo el código de los desplazamientos generados en MatLab.

Una vez copiado el código de los desplazamientos, se abrió un nuevo archivo en ANSYS® y se cargó el archivo .log ya con los desplazamientos. En la Figura 4.22 se muestran los desplazamientos aplicados en la cara frontal de la pieza. Esta cara frontal es la superficie cortada por hilo y también la superficie medida por la máquina de coordenadas. Se aplicaron restricciones a la cara de atrás, la cual es paralela a la cara donde aplicaron los desplazamientos. Las restricciones aplicadas a esta cara fueron los desplazamientos en todas las direcciones (x,y,z). Después se procedió a la etapa de solución y posteriormente el postprocesamiento para ver los resultados del análisis ejecutado. En el Apéndice D se muestra el programa de ANSYS® para el cálculo de los esfuerzos residuales.

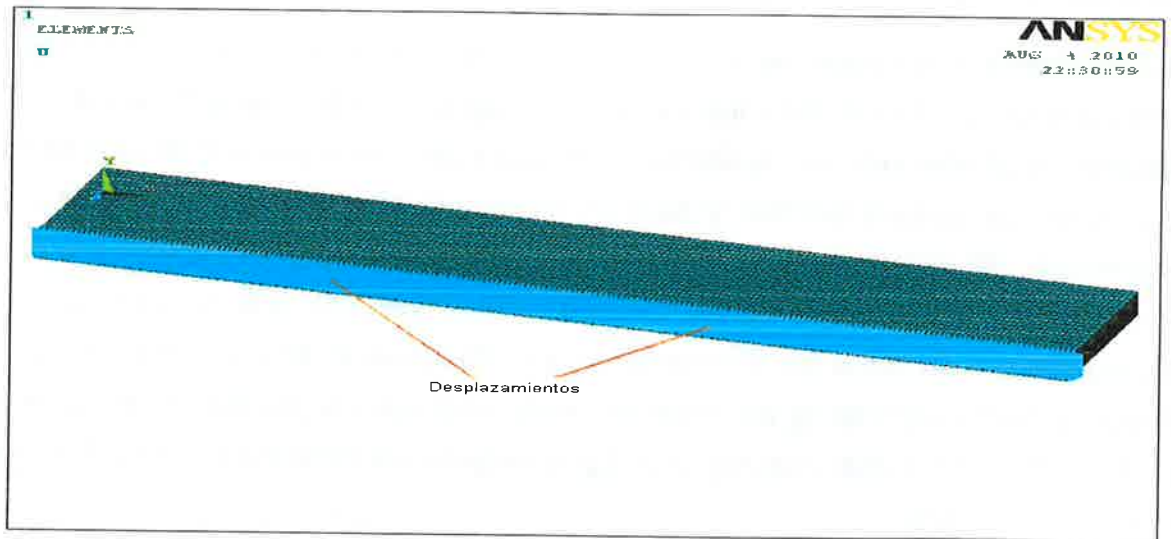
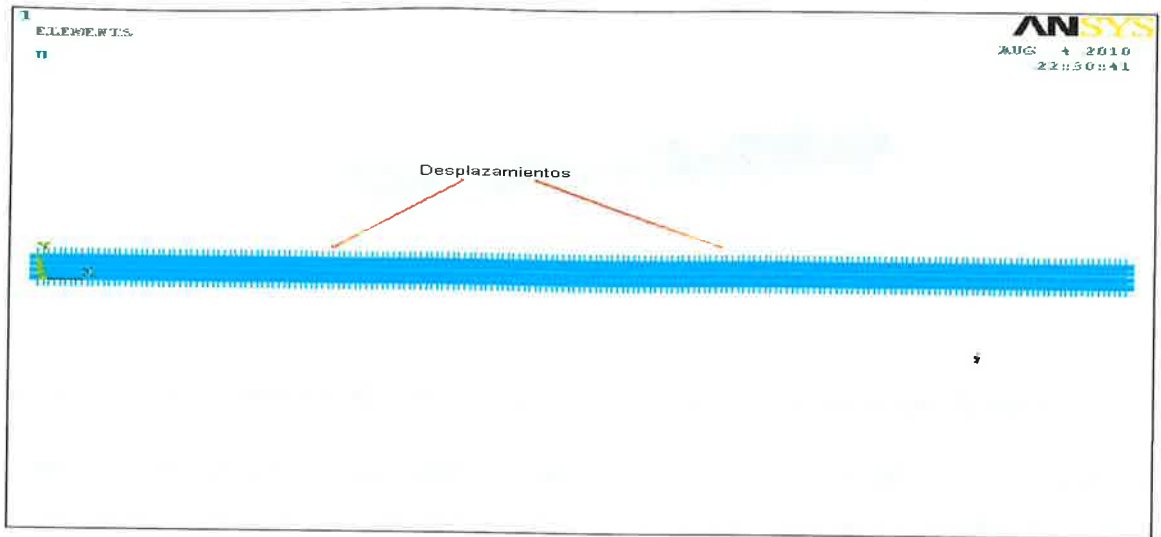


Fig. 4.22. Desplazamientos generados en MatLab®, inducidos en ANSYS®, para el análisis de los esfuerzos residuales.

Capítulo V

Resultados Experimentales

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos de las pruebas experimentales, así como la comparación de las propiedades mecánicas cuasi-estáticas, dinámicas, fatiga, microindentación, esfuerzos residuales, de las uniones soldadas por los procesos TIG y FSW de la aleación Al6063. Después de mostrar los resultados de la comparación de las uniones soldadas por ambos procesos de la aleación Al6063, se muestran los resultados obtenidos de las propiedades mecánicas cuasi-estáticas, microdureza y metalografías de las uniones soldadas por fricción de la aleación Al6061-T6 realizadas en CIDESI.

5.1. Pruebas cuasi-estáticas

Las pruebas cuasi-estáticas de tensión se realizaron en especímenes obtenidos de las uniones soldadas por fusión y fricción de Al6063. Las curvas esfuerzo-deformación se muestran a continuación. Propiedades importantes tales como el módulo de Young, esfuerzo de fluencia y esfuerzo último, son obtenidos de estas curvas.

5.1.1. Especímenes sin daño por fatiga

En la Figura 5.1 se muestra la comparación de las curvas esfuerzo-deformación de las uniones soldadas respecto con el material base, ambos especímenes libres de daño. Se puede observar que las propiedades del material base son más altas que la de las uniones soldadas, en la Tabla 5.1 se muestran las propiedades obtenidas de las pruebas cuasi-estáticas para ambos especímenes.

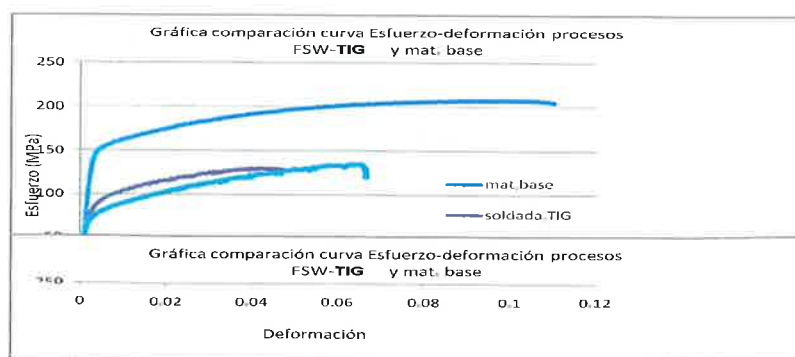


Fig. 5.1. Curvas esfuerzo-deformación cuasi-estáticas material base y uniones soldadas, Al6063.

Tabla 5.1. Propiedades mecánicas cuasi-estáticas sin daño, Al6063.

	Material base	Unión TIG	Unión FSW
Módulo de Young, E(GPa)	59.2	58.8	62
Esfuerzo de fluencia (MPa)	151.7	86.7	74.5
Esfuerzo último (MPa)	208	130.2	135.2

El esfuerzo último de las uniones soldadas TIG y FSW es alrededor del 62% y 65%, el esfuerzo de fluencia es alrededor de 57% y 49%, respectivamente de la medida en el material base. También se observa en la Figura 5.1 que la unión soldada FSW permite más deformación plástica que la unión soldada TIG, la deformación última de la unión FSW antes del punto de ruptura es alrededor de un 38% mayor que es espécimen TIG.

5.1.2. Especímenes con daño por fatiga

En la Figura 5.2 se puede observar que las uniones soldadas TIG presentan defectos que afectan a la fatiga. Por esa razón, el daño por fatiga solo fue inducido en especímenes de FSW.

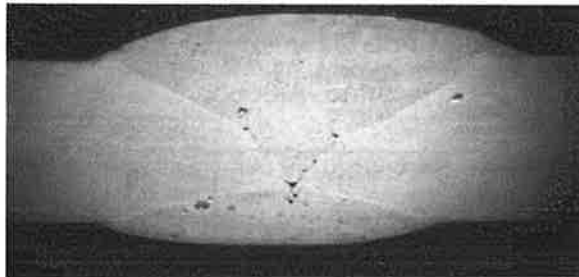


Fig. 5.2. Fotografía de la sección transversal de la unión TIG mostrando poros.

La Figura 5.3 muestra las curvas esfuerzo-deformación cuasi-estáticas de las uniones soldadas FSW para diferente nivel de daño por fatiga. La curva esfuerzo-deformación libre de daño de la unión FSW es incluida para la comparación. Se aplicaron diferentes números de ciclos para inducir el daño por fatiga, 250 000, 500 000, 1 000 000. De los

resultados es posible observar un efecto no significativo del daño previo por fatiga en la respuesta esfuerzo-deformación cuasi-estática a tensión de los especímenes de FSW.

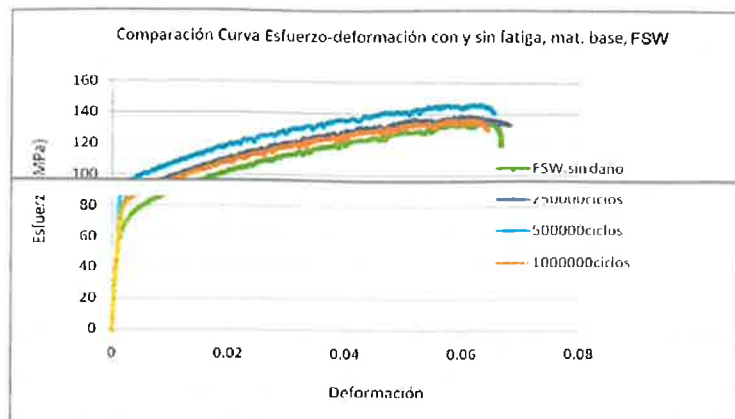


Fig. 5.3. Curva esfuerzo-deformación cuasi-estáticas con daño y sin daño de especímenes FSW, Al6063.

La comparación de las propiedades mecánicas con 1 000 000 de ciclos de carga por fatiga con las uniones libres de daño se observa que el esfuerzo de fluencia es 12% más alto, mientras el módulo de Young y esfuerzo último son los mismos. En la Tabla 5.2 se muestran las propiedades mecánicas de las uniones sin y con daño previo por fatiga.

Tabla 5.2. Propiedades mecánicas de las uniones FSW. Condición cuasi-estática con daño, Al6063.

	Sin daño	250 000 ciclos	500 000 ciclos	1 000 000 ciclos
Módulo de Young, E(GPa)	62	58	71	61
Esfuerzo de fluencia (MPa)	74.5	88.6	95.8	86
Esfuerzo último (MPa)	135.2	138.7	146.6	136.3

Se puede observar que la estabilidad de las propiedades mecánicas cuasi-estáticas a diferente nivel de daño por fatiga mejora el comportamiento de esta unión soldada

(estructura soldada) y el proceso de soldadura por fricción. También se nota que los especímenes con un daño previo por fatiga permiten la misma deformación plástica que los especímenes libres de daño.

5.2. Pruebas de fatiga por control de esfuerzo

Las pruebas de fatiga por control de esfuerzo se aplicó a los especímenes de TIG y FSW. Como se puede observar en la Figura 5.2, la soldadura TIG presentó defectos, por lo cual estas muestras exhibieron una dispersión significativa de la resistencia a la fatiga, y como consecuencia no se pudo obtener la curva S-N y tampoco se les aplicó daño por fatiga.

En el caso de los especímenes FSW, tampoco se obtuvo la curva S-N, debido a que los especímenes ensayados llegaron al 1 000 000 de ciclos. Como se mencionó anteriormente, las especímenes FSW si fueron dañados por fatiga aplicando 250 000, 500 000 y 1 000 000 de ciclos.

Para las pruebas de fatiga en ambas uniones soldadas se uso un $R=0.2$. Para los especímenes FSW la carga aplicada fue entre $\sigma_{\min}=17.1\text{MPa}$ y $\sigma_{\max}=85.6\text{MPa}$; y para los especímenes TIG la carga aplicada fue entre $\sigma_{\min}=19.55\text{MPa}$ y $\sigma_{\max}=97.75\text{MPa}$.

5.3. Ensayos dinámicos

Mediante el uso de la barra Hopkinson, se obtuvieron las curvas dinámicas esfuerzo-deformación para los especímenes de TIG y FSW sin daño previo por fatiga, como se muestran en la Figura 5.4. Las curvas esfuerzo-deformación cuasi-estáticas fueron incluidas para la comparación. Los especímenes fueron ensayados a tres velocidades de proyectil diferentes, 15 m/s, 18 m/s y 25 m/s.

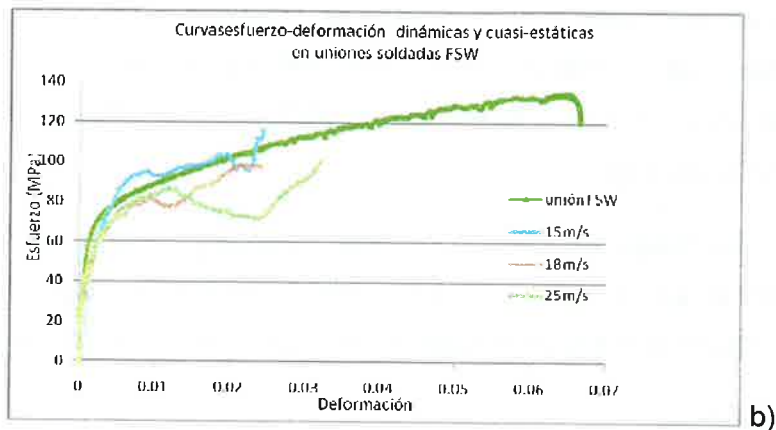
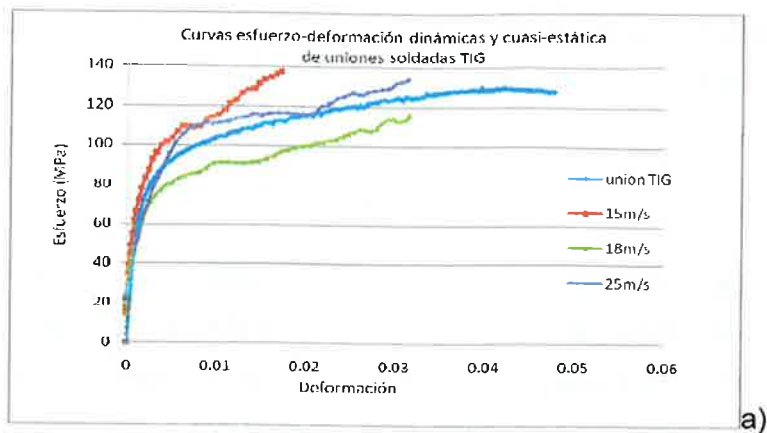


Fig. 5.4. Curvas dinámicas esfuerzo-deformación de (a) uniones TIG y (b) uniones FSW a diferentes velocidades de deformación, Al6063. En ambos casos las probetas están libres de daño.

En la comparación de las curvas esfuerzo-deformación de la Figura 5.4(a) para especímenes TIG no se observa mucha diferencia entre ellos; es decir, las uniones soldadas no son afectadas significativamente por las altas velocidades de deformación. De igual manera, para los especímenes FSW, no se observa ningún efecto significativo por las altas velocidades de deformación, como se muestra en la Figura 5.4(b); es decir, las uniones soldadas no son afectadas significativamente por altas velocidades de deformación. El comportamiento exhibido por las uniones soldadas de aluminio

obtenidas por ambos procesos de soldadura, TIG y FSW, esta en concordancia con la bien conocida para los especímenes de aluminio monolítico.

5.4. Perfiles de microindentación

Las Figuras 5.5 y 5.6 muestran los perfiles de microindentación realizados en las uniones soldadas TIG y FSW, respectivamente. La Figura 5.5(a) presenta la sección transversal de la unión y la línea amarilla dibujada indica la ruta seguida para la medición de la microindentación de la soldadura por fusión. El metal soldado (MS) presentó valores bajos de dureza, sobre 50HV. La dureza incrementó en la zona afectada por el calor (ZAC) alcanzando valores alrededor de 65HV. Lejos de la zona afectada por el calor, la dureza alcanzó 60HV en el material base. La Figura 5.5(b) presenta el perfil de microdureza de la muestra TIG.

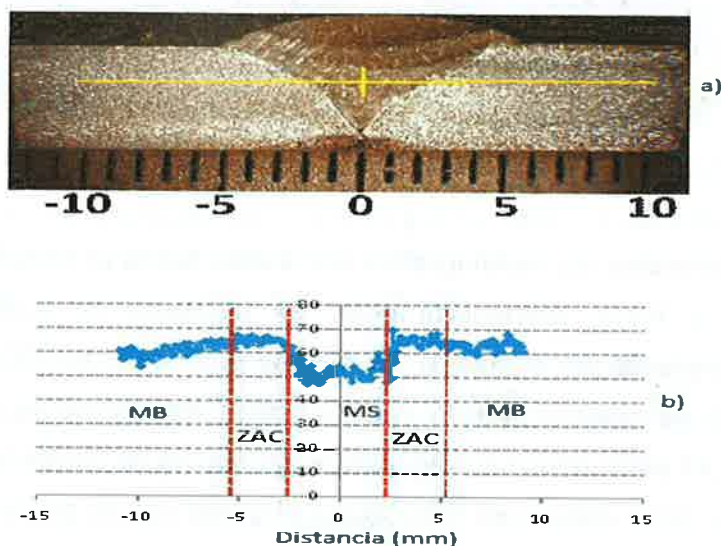


Fig. 5.5. Perfil de microindentación de la union soldada TIG.

La Figura 5.6(a) presenta la sección transversal de la unión soldada por fricción. Al igual que en la figura anterior, la línea amarilla dibujada indica la ruta seguida para la medición de la microdureza. El perfil de microindentación mostrado en la Figura 5.6(b) no indica una gran diferencia de la microdureza a lo largo de las diferentes regiones de

la union soldada, alcanzando valores entre 55HV y 60HV en la mayor parte de la sección transversal.

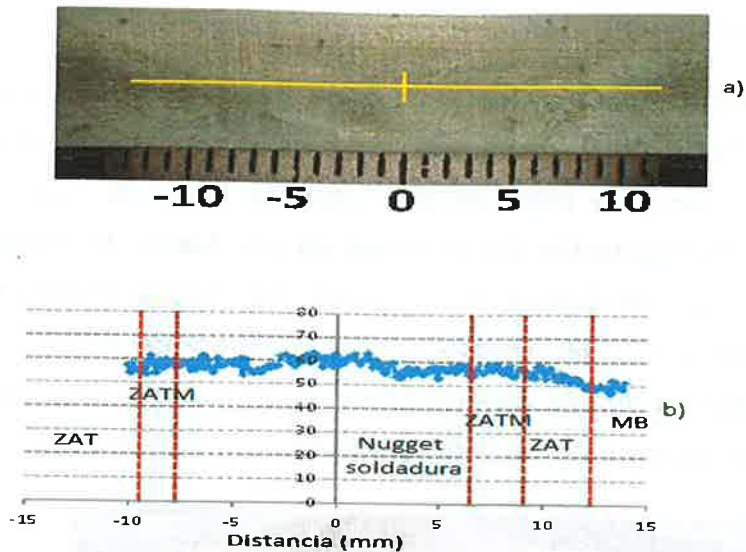


Fig. 5.6. Perfil de microdureza de la union soldada FSW.

5.5. Metalografías

La Figura 5.7(a-b) muestra las metalografías realizadas sobre la sección transversal de las muestras TIG y FSW, respectivamente. En la figura se puede observar las diferentes zonas reveladas por el ataque. En el caso de la muestra TIG, que se muestra en la Figura 5.7(a), se observa que la zona afectada termicamente (ZAT) o también zona afectada por el calor (ZAC) se encuentra en las áreas formadas por las líneas rojas, la cual se identifico porque en esas áreas el grano era un poco más brillante. En la Figura 5.7(a) tambien se muestra el metal soldado y el material base. En el caso de la muestra FSW, que se muestra en la Figura 5.7(b), en la parte central, aunque no está bien definido, se puede observar el “nugget” que es formado por la herramienta durante el proceso. También se observa la zona afectada termomecánicamente (ZATM) y la zona afectada termicamente (ZAT), esta última se encuentra en el área más pequeña creada por las líneas rojas. La ZAT se identifica porque se localiza despues de la ZATM y también porque el color de los granos en esa zona es más oscuro, como color café. La ZATM se puede identificar puesto que es la transición entre la zona del “nugget” y el

material base, las líneas rojas marcan esa transición, la división del “nugget” y el metal soldado con la ZATM, como se puede ver en la Figura 5.7(b).

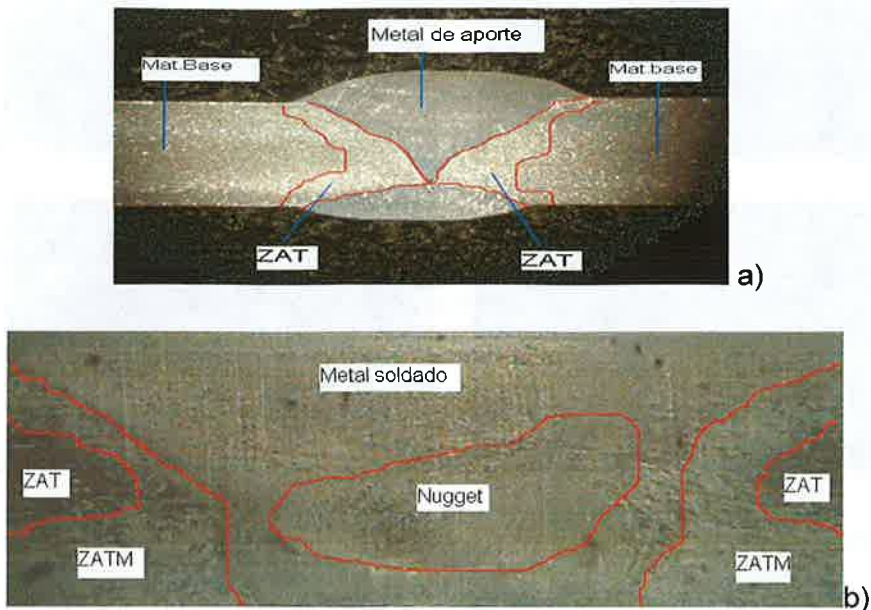


Fig. 5.7. Metalografías de las secciones transversales de las muestras (a) TIGy (b) FSW. Fotos tomadas a 0.8x y 2.5x, respectivamente.

5.6. Fractografías

Las fractografías de la superficie de fractura (modos de falla) de los especímenes ensayados en la Barra Hopkinson fueron obtenidas mediante un Microscopio Electrónico de Barrido (MEB) (SEM, por sus siglas en inglés). La Figura 5.8 muestra la superficie de fractura de un espécimen de TIG bajo una carga dinámica con una velocidad del proyectil de $v=15\text{m/s}$. En las Figuras 5.8(c) y 5.8(d) se puede notar la combinación de modos de falla, esto es, junto con mecanismos bien definidos de falla dúctil caracterizados por la aparición de “dimples” y altas deformaciones plásticas, hay evidencia de algo de clivaje (“cleavage”) indicando la separación de grano a lo largo de los planos cristalográficos. A este tipo de falla donde se presentan falla dúctil y falla frágil también se le conoce como cuasi-clivaje.

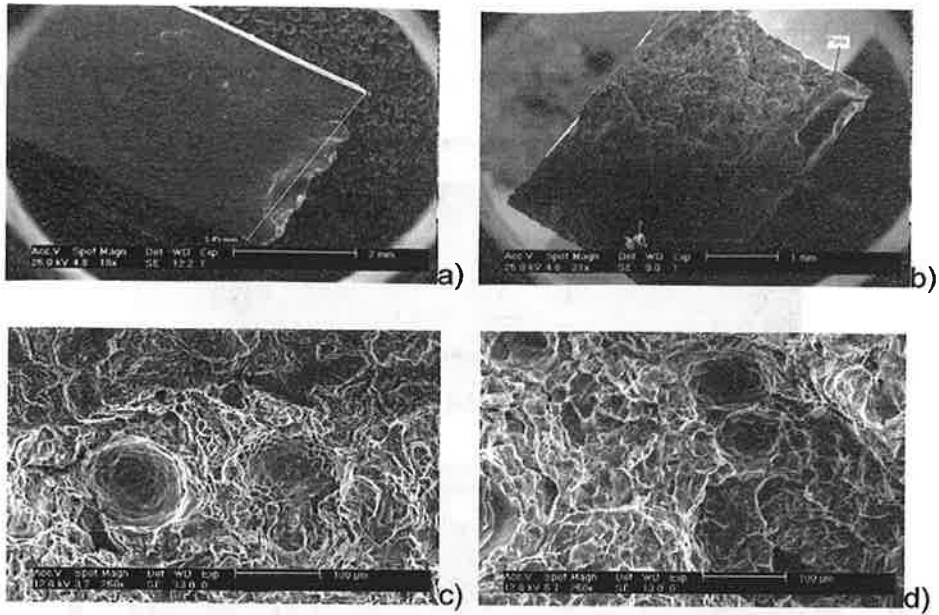


Fig. 5.8. Uniones soldadas por fusión ensayadas en la Barra Hopkinson a una velocidad del proyectil de $v=15$ m/s.

Las Figuras 5.9(a) y 5.9(b) muestran una fractura dúctil en la superficie de especímenes TIG ensayados a una velocidad de impacto de $v=18$ m/s y $v=25$ m/s, respectivamente. En ambas fractografías se observa que hay presencia de “dimples”, lo cual indica que el modo de falla en ambos especímenes fue dúctil. También se observa que rompieron por una fuerza de tensión debido a la orientación de los “dimples”.

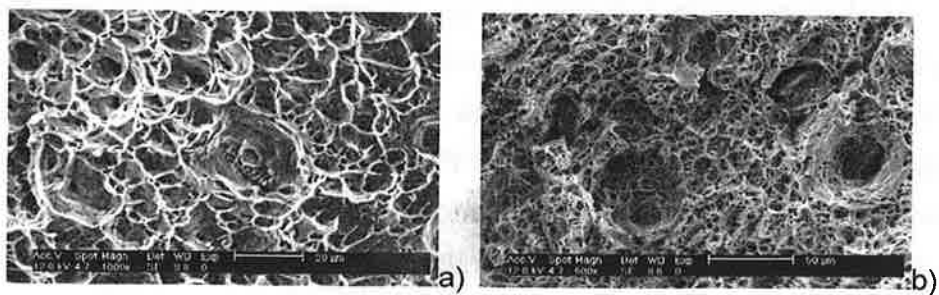


Fig. 5.9. Fractografías de uniones soldadas por fusión ensayadas en la Barra Hopkinson a velocidades de impacto de (a) $v=18$ m/s y (b) $v=25$ m/s.

Las Figuras 5.10, 5.11 y 5.12 muestran especímenes de FSW ensayados en la Barra Hopkinson a diferentes cargas dinámicas de impacto con velocidades del proyectil de $v=15$ m/s, 18 m/s y 25 m/s, respectivamente. Ningún espécimen se separó en dos partes, como los especímenes de TIG. La Figura 5.12 muestra un espécimen sujeto a una carga dinámica de impacto con una velocidad del proyectil de $v=25$ m/s. Este espécimen presenta más deformación que los otros especímenes ensayados a otras velocidades de impacto. Este resultado sugiere que los especímenes de FSW pueden aceptar más deformación plástica antes de romper cuando es sometido a cargas dinámicas de impacto. Esto se puede comparar con la respuesta cuasi-estática mostrada en la Figura 5.1, donde la curva esfuerzo-deformación del espécimen de FSW presenta más deformación plástica en el punto de ruptura que la del espécimen de TIG. Las fotos fueron tomadas a 2x en el estereoscopio mostrado en la Figura 4.19.

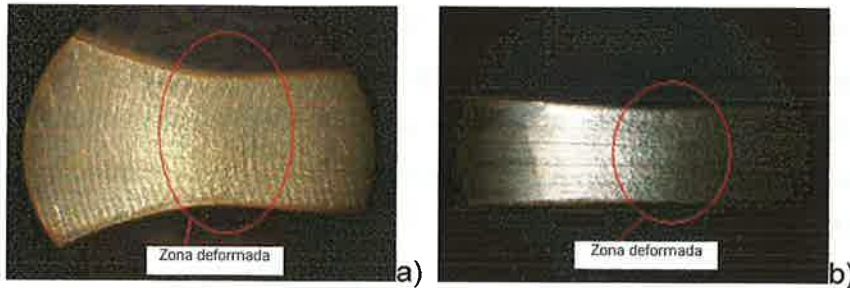


Fig. 5.10. Uniones soldadas por fricción ensayadas en la Barra Hopkinson a una velocidad de impacto de $v=15$ m/s.

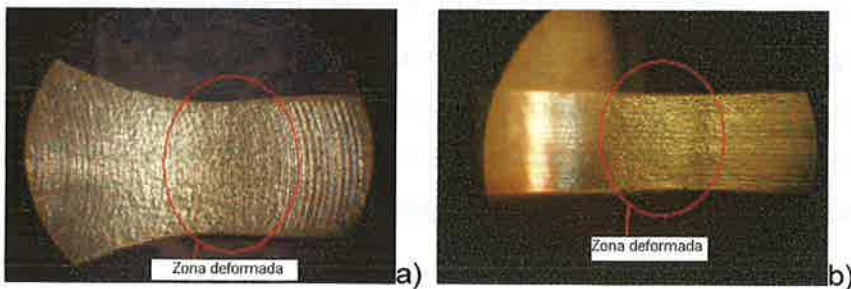


Fig. 5.11. Uniones soldadas por fricción ensayadas en la barra Hopkinson a una velocidad de impacto de $v=18$ m/s.

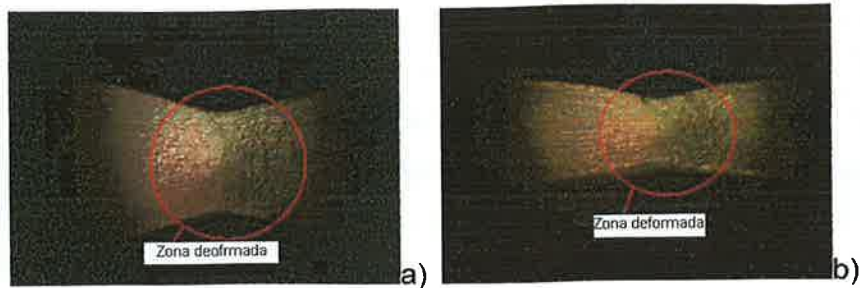


Fig. 5.12. Uniones soldadas por fricción ensayadas en la barra Hopkinson a una velocidad de impacto de $v=25$ m/s.

5.7. Esfuerzos residuales

Las figuras 5.13(a) y 5.13(b) muestran la distribución de esfuerzos longitudinales en las muestras de TIG y FSW, respectivamente. Los resultados fueron obtenidos mediante el método de contorno descrito anteriormente, y por medio de elemento finito. La Figura 5.14 muestra la comparación de los esfuerzos residuales a lo largo de los perfiles de las uniones soldadas, desde el punto A hasta el punto B como se indica en la Figura 5.13. La superficie suavizada de la superficie deformada de ambas muestras se muestra en las Figuras 5.15(a) y 5.15(b).

Los esfuerzos residuales a tensión se observan en el centro de la sección transversal, los valores están alrededor de 72 MPa para el espécimen de FSW y 78 MPa para el espécimen de TIG, como se observa en las Figuras 5.13 y 5.14. La soldadura de fusión exhibe ligeramente valores mayores para los esfuerzos residuales de tensión; sin embargo, el tamaño de la zona con esfuerzos residuales de tensión es más grande para el caso de TIG. En otras palabras, se puede decir que el proceso de fusión genera más y regiones más grandes de esfuerzos residuales de tensión que el proceso por fricción, esto podría deberse a la distorsión generada durante el proceso por fusión.

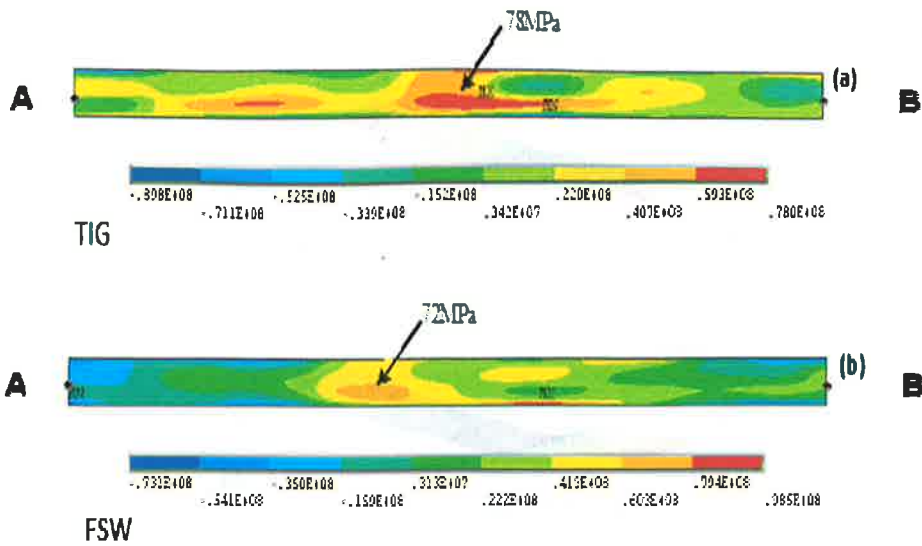


Fig. 5.13. Distribución de esfuerzos residuales, (a) muestras TIG, (b) muestras FSW.

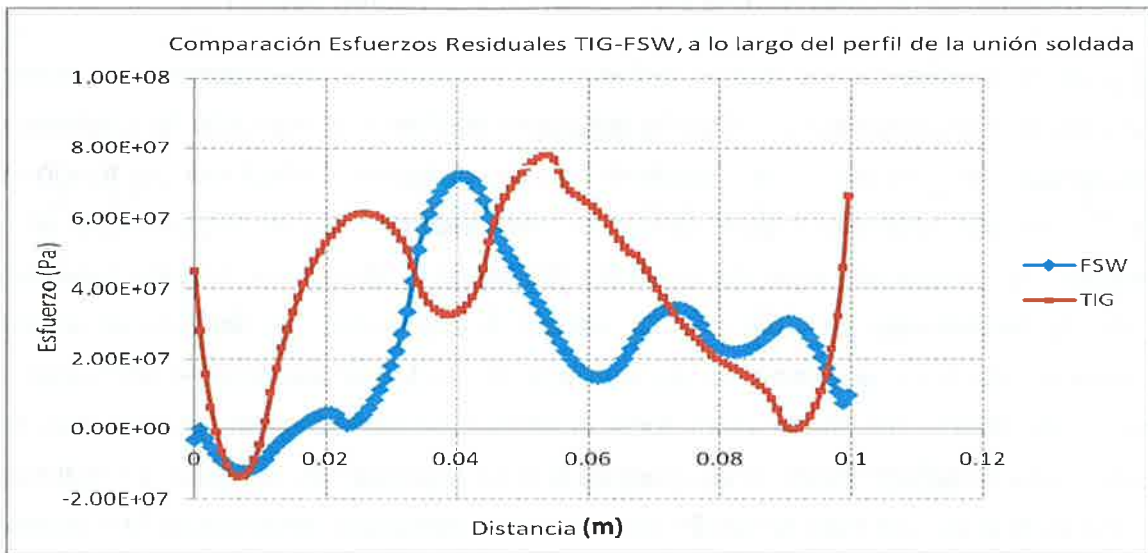


Fig. 5.14. Distribución esfuerzos residuales a lo largo del perfil de las uniones soldadas, Al6063.

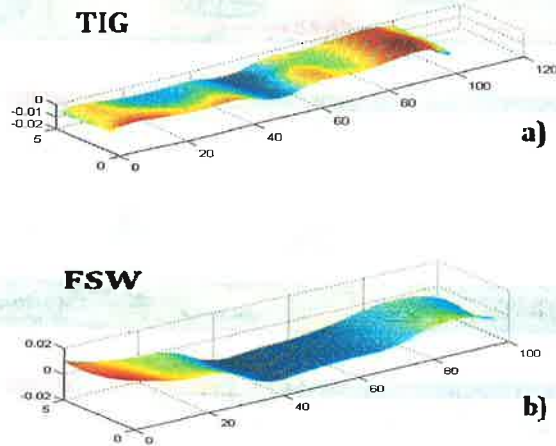


Fig. 5.15. Nube suavizada de puntos de la superficie deformada, muestras (a) TIG, muestras (b) FSW.

5.8. Soldadura por fricción hecha en CIDESI en la aleación Al6061-T6

La Figura 5.16 muestra las curvas esfuerzo-deformación cuasi-estáticas del material base y las uniones soldadas por fricción obtenidas mediante el uso de la herramienta de pin cuadrado. Anteriormente se mencionó que se realizaron soldaduras por fricción en CIDESI con dos diferentes geometrías de herramientas. En la Figura 5.16 no se muestran las curvas esfuerzo-deformación de las soldaduras por fricción realizadas usando la herramienta con pin circular debido a que todas las soldaduras salieron defectuosas; es decir, el diseño de esa herramienta no fue el óptimo ni el adecuado, no hubo buena fusión del material en toda la soldadura de todas las placas. Las tres curvas esfuerzo-deformación de las uniones que se muestran en la figura, se realizaron con una inclinación del cabezal de 2° , una cuarta se realizó sin inclinación del cabezal y resultó defectuosa.

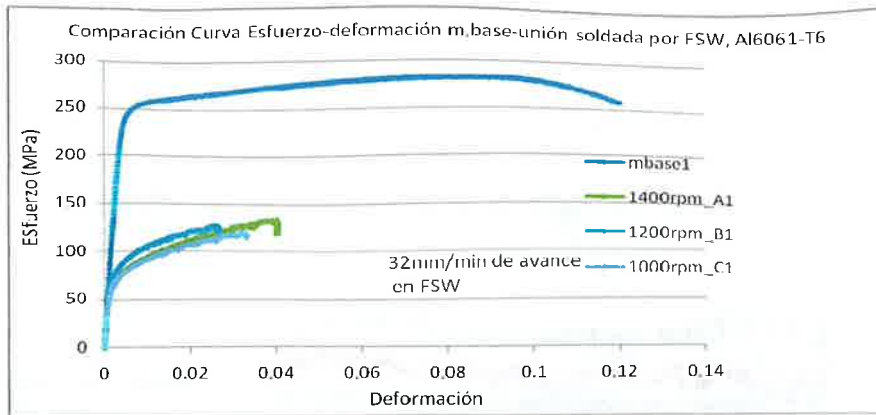


Fig. 5.16. Curvas esfuerzo-deformación de la aleación Al6061-T6, material base y uniones soldadas por fricción usando la herramienta de pin cuadrado.

En la Tabla 5.3 se muestra la comparación de las propiedades mecánicas entre el material base y las uniones soldadas. Se observa que no hay una variación significativa entre las uniones soldadas. También, se puede ver que el esfuerzo último de las uniones soldadas son alrededor entre 46% y 44%, el esfuerzo de fluencia es alrededor entre 29% y 34%, de la medida en el material base.

Tabla 5.3. Propiedades mecánicas material base y uniones soldadas, Al 6061-T6

	Material base	FSW 1400rpm	FSW 1200rpm	FSW 100rpm
Módulo de Young, E(GPa)	67.6	72.1	71.4	66.9
Esfuerzo de fluencia (MPa)	241	71	82	71
Esfuerzo último (MPa)	258.3	119.2	119.7	114.3

En la Figura 5.17 se muestran los perfiles de microindentación de las uniones soldadas, 1400rpm, 1200rpm, 1000rpm, todas con el mismo avance. Se observa que la muestra de 1000rpm tiene la dureza más alta que las otras dos muestras. La dureza más alta de la muestra 1000rpm está en 96HV, la de 1200rpm está en 79HV y la de 1400rpm está en 64HV. También se puede ver que la muestra de 1400rpm no indica una gran

diferencia de la microindentación a lo largo de las diferentes regiones. Sin embargo en la muestra de 1000rpm se observa que en la zona del “nugget” es donde se presenta menor dureza, valores entre 78HV-80HV.

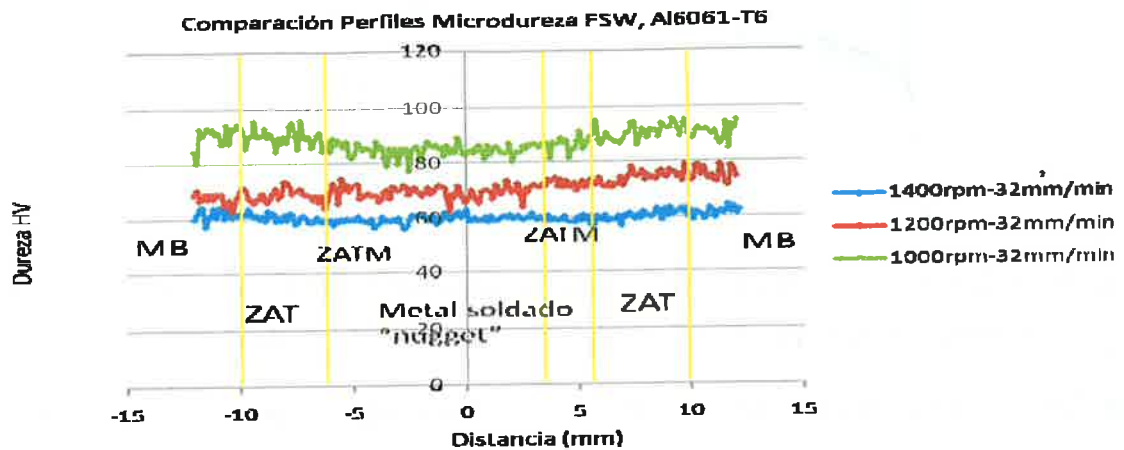
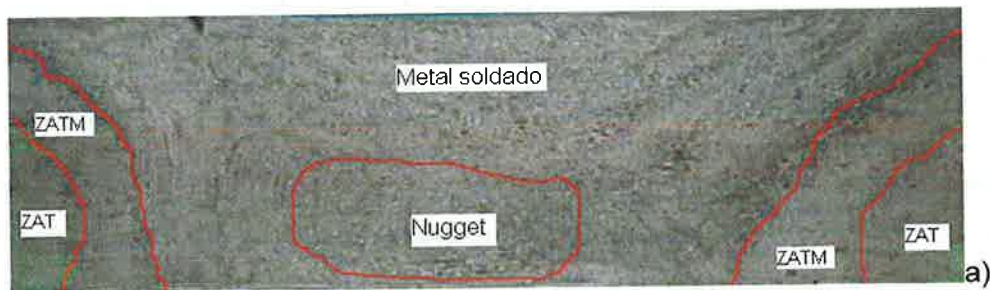


Fig. 5.17. Perfiles microindentación uniones soldadas por fricción, 1000rpm, 1200rpm, 1400rpm, Al6061-T6.

En las Figuras 15.18(a-c) se muestran las metalografías realizadas a las muestras, 1000rpm, 1200rpm, 1400rpm, respectivamente. Se utilizó el reactivo Keller (15ml HNO₃, 10ml HCl, 5ml HF, 70ml H₂O) para atacar las secciones transversales de las muestras. Las fotografías fueron tomadas en el estereoscopio mencionado anteriormente a un aumento de 0.8x. En cada fotografía se pueden ver las diferentes regiones o zonas que se presentan y caracteriza a las uniones soldadas por el proceso de fricción.



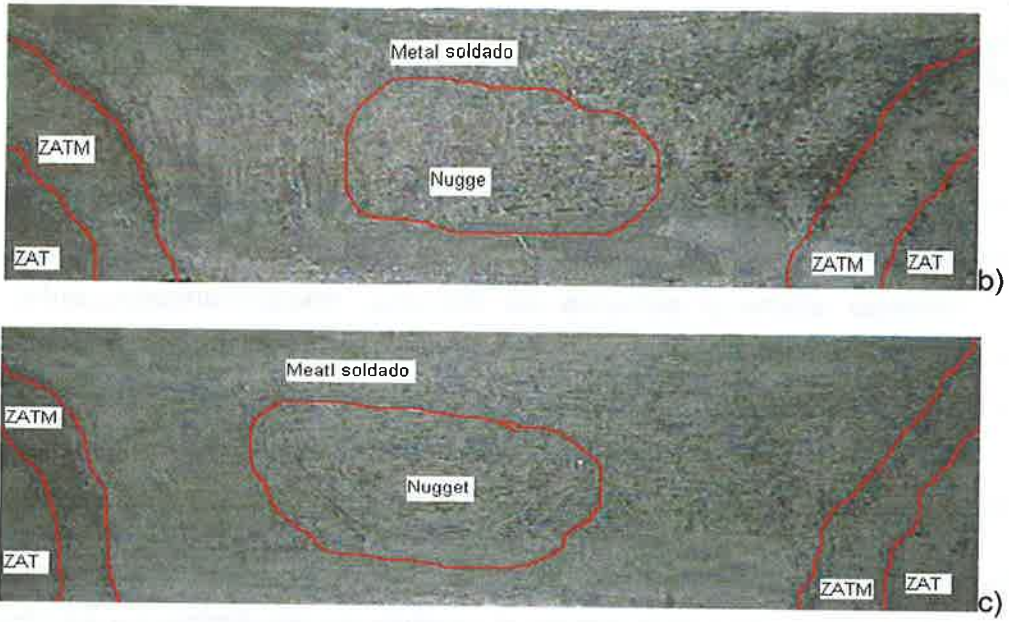


Fig. 5.18. Fotografías de las diferentes regiones en las uniones FSW, Al6061-T6, (a) 1000rpm, (b) 1200rpm, (c) 1400rpm. Aumento de 0.8x.

CONCLUSIONES

Para los especímenes obtenidos por ambos procesos de soldadura se obtuvo un decremento en las propiedades mecánicas (respecto al material base), entre un 60% y 50% del esfuerzo último y esfuerzo de fluencia, respectivamente, entre ambos procesos. Se obtuvo un decremento más significativo en el esfuerzo de fluencia y esfuerzo último en la unión FSW, ya que disminuyó un 8% más que la unión TIG; el cual se puede atribuir a los parámetros del proceso (velocidad de rotación y velocidad de avance) y geometría de la herramienta con los cuales se realizó la soldadura.

El efecto cuasi-estático fue estudiado en especímenes con diferentes niveles de daño previo por fatiga. Como se puede ver en el capítulo de resultados, no se observó un efecto significativo del daño previo por fatiga en la curva esfuerzo-deformación cuasi-estática de los especímenes FSW, ya que el aumento más significativo fue de un 12% y 10% en los esfuerzos de fluencia y esfuerzo último, respectivamente. Por lo cual, se puede decir, que la estabilidad de las propiedades mecánicas cuasi-estáticas con un daño previo por fatiga mejora el comportamiento de esta estructura de unión soldada y el proceso de Soldadura por Fricción con batido.

Para el caso de la curva S-N, no se pudo obtener para los especímenes de ambos procesos. En el caso de los especímenes de TIG, la dispersión de datos que se obtuvieron en las pruebas de fatiga fue debido a los defectos que presentó esta soldadura, por lo cual las probetas se rompían rápidamente. Para los especímenes de FSW, las probetas no rompieron, todas llegaron al 1 000 000 de ciclos.

La respuesta dinámica a tensión a diferentes cargas fue evaluada usando la barra Hopkinson. Se encontró que altas velocidades de deformación (15 m/s), 18 m/s, 25 m/s no afectan significativamente la respuesta dinámica de las uniones obtenidas por ambos procesos.

Se observó que las uniones de FSW permiten más deformación plástica antes del punto de ruptura bajo condición cuasi-estática, y de igual manera se observó un comportamiento similar bajo condición dinámica.

La componente longitudinal de los esfuerzos residuales se determinó empleando el método de contorno en especímenes TIG y FSW. Se encontró un poco menos de esfuerzos residuales en tensión para las muestras de FSW que las de TIG (6 MPa menos), por lo cual se esperaría que las uniones de FSW presenten mejores propiedades a la fatiga que las exhibidas por las uniones soldadas por el proceso convencional TIG.

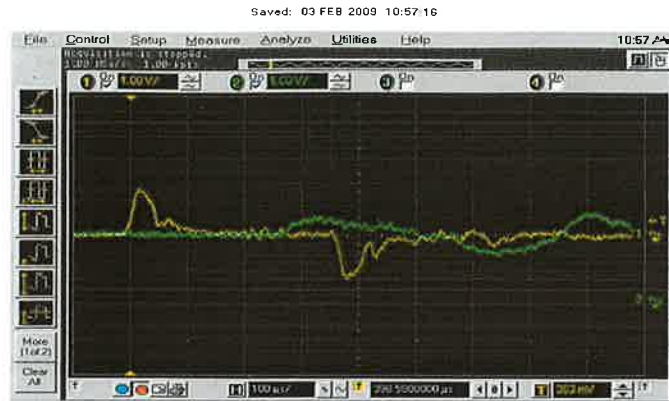
Para el caso del proceso de Soldadura por Fricción con batido, se puede decir, que para obtener mejores propiedades mecánicas mediante los parámetros del proceso óptimos y geometrías de las herramientas óptimas, se necesita mucho tiempo de investigación.

APÉNDICES

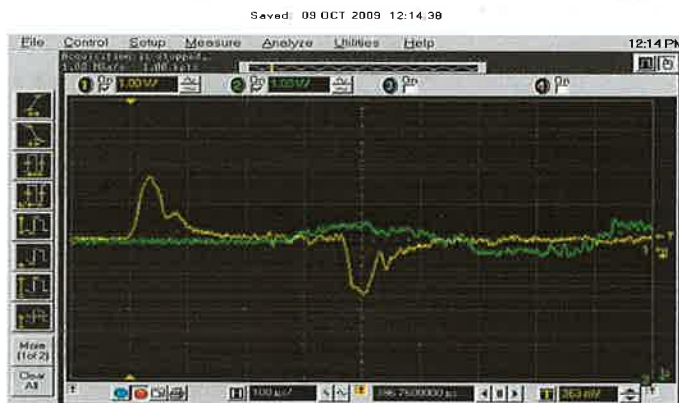
APÉNDICE A

Set up Osciloscopio, Set up Amplificadores de señal para pruebas dinámicas, strain gages.

- Osciloscopio.



Pulsos registrados por el osciloscopio de un ensayo dinámico en un espécimen TIG.



Pulsos registrados por el osciloscopio de un ensayo dinámico en un espécimen FSW.

- Amplificadores de señal.
- Barra Incidente:

Voltaje de excitación 3.5V

Ganancia 300

Filtro WB

- Barra Transmitida:

Voltaje de excitación 3.5V

Ganancia 5000

Filtro WB

- Strain gage:

Modelo CEA-06-062UW-120

Resistencia en Ohms $120 \pm 0.3\%$

Factor de galga $2.105 \pm 0.5\%$

APÉNDICE B

Programa de MatLab para el filtrado de las señales y la conversión de unidades de voltaje a unidades de deformación.

```
% Analisis de pulsos de la barra Hopkinson

clear all;
close all;
clc;
load 'Incidente.txt' %pulso incidente y reflejado
load 'Transmitido.txt' %pulso transmitido

t1=Incidente(:,1);
v1=Incidente(:,2);
t3=Transmitido(:,1);
v3=Transmitido(:,2);

C=4873; %velocidad de propagación de onda de la barra
Ls=.02988; %longitud efectiva del espécimen
E=190e9; %módulo de Young de la barra
A0=.25*pi*(.01905)^2; %área de la barra
A=0.00498*0.00347; %área del espécimen

vm=mean(v1(4:20)); %referencia a cero de la señal
v1=v1-vm;
vf1=filter(ones(1,15)/15,1,v1); %filtrado
vm=mean(v3(4:20)); %referencia a cero de la señal
v3=v3-vm;
vf3=filter(ones(1,15)/15,1,v3); %filtrado

%vf1=v1;
%vf3=v3;

figure(1)
plot(t1,v1,t1,vf1,t3,v3,t3,vf3)
title('Señales originales')
grid

%CONVERSIÓN DE UNIDADES DE VOLTS A DEFORMACIÓN PARA CADA SEÑAL

Sg=2.105; %gage factor
GIR=300; %ganancia de los pulsos incidente y reflejado
GTS=5000; %ganancia del pulso transmitido
VEIR=3.5; %voltaje excitación pulsos incidente y reflejado
VETS=3.5; %voltaje excitación pulso transmitido

e1=(vf1*4)/(VEIR*GIR*Sg); %pulso incidente y reflejado
e3=(vf3*4)/(VETS*GTS*Sg); %pulso transmitido
figure(2)
plot(t1,e1,t3,e3)
legend('incidente-reflejado','transmitido')
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('Strain')
title('Pulsos filtrados')
grid

ei=e1(95:354); %pulso incidente
er=e1(409:552); %pulso reflejado
er=e1(461:646); %pulso reflejado
ti=t1(95:354)-t1(95);
%tr=t1(409:552)-t1(409);
tr=t1(461:646)-t1(461);
et=e3(374:609); %pulso transmitido
tt=t3(374:609)-t3(374);

figure(3)
plot(ti,-ei,tr,er,tt,25*et,ti(1:65),ei(1:65)+er(1:65))
xlabel('Tiempo (s)')
```

```
ylabel('strain')
legend('Impulsos', 'Derivado', 'Transmitido')
grid
```

```
% Analisis de la Hopkinson
```

```
ed=-2*C*er/Ls; %strain rate
figure(4)
plot(tr,ed)
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('Strain Rate')
grid
```

```
e(1)=0;
ne=length(er);
for i=2:ne
    e(i)=trapz(tr(1:i),ed(1:i));
```

```
end
s=E*A0*et/A;
ns=length(s);
nn=min(ne,ns);
figure(5)
plot(e(1:nn),s(1:nn)*1e-6,'co')
title('Curva esfuerzo-deformación. aluminio')
ylabel('Esfuerzo (MPa)')
xlabel('Deformación')
grid
```

```
x=(e(1:nn))'
y=s(1:nn)*1e-6
```

```
!x=(tr)
!y=(ed)
```

```
!x=(ti)
!y=(ei)
```

```
!x=(tr)
!y=(er)
```

```
!x=(tt)
!y=(et)
```

APÉNDICE C

Programas MatLab del método de contorno para cálculo de esfuerzos residuales.

PROGRAMA TIG

```
clear all, clc
clear all, close all, clc
load gtaw.txt
load nodos1.txt

% se genera una tabla con tres rangos diferentes cada rango con
% incrementos diferentes
a=[1:0.5:40.5,41:0.5:60.5,61:0.5:101.5]';
b=[1:0.5:5];
[r,s]=size(a);
%K es el numero de divisiones que se hacen dentro del espesor del material

Q=nodos1; % numero de nodo en la superficie del modelo de ansys
[j,k]=size(Q);
Nsu=j*k;

n=1;
w=r;
K=9;
for m=1:K;
    z=gtaw(s:w,3)+(0.009);
    C(n,:)=z;
    n=n+1;
    s=w+1;
    w=r*n;
end
Cp=C';
%ngrid genera una tabla con un numero de columnas igual al numero de filas
%de a y asigna los datos a la variable aa de igual manera a b
[aa,bb]=ndgrid(a,b);

%figure; mesh(a,b,C);
%daspect([.5 .1 .001]);

%figure; surf(a,b,C);
%daspect([.5 .1 .001]);

% spline en la dirección y
ky = 3; knotsy = augknt([1,1:4/1.7:5],ky);
sp = spap2(knotsy,ky,b,Cp);
%evaluación de la función
yy = 1:0.05:5; vals = fnval(sp,yy);
vals=vals';
%figure; mesh(a,yy,vals);
%daspect([.5 .1 .001]);
% spline en la dirección x

coefsy = fnbrk(sp,'c');
kx = 3; knotsx = augknt([1,1:100/9:101.5,101.5],kx);
coefsy=coefsy';
sp2 = spap2(knotsx,kx,a,coefsy);
coefs = fnbrk(sp2,'c')';

%Datos para los grafios de superficie suavizada
xv=[1:.5:40.5,41:.5:60.5,61:.5:101.5];
%xv = 1:.5:95;
yv = 1:4/25:5;
[xvv,yvv] = ndgrid(xv,yv);
xvv=xvv';
yvv=yvv';
values = spcol(knotsx,kx,xv)*coefs*spcol(knotsy,ky,yv)';
values=values';
figure; mesh(xv,yv,values)
daspect([.5 .1 .001])
```



```

    S4(i,1)=(strvcat(q4,d4, ' ', char(e4)));
end
S4=char(S4(g*f-(f-2):g*f-1));
S4=cellstr(S4);
for i=1:Nsu
    e=strcat('D,P5IX, ', num2str(values(i)*-1e-3), ' ', '0Z, ', ' ');
    q=strcat('FLST,2,1,1,ORDE,1');
    d=strcat('ITEM, ', int2str(Q(i)));
    S(i,1)=(strvcat(q,d, '/GO', char(e)));
end
S=char(S(1:Nsu));
S=cellstr(S);

alldof1=strcat('FLST,2, ', int2str(f*g), ',1,ORDE,2');
alldof2=strcat('ITEM,2, ', int2str(f*g+1));
alldof3=strcat('ITEM,2,- ', int2str(2*f*g));

Alldof=cellstr(strvcat(alldof1,alldof2,alldof3, ' ', '/GO ', 'D,P5IX, ', ' ', ' ', ' ', 'ALL, ', ' ', ' '));

[filename, pathname] = uigetfile({'*.xlsx','Excel (*.xlsx)'; '*.xls','Excel (*.xls)'}, 'Guardar
Datos en Archivo de Excel', 'C:\MATLAB7\work\');
saveFileName = fullfile(pathname, filename);
xlswrite(saveFileName,R,1,'A1');
xlswrite(saveFileName,AT,1,'B1');
xlswrite(saveFileName,S1,1,'C1');
xlswrite(saveFileName,S2,1,'D1');
xlswrite(saveFileName,S3,1,'E1');
xlswrite(saveFileName,S4,1,'F1');
xlswrite(saveFileName,S,1,'G1');
xlswrite(saveFileName,Alldof,1,'H1');

```

PROGRAMA FSW

```

clear all, clc
clear all, close all, clc
load fsw6.txt
load nodos1.txt

% se genera una tabla con tres rangos diferentes cada rango con
% incrementos diferentes
a=[0.5:0.5:100]';
b=[1:0.5:5];
[r,s]=size(a);
%K es el numero de divisiones que se hacen dentro del espesor del material

Q=nodos1; % numero de nodo en la superficie del modelo de ansys
[j,k]=size(Q);
Nsu=j*k;

n=1;
w=r;
K=9;
for m=1:K;
    z=fsw6(s:w,3)+(0.037);
    C(n,:)=z;
    n=n+1;
    s=w+1;
    w=r*n;
end
Cp=C'*-1;
%ndgrid genera una tabla con un numero de columnas igual al numero de filas
%de a y asigna los datos a la variable aa de igual manera a b
[aa,bb]=ndgrid(a,b);

%figure; mesh(a,b,C);
%daspect([.5 .1 .001]);

%figure; surf(a,b,C);
%daspect([.5 .1 .001]);

```


APÉNDICE D

Programa ANSYS para cálculo de esfuerzos residuales.

```
/BATCH
! /COM,ANSYS RELEASE 11.0      UP20070125
22:21:54      08/04/2010

/input,menust,tmp,'',,,,,,,,,,,,,,1

! /GRA,POWER
! /GST,ON
! /PLO,INFO,3
! /GRO,CURL,ON
! /CPLANE,1
! /REPLOT,RESIZE
WPSTYLE,,,,,,,,,0
!*
/NOPR
/PMETH,OFF,0
KEYW,PR_SET,1
KEYW,PR_STRUC,1
KEYW,PR_THERM,0
KEYW,PR_FLUID,0
KEYW,PR_MULTI,0
/GO
!*
! /COM,
! /COM,Preferences for GUI filtering have
been set to display:
! /COM, Structural
!*
/PREP7
!*
ET,1,SOLID45
!*
!*
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0

MPDATA,EX,1,,58.8e9
MPDATA,PRXY,1,,0.3
BLC4,0,0,0.0995,0.004
!*
VOFFST,1,0.02,,
! /VIEW,1,1,2,3
! /ANG,1
! /REP,FAST
FLST,5,4,4,ORDE,4
FITEM,5,1
FITEM,5,3
FITEM,5,5
FITEM,5,7
CM,_Y,LINE
LSEL,,,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,,_Y
!*
LESIZE,_Y1,,,199,,,,,1
!*
FLST,5,4,4,ORDE,4
FITEM,5,2
FITEM,5,4
FITEM,5,6
FITEM,5,8
CM,_Y,LINE
LSEL,,,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,,_Y
!*
LESIZE,_Y1,,,25,,,,,1
!*

```

```

FLST,5,4,4,ORDE,2
FITEM,5,9
FITEM,5,-12
CM,_Y,LINE
LSEL,, , ,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,,_Y
!*
LESIZE,_Y1,0.001, , , , , ,1
!*
MSHAPE,0,3D
MSHKEY,1
!*
CM,_Y,VOLU
VSEL, , , , 1
CM,_Y1,VOLU
CHKMSH,'VOLU'
CMSEL,S,_Y
!*
VMESH,_Y1
!*
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2
!*
SE INTRODUCEN LOS DESPLAZAMIENTOS GENERADOS
EN MATLAB.PARA NO AGREGAR TODO EL PROGRAMA
SOLO SE PONEN LOS PRIMEROS Y ULTIMOS
DESPLAZAMIENTOS YA QUE SON 20800
DESPLAZAMIENTOS GENERADOS.
FLST,2,1,1,ORDE,1
FITEM,2,5426
/Go
D,P51X, ,1.3843e-005, , , ,UZ, , , , ,
FLST,2,1,1,ORDE,1
FITEM,2,5625
/Go
D,P51X, ,1.3983e-005, , , ,UZ, , , , ,

```

```

FLST,2,1,1,ORDE,1
FITEM,2,5626
/Go
D,P51X, ,1.4119e-005, , , ,UZ, , , , ,
FLST,2,1,1,ORDE,1
FITEM,2,5627
/Go
D,P51X, ,1.4251e-005, , , ,UZ, , , , ,
FLST,2,1,1,ORDE,1
FITEM,2,5628
/Go
D,P51X, ,1.4379e-005, , , ,UZ, , , , ,
FLST,2,1,1,ORDE,1
FITEM,2,5629
/Go
D,P51X, ,1.4503e-005, , , ,UZ, , , , ,
-----
-----
-----
FLST,2,1,1,ORDE,1
FITEM,2,5407
/Go
D,P51X, ,1.5172e-005, , , ,UZ, , , , ,
FLST,2,1,1,ORDE,1
FITEM,2,5406
/Go
D,P51X, ,1.5184e-005, , , ,UZ, , , , ,
FLST,2,1,1,ORDE,1
FITEM,2,5405
/Go
D,P51X, ,1.5168e-005, , , ,UZ, , , , ,
FLST,2,1,1,ORDE,1
FITEM,2,5404

```

```

/Go
D,P51X, ,1.5126e-005, ,UZ,
FLST,2,1,1,ORDE,1
FITEM,2,5403
/Go
D,P51X, ,1.5057e-005, ,UZ,
FLST,2,1,1,ORDE,1
FITEM,2,5402
/Go
D,P51X, ,1.4962e-005, ,UZ,
FLST,2,1,1,ORDE,1
FITEM,2,5202
/Go
D,P51X, ,1.484e-005, ,UZ,
! /VIEW,1,1,2,3
! /ANG,1
! /REP,FAST
FINISH
/SOL
FLST,2,1,5,ORDE,1
FITEM,2,1
!*
/GO
DA,P51X,ALL,
FINISH
/POST1
FINISH
/SOL
! /STATUS,SOLU

```

```

SOLVE
FINISH
/POST1
!*
! /EFACET,1
! PLNSOL, U,Z, 0,1.0
!*
! /EFACET,1
! PLNSOL, S,Z, 0,1.0
!*
! /EFACET,1
! PLNSOL, S,X, 0,1.0

```

BIBLIOGRAFIA

- [1] R. Nandan, T. DebRoy, H.K.D.H. Bhadeshia, Recent advances in friction-stir welding – Process, weldment structure and properties, *Progress in Materials Science* 53 (2008) 980–1023.
- [2] Sato YS, Kokawa H, Enomote M, Jogan S. Microstructural evolution of 6063 aluminum during friction-stir welding. *Metall Mater Trans* 1999;30A(9):2429–37
- [3] Liu HJ, Fujii H, Maeda M, Nogi K. Tensile properties and fracture locations of friction-stir-welded joints of 2017-T351 aluminum alloy. *J Mater Process Tech* 2003;142(3):692–6.
- [4] Liu G, Murr LE, Niou CS, McClure JC, Vega FR. Microstructural aspects of the friction-stir welding of 6061-T6 aluminum. *Scripta Mater* 1997;37(3): 355–61.
- [5] Kumar K, Kailas SV. On the role of axial load and the effect of interface position on the tensile strength of a friction stir welded aluminium alloy. *Mater Des* 2008;29(4):791–7.
- [6] Sato YS, Kokawa H. Distribution of tensile property and microstructure in friction stir weld of 6063 aluminum. *Metall Mater Trans* 2001;32A(12): 3023–31.
- [7] H. Aydın, A. Bayram, A. Ug̃uz, K. S. Akay, Tensile properties of friction stir welded joints of 2024 aluminum alloys in different heat-treated-state, *Materials and Design* 30 (2009): 2211–2221.
- [8] D.M. Rodrigues, A. Loureiro, C. Leitao, R.M. Leal, B.M. Chaparro, P. Vilaça, Influence of friction stir welding parameters on the microstructural and mechanical properties of AA 6016-T4 thin welds, *Materials and Design* 30 (2009): 1913–1921.
- [9] C. Leita, R.M. Leal, D.M. Rodrigues, A. Loureiro, P. Vilaca, Mechanical behaviour of similar and dissimilar AA5182-H111 and AA6016-T4 thin friction stir welds, *Materials and Design* 30 (2009):101–108.
- [10] R.M. Leal, C. Leitão, A. Loureiro, D.M. Rodrigues, P. Vilaca, Material flow in heterogeneous friction stir welding of thin aluminium sheets: Effect of shoulder geometry, *Materials Science and Engineering A* 498 (2008):384–391.
- [11] G. Buffa, G. Campanile, L. Fratini, A. Prisco, Friction stir welding of lap joints: Influence of process parameters on the metallurgical and mechanical properties, *Materials Science and Engineering A* 519-1 (2009):19–26.
- [12] A. Scialpi, L. A. C. De Filippis, P. Cavaliere, Influence of shoulder geometry on microstructure and mechanical properties of friction stir welded 6082 aluminium alloy, *Materials and Design* 28 (2007) 1124-1129.
- [13] K. Elangovan, V. Balasubramanian, Influences of post-weld heat treatment on tensile properties of friction stir-welded AA6061 aluminum alloy joints, *Materials Characterization* 59 (2008) 1168-1177.
- [14] G. Buffa, L. Fratini, S. Pasta, R. Shivpuri, On the thermo-mechanical loads and the resultant residual stresses in friction stir processing operations, *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 57(2008):287–290.
- [15] Peel M, Steuwer A, Preuss M, Withers PJ. Microstructure, mechanical properties and residual stresses as a function of welding speed in aluminium AA5083 friction stir welds. *Acta Mater* 2003;51(16):4791–801.
- [16] J. T. Assis, V. Monin, J. R. Teodosio, T. Gurova, X-Ray analysis of residual stress distribution in weld region, *International Centre for Diffraction Data* 2002, *Advances in X-ray Analysis*, Volume 45.
- [17] Vladimir I. Monin, Tatiana Gurova, X. Castello, S. F. Estefen, Analysis of residual stress state in welded steel plates by X-ray diffraction method, *Advance Materials Science* 19 (2009) 172-175.

- [18] Prime, M. B., Cross-sectional mapping of residual stresses by measuring the surface contour after a cut. *J. Eng. Mater. Technol.* 123(2001):162–168.
- [19] Prime, M. B., Residual stress mapping in welds using the contour method. *Trends in Welding Research*, ASM International. 2003pp:891-896.
- [20] Prime, M. B., The contour method: A new approach in experimental mechanics. *Proceedings of the SEM Annual Conference*, 2009.
- [21] J. Zhao, F. Jiang, H. Jian, K. Wen, L. Jiang, X. Chen, Comparative investigation of tungsten inert gas and friction stir welding characteristics of Al-Mg-Sc alloy plates, *Materials and Design* 31 (2010) 306-311.
- [22] A. Muñoz, C. Ruckert, B. Huneau, X. Sauvage, S. Marya, Comparison of TIG and friction stir welded Al-4.5Mg-0.26Sc alloy, *Journal of Materials Processing Technology* 197 (2008) 337-343. ,
- [23] Y. J. Chao, Y. Wang and K. W. Miller, Effect of Friction Stir Welding on Dynamic Properties of AA2024-T3 and AA7075-T735. *Welding Research Supplement* (2001):196-200.
- [24] U. Sánchez-Santana, C. Rubio-González, G. Mesmacque, A. Amrouche, X. Decoopman, Effect of fatigue damage induced by cyclic plasticity on the dynamic tensile behavior of materials, *International Journal of Fatigue* 30(2008):1708-1719.
- [25] Jonny Leicer Carabali Loba, *Welding Process in the Engineering*, Atlantic International University.
- [26] J. W. Giachino, W. Weeks, *Técnica y práctica de la soldadura*, Edit. Reverté, S.A, 5ª. Edición, 2003.
- [27] M. Zalazar, *Soldadura por arco con electrodo no consumible-Gas Tungsten Arc Welding*, Laboratorio de metalografía y soldadura, Universidad Nacional del Comahue.
- [28] Sindo Kou, *Welding Metallurgy*, John Wiley & Sons, Inc., Publication, Second Edition, 2003.
- [29] D. Harris, F. Norman, *Properties of Friction Stir Welded Joints: A Review of the Literature*, Draft Version, 2003.
- [30] M. Dilek, Mechanical properties of different aluminum alloys joined by friction stir welding, Institute of Natural and Applied Sciences, Department of Mechanical Engineering, 2006.
- [31] P. Cabot, A. Moglioni, E. Carella, Soldadura por Fricción Agitación (FSW) de AA6061-T6, *Matéria* Vol 8, N° 2 (2003) 187-195.
- [32] R. S. Mishra, Z. Y. Ma, Friction stir welding and processing, *Materials Science and Engineering*, R 50(2005) 1-78.
- [33] Terry Khaled, An outside looks at friction stir welding, Report ANM-112N-05-06, 2005.
- [34] Norman E. Dowling, *Mechanical Behavior of Materials: Engineering Methods for Deformation, Fracture, and Fatigue*, Third Edition, Pearson Prentice Hall, 2007.
- [35] Ralph I. Stephens, Ali Fatemi, Robert R. Stephens, Henry O. Fuchs, *Metal Fatigue in Engineering*, Second Edition, Wiley Interscience, 2001.
- [36] Marc. A. Meyers, *Dynamic Behavior of Materials*, Wiley Interscience Publication, 1994.

[37] ASTM 2007 Annual book of ASTM Standards, Vol. 03.01, No. E466, Standard Practice for Conducting Force Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials.

[38] Welding Materials Sales, Inc. 2008.

[39] C. Rubio-Gonzalez, C. Félix, J. L. Ortiz Rosales, A. Sánchez, Dynamic Tensile Behavior of TIG welded and friction stir welded joints of 6061-T6 aluminum alloys, Journal Materials and Design (En revision).

[40] Koshkin, Shirkévich, Manual de Física, Editorial Mir, 1975.

[41] ASTM 2007 Annual book of ASTM Standards, Vol. 03.01, No. E8-09, Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials.