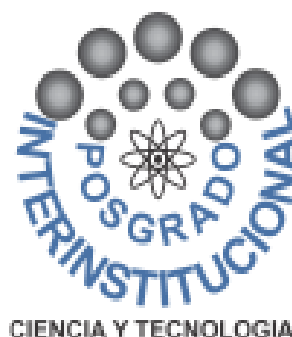


**CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN  
MATERIALES S.A. de C.V.**

**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**



**SIMULACIÓN DEL PROCESO DE SOLDADURA POR PUNTO  
POR FRICCIÓN-AGITACIÓN (FSSW) EN LA UNIÓN DE LA  
ALEACIÓN DE TITANIO TI-6AL-4V**

**POR**

**FLOR ARACELI GARCÍA CASTILLO**

**DOCTORADO EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA EN  
MANUFACTURA AVANZADA**

**SALTILLO, COAHUILA**

**NOVIEMBRE 2016**

**SIMULACIÓN DEL PROCESO DE SOLDADURA POR PUNTO  
POR FRICCIÓN-AGITACIÓN (FSSW) EN LA UNIÓN DE LA  
ALEACIÓN DE TITANIO TI-6AL-4V**

*Por*

*FLOR ARACELI GARCÍA CASTILLO*

*Tesis*

*Presentada al Posgrado Interinstitucional en Ciencia y Tecnología*

*Sede*

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

*Como requisito parcial para obtener el Grado Académico de*

*Doctorado en Ciencia y Tecnología*

*en Manufactura Avanzada*

*Posgrado Interinstitucional en Ciencia y Tecnología*

*COMIMSA/CONACyT*

*Saltillo, Coahuila a noviembre de 2016*

## Dedicatoria

Especialmente a **Mi Padre Celestial** por permitirme caminar en este hermoso sendero, gracias por permitirme ser y hacer, gracias Señor por tu inmenso amor

A mi piloto-copiloto, compañero de viaje, mi esposo, gracias por su gran apoyo, amor, cariño y paciencia durante todos estos años...

### **Miguel Francisco Arratia Obregón**

A mis hijas, mis grandes amores, dos grandes turbinas que me impulsaron a volar mucho más alto de lo que algún día imagine ...

### **Mariana Michell Arratia Garcia**

### **Barbara Jaqueline Arratia Garcia**

A mis padres por su amor y cariño

### **Flora Castillo Garay y Federico Garcia Arron**

Y especialmente a mi mamá por su gran ejemplo y por todo el apoyo recibido en cada uno de los proyectos emprendidos, eternamente gracias, te amo mamá.

A mis hermanas que en todo momento han estado precisamente ahí, siempre ahí para apoyarme, muchas gracias por todo, las amo, mejores hermanas imposible

### **Olga Nelly y Adriana Eloisa**

A mis cuñados y sobrinos por todo su cariño y apoyo incondicional

### **Rodolfo, Patrick, Rebeca y Jacobo**

A mis grandes amigas y fuentes de inspiración, gracias por todo lo compartido y lo vivido, gracias por haberme motivado a emprender este maravilloso viaje de conocimiento, pero sobre todo gracias por haber creído en mí, infinitamente gracias

### **Paty, Maribel y Lupita**

A mis amigos y amigas, compañeros, mi familia FIME-COMIMSA por su valioso apoyo y colaboración

**Ezequiel, Maribel, Paty, Brenda, Lupita Mata, Adriana, Marisela, Ariana, Angélica, Tere, Karla, Fernando Montemayor, Ángel Rivas, Maestra Mara, Ceci, Rubén Campos, Roberto Fabela, Gabino Ramírez, Mary Lara, Catalina, Esmeralda, Olga, Lulú, Alba, Jesús Orona, Gladys.**

A mi compañera de equipo, colega, gran amiga, gracias por tu ayuda, por tus consejos, por siempre estar con un oído atento, por preocuparte siempre buscando el cómo ayudar o colaborar, doy gracias a Dios por tu amistad pidiendo sean muchos años más recorriendo juntas este maravilloso mundo de conocimiento

**Maribel**

A mi líder y guía en este fascinante universo lleno de sabiduría, gran amiga, colega, gracias por la oportunidad y la confianza, gracias por todo el apoyo, orando a Dios siga bendiciendo su camino y guarde ese generoso corazón que tantas vidas ha tocado

**Paty**

A mi buen y gran amigo **Ezequiel Rodríguez** un gran ejemplo de vida, trabajo y tenacidad, gracias por todas tus enseñanzas y por todo el conocimiento compartido.

A mi compañero y ahora gran amigo **Luis Arturo** gracias por toda esa transferencia de conocimiento, un placer trabajar contigo

A nuestros compañeros de equipo, nuestros jóvenes investigadores, estudiantes, becario, colaboradores, por toda su valiosa ayuda y colaboración en el trabajo día a día, gracias por las increíbles experiencias que hemos pasado aprendiendo juntos, por los gratos y no tan gratos momentos, muchas gracias

**Fernando Quiroz, Alejandro Loyda, Jaime Rojas, Alberto Quiroga, Miguel Cisneros, Daniela Fabela, Irving Saldaña,**

A un excelente estudiante, extraordinario ser humano y ahora colega, Ingeniero Aeronáutico, gracias por el apoyo y por el conocimiento compartido

**Alejandro Loyda**

A mi director de tesis por sus conocimientos y sabiduría compartida, por su tiempo, por permitirme crecer y aprender de él a lo largo de este hermoso camino llamado doctorado, gracias por todo el apoyo brindado

**Dr. Felipe García**

Y a todos aquellos que estuvieron apoyando siempre con una sonrisa y con una palabra de ánimo y aliento durante todo este tiempo, por siempre gracias

**Mary Vega, Maestra Maru, Maestra Pily, Silvia**

## Agradecimientos

A la Corporación Mexicana de Investigación en Materiales SA de CV (COMIMSA), Saltillo, por el apoyo brindado en mis estudios de posgrado.

Agradezco a la Universidad Autónoma de Nuevo León por el apoyo brindado para realizar mi estudios de posgrado, así mismo agradezco a la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica.

Al Programa para el Mejoramiento del Profesorado (PROMEP) por el apoyo financiero otorgado para la realización de esta investigación.

A la Dra. Patricia del Carmen Zambrano Robledo, como una gran mentora en el desarrollo de este trabajo y en mi trayectoria profesional, por su compromiso y acompañamiento que me me brindo durante esta etapa.

Al Dr. Felipe de Jesús García Vázquez, como un gran mentor, por todo el intercambio de conocimientos, la dedicación, el interés y apoyo recibido durante todos estos años.

Al Dr. Felipe Arturo Reyes Valdés por todo el conocimiento compartido, por toda la gestión y el apoyo durante todo el posgrado.

A la Dra. Guadalupe Maribel Hernández Muñoz, al Dr. Luis Arturo Reyes Osorio por todo el conocimiento y el apoyo brindado durante el desarrollo de este proyecto.

Al Dr. Abraham Velasco y Dr. Héctor Hernández por su tiempo en la revisión de este trabajo.

Al M.C. Esteban Báez Villarreal y al Dr. Jaime Castillo por su apoyo académico y administrativo. A todos mis compañeros y amigos del CIIIA, FIME y COMIMSA.

A mis amigos y amigas.

# Resumen

El avance rápido en la creación de nuevas tecnologías para dar solución y tener acertadas decisiones en el complejo manejo de los procesos industriales, requiere de estrategias y metodologías que ayuden a elegir las opciones que den los mejores resultados. Para poder decidir acertadamente se necesita conocer cómo responderá el sistema de proceso real ante una determinada acción. Esto puede llevarse a cabo mediante la experimentación; sin embargo, factores como tiempos, costos, mano de obra y seguridad, hacen que esta alternativa no sea factible. Es posible estudiar el efecto de las modificaciones de una forma más rápida, económica y completa, mediante el reemplazo del sistema real por otro sistema que en la mayoría de los casos es una versión simplificada. A esta práctica de experimentar con un modelo virtual se le denomina *modelación numérica, simulación o modelo de elemento finito*. La simulación de los procesos presenta grandes ventajas, debido a que los modelos numéricos nos permiten establecer las condiciones óptimas de un sistema existente, ayudando a predecir los resultados más viables a la situación real, teniendo en cuenta que pequeñas modificaciones pueden tener un alto impacto económico, la simulación representa un elemento muy importante en la toma de decisiones.

La soldadura de puntos por fricción-agitación (FSSW, por sus siglas en inglés) es un tema de reciente desarrollo e interés, principalmente en aleaciones de titanio, ya que existen estudios previos realizados en aleaciones de aluminio, magnesio, aceros y polímeros. Las aleaciones de titanio se encuentran una amplia aplicación en la industria aeronáutica, principalmente como componentes en el tren de aterrizaje en aviones *comerciales*, en componentes de turbinas, por lo cual este trabajo se centra en la

aleación Ti-6Al-4V, este tipo de aleación presenta fases características que brindan un mejor balance en propiedades mecánicas de dureza y esfuerzo a la tensión.

En el presente trabajo se desarrolló un modelo numérico tridimensional en la representación del proceso FSSW mediante elemento finito, utilizando el software DEFORM 3D, se llevó a cabo la unión de láminas de aleación de Ti-6Al4-V mediante un centro de maquinado de alta velocidad, con el objetivo de determinar los valores óptimos de las variables críticas del proceso, utilizando un diseño central compuesto. Durante las pruebas experimentales se registraron las fuerzas axiales y la distribución de la temperatura en la región de las uniones, los resultados se utilizaron como referencia para la validación del modelo.

Los resultados obtenidos muestran el efecto de las variables del proceso FSSW a través de perfiles de temperatura y la distribución del flujo del material al realizar uniones mediante proceso FSSW de la aleación Ti-6Al-4V en láminas de un espesor de 1.5 mm, concluyendo que una adecuada combinación de parámetros permite realizar una unión consolidada, con buenas características mecánicas y microestructurales, los modelos numéricos desarrollados permiten un mejor entendimiento de las principales variables que afectan el proceso de unión de componentes.

## Índice

Resumen.....	1
Capítulo 1 .....	19
Introducción .....	19
Capítulo 2.....	25
Planteamiento del Problema.....	25
2.1. Antecedentes del problema .....	25
2.2. Descripción de la problemática en la unión de aleaciones de titanio.....	25
2.3. Preguntas de investigación.....	26
2.4 Hipótesis.....	27
2.5 Objetivo.....	27
2.5.1. Objetivo general.....	27
2.5.2. Objetivos específicos .....	27
2.6 Justificación.....	28
2.7. Limitación de la tesis .....	30C
2.7.1. Delimitación.....	30
2.7.2. Resultados e Impactos Esperados .....	30
2.8. Estructura de la tesis.....	31
Capítulo 3 .....	33
Marco Teórico y Estado del Arte .....	33
3.1. Aleaciones de titanio y su aplicación en la Industria aeronáutica.....	33
3.1.1. Titanio.....	33
3.1.2. Propiedades físicas, químicas y mecánicas.....	34
3.1.3. Características generales de las aleaciones de titanio .....	37
3.1.5. Metalurgia del titanio.....	40
3.1.6. Aleación Ti-6Al-4V .....	42
3.1.7. Procesos de soldadura aplicados en aleaciones de titanio .....	44



3.1.8. Procesos de soldadura por fricción-agitación aplicados en aleaciones de titanio .....	46
3.1.9. Evolución microestructural del titanio en proceso FSW .....	49
3.2. Proceso de soldadura por fricción agitación .....	50
3.2.1. Introducción al proceso de soldadura .....	50
3.2.2. Fricción .....	52
3.2.2.1. Fricción cinética o deslizante .....	55
3.2.3. Proceso de soldadura por fricción agitación FSW .....	60
3.2.4. Herramienta para proceso FSW .....	65
3.2.5. Zonas generadas en el proceso FSW .....	69
3.2.6. Parámetros importantes del proceso FSW .....	70
3.2.7. Generación de calor en el proceso FSW .....	73
3.2.8. Transferencia de calor y flujo de material en el proceso FSW .....	79
3.2.9. Defectos, ventajas y desventajas presentados en la soldadura por proceso FSW .....	85
3.2.10. Proceso de soldadura FSSW .....	89
3.3. Método de elemento finito aplicado en proceso de soldadura en estado solido ..	92
3.3.1. MEF .....	92
3.3.2. Características del método elemento finito.....	100
3.3.3. Formulación matemática para MEF .....	102
3.3.4. Formulación Mecánica .....	108
3.3.5. Modelo Constitutivo de Johnson Cook.....	111
3.3.6. Uso del MEF en el proceso FSW.....	114
Capítulo 4.....	118
Metodología Experimental.....	118
4.1 Identificación de variables en el proceso FSSW .....	121

4.2 Identificación del rango de los valores en los parámetros de operación utilizados en la entrada del proceso FSW para soldar la aleación Ti-6Al-4V .....	122
4.3 Diseño de experimentos .....	123
4.4 Herramienta para unir por proceso FSSW .....	125
4.5 Corte del material .....	126
4.6 Sistema de sujeción .....	126
4. 7 Unión de láminas de Ti-6Al-4V mediante proceso FSSW, equipo y dispositivos utilizados para la unión y el análisis de las probetas soldadas .....	127
4.7.1 Dinamómetro .....	128
4.7.2 Termopares .....	130
4.7.3 Microscopia óptica (MO).....	132
4.7.4 Microscopia Electrónica de Barrido (MEB).....	133
4.7.5 Microdurómetro Vickers.....	134
4.7.6 Máquina de ensayo Instron .....	135
4.8 Desarrollo del modelo numérico del proceso de soldadura por punto por fricción-agitación. ....	136
4.8.1 Modelo Johnson-Cook .....	139
4.8.2 Descripción del desarrollo del modelo de elemento finito .....	140
Capítulo 5 .....	143
Análisis y discusión de resultados.....	143
5.1 Unión de las láminas por medio del proceso FSSW .....	143
5.2 Caracterización de las uniones soldadas por proceso FSSW .....	147
5.3 Resultados de ensayos para evaluación de propiedades mecánicas.....	157
5.3.1 Ensayos de microdureza .....	157
5.3.2 Ensayos de tensión.....	160
5.4 Perfil de Temperatura.....	163
5.5 Fuerza ejercida .....	166

5.5 Resultados mediante la simulación por MEF.....	169
5.5.1 Perfil de temperatura.....	171
5.5.2 Esfuerzo efectivo y deformación efectiva .....	176
5.5.4 Flujo del Material.....	182
5.5.4 Resultados experimentales comparados con los resultados modelo numérico .....	184
Capítulo 6.....	186
Conclusiones y recomendaciones .....	186
6.1 Conclusiones .....	186
6.2 Recomendaciones.....	188
Anexos .....	189
Referencias.....	195

## Índice de Figuras

Figura 3.1 Estructuras cristalinas presentes en el titanio: a) fase $\alpha$ de baja temperatura y b) fase $\beta$ de alta temperatura indicando los valores de los parámetros de red y los índices de Miller de los planos de mayor densidad para cada estructura. ....	35
Figura 3.2 Influencia de los elementos sobre el diagrama de fases en las aleaciones de titanio. ....	39
Figura 3.3 Diagrama Pseudo-binario de fase $\beta$ isomorfa, Collings (2013). ....	41
Figura 3.4 Microestructuras típicas de $\alpha$ , $\alpha + \beta$ y $\beta$ : a) fase $\alpha$ equiaxial en Ti no aleado después de 1 hora a 699°C (1290°F), b) $\alpha + \beta$ equiaxial, c) $\alpha + \beta$ auriculares en Ti-6Al-4V y d) $\beta$ equiaxial en Ti-13V-11Cr-3 <sup>a</sup> , Donachie (2000). ....	42
Figura 3.5 Típica estructura Widmanstätten de las aleaciones $\alpha$ - $\beta$ . La fase $\alpha$ se observa en color gris claro y la fase $\beta$ en oscuro, Donachie (2000). ....	43
Figura 3.6 Distribución de materiales en un avión Boeing 787, Campbell (2012). ....	43
Figura 3.7 Evolución microestructural de típica estructura Widmanstätten de las aleaciones $\alpha$ - $\beta$ . La fase $\alpha$ se observa en color blanco y la fase $\beta$ en oscuro, Mishra y Mahoney (2007) ....	50
Figura 3.8 Esquema de los cinco tipos básicos de juntas que se utilizan en la unión de piezas: a) a tope, b) en L, c) en T, d) solapada y e) en borde. Campbell (2012). ....	51
Figura 3.9 Clasificación general de los procesos de soldadura. ....	52
Figura 3.10 Diagrama del concepto de fricción. ....	54
Figura 3.11 El establecimiento de contacto entre dos asperezas opuestas: a) interferencia geométrica y b) penetración, Glaeser (2010). ....	55
Figura 3.12 Clasificación de las formas en que puede ser determinado un contacto entre asperezas: a) sin ningún cambio en la forma, b) con un cambio en la forma, y c) con generación de desechos, Glaeser (2010). ....	56

Figura 3.13 Representación del esquema del fenómeno de fricción a) Asperezas sin carga y b) Asperezas con carga. ....	57
Figura 3.14 Clasificación de los diferentes procesos de fricción. ....	60
Figura 3.15 Esquema del proceso FSW. ....	61
Figura 3.16 Esquema de la secuencia del proceso FSLW. ....	61
Figura 3.17 Esquema de la presión y el tiempo implicado en los procesos de deformación y unión por difusión. ....	62
Figura 3.18 Algunos ejemplos ilustrativos de la aplicación de la soldadura FSW (todas las fotografías relacionadas con las aeronaves son cortesía de Grupo Airbus, Ottobrunn, Germany and Shinkansen cortesía del Sr. Gilbert Sylva), Mishra et al. (2014). ....	64
Figura 3.19 Algunos ejemplos ilustrativos de la soldadura FSSW aplicados en la industria automotriz (las fotografías cortesía del Dr. Blair Carlson, General Motor), Mishra et al. (2014). ....	65
Figura 3.20 (a) Esquema de las partes principales herramienta para proceso FSW (b) geometrías básicas de la herramienta para soldadura FSW. ....	66
Figura 3.21 Esquema del proceso FSW, Mijalović (2012). ....	70
Figura 3.22 Esquema que muestra la zona de la soldadura y la aledaña a la misma: (A) metal base (MB), (B) zona afectada por calor (ZAC), (C): zona afectada termomecánicamente (ZATM) y (D) zona de agitación (ZA), Mishra et al. (2005). ....	70
Figura 3.23 Esquema general de las principales variables del proceso (dependientes e independientes) que deforman y afectan el flujo de material, y la distribución de la temperatura en el proceso FSW, Colligan y Mishra (2008). ....	74
Figura 3.24 Esquema del proceso FSW: a) operación principal, b) herramienta y c) esquema de la generación de calor durante el proceso FSW Mijajlović et al. (2012). ...	75
Figura 3.25 Esquema de la pérdida del flujo de calor reconocido en la literatura del proceso FSW, Zettler (2008). ....	77

Figura 3.26 Geometría de la herramienta de FSW y el calor generado en las áreas de la herramienta; Q1 = Generación de calor por el hombro de la herramienta, Q2= Generación de calor por el pin de la herramienta y Q3= Generación de calor por la punta del pin de la herramienta, Hattel et al. (2009).....	78
Figura 3.27 El flujo de energía a la pieza de trabajo durante FSW; a) la fuente de energía y su flujo y b) la naturaleza de la generación de calor y su utilización, Mishra et al. (2014).....	79
Figura 3.28 Líneas de flujo a diferentes alturas desde la superficie para un acero AISI304 : a-0.35 mm, b- 1.59 mm y c-2.28 mm, Nandan et al. (2006).....	83
Figura 3.29 Micrografía mostrando un hueco, defecto en soldadura FSW, Leonard et al. (2003).....	86
Figura 3.30 a) Micrografía mostrando un defecto de línea remanente, en soldadura FSW y b) Residuos de óxido presentes en la superficie de las piezas de trabajo a unir Leonard et al. (2003). .....	87
Figura 3.31 a) Micrografía mostrando penetración incompleta, defecto en FSW y b) Fractura generada por penetración incompleta, Leonard et al. (2003). .....	87
Figura 3.32 Esquema del proceso FSSW, Yang et al. (2014).....	89
Figura 3.33 Esquema del proceso FSSW, a) configuración de la junta y dimensiones de las láminas, b) geometría de la herramienta utilizada y c) sección transversal del punto de soldadura mediante proceso FSSW.....	91
Figura 3.34 Proceso de modelado y simulación, Cellier y Kofman (2006).....	92
Figura 3.35 Clasificación de modelos matemáticos válidos para distintas áreas en mecánica. Toro (2007). .....	93
Figura 3.36 Discretización de un objeto a) estructura de maquina fresadora, b) discretización de la estructura de maquina fresadora, c) viga circular y d) discretización de la viga circular, Zhu et al. (2013). .....	96
Figura 3.37 Representación de elementos y nodos. ....	97

Figura 3.38 Avión de combate mallado Rao, (2010).	98
Figura 3.39 Uso del MEF en el desarrollo de proyectos.	98
Figura 3.40 Esquema general de la implementación computacional del método de elemento finito.	100
Figura 3.41 Geometrías de algunos tipos de elementos, Madenci (2015).	101
Figura 3.42 Un resorte lineal con un extremo fijo y una fuerza aplicada en su extremo libre.	103
Figura 3.43 Un resorte lineal típica en un sistema de resortes.	103
Figura 3.44 Mallado Lagrangiano.	108
Figura 3.45 Mallado Euleriano.	109
Figura 3.46 Mallado ALE.	109
Figura 3.47 Ejemplo de dimensiones de Lagrange, Euler y ALE, movimiento de un punto.	111
Figura 3.48 Esquema general del modelo numérico del proceso soldadura por fricción-agitación FSW, Lorrain et al. (2009).	115
Figura 4.1 Diagrama de flujo de la metodología propuesta en esta investigación.	119
Figura 4.2 Esquema de herramienta para unir soldadura por puntos por fricción agitación FSSW en espesor de lámina 1.5 mm.	126
Figura 4.3 a) Modelado geométrico del sistema de sujeción, b) Sistema de sujeción fabricado, c) Montaje sistema de sujeción en prensa situada en la mesa de trabajo del centro de maquinado de alta velocidad.	127
Figura 4.4 Centro de maquinado CNC marca Bridgeport modelo VMC 760 XP <sup>3</sup> en la cual se realizaron las soldaduras.	128
Figura 4.5 a) Dinamómetro de cuarzo de tres componentes, b) Amplificador de carga	129
Figura 4.6 Esquema de adquisición de datos	130
Figura 4.7 Termopar tipo K	131

Figura 4.8 Tarjeta de adquisición de datos.....	131
Figura 4.9 Microscopio Óptico de platina invertida Marca Axio Zeiss Observer.Z1m	133
Figura 4.10 Microscopio electrónico de barrido Oxford Jeol JSM-6490-LV-15kV ..	134
Figura 4.11 Microdurómetro Instron modelo 402MVD .....	135
Figura 4.12 Maquina MTS Landmark 64725 A .....	136
Figura 4. 13 a) Herramienta en 3D para modelo de proceso FSSW y b) Placas en 3D de aleación de Titanio Ti-6Al-4V.....	137
Figura 4.14 a) Modelo en 3D del proceso de soldadura de punto por fricción agitación (FSSW) y b) mallado estructural definido en las placas a unir.....	139
Figura 4.15 Muestra el diagrama de flujo del desarrollo del modelo de elemento finito del proceso de soldadura FSSW en la plataforma comercial DEFORM™. ....	139
Figura 5.1 Microscopia óptica de metal base de aleación Ti-6Al-4V a) Microscopia óptica. b) Micrografía SEM, microestructura principalmente fase $\alpha$ con fase $\beta$ que se encuentra en los límites de grano y micronalisis químico puntual de las partículas encontradas en la región bifásica donde se muestran los resultados del análisis y c) el espectro EDAX obtenido.....	147
Figura 5.2 Punto de soldadura por proceso FSSW con parámetros de proceso de 500 RPM y 120 mm/min. a) Vista superior de la unión, b) Perfil transversal de la unión.....	148
Figura 5.3 Macrografía de la sección transversal de muestra con parámetros de 500 rpm y 120 mm/min.....	149
Figura 5.4 Micrografías a 200X de las uniones a diferentes parámetros de proceso donde se aprecian las zonas características de la soldadura por fricción, ZA, Zona de Agitación, ZATM, Zona Afectada Termomecánicamente, ZAC, Zona Afectada por el Calor y zona del metal base MB. a) 650 rpm y 90 mm/min, b) 650 rpm y 48 mm/min, c) 800 rpm y 120 mm/min, d) 650 rpm y 90 mm/min.....	150



Figura 5.5 Micrografías a 200X de las uniones a diferentes parámetros de proceso donde se aprecian las zonas características de la soldadura por fricción, ZA, Zona de Agitación, ZATM, Zona Afectada Termomecánicamente, ZAC, Zona Afectada por el Calor y zona del metal base MB. e) 500 rpm y 120 mm/min, f) 438 rpm y 90 mm/min, g) 650 rpm y 90 mm/min, h) 650 rpm y 90 mm/min.....	151
Figura 5.6 Micrografías a 200X de las uniones a diferentes parámetros de proceso donde se aprecian las zonas características de la soldadura por fricción, ZA, Zona de Agitación, ZATM, Zona Afectada Termomecánicamente, ZAC, Zona Afectada por el Calor y zona del metal base MB, i) 650 rpm y 90 mm/min, j) 650 rpm y 132 mm/min, k) 800 rpm y 60 mm/min, l) 500 rpm y 60 mm/min y m) 863 rpm y 90 mm/min.....	152
Figura 5.7 Micrografías obtenidas por MEB de la muestra con 650 rpm y 90 mm/min, a) micrografia donde se observan la zona ZA b) imagen sección transversal del punto de soldadura c) micrografia donde se observan las zonas ZA, ZATM y ZAC y d) micrografia donde se observa la zona del MB.....	153
Figura 5.8 Micrografías obtenidas por MEB de la muestra con 800 rpm y 120 mm/min, a) micrografia donde se observan la zona ZA b) imagen sección transversal del punto de soldadura c) micrografia donde se observan las zonas ZATM y ZAC y d) micrografia donde se observa la zona del MB.....	154
Figura 5.9 Micrografías obtenidas por MEB de la muestra con 500 rpm y 120 mm/min, a) micrografia donde se observan la zona ZA b) imagen sección transversal del punto de soldadura c) micrografia donde se observan las zonas ZATM y ZAC y d) micrografia donde se observa la zona del MB.....	155
Figura 5.10 Micrografías obtenidas por MEB de la muestra con 650 rpm y 132 mm/min, a) micrografia donde se observan la zona ZA b) imagen sección transversal del punto de soldadura c) micrografia donde se observan las zonas ZATM y ZAC y d) micrografia donde se observa la zona del MB.....	155

Figura 5.11 Micrografías obtenidas por MEB de la muestra con 800 rpm y 60 mm/min, a) micrografia donde se observan la zona ZA b) imagen sección transversal del punto de soldadura c) micrografia donde se observan las zonas ZA, ZATM y ZAC y d) micrografia donde se observa la zona del MB.....	156
Figura 5.12 Micrografías obtenidas por MEB de la muestra con 863 rpm y 90 mm/min, a) micrografia donde se observan la zona ZA b) imagen sección transversal del punto de soldadura c) micrografia donde se observan las zonas ZA, ZATM y ZAC y d) micrografia donde se observa la zona del MB.....	156
Figura 5.13 Microdureza en las muestras con parámetros de proceso de 500 rpm con 120 y 60 mm/min y 438 rpm con 90 mm/min, donde se observa la distribución de los valores obtenidos en las zonas del MB, ZAC, ZATM y ZA.....	158
Figura 5.14 Microdureza en las muestras con parámetros de proceso de 650 rpm con 90, 48 y 132 mm/min, donde se observa la distribución de los valores obtenidos en las zonas del MB, ZAC, ZATM y ZA.....	159
Figura 5.15 Microdureza en las muestras con parámetros de proceso de 800 rpm y 60 mm/min, 800 rpm y 120 mm/min y 863 rpm y 90 mm/min donde se observa la distribución de los valores obtenidos en las zonas del MB, ZAC, ZATM y ZA.....	160
Figura 5.16 Prueba de tensión, a) Muestra montada para realizar prueba de tensión y b) probeta presento modo de falla nugget pull-out.....	161
Figura 5.17 Gráfico de la relación a la tracción de las uniones soldadas con respecto al número de experimentos desarrollados.....	162
Figura 5.18 Medición de temperatura (°C) durante el proceso FSSW.....	163
Figura 5.19 Temperatura (°C) de las uniones a 438 rpm y 500 rpm con diferentes valores de velocidad de penetración donde se aprecia los valores alcanzados.....	164
Figura 5.20 Temperatura (°C) de las uniones a 650 rpm con diferentes valores de velocidad de penetración donde se aprecia los valores alcanzados.....	165

Figura 5.21 Temperatura (°C) de las uniones a 800 rpm y 863 rpm con diferentes valores de velocidad de penetración donde se aprecia los valores alcanzados.....	166
Figura 5.22 Fuerza de penetración de la uniones a 438 rpm y 500 rpm con diferentes valores de velocidad de profundidad donde se aprecia los valores alcanzados.....	167
Figura 5.23 Fuerza de penetración de la uniones a 650 rpm con diferentes valores de velocidad de profundidad donde se aprecia los valores alcanzados.....	168
Figura 5.24 Fuerza de penetración de la uniones a 800 rpm y 863 rpm con diferentes valores de velocidad de profundidad donde se aprecia los valores alcanzados.....	169
Figura 5.25 a) Modelo tridimensional del proceso de soldadura FSSW, b) Imagen de las láminas donde se observa el área del mallado más fino en la zona de contacto.....	170
Figura 5.26 a) Modelo tridimensional del pinto de soldadura, b) Imagen del punto de soldadura generado mediante el proceso FSSW .....	171
Figura 5.27 Distribución de temperaturas generadas durante el proceso FSSW en la unión con parámetros de 650 rpm y 90 mm/min.....	172
Figura 5.28 Temperaturas de los modelos a 500 y 438 rpm con diferentes valores de velocidad de profundidad donde se aprecia los valores alcanzados. a) 500 rpm con 60 mm/min, b) 500 rpm con 120 mm/min y c) 438 rpm con 90 mm/min.....	174
Figura 5.29 Temperaturas de los modelos a 650 rpm con diferentes valores de velocidad de profundidad donde se aprecia los valores alcanzados. a) 650 rpm y 90 mm/min, b) 650 rpm y 48 mm/min y c) 650 rpm y 132 mm/min.....	175
Figura 5.30 Temperaturas de los modelos a 800 y 863 rpm con diferentes valores de velocidad de profundidad donde se aprecia los valores alcanzados. a) 800 rpm y 120 mm/min, b) 800 rpm y 60 mm-min-1 y c) 863 rpm y 90 mm/min.....	176
Figura 5.31 Simulación del esfuerzo efectivo en la unión de los puntos de soldadura con los parámetros a 500 rpm y 438 rpm con diferentes velocidades de penetración donde se aprecia los valores alcanzados en a) 500 rpm y 120 mm/min, b) 500 rpm y 60 mm/min y c) 438 rpm y 90 mm/min.....	177

Figura 5.32 Simulación del esfuerzo efectivo en la unión de los puntos de soldadura con los parámetros a 650 rpm con diferentes velocidades de penetración donde se aprecia los valores alcanzados en a) 650 rpm y 48 mm/min, b) 650 rpm y 90 mm/min, y c) 650 rpm y 132 mm/min.....	178
Figura 5.33 Simulación del esfuerzo efectivo en la unión de los puntos de soldadura con los parámetros a 800 y 863 rpm con diferentes valores de velocidad de penetración donde se aprecia los valores alcanzados en a) 800 rpm con 60 mm/min, b) 800 rpm con 120 mm/min, y c) 863 rpm con 90 mm/min.....	179
Figura 5.34 Resultados de FE de la deformación efectiva en la unión mediante el proceso de soldadura FSSW a 500 rpm y 438 rpm con diferentes valores de velocidad de penetración donde se aprecia los valores alcanzados. a) 500 rpm con 60 mm/min, b) 500 rpm con 120 mm/min y c) 438 rpm con 90 mm/min.....	180
Figura 5.35 Resultados de FE de la deformación efectiva en la unión mediante el proceso de soldadura FSSW a 650 rpm con diferentes valores de velocidad de penetración donde se aprecia los valores alcanzados. a) 650 rpm con 48 mm/min, b) 650 rpm con 90 mm/min y c) 650 rpm con 132 mm/min.....	180
Figura 5.36 Resultados de FE de la deformación efectiva en la unión mediante el proceso de soldadura FSSW a 800 rpm y 863 rpm con diferentes valores de velocidad de penetración donde se aprecia los valores alcanzados. a) 800 rpm con 60 mm/min, b) 800 rpm con 120 mm/min y c) 863 rpm con 90 mm/min.....	181
Figura 5.37 Flujo del material en el punto de soldadura mediante el proceso de soldadura FSSW, a) Imagen del punto de soldadura generado mediante el proceso FSSW, b) representación del flujo del material en la unión por MEF y c) huella de la herramienta mediante MEF.....	182
Figura 5.38 Representación en el modelo tridimensional de la geometría real de la herramienta, a) vista alámbrica del hombro y las láminas a unir y b) modelo	

tridimensional donde se observa la herramienta a la profundidad de 2.5 mm en las láminas.....183

Figura 5.39 Gráfica de los resultados numéricos y experimentales de las máximas temperaturas registradas durante la unión de las láminas de aleación de Ti-6Al-4V...185

## Índice de Tablas

Tabla 3.1 Propiedades de algunos metales más importantes en el sector industrial, Crowley (2003). .....	34
Tabla 3.2 Composición química (% e.p.) de aleación de titanio Ti-6Al-4V, Nandan et al. (2008). .....	36
Tabla 3.3 Propiedades mecánicas de la aleación de titanio Ti-6Al-4V, Donachie (2000). .....	36
Tabla 3.4 Clasificación de las aleaciones de titanio más importantes, Donachie (2000). .....	37
Tabla 3.5 Rangos y efecto de algunos elementos utilizados en aleaciones de titanio, Donachie (2000). .....	39
Tabla 3.6 Ventajas y desventajas de procesos de soldadura utilizados para unir titanio.45	
Tabla 3.7 Resumen de trabajos en uniones en aleaciones de titanio mediante proceso FSW encontrados en la literatura entre 2003 a 2015. ....	47
Tabla 3.8 Resumen de trabajos en uniones en aleaciones de titanio mediante proceso FSW encontrados en la literatura entre 2003 a 2015 (Continuación Tabla 3.7 ). .....	48
Tabla 3.9 Material de la herramienta, geometrías y parámetros de proceso utilizados en FSW para aleaciones de titanio. ....	68
Tabla 3.10 Principales variables del proceso en la soldadura por fricción agitación. ....	71
Tabla 3.11 Beneficios del proceso FSW. ....	88
Tabla 4.1 Composición química (% e.p.) de aleación Ti-6Al-4V .....	120
Tabla 4.2 Propiedades mecánicas de aleación Ti-6Al-4V .....	120
Tabla 4.3 Valores de los factores en el diseño de superficie central compuesto .....	124
Tabla 4.4 Diseño de experimentos para láminas de espesor 1.5 mm.....	125
Tabla 4.5 Propiedades físicas de PCBN.....	126

Tabla 4.6 Características de la máquina CNC Bridgeport VMC 760XP <sup>3</sup> .....	128
Tabla 4.7 Condiciones generales del proceso utilizados para llevar a cabo el modelo de elemento finito. ....	138
Tabla 4.8 Parámetros implementados en el modelo de elemento finito del proceso FSSW. ....	138
Tabla 4.9 Constantes de ecuación de Johnson-Cook utilizadas en el desarrollo del modelo numérico del proceso de soldadura FSSW.....	140
Tabla 5.1 Imágenes de la uniones de los experimentos soldadas a diferentes parámetros de proceso mediante proceso FSSW .....	143
Tabla 5.2 Continuación, Imágenes de la uniones de los experimentos soldadas a diferentes parámetros de proceso mediante proceso FSSW .....	144
Tabla 5.3 Continuación, Imágenes de la uniones de los experimentos soldadas a diferentes parámetros de proceso mediante proceso FSSW .....	145
Tabla 5.4 Continuación, Imágenes de la uniones de los experimentos soldadas a diferentes parámetros de proceso mediante proceso FSSW .....	146
Tabla 5.5 Parámetros constantes durante los experimentos.....	146
Tabla 5.6 Diferencia en resultados experimentales y numéricos del historial de temperatura .....	184

# Capítulo 1

## Introducción

Los procesos de manufactura son utilizados en la transformación de la materia en productos o artículos con valor agregado, una operación de ensamble une dos o más componentes en forma permanente o semipermanente para crear una nueva entidad llamada ensamble o subensamble. Los procesos de unión permanente incluyen la soldadura y el pegado con adhesivos, estos procesos forman una unión entre componentes que no pueden deshacerse fácilmente. Los métodos de ensamble semipermanente o conocidos también como ensamble mecánico o unión mecánica, aseguran dos o más partes en una unión que puede desarmarse cuando convenga; el uso de tornillos, pernos, tuercas, sujetadores roscados, remaches, ajustes a presión y encajes de expansión son métodos tradicionales importantes dentro de la categoría, Groover (1997).

El método de ensamble semipermanente o unión mecánica es utilizado actualmente en la industria aeroespacial para la fabricación de grandes aviones de carga militar y aeronaves comerciales. Este tipo de uniones presentan defectos importantes que impactan en el decremento de la calidad del producto ensamblado, dando origen a la iniciación de grietas y corrosión en los orificios que se maquinan para realizar el ensamble mecánico, John et al (2003).



La industria aeronáutica representa un evidente ejemplo del gran avance científico y tecnológico alcanzado en el último siglo. Las aeronaves vuelan a más altura, con mayor velocidad y son capaces de transportar un mayor número de pasajeros. Todos los seres humanos son potenciales usuarios de la aviación y cada vez son más las personas que se transportan por esta vía. Es así cómo en los últimos 20 años, se ha duplicado el número de personas que emplea este medio de transporte y los pronósticos de la aviación internacional muestran un incremento del tránsito aéreo, Sánchez (2008).

El avance y el augurio en el incremento de los posibles usuarios en la industria aeronáutica, ha dado origen a un creciente interés en la eliminación de las uniones mecánicas para la sujeción de los componentes, debido a que impacta fuertemente en la reducción de peso y costos de fabricación.

Las notables características de rendimiento de los vehículos aeroespaciales modernos son en gran medida, al resultado de los materiales de alto rendimiento y la tecnología de fabricación tanto en los fuselajes como en los sistemas de propulsión, por esta razón la industria aeronáutica ha promovido la utilización de nuevos materiales vinculados con la disminución del peso, el incremento de rendimiento, mayor resistencia a los esfuerzos y a la corrosión, pero sobre todo, la resistencia al calor, característica muy necesaria en los aviones veloces, donde el calentamiento de la estructura debido a la fricción del aire es importante. En este sentido el titanio es un material que ha despertado mayor interés en el sector aeronáutico, Mouritz (2012)

En las aleaciones de titanio, la utilización de procesos de soldadura por fusión presentan defectos tales como microestructuras frágiles, porosidad, distorsión y esfuerzos residuales. Para evitar la presencia de los defectos asociados con la fusión y solidificación en la unión de materiales, el proceso de soldadura por fricción parece ser muy conveniente en la unión de aleaciones de titanio, Yulian et al (2000).

En investigaciones previas, Campbell (2011) describe el proceso de soldadura por fricción agitación (FSW, por sus siglas en inglés) como un proceso de estado sólido que no alcanza las temperaturas de fusión. Esto da como resultado una reducción en la distorsión y experimentación de esfuerzos residuales y el calor debido a la fusión durante el proceso convencional de soldadura por arco metálico con gas protector (GMAW, por sus siglas en inglés). El proceso FSW ha sido ampliamente desarrollado y aceptado en la industria automotriz y aeroespacial para las aleaciones de aluminio, antes consideradas como no soldables en aplicaciones aeronáuticas y aeroespaciales debido a las pobres propiedades en la zona de fusión.

La soldabilidad de los materiales tiene un rol fundamental en el desarrollo y el uso de los mismos. La aplicación de diversos procesos de soldadura sobre los distintos materiales es un área de fuerte interés tecnológico. El titanio y sus aleaciones han demostrado excelentes propiedades mecánicas, físicas y una alta resistencia a la corrosión. Algunos datos significativos y/o beneficios importantes que ofrecen las aleaciones de titanio son las siguientes, Mishra et al. (2014):

- La densidad del titanio es sólo alrededor del 60% de las aleaciones de acero o materiales base níquel.
- Las aleaciones de titanio pueden tener resistencia a la fractura comparable a las aleaciones base hierro, tales como A286, o aleaciones base cobalto, tales como L605.
- Las aleaciones comerciales de titanio son útiles a temperaturas hasta aproximadamente 538°C a 595°C, dependiendo de la composición.
- El titanio es excepcionalmente resistente a la corrosión. A menudo excede la resistencia del acero inoxidable en la mayoría de los entornos.
- Tiene excelente resistencia a la corrosión en el cuerpo humano, en aplicaciones biomédicas.

- El titanio se puede unir por medio de adhesivos, elementos de fijación, unión por difusión, soldadura por fusión y recientemente se ha mostrado que puede unirse con excelentes resultados a través del proceso FSW.

El titanio se utiliza a menudo para disminuir peso mediante la sustitución de las aleaciones de acero más pesadas en la estructura del avión y la sustitución de las superaleaciones en las partes de baja temperatura en las turbinas de gas. El titanio también se usa en lugar de aluminio, cuando los requerimientos de temperaturas exceden las capacidades del aluminio, o en las áreas donde la fatiga o corrosión ha sido un problema recurrente, Campbell (2011).

El titanio es cada vez más importante como un material para emplearlo en el fuselaje debido a su excelente resistencia a la fatiga, su capacidad a soportar altas temperaturas y su resistencia a la corrosión. Las aleaciones de titanio comprenden aproximadamente el 42% de la estructura de los aviones de combate F-22, Cotton et al. (2002).

La presión sobre los fabricantes del sector aeronáutico por mejorar en forma continua la seguridad en la fabricación, mientras que al mismo tiempo buscan reducir los costos y el impacto ambiental, afecta dramáticamente el diseño y la selección de las partes para el mismo. Lograr estas metas requiere la combinación de materiales de alta tecnología, de diseños innovadores y de procesos de manufactura avanzados. La soldadura por fricción suele emplearse en volúmenes cilíndricos como pueden ser los ejes de transmisión, turbocompresores o las válvulas de coches, camiones o trenes, turbinas generadoras de energía y los fuselajes, Campbell (2006).

En el ámbito industrial, el interés está relacionado con el diseño y desarrollo de nuevos sistemas, máquinas, sus mecanismos de control y el estudio de nuevos procesos de fabricación avanzada. En los últimos años se ha desarrollado una gran actividad

relacionada con nuevas tecnologías de fabricación, dentro de la cual, el estudio, desarrollo y optimización del proceso de soldadura por fricción ha sido uno de los ejes principales en los que se soporta la actividad.

El garantizar la calidad de los productos y los procesos de fabricación es una de las problemáticas primordiales de la industria, la realización de los ensayos y pruebas que deben efectuarse para probar su fiabilidad ante diferentes eventualidades son muy costosos, y requieren con frecuencia largos periodos de tiempo para llevar a cabo cada fase que determina su factibilidad. Los modelos numéricos en la validación experimental son una técnica de estudio que reduce los costos drásticamente. El método por elemento finito (MEF en español y FEM, por sus siglas en inglés) es un método de cálculo numérico por aproximaciones sucesivas para la resolución de ecuaciones derivadas parciales.

El objetivo del presente trabajo es el desarrollo de un modelo numérico para disponer de un modelo de simulación del proceso de soldadura FSSW para determinar los valores aceptables de los parámetros de proceso para la industria aeronáutica mediante el perfil térmico presente en el proceso. Se presentan los resultados del trabajo experimental realizado en un centro de maquinado de alta velocidad con valores de velocidad de giro entre 438-863 RPM y velocidad de penetración entre 48-132 mm/min que se obtuvieron mediante un diseño de experimentos central compuesto, el cual está estructurado con 4 puntos del cubo, 5 puntos centrales y 4 puntos axiales. Teniendo una distancia de las corridas axiales al centro del diseño ( $\alpha$ ) con valor de 1.41421. Las pruebas se realizaron aleatoriamente, los resultados mostraron que la combinación de los valores en los parámetros y la geometría de la herramienta dan como resultado uniones de calidad, y las mediciones de microdureza en las zonas de soldadura han mostrado una mayor dureza respecto al metal base.

Después de obtener la combinación de parámetros para soldar la aleación de titanio Ti-6Al-4V mediante el proceso FSSW se utilizó un paquete comercial de elemento finito con el propósito de analizar el perfil térmico y establecer los valores de las temperaturas y la distribución del flujo del material generado durante el proceso de soldaduras FSSW.

# Capítulo 2

## Planteamiento del Problema

### 2.1. Antecedentes del problema

La industria aeronáutica continuamente busca mejorar las aeronaves, debido al alto costo de los combustibles y la seguridad de los tripulantes. Las aleaciones de titanio, han despertado un gran interés por su atractiva combinación de propiedades, las metodologías clásicas de unión de estos materiales no son adecuadas para la aplicación aeronáutica; por lo que el proceso de soldadura fricción-agitación, es una fuerte opción para la unión de aleaciones de titanio. Actualmente, el estudio del proceso FSW para las aleaciones de titanio es muy escaso, por lo que es importante promover proyectos de investigación que cubran las demandas de la industria en esta área.

### 2.2. Descripción de la problemática en la unión de aleaciones de titanio

Los procesos de soldadura en estado sólido son más viables que los procesos de soldadura convencionales para la unión de aleaciones de titanio ya que éste tiende a reaccionar con los flujos y los gases utilizados, incluyendo la soldadura de gas, arco metálico protegido, núcleo de fundente y soldadura por arco sumergido.

La aleación Ti-6Al-4V se considera que tiene buena soldabilidad a través de los procesos de soldadura por fusión, tales como arco, láser o haz de electrones. Sin embargo, estos procesos de soldadura producen tamaños de grano grande, precipitación de martensita que pueden producir efectos adversos sobre las propiedades mecánicas de las soldaduras. Los procesos de soldadura en estado sólido, tales como el proceso FSW son capaces de retener la integridad de las microestructuras del material y propiedades mecánicas, permitiendo así que puedan ser más comparables a la matriz del material base.

El desarrollo de procesos de soldadura mediante ensayos utilizados en la práctica actual debe ser modificado, ya que esta metodología presenta fuertes limitaciones en cuanto al análisis en la calidad de las uniones, y considerando las necesidades de la tecnología moderna y las exigencias del mercado se requiere utilizar herramientas avanzadas que permitan reducir los tiempos de desarrollo de procesos y aumento en la calidad de los productos, es por ello que aplicar el método de elemento finito con el apoyo de aproximaciones adecuadas en la complejidad de los procesos de soldadura ayudara a obtener modelos confiables.

### **2.3. Preguntas de investigación**

- ¿Es posible soldar aleación de titanio Ti-6Al-4V mediante el proceso FSSW considerando parámetros de entrada tales como velocidad de rotación, velocidad de penetración y tiempo de sostenimiento?
- ¿Es posible predecir el perfil de temperatura al unir láminas de 1.5 mm de espesor de aleación de titanio Ti-6Al-4V por medio del proceso FSSW a través de la simulación por elemento finito?

- ¿La simulación del proceso FSSW ayudará a identificar el flujo del material generado en el punto de soldadura unido mediante el proceso FSSW en aleación de Ti-6Al-4V?

## **2.4 Hipótesis**

El desarrollo de un modelo de elemento finito del proceso de soldadura por punto por fricción-agitación de la aleación Ti-6Al-4V a través de la selección de los valores de los parámetros de velocidad de rotación, velocidad de penetración y tiempo de sostenimiento, permitirá la estimación del mapa térmico y la distribución del flujo del material de la unión mediante el análisis.

## **2.5 Objetivo**

### **2.5.1. Objetivo general**

Desarrollar la simulación numérica del proceso de soldadura por punto por fricción-agitación para obtener el perfil de temperatura y la distribución del flujo del material con el fin de utilizar el modelo como una herramienta para analizar las zonas generadas durante el proceso, lo cual permitirá evaluar la unión adecuada.

### **2.5.2. Objetivos específicos**

- Definir y estudiar el impacto de las variables de entrada y los valores que se aplicarán para producir uniones adecuadas en la aleación Ti-6Al-4V.
- Evaluar las soldaduras mediante el comportamiento metalúrgico y caracterización microestructural de la aleación Ti-6Al-4V unida por el proceso FSSW.



- Evaluar las propiedades mecánicas de las soldaduras mediante ensayos de tensión y microdureza.
- Obtener el perfil de temperatura generado durante el proceso FSSW en aleación Ti-6Al-4V.
- Establecer una simulación mediante elemento finito utilizando los resultados experimentales, permitiendo estudiar la influencia de los parámetros del proceso FSSW en la evolución microestructural de la aleación Ti-6Al-4V.
- Validar los resultados experimentales con la simulación generada.
- Seleccionar la ecuación constitutiva que represente el comportamiento del flujo del material.
- Definir los parámetros de proceso para realizar uniones adecuadas de la soldadura por punto por fricción-agitación de aleación de titanio Ti-6Al-4V.

## **2.6 Justificación**

Con el surgimiento de nuevos materiales es necesario el requerimiento de nuevos procesos de manufactura, éstos pueden permitir el procesamiento de materiales existentes con mejores resultados superando los procesos actuales.

La presente investigación se centra en el desarrollo de un modelo de simulación del proceso FSSW, aplicado en uniones de aleación de titanio alfa-beta ( $\alpha/\beta$ ), denominada Ti-6Al-4V. Para esto, se llevará a cabo la experimentación pertinente para elaborar el modelo de simulación del proceso y obtener el comportamiento térmico y mecánico del mismo. Asimismo, se determinarán los parámetros del proceso y sus

efectos, como la velocidad de rotación de la herramienta, la velocidad de penetración y el tiempo de sostenimiento, también se analizará el calor generado durante el proceso variando diferentes parámetros para efectuar la soldadura por punto por fricción-agitación durante la investigación. El modelo de simulación se realizará en un software de elemento finito comercial DEFORM™, utilizando la estructura geométrica real de los elementos que componen el sistema y el comportamiento constitutivo del material. Los principales resultados que se obtendrán será el historial térmico del proceso; la determinación de propiedades mecánicas por medio de ensayos de tensión y microdureza de las muestras; la caracterización microestructural para obtener la distribución de la zona de agitación, la zona afectada termomecánicamente, la zona afectada por el calor y la zona del metal base, además de la distribución del flujo del material. Estos resultados se utilizarán para validar el modelo de simulación del proceso. Con esto se establecerá la relación entre los parámetros y las respuestas en la calidad de las uniones que conformarán la simulación del proceso mencionado.

Esta investigación permitirá evaluar el proceso FSSW para mejorar la calidad en la unión de la aleación Ti-6Al-4V la cual ofrece importantes beneficios en la industria aeronáutica. Para lograr esto es necesario el desarrollo y aplicación de metodologías que permitan llegar a herramientas que ayuden a elegir las mejores opciones para procesar los materiales y de esta manera obtener resultados de alto nivel, permitiendo además a la industria aeronáutica mejorar la calidad de los productos a través de la aplicación de nuevos procesos de manufactura apoyándose en la técnica de simulación por elemento finito. La importancia de esta investigación en la ciencia, consiste en obtener la relación que existe entre la calidad de la unión y los parámetros a través de los mapas térmicos y la distribución del flujo del material utilizando la simulación del proceso FSSW.

## **2.7. Limitación de la tesis**

### **2.7.1. Delimitación**

Este trabajo está enfocado en la simulación del proceso FSSW en la unión de la aleación de titanio Ti-6Al-4V mediante el análisis numérico por el método de elemento finito, para analizar la distribución de la temperatura en el punto de la soldadura y la distribución del flujo del material del proceso para que la calidad de la unión sea la adecuada. La experimentación se realizará en un centro de maquinado vertical Bridgeport VMC 760 considerando el tiempo de sostenimiento y variando la velocidad de rotación y la velocidad de penetración.

### **2.7.2. Resultados e Impactos Esperados**

- Desarrollar una metodología para elaborar un modelo de simulación que ayude en el análisis termomecánico de las diferentes zonas de la unión de la aleación Ti-6Al-4V.
- Aportar un modelo para ser utilizado como herramienta de análisis entre el mapa térmico, la distribución del flujo del material y los valores de los parámetros involucrados en el proceso FSSW para predecir el comportamiento de la unión.
- Generar un modelo de simulación local del proceso FSSW que pueda ser modificado a través de las propiedades de los materiales que se requieran evaluar.
- Utilizando el modelo de simulación como herramienta para analizar el mapa térmico y la distribución del flujo del material en la unión, se podrá reducir

los defectos en la unión mediante el proceso FSSW garantizando la calidad en la unión.

- Generación de nuevo conocimiento tecnológico y científico en la aplicación de nuevos procesos de manufactura avanzada.

## **2.8. Estructura de la tesis**

La estructura de este trabajo se desarrolla en 6 capítulos. En el capítulo 1 se plantea los antecedentes del proyecto, así mismo se describe el interés para realizar este trabajo enfocado a la industria aeronáutica.

En el capítulo 2 se describe el planteamiento del problema, los objetivos generales y específicos, la hipótesis y limitaciones del proceso y la aportación de este trabajo.

En el capítulo 3 se presenta el marco teórico y el estado del arte de las aleaciones de titanio y su aplicación en la industria aeronáutica, el proceso FSW y el proceso FSSW detallando los parámetros que tienen mayor importancia en los procesos y se describen los métodos numéricos, haciendo hincapié en el método de elemento finito en los procesos de soldadura por fricción-agitación y el proceso de soldadura por punto por fricción-agitación así mismo el análisis de la distribución de la temperatura.

En el capítulo 4 se detalla la metodología propuesta, presentando como base el diseño de experimentos, continuando con la descripción de las muestras a diferentes parámetros de proceso y mostrando a detalle la caracterización del material y las pruebas mecánicas como microestructurales, terminando con la descripción del desarrollo del modelo. En el capítulo 5 se presentan los resultados obtenidos y la discusión de los

mismos. En el capítulo 6 son presentadas las conclusiones a las que se han llegado en este trabajo y recomendaciones de trabajos futuros.

## Capítulo 3

### Marco Teórico y Estado del Arte

#### 3.1. Aleaciones de titanio y su aplicación en la Industria aeronáutica

##### 3.1.1. Titanio

El titanio es el cuarto elemento más abundante en la corteza de la tierra, con un 0.8% en peso, si bien no es tan frecuente su existencia en concentraciones que hagan económicamente viable su extracción. Está presente en numerosas rocas ígneas y en los sedimentos derivados de ellas, y también en muchos silicatos reemplazados al silicio. Los minerales que muestran una mayor concentración de este metal son el rutilo ( $\text{TiO}_2$ ) y la ilmenita ( $\text{FeO} \cdot \text{TiO}_2$ ).

El titanio fue descubierto por el sacerdote y mineralogista inglés William Gregor en 1791. En 1887 Nilson y Pettersson obtuvieron una muestra impura del titanio. Se obtuvo una muestra pura de titanio en el año 1910, cuando M. A. Hunter calentó una muestra de sodio y el compuesto  $\text{TiCl}_4$  en una bomba de acero y redujo el cloruro. Los primeros productos comerciales de fábrica fueron producidos alrededor de 1950. La producción del metal ha crecido en un índice anual del 8%. La industria aeroespacial era el mercado principal para el titanio durante los primeros años.

En 1937 el doctor Wilhelm Kroll, en asociación con Siemens y Halske, desarrolló un proceso para la obtención de titanio consistente en la reducción de compuestos tetracloruro de titanio con magnesio molido, en un a atmósfera de argón

para evitar la oxidación. Este fue el primer proceso que permitió la obtención de cantidades apreciables de titanio puro, y se sigue utilizando mayoritariamente en la actualidad. Otro método, desarrollado con posterioridad, se basa en la purificación del titanio mediante descomposición con yodo, pero es poco usado industrialmente, y se utiliza básicamente para la preparación de titanio de muy alta pureza para investigación, Roza (2008). En la Tabla 3.1 se describen las propiedades de algunos metales.

El titanio se caracteriza por su excelente resistencia a la corrosión y la resistencia a altas temperaturas, desde el punto de vista industrial el titanio y sus aleaciones presentan propiedades importantes con respecto al aluminio y sus aleaciones, el acero y el acero inoxidable. Las propiedades de cada uno de estos materiales dependen de la composición final de la aleación y del tipo de tratamiento térmico llevado a cabo. Cabe mencionar que la razón entre la resistencia y el peso es un parámetro significativo durante el diseño de un componente y que a la vista de esta igualdad de peso, el titanio es tres veces más resistente que un acero, Crowley (2003).

Tabla 3.1 Propiedades de algunos metales más importantes en el sector industrial, Crowley (2003).

<b>Material</b>	<b>Peso</b>	<b>Resistencia</b>	<b>Resistencia/Peso</b>	<b>Indice de corrosión</b>	<b>Vida estimada *</b>
Titanio	1,00	1,00	1,00	1,00	Ilimitada
Aluminio	0,57	0,29	0,51	0,36	2 años
Acero	1,67	0,59	0,35	0,06	1 año
Acero Inoxidable	1,67	0,59	0,35	0,31	200 años

### **3.1.2. Propiedades físicas, químicas y mecánicas**

El titanio puro es del color de la plata; hasta los 895°C permanece en la forma alotrópica  $\alpha$ , con una estructura hexagonal compacta (hcp), la fase de baja temperatura,

y por encima de dicha temperatura pasa a la forma alotrópica  $\beta$ , con una estructura cúbica centrada en el cuerpo (bcc), ilustradas en la Figura 3.1.

Su densidad es de  $4.5 \text{ g/cm}^3$  que es prácticamente la mitad de la de los aceros y el doble de la del aluminio. El titanio se destaca por su alto punto de fusión que es de  $1668^\circ\text{C}$ . También son destacables su baja capacidad térmica, comparable a la del acero inoxidable, y sus bajos coeficientes de conductividad y dilatación térmica.

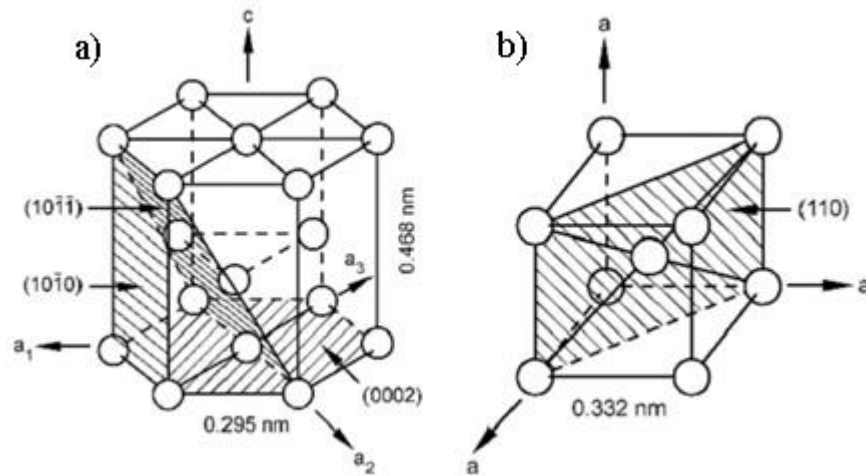


Figura 3.1 Estructuras cristalinas presentes en el titanio: a) fase  $\alpha$  de baja temperatura y b) fase  $\beta$  de alta temperatura indicando los valores de los parámetros de red y los índices de Miller de los planos de mayor densidad para cada estructura.

Debido a su afinidad por el oxígeno, se cubre de una finísima película de óxido a la temperatura ambiente. Gracias a esta película delgada, el titanio es resistente a la corrosión, tanto en ambientes salinos como en contacto con soluciones ácidas. Esta característica la comparte con el aluminio, si bien la protección que proporciona la película protectora del titanio es muy superior a la del aluminio.

La reactividad del titanio depende fuertemente de la temperatura. A altas temperaturas, la reactividad del titanio aumenta en gran medida. Esta propiedad es especialmente visible con el oxígeno y otros gases a altas temperaturas. Por encima de



los 649°C, la resistencia a la oxidación decrece rápidamente y tanto el titanio como sus aleaciones deben protegerse del aire debido a su posible combinación con el oxígeno. La presencia de este elemento y del nitrógeno del aire fragiliza el metal.

Las propiedades mecánicas del titanio dependen de su pureza. El titanio puro es muy dúctil y su resistencia a la tracción es relativamente baja. Se puede elevar su resistencia, a expensas de disminuir su plasticidad, disolviendo otros elementos en la red del titanio. El oxígeno y el nitrógeno, cuando están disueltos en el titanio, proporcionan una mayor resistencia, lo que no ocurre cuando se encuentran en forma de óxidos. El orden de magnitud de la solubilidad intersticial de estos elementos en el titanio es mayor que en otros metales lo que hace que la influencia de estos elementos en las propiedades mecánicas sea notable, Molera (1990).

Se definen varios grados de titanio comercialmente puro en función del contenido de elementos como: oxígeno, nitrógeno, carbono e hidrógeno que controlan su resistencia y fragilidad, y del hierro, que controla su resistencia a la corrosión. Los valores típicos de la composición química y las propiedades mecánicas de la aleación de titanio Ti-6Al-4V están dados en la Tabla 3.2 y Tabla 3.3 respectivamente.

Tabla 3.2 Composición química (% e.p.) de aleación de titanio Ti-6Al-4V, Nandan et al. (2008).

<b>C</b>	<b>O</b>	<b>N</b>	<b>Fe</b>	<b>Al</b>	<b>V</b>	<b>Ti</b>
0.019	0.19 máx	0.016	0.25 máx	6.2	3.87	Balance

Tabla 3.3 Propiedades mecánicas de la aleación de titanio Ti-6Al-4V, Donachie (2000).

Ti-6Al-4V	<b>Esfuerzo de Cedencia Mpa</b>	<b>Esfuerzo último a la tensión Mpa</b>	<b>Dureza HRB</b>
	827	896	33

### 3.1.3. Características generales de las aleaciones de titanio

Gracias a la transformación alotrópica del titanio existe la posibilidad de obtener aleaciones con microestructuras de tipo  $\alpha$ ,  $\beta$  o mixta  $\alpha/\beta$ , lo cual permite la posibilidad de aprovechar diferentes tipos de tratamientos térmicos para modificar los constituyentes microestructurales y las propiedades mecánicas.

El titanio puede formar soluciones sólidas y compuestos, con enlace metálico, covalente o iónico. Según la capacidad de los aleantes de estabilizar la fase  $\alpha$  o  $\beta$ , se definen tres tipos de aleaciones de titanio: las aleaciones de tipo  $\alpha$ , aleaciones de tipo  $\alpha/\beta$  y aleaciones de tipo  $\beta$ . Las aleaciones de tipo  $\alpha/\beta$  se suelen clasificar a su vez en casi- $\alpha$ , cuando tiene una estructura esencialmente  $\alpha$  a temperatura ambiente, y casi- $\beta$ , cuando la estructura a temperatura ambiente es principalmente  $\beta$ . En la Tabla 3.4 se muestra la clasificación de las aleaciones de titanio más importantes comercialmente.

Tabla 3.4 Clasificación de las aleaciones de titanio más importantes, Donachie (2000).

Aleaciones de titanio	
Tipo $\alpha$	Ti-5Al-2.5Sn
Cerca $\alpha$	Ti-5Al-6Sn-2Zr-1Mo-0.2Si, Ti-Al-2Sn-4Zr-2Mo, Ti-8Al-Mo-V
Tipo $\alpha/\beta$	Ti-6Al-4V, Ti-6Al-4V-2Sn, Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo
Cerca $\beta$	Ti-8Mn
Tipo $\beta$	Ti-8Mo-8V-Fe-3Al, Ti-11.5Mo-6Zr-4.5Sn, Ti-13V-11Cr-3Al

- a) **Aleaciones alfa ( $\alpha$ ).** Presentan tenacidad, soldabilidad, alta resistencia a la tensión y a la deformación a altas temperaturas, son aleaciones constituidas por una estructura hexagonal compacta, ya que contienen un número importante de estabilizadores de la fase  $\alpha$ . Su campo de aplicación se extiende a operaciones que se realizan a alta temperatura. Algunas de estas aleaciones contienen pequeñas cantidades de elementos estabilizadores de la fase  $\beta$  y se consideran

aleaciones casi  $\alpha$ , sin embargo, su comportamiento mecánico es muy similar al de las aleaciones  $\alpha$ , Lütjering y Williams (2007).

- b) Aleaciones alfa-beta ( $\alpha$ - $\beta$ ).** Los sistemas  $\alpha$ - $\beta$  contienen uno o más elementos estabilizadores de la fase  $\alpha$ , e. g. aluminio más uno o más elementos estabilizadores de la fase beta  $\beta$ . A consecuencia de esta combinación, es relativamente fácil alcanzar la temperatura de transformación  $\beta$ -transus y por lo tanto la formación homogénea de la fase  $\beta$  durante el calentamiento. Finalmente, durante el enfriamiento una cantidad importante de la fase  $\beta$  sin transformar se mantiene estable/metaestable a temperatura ambiente. Las propiedades mecánicas de estas aleaciones son definidas durante el procesamiento de fabricación de acuerdo a la cantidad de trabajo en caliente que se suministra a la aleación (proceso termomecánico), seguido por un tratamiento de solución y envejecimiento en donde el tiempo y la temperatura son factores críticos que determinan la microestructura y las propiedades finales de la aleación, Leyens y Paters (2003). Como resultado del proceso de fabricación, las aleaciones  $\alpha$ - $\beta$  pueden ser producidas con 3 tipos de microestructura diferentes:  $\alpha$ -laminar,  $\alpha$ -equiaxial y dúplex ( $\alpha$ -laminar +  $\alpha$ -equiaxial +  $\beta$ ); las cuales tienen un impacto no solo en las propiedades mecánicas de estas aleaciones, sino también en la evolución microestructural durante procesos como soldadura, como se describe más adelante.
- c) Aleaciones Beta ( $\beta$ ).** Estas aleaciones retienen un 100% de la fase beta a temperatura ambiente debido a que los elementos de aleación que las constituyen suprimen la temperatura de transformación  $\beta$ -transus, Lütjering y Williams (2007). La estructura hexagonal compacta de estas aleaciones deriva en ductilidad, tenacidad, baja resistencia a la tensión y excelente formabilidad; sin embargo, por ser una estructura metaestable, bajo condiciones de trabajo en frío o a relativa baja temperatura, una transformación parcial a fase  $\alpha$  se puede llevar a cabo y modificar las propiedades mecánicas originales.

### 3.1.4. Efecto de los aleantes y fases estables

Los elementos que pueden aliarse con el titanio forman una solución sólida. Cuando a un metal se le añade un segundo elemento, los átomos de ambos tipos se ajustan a posiciones que se definen, respectivamente, como soluciones sólidas de sustitución y soluciones sólidas intersticiales. Los elementos con átomos de radio grande formarán mejor una solución sólida de sustitución, por lo que un elemento aleante estabilizará la fase  $\alpha$  o  $\beta$ ; es decir, aquella fase que tenga más solubilidad. En la Tabla 3.5 se muestran los efectos y rangos de algunos elementos utilizados en aleaciones de titanio y en la Figura 3.2 se puede observar de manera general la influencia de los elementos de aleación sobre el diagrama de fase de las aleaciones del titanio.

Tabla 3.5 Rangos y efecto de algunos elementos utilizados en aleaciones de titanio, Donachie (2000).

Elemento en la aleación	% e.p.	Efecto sobre las fases
Aluminio	2-7	Estabiliza alfa
Vanadio	2-20	Estabiliza beta
Molibdeno	2-20	Estabiliza beta
Cromo	2-12	Estabiliza beta
Cobre	2-6	Estabiliza beta
Circonio	2-8	Estabiliza alfa y beta
Silicio		Mejora la resistencia a la fluencia

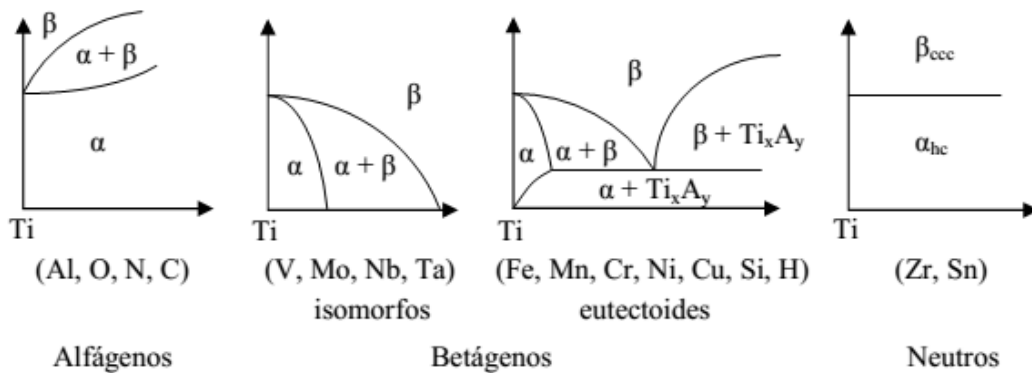


Figura 3.2 Influencia de los elementos sobre el diagrama de fases en las aleaciones de titanio.

Cuando a un metal se le añade un segundo elemento, los átomos de ambos tipos se ajustan a posiciones que se definen, respectivamente, como soluciones sólidas de sustitución y soluciones sólidas intersticiales. Los elementos con átomos de radio grande formarán una mejor solución sólida de sustitución, por lo que un elemento aleante estabilizará la fase  $\alpha$  o  $\beta$ ; es decir, aquella fase que tenga más solubilidad.

La adición de por ejemplo el aluminio estabiliza la fase  $\alpha$  y aumentan la temperatura de transformación, en tanto que el cromo, el molibdeno, el vanadio y otros estabilizan la fase  $\beta$  y reducen la temperatura de transformación. Existen dos tipos de estabilizadores  $\beta$ : los  $\beta$ -estabilizadores isomorfos, que son el vanadio y el molibdeno, y que no forman compuestos intermetálicos con el titanio BCC; y los  $\beta$ -estabilizadores eutécticos que son el hierro Fe, el manganeso Mn, el cromo Cr, el cobalto Co, el níquel Ni, el cobre Cu y el silicio Si, y que forman sistemas eutectoides con el titanio.

En cuanto a las propiedades mecánicas los elementos estabilizadores de la fase  $\alpha$ , como el aluminio, y otros elementos llamados neutros elevan la resistencia del titanio, pero aumentan la fragilidad. Como las aleaciones  $\alpha$  son de una sola fase, no pueden ser tratadas térmicamente a fin de obtener mejoras en las propiedades mecánicas. Por otro lado, los  $\beta$ -estabilizadores eutécticos minimizan la formación de compuestos intermetálicos que puede ocurrir en el servicio a altas temperaturas y resulta en una mejora de las propiedades mecánicas.

### **3.1.5. Metalurgia del titanio**

El titanio en su estado puro posee dos estructuras cristalinas, una estructura cúbica centrada en las caras (bcc) estable a altas temperaturas y denominada como fase  $\beta$ , y una estructura cristalina hexagonal compacta (hcp) estable a temperatura ambiente denominada  $\alpha$ .

La transformación alotrópica de una estructura a otra se lleva a cabo a una temperatura aproximadamente de 882°C y es sensible en gran magnitud a los elementos de aleación que contenga el titanio, Leyens y Paters (2003).

La temperatura de fusión de titanio puro es de 1670°C y la temperatura de transformación en  $\beta \rightarrow \alpha + \beta$  se conoce comúnmente como transus  $\beta$ . En la Figura 3.3 se muestra el diagrama Pseudo-binario de fase  $\beta$  isomorfa, Collings (2013).

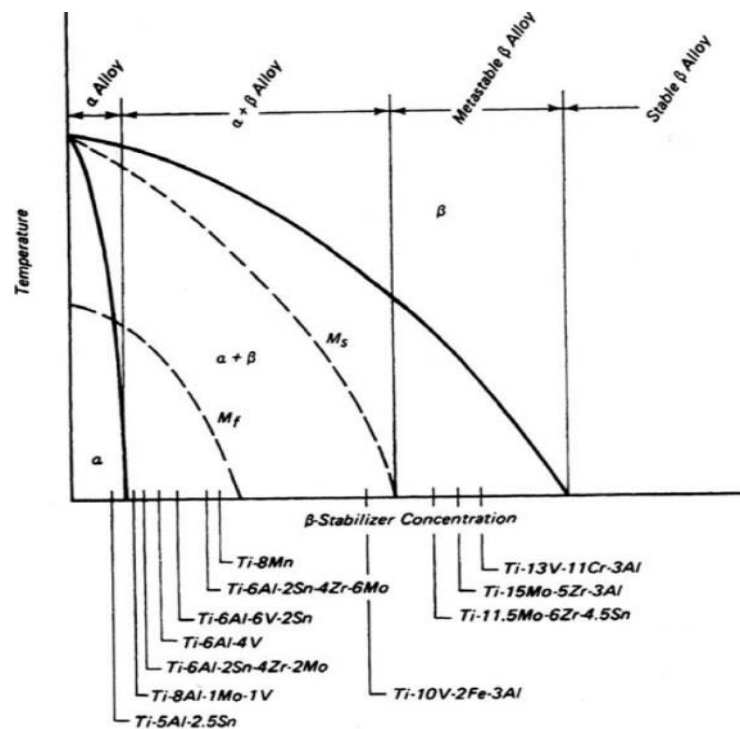


Figura 3.3 Diagrama Pseudo-binario de fase  $\beta$  isomorfa, Collings (2013).

A causa de la presencia de las dos formas alotrópicas del titanio, la transformación  $\alpha/\beta$  se lleva a cabo durante un ciclo térmico cuando se alcanza la temperatura de transformación  $\beta$ -transus. Durante el enfriamiento, la transformación  $\beta/\alpha$  puede ocurrir por la difusión ordenada de los átomos mediante procesos de nucleación y

crecimiento o por una transformación adifuncional martensítica que depende de la velocidad de enfriamiento y la composición de la aleación, Donachie (2000).

Siendo una aleación monofásica, la microestructura del Ti puede ser modificada por factores como procesos de trabajo o tratamientos térmicos. Cuando el Ti es procesado a temperaturas superiores a la temperatura de transformación de  $\alpha \rightarrow \beta$  ( $\beta$ -transus) y enfriado desde este rango a una determinada velocidad, es posible obtener diferentes tipos de microestructuras. En la Figura 3.4 se presentan algunas metalografías características.

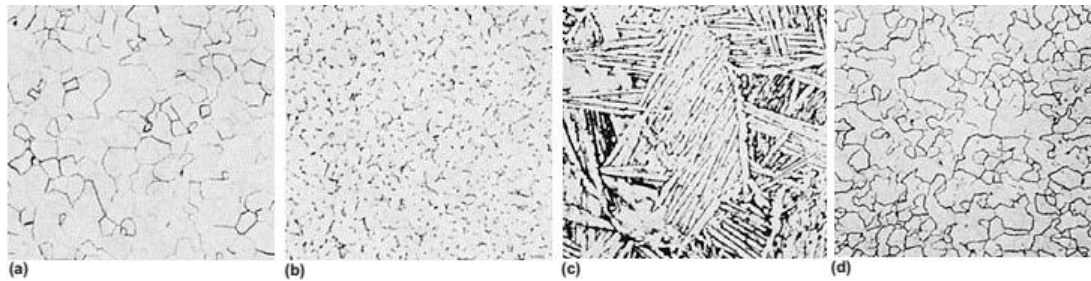


Figura 3.4 Microestructuras típicas de  $\alpha$ ,  $\alpha + \beta$  y  $\beta$ : a) fase  $\alpha$  equiaxial en Ti no aleado después de 1 hora a  $699^{\circ}\text{C}$  ( $1290^{\circ}\text{F}$ ), b)  $\alpha + \beta$  equiaxial, c)  $\alpha + \beta$  auriculares en Ti-6Al-4V y d)  $\beta$  equiaxial en Ti-13V-11Cr-3<sup>a</sup>, Donachie (2000).

### 3.1.6. Aleación Ti-6Al-4V

La aleación Ti-6Al-4V es la más conocida dentro de la clasificación de las aleaciones de titanio denominada  $\alpha + \beta$ , la densidad de las aleaciones comerciales varía entre  $4.37 \text{ g/cm}^3$  y  $4.56 \text{ g/cm}^3$ .

Mediante un enfriamiento relativamente lento por encima de la temperatura de transformación (en la región bifásica  $\alpha + \beta$ ), se forma una estructura Widmanstätten que consiste en placas o láminas paralelas de  $\alpha$  delineadas y confinadas por granos de  $\beta$ , Leyens y Paters (2003). En la Figura 3.5 se muestra la micrografía de la típica estructura Widmanstätten.

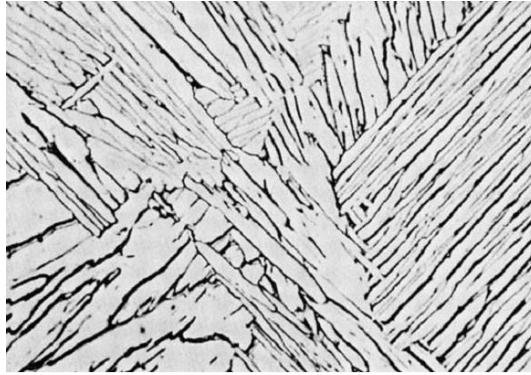


Figura 3.5 Típica estructura Widmanstätten de las aleaciones  $\alpha$ - $\beta$ . La fase  $\alpha$  se observa en color gris claro y la fase  $\beta$  en oscuro, Donachie (2000).

El titanio es cada vez más importante como un material para emplearlo en el fuselaje debido a su excelente resistencia a la fatiga, su capacidad a soportar altas temperaturas y su resistencia a la corrosión. Las aleaciones de titanio comprenden aproximadamente el 42% de la estructura de los aviones de combate F-22, Cotton et al. (2002). La Figura 3.6 muestra la distribución de materiales en un Boeing 787.

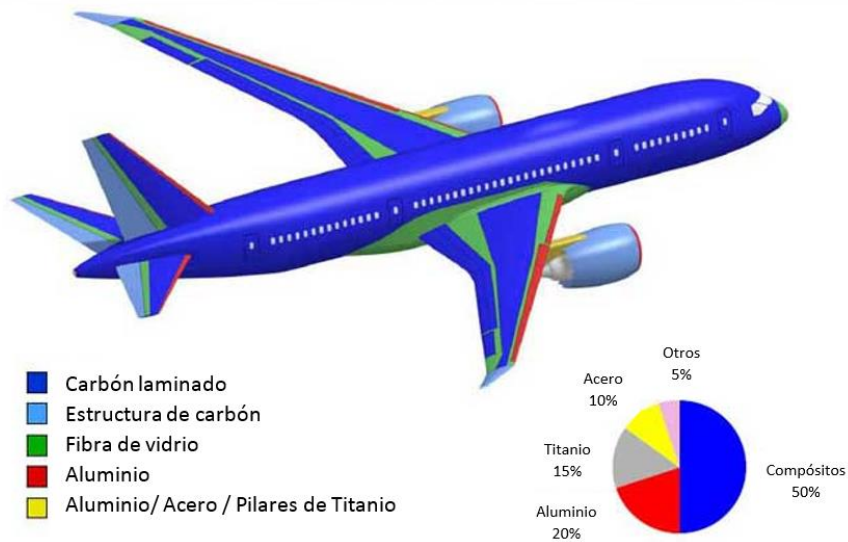


Figura 3.6 Distribución de materiales en un avión Boeing 787, Campbell (2012).



### **3.1.7. Procesos de soldadura aplicados en aleaciones de titanio**

El titanio no aleado y la mayoría de sus aleaciones son fácilmente soldables con los equipos apropiados para la soldadura de aceros inoxidable y aleaciones de níquel. Las aleaciones de titanio están diseñadas para que las uniones soldadas realizadas en ellas conserven sus buenas características mecánicas, como tenacidad y ductilidad.

Un criterio fundamental de la calidad de la soldadura es la aptitud para producir soldaduras libres de defectos que limiten la eficiencia de la soldadura en servicio. Es muy importante la capacidad de resistencia de la soldadura a la formación de las fisuras, factor que se ha relacionado con el proceso de fabricación debido a la generación de tensiones durante dicho proceso. También influyen la resistencia y la tenacidad propias de la aleación.

Los procesos para soldar el titanio pueden clasificarse en siete distintas clases[Lütjering et al. (2003)]:

- La soldadura por arco (TIG, MIG y PAW).
- La soldadura por láser y haz de electrones.
- La soldadura por resistencia.
- La soldadura por fricción.
- La soldadura por difusión.
- La soldadura por forja.
- La soldadura Brazing.

En la industria aeronáutica la naturaleza de los procesos para soldar se caracterizan por la baja producción de unidades, el alto costo unitario, la fiabilidad extrema y las severas condiciones del servicio. Estas características señalan hacia procesos más costosos y con fuentes de calor más concentradas tales como la soldadura con arco-plasma, con láser y con haz de electrones. En la Tabla 3.6 se describen

brevemente las ventajas y desventajas de los procesos de soldadura utilizados para unir titanio en la industria aeronáutica, Méndez y Eagar (2001).

Tabla 3.6 Ventajas y desventajas de procesos de soldadura utilizados para unir titanio.

<b>Soldadura</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Inconvenientes</b>
<b>TIG (GTAW)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Proceso manual o mecanizado.</li> <li>• La geometría compleja puede ser ensamblada.</li> <li>• Capaz de producir soldaduras de alta calidad</li> <li>• Experiencia industrial significativa.</li> <li>• Ninguna salpicadura de la soldadura.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Baja productividad</li> <li>• Inclusiones de tungsteno si el electrodo de tungsteno toca la soldadura</li> </ul>
<b>MIG (GGAW)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Proceso manual o mecanizado.</li> <li>• La geometría compleja puede ser ensamblada.</li> <li>• Una productividad mejor que la soldadura TIG.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Salpicaduras de la soldadura</li> </ul>
<b>PAW</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Más rápido que el TIG.</li> <li>• Posible de dar un solo paso al soldar en materiales hasta 18 mm de grosor.</li> <li>• Mayor inmunidad contra la porosidad del metal que cualquier otro proceso de soldadura por fusión.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Capacidad de posiciones limitadas.</li> </ul>
<b>Haz de electrones</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Proceso automatizado.</li> <li>• Posible de dar un solo paso al soldar en materiales de secciones gruesas.</li> <li>• Experiencia industrial significativa.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Equipo costoso.</li> <li>• Tamaño del componente limitado por el comportamiento del vacío.</li> </ul>
<b>Resistencia</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Proceso automatizado.</li> <li>• Distorsión baja.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Resistencia pobre a la fatiga</li> </ul>
<b>Fricción</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Automatizado completamente</li> <li>• Puede ensamblar las aleaciones disimiles del titanio.</li> <li>• Potencial de ensamblar el titanio a otros metales.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Equipo puede ser costoso.</li> <li>• La inspección puede ser difícil.</li> </ul>
<b>Fricción Lineal</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• No requiere protección de gas.</li> <li>• Exactitud en posición.</li> <li>• Simetría rotatoria.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Equipo costoso</li> </ul>

### **3.1.8. Procesos de soldadura por fricción-agitación aplicados en aleaciones de titanio**

Trap et al. (2003) fueron de los primeros en informar sobre la soldadura por fricción en aleaciones de titanio, trabajaron en espesor de 12 mm en aleaciones Ti-17 y Ti-6Al-4V, reportaron el desarrollo de parámetros, análisis metalúrgicos, pruebas mecánicas, evaluaciones de tratamientos térmicos posteriores a la soldadura, evaluaciones de materiales para las herramientas y distribución térmica, sin embargo, mostraron pocos detalles con respecto a los parámetros de proceso y las herramientas utilizadas.

Otro autor Leinert (2007) proporcionó una excelente revisión del proceso de soldadura por fricción agitación en titanio comercialmente puro CP Ti y las aleaciones de titanio Ti-6Al-4V, Ti-15V-3Cr-3Al-3Sn y  $\beta$  21-S, en su trabajo reportó materiales y diseño de herramientas, parámetros de proceso, microestructuras, microdurezas y propiedades mecánicas.

Ramirez y Juhas (2003) también reportaron sobre la aleación de titanio Ti-6Al-4V  $\beta$  recocido en 6 mm de espesor, los parámetros utilizados fueron los mismos que Leinert (2000), la única diferencia fue que se utilizó una herramienta de material W-25%Re, la microestructura de las soldaduras en ambas condiciones fueron muy similares, consiste en pequeños granos  $\beta$  con finas capas  $\alpha$  en los límites de granos. Esto implica que la evolución microestructural depende de los ciclos térmicos durante el proceso FSW y no de la microestructura base. Esta fue una observación clave de su investigación.

Zhang et al. (2008) trabajaron con la aleación Ti-6Al-4V explorando la microestructura y propiedades mecánicas en placas de 3 mm de espesor, variando la velocidad de rotación utilizando una herramienta fabricada de molibdeno, la velocidad

de penetración se utilizó en valores de 2 mm/min y 60 mm/min y la velocidad de rotación de la herramienta en un rango de 300 a 600 RPM. Se observaron defectos en las uniones, pero se obtuvieron soldaduras libres de defectos a 400 y 500 RPM. El análisis microestructural mostró un tamaño de grano refinado, con evidencia de haber superado la temperatura  $\beta$  transus. La microestructura de la zona afectada por el calor (ZAC) se originó por debajo de la temperatura  $\beta$  transus. En general se encontró que la dureza en la zona de la soldadura o agitación (ZA) era mayor que la del metal base (MB). En la Tabla 3.7 se encuentra el resumen de trabajos publicados en el tema de la unión en las aleaciones de titanio mediante la aplicación del proceso FSW .

Tabla 3.7 Resumen de trabajos en uniones en aleaciones de titanio mediante proceso FSW encontrados en la literatura entre 2003 a 2015.

<b>Autor</b>	<b>Material de la herramienta</b>	<b>Material de la pieza de trabajo</b>	<b>Geometría y dimensiones de la herramienta</b>	<b>Parámetros de proceso</b>
Ramirez y Juhas (2003)	CP W	Ti-6Al-4V	-	275 rev min <sup>-1</sup>
Lee et al.(2005)	TiC	CP Ti	-	1,100 rev min <sup>-1</sup> ; 500 mm min <sup>-1</sup> ;
		Timetal 21S	-	200 rev min <sup>-1</sup> ; 50-300 mm min <sup>-1</sup> ;
Reynolds et al.(2005)	W-25 % Re			275 rev min <sup>-1</sup> ; Up to 100 mm min <sup>-1</sup> ;
Lienert et al. (2007)	CP W	CP Ti, Ti-6Al-4V, Ti-15V- 3Cr-3Al-3Sn	LP: 6.4 mm; DP:7.9 mm; DH:15 mm;	
Pilchak et al. (2007a)	W-Re	Ti-6Al-4V	LP: 1.27 mm; DP:5.1 mm; DH:19 mm;	100 rev min <sup>-1</sup> ; 4 ipm;
Pilchak et al. (2007b)	W-Re	Ti-6Al-4V	LP: 1.27 mm; DP:5.1 mm; DH:19 mm;	100/150 rev min <sup>-1</sup> ; 5/10 ipm;
Zhang et al. (2008a)	Mo base de herramienta	Ti-6Al-4V	LP: 2 mm; DP:5.1-3 mm; DH:15 mm; GH:cóncavo; GP:conico;	300-600 rev min <sup>-1</sup> ; 60 mm min <sup>-1</sup> ;
Zhang et al. (2008b)	PCBN	Ti-6Al-4V	LP: 2 mm; DP:5.1-3 mm; DH:15 mm; GH:cóncavo; GP:conico;	200 rev min <sup>-1</sup> ; 50 mm min <sup>-1</sup> ;

Tabla 3.8 Resumen de trabajos en uniones en aleaciones de titanio mediante proceso FSW encontrados en la literatura entre 2003 a 2015 (Continuación Tabla 3.7 ).

Autor	Material de la herramienta	Material de la pieza de trabajo	Geometría y dimensiones de la herramienta	Parámetros de proceso
Pasta y Reynolds (2008)	W-25 % Re	Ti-6Al-4V	DP:5 mm; DH:15 mm;	150 rev min <sup>-1</sup> ; 100 mm min <sup>-1</sup> ;
Kumar et al. (2009)	WC-Co	Ti-6Al-4V	LP: 1.1 mm; DP:4 mm; DH:10 mm;	800/1,200 rev min <sup>-1</sup> ; 1 ipm;
Querin et al. (2009)	WC-Co	Ti-6Al-4V	LP: 4.3 mm; DP:8.9-0, 15.5-10 mm; DH:15.5, 19.1 mm; Geometría: conica a 45° y 60°.	400 rev min <sup>-1</sup> ; 4-5 ipm;
Liu et al. (2009)	W-Re	Ti-6Al-4V	LP: 1.8 mm; DP:9-4 mm; DH:11 mm; GP:conico;	400 rev min <sup>-1</sup> ; 4 ipm;
Zhou et al. (2009)	W-Re	Ti-6Al-4V	LP: 1.8 mm; DP:6-4 mm; DH:12 mm; GP:conico;	400 rev min <sup>-1</sup> ; 2 ipm;
Edward and Ramulu (2010)	W-La203	Ti-6Al-4V	LP:2.8-13.3 mm; DP:19-32 mm;	150 rev min <sup>-1</sup> ; 100 mm min <sup>-1</sup> ;
Pilchak et al. (2010)	W-La203	Ti-6Al-4V	LP: 9.9 mm; DP:15 mm; DH:25 mm;	120-800 rev min <sup>-1</sup> ; 50.8-203.2 mm min <sup>-1</sup> ;
Liu et al. (2010)	W-Re	Ti-6Al-4V	--	300-600 rev min <sup>-1</sup> ; 1-5 ipm;
Sato (2011)	Co base de herramienta	CP Ti Ti-6Al-4V	LP: 1.7 mm; DP:3.5-6.5 mm; DH:15 mm; GP:conico;	200 rev min <sup>-1</sup> ; 100 mm min <sup>-1</sup> ;
Yoon y Fujii (2015)	WC	Ti-6Al-4V	LP: 1.8 mm; DP: 6 mm; DH: 15 mm	225-300 rev min <sup>-1</sup> ; 50 mm min <sup>-1</sup> ;

DH: diametro del hombro; DP: diametro de pin; LP: longitud de pin; DP<sub>s</sub>: diámetro del pin en la parte superior (diámetro mayor) para pin cónico; DP<sub>i</sub>: diámetro del pin en la parte inferior (diámetro menor) para pin cónico; GP: geometría del pin; GH: geometría del hombro; HSS: acero de alta velocidad.

### 3.1.9. Evolución microestructural del titanio en proceso FSW

Lee et al. (2005), reportaron la evolución microestructural y las propiedades mecánicas de la unión de titanio comercial puro con el uso de una herramienta de TiC sinterizado; Fonda et al.(2009), trabajaron con una aleación Ti-511 donde analizaron los cambios microestructurales que se generaron durante el proceso FSW; Reynolds et al. (2005), estudiaron la factibilidad de producir uniones en las aleaciones Ti-21S sobre un amplio rango de velocidades de avance, así como la evolución en la textura cristalográfica durante el proceso FSW. Ramírez y Juhas (2003) reportaron las características microestructurales de la ZC y la ZAT en la aleación Ti-6Al-4V. John et al. (2003), demostraron que la presencia de esfuerzos residuales en la unión de la misma aleación, tiene un gran impacto sobre velocidad de crecimiento de grietas por fatiga. Estos estudios aportan, aunque no suficiente, valiosa información sobre la microestructura de las uniones en las aleaciones de titanio mediante el proceso FSW en relación a sus propiedades mecánicas; sin embargo, su estudio y análisis debe ser extendido, así como profundizar la investigación en relación al desgaste de la herramienta.

La secuencia de la deformación mecánica y microestructural cambia en las diferentes zonas generadas en la unión de la aleación Ti-6Al-4V mediante el proceso FSW. Esto depende de la temperatura máxima alcanzada por encima o por debajo de la temperatura  $\beta$  transus.

- a) Durante el proceso FSW, cuando la herramienta está en contacto con el metal base, éste se encuentra en un estado plástico de deformación a máxima temperatura (por arriba de  $T\beta$ ) producto del calor por fricción generado durante el contacto de la herramienta en rotación y la fuerza de corte, así como la compresión que actúa sobre él mismo.

- b) Inmediatamente después del avance de la herramienta se lleva a cabo el enfriamiento local de la zona de agitación (ZA) que da lugar a los procesos de restauración a una temperatura por arriba de la temperatura de transformación  $\beta$ , donde el crecimiento de grano y minimización de la energía interna en esa zona se lleva a cabo por medio de un mecanismo de recristalización dinámica, la fase  $\alpha$  comienza a nuclearse en la zona de alta energía (puntos triples al límite de grano de  $\beta$ , consumiendo una cantidad de  $\beta$ , Mishra y Mahoney (2007).

La evolución microestructural típica de la estructura Widmanstätten presente en las aleaciones  $\alpha$ - $\beta$  se muestran en la Figura 3.7, la fase  $\alpha$  se observa en color blanco y la fase  $\beta$  en color oscuro.

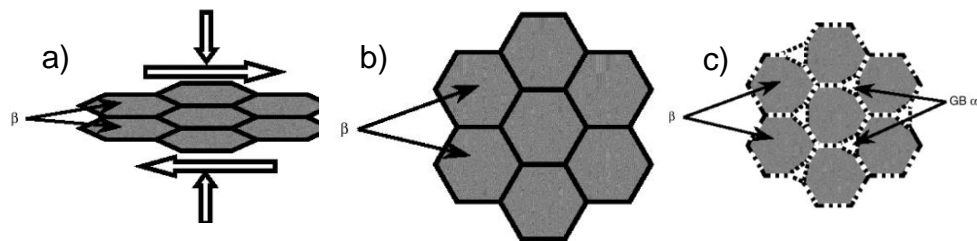


Figura 3.7 Evolución microestructural de típica estructura Widmanstätten de las aleaciones  $\alpha$ - $\beta$ . La fase  $\alpha$  se observa en color blanco y la fase  $\beta$  en oscuro, Mishra y Mahoney (2007)

## 3.2. Proceso de soldadura por fricción agitación

### 3.2.1. Introducción al proceso de soldadura

Una unión comprende un gran número de procesos utilizados para ensamblar partes individuales que conformarán un componente más grande y complejo. Las partes individuales de un componente se unen mediante articulaciones. Una articulación puede ser temporal o permanente. Los cinco tipos de juntas básicas que se utilizan en la unión de piezas son: a tope, en L, en T, solapada y en borde, la configuración de las juntas básicas se muestra en la Figura 3.8, Campbell (2012).

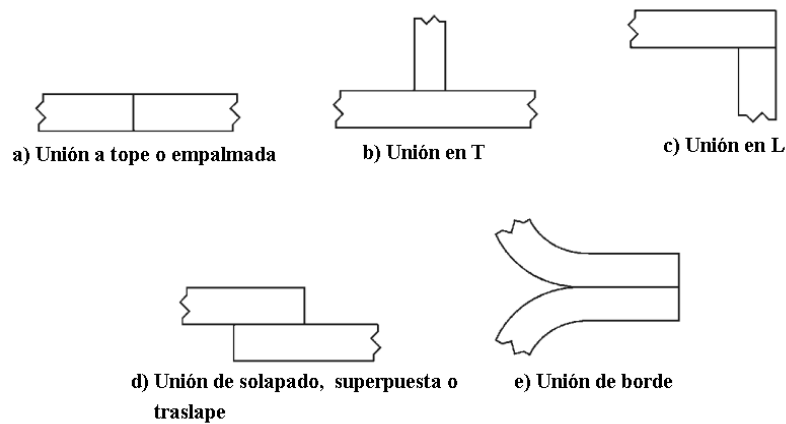


Figura 3.8 Esquema de los cinco tipos básicos de juntas que se utilizan en la unión de piezas: a) a tope, b) en L, c) en T, d) solapada y e) en borde. Campbell (2012).

El término soldadura, en ingeniería, se refiere al procedimiento por el cual dos o más piezas de metal se unen por aplicación de calor, presión, o una combinación de ambos, con o sin material de aporte de otro metal. Los procesos de unión por soldadura han adquirido una gran importancia en las últimas décadas, dada su creciente implementación en los procesos industriales, Ballesteros (2009).

Norrish (2006) presenta una clasificación de los diferentes procesos de soldadura que se han desarrollado, para simplificar lo dividió en dos grupos; es decir, soldadura por fusión y soldadura por presión, en la Figura 3.9 se muestra la clasificación de estos grupos.

Schmid (2002) describe que el proceso de soldadura por fricción es un proceso de soldadura en estado sólido, el cual se refiere a una familia de procesos en los que la unión se lleva a cabo sin fusión (derretimiento) de las piezas. En la soldadura por fricción el calor necesario para realizar la unión se genera mediante la fricción, como indica el nombre, en la interfase de los dos componentes que se unen.



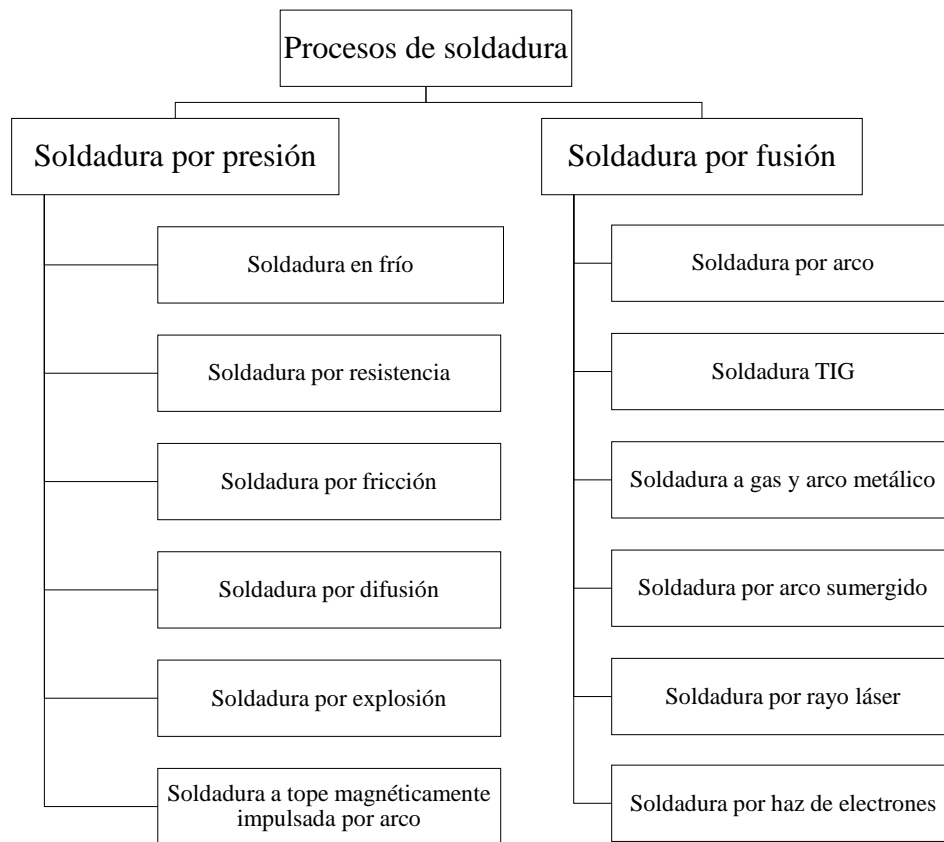


Figura 3.9 Clasificación general de los procesos de soldadura.

### 3.2.2. Fricción

Los mecanismos de contacto y la física de la fricción son disciplinas fundamentales en las ciencias de la ingeniería, estos fenómenos son indispensables para un sin número de aplicaciones, por ejemplo: la construcción de diseños seguros y de bajo costo, y son indispensables para la fabricación de frenos, llantas, cojinetes, motores de combustión, bisagras, uniones, piezas de fundición, mecanizado, contactos eléctricos, y muchos otros. Estas aplicaciones tienen tareas que van desde el análisis de estrés de los elementos de contacto y las articulaciones, el análisis de los diseños considerando la influencia de la lubricación requerida para evitar el desgaste de las partes.

Un ejemplo clásico de contacto es un contacto del carril-rueda, en la que nos interesan sobre todo las propiedades del material y la transmisión de fuerza. Los contactos pueden transferir la fuerza mecánica (tornillos), conducir la electricidad o calor, o impedir el flujo de materiales (sellos). El contacto entre la punta de un microscopio de fuerza atómica y el material subyacentes o el contacto entre dos placas tectónicas son ejemplos de contactos de fricción también, Popov (2010).

González (1971) determinan la fricción describiendo que cuando se intenta rodar o arrastrar un cuerpo por el suelo, se encuentra que hay una fuerza que se opone al movimiento. Esta fuerza se llama fricción o rozamiento. Wilson et al. (2003) define la fricción como la fuerza que se opone al movimiento que se da cuando dos materiales o medios están en contacto. Esta fuerza de resistencia al movimiento existe con todos los tipos de medios, sólidos, líquidos y gases y se caracteriza como fuerza de fricción. La fricción entre sólidos generalmente se clasifica en tres tipos: estática, deslizante (cinética) y rodante. La fricción estática incluye todos los casos en que la fuerza de fricción es suficiente para impedir un movimiento relativo entre las superficies. La fricción de rodamiento se da cuando una superficie gira conforme se mueve sobre otra superficie, pero no desliza ni resbala en el punto o área de contacto.

El concepto de fricción es representado en la Figura 3.10, donde el bloque 1 no se moverá con respecto al bloque 2 si la fuerza aplicada  $\mathbf{F}$  es menor que la fuerza de rozamiento  $\mathbf{F}_f$ , también se puede observar que el coeficiente de fricción puede estar en función de la fuerza normal  $\mathbf{F}_N$ , la temperatura  $\mathbf{T}$  y la tasa de deslizamiento  $\mathbf{v}$ , Persson y Tosatti (2013).

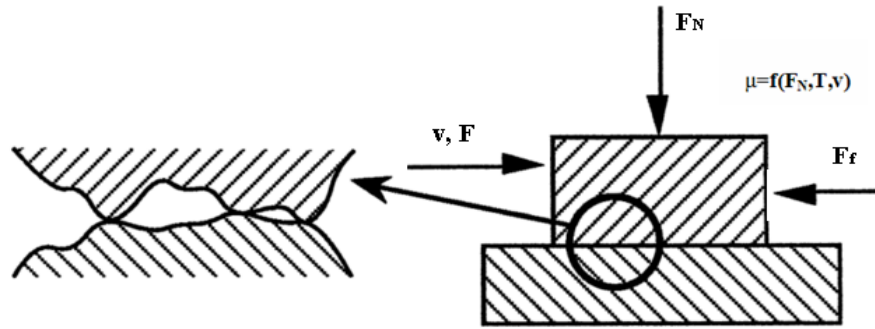


Figura 3.10 Diagrama del concepto de fricción.

La aproximación clásica de la fuerza de fricción conocida como ley de fricción de Columb se expresa en la ecuación 1 como:

$$F_f \leq \mu F_N \quad (1)$$

donde  $\mu$  es el coeficiente de fricción,  $F_N$  es la fuerza normal a la superficie de contacto, y  $F_f$  es la fuerza ejercida por la fricción. Las dos primeras leyes clásicas de fricción son atribuidas al científico francés Guillaume Amontons (1699) y más tarde fueron verificadas por Coulomb, establecen que la fricción es directamente proporcional a la fuerza normal e independiente del área de contacto, Budinski (2013).

Por definición, el coeficiente de fricción es una constante adimensional, que describe la relación de la fuerza de fricción y la fuerza normal entre dos cuerpos. El coeficiente de fricción se puede clasificar sobre la base de los tipos de fricción, es decir  $\mu$  coeficiente de fricción estática,  $\mu_s$  coeficiente de fricción cinética o deslizante y  $\mu_k$  coeficiente de fricción de rodamiento, Wilson (2007).

### 3.2.2.1. Fricción cinética o deslizante

La fricción se presenta principalmente en o cerca de las áreas de contacto en las superficies deslizantes. La suma vectorial de las fuerzas de la resistencia al movimiento en las áreas de contacto constituye la fuerza de fricción. La fuerza de fricción se debe a las irregularidades de las superficies en contacto, en la Figura 3.11 se muestra el establecimiento de contacto entre dos asperezas opuestas.

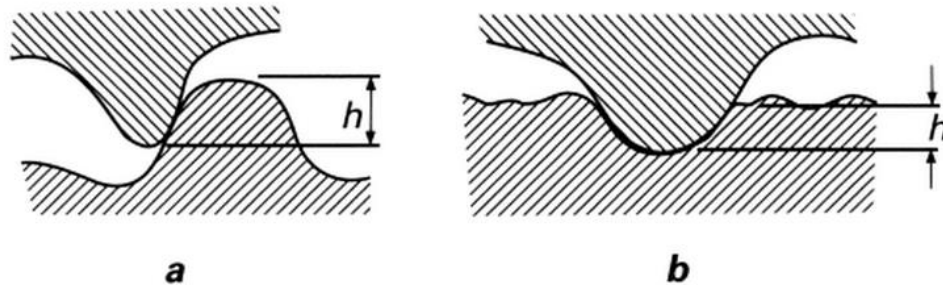


Figura 3.11 El establecimiento de contacto entre dos asperezas opuestas: a) interferencia geométrica y b) penetración, Glaeser (2010).

Una parte integral en el campo de estudio de la fricción es el conocer acerca del área de contacto, es conocido que las superficies de los cuerpos sólidos no son idealmente lisas, por lo tanto es importante saber los tipos de contactos que existen, en la Figura 3.12 se muestra la clasificación de las formas en que puede ser determinado el contacto entre asperezas, Kossowsky (1989).

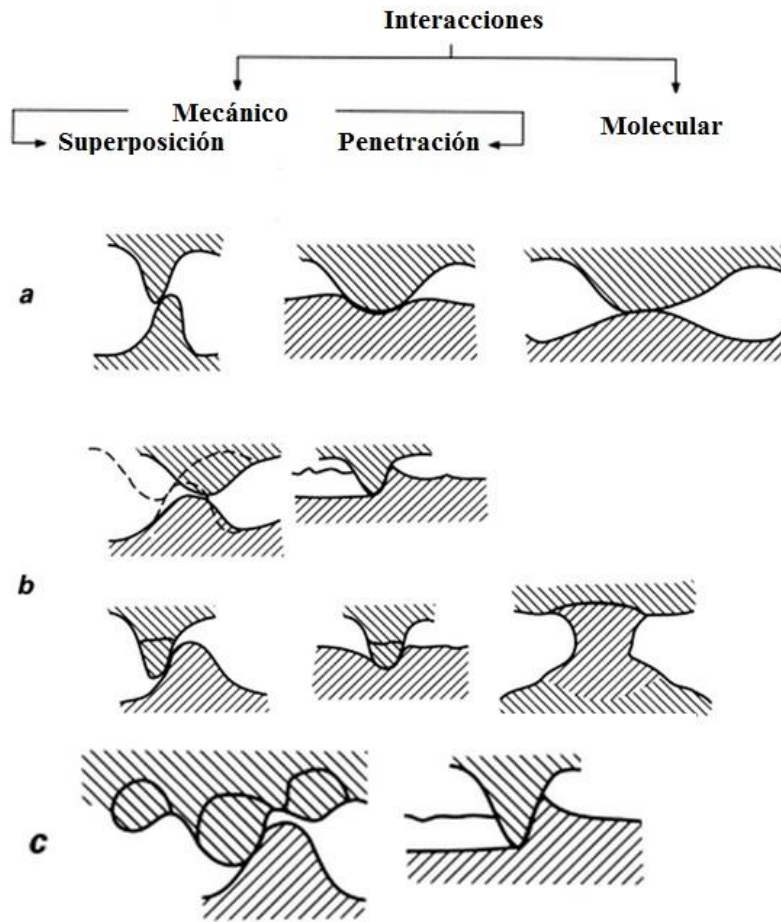


Figura 3.12 Clasificación de las formas en que puede ser determinado un contacto entre asperezas: a) sin ningún cambio en la forma, b) con un cambio en la forma, y c) con generación de desechos, Glaeser (2010).

La fricción de deslizamiento puede ser considerada como deformación elástica, plástica o mixta de asperezas microscópicas en contacto, la Figura 3.13 muestra la representación del fenómeno de fricción a nivel microscópico, Straffelini (2015).

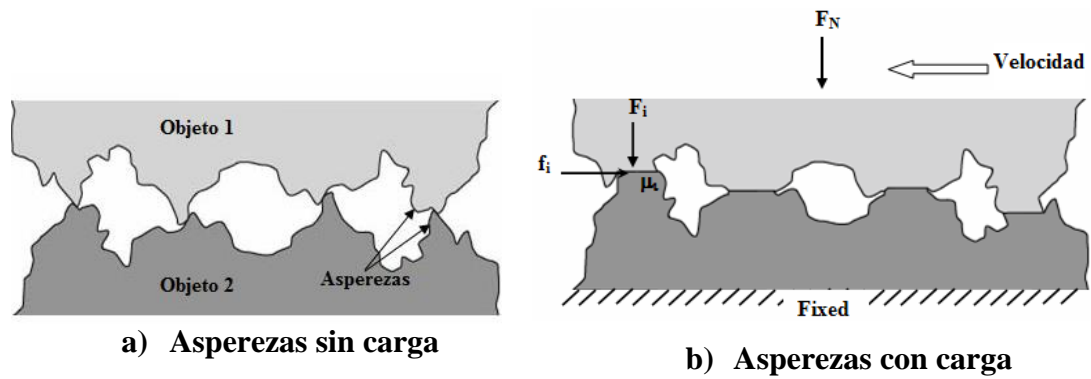


Figura 3.13 Representación del esquema del fenómeno de fricción a) Asperidades sin carga y b) Asperidades con carga.

Cada una de las asperidades llevan una parte de la componente de la carga ( $f_i$ ) y de carga normal ( $F_N$ ). Si se supone que la deformación plástica de las áreas de contacto de cada unión ha crecido lo suficiente como para llevar su parte de la carga normal, el área de contacto de cada unión asperidad es:

$$a_i = \frac{f_i}{H} \quad (2)$$

donde  $H$  es la dureza del material de los cuerpos en contacto. El área total de contacto puede expresarse como:

$$A_T = \frac{F_N}{H} \quad (3)$$

Para cada contacto de asperezas, la deformación tangencial es elástica hasta que la presión de cizalla aplicada supera la resistencia al corte  $\tau_y$  de los materiales de la superficie cuando se convierte en plástico. La fuerza de fricción deslizante por lo tanto es:

$$F_f = \tau_y A_T \quad (4)$$

Basado en la definición, el coeficiente de fricción se puede expresar:

$$\mu = \frac{F_f}{F_N} \quad (5)$$

Sustituyendo la ecuación 3 y 4 en la ecuación 5, se obtiene:

$$\mu = \frac{\tau_y A_T}{A_T H} = \frac{\tau_y}{H} \quad (6)$$

Por lo tanto, el coeficiente de fricción puede ser calculado a partir de la resistencia al esfuerzo cortante de las asperezas en las uniones y la dureza de los dos materiales que están en contacto, Flores et al. (2008).

Teniendo en cuenta los fenómenos de generación de calor por fricción en primer lugar se concluyó que: convencionalmente, la fricción entre dos cuerpos sólidos se rige por las siguientes tres leyes empíricas contribuidas por los científicos franceses antes mencionados.

La fuerza de fricción ( $F_f$ ) está relacionada con la fuerza normal ( $F_N$ ), donde  $\mu$  es el coeficiente de fricción estático/dinámico. Tanto el coeficiente de fricción estático y dinámico son independientes de  $F$ .

Los coeficientes de fricción son independientes de la zona de contacto macroscópica entre los cuerpos, y el coeficiente dinámico de fricción es independiente de la velocidad relativa entre los cuerpos.

Sin embargo, con frecuencia es necesario indicar las complejidades involucradas para definir el fenómeno de fricción. De acuerdo con la comprensión actual donde Bowden y Tabor (1973) expresan algunas excepciones a las leyes antes mencionadas que se presenta durante la fricción entre metales y/o cerámicos:

- a) Sobre las superficies de contacto ocurren adhesiones interfaciales entre las asperezas.
- b) Una deformación plástica microscópica ocurre durante el movimiento relativo entre las superficies de contacto.

La energía de fricción disipada durante las deformaciones microscópicas que se producen entre las superficies de contacto, se convierte completamente en energía térmica. Por lo tanto, en realidad, la fuerza de fricción está influenciada por las propiedades físicas y químicas de las superficies que interactúan, dependientes de la carga, las velocidades relativas y la temperatura de los mismos. Es importante señalar que en el proceso de soldadura por fricción estas deformaciones microscópicas se producen principalmente en la superficie de la pieza (la superficie de la herramienta más o menos es considerada no-deformable, aunque puede que no ocurra para el proceso de soldadura por fricción con materiales de alta temperatura y herramientas de metal refractario). Como consecuencia, el calor generado se distribuye de forma desigual entre las dos superficies (i.e herramienta y pieza), la magnitud de esta partición de calor depende la conductividad térmica, la capacidad calorífica, la velocidad relativa y el área interfacial de la herramienta y la pieza de trabajo, Mishra et al. (2014).



### 3.2.3. Proceso de soldadura por fricción agitación FSW

La unión efectiva de piezas es uno de los desafíos que se presenta en la industria. Aunque muchas técnicas de unión, incluyendo ensamble mecánico, unión adhesiva y soldadura en estado sólido están bien desarrolladas, la soldadura por fricción ofrece un proceso de soldadura alternativo para la unión de materiales considerados por sus propiedades térmicas y mecánicas difíciles de soldar, en particular materiales no ferrosos o superaleaciones, Yilbas y Sahin (2014).

La unión mediante el proceso de soldadura por fricción ocurre por el calor generado entre los componentes que se presionan y se unen como resultado del calor generado por la fricción y la presión ejercida. La clasificación de los diferentes procesos de fricción se muestran en la Figura 3.14, Yilbas et al. (1995). Éstas dependen del tipo de técnicas involucradas en la unión mediante el proceso de soldadura por fricción.

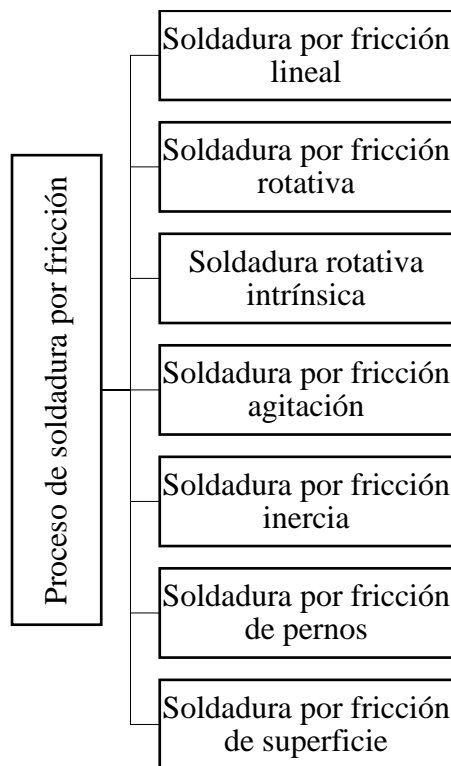


Figura 3.14 Clasificación de los diferentes procesos de fricción.

El proceso de soldadura por fricción agitación fue inventado en The Welding Institute (TWI) en Reino Unido en 1991 como una técnica en estado sólido, y se aplicó inicialmente a las aleaciones de aluminio, ver Figura 3.15. El concepto básico del proceso de soldadura por fricción lineal (FSLW, por sus siglas en inglés) descrito por Farias et al. (2012) es simple, ver Figura 3.16: i) la herramienta no consumible se encuentra girando con velocidad programada y baja hacia la ubicación donde se encuentran montadas las placas a unir, ii) la herramienta penetra las placas hasta la profundidad determinada, iii) la herramienta permanece girando un tiempo determinado en un punto para generar la cantidad de calor necesario para ablandar el material, iv) posteriormente la herramienta se desplaza longitudinalmente sobre las placas a unir, v) termina el recorrido de la distancia establecida y se efectúa la retracción de la herramienta.

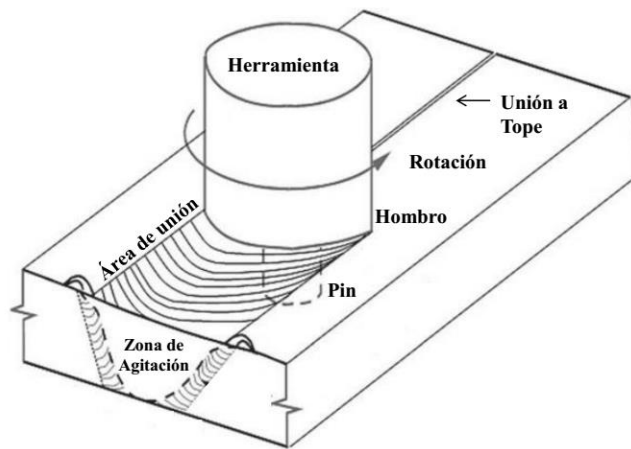


Figura 3.15 Esquema del proceso FSW.

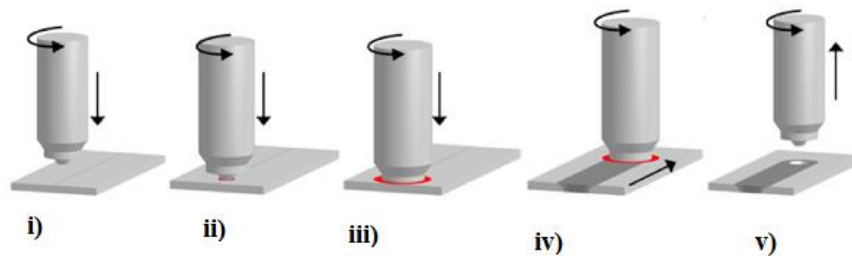


Figura 3.16 Esquema de la secuencia del proceso FSLW.

El proceso de unión por deformación suele aplicar presión arriba del límite elástico del trabajo, causando alta deformación, forzando a los átomos en una superficie en contacto íntimo con los átomos sobre la segunda superficie.

La atracción atómica proporciona la unión. Se puede proporcionar la presión para el trabajo por varios métodos, incluyendo la soldadura en frío, soldadura explosiva, soldadura por forja, soldadura por fricción, soldadura por presión en caliente, soldadura en continuo, soldadura ultrasónica, y la soldadura por fricción agitación. La soldadura por fricción-agitación es única en deformación, en base a procesos de estado sólido, debido a los flujos de materiales que forma y se une para producir la articulación. Debido a la conducción del flujo del material para producir la unión, es necesario realizar correctamente la introducción de los parámetros involucrados, lo cual permite obtener propiedades excepcionales en los elementos producidos por este tipo de soldadura. Ésta es la razón principal del uso del proceso FSW en numerosas aplicaciones de la industria aeroespacial, de automoción y la construcción naval. Un esquema simple de la presión y tiempo durante soldado de estado sólido se muestra en la Figura 3.17. El proceso FSW involucra deformación plástica intensa y un ciclo de soldado bastante corto.

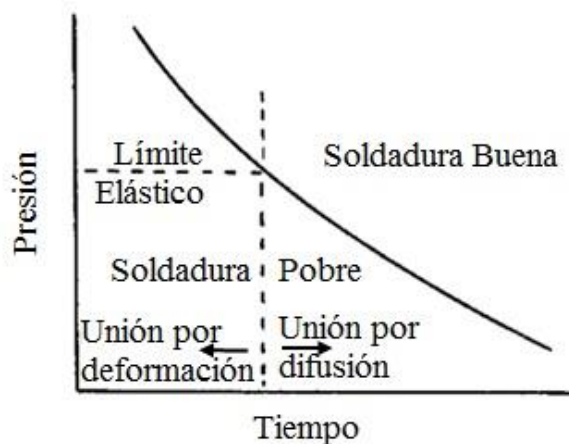


Figura 3.17 Esquema de la presión y el tiempo implicado en los procesos de deformación y unión por difusión.

La adopción de la soldadura FSW fue rápida en la industria aeroespacial. Éste es un ejemplo clásico de “impulso tecnológico”. Las aleaciones de aluminio de alta resistencia, como la serie de aleaciones de aluminio 2XXX y 7XXX son clasificadas como “no soldables” mediante técnicas de soldadura por fusión. Por lo tanto, cuando la soldadura por fricción agitación fue inventada en 1991, abrió nuevas oportunidades para soldar aleaciones de aluminio de alta resistencia. Obviamente, esto condujo a un alto nivel de importancia para la industria aeroespacial, que vio oportunidades de diseño importantes.

Los últimos ejemplos de comercialización de FSW incluyen la unión de la sección frontal y posterior del monitor de la iMac, ensamble del tunes central de Ford GT, paneles largos para el cuerpo de vagones de tren de alta velocidad chinos, nave espacial Orión de la NASA, etc.

La Figura 3.18 muestra algunas fotografías de las implementaciones en aplicaciones aeroespaciales y de locomotoras. La fotografía de la esquina superior izquierda muestra una soldadura curvilínea genérica utilizando una máquina robótica de soldadura por fricción agitación. Airbus incluye diversos tipos, entre ellos varios relativos a la sustitución de la tecnología de remachado por FSW en las juntas longitudinales y circunferenciales. La versatilidad de FSW es bastante obvia. Del mismo modo, el ejemplo de la aplicación Shinkansen es ilustrativa de una solución de nivel de sistema. La Figura 3.19 muestra un ejemplo de soldadura FSSW que se utiliza para aplicaciones automotrices.



Figura 3.18 Algunos ejemplos ilustrativos de la aplicación de la soldadura FSW (todas las fotografías relacionadas con las aeronaves son cortesía de Grupo Airbus, Ottobrunn, Germany and Shinkansen cortesía del Sr. Gilbert Sylva), Mishra et al. (2014).



Figura 3.19 Algunos ejemplos ilustrativos de la soldadura FSSW aplicados en la industria automotriz (las fotografías cortesía del Dr. Blair Carlson, General Motor), Mishra et al. (2014).

### 3.2.4. Herramienta para proceso FSW

Liu et al. (2010) define tres funciones principales de la herramienta: el calentamiento de las piezas de trabajo, el movimiento del material para producir la unión y la contención del material plastificado debajo del hombro de la herramienta.

Un concepto importante aportado por London et al. (2001) consiste en el calentamiento localizado, el cual ablanda el material que se encuentra alrededor del pin, y la combinación de la rotación de la herramienta y el movimiento de la misma producen desplazamiento del material desde la parte frontal a la parte posterior del pin. Como resultado de este proceso se produce una unión en estado sólido. Debido a diversas características geométricas de la herramienta, el movimiento de material alrededor del pin puede ser muy complejo.

Posteriormente, Elangovan y Balasubramanian. (2008) se enfocaron a cada una de las partes de la herramienta de fricción: pin y hombro, y determinaron que cada una de las partes de la herramienta tienen una función diferente, el diámetro del hombro de la herramienta es fundamental porque genera la mayor cantidad de calor durante el proceso de FSW, además controla el material plastificado y en gran medida el campo del flujo del material, para obtener resultados óptimos en la práctica del proceso FSW el material debe de ser suficientemente ablandado para obtener un buen flujo de material.

Por otro lado, Arora et al. (2011) hace mención de la necesidad de determinar un diámetro óptimo de hombro. Estudios recientes de Rai et al. (2011) incluyen cálculos de los campos del flujo del material para diferentes geometrías de herramientas y el cálculo de las dimensiones del hombro basado en el control del material plastificado. La Figura 3.20 muestra las partes principales y geometrías básicas de la herramienta utilizada en el proceso FSW, Liu et al. (2010).

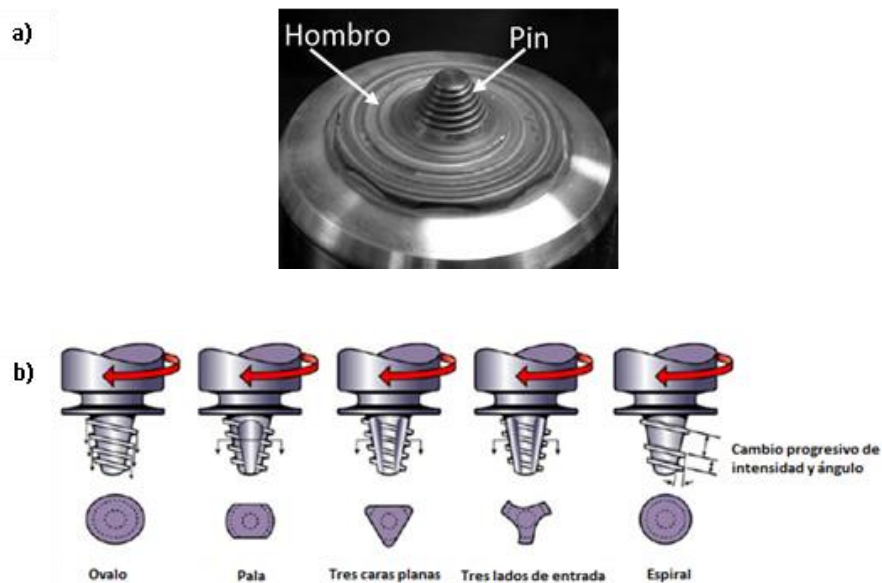


Figura 3.20 (a) Esquema de las partes principales herramienta para proceso FSW (b) geometrías básicas de la herramienta para soldadura FSW.

Nandan et al. (2008) hace mención en su trabajo que la geometría de la herramienta afecta la generación de calor, la fuerza requerida y el fenómeno termomecánico necesario para producir la unión por proceso FSW. El flujo del material plastificado de las piezas de trabajo se ve afectado directamente por la geometría de la herramienta, así como el movimiento lineal y rotacional de la herramienta. Los factores importantes son el diámetro y ángulo del hombro, la geometría del pin que incluye la forma y tamaño.

En 2011 Rai et al. realizó una revisión y examen crítico de varios aspectos importantes de las herramientas utilizadas en el proceso FSW, donde se menciona que la selección del material con el que se fabricará la herramienta es de suma importancia, ya que la calidad de la soldadura y el desgaste de la herramienta son dos consideraciones que deben de tomarse en cuenta al elegir el material, las propiedades de los materiales pueden influir en la generación de calor y la disipación. Independiente de los efectos potencialmente no deseados en la microestructura de la unión, el desgaste de la herramienta incrementa significativamente el costo del procesamiento de uniones mediante FSW. Las temperaturas en la pieza de trabajo dependen de las propiedades del material de la herramienta, tales como la conductividad térmica, la dureza, ductilidad, la reactividad con el material de la pieza de trabajo, y el coeficiente de expansión térmica que puede afectar en los esfuerzos térmicos en la herramienta. La conductividad térmica determina la tasa de eliminación de calor y afecta el campo de temperatura, el flujo de tensiones y la microestructura en la unión. La alta conductividad térmica del nitrato de boro cúbico policristalino (PCBN, por sus siglas en inglés) evita la formación de puntos calientes en la herramienta. El valor adecuado de la conductividad térmica depende de las variables del proceso, las propiedades del material de la pieza y de la herramienta.

Las propiedades de algunos materiales para herramientas de uso común y algunas observaciones con respecto a la idoneidad para la unión de algunas aleaciones de titanio se muestran en la Tabla 3.9, Rai et al. (2011).



Tabla 3.9 Material de la herramienta, geometrías y parámetros de proceso utilizados en FSW para aleaciones de titanio.

Material de la pieza de trabajo	Material de la herramienta	Geometría y tamaño de la herramienta	Parámetros de proceso	Observaciones
Cp-Ti, 3mm	PCBN	GH: cóncavo; DH: 15 mm; GP: cónico a 45°; LP: 1.7 mm; DP <sub>s</sub> : 5.1 mm.	200 rev min <sup>-1</sup> ; 50 mm min <sup>-1</sup> ;	Severo desgaste de herramienta
Ti, 3mm	1. HSS; 2. WC pin, HSS hombro; 3. WC pin, W hombro	DH: 18 mm; GP: SC; DP: 5 mm; LP: 2.85 mm	(1250 rev min <sup>-1</sup> ; 32 mm s <sup>-1</sup> ), (1500 rev min <sup>-1</sup> ; 60 mm min <sup>-1</sup> ); ángulo: 1,3°	Hasta un 100% de eficiencia obtenida en la unión con herramienta W-WC
Ti-6Al-4V, 3-12 mm	Aleación W-La	DH: 19-32 mm; GP: cónico;	150-750 rev min <sup>-1</sup> ; 50-200 mm min <sup>-1</sup> ;	Eficiencia de la unión: >100%
Ti, 2 mm	WC-Co	LP: 2.8-13.3mm DH: 15 mm; LP: 2 mm; DP: 6 mm	200-350 rev min <sup>-1</sup> ; 50-150 mm min <sup>-1</sup> ;	
Timetal 21S, 1-59 mm	Aleación W	Propiedades	200 rev min <sup>-1</sup> ; 51-305 mm min <sup>-1</sup> ;	
Ti, 5-6 mm	Sinterizado TiC		1000 rev min <sup>-1</sup> ; 500 mm min <sup>-1</sup> ;	
Ti-6Al-4V, 2mm	W-3 wt-%Re	DH: 11 mm; LP: 1.8 mm; DP <sub>c</sub> : 6 mm; DP <sub>i</sub> : 4 mm;	400 rev min <sup>-1</sup> ; 32 mm min <sup>-1</sup> ; ángulo: 2.5°	
Ti-5111, 12-7mm	Aleación W	LP: 12.7 mm; DP <sub>s</sub> : 25.4 mm; DP <sub>i</sub> : 9.5 mm;	140 rev min <sup>-1</sup> ; 51 mm min <sup>-1</sup> ;	
Ti-15V-3Cr-3Al-3Sn, 3 mm	Aleación basada en Mo	GH: cóncavo; LP: 15 mm; DP <sub>c</sub> : 5.1 mm; DP <sub>i</sub> : 3 mm;	400 rev min <sup>-1</sup> ; 60 mm min <sup>-1</sup> ;	

DH: diametro del hombro; DP: diametro de pin; LP: longitud de pin; DP<sub>s</sub>: diámetro del pin en la parte superior (diámetro mayor) para pin cónico; DP<sub>i</sub>: diámetro del pin en la parte inferior (diámetro menor) para pin cónico; GP: geometría del pin; GH: geometría del hombro; HSS: acero de alta velocidad;

### 3.2.5. Zonas generadas en el proceso FSW

La sección transversal de la unión por FSW consiste en cuatro zonas: (A) metal base, (B) zona afectada por calor (ZAC), (C) zona afectada termomecánicamente (ZATM) y (D) zona de agitación (ZA) O.Frigaard et al. (2005); Mishra et al. (2005). La zona del metal base representa el área que no ha sido deformada, y aunque pueda haber experimentado un ciclo térmico de la soldadura, esta no es afectada por el calor en términos de microestructura ni propiedades mecánicas. La zona ZAC es una región, que está claramente más cerca al centro de la soldadura, la zona experimenta un ciclo térmico que modifica la microestructura y/o las propiedades mecánicas. Sin embargo, no hay deformación plástica en esta área. La zona ZATM presenta afectación termomecánica, en esta región, el material se deforma plásticamente por la herramienta de soldadura por fricción, y por el calor que el proceso genera, teniendo una influencia amplia en el comportamiento del material.

La zona de la soldadura o zona de agitación es una zona adyacente a la ZATM y se separa de la misma, ya que ésta es el lugar donde el pin ejerce directamente la acción, en esta zona la estructura de grano generalmente es diferente. La Figura 3.21 muestra el esquema del proceso de soldadura por fricción agitación y la Figura 3.22 muestra la clasificación de las zonas de la soldadura y el área aledaña a la misma.

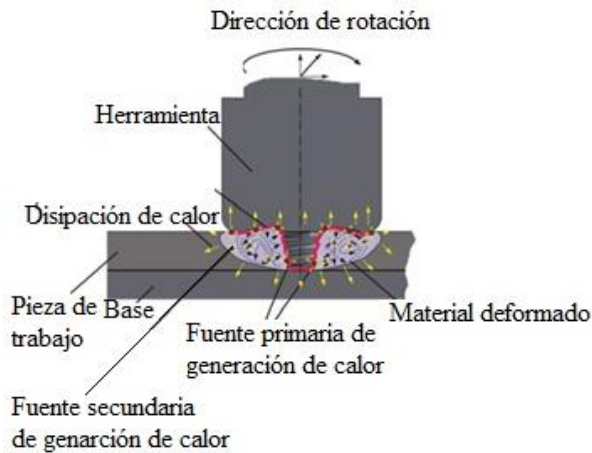


Figura 3.21 Esquema del proceso FSW, Mijalović (2012).

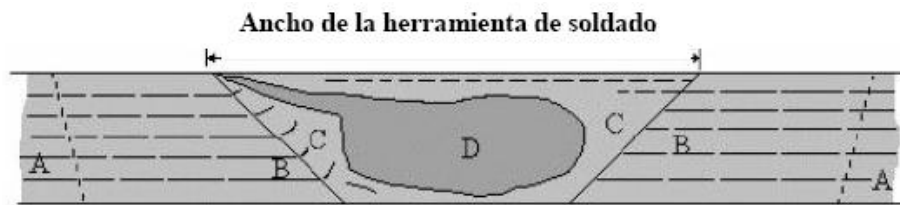


Figura 3.22 Esquema que muestra la zona de la soldadura y la aledaña a la misma: (A) metal base (MB), (B) zona afectada por calor (ZAC), (C): zona afectada termomecánicamente (ZATM) y (D) zona de agitación (ZA), Mishra et al. (2005).

### 3.2.6. Parámetros importantes del proceso FSW.

Mientras que los principios generales del efecto de las variables del proceso en la soldadura por fricción agitación tienen mucho en común con otros procesos de soldadura, los detalles son completamente diferentes, como se es esperado. Las principales variables del proceso en la soldadura por fricción agitación están listadas en la Tabla 3.10.

Tabla 3.10 Principales variables del proceso en la soldadura por fricción agitación.

<b>Variables de diseño de herramienta</b>	<b>Variables de la maquina</b>	<b>Otras variables</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Material de hombro y pin</li> <li>• Diámetro del hombro</li> <li>• Diámetro del pin</li> <li>• Altura del pin</li> <li>• Paso de rosca</li> <li>• Geometría</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Velocidad de la soldadura</li> <li>• Velocidad de eje</li> <li>• Profundidad</li> <li>• Angulo de inclinación de la herramienta</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Material de la base</li> <li>• Tamaño de la base</li> <li>• Tamaño de pieza a unir</li> <li>• Propiedades de material de la pieza</li> </ul>

Todas estas variables actúan para determinar el resultado del proceso de soldadura. El principal interés en estudiar el efecto de las variables del proceso yace en entender el efecto del proceso en las propiedades de la unión, incluyendo propiedades estáticas, mecánicas, resistencia a la fatiga, propiedades de corrosión, corrosión bajo tensión, resistencia al agrietamiento y dureza, con la meta de maximizar la productividad, rendimiento y reproducción. El proceso de soldadura afecta esas propiedades en la unión principalmente a través de la generación y disipación de calor, así que la principal atención debe ser dada al efecto de las variables del proceso de soldadura en el proceso de unión, pero al mismo tiempo eso complica la determinación del efecto de las variables del proceso en la generación del calor. Más allá, el hecho de que la soldadura por fricción agitación está completamente acoplada con procesos termodinámicos significa que se tiene que considerar cuidadosamente el involuntario efecto en variables conectadas entre sí cuando se hace un cambio en el proceso, así como cuando se mueve un proceso desarrollado en una pieza del equipo hacia un nuevo sistema de soldadura. Otras áreas de estudio incluyen el efecto de los parámetros del proceso en el flujo de material, formación de defectos, fuerzas del proceso, tamaño de grano, etc.

Numerosos modelos experimentales se han realizado con la finalidad de estudiar el efecto de los parámetros del proceso en la generación del calor, los cuales han sido publicados desde que el proceso se introdujo por primera vez. La soldadura FSW tal vez en un principio pareció ser un proceso simple, el hecho de que el proceso sea totalmente acoplado a un proceso termodinámico puede llevar a unas relación entre variables y el

material de flujo resultante. Mientras que en el proceso de soldadura por arco el calor de entrada es completamente determinado por parámetros controlados por una máquina (voltaje, corriente y velocidad de recorrido del electrodo), en la soldadura FSW las propiedades de la pieza que se trabaja son importantes para determinar el calor de entrada, que en ocasiones llega a afectar las condiciones de la pieza que se trabaja. Como resultado, pueden participar variables algunas independientes en la generación de calor en el proceso. Por ejemplo, el tamaño de base y el material pueden tener un efecto dramático en las fuerzas del proceso y la generación de calor en la soldadura por fricción agitación, basado en su función en el pre condicionamiento térmico del material de la pieza antes de la herramienta de soldadura, Lohwasser et al. (2009).

Nandan et al. (2008) describen los principales parámetros que controlan la calidad de la soldadura: la velocidad de giro de la herramienta, la velocidad de avance de la herramienta en el material y la fuerza ejercida del cabezal de la máquina sobre el material. La velocidad a la cual se genera el calor, el historial de temperatura, la velocidad de enfriamiento y el torque son el resultado de la combinación de las variables críticas del proceso, sin embargo éstas determinan la evolución de la microestructura de la soldadura y las propiedades mecánicas.

Las variables críticas que afectan la calidad de soldaduras por fricción son las siguientes:

- **Velocidad de rotación**, esta variable al aumentar su valor aumenta la fricción y genera una mayor cantidad de calor en el proceso.
- **Velocidad de penetración**, es la velocidad con la que comienza la etapa de hundimiento de la herramienta para penetrar el material a unir.
- **Velocidad de avance de la herramienta**, es importante para el calor de entrada a la pieza.

- **Fuerza**, se requiere una fuerza axial consistente para producir en la unión una microestructura homogénea, Zhao et al. (2004).

### 3.2.7. Generación de calor en el proceso FSW

Para comprender y entender el proceso FSW Colligan y Mishra (2008) dividieron el proceso de soldadura en dos componentes operativos claves: generación de calor y flujo de material, en la Figura 3.23 se ilustra una visión general de las principales variables del proceso (dependientes e independientes) que afectan el flujo de material, y la distribución de la temperatura en el proceso FSW, además relacionan los efectos físicos asociados con cada parámetro. Las variables independientes del proceso se muestran en bloques con línea continua, mientras que las variables dependientes se representan en bloques con líneas discontinuas. La relación entre las variables de proceso dependientes e independientes se muestra a través de flechas que pasan a través de los bloques que contienen los efectos físicos con letra cursiva, dicho esquema ayuda a deducir el efecto de las variables del proceso independientes en las variables dependientes, con lo cual se pueden realizar deducciones sencillas sobre el efecto en diferentes variables, por ejemplo, un aumento en el diámetro del hombro de la herramienta manteniendo constantes el resto de las variables de proceso no solo tendrá un impacto en el incremento de la temperatura y su distribución, sino también tendrá un impacto en las variables dependientes, torque y potencia de entrada asociada. El esquema nos proporciona una visión de la interdependencia y complejidades asociadas con el proceso FSW, se espera que el incremento de la velocidad de rotación o la disminución de la velocidad de desplazamiento transversal de la herramienta aumente el calor de entrada en la unión, siempre y cuando las condiciones de fricción permenezcan sin cambios, este parámetro a su vez depende de la presión de contacto, la distribución de la temperatura, el esfuerzo cortante del material de la pieza de trabajo, etc.

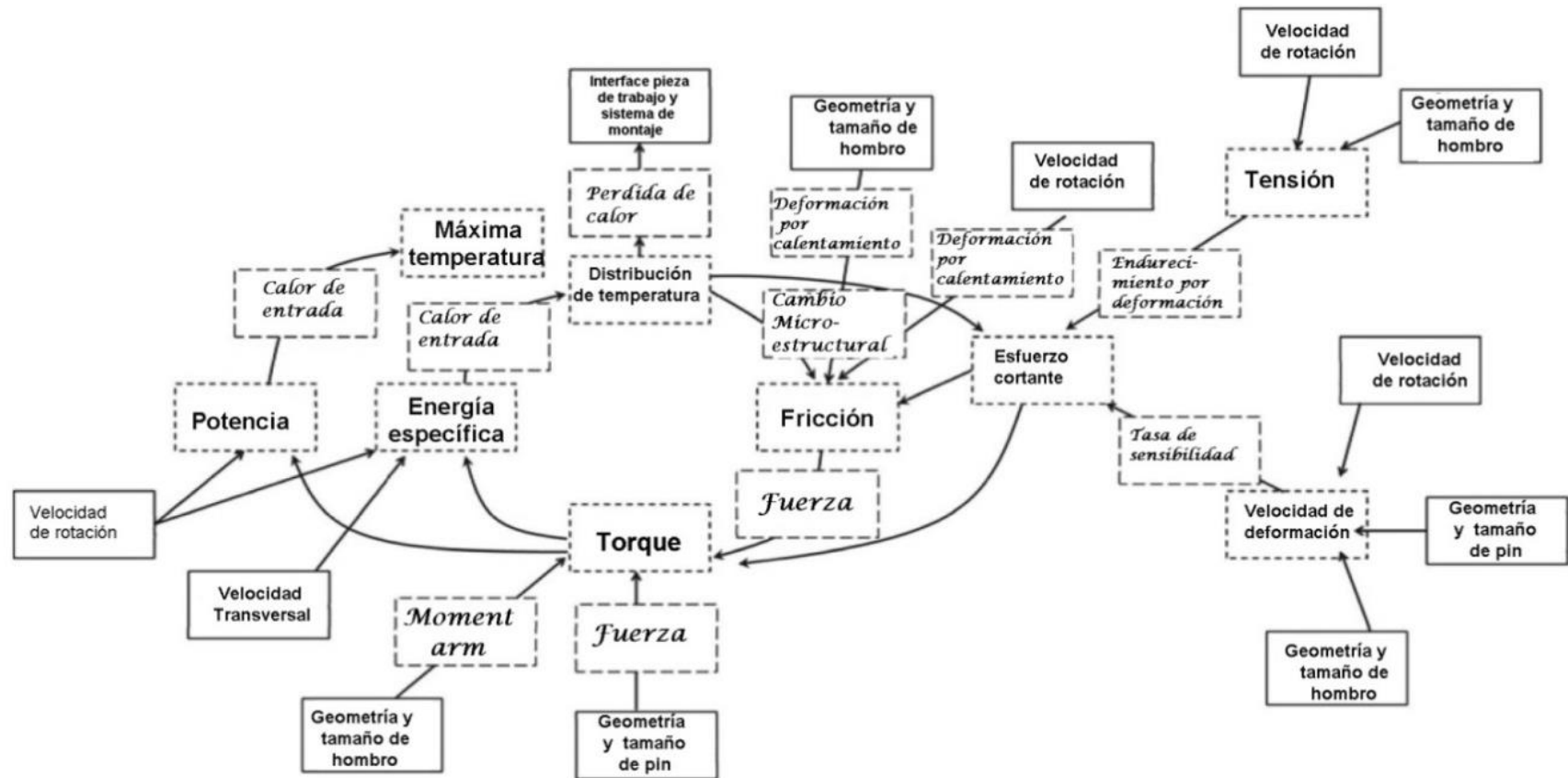


Figura 3.23 Esquema general de las principales variables del proceso (dependientes e independientes) que deforman y afectan el flujo de material, y la distribución de la temperatura en el proceso FSW, Colligan y Mishra (2008).

La generación y transferencia de calor se convirtió en un tema de investigación relacionado con el proceso FSW, sin embargo, para la comprensión de la transformaciones de fases que se producen durante el proceso es necesario comprender varios procesos físicos, Nandan et al. (2008) clasifica la generación de calor en los siguientes procesos: el flujo del material alrededor de la herramienta de soldadura, la presión de contacto causada por la herramienta, el coeficiente de fricción, el cambio de las propiedades termomecánicas y el coeficiente de transferencia de calor.

Mijajlović et al. (2012) por otro lado clasifican dos fuentes de calor principales en el proceso FSW, la primera fuente de calor ocurre cuando la energía mecánica se transforma en calor al ponerse en contacto la herramienta y el material que se unirá, mientras que la segunda fuente de calor se origina cuando el material es deformado alrededor del pin de la herramienta, en la Figura 3.24 se muestra el esquema del proceso FSW.

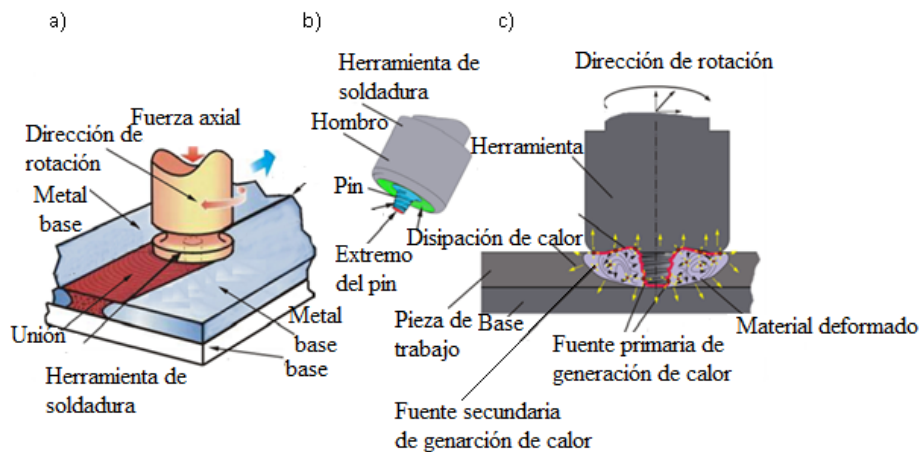


Figura 3.24 Esquema del proceso FSW: a) operación principal, b) herramienta y c) esquema de la generación de calor durante el proceso FSW Mijajlović et al. (2012).

Otros autores Mishra y Ma (2005) en su trabajo describen que durante el proceso FSW se genera calor por la fricción entre la herramienta y la pieza de trabajo



produciendo una deformación plástica. La interacción de los parámetros del proceso tiene influencia directa en la cantidad de calor que se genera debido a la magnitud de la fricción, con respecto al tiempo de trabajo de la herramienta en un mismo punto. El aumento de la temperatura va acompañado con el aumento de la velocidad de giro y fuerza axial, debido a que la magnitud de la fricción es mayor, por otro lado la cantidad de calor disminuye ligeramente con el aumento de la velocidad de avance, ya que disminuye el tiempo en el que la herramienta tiene un efecto sobre el metal base. Una parte de la energía de deformación plástica se almacena en la región ZATM. En la soldadura ocurre simultáneamente una mezcla de fenómenos de recuperación y recristalización.

Zettler (2008); Almanar y Hussain (2011) consideran dos fuentes de calor principal: la primera es el calor que se genera en el interior del volumen confinado cuando por la fricción mecánica entre la superficie del pin y el hombro de la herramienta se ponen en contacto con el material de trabajo, y la otra fuente es el calor generado adiabáticamente por la acción de la cizalladura entre las partículas del material durante la fase de agitación cuando presenta la deformación de los materiales alrededor del pin de la herramienta. Sin embargo, habrá una cierta cantidad de pérdida de calor durante el proceso, como se representa en la Figura 3.25. Para mantener una cantidad suficiente de calor para ablandar el material de trabajo durante el proceso de soldadura, la pérdida de calor se puede compensar mediante el aumento de la tasa de deformación del material a través del incremento de la velocidad de rotación y desplazamiento de la herramienta.

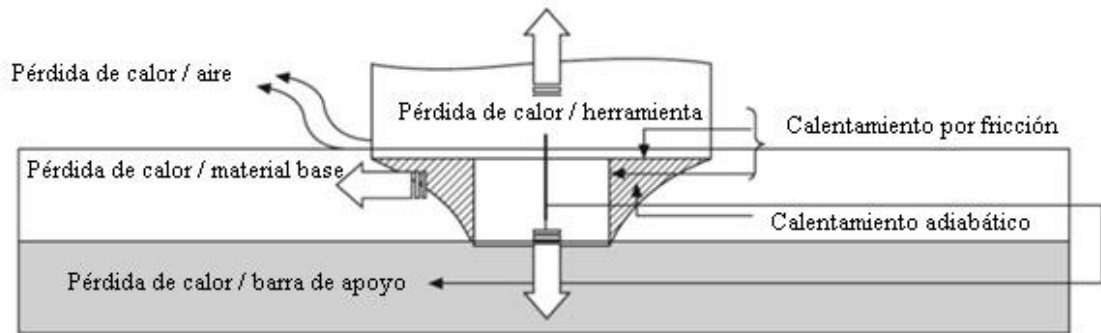


Figura 3.25 Esquema de la pérdida del flujo de calor reconocido en la literatura del proceso FSW, Zettler (2008).

Schmidt y Hattel (2005) han propuesto la siguiente ecuación general para la generación de calor total:

$$\begin{aligned}
 Q_{total} &= \delta Q_{contacto} + (1 - \delta) Q_{deslizamiento} \\
 &= \frac{2}{3} \pi \omega [\delta \tau_{rendimiento} + (1 - \delta) \mu \rho] X \\
 &\quad [(R_{hombro}^3 - R_{pin}^3)(1 - \tan \alpha) + R_{pin}^3 + 3R_{pin}^3 H]
 \end{aligned} \tag{7}$$

donde  $\delta$  es la tasa de deslizamiento adimensional entre la herramienta y la pieza de trabajo (1 para contacto de adherencia y 0 para contacto de deslizamiento).

Cada superficie geométrica de la herramienta posee una ecuación generadora de calor. En la Figura 3.26 se muestran las geometrías y sus respectivos calores generados.

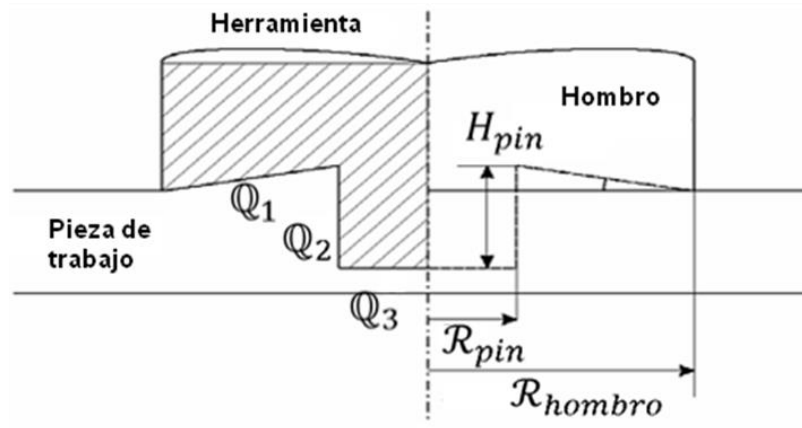


Figura 3.26 Geometría de la herramienta de FSW y el calor generado en las áreas de la herramienta;  $Q_1$  = Generación de calor por el hombro de la herramienta,  $Q_2$  = Generación de calor por el pin de la herramienta y  $Q_3$  = Generación de calor por la punta del pin de la herramienta, Hattel et al. (2009).

La ecuación general para la generación de calor de las diferentes zonas de la interfase entre herramienta/pieza es:

$$dQ = \omega \cdot r \cdot dF \quad (8)$$

Lineat et al. 2002 y Khandkar et al. 2003 describen en términos macroscópicos el flujo de energía que se produce en el proceso FSW; el par generado en el motor y el cabezal pueden proporcionar la energía total requerida en el proceso FSW, en la Figura 3.27 se muestran las energías presentes y su flujo. La generación de calor en FSW surge principalmente a partir de dos fuentes, (a) la fricción entre la herramienta y la pieza de trabajo y (b) el calor generado durante la deformación plástica en la pieza de trabajo.

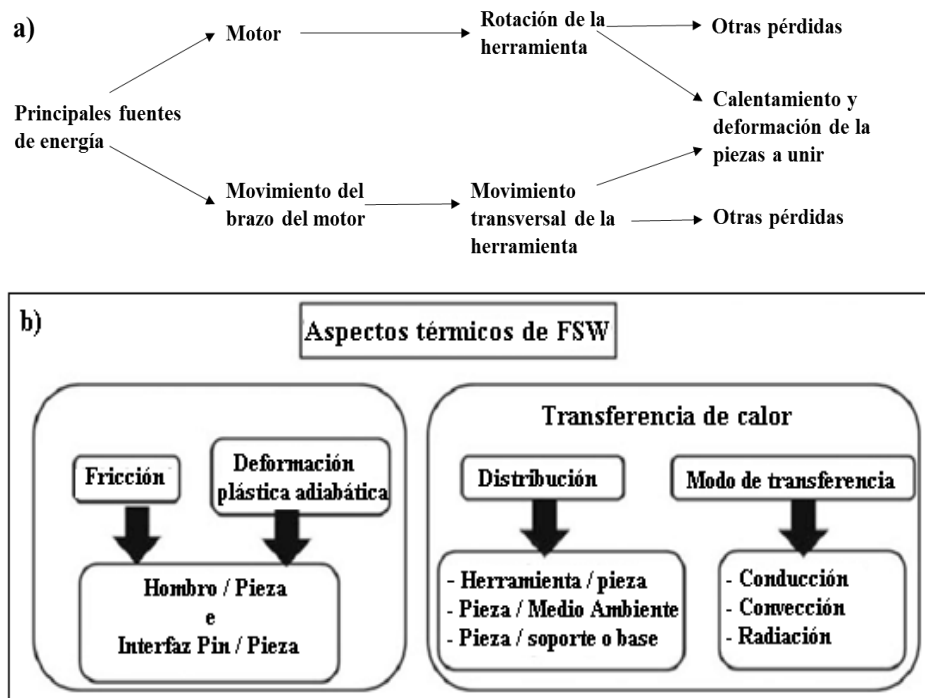


Figura 3.27 El flujo de energía a la pieza de trabajo durante FSW; a) la fuente de energía y su flujo y b) la naturaleza de la generación de calor y su utilización, Mishra et al. (2014)

### 3.2.8. Transferencia de calor y flujo de material en el proceso FSW

La geometría de la herramienta dispone el movimiento y el flujo del material alrededor del pin (Rajiv S. et al, 2007). El flujo del material plastificado en la unión se ve afectado por la geometría de la herramienta, así como el movimiento lineal y rotacional de la misma, O. Larrain et al. (2009); Vijay y Murugan, (2010).

La distribución de temperatura se obtiene resolviendo la ecuación de balance de calor:

$$\rho C_p = \frac{D\theta}{Dt} = \nabla \cdot (k\nabla\theta) + \gamma \quad (9)$$

donde  $\rho$  es la densidad,  $C_p$  la capacidad calorífica,  $k$  la conductividad térmica,  $\theta$  la temperatura y  $\gamma$  la tasa de generación de calor interna por la disipación de la potencia visco plástica. Se asume que alrededor del 50% de la potencia plástica se convierte en calor [O.Lorrain et al, 2009]. El término de tasa de generación de calor por trabajo mecánico se puede expresar con la siguiente ecuación:

$$\gamma = \eta S : D \quad (10)$$

siendo  $\eta$  la fracción de potencia que no es absorbida en defectos microestructurales.

Pereira et al. (2005) menciona que los flujos  $q^\circ$  se pueden prescribir en una porción del contorno  $\partial\Omega_q$ , mientras que la temperatura  $\theta^\circ$  se puede especificar en el resto de la superficie  $\partial\Omega_\theta$  esto se puede expresar como:

$$q^\circ = \beta(\theta - \theta^\circ) + \varepsilon\beta(\theta^4 - \theta^{\circ 4}) \text{ en } \partial\Omega_q, \theta = \theta^\circ \text{ en } \partial\Omega_\theta \quad (11)$$

donde  $\partial\Omega = \partial\Omega_q + \partial\Omega_\theta$  y  $n$  es la normal unitaria externa en el contorno  $\partial\Omega$ ,  $\beta$  es el coeficiente de pérdida de calor por convección,  $\varepsilon$  es la emisividad de la superficie de la superficie y  $B = 5.67 \cdot 10^{-12}$  ( $\text{W cm}^{-2} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ) es la constante de Stefan-Boltzman. Se reconoció la necesidad de aplicar condiciones de deslizamiento más sofisticadas en la interfase herramienta-placas con el fin de captar mejor el fenómeno de flujo de material alrededor del perno y, en consecuencia, mejorar los resultados del modelo térmicos.

Durante la inserción y la extracción del pin de la herramienta el calor se produce a una velocidad constante si la herramienta gira y se mueve hacia adelante a una velocidad constante. Esta suposición de estado estacionario se justifica por el hecho

de que el perfil de soldadura y las propiedades permanecerán aproximadamente constantes durante la fase de soldadura. La ecuación del estado de equilibrio térmico para la conservación de la energía, para  $i = 1, 2$  y  $3$ , representando las direcciones  $x$ ,  $y$  y  $z$  respectivamente, está dada por:

$$\rho C_p \frac{\partial(v_i T)}{\partial x_i} = - \rho C_p U \frac{\partial T}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \kappa \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + S_b \quad (12)$$

donde  $\rho$  es la densidad,  $v_i$  es la velocidad del material en dirección  $i$ ,  $T$  es la temperatura,  $x_i$  es la coordenada,  $C_p$  es la capacidad de calor específica a presión constante,  $\kappa$  es la conductividad térmica de la pieza de trabajo y  $S_b = \frac{d\epsilon_p}{dV} = \beta \mu \phi$  es la tasa de generación de calor por unidad de volumen, debido a la deformación plástica de la pieza fuera de la interfaz.

Otros autores Linert et al. (2003) mencionan que parte del calor generado en la interfaz hombro/pieza de trabajo se transporta al material de la herramienta, mientras el resto entra en la pieza de trabajo. El calor total generado entre el hombro de la herramienta/pieza de trabajo puede haberse repartido entre la pieza de trabajo  $J_W$  y la herramienta  $J_T$ , en base a sus propiedades termofísicas se puede expresar en la siguiente ecuación:

$$f = \frac{J_w}{J_T} = \frac{(k_p C_p)_W^{1/2}}{(k_p C_p)_T^{1/2}} \quad (13)$$

Ayer et al. (2005) menciona que el flujo durante el proceso FSW difiere en las características de flujo de material en estado líquido durante la soldadura por fusión convencional. Esto es evidente a partir de estudios de la soldadura de metales disímiles. Durante la soldadura por fusión, el punto de soldadura se convierte en composición homogénea después de la solidificación. Sin embargo, durante el proceso FSW de metales disímiles, la mezcla no se produce en una escala atómica, y es posible encontrar

mayor diferencia de concentración en el área de soldadura, esta región está lejos de ser homogénea.

Se determinan tres direcciones de flujo que hacen la unión en el proceso FSW:

- El primero tiene lugar cerca de la herramienta y está asociado al material plastificado que se mueve alrededor de la misma. Está controlada por la rotación de la herramienta y la fricción entre la interfase herramienta-pieza de trabajo.
- El movimiento del pin de la herramienta produce un flujo de material hacia abajo en la adyacencia del pin, el cual induce un flujo de material ascendente equivalente algo más alejado del pin.
- El tercer flujo se identifica en un movimiento relativo entre la herramienta y el material.

Nandan et al. (2006) considera que el flujo total de material plastificado y la formación de la unión resulta de la interacción de estos tres flujos, ver Figura 3.28.

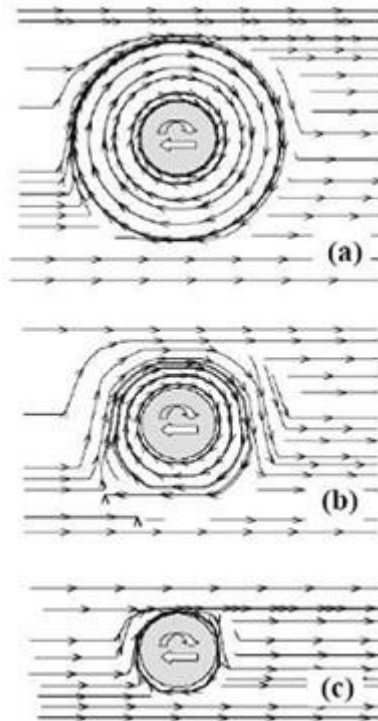


Figura 3.28 Líneas de flujo a diferentes alturas desde la superficie para un acero AISI304 : a- 0.35 mm, b- 1.59 mm y c-2.28 mm, Nandan et al. (2006).

Otros autores Anca et al. (2011) mencionan que el problema mecánico se basa en la historia térmica. Las investigaciones relacionadas con los parámetros de soldadura, la microestructura, las propiedades de las uniones y la distribución de temperatura en la herramienta y la pieza de trabajo han sido considerados por McClure et al. (1998); Mishra y Ma, (2005); Tang et al. (1988); Gould y Feng, (1998), así como los efectos de la variación de los parámetros de proceso en la soldadura por fricción se encuentran desde su aparición hasta épocas recientes. Durante el proceso FSW se genera calor por la fricción entre la herramienta y las piezas a unir produciéndose una deformación plástica, Bever et al, 1973. Este calor fluye tanto en el interior de la pieza como de la herramienta. La cantidad de calor conducido dentro de la pieza, así como las propiedades térmicas y mecánicas de los materiales, los esfuerzos residuales y la distorsión de la pieza determinan la calidad de la soldadura.



Chao et al, 2003 separó la transferencia de calor del proceso FSW en dos problemas de valor a la frontera, un estado estable para la herramienta y uno transitorio para la pieza de trabajo. Cuantificó los valores físicos del proceso, la temperatura en la pieza del trabajo y las mediciones de la herramienta durante el proceso FSW. Determinó el flujo de calor generado a partir de la fricción entre la pieza de trabajo y la herramienta utilizando las mediciones de los experimentos de las temperaturas transitorias del análisis numérico por medio de elemento finito. Concluyeron con sus resultados que la mayor parte del calor generado por fricción, i.e., cerca del 95% se transfiere dentro de la pieza de trabajo y sólo el 5% fluye dentro de la herramienta y la fracción de la relación del trabajo plástico disipado como calor es cerca del 80%.

Por otro lado Russel y Shercliff, (1999) aceptaron una entrada de calor dependiente del esfuerzo de corte del material como base. Frigaard et al. (1999) desarrolló una fórmula para la generación de calor en su modelo, utilizando un coeficiente supuesto de fricción. Song y Kovacevic, (2002) utilizaron la temperatura de fusión en la interfase como una fuente de calor en movimiento para modelar el campo térmico en FSW. Lienert et al, 2003, mostró la extrapolación de las mediciones de temperatura y la evidencia microestructural sugiere un pico de temperatura en la zona de la soldadura excediendo los 1100°C y un poco por arriba de los 1200°C durante la soldadura de aceros templados. A pesar de la importancia de la temperatura y el calor en la herramienta, los cuales son los factores principales para el diseño de la herramienta en FSW, no se encuentran análisis ni mediciones para la herramienta en la literatura abierta, a excepción de los datos preliminares reportados (Chao et al, 2000).

La velocidad de avance, la velocidad de rotación de la herramienta, la presión ejercida a la herramienta, el ángulo de inclinación de la herramienta y el diseño de la herramienta, son las principales variables que se utilizan para controlar el proceso de soldadura por fricción. La cantidad de calor, el campo de temperatura, la velocidad de enfriamiento, el par de fuerza en la dirección transversal son las variables dependientes

de este proceso. En resumen la temperatura se incrementa con la velocidad de rotación y disminuye ligeramente con la velocidad de avance.

### **3.2.9. Defectos, ventajas y desventajas presentados en la soldadura por proceso FSW**

Leonard et al. (2003) clasifica tres imperfecciones comunes encontradas en las uniones efectuadas con el proceso FSW:

- La presencia de huecos.
- Líneas remanentes en la unión.
- Penetración incompleta.

Los huecos generalmente se producen en el lado de avance de la soldadura, y pueden presentarse fisuras a través de la superficie soldada. La formación de huecos se debe a una presión insuficiente, alta velocidad de avance y la inadecuada sujeción de las piezas de trabajo. La herramienta debe de ser capaz de llenar con el material deformado los huecos producido por el pin y el desplazamiento. Si el diseño de la herramienta es incorrecto, es decir el diámetro del pin es demasiado grande para los parámetros seleccionados o la velocidad de desplazamiento es demasiado rápida, el material se enfría antes de que pueda incorporarse completamente en la región detrás de la herramienta. El hombro de la herramienta debe de ser capaz de generar la cantidad de calor suficiente para permitir el flujo del material alrededor de la herramienta, esto se logrará con la presión y el diámetro adecuado, si no se produce el calor suficiente entonces el material no fluirá correctamente y se formarán los huecos. En la Figura 3.29 se muestra un hueco presente en la pieza de trabajo unida a través del proceso FSW.

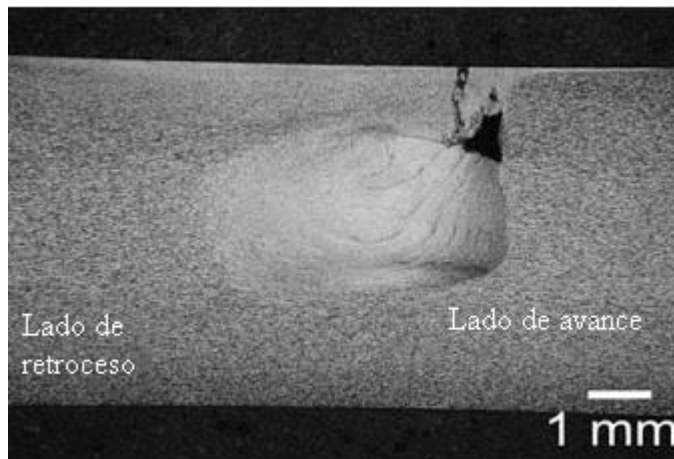


Figura 3.29 Micrografía mostrando un hueco, defecto en soldadura FSW, Leonard et al. (2003).

Las líneas remanentes en la unión también conocidas como defecto de óxido atrapado, aparecen debido a una capa semicontinua de óxido presente en el área del botón de la soldadura. La capa semicontinua de óxido se presenta inicialmente sobre la superficie de contacto de las placas a unir. La línea remanente se forma debido a una limpieza insuficiente de las piezas de trabajo antes de ser unidas o a la deformación incompleta debido a la posición incorrecta de la herramienta con respecto al contacto entre las piezas de trabajo a unir, también se puede presentar por un alto valor en la velocidad de avance, o el diámetro del hombro demasiado grande. En la Figura 3.30 se muestra un defecto de línea remanente.

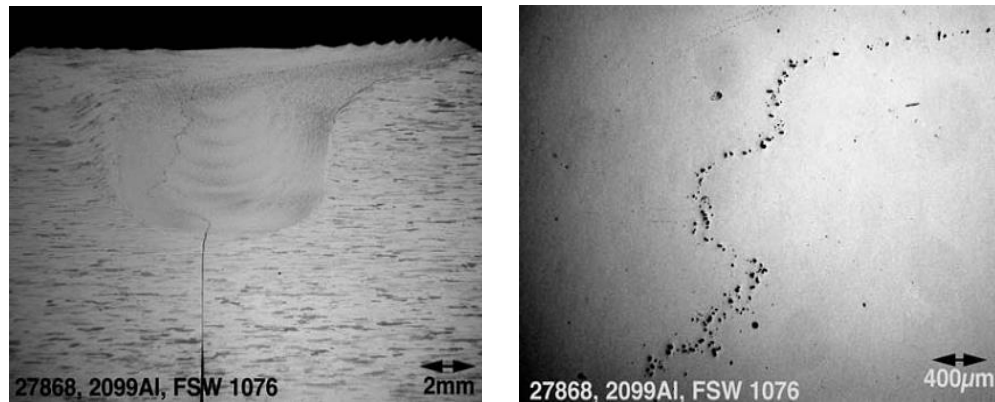


Figura 3.30 a) Micrografía mostrando un defecto de línea remanente, en soldadura FSW y b) Residuos de óxido presentes en la superficie de las piezas de trabajo a unir Leonard et al. (2003).

La penetración incompleta es otro defecto que se presenta por varias causas, puede presentarse por variaciones locales en el espesor de las placas a unir, la incorrecta alineación de la herramienta con respecto a la interfaz de la posición al contacto entre las placas a unir y también puede presentarse por el diseño inadecuado de la herramienta, tanto en la longitud y la geometría del pin, al tener una longitud precisa con respecto al espesor de las placas, para que no quede una penetración incompleta y tampoco toque la base del soporte donde se encuentra montado el material a unir. En la Figura 3.31 se muestra el defecto de penetración incompleta de la herramienta en las placas a unir.

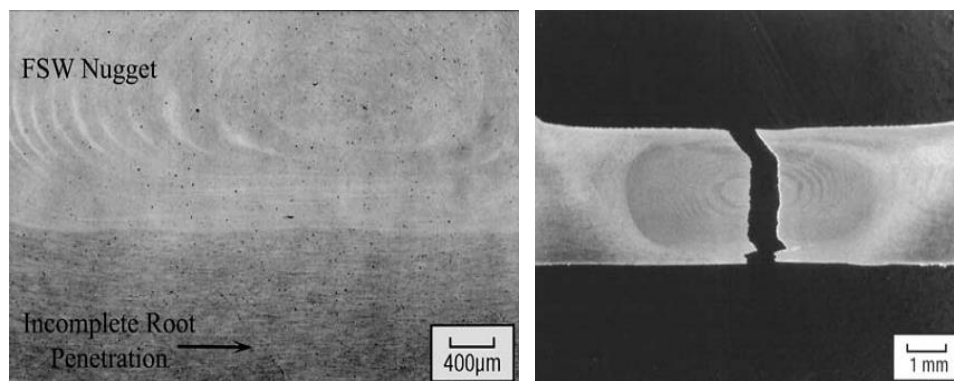


Figura 3.31 a) Micrografía mostrando penetración incompleta, defecto en FSW y b) Fractura generada por penetración incompleta, Leonard et al. (2003).

Mishra et al. (2005) clasifica en su trabajo las ventajas del proceso de FSW y se considera el avance más significativo en la unión de los metales en la última década, es considerada una tecnología verde debido a su eficiencia energética con respecto al medio ambiente. En comparación con los métodos convencionales de soldadura, el proceso FSW, consume considerablemente menos energía. No se utiliza gas protector por lo que el proceso es amigable con el medio ambiente. La unión no implica ningún uso de material de aporte, en la Tabla 3.11 se resumen los beneficios del proceso FSW.

Tabla 3.11 Beneficios del proceso FSW.

<b>Beneficios Metalúrgicos</b>	<b>Beneficios Ambientales</b>	<b>Beneficios Energéticos</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Procedimiento en fase sólida</li> <li>• Baja distorsión de la pieza de trabajo.</li> <li>• Buena estabilidad dimensional y repetitividad</li> <li>• No hay pérdida de elementos en a aleación.</li> <li>• Excelentes propiedades metalúrgicas en el área de la unión.</li> <li>• Microestructura fina.</li> <li>• Genera una baja porosidad en la unión.</li> <li>• Se aplica en la unión de componentes de materiales disímiles.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• No se requiere gas protector</li> <li>• No requiere limpieza en la superficie.</li> <li>• Se eliminan los solventes para desengrasar</li> <li>• Ahorro en materiales consumibles, tales como alambres o cualquier otro gas.</li> <li>• Proceso ambientalmente limpio, no se producen humos tóxicos, presenta ventajas por ser seguro porque no se producen arcos, chispas ni llamas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• El avance en la aplicación de los materiales, por ejemplo, uniéndose a diferentes espesores permite la reducción de peso.</li> <li>• Sólo utiliza el 2.5% de la energía necesaria para efectuar una soldadura láser.</li> <li>• Disminución en el consumo de combustible en las aeronaves ligeras, automóviles y en los barcos.</li> <li>• Se tiene un mejor control de la soldadura porque es programable en computadora del equipo donde se realiza el proceso.</li> <li>• No requiere un proceso posterior.</li> <li>• Proceso que aprovecha el calor generado por la fricción mecánica entre dos piezas en movimiento.</li> </ul>

Algunas de las desventajas presentadas en el proceso FSW son el costo y la inspección, además de ser difícil de efectuar la inspección a la unión.

### 3.2.10. Proceso de soldadura FSSW

El proceso FSW ha evolucionado y dio lugar al proceso FSSW. Awang et al. (2006) describe que el proceso consiste en tres etapas distintas: a) penetración, b) agitación y c) retroceso, el proceso se inicia con la herramienta penetrando lentamente el material, entonces los efectos combinados de la rotación de la herramienta y el movimiento de la misma penetrando el material promueven la agitación, y finalmente se retrae la herramienta, la etapa de retroceso se realiza rápidamente, justo después de que la herramienta haya alcanzado la profundidad de inmersión y después de transcurrido el tiempo de sostenimiento especificado, Malafaia et al. (2010), en la Figura 3.32 se puede observar el esquema del proceso FSSW.

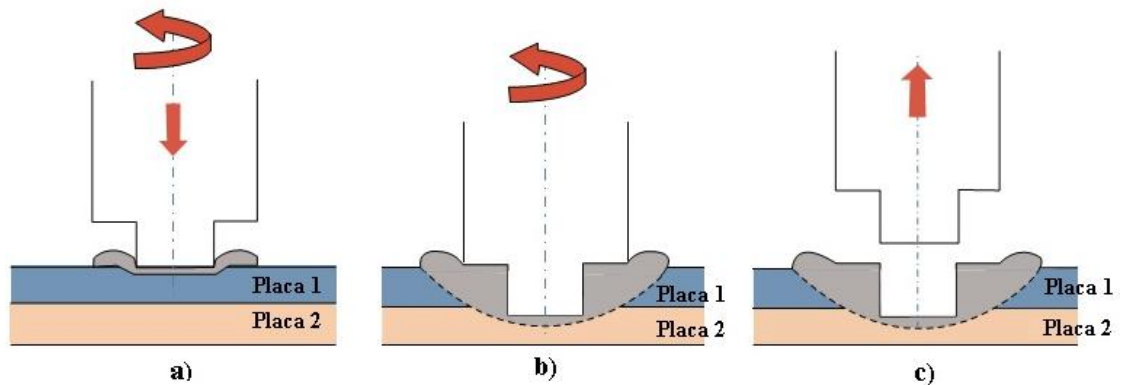


Figura 3.32 Esquema del proceso FSSW, Yang et al. (2014).

El proceso FSSW es un proceso desarrollado recientemente y ha sido estudiado para aplicaciones en la industria automotriz, aeronáutica entre otros Hancock (2004). El proceso FSSW es un proceso derivado del proceso FSW ampliamente utilizado para uniones de aleaciones de aluminio, el proceso FSSW posee la diferencia esencial que no existe un movimiento transversal de la herramienta, Lathabai et al. (2006). El proceso FSSW también es conocido como soldadura sumergida por punto por fricción-agitación (PFSSW, por sus siglas en inglés), la cual fue patentada por MAZDA en 2003, Badarinarayan et al. (2007) y Iwashita (2003).

Las variables del proceso FSSW más importantes son la velocidad de rotación y el tiempo de sostenimiento, estos parámetros determinan las propiedades mecánicas de los puntos de soldadura, influyendo en la generación de calor, el flujo del material alrededor del pin, así como la geometría de la herramienta. En los últimos años, algunos investigadores han estudiado el efecto de la velocidad de rotación y el tiempo de sostenimiento en las propiedades físicas y mecánicas en la unión de aleaciones de aluminio (Al), y las aleaciones de magnesio (Mg) son objeto de interés creciente para la industria automotriz debido a sus propiedades de alta resistencia/peso, Fereiduni et al. (2015). Una de las desventajas del proceso FSSW es el hueco en el centro de la unión donde se produce el punto de soldadura, este agujero reduce la resistencia de la unión y propicia la corrosión debido a que el agua de la lluvia permanece alojada en el hueco, en esta área la pintura o recubrimientos en ocasiones es difícil que cubra completamente el fondo, Uematsu et al. (2008).

En la Figura 3.33 se muestra el esquema del estudio realizado en aleación de Mg por Rao et al. (2014) donde fueron utilizadas láminas de 1.4 mm de espesor con un configuración de junta a traslape utilizando una herramienta en acero H13 con geometría no roscada cilíndrica con un diámetro de hombro de 12 mm y un pin de diámetro de 5 mm y longitud de 1.8 mm.

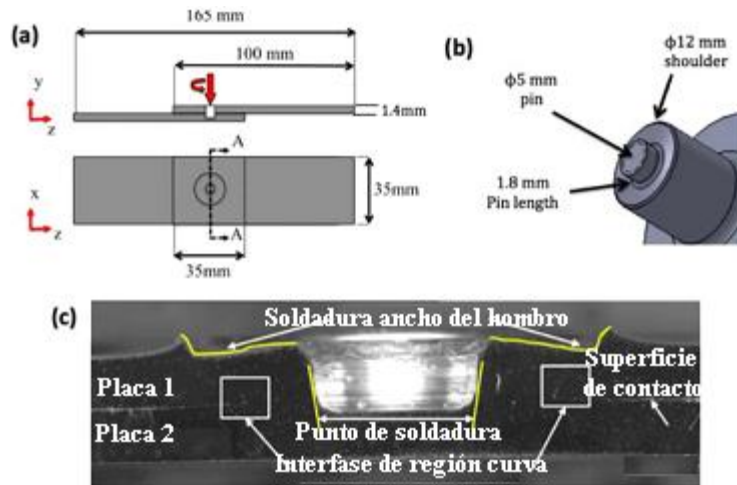


Figura 3.33 Esquema del proceso FSSW, a) configuración de la junta y dimensiones de las láminas, b) geometría de la herramienta utilizada y c) sección transversal del punto de soldadura mediante proceso FSSW.

Existen trabajos reportados en literatura del proceso FSSW en distintas aleaciones, Wang y Lee (2007) realizaron un estudio de la microestructura en proceso FSSW en la aleación de aluminio 6061 T6, sin embargo, no se han encontrado publicaciones sobre este proceso en aleaciones de titanio. Este estudio se enfoca en el proceso FSSW aplicado a la aleación Ti-6Al-4V, con el fin de contribuir al mapa de proceso de soldadura en estado sólido en dichas aleaciones; debido al creciente interés de la industria aeronáutica que se mueve hacia diseños ligeros.



### 3.3. Método de elemento finito aplicado en proceso de soldadura en estado solido

#### 3.3.1. MEF

El entorno real está conformado por una serie de sistemas o procesos que la mayoría de las veces son extremadamente complejos, por lo cual para su resolución se deben emplear metodologías potentes que nos ayuden a alcanzar las resultantes que mejor satisfagan el manejo de estos sistemas. Intentar comprender el comportamiento de un sistema o proceso mediante la experimentación puede llegar a ser muy costoso económicamente y consumir una alta cantidad de tiempo, lo cual representa una gran desventaja en la solución, con el fin de superar dichas desventajas se utilizan alternativas donde se reemplaza el sistema o proceso real por una versión simplificada denominada modelación numérica o simulación. Para poder simular un sistema o proceso primeramente se debe de modelar, en Figura 3.34 se muestra el esquema de modelado y simulación.

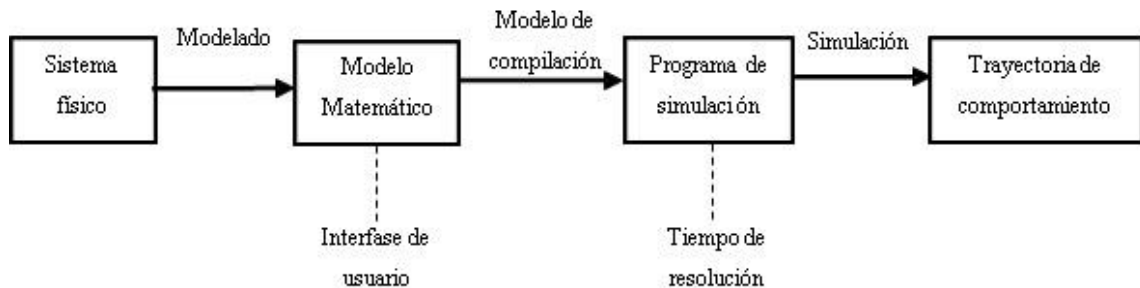


Figura 3.34 Proceso de modelado y simulación, Cellier y Kofman (2006).

Toro (2007) clasifica los modelos matemáticos válidos para distintas áreas en mecánica, los agrupa por categorías que contrastan, en la primera se distinguen entre problemas estáticos y dinámicos, en los primeros sólo interesa encontrar un estado  $u$  que posiblemente representa un estado de equilibrio del sistema físico, en los problemas

dinámicos, interesa una evolución  $u(t)$  con  $t \geq 0$ , siendo  $t$  el tiempo. La segunda categoría distingue la dimensión del espacio vectorial al cual pertenecen los vectores de estado, si es finita se clasificará el problema como discreto, si por lo contrario la dimensión de los vectores de estado es infinita, es decir son funciones de estado, entonces se clasificará el problema como continuo. La última categoría de modelos en mecánica distingue entre el hecho de que la evolución de estados  $u(t)$  se obtiene mediante una ley causal en la cual cualquier estado futuro se obtiene de una manera única a partir de un estado presente, en cuyo caso se llama un modelo determinístico, por contraste, en los modelos probabilísticos existe una incertidumbre en la evolución del vector de estado, pudiéndose conocerse únicamente la evolución de las probabilidades de ocurrencia de los diversos estados que son elementos de un espacio muestral. Para precisar la clasificación describe que en cada modelo se pretende encontrar un vector de estado que describa el sistema físico que se está modelando, dicho *vector de estado* lo denotamos de manera general  $u$  y pertenece a un *espacio vectorial*  $V$  que también podemos llamar espacio de estado, en la Figura 3.35 clasificación de modelos matemáticos válidos para distintas áreas en mecánica.

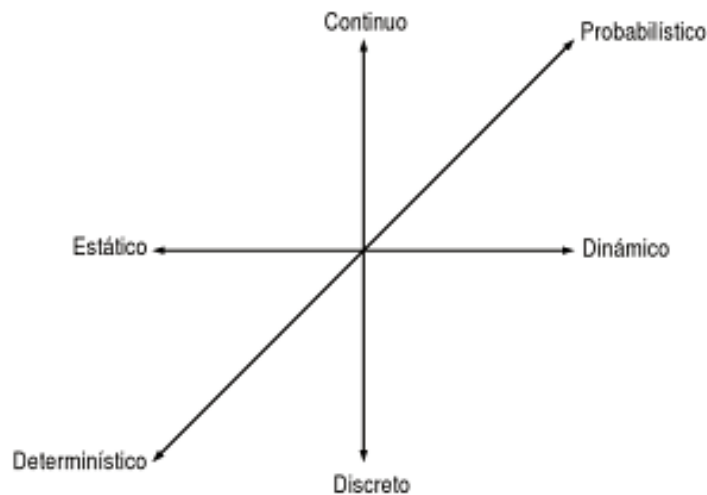


Figura 3.35 Clasificación de modelos matemáticos válidos para distintas áreas en mecánica.

Toro (2007).

La categoría en la cual se aborda, es la categoría que distingue la dimensión del espacio vectorial al cual pertenecen los vectores de estado. La observación aquí es que las técnicas más importantes de la simplificación de problemas en ingeniería consisten precisamente en crear modelos discretos del sistema físico, caracterizables por un número finito de grados de libertad, que emulen dentro de un nivel de aproximación razonable la dinámica o los estados de equilibrio de sistemas continuos. Prueba de ellos son los típicos modelos de “masa, resorte, amortiguador” que se usan para resolver problemas de ingeniería, siendo estos un buen ejemplo de una discretización de un problema físico, Law y Kelton (1991).

Para comenzar con la fase de modelado en primer instancia se debe reunir el conocimiento científico y tecnológico perteneciente al propio sistema o proceso, para posteriormente organizar e interpretar adecuadamente la información y buscar reproducirlo mediante solución analítica o numérica, Cellier y Kelton (1991) y Millan et al. (2011). Se entiende por solución analítica a aquellas expresiones matemáticas que arrojan valores para alguna determinada incógnita, la cual es validada a lo largo del cuerpo estudiado y por lo tanto, es válida también en cualquier sección del cuerpo en un número infinito de locaciones dentro del cuerpo. Estas soluciones analíticas, generalmente requieren la solución de ecuaciones diferenciales ya sea parciales u ordinarias, las cuales, debido a que se analizan geometrías complejas, cargas no distribuidas y determinación de propiedades de materiales, no son posibles de resolver Calderón y Gallo (2010). Es entonces que la modelación numérica brinda un valioso servicio de información en la predicción de resultados en el comportamiento de un sistema o proceso. La técnica de solución por MEF consiste en el empleo de los métodos numéricos en la solución de un problema físico determinado.

El método de elemento finito es una herramienta numérica para determinar soluciones aproximadas a una gran variedad de problemas de ingeniería que con frecuencia es necesario obtener soluciones numéricas aproximadas para problemas

industriales complejos, en los cuales las soluciones exactas son difíciles de alcanzar Roland et al. (2004); Zienkiewicz y Cheung (1967) y Ainsworth y Oden (2011). MEF es conocido como un método rentable en la resolución de problemas físicos, cuya formulación surge desde un punto de vista matemático y comúnmente la solución es expresada a partir de una ecuación diferencial en derivadas parciales. Esta metodología es apropiada en los casos de resolución de problemas en mecánica de sólidos, mecánica de fluidos, potenciales eléctricos etc. Zienkiewicz y Taylor (2005) y Martínez (2011).

El MEF es un método de cálculo numérico basado en ecuaciones diferenciales para resolver problemas relacionados con la ingeniería. Para dar solución a un problema de ingeniería basándose en el método de elemento finito se debe tener en cuenta lo siguiente:

- Una función continua se aproxima a una serie de funciones finitas y mediante ese número finito de funciones se puede llegar a una solución equivalente de la función continua.
- El objeto a estudiar estará dividido en subdominios a los que se denomina “elementos”, ver Figura 3.36 a) y b). El MEF, por tanto, se basa en transformar un cuerpo de naturaleza continua en un modelo discreto aproximado. Esta transformación se denomina discretización del modelo ver Figura 3.36 c) y d).

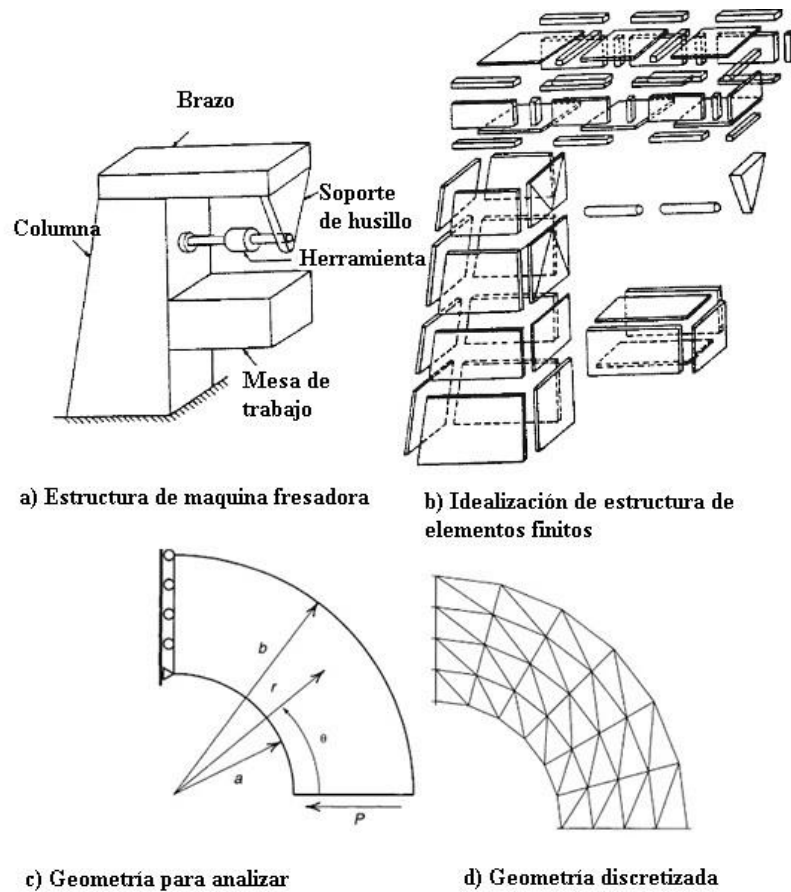


Figura 3.36 Discretización de un objeto a) estructura de maquina fresadora, b) discretización de la estructura de maquina fresadora, c) viga circular y d) discretización de la viga circular, Zhu et al. (2013).

- Estos elementos estarán definidos mediante puntos y conexiones llamados “nodos”, ver Figura 3.37. El conocimiento de lo que sucede en el interior de este modelo del cuerpo aproximado, se obtiene mediante la interpolación de los valores conocidos en los nodos. Es por tanto una aproximación de los valores de una función a partir del conocimiento de un número determinado y finito de puntos.

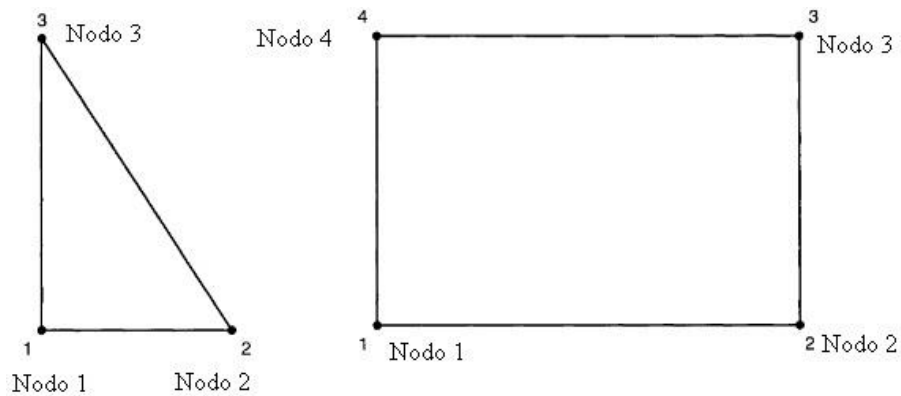


Figura 3.37 Representación de elementos y nodos.

- La unión de todos los nodos y elementos presentes en una pieza se denomina “mallado”, por lo tanto “mallar” una pieza significa crear los subdominios que van a definir la misma.
- Las funciones continuas definidas son resueltas en cada nodo, asumiendo que cualquier punto interno al elemento puede calcularse como variables nodales del elemento.
- Como variables nodales entendemos los grados de libertad de los nodos: tres grados de desplazamiento y tres grados de rotación.
- La suma de todos los elementos representa el objeto de estudio, al que se llama cuerpo mallado (ver Figura 3.38), consiguiendo una aproximación con la realidad a la hora de realizar el análisis de los elemento finito, Rao, (2010).

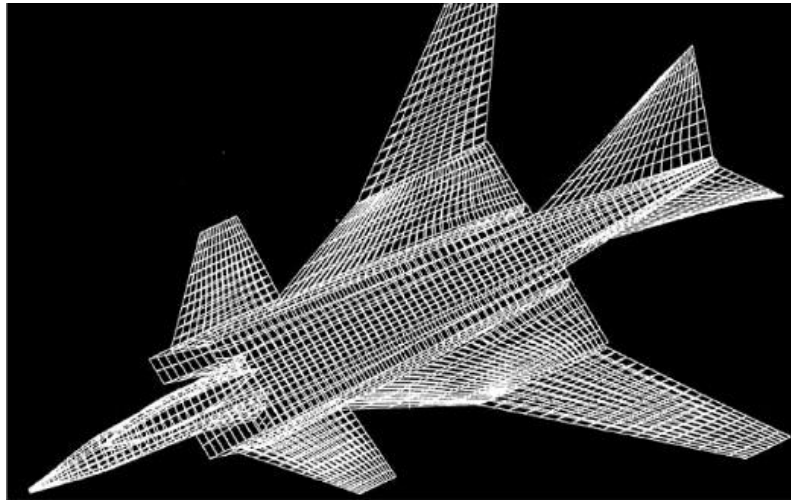


Figura 3.38 Avión de combate mallado Rao, (2010).

El ciclo del análisis por elemento finito incluye cinco etapas diferenciadas, tal y como se puede observar en la Figura 3.39.

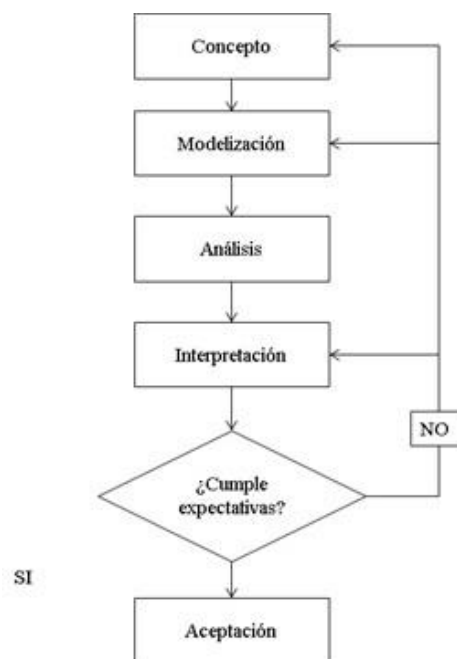


Figura 3.39 Uso del MEF en el desarrollo de proyectos.

- Concepto: en esta etapa se debe tener en cuenta los requisitos del problema a analizar. Hay que definir el modelo e incluir para el correcto análisis.
- Modelización: esta etapa es también llamada pre-procesamiento. En este punto se diseña el objeto a analizar así como las condiciones de contorno.
- Análisis: en este punto se hace el verdadero cálculo numérico del modelo de elemento finito.
- Interpretación: aunque todos los demás puntos son los que hacen posible el análisis, ésta es en realidad la etapa más importante. Aquí es donde se da forma a los datos obtenidos, se interpreta su significado y se decide si el análisis es admisible o si por el contrario se debe de proceder a realizar algún cambio. Desde esta etapa se puede volver atrás hasta el concepto, la modelización o incluso hasta una nueva interpretación de los mismos datos.
- Aceptación: es el momento de realizar las conclusiones finales obtenidas del análisis e interpretación de los datos.

El MEF se implementa a través de software informático que minimiza los tiempos dedicados a la resolución del problema. En este caso los programas informáticos usados para estos análisis incluyen tres pasos o módulos principales, el pre-procesado, el análisis y el post-procesado.

Da Fonseca Lopes (2011) describe las funciones principales de estos módulos respectivamente como (1) entrada y/o generación de los parámetros del problema, (2) ensamblaje y resolución del sistema de ecuaciones y (3) impresión y graficación de la solución, en la Figura 3.40 se muestra el esquema general de la implementación computacional del método de los elemento finito.



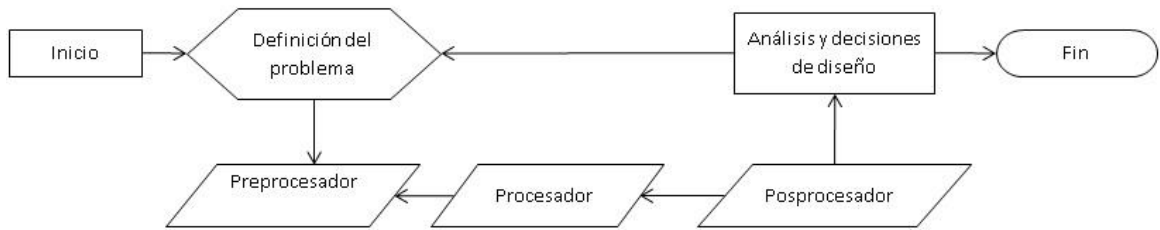


Figura 3.40 Esquema general de la implementación computacional del método de elemento finito.

### 3.3.2. Características del método elemento finito

La tarea del procesamiento se considera una parte importante dentro del análisis mediante elemento finito. De hecho, con frecuencia puede ser la parte más compleja y consume la mayoría del tiempo estimado dentro del desarrollo del trabajo. Por esta razón es importante considerar la fase de conceptualización. Como se mencionó anteriormente en el esquema de las etapas del MEF, la finalidad de esta etapa es determinar el objetivo del análisis enfocado a la respuesta que se está buscando, ya que de ello depende fuertemente en la elección del modelo.

Inglessis y Cerrolaza, (2003) en general describen al MEF como un método que genera un sistema de ecuaciones algebraicas a partir de ecuaciones integrales, utilizando interpolación polinómica sobre elementos discretos que forman una malla definida sobre el dominio problema, los cuales están unidos por nodos.

El objetivo del MEF también es conocer los campos anteriores en cualquier punto del dominio a partir de los valores encontrados en ciertos puntos. Para la construcción de la malla los elementos pueden ser de diferentes formas geométricas (ver Figura 3.41) dependiendo de la geometría del dominio total, siendo en general formas geométricas bastante simples:

- Puntos y líneas para problemas unidimensionales.
- Triángulos y cuadriláteros para problemas bidimensionales.
- Tetraedros y hexaedros para problemas tridimensionales.

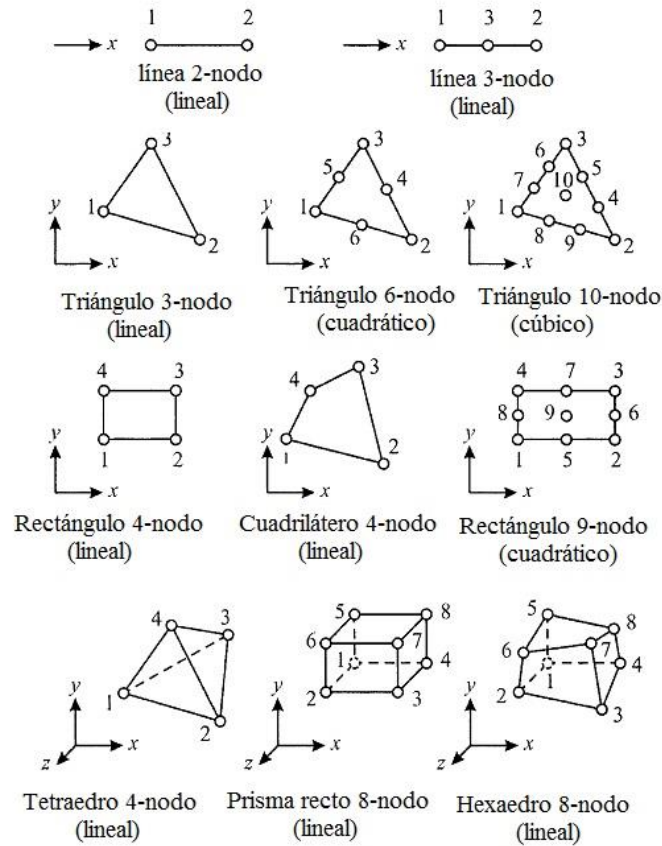


Figura 3.41 Geometrías de algunos tipos de elementos, Madenci (2015).

El método supone que el comportamiento mecánico de un sólido continuo está conformado por un número finito de secciones o elementos, sobre estas secciones o elementos son consideradas las propiedades del material y las relaciones constitutivas, donde a su vez, estos elementos se encuentran conectados entre sí por un número discreto de puntos llamados nodos localizados en su contorno, Dhatt et al. (2012).

Se define al conjunto de nodos (considerando sus relaciones de adyacencia) como una malla. Los cálculos son realizados sobre una malla o discretización (partición del dominio) creada a partir del dominio de geometría simple. La matriz de dicho sistema de ecuaciones se conoce con el nombre de matriz de rigidez del sistema o hipermatriz. De lo antes mencionado, se puede notar que el número de ecuaciones del sistema (ecuación 1) es proporcional al número de nodos, Angulo (2009).

$$\begin{aligned}
 a_1x_1 + b_1x_2 + c_1x_3 &= d \\
 e_1x_1 + l_1x_2 + g_1x_3 &= h \\
 i_1x_1 + j_1x_2 + k_1x_3 &= l
 \end{aligned}
 \tag{14}$$

Sistema de ecuaciones lineal

$$\begin{array}{ccc}
 \begin{bmatrix} a & b & c \\ e & f & g \\ i & j & k \end{bmatrix} x & \begin{matrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \end{matrix} = & \begin{matrix} d \\ h \\ l \end{matrix} & (15) \\
 \text{Hipermatriz} & \text{Solución} & \text{Resultado} & 
 \end{array}$$

### 3.3.3. Formulación matemática para MEF

En general, hay diversos modos de enfocar el problema mediante elemento finito: (1) formulación directa, (2) formulación variacional, (3) formulación por pesos residuales y (4) formulación mediante la energía potencial.

El método directo puede verse como una extensión del *método de rigidez*, ampliamente usado en el análisis estructural, por lo cual, es conveniente iniciar el estudio de los conceptos esenciales de esta formulación, considerando ejemplos sencillos de dicho análisis. Uno de los elementos más simples que puede examinarse desde el punto de vista del MEF, es el sistema formado por resortes lineales. En la Figura 3.42 se muestra un resorte elástico-lineal, el cual obedece la ley de Hooke; es

decir si una fuerza  $f$  esta aplicada en el extremo libre del resorte y produce un desplazamiento  $\delta$ , entonces existirá una relación fuerza-desplazamiento, la cual es lineal y está dada por la ecuación 3:

$$f = k\delta \quad (16)$$

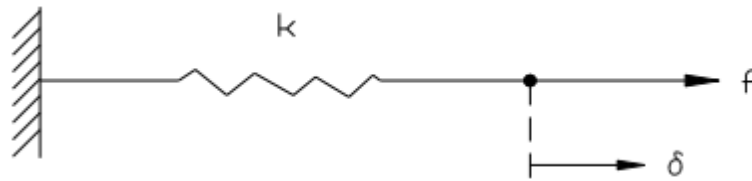


Figura 3.42 Un resorte lineal con un extremo fijo y una fuerza aplicada en su extremo libre.

En la ecuación 16,  $k$  es la rigidez del resorte. El resorte de la Figura 3.432 está fijo en un extremo y solo se puede tener desplazamiento como se indica en la figura. Ahora considérese un resorte elástico-lineal, de extremos  $i$  y  $j$ , el cual forma parte de un sistema de resortes (en equilibrio) tal como se muestra en la Figura 3.43. En este caso, debido a la acción de los resortes adyacentes, actúan las fuerzas  $f_1$  y  $f_2$  en los extremos del resorte, siendo  $\delta_1$  y  $\delta_2$  los correspondientes desplazamientos. Los extremos  $i$  y  $j$  del resorte son los nodos del “elemento resorte”, y los desplazamientos de cada nodo se denominan, en general, grados de libertad.

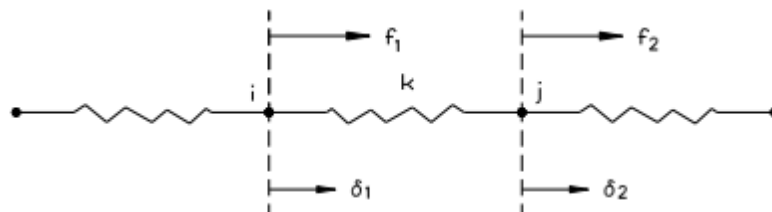


Figura 3.43 Un resorte lineal típico en un sistema de resortes.

Del equilibrio de las fuerzas sobre el resorte, se tiene

$$f_1 + f_2 = 0 \quad (17)$$

es decir,  $f_1 = -f_2 \quad (18)$

Puesto que el nodo  $i$  se desplazó una distancia  $\delta_1$  y el nodo  $j$  se desplazó una distancia  $\delta_2$ , la elongación total del resorte es  $\delta_2 - \delta_1$ , y por lo tanto este resorte se comportará exactamente igual al resorte de la Figura 3.43 con una fuerza  $f_2$  y un desplazamiento  $\delta_2 - \delta_1$ . Obteniendo,

$$f_2 = k(\delta_2 - \delta_1) \quad (19)$$

de modo que:

$$F_1 = k(\delta_1 - \delta_2) \quad (20)$$

En notación matricial, estas ecuaciones pueden escribirse del siguiente modo:

$$\begin{pmatrix} f_1 \\ f_2 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} k & -k \\ -k & k \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \end{pmatrix} \quad (21)$$

o, en forma compacta

$$\{f\} = [k]\{\delta\} \quad (22)$$

Los índices  $i$  y  $j$  de los elementos de la matriz de rigidez  $[k]$ ,  $k_{ij}$ , denotan la localización de cada coeficiente de rigidez en la  $i$ -ésima fila y la  $j$ -ésima columna de dicha matriz. Esta matriz (cuadrada) es conocida con el nombre de matriz de rigidez del elemento (en este caso, el resorte), el vector  $\{\delta\}$  es el vector de desplazamientos nodales y el vector  $\{f\}$  es el vector de fuerzas nodales del elemento. En este ejemplo la ley de Hooke permitió determinar los valores exactos de los coeficientes de rigidez de la matriz de rigidez  $[k]$ . Este método es difícil de aplicar en los problemas bidimensionales y tridimensionales, los cuales son los casos donde el método de elemento finito es más útil, lo cual reduce su rango de aplicación, Hernández (2013).

El comportamiento en el interior de cada elemento queda definido a partir del comportamiento de los nodos mediante las funciones adecuadas de interpolación o funciones de forma. La interpolación es un elemento clave del MEF, puesto que es a través de las funciones de forma, o interpolación, que se consigue reducir el problema a la determinación de los movimientos de unos nodos. Estas funciones deben dar valores sucesivamente aproximados de los movimientos de cualquier punto del elemento, Johnson (2012).

El método de Rayleigh-Ritz es un método variacional que está basado en la minimización de algún funcional. La idea básica consiste en aproximar a las soluciones  $u, v$  que hacen estacionario un funcional mediante una suma ponderada de funciones:

$$\tilde{u} = \sum_{i=l}^m a_i N_i(x, y), \quad \tilde{v} = \sum_{i=m+1}^n a_i N_i(x, y), \quad (23)$$

donde  $a_i$  son constantes a determinar llamadas coordenadas generalizadas. Las funciones  $N_i(x, y)$  son llamadas funciones de prueba y pueden ser elegidas arbitrariamente, pero deben ser admisibles, esto es, deben de satisfacer las condiciones esenciales de contorno y las condiciones de compatibilidad. En general, se utilizan polinomios, aunque pueden utilizarse funciones trigonométricas u otro tipo de funciones.

Considerando un sistema de ecuaciones diferenciales, cuya solución es equivalente a hacer estacionaria la primera variación de un funcional asociado  $\Pi$  que es función de  $u, v$  y sus primeras derivadas, se tiene:

$$\pi = \int_{\Omega} F(x, y, u, v, u_x, u_y, v_x, v_y) dx dy \quad (24)$$

Las derivadas de las funciones de aproximación  $u$  son:

$$\frac{\delta \tilde{u}}{\delta x} = \sum_{i=1}^m a_i \frac{\delta N_i(x, y)}{dx}, \quad \frac{\delta \tilde{u}}{\delta y} = \sum_{i=1}^m a_i \frac{\delta N_i(x, y)}{dy}, \quad (25)$$

y en forma análoga para aproximación de  $v$ . Si se sustituyen las funciones de aproximación de  $u$ ,  $v$  y sus derivadas en funcional  $\Pi$ , éste se transformará en una función de las coordenadas generalizadas  $a_i$ , cuyos valores por ahora se desconocen, esto es:

$$\pi = \pi(a_i) \quad i=1,2,\dots,n \quad (26)$$

Posteriormente se desea conocer cuáles son los mejores valores de las constantes  $a_i$ , tal que reemplazados en las expresiones (25) nos brinden la mejor aproximación a la solución del sistema de ecuaciones diferenciales asociado al funcional  $\Pi$ . Para ello se aplica la condición de estabilidad a este funcional que, como se había mencionado anteriormente, debe ser satisfecha por la solución exacta, resultando:

$$\delta \pi = \sum_{i=1}^n \frac{\delta \pi}{\delta a_i} a_i = 0 \quad (27)$$

Como esta ecuación debe ser válida para variaciones arbitrarias  $\delta a_i$ , deben cumplirse las siguientes  $n$  ecuaciones algebraicas:

$$\frac{\delta \pi}{\delta a_i} = 0 \quad i=1,2,\dots,n \quad (28)$$

Las derivadas de este funcional serán funciones lineales en las coordenadas generalizadas  $a_i$  que se pueden expresar como:

$$\frac{\delta \pi}{\delta a_i} = (k_{i1}a_1 + k_{i2}a_2 + \dots + k_{in}a_n - f_i) = 0 \quad i=1,2,\dots,n \quad (29)$$

En forma matricial este sistema de ecuaciones se puede escribir de la siguiente manera:

$$\begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & \dots & k_{1n} \\ k_{21} & k_{22} & \dots & k_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ k_{n1} & k_{n2} & \dots & k_{nn} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \dots \\ a_n \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \dots \\ f_n \end{Bmatrix} \quad (30)$$

y en forma abreviada usando notación matricial:

$$Ka = f \quad (31)$$

La solución de este sistema de ecuaciones nos da valores de las constantes  $a_i$ . Para un número grande de ecuaciones la solución a mano de este sistema es prácticamente imposible y debe ser resuelto por computadora.

El método mediante pesos residuales es usado para desarrollar las ecuaciones de los elementos cuando se conoce la ecuación diferencial que describe al fenómeno físico. El método más usado es el de Galerkin; éste permite obtener las mismas ecuaciones que en el método de la energía, pero existen caso especiales en donde la función de la energía potencial no es viable, Rao (2010).

El método usando energía o trabajo es el desarrollo de la matriz de rigidez y las ecuaciones de los elementos bidimensionales y tridimensionales, pero es mucho más sencillo aplicar el método de la energía. El principio de trabajo virtual (usando desplazamientos virtuales), el principio de energía potencial mínima y el teorema de Castigliano son usados frecuentemente para encontrar las ecuaciones de los elementos.



El principio de trabajo virtual es aplicable para cualquier tipo de material, el principio de energía potencial mínima y el teorema de Castigliano son teoremas aplicables para materiales elásticos. Sin embargo, el principio de trabajo virtual puede ser usado cuando no existe función potencial. Los tres principios permiten obtener las mismas ecuaciones elementales para materiales elásticos y lineales, Zienkiewicz y Taylor (2005).

### 3.3.4. Formulación Mecánica

**Método Lagrangiano:** en este tipo de formulación de la malla, un elemento finito representa la misma parte de material a lo largo de todo el análisis, el mallado seguirá los movimientos del material. Se deben definir adecuadamente las propiedades del material para simular el fluido. Para ilustrar el funcionamiento de este tipo de malla se puede observar la Figura 3.44 en la cual las fuerzas son aplicadas tan solo al nodo central, el resultado de las cargas es el desplazamiento del nodo. Este nodo toma una nueva posición y la malla se deforma.

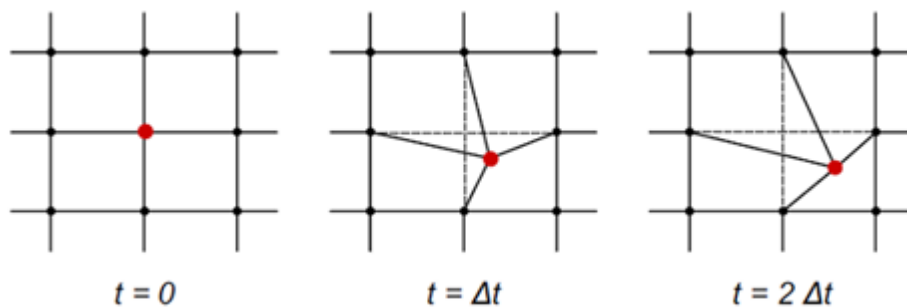


Figura 3.44 Mallado Lagrangiano.

**Método Euleriano:** en este tipo de mallado del material, cada punto del fluido se desplaza de un elemento finito a otro del mallado sin que exista deformación de éste; el material puede fluir a través del mallado. Aunque durante un incremento de tiempo se

deforma, debido a que el mallado usa la formulación lagrangiana en los incrementos de tiempo, posteriormente se realiza una interpolación de las variables asociados de los nodos. Se puede observar el procedimiento en la

Figura 3.45, las cargas al igual que en el ejemplo anterior son aplicadas sobre el nodo central.

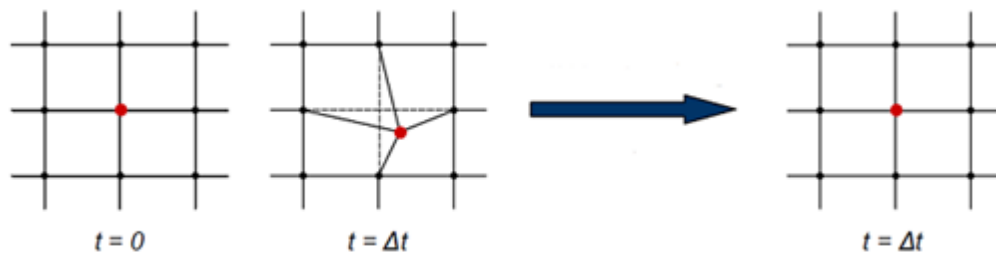


Figura 3.45 Mallado Euleriano.

**Método Lagrangiano - Euleriano Arbitrario (ALE, por sus siglas en inglés):** en este tipo de método, la malla se mueve parcialmente y se deforma, ya que sigue al material (parte lagrangiana) además de que el material puede unirse por la malla (parte euleriana), el proceso que se muestra en la

Figura 3.46 es muy similar al euleriano, Lorrain et al. (2009).

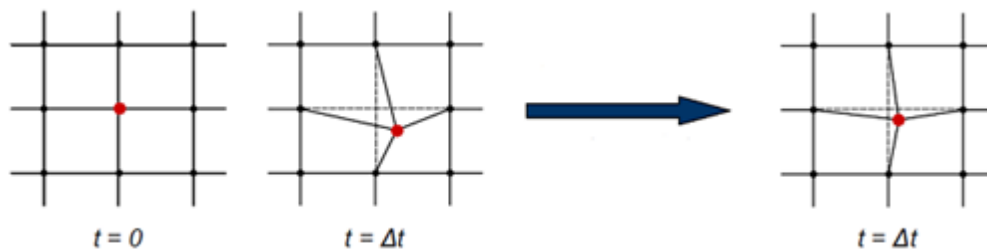


Figura 3.46 Mallado ALE.

Se plantean tres tipos de formulaciones de elemento finito, es decir Lagrangiano, Euleriano y Lagrangiano – Euleriano Arbitrario. Comúnmente se aplican dos tipos de representaciones al delinear las distorsiones cuando se simula utilizando el método de elemento finito en los procesos no lineales en mecánica de sólidos: Lagrangiano y Euleriano. Ambos se utilizan para determinar la relación entre el continuo deformado y el mallado de las zonas, pero cada uno de ellos tiene sus ventajas y desventajas y se aplican a solución de problemas diferentes.

En una descripción lagrangiana, los nodos de la malla de elemento finito están unidos a los puntos determinados en el material y la malla se deforma con el material, como se muestra en la Figura 3.47. Dado que los nodos coinciden con los puntos determinados en el material en la malla de Lagrange, los nodos frontera permanecerán en el límite a lo largo de la evolución en la solución del problema. Esto simplifica la imposición de condiciones de contorno en mallas Lagrangiana. La descripción lagrangiana es la más popular en la mecánica de sólidos, su atractivo es que se puede manejar fácilmente y con precisión. Sin embargo, este enfoque no es adecuado para grandes problemas de deformación, ya que el material se deforma en gran medida y la malla también se deformará severamente, causando resultados pobres y la interrupción de la solución computacional.

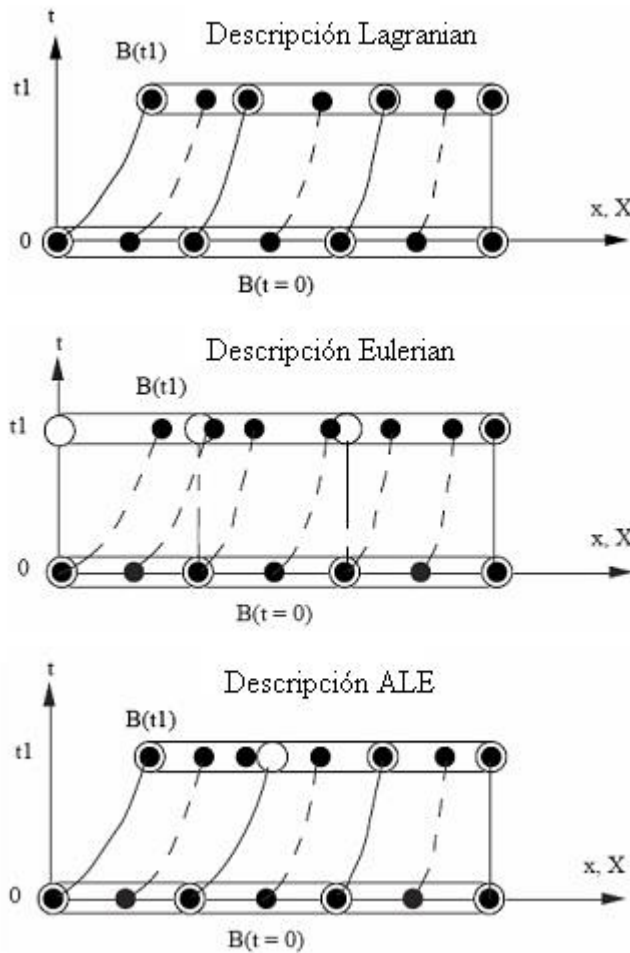


Figura 3.47 Ejemplo de dimensiones de Lagrange, Euler y ALE, movimiento de un punto.

### 3.3.5. Modelo Constitutivo de Johnson Cook

Durante el proceso FSW, el material se somete a cambios de temperatura y diversas velocidades de deformación. Por lo tanto, la ecuación constitutiva tiene que captar los cambios en el comportamiento del material dependiendo de la velocidad de deformación y la temperatura. Además de capturar los cambios del material debido a la relación del endurecimiento por deformación y la evolución de la microestructura. En la literatura, se pueden encontrar tanto modelos muy simples como sofisticados que

implican cambios microestructurales, todos ellos basados en el comportamiento viscoplástico.

La ecuación constitutiva es una formulación físico-matemática que describe el comportamiento termomecánico de un material bajo diferentes condiciones de carga, permitiendo obtener la tensión en función de la deformación  $\epsilon$ , la velocidad de deformación  $\dot{\epsilon}$ , la temperatura  $\theta$ , el cambio  $D$  u otras variables internas:

$$\sigma = f(\epsilon, \dot{\epsilon}, \theta, D, \dots) \quad (32)$$

En el año de 1983 dos científicos-investigadores Gordon R. Johnson (Honeywell Inc., Defense System Division) y William H. Cook (Air Force Arment Laboratory) desarrollaron un modelo constitutivo empírico, el cual representa el comportamiento de materiales sujetos a grandes deformaciones, altas velocidades de deformación y altas temperaturas. Las variables presentes en el modelo son deformación, velocidad de deformación y temperatura. La simplicidad básica del modelo permite ser implementado fácilmente en software de simulación, Johnson y Cook (1983).

El modelo de Johnson-Cook, también nombrado modelo viscoplástico, es un modelo sensible a la velocidad de deformación y temperatura, de forma adiabática pues no asume conducción de calor. Es un modelo con variaciones grandes de deformación y temperaturas, lo que afecta al comportamiento plástico del material provocando un ablandamiento de éste. Se puede utilizar en elementos tipo placa y en elementos sólidos, Zhang et al. (2006).

En una ecuación constitutiva fenomenológica con endurecimiento isótropo, donde el límite elástico,  $\sigma^0$ , viene dada por la expresión:

$$\sigma^0 = [A + B(\epsilon^{-\rho l})^n](1 - \hat{\theta}^m) \quad (33)$$

donde  $\varepsilon^{-pl}$  es la deformación plástica específica,  $\dot{\varepsilon}$  es la velocidad de deformación normalizada, y A, B, C, n, y m son las constantes de los materiales,  $\theta_{transición}$ .  $\hat{\theta}_{fusión}$  es la temperatura adimensional definida como:

$$\hat{\theta} \equiv \begin{cases} (\theta - \theta_{transición})^0 & \text{Para } \theta < \theta_{transición} \\ \frac{(\theta - \theta_{transición})}{(\theta_{fusión} - \theta_{transición})} & \text{Para } \theta_{transición} \leq \theta \leq \theta_{fusión} \\ 1 & \text{Para } \theta > \theta_{fusión} \end{cases} \quad (34)$$

En el comportamiento viscoplástico son utilizadas dos ecuaciones. La primera es la ecuación de Johnson-Cook, la cual mide la tensión, velocidad de deformación y el comportamiento del material dependiente de la temperatura. Se representa de la siguiente manera:

$$\sigma = [A + B(\bar{\varepsilon}^{pl})^n] \left[ 1 + C \ln \left( \frac{\dot{\varepsilon}^{pl}}{\dot{\varepsilon}_0^{pl}} \right) \right] (1 - \hat{\theta}^m) \quad (35)$$

donde  $\sigma$  es el esfuerzo de cedencia,  $\bar{\varepsilon}^{pl}$  es la deformación plástica específica,  $\dot{\varepsilon}^{pl}$  es la velocidad de deformación normalizada, A representa el límite elástico a temperatura ambiente (20°C) , B es el módulo de endurecimiento, n coeficiente de sensibilidad a la deformación plástica y m es el coeficiente de ablandamiento térmico, Schmidt y Hattel (2004;2005).

### **3.3.6. Uso del MEF en el proceso FSW**

Las condiciones termomecánicas en el proceso FSW son difíciles de determinar experimentalmente. La geometría del pin de la herramienta influye en el proceso al igual que los parámetros, tales como la velocidad de rotación, de avance y la fuerza aplicada a la herramienta, Mishra y Ma, (2005).

Para optimizar las condiciones del proceso para un determinado material y espesor de pieza de trabajo, se tienen que realizar una gran cantidad de pruebas mecánicas y caracterizaciones metalúrgicas. Las simulaciones por MEF son ampliamente utilizadas para obtener los campos de temperatura y parámetros mecánicos para optimizar el proceso.

Un número pequeño pero creciente de trabajos, que se enfocan a la simulación del proceso FSW, han aparecido en la literatura. Éstos simulan el modelado de la fricción, el comportamiento mecánico, térmico y la cinemática; también deben de resolver todas las ecuaciones de campo. En la Figura 3.48 se muestra el esquema de las entradas, salidas y restricciones involucradas en el modelo numérico. Las entradas tales como la geometría de la herramienta, los parámetros del proceso y el grado del material son mostradas a la izquierda. Las salidas ubicadas a la derecha del esquema muestran los campos mecánicos y térmicos. Las opciones necesarias se muestran en la parte superior del esquema.

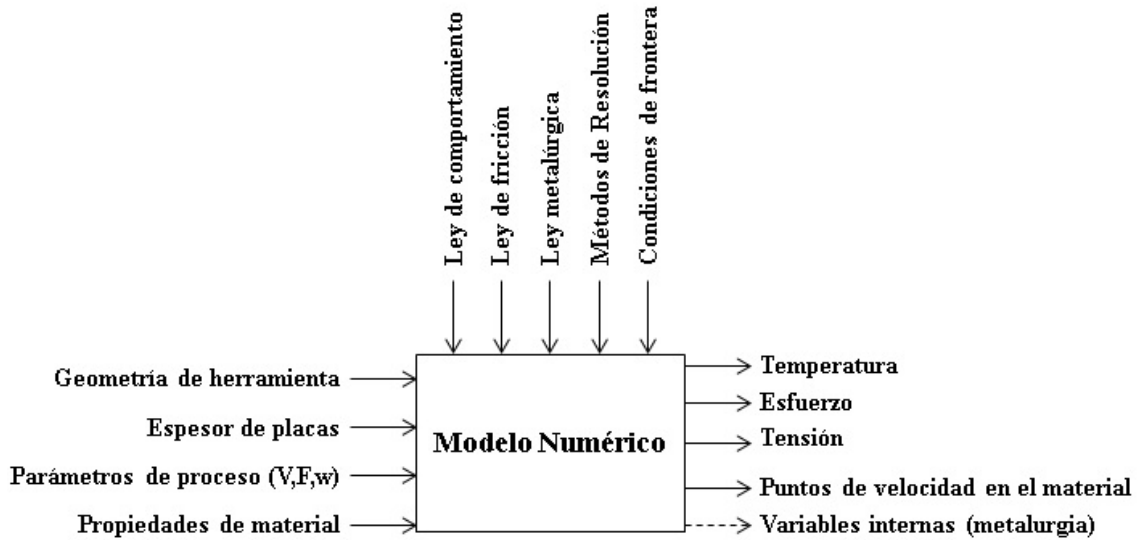


Figura 3.48 Esquema general del modelo numérico del proceso soldadura por fricción-agitación FSW, Lorrain et al. (2009).

Mecánicamente y numéricamente, dos problemas diferentes pero acoplados tienen que ser resueltos con el fin de obtener una simulación computacional realista del proceso. El primero es el calentamiento de la pieza de trabajo, con el cual el material se ablanda y se facilita su agitación. Este calentamiento se rige por la ecuación constitutiva, la ley de fricción, el contacto entre la herramienta y el material, el acoplamiento termomecánico y las condiciones del entorno, tales como intercambio de calor entre las placas y el aire adyacente. El segundo problema es la representación de la cinemática del flujo. El flujo sufre grandes deformaciones y controla la agitación y la calidad de las uniones. El objetivo en el modelo es proporcionar una herramienta numérica capaz de predecir la mezcla de los materiales y los valores óptimos de los parámetros del proceso FSW. Ambas características (grandes deformaciones y la agitación del material) son difíciles de resolver numéricamente utilizando MEF. El tiempo requerido para realizar los cálculos también es un obstáculo en la simulación de FSW, especialmente para usos industriales y se debe de tener presente, Lorrain et al. (2009).



Es evidente que los enfoques Lagrangiano y Euleriano no se pueden utilizar para simular los procesos que implican grandes deformaciones y flujo libre del material; una formulación adecuada debe de incluir aspectos de ambos métodos, Sukumaret al. (2000). Por lo tanto, la formulación lagrangiana - euleriana arbitraria (ALE) será implementada para simular el flujo del material durante el proceso FSW. Dicha formulación se ha desarrollado en un intento para combinar las ventajas de la función de Lagrange y Euler en un único análisis, con la finalidad de minimizar las desventajas tanto como sea posible. La formulación ALE fue desarrollada originalmente para la dinámica de fluidos, Donea et al. (2004)

En el campo del modelado computacional y la experimentación, se han realizado una gran cantidad de trabajo en la modelación mediante elemento finito. La herramienta para soldar y el material no fueron tomados en consideración, debido a que para mejorar la calidad, se enfocaron en los parámetros del proceso, tales como las velocidades de rotación y traslación de la herramienta y la fuerza del equipo Colligan (1999); Dickerson et al. (2003); Guerra et al. (2001); London et al. (2003); Reynolds et al. (2003) y Seidel et al. (2001).

En una investigación previa fue desarrollado un modelo de elemento finito tridimensional en ABAQUS/Explicit, utilizando formulaciones ALE y las leyes de comportamiento plástico del material del tipo Johnson-Cook para analizar las condiciones primarias bajo las cuales se llena la cavidad que está detrás de la herramienta. Los resultados de este modelo son comparados con la fuerza de penetración y la generación de calor observada en soldaduras experimentales de las diferentes aleaciones avanzadas utilizadas, Schmidt y Hattel (2005).

Shercliff et al. (2005) en el Reino Unido crearon un modelo de procesamiento para predecir los cambios microestructurales debido al ciclo térmico impuesto en FSW. Desarrollaron un modelo para aleaciones de aluminio tratadas térmicamente de la serie 6000 y lo aplicaron a la aleación aeroespacial 2014 con una

condición de envejecimiento (T6). En sus investigaciones los dos modelos térmicos, tanto el analítico como el numérico, fueron usados para predecir el historial térmico de las pruebas de soldadura. Chao y Oi, (1998) desarrollaron un modelo como fuente de calor en movimiento en elemento finito para estudiar la temperatura, los esfuerzos residuales y la distorsión en FSW para el flujo térmico y del material, incluyendo la herramienta. En estas investigaciones, el modelo de elemento finito de la herramienta para soldar y del material no fueron tomados en consideración, debido a que para mejorar la calidad se enfocaron en los parámetros de soldado, tales como las velocidades de rotación y traslación de la herramienta y la fuerza del equipo.

Desde finales de los años noventa el modelado térmico en el proceso FSW ha sido una parte central en la comprensión de los fenómenos y variables que afectan dicho proceso. Algunas de las principales contribuciones las han realizado Russel y Shercliff (1999), Mandal y Williamson (2006) y Tutum et al. (2007), por mencionar algunas se tiene; en primer lugar, varias de las propiedades de la soldadura final son directamente una función de la historia térmica a la que la pieza de trabajo ha sido expuesta, en segundo lugar, el proceso FSW en sí es afectado por la generación y flujo de calor, y en tercer lugar, el modelado térmico del proceso FSW puede ser considerado la base de todos los demás modelos que intervienen en el proceso FSW.

El análisis del proceso FSSW mediante el método de los elemento finito es uno de los tópicos dentro del campo de soldadura en estado sólido que ha incrementado el interés por formular distintos elemento finito válidos para este tipo de fenómeno.

## Capítulo 4

### Metodología Experimental

En el presente capítulo se detalla la metodología aplicada y el proceso de los ensayos realizados para efectuar las uniones soldadas de las láminas de la aleación Ti-6Al-4V mediante el proceso FSSW, se obtienen de literatura los parámetros fundamentales del proceso de soldadura por fricción agitación (FSW), los valores de los parámetros se obtuvieron mediante búsqueda de literatura para posteriormente procesar los datos en un diseño de experimentos basado en la metodología de superficie de respuestas con un ajuste utilizando el diseño central compuesto. Los resultados de los ensayos y la caracterización microestructural desarrollada se utilizaron para implementar y validar el modelo de simulación propuesto.

En la Figura 4.1 se muestra el diagrama de flujo de la metodología propuesta para esta investigación, en donde se esquematiza las actividades requeridas para llevar a cabo el estudio. Así mismo se propone comenzar con la búsqueda de literatura con el propósito situarse en la información más reciente del tema, ya que se tiene identificado que se ha hecho un gran número de estudios en la aleación de Ti-6Al-4V con el proceso FSW, pero no se han encontrado investigaciones utilizando esta aleación con el proceso FSSW, posteriormente se identificaron los parámetros fundamentales en el proceso y los valores con los que trabajaron en la aleación con FSW, se construyó un diseño de experimentos para determinar los valores óptimos de las variables significativas dentro del proceso FSSW, consecutivamente se seleccionó la herramienta y se diseñó y fabricó

el sistema de sujeción para montar las láminas a unir, el material de la aleación a trabajar se cortó con proceso de hilo erosión para obtener las láminas de 50 x 50 x 1.5 mm, contando con lo anterior se procedió a realizar la parte experimental tanto la unión física de las láminas como la construcción del modelo de simulación.

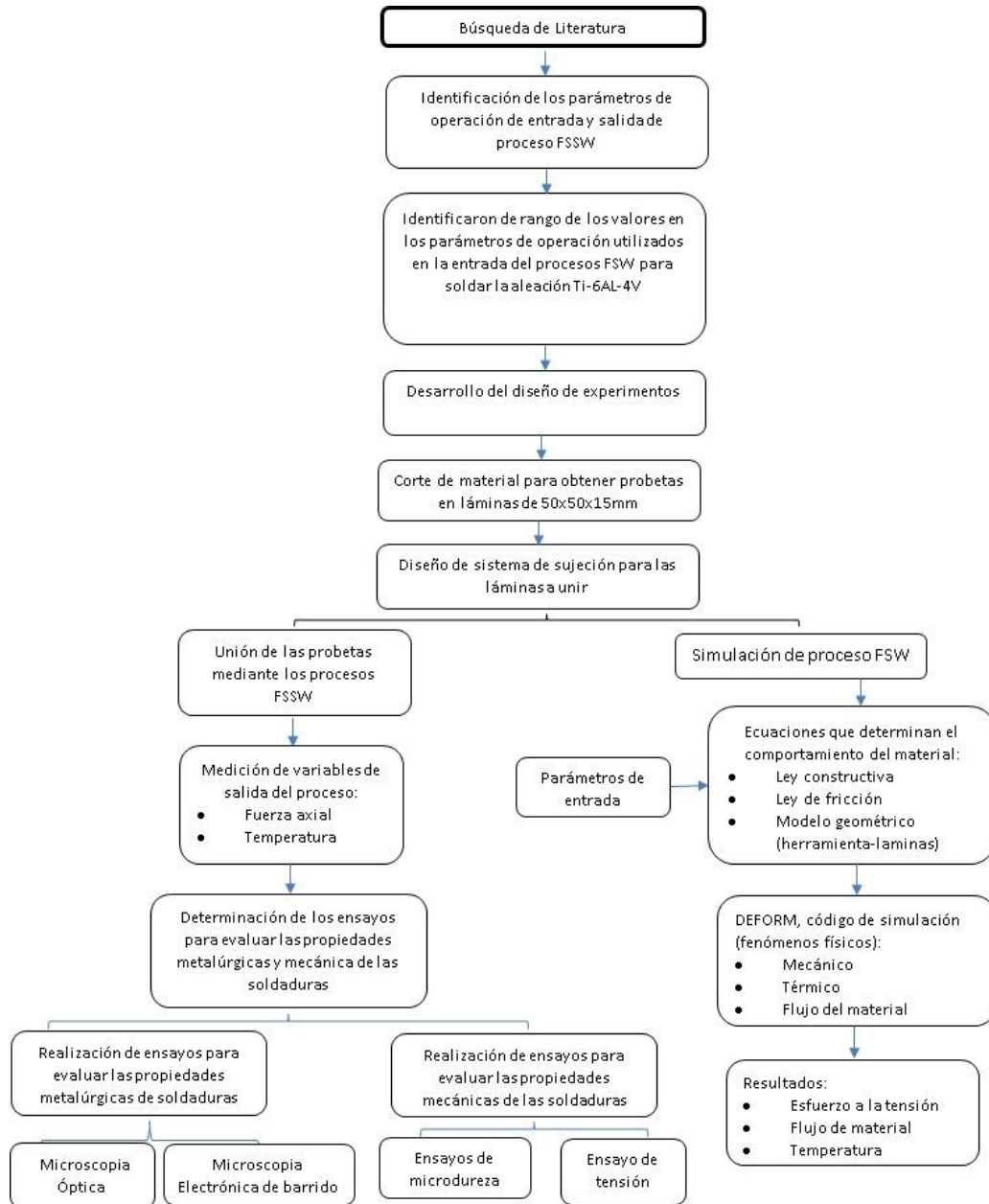


Figura 4.1 Diagrama de flujo de la metodología propuesta en esta investigación

El material base utilizado en esta investigación corresponde a una aleación de titanio  $\alpha + \beta$  grado 5 denominada Ti-6Al-4V, contiene un porcentaje en peso del 6% de aluminio, 4% vanadio y presenta una interesante relación entre resistencia y tenacidad, en comparación a la mayoría de las aleaciones estructurales de titanio, la aleación Ti-6Al-4V es considerada una de las aleaciones con mayor grado de soldabilidad. En la

Tabla 4.1 y la Tabla 4.2 se puede observar la composición química de la aleación Ti-6Al-4V.

Tabla 4.1 Composición química (% e.p.) de aleación Ti-6Al-4V

C	O	N	Fe	Al	V	Ti
0.019	0.19 max	0.016	0.25 max	6.2	3.87	Balance

Tabla 4.2 Propiedades mecánicas de aleación Ti-6Al-4V

Resistencia a la tensión (MPa)	Esfuerzo de cedencia (MPa)	Elongación (%)	Dureza (HV)
1040	1008	14.1	331

En la figura 4.2 se muestra el comportamiento cuando el material es trabajado en el rango de temperaturas bifásico  $\alpha+\beta$ , Park et al. (2002) desarrollaron mapas de procesamiento a partir de los cuales es posible establecer correlaciones entre temperatura de procesamiento y la velocidad de deformación.

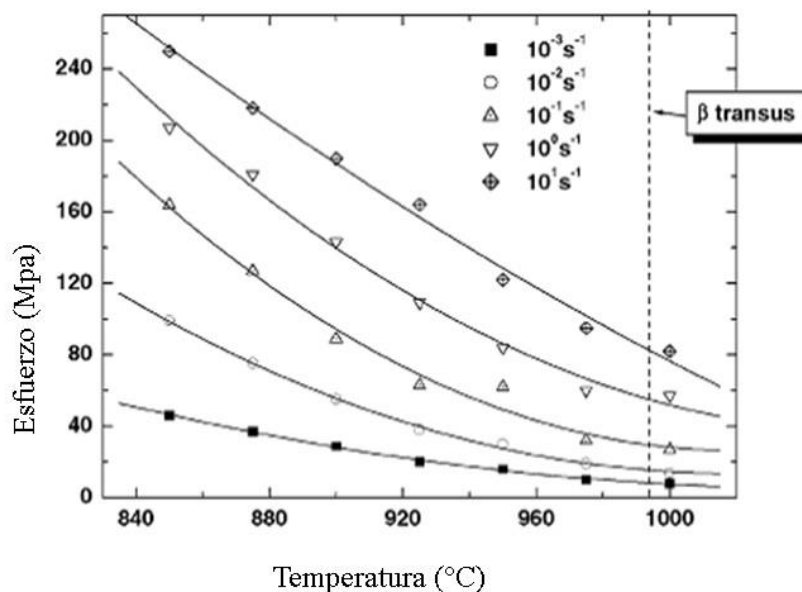


Figura 4.2 Variación del esfuerzo del flujo contra la temperatura a diferentes tasas de deformación para la aleación de Ti-6Al-4V.

#### 4.1 Identificación de variables en el proceso FSSW

De acuerdo con el análisis del estado del arte del proceso de soldadura FSSW, las principales variables de proceso consideradas en la presente investigación fueron la velocidad de giro donde al aumentar el valor en este parámetro aumenta la fricción y genera una mayor cantidad de calor en el proceso, la velocidad de penetración considerada como fuente primaria de generación de calor y el tiempo de sostenimiento, Cox et al. (2014).

- Velocidad de giro RPM ( $\Omega$ ).
- Velocidad de penetración mm/min (F).
- Tiempo de sostenimiento (s).

## **4.2 Identificación del rango de los valores en los parámetros de operación utilizados en la entrada del proceso FSW para soldar la aleación Ti-6Al-4V**

Se identificó en la literatura los valores utilizados para la unión de la aleación de Ti-6Al-4V en el proceso FSW con la finalidad de contar con la información de los trabajos más recientes, teniendo los siguientes resultados: Edwards P y Ramulu M. en 2009 se realizaron uniones en láminas de 5 mm de espesor con condiciones de parámetro de 150-750 RPM en velocidad de rotación y 50-200 mm/min en velocidad de avance, en 2010 los mismos autores trabajaron con 300 RPM en velocidad de rotación y 50-130 mm/min en velocidad de avance para espesor de láminas de 3 mm, Zhou, L et al (2010) utilizaron 400, 500 y 600 RPM en velocidad de rotación y 75–100 mm/min en velocidad de avance en láminas de 2 mm de espesor, otros investigadores Kitamura K. et al (2013) usaron 300 – 1000 RPM en velocidad de rotación y 25 – 400 mm/min en velocidad de avance en 2 mm de espesor, Wei Y. (2012) realizaron experimentación utilizando 950 RPM en velocidad de rotación y 150 – 475 mm/min, Buhl N. et al (2013) utilizaron 700 RPM en velocidad de rotación y 80 mm/min en velocidad de avance para unir láminas de 1.2 mm de aleación de Ti-6Al-4V y CP-Titanio.

La entrada de calor siempre se ha considerado un importante parámetro para evaluar la calidad y las características de las soldaduras de fusión convencionales como se ha mencionado por Kumar et al. (2012). Lombard et al.(2009) calcula el aporte de energía para soldadura por fricción agitación utilizando dos vías, es decir, enfocado a la entrada de calor y el enfoque de la energía de fricción. La entrada de calor es definido como la energía térmica aplicada a la pieza de trabajo por unidad de longitud en kJ/mm. Calcular la entrada de calor enfocado a la energía de fricción considerando un adecuado coeficiente de fricción entre el hombro de la herramienta y las láminas no es factible, ya que es difícil determinar el coeficiente de fricción en condiciones del proceso de soldadura real.

La ecuación 36 dada a continuación se deriva de la entrada de calor enfocada en el torque aplicado a la herramienta durante la soldadura:

$$HI = \frac{P}{v} \quad (36)$$

donde HI es la entrada de calor (J/mm); P es la potencia (kW) y v es la velocidad de soldadura (mm/min).

### **4.3 Diseño de experimentos**

El diseño de experimentos, permite determinar tanto las variables más influyentes en el sistema, así como su correlación. En el presente estudio se utilizó la metodología de superficie de respuesta, permitiendo observar los efectos asociados de todos los factores del proceso, el propósito de esta técnica es diseñar un experimento que proporcione valores adecuados de la variable respuesta, con el fin de determinar el modelo matemático que mejor se ajusta a los datos obtenidos.

Como se mencionó anteriormente se consideraron las variables principales del proceso FSSW para desarrollar el diseño de experimentos, velocidad de rotación ( $\Omega$ ), velocidad de penetración (F) y tiempo de sostenimiento (s), esta última considerada como variable independiente, el valor de tiempo de sostenimiento se fijó en 3 segundos. Se construyó con ellas un diseño de superficie central compuesto con el objetivo de determinar los valores de velocidad óptimos en el proceso de soldadura de punto por fricción agitación en aleación de Titanio Ti-6Al-4V, velocidad de rotación  $\Omega$  (500 – 800 RPM) y velocidad de penetración F (60 - 120 mm/min), en la Tabla 4.3 se describen los niveles para los respectivos factores.



Tabla 4.3 Valores de los factores en el diseño de superficie central compuesto

	Niveles	
	Bajo	Alto
Velocidad de rotación ( $\Omega$ ) RPM	500	800
Velocidad de penetración (F) mm/min	60	120

El diseño está estructurado con 4 puntos del cubo, 5 puntos centrales y 4 puntos axiales. Teniendo un distancia de las corridas axiales al centro del diseño ( $\alpha$ ) con valor de 1.41421, el diseño se replicó una vez. Las pruebas se realizaron aleatoriamente, en la Tabla 4.4 se presenta completo el diseño de experimentos con los valores codificados para la realización de esta investigación.

Tabla 4.4 Diseño de experimentos para láminas de espesor 1.5 mm

Prueba	Velocidad de giro (RPM)	Velocidad de penetración (mm/min)
1	650	90
2	650	48
3	800	120
4	650	90
5	500	120
6	438	90
7	650	90
8	650	90
9	650	90
10	650	132
11	800	60
12	500	60
13	863	90

#### 4.4 Herramienta para unir por proceso FSSW

La herramienta que se utilizó fue diseñada y fabricada por la compañía MegaStir el material utilizado en la fabricación de las herramientas es nitruro de boro cúbico policristalino (PCBN por sus siglas en inglés), en la Figura 4.2 se muestra la geometría y el plano del diseño de la herramienta para unir las láminas de 1.5 mm de espesor, en la Tabla 4.5 se muestran las propiedades físicas del material PCBN, Swab et al. (2015).

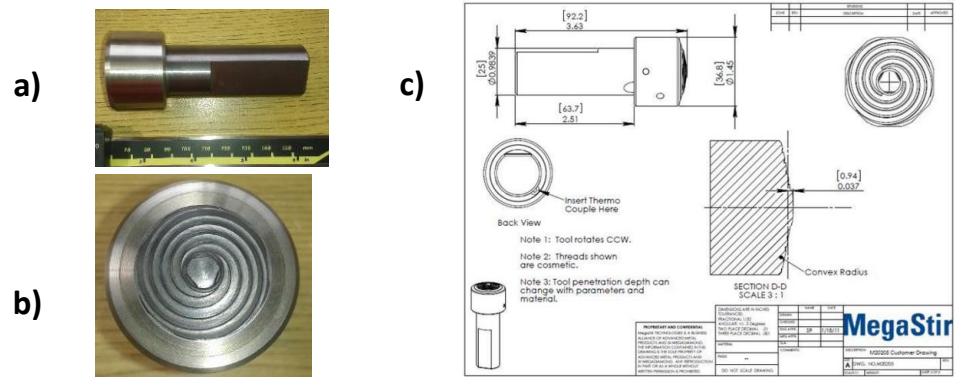


Figura 4.2 Esquema de herramienta para unir soldadura FSSW en espesor de lámina 1.5 mm. a) vista lateral de la herramienta, b) vista frontal de la herramienta y c) plano de la herramienta

Tabla 4.5 Propiedades físicas de PCBN

Coefficiente de expansión térmica/ $10^{-6} \text{ K}^{-1}$	Conductividad térmica/ $\text{W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$	Dureza (HV)
4.6 – 4.9	100-250	2600-3500

#### 4.5 Corte del material

Para obtener las láminas a unir, se cortaron mediante proceso electroerosión, el cual consiste en un hilo de metal para cortar el contorno programado de la geometría de una pieza.

#### 4.6 Sistema de sujeción

Se diseñó y fabricó el sistema de sujeción de aluminio y alojamiento interior de titanio para soportar las láminas a unir con la finalidad de que las láminas contaran con las condiciones mecánicas apropiadas para poder ser soldadas mediante el proceso FSSW, en la Figura 4.3 se observa el modelo geométrico del sistema de sujeción, el

sistema de sujeción fabricado y en montaje del mismo en la prensa marca Kurt instalada en la mesa de trabajo del centro de maquinado de alta velocidad.

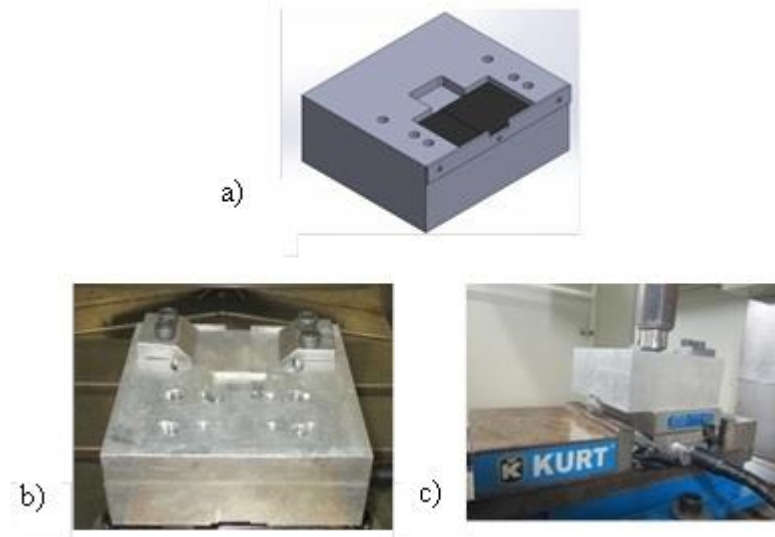


Figura 4.3 a) Modelado geométrico del sistema de sujeción, b) Sistema de sujeción fabricado, c) Montaje sistema de sujeción en prensa situada en la mesa de trabajo del centro de maquinado de alta velocidad.

#### **4. 7 Unión de láminas de Ti-6Al-4V mediante proceso FSSW, equipo y dispositivos utilizados para la unión y el análisis de las probetas soldadas**

Para la realización de las uniones soldadas mediante el proceso de soldadura por puntos por fricción agitación se utilizó un centro de maquinado CNC marca Bridgeport modelo VMC 760 XP<sup>3</sup> (Figura 4.4). Las características a detalle de la máquina se muestran en la Tabla 4.6.



Figura 4.4 Centro de maquinado CNC marca Bridgeport modelo VMC 760 XP<sup>3</sup> en la cual se realizaron las soldaduras.

Tabla 4.6 Características de la máquina CNC Bridgeport VMC 760XP<sup>3</sup>.

Velocidad máxima de Eje (rpm)	Momento máximo de Torsión (Nm)	Potencia máxima (kW)	Maquinado de altura (mm)	Superficie útil (mm)
12000	108-118	18.5	2940	2850x3000

#### 4.7.1 Dinamómetro

La medición del torque durante el procesamiento es de vital importancia, se requiere conocer la fuerza de torque que produce la herramienta cuando es introducida lentamente por una fuerza axial entre el área de las dos láminas a unir, las cuales se encuentran dispuestas a traslape.

Cuando la herramienta inicia la penetración, el dinamómetro detecta la fuerza aplicada en sus tres componentes, además del torque. Las señales eléctricas emitidas por el dinamómetro llegan al amplificador de carga del sistema, aquí las señales son adaptadas para que ingresen a una tarjeta de adquisiciones de datos instalada en la computadora. En la Figura 4.5 se muestra el equipo utilizado.

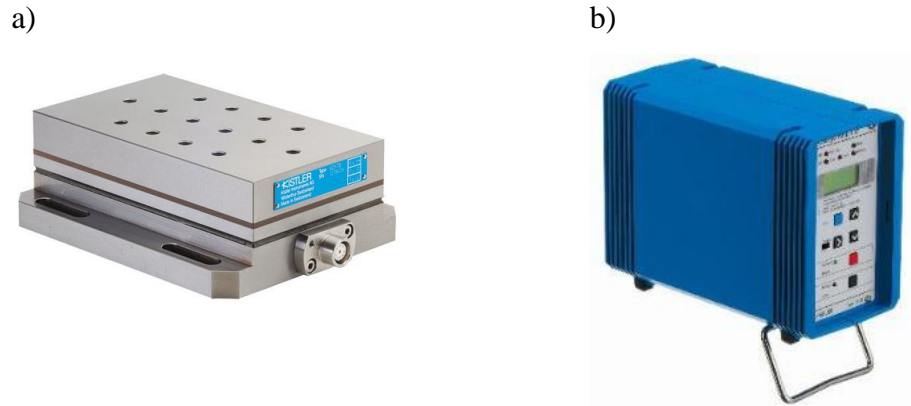


Figura 4.5 a) Dinamómetro de cuarzo de tres componentes, b) Amplificador de carga.

En la Figura 4.6 se muestra el esquema de adquisición de datos del Centro de maquinado CNC marca Bridgeport modelo VMC 760 XP<sup>3</sup>. Las láminas a ser soldadas fueron colocadas en sistema de sujeción instalado sobre el dinamómetro piezoeléctrico Kistler.

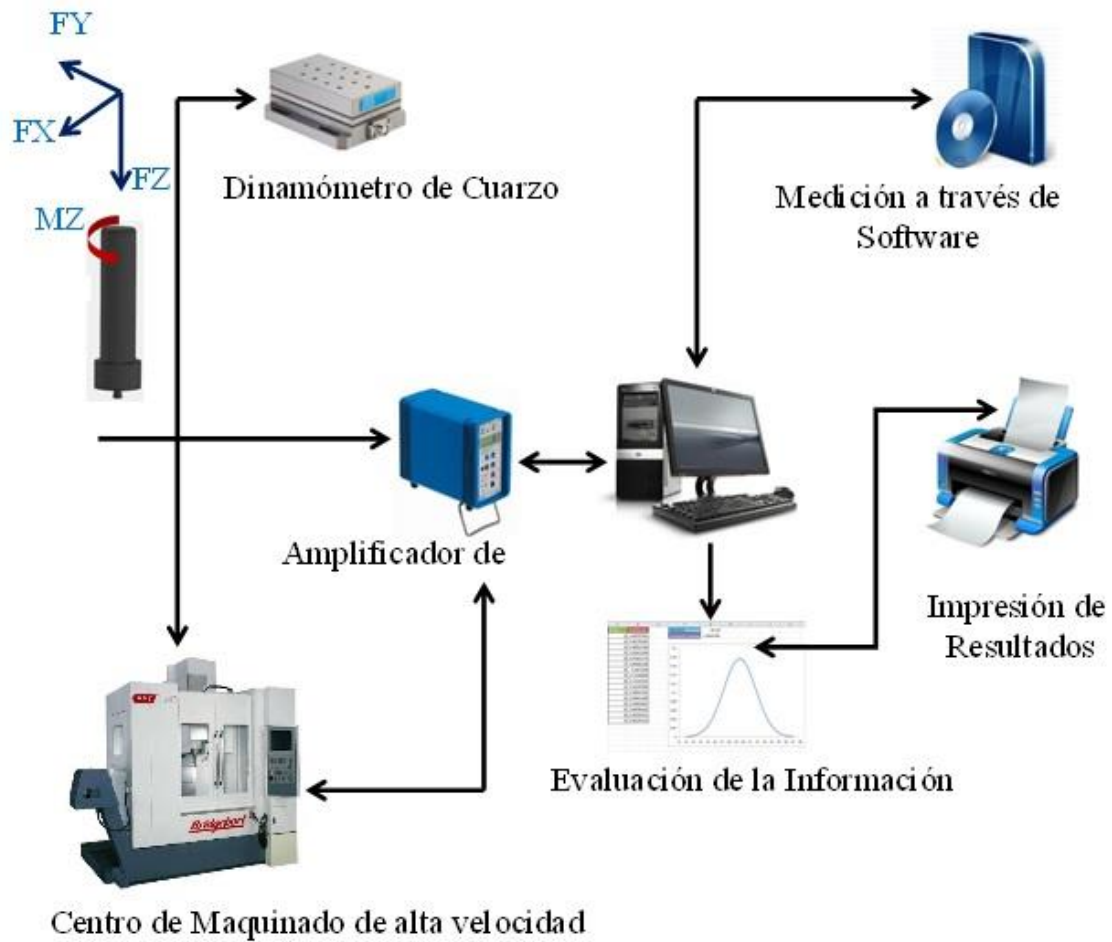


Figura 4.6 Esquema del proceso para la adquisición de datos.

#### 4.7.2 Termopares

Para las mediciones de la temperatura se utilizó termopar tipo K (Cromo (Ni-Cr) Chromel / Aluminio (aleación Ni-Al)), con una amplia variedad de aplicaciones, tiene un intervalo de temperatura de  $-200^{\circ}\text{C}$  a  $1372^{\circ}\text{C}$  y una sensibilidad de  $41 \mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$  aproximadamente, en la Figura 4.7 se muestra termopar utilizado.

La tarjeta de adquisición de datos utilizada es la NI DAQCard-6062E de National Instruments la cual se muestra en la Figura 4.8, la información adquirida y recibida por la PC será transmitida para procesar los datos en un programa realizado en LabVIEW.

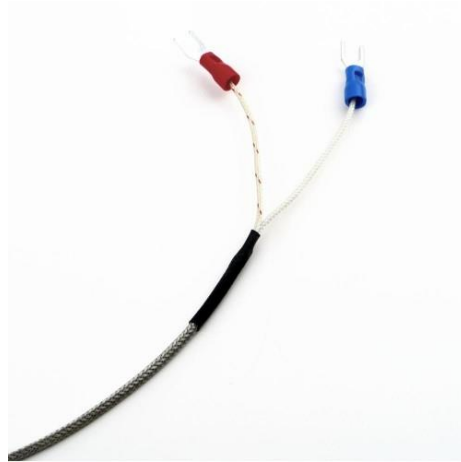


Figura 4.7 Termopar tipo K



Figura 4.8 Tarjeta de adquisición de datos



### 4.7.3 Microscopia óptica (MO)

La microscopia óptica, MO, se utilizó principalmente para la caracterización de los granos del material base así como la identificación las zonas presentes en la unión por proceso de soldadura por fricción agitación por puntos FSSW, zona de soldadura (ZS), la zona afectada termomecánicamente (ZAT), la zona afectada por el calor (ZAC) y la zona del metal base (MB), se utilizó un microscopio óptico de platina invertida marca Axio Zeiss Observer Z1m, ver Figura 4.9.

La preparación metalográfica para MO se realizó mediante métodos de desbaste y pulido convencionales. Para preparar las muestras se realizó corte transversal a través de la unión y se preparó una probeta de aproximadamente 2.54 mm de diámetro para facilitar su manejo, se empleó el método de montaje en frío, donde el material empleado fue una resina epóxica, como segundo proceso posteriormente se procedió a desbastar las piezas. Durante el desbaste se refrigeró constantemente con chorro de agua para no sobrecalentar, además ayudó a arrastrar las partículas desprendidas del metal y abrasivo, el tercer proceso se continuo con el pulido, para el pulido se empleó como abrasivo alúmina así como también pequeñas cantidades de agua. El tiempo de pulido empleado por cada muestra tuvo un promedio entre 10 y 12 minutos y como último proceso se realizó ataque químico, el reactivo aplicado para el material base de la aleación de titanio Ti-6Al-4V fue 100 ml de HCl, 50 ml de etanol y 5 gr de  $\text{CuCl}_2$ . El propósito del reactivo conocido como Kalling's es revelar los límites de grano. La sección transversal una vez pulida se sumergió 15 segundos en la solución, una vez que pasaron los 15 segundos, se enjuago en chorro de agua seguido de alcohol y se procedió a secar con algodón y aire frío y posteriormente con aire caliente, pasando por un segundo proceso de 10 segundos en la solución, una vez que pasaron los 10 segundos, se enjuago en chorro de agua seguido de alcohol y se procedió a secar con algodón y aire frío y posteriormente con aire caliente.

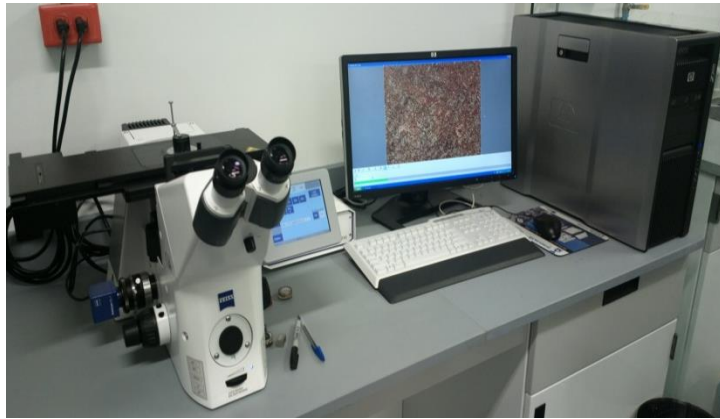


Figura 4.9 Microscopio óptico de platina invertida marca Axio Zeiss Observer Z1m

#### **4.7.4 Microscopia Electrónica de Barrido (MEB)**

La microscopía electrónica de barrido se utilizó para caracterizar la evolución microestructural de la típica estructura widmanstätten de las aleaciones  $\alpha$ - $\beta$  durante la deformación plástica severa utilizando electrones secundarios. Los electrones retrodispersados se difractan diferente en cada (sub)grano y proporcionan imágenes de la microestructura por contraste cristalográfico. En el caso de la aleación Ti-6Al-4V la microscopia electrónica de barrido se utilizó también para caracterizar las fases generadas por el proceso FSSW, se utilizó microscopio electrónico de barrido marca Oxford Jeol JSM-6490-LV-15kV, ver Figura 4.10. La preparación metalográfica para MEB se realizó con los mismos métodos de desbaste y pulido mencionado en el punto anterior.



Figura 4.10 Microscopio electrónico de barrido Oxford Jeol JSM-6490-LV-15kV

#### 4.7.5 Microdurómetro Vickers

Los ensayos de dureza se utilizaron para obtener los valores de dureza en el metal base de la aleación de titanio Ti-6Al-4V y obtener los perfiles de dureza en las probetas unidas mediante proceso FSSW, las mediciones se llevaron a cabo de acuerdo a la norma ASTM E384 con durómetro Instron (Figura 4.11), aplicando una carga de 980.1 mN durante 15 segundos, Kitamura et al. (2013).



Figura 4.11 Microdurómetro Instron modelo 402MVD

#### **4.7.6 Máquina de ensayo Instron**

Se realizaron ensayos de tracción uniaxial para evaluar las propiedades mecánicas de la aleación. Los ensayos fueron realizados en una máquina servo hidráulica marca MTS Landmark modelo 64725 A ver Figura 4.12, con una tasa de deformación constante de  $0.02 \text{ s}^{-1}$  sobre muestra normalizadas por la ASTM E8.



Figura 4.12 Maquina MTS Landmark 64725 A

#### **4.8 Desarrollo del modelo numérico del proceso de soldadura por punto por fricción- agitación.**

Se modelo en 3D la herramienta y las placas que conformaron el modelo preliminar del proceso de soldadura de punto por fricción-agitación, para la construcción se utilizó paquete comercial CATIA versión V6R18, en la Figura 4.13a se muestra la herramienta que se modelo con un cuerpo lagrangiano elástico lineal, el zanco tiene una longitud de 63.7 mm de 25 mm de diámetro, el hombro tiene un diámetro de 36.8 mm, en la Figura

4.13b se observa el esquema de la configuración de las placas, las cuales tienen una dimensión de 50 mm x 50 mm y un espesor de 1.5 mm.

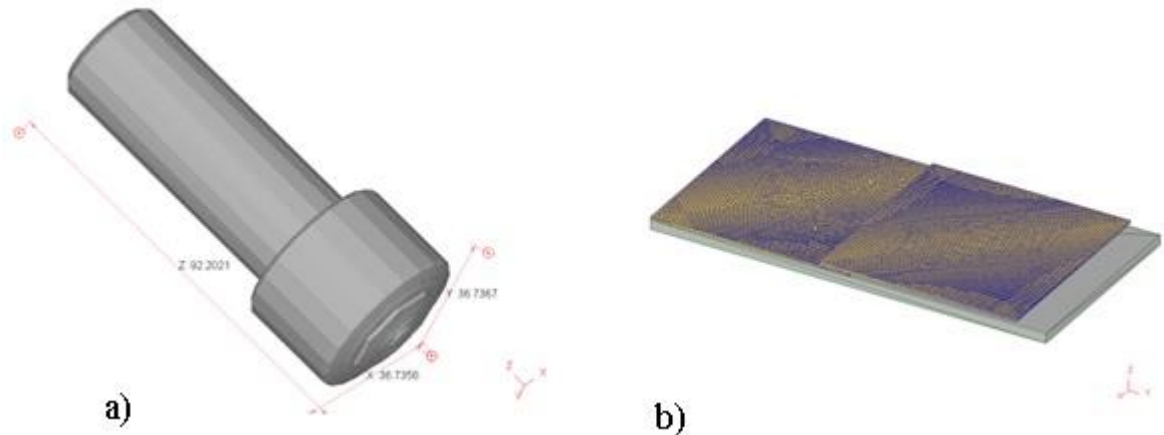


Figura 4.13 a) Herramienta en 3D para modelo de proceso FSSW y b) Placas en 3D de aleación de Titanio Ti-6Al-4V.

Un modelo de elemento finito en 3D del proceso de soldadura FSSW fue desarrollado en el software comercial DEFORM™ debido a la capacidad que tiene para simular los procesos que presentan una alta deformación, código implícito de Lagrange y un remallado automático fue seleccionado para modelar el proceso de fricción. Se definió un modelo totalmente acoplado que permite el cálculo interdependiente de los desplazamientos y la temperatura en cada nodo, las dos placas se modelaron como un material rígido visco-plástico y una hoja integrada para minimizar la inestabilidad de contacto, mientras que la herramienta y el sistema de sujeción se modelaron como objetos rígidos. Las propiedades térmicas y de flujo del material de la aleación Ti-6Al-4V se modelo usando la base de datos de software, se consideró intercambio de calor de los cuerpos con el medio ambiente, la interacción entre la herramienta y las placas fueron tomadas en cuenta por definición de un modelo de fricción de cizalladura. En la Tabla 4.7 se muestra se presentan las condiciones de proceso utilizados para llevar a

cabo el modelo de elemento finito. Mientras que en la Tabla 4.8 los parámetros de procesamiento los cuales representan las condiciones para llevar a cabo la simulación del proceso FSSW así como los diferentes valores tomados para cada parámetro.

Tabla 4.7 Condiciones generales del proceso utilizados para llevar a cabo el modelo de elemento finito.

Condición	Tipo/valor
Modelo	Tridimensional
Método de aproximación	Lagrangiano
Número de pasos por simulación	1219
Desplazamiento de la herramienta por paso	0.003125
Método de solución	Gradiente conjugado
Método de iteración	Directa
Máximo número de iteraciones por deformación	200
Número de elementos	338,941
Numero de nodos	71,121
Límite de error por convergencia	0.005
Límite de error por fuerza	0.05
Volumen (mm <sup>3</sup> )	7,500

Tabla 4.8 Parámetros implementados en el modelo de elemento finito del proceso FSSW.

Parámetros	Modelo									
Velocidad de rotación (RPM)	650	650	800	500	438	650	800	500	862	
Velocidad de profundidad (mm/min)	90	48	120	120	90	132	60	60	90	

El modelo numérico del proceso FSSW fue construido con una herramienta con una geometría convexa a lo ancho del área que conforma el hombro. Una herramienta cónica es necesaria debido a la baja conductividad térmica del titanio Lombard et al. (2009). El diseño típico de una herramienta presenta un hombro ancho y un pin de tamaño menor respecto al tamaño del hombro Rai et al (2011). La Figura 4.14a) muestra el ensamble completo del modelo y Figura 4.14b) muestra el mallado estructural definido, en el cual se generó un mallado más fino en el área de contacto entre las placas y el hombro de la herramienta. El mallado general consistió en elementos tetraédricos con un tamaño general de 0.99 mm, con el tamaño de elemento más fino de 0.4 mm en la área de contacto.

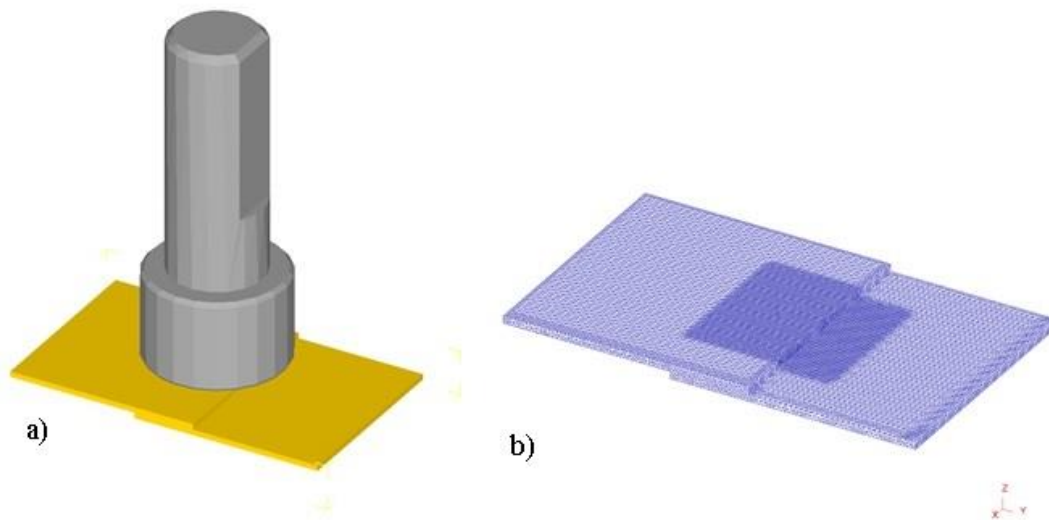


Figura 4.14 a) Modelo en 3D del proceso de soldadura de punto por fricción agitación (FSSW) y b) mallado estructural definido en las placas a unir.

#### 4.8.1 Modelo Johnson-Cook

La ecuación constitutiva del modelo de Johnson-Cook fue utilizada dentro del modelo para determinar el comportamiento del material que es sujeto a grandes deformaciones, altas temperaturas y altas velocidades de deformación, se muestran en



Tabla 4.9. Los valores de las constantes empíricas que constituyen dicha ecuación y las cuales fueron obtenidas por Lee y Lin (1998) que determinan el comportamiento del material. La ecuación de Johnson-Cook se encuentra implementada en algunos de los códigos de software de simulación por el método de elemento finito comerciales.

$$\sigma = [A + B(\bar{\epsilon}^{pl})^n] \left[ 1 + C \ln \left( \frac{\dot{\epsilon}^{pl}}{\dot{\epsilon}_0^{pl}} \right) \right] \left[ \frac{T - T_{\text{ambiente}}}{T_{\text{fusión}} - T_{\text{ambiente}}} \right] \quad (35)$$

Tabla 4.9 Constantes de ecuación de Johnson-Cook utilizadas en el desarrollo del modelo numérico del proceso de soldadura FSSW

Constante	Símbolo	Unidades	Valor
Límite elástico a temperatura ambiente (20°C)	A	MPa	782.7
Módulo de endurecimiento	B	MPa	498.4
Coefficiente de acritud o sensibilidad a la deformación plástica	n	-	0.28
Coefficiente relativo a la sensibilidad a la deformación plástica	C	-	0.028
Temperatura medio ambiente	T <sub>ambiente</sub>	°C	20
Temperatura de fusión	T <sub>fusión</sub>	°C	1662
Coefficiente de ablandamiento térmico	m	-	1
Deformación plástica	$\bar{\epsilon}^{pl}$	-	1
Velocidad de deformación plástica normalizada	$\dot{\epsilon}^{pl}$	-	1
Velocidad de deformación plástica normalizada	$\dot{\epsilon}_0^{pl}$	-	1.00E-05

#### 4.8.2 Descripción del desarrollo del modelo de elemento finito

La figura 4.15 muestra el diagrama de flujo del desarrollo del modelo de elemento finito del proceso de soldadura FSSW, en la plataforma comercial DEFORM™ en su librería cuenta con la información de la aleación utilizada, a la cual para complementar la base de datos se le agregaron propiedades térmicas y mecánicas. Para representar la

fricción con la ecuación de Johnson –Cook se acoplaron en las constantes los valores que aparecen en la tabla 4.9 y para representar cada experimento en un modelo se alimentaron los parámetros de proceso, velocidad de rotación  $\omega$  y velocidad de penetración  $F$  mostrados en la tabla 4.8. En la malla estructurada se adecuó un refinamiento en el área de contacto con el objetivo de obtener precisión en los resultados. A la geometría que representa las placas de material deformable se le colocaron las condiciones de frontera para restringir su movimiento para representar el sistema real de soldadura y a la herramienta se consideró un cuerpo rígido no deformable. El programa calcula la evolución de la temperatura, los esfuerzos, la deformación y el flujo del material hasta llegar a la profundidad establecida de 2.5 mm, si esta condición es cumplida se analizan los resultados, en caso contrario se generará una nueva base de datos con la información previa obtenida hasta la profundidad alcanzada para posteriormente generar una nueva solución.

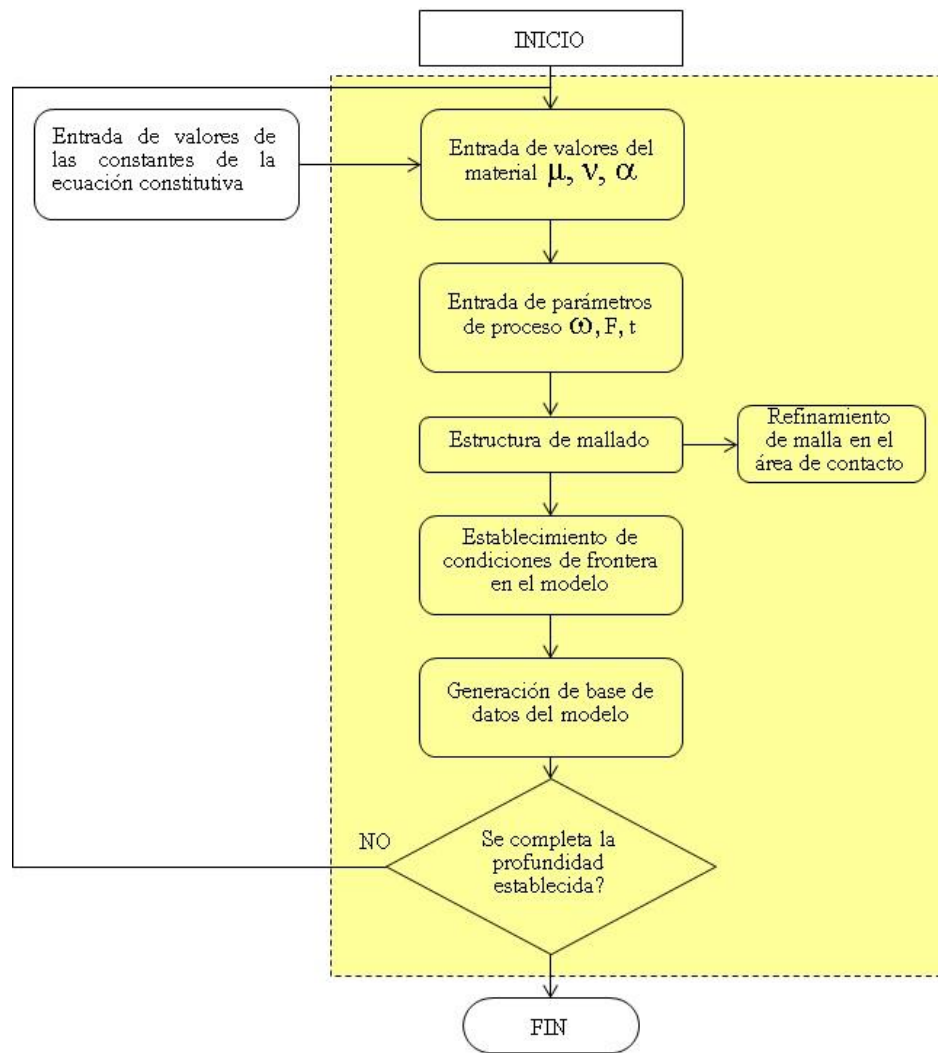


Figura 4.15 Muestra el diagrama de flujo del desarrollo del modelo de elemento finito del proceso de soldadura FSSW en la plataforma comercial DEFORM™

## Capítulo 5

### Análisis y discusión de resultados

En el presente capítulo se presentan los resultados obtenidos en las uniones a diferentes parámetros de proceso, así como el análisis y discusión de los datos obtenidos en la caracterización microestructural y propiedades mecánicas y también sus resultados numéricos.

#### 5.1 Unión de las láminas por medio del proceso FSSW

En la tabla 5.1 se muestran las uniones realizadas en láminas de aleación de Ti-6Al-4V con 1.5 mm de espesor, las cuales fueron producidas con una herramienta con hombro convexo fabricada en PCBN, las muestras fueron unidas con las combinaciones de parámetros de proceso aleatorizadas de acuerdo al diseño de experimentos utilizado en esta investigación.

Tabla 5.1 Imágenes de la uniones de los experimentos soldadas a diferentes parámetros de proceso mediante proceso FSSW


No. de experimento	Parámetros	Imagen de los puntos de soldadura
9	650 rpm con 90 mm/min	

Tabla 5.2 Continuación, Imágenes de la uniones de los experimentos soldadas a diferentes parámetros de proceso mediante proceso FSSW






No. de experimento	Parámetros	Imagen de los puntos de soldadura
7	650 rpm con 48 mm/min	
4	800 rpm con 120 mm/min	
10	650 rpm con 90 mm/min	
3	500 rpm con 120 mm/min	
5	438 rpm con 90 mm/min	

Tabla 5.3 Continuación, Imágenes de la uniones de los experimentos soldadas a diferentes parámetros de proceso mediante proceso FSSW


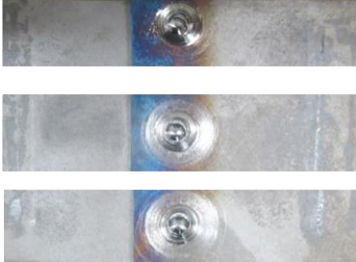




No. de experimento	Parámetros	Imagen de los puntos de soldadura
13	650 rpm con 90 mm/min	
12	650 rpm con 90 mm/min	
11	650 rpm con 90 mm/min	
8	650 rpm con 132 mm/min	
2	800 rpm con 60 mm/min	

Tabla 5.4 Continuación, Imágenes de la uniones de los experimentos soldadas a diferentes parámetros de proceso mediante proceso FSSW

1	500 rpm con 60 mm/min	
6	863 rpm con 90 mm/min	

Los parámetros que se mantuvieron constantes para todos los experimentos se presentan en la Tabla 5.5.

Tabla 5.5 Parámetros constantes durante los experimentos

Penetración (mm)	Tiempo de sostenimiento (seg)	Sentido de giro de herramienta
2.5 mm	3 seg	A favor de las manecillas del reloj (CW)

A partir de los resultados obtenidos es posible observar en la tabla 5.1 los puntos de soldadura con valores en velocidad de rotación más altos presentan sanidad en la unión. Para continuar con la metodología y procesar las muestras para evaluación metalúrgica y mecánica.

## 5.2 Caracterización de las uniones soldadas por proceso FSSW

Se realizó un análisis microestructural del metal base aleación Ti-6Al-4V antes de ser soldado, presentando una microestructura principalmente de fase  $\alpha$  con fase  $\beta$  que se encuentra en los límites de grano. En la Figura 5.1 se muestra una micrografía en MO y SEM de la aleación Ti-6Al-4V en las condiciones en que se recibió, donde se observan las fases microestructurales.

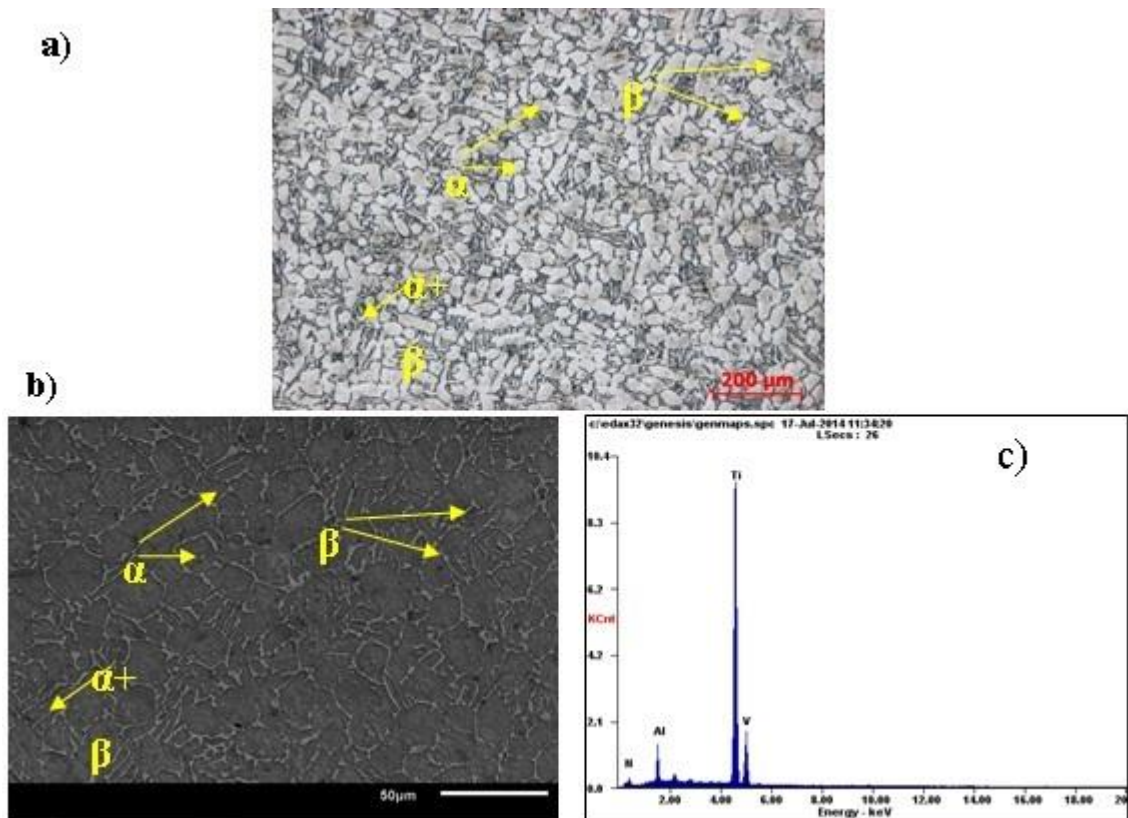


Figura 5.1 Microscopia óptica de metal base de aleación Ti-6Al-4V a) Microscopia óptica. b) Micrografía SEM, microestructura principalmente fase  $\alpha$  con fase  $\beta$  que se encuentra en los límites de grano y micronálisis químico puntual de las partículas encontradas en la región bifásica donde se muestran los resultados del análisis y c) el espectro EDAX obtenido.



En la Figura 5.2 se muestra una de las vistas superiores de las unión de las dos placas, en ella se observa zona de unión de soldadura dejada después de realizar el proceso de soldadura por punto fricción-agitación. Imágenes tomadas mediante estereoscopia.

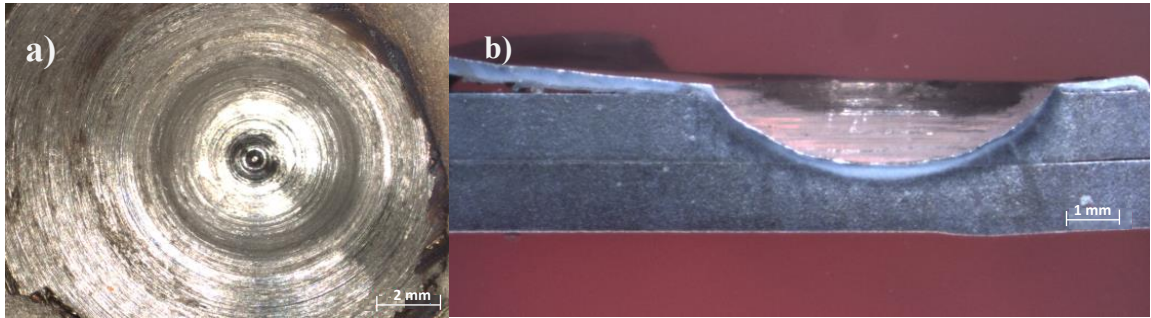


Figura 5.2 Punto de soldadura por proceso FSSW con parámetros de proceso de 500 RPM y 120 mm/min. a) Vista superior de la unión, b) Perfil transversal de la unión.

Las micrografías de las probetas unidas bajo las diferentes condiciones en velocidad de rotación, velocidad de penetración y 3 segundos en tiempo de sostenimiento se examinaron y según las observaciones del MO y MEB, la microestructura se puede dividir en cuatro zonas: una zona agitada (ZA), una zona afectada termomecánica (ZATM), una zona afectada por el calor (ZAC) y la zona del metal base (MB), adicionalmente se identifica material en la parte superior del punto que fue arrastrado por el pin y el hombro de la herramienta en un sentido ascendente. En la Figura 5.3 se puede observar las zonas generadas en la unión mediante el proceso FSSW, la muestra corresponde a la combinación de parámetros 500 rpm y 120 mm/min.

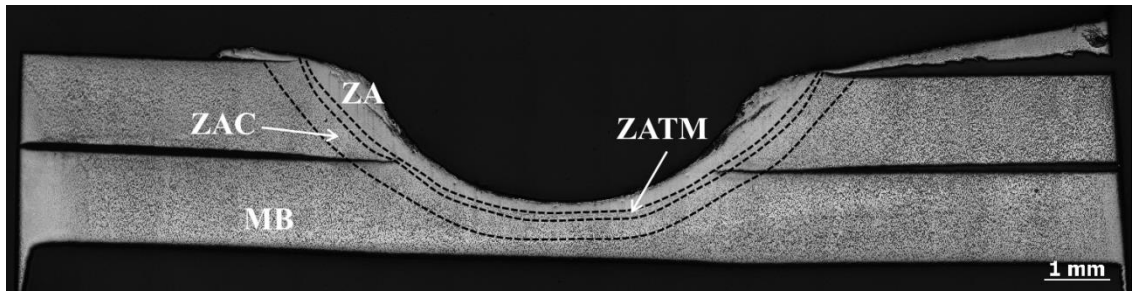


Figura 5.3 Macrografía de la sección transversal de muestra con parámetros de 500 rpm y 120 mm/min.

Los límites entre las diferentes zonas están indicados por las líneas punteadas en la Figura 5.4. Un refinamiento de grano  $\alpha$  se observa en la región ZA causado por el esfuerzo mecánico en la dirección de la fricción aplicada y en la zona ZATM los granos son alargados en dirección paralela a la frontera, lo que indica la evidencia de la deformación por efecto de la fricción y temperatura durante el proceso FSSW. Las micrografías de a) 650 rpm y 90 mm/min, b) 650 rpm y 48 mm/min, c) 800 rpm y 120 mm/min, d) 650 rpm y 90 mm/min presentan las tres zonas producidas por el proceso de soldadura por fricción, ZA, ZATM y ZAC.

La microestructura del metal base presenta una microestructura  $\alpha/\beta$  laminar, Lutjering et al 2003. La ZAC muestra una microestructura bimodal (dúplex), que consiste en granos primarios de  $\alpha$  englobados en una matriz de laminas de  $\alpha/\beta$  Lutjering (2007), la temperatura máxima experimentada en la zona ZAC se supone es más baja que la temperatura transus de acuerdo con la observación de la relación  $\alpha/\beta$ , Elmer et al (2004), la microestructura ZATM esta entre la zona ZAC y la zona ZA, la ZATM se caracteriza por la deformación alargada de granos, la microestructura en la ZA es influenciada significativamente por la velocidad de rotación, el refinamiento de los granos en esta zona sugiere que la temperatura máxima supera la temperatura transus Zhang et al (2008), y la formación de una microestructura completa laminar, Ramirez et al. (2003); Mironov et al. (2008); Mironov et al. (2008) y Zhang et al (2008)

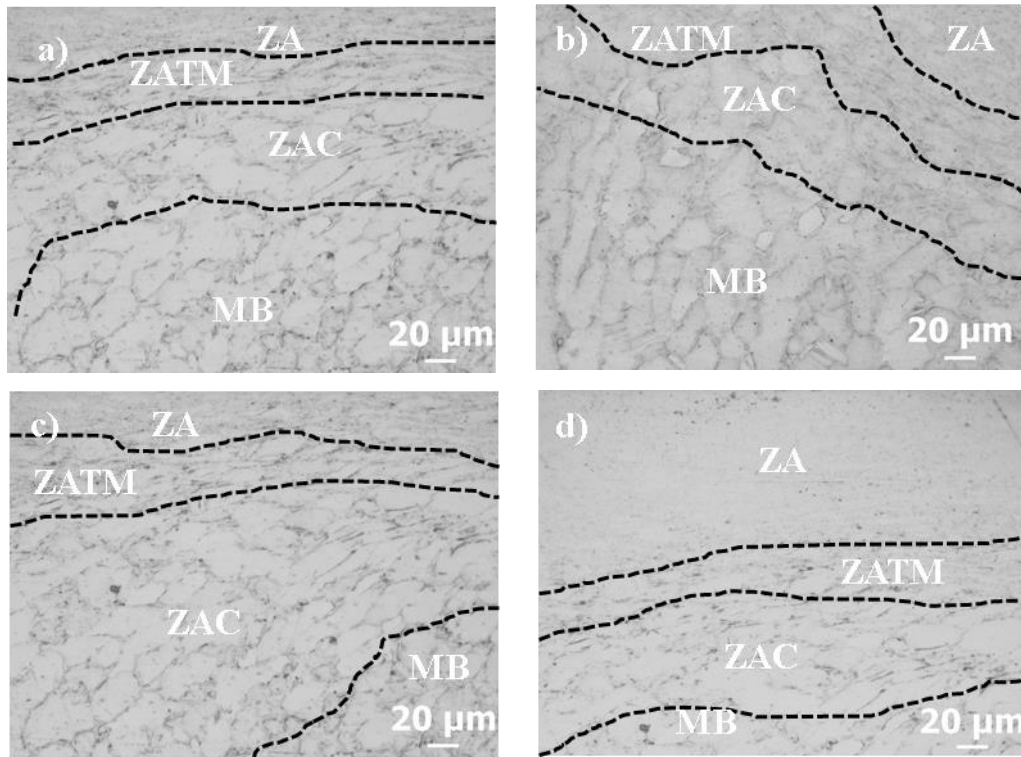


Figura 5.4 Micrografías a 200X de las uniones a diferentes parámetros de proceso donde se aprecian las zonas características de la soldadura por fricción, ZA, Zona de Agitación, ZATM, Zona Afectada Termomecánicamente, ZAC, Zona Afectada por el Calor y zona del metal base MB. a) 650 rpm y 90 mm/min, b) 650 rpm y 48 mm/min, c) 800 rpm y 120 mm/min, d) 650 rpm y 90 mm/min.

En la Figura 5.5 se observa las micrografías de las soldaduras realizadas con e) 500 rpm y 120 mm/min, f) 438 rpm y 90 mm/min, g) 650 rpm y 90 mm/min, h) 650 rpm y 90 mm/min, donde en la micrografía con parámetros de 438 rpm y 90 mm/min se aprecia una escasa área de ZATM, se atribuye alojamiento y distribución de las cepas que mediante el material circundante se mezcla con la ZA. La reducida zona ZAC esta relacionada con la baja conductividad térmica de la aleación de titanio (17 W/(m.K)), las aleaciones de aluminio (210 W/(m.K)). Liu et al. (2010)

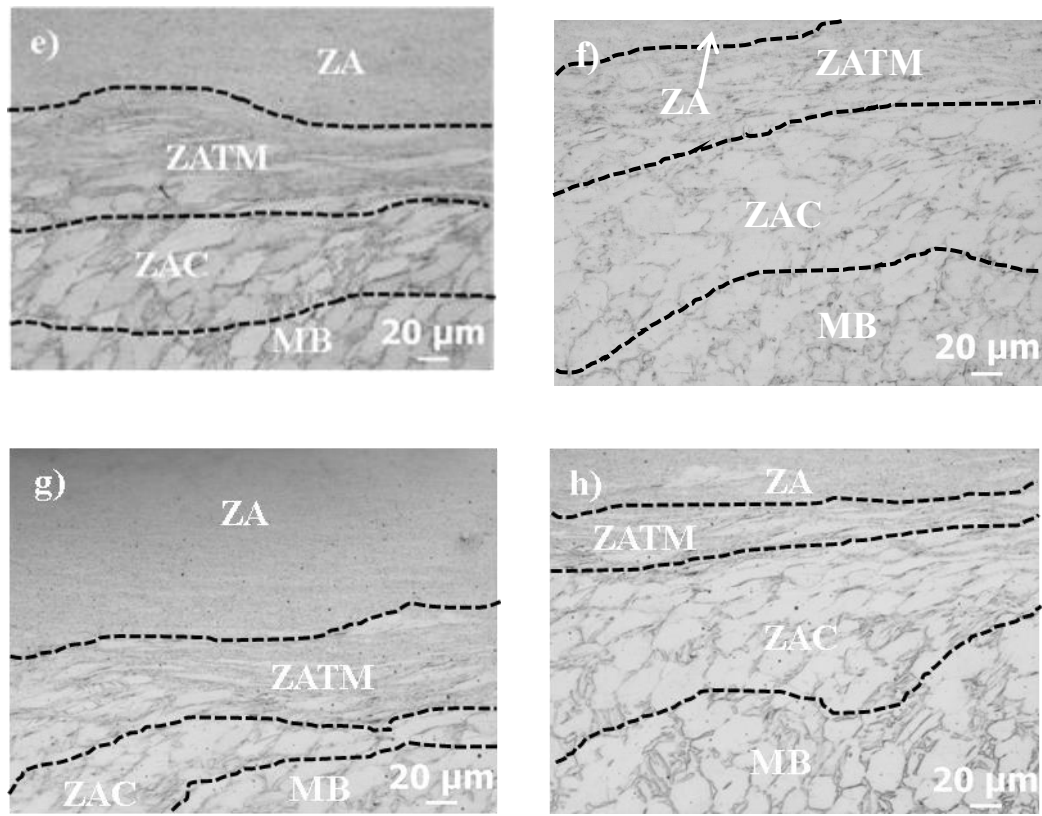


Figura 5.5 Micrografías a 200X de las uniones a diferentes parámetros de proceso donde se aprecian las zonas características de la soldadura por fricción, ZA, Zona de Agitación, ZATM, Zona Afectada Termomecánicamente, ZAC, Zona Afectada por el Calor y zona del metal base MB. e) 500 rpm y 120 mm/min, f) 438 rpm y 90 mm/min, g) 650 rpm y 90 mm/min, h) 650 rpm y 90 mm/min.

En la Figura 5.6 se observa las micrografías de las soldaduras realizadas con i) 650 rpm con 90 mm/min, j) 650 rpm con 132 mm/min, k) 800 rpm con 60 mm/min, l) 500 rpm con 60 mm/min y m) 863 rpm con 90 mm/min, comparado con el MB, la microestructura de ZA es significativamente refinada, esto implica que la temperatura en ZA es por arriba de transus, 1100°C, 1250°C, 1105°C, 1268°C y 1198°C, respectivamente.

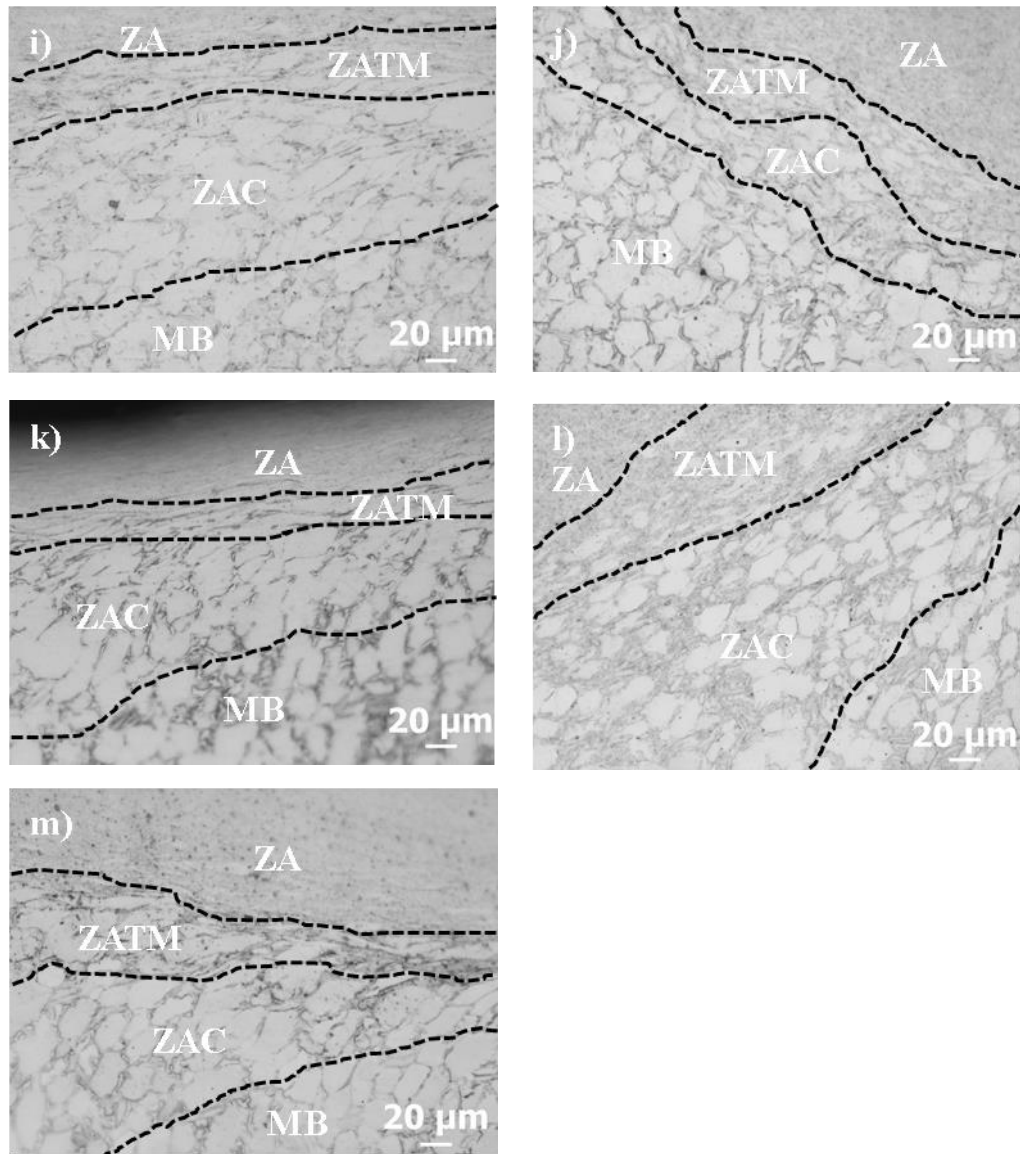


Figura 5.6 Micrografías a 200X de las uniones a diferentes parámetros de proceso donde se aprecian las zonas características de la soldadura por fricción, ZA, Zona de Agitación, ZATM, Zona Afectada Termomecánicamente, ZAC, Zona Afectada por el Calor y zona del metal base MB, i) 650 rpm y 90 mm/min, j) 650 rpm y 132 mm/min, k) 800 rpm y 60 mm/min, l) 500 rpm y 60 mm/min y m) 863 rpm y 90 mm/min.

A continuación se presentan los resultados más sobresalientes de las microestructuras obtenidas por MEB en la Figura 5.7 Figura 5.8 Figura 5.9 Figura 5.10 Figura 5.11 Figura 5.12 donde se puede observar un apreciable refinamiento de fases en el botón de soldadura, mientras que en la ZATM existe un flujo y alargamiento de grano.

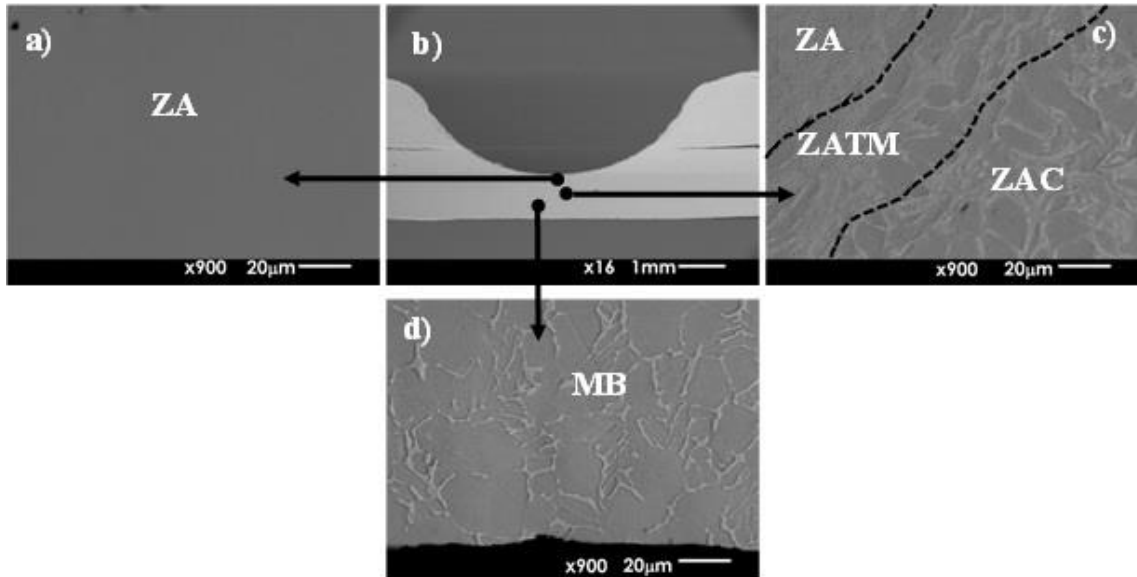


Figura 5.7 Micrografías obtenidas por MEB de la muestra con 650 rpm y 90 mm/min, a) micrografía donde se observan la zona ZA b) imagen sección transversal del punto de soldadura c) micrografía donde se observan las zonas ZA, ZATM y ZAC y d) micrografía donde se observa la zona del MB.

La microestructura en la zona ZAC es similar a la del metal base, esta microestructura bimodal consiste en granos aislados de  $\alpha$  en una matriz  $\beta$  transformada, esto implica que la temperatura en la zona ZAC es inferior a la temperatura transus  $\beta$  Elemer et al (2004). El material en la zona afectada por el calor no experimenta deformación plástica detectable durante el proceso FSSW. Por lo tanto, cualquier evolución microestructural en esta región resulta del aumento de la temperatura.

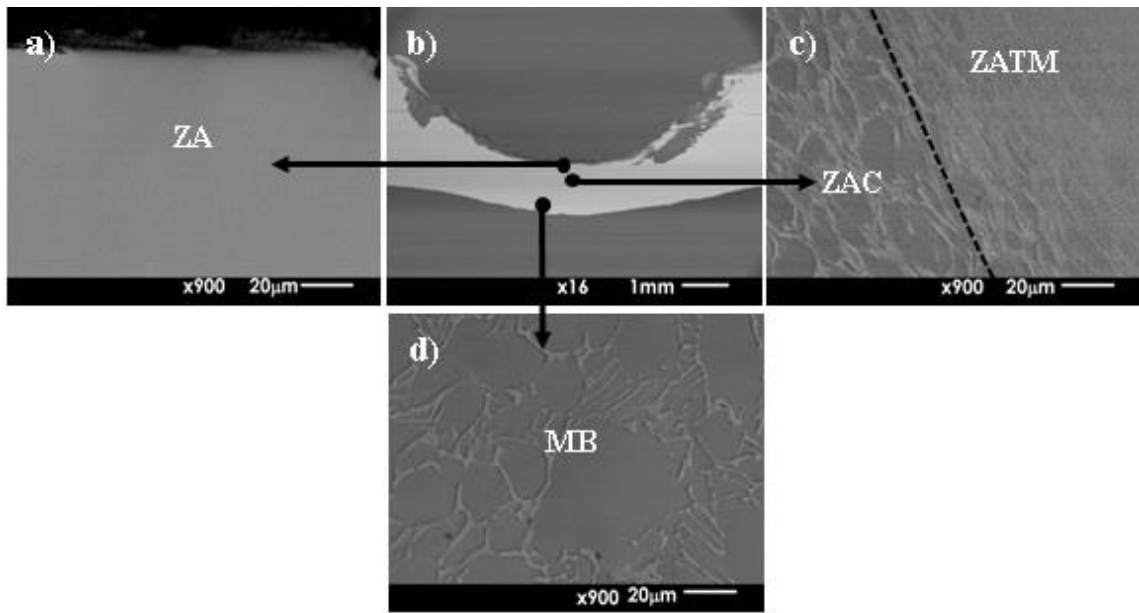


Figura 5.8 Micrografías obtenidas por MEB de la muestra con 800 rpm y 120 mm/min, a) micrografía donde se observan la zona ZA b) imagen sección transversal del punto de soldadura c) micrografía donde se observan las zonas ZATM y ZAC y d) micrografía donde se observa la zona del MB.

Las microestructuras obtenidas por microscopía electrónica de barrido (MEB) permiten observar los cambios microestructurales de las uniones, en los especímenes puede observarse un refinamiento de grano en el botón de soldadura denominada ZA, al lado de la zona ZA se encuentra la ZATM con alargamiento de grano mostrando la evidencia de flujo de material durante el proceso de soldadura por puntos por fricción agitación, la deformación plástica ocurre en la fase  $\alpha$ , principalmente mediante deslizamiento de dislocaciones. Estas dislocaciones se emiten desde las interfaces  $\alpha/\beta$  y se deslizan en planos basales, más que en planos prismáticos, debido a su compatibilidad con la interfaz HC-CC, Salem et al.(2008).

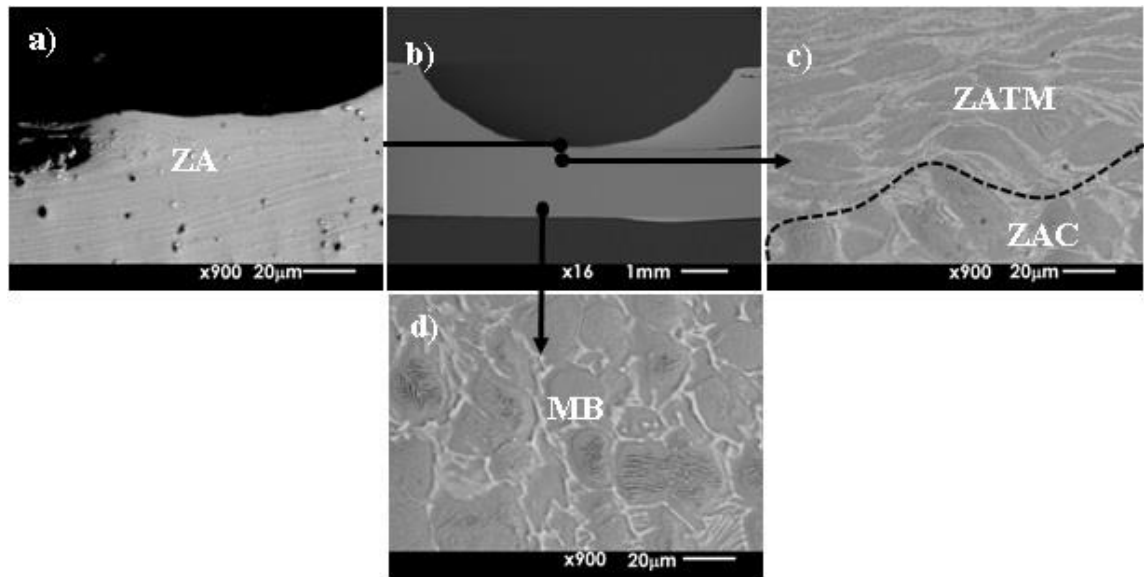


Figura 5.9 Micrografías obtenidas por MEB de la muestra con 500 rpm y 120 mm/min, a) micrografía donde se observan la zona ZA b) imagen sección transversal del punto de soldadura c) micrografía donde se observan las zonas ZATM y ZAC y d) micrografía donde se observa la zona del MB.

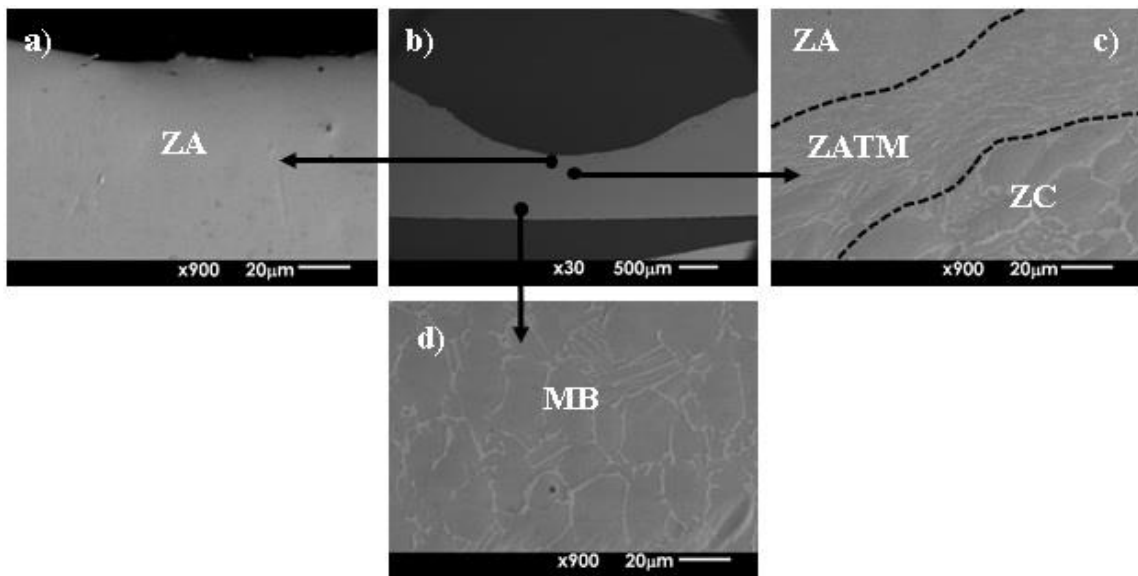


Figura 5.10 Micrografías obtenidas por MEB de la muestra con 650 rpm y 132 mm/min, a) micrografía donde se observan la zona ZA b) imagen sección transversal del punto de soldadura c) micrografía donde se observan las zonas ZATM y ZAC y d) micrografía donde se observa la zona del MB.



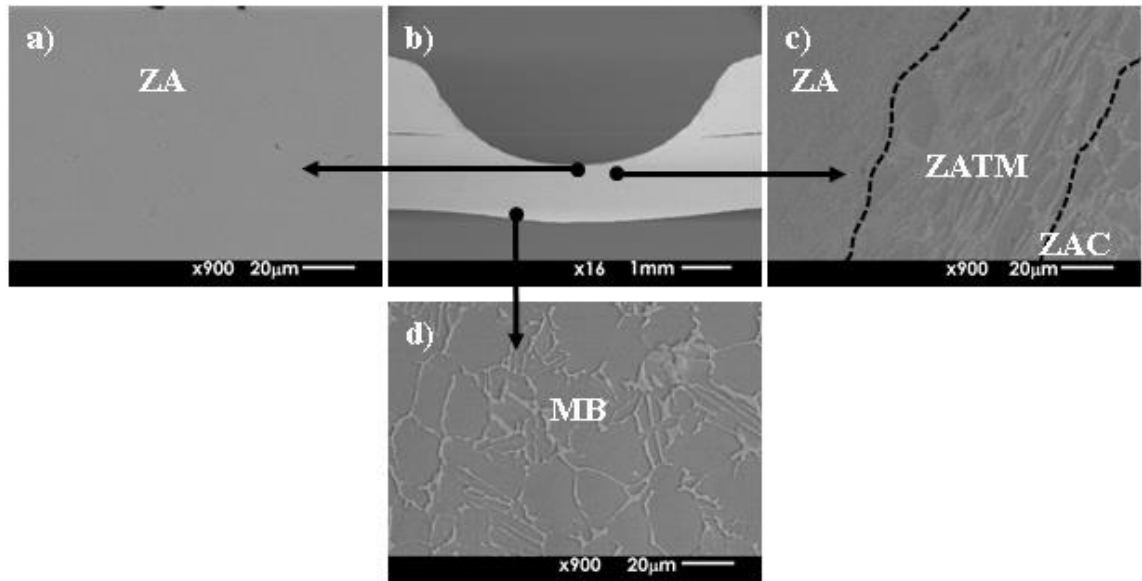


Figura 5.11 Micrografías obtenidas por MEB de la muestra con 800 rpm y 60 mm/min, a) micrografía donde se observan la zona ZA b) imagen sección transversal del punto de soldadura c) micrografía donde se observan las zonas ZA, ZATM y ZAC y d) micrografía donde se observa la zona del MB.

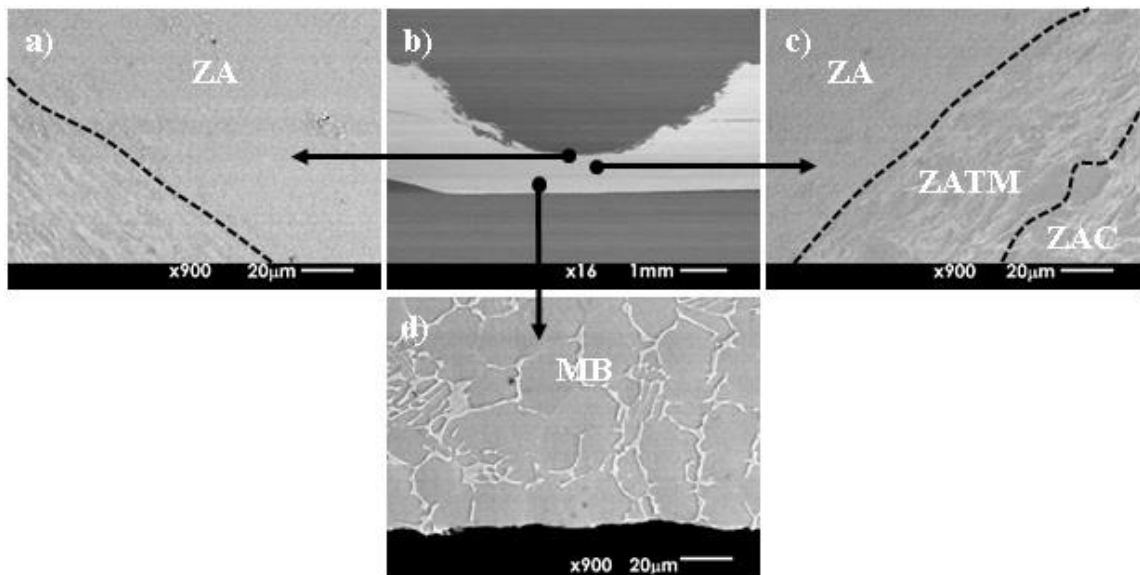


Figura 5.12 Micrografías obtenidas por MEB de la muestra con 863 rpm y 90 mm/min, a) micrografía donde se observan la zona ZA b) imagen sección transversal del punto de soldadura c) micrografía donde se observan las zonas ZA, ZATM y ZAC y d) micrografía donde se observa la zona del MB.

En las micrografías se muestra a detalle la zona de agitación ZA, la zona afectada termomecánica ZATM y la zona afectada por el calor ZAC en la unión, evidencia de que puede ser unida mediante el proceso FSSW con éxito, utilizando una herramienta especialmente diseñada y fabricada de nitruro de boro cubico policristalino (PCBN) además muestra que en las uniones efectuadas por el proceso de soldadura por puntos por fricción-agitación se observó una morfología laminar  $\alpha+\beta$  en la ZA y una microestructura bimodal en la ZAC, la formación de la microestructura bimodal es debido al efecto de la combinación de la transformación de fase y de la recristalización cuando se procesa, esta zona exhibe dureza menor que la zona MB, mientras que la zona ZA es la parte de la soldadura con una dureza cercana al promedio de la zona MB, la disminución de la dureza en la zona ZAC se puede explicar por el efecto de recocido causado por el calentamiento generado por la fricción. La microestructura en la ZA está influenciada significativamente por las velocidades de rotación y penetración. Para lograr la unión en la aleación de titanio  $\alpha+\beta$  la temperatura en la zona ZA debe superar la temperatura  $\beta$ -transus, y por lo tanto se forma una microestructura laminar completa, Knipling et al. (2009); Ramirez et al. (2003) y Zhang et al. (2008).

## **5.3 Resultados de ensayos para evaluación de propiedades mecánicas**

### **5.3.1 Ensayos de microdureza**

Los resultados obtenidos de los ensayos de microdureza de las 13 probetas unidas con los diferentes valores de los parámetros resultado del diseño de experimentos central compuesto utilizado en este estudio fueron analizados.

El perfil de microdureza obtenidos en los ensayos de las probetas unidas a diferentes parámetros de proceso se muestra en la Figura 5.13. En la Figura 5.14 y Figura 5.15 se observa la variación de la dureza que experimentan las uniones realizadas por proceso FSSW con los parámetros de proceso de velocidad de rotación en rpm, velocidad de penetración en mm/min y 3 s en tiempo de sostenimiento. Se obtuvieron valores partiendo desde la zona de agitación (ZA), la zona afectada termomecánicamente (ZATM), la zona afectada por el calor (ZAC) y el metal base (MB), se puede observar que la zona de agitación de la muestra de 500 rpm con 60 mm/min presenta el mayor de los valores en esta zona 373.3 HV, el valor más bajo en la zona afectada termomecánicamente y zona afectada por el calor se presentó en la muestra con parámetros de 438 rpm con 90 mm/min, los valores obtenidos fueron de 303.2 y 280.2 HV respectivamente, mientras que para la zona del metal base es de 363.2 HV en promedio.

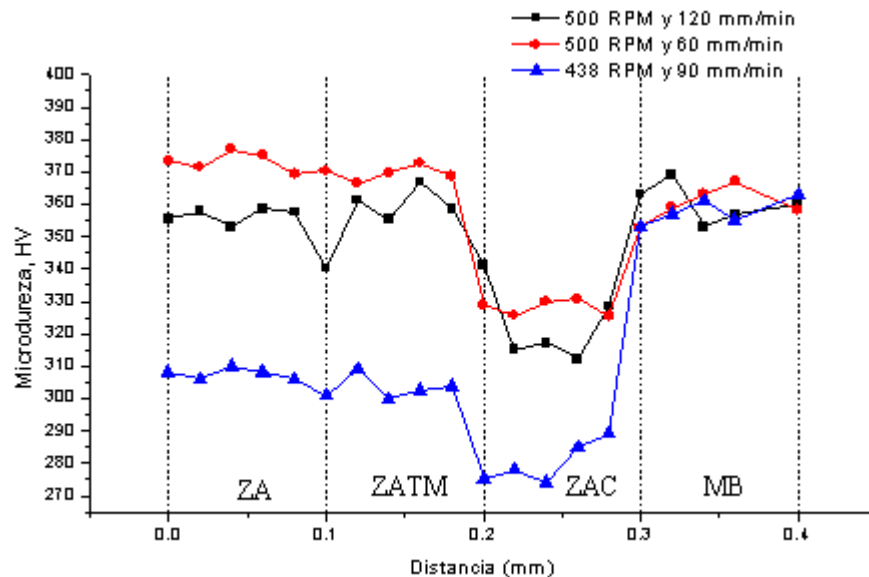


Figura 5.13 Microdureza en las muestras con parámetros de proceso de 500 RPM con 120 y 60 mm/min y 438 rpm con 90 mm/min, donde se observa la distribución de los valores obtenidos en las zonas del MB, ZAC, ZATM y ZA.

En la Figura 5.14 se observar el perfil de microdureza de las probetas con velocidad de rotación de 650 rpm y 90, 48 y 132 mm/min respectivamente, en donde la zona de agitación de la muestra de 650 rpm con 132 mm/min presenta el menor de los valores en esta zona 298.68 HV debido a que a mas altos valores en la velocidad de penetración disminuye la generación de calor .

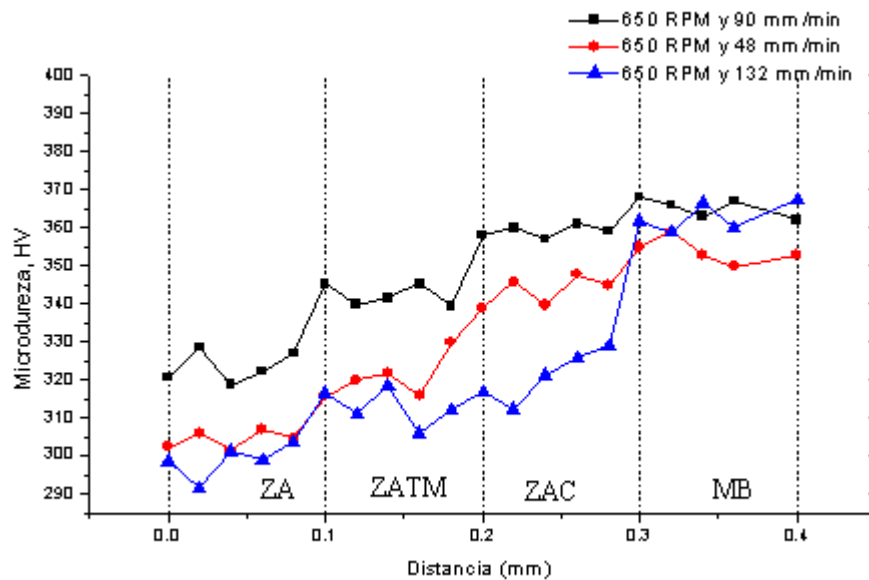


Figura 5.14 Microdureza en las muestras con parámetros de proceso de 650 RPM con 90, 48 y 132 mm/min, donde se observa la distribución de los valores obtenidos en las zonas del MB, ZAC, ZATM y ZA.

En la Figura 5.15 se puede observar el perfil de microdureza de las probetas con velocidad de rotación de 800 rpm con 120 y 60 mm/min y 863 rpm con 90 mm/min, en donde la zona de agitación de la muestra de 800 rpm con 120 mm/min presenta el menor de los valores en esta zona 342.2 HV debido a que a mas altos valores en la velocidad de penetración disminuye la generación de calor .

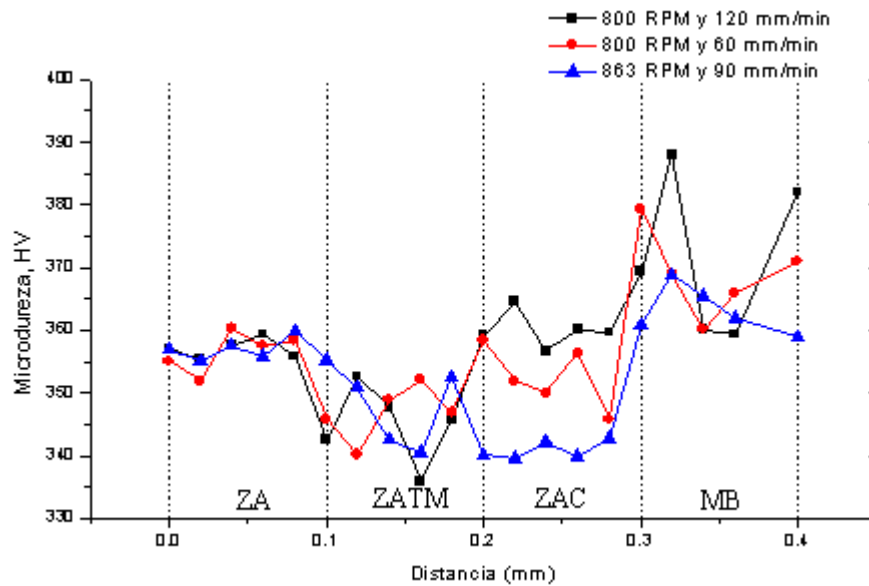


Figura 5.15 Microdureza en las muestras con parámetros de proceso de 800 rpm y 60 mm/min, 800 rpm y 120 mm/min y 863 rpm y 90 mm/min donde se observa la distribución de los valores obtenidos en las zonas del MB, ZAC, ZATM y ZA.

En la zona afectada por el calor presentó una dureza menor que la del metal base, la disminución de la dureza en la zona ZAC puede explicarse por el efecto de recocido causado por el calentamiento producido por la fricción, Liu et al (2009).

### 5.3.2 Ensayos de tensión

Las uniones soldadas presentaron un modo de falla de forma circunferencial nugget pull-out o falla por desprendimiento en una de las zonas presentes en unión mediante FSSW. En la

Figura 5.16 a se muestra el montaje de la probeta y la Figura 5.16 b muestra el modo de falla nugget pull-out en la zona afectada por calor, esta región exhibe la dureza con valores más bajos con respecto a los valores del metal base convirtiéndose en la posición de fallo durante el ensayo de tracción en el punto de la soldadura. La rotura de las probetas de los ensayos de tracción se han producido al nivel de la zona ZAC y no al nivel de la soldadura, esto se debe a que el nivel de la unión en la zona recristalizada que esta caracterizada por un tamaño de granos finos inferior al tamaño de los granos del metal base, lo que proporciona a la unión una resistencia elevada. La relación Hall-Petch se deriva sobre la base del aumento de la resistencia que resulta del apilamiento de dislocaciones como obstáculos físicos, tales como límites de grano. A tamaños de granos finos, los granos individuales no pueden mantener más de una dislocación, por lo que la dureza no obedece la relación de Hall-Petch Suryanarayana C (1995) y Nieh (1991). Las propiedades mecánicas de las aleaciones de titanio dependen en gran parte de su microestructura, es decir de la forma y del tamaño de los granos, y de la proporción de las fases  $\alpha$  y  $\beta$ .

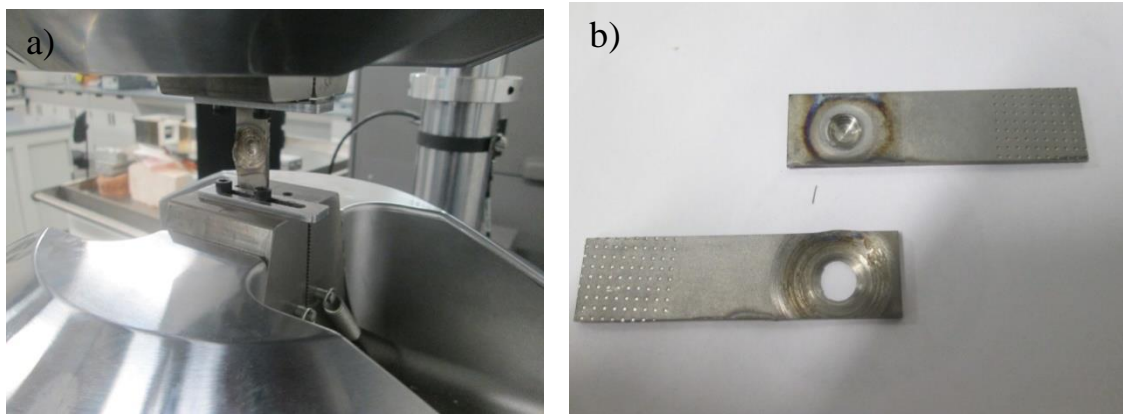


Figura 5.16 Prueba de tensión, a) Muestra montada para realizar prueba de tensión y b) probeta presento modo de falla nugget pull-out

Los resultados de los ensayos de tensión sobre las probetas mostraron una tendencia de aumento con el incremento en la velocidad de rotación, se observa una tendencia de decremento con respecto a la combinación en velocidad de rotación y velocidad de penetración, ver Figura 5.17. Con velocidad de rotación de 500 rpm, 120 mm/min en velocidad de penetración y 3 s en tiempo de sostenimiento se observa que la resistencia a la tracción máxima para la unión es de 989 MPa, y en el experimento 2 con 800 rpm, 60 mm/min y 3 s y el experimento 6 con 862,13 rpm, 90 mm/min y 3 s la resistencia a la tracción fue de 1118 MPa y 1072 MPa respectivamente.

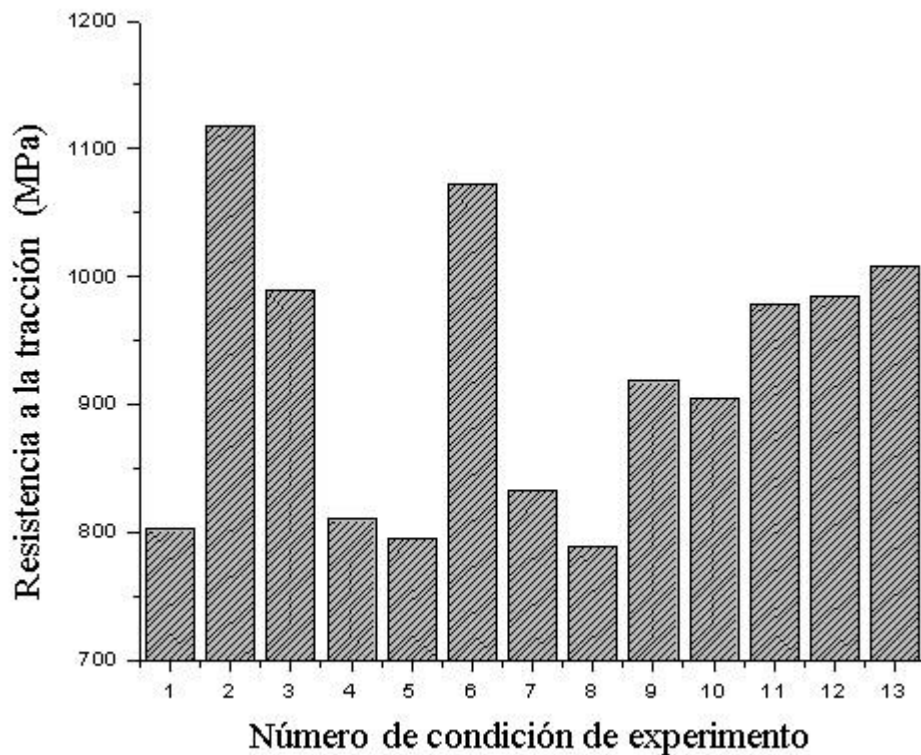


Figura 5.17 Gráfico de la relación a la tracción de las uniones soldadas con respecto al número de experimentos desarrollados.

## 5.4 Perfil de Temperatura

Se registró la temperatura en las uniones realizadas durante el proceso mediante termopar tipo k , en la Figura 5.18 se muestra el montaje del equipo utilizado. El historial de temperatura se muestra en la Figura 5.19 Figura 5.20 y Figura 5.21, la temperatura más alta se registra en 1278.71°C en una combinación de parámetros de 800 rpm con 120 mm/min y la temperatura más baja registrada corresponde a la combinación de parámetros de 438 rpm con 90 mm/min, 638.569 °C.

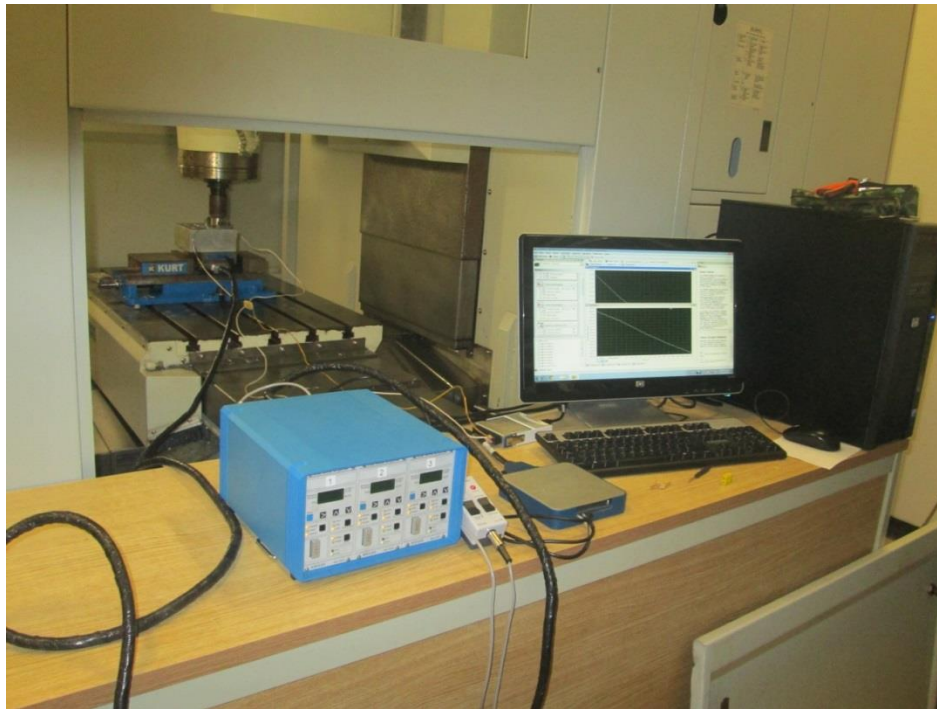


Figura 5.18 Medición de temperatura (°C) durante el proceso FSSW

En la Figura 5.19 se observa la distribución de la temperatura en las uniones soldadas con parámetros de 438 rpm con 90 mm/min, 500 rpm con 60 mm/min y 500 rpm con 120 mm/min. Las variables que determinan las propiedades en la zona de la soldadura son la temperatura máxima y la velocidad de enfriamiento, destacando que el tamaño de grano es determinado principalmente por la temperatura máxima en la



soldadura. La velocidad de rotación y la velocidad de soldadura son las principales variables independientes que tienen efecto sobre la temperatura alcanzada durante el proceso FSW y son las que se utilizan para controlar el mismo, Nandan et al. (2008). Altas velocidades transversales tienden a reducir el calor de entrada y la temperatura en el proceso FSW, Pérez (2012). En la Figura 5.19 se puede observar que la velocidad de penetración incrementa la temperatura en el proceso de FSSW en la aleación Ti-6Al-4V, caso contrario al efecto de la velocidad de soldadura en el proceso FSW en aleaciones de aluminio, esto puede atribuirse a la baja conductividad térmica del titanio.

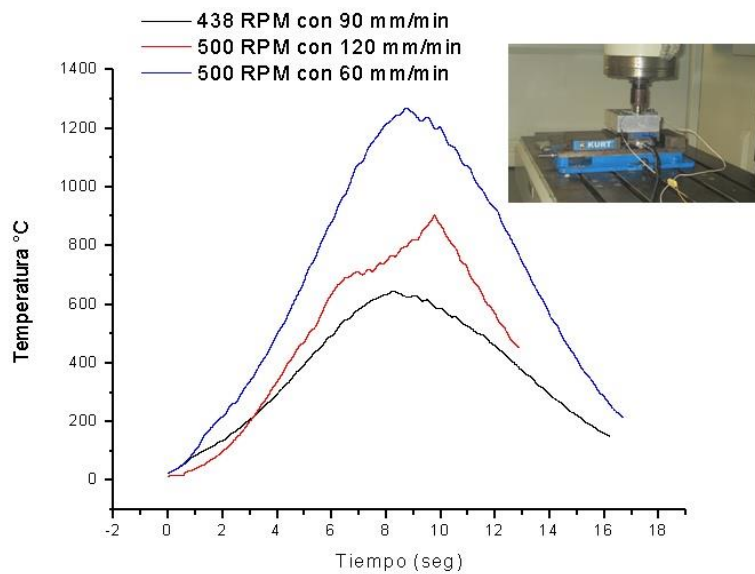


Figura 5.19 Temperatura (°C) de las uniones a 438 RPM y 500 RPM con diferentes valores de velocidad de penetración donde se aprecia los valores alcanzados

En la Figura 5.20 se observa la distribución de la temperatura en las uniones soldadas con parámetros de 650 rpm con 132 mm/min, 650 rpm con 90 mm/min y 650 rpm con 132 mm/min. El comportamiento del historial de temperatura en los puntos de soldadura que se presentan en la gráfica es similar a las uniones anteriores, cabe mencionar que solo en la combinación de los parámetros de 650 rpm con 48 mm/min registro una ligera diferencia hacia arriba en el valor con respecto a la soldadura efectuada con una velocidad de penetración de 90 mm/min.

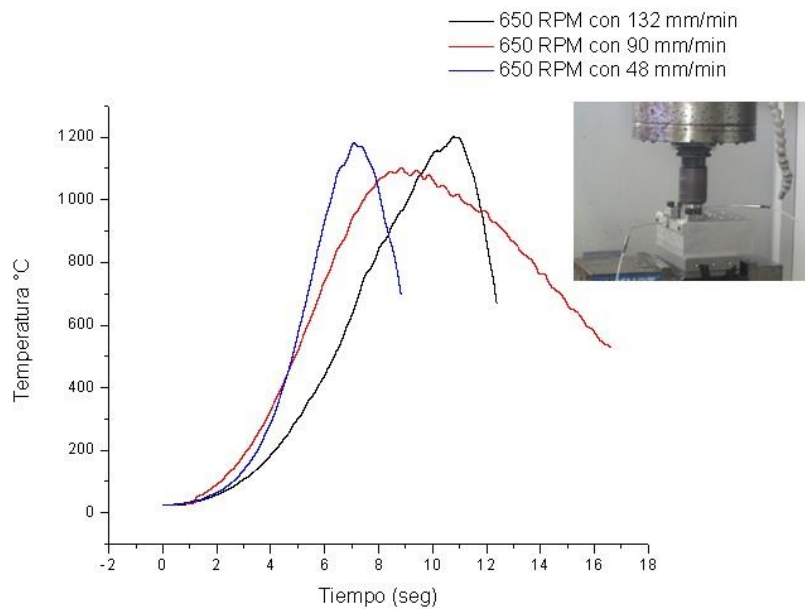


Figura 5.20 Temperatura (°C) de las uniones a 650 rpm con diferentes valores de velocidad de penetración donde se aprecia los valores alcanzados

En la Figura 5.21 se observa la distribución de la temperatura en las uniones soldadas con parámetros de 800 rpm con 120 mm/min, 800 rpm con 90 mm/min y 800 rpm con 60 mm/min, en este grupo de uniones la temperatura más alta se registró en la unión con 800 rpm y 120 mm/min de 1278.71 °C, mientras que la soldadura de 863 rpm con 90 mm/min alcanzó una temperatura máxima de 1198.043 °C evidenciando que la combinación a mayor escala de los principales parámetros de operación incrementa la temperatura. Para el punto de soldadura de 800 rpm y 60 mm/min se obtuvo una temperatura de 1105.122°C

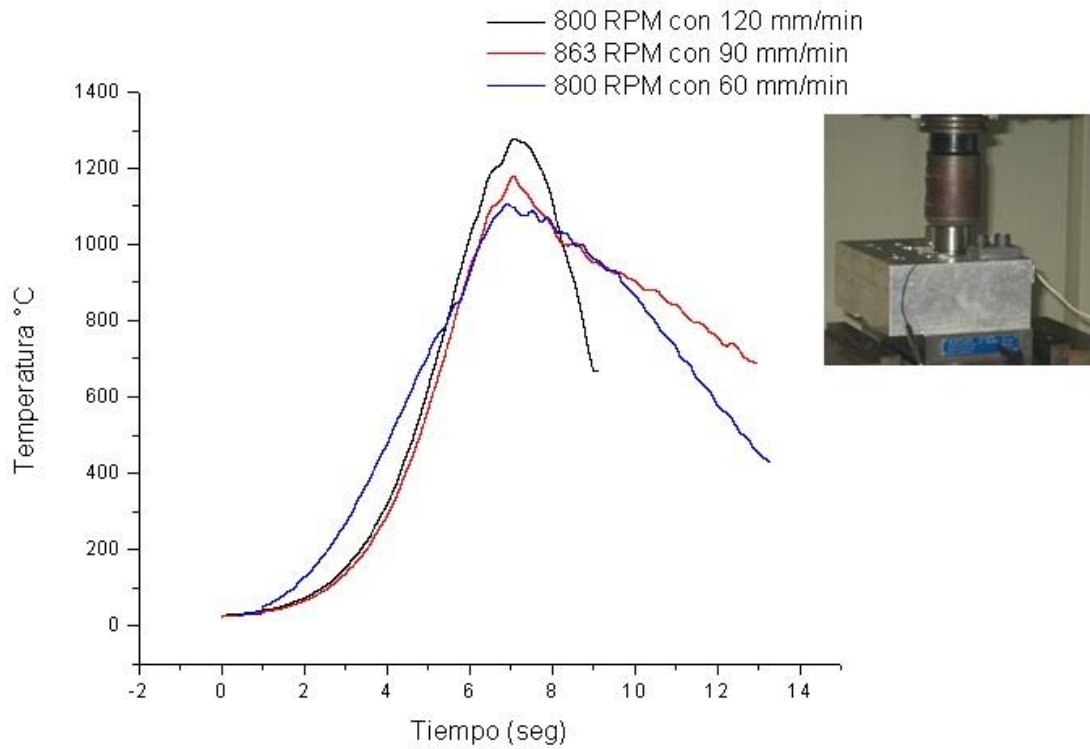


Figura 5.21 Temperatura (°C) de las uniones a 800 rpm y 863 rpm con diferentes valores de velocidad de penetración donde se aprecia los valores alcanzados

## 5.5 Fuerza ejercida

Los resultados de la evolución de fuerza ejercida por la maquina sobre la uniones se muestran en la Figura 5.22. El valor 4370 N se registro en la soldadura con parámetros de 438 rpm y 90 mm/min, mientras que para la unión con 500 rpm y 120 mm/min se registro una carga de 5850 N, con los resultados se puede corroborar las conclusiones del trabajo de Nandan et al (2008), donde concluyen que a un aumento de presión la temperatura máxima incrementa.

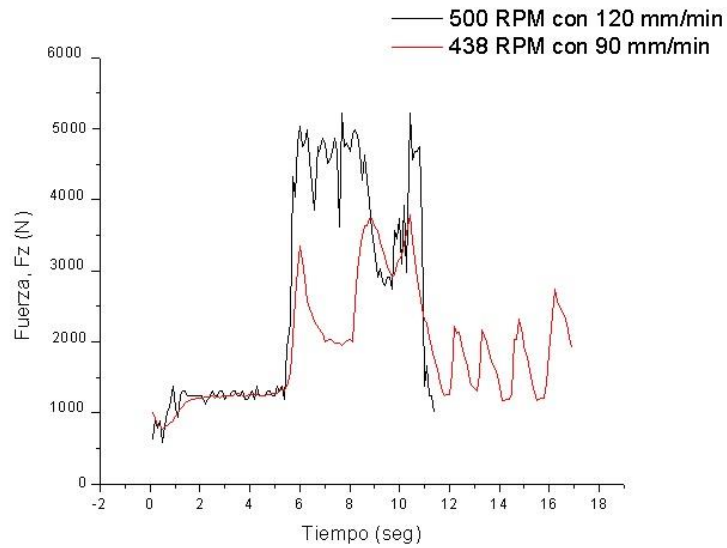


Figura 5.22 Fuerza de penetración de las uniones a 438 rpm y 500 rpm con diferentes valores de velocidad de profundidad donde se aprecia los valores alcanzados

La Figura 5.23, muestra las curvas correspondientes a la fuerza ejercida por el cabezal de la máquina en el eje Z, los valores corresponden a las uniones con parámetros de proceso de 650 rpm a diferentes valores en velocidad de profundidad, donde el valor máximo registrado para la soldadura de 650 rpm con 48 mm/min fue de 6310 N, se observa un valor máximo de 6790 N en la unión con parámetros de 650 rpm con 90 mm/min y 7050 N se registro para la soldadura con 650 rpm con 132 mm/min, los diagramas de las fuerzas de penetración muestran que la fuerza ejercida aumenta en función de la velocidad de penetración.

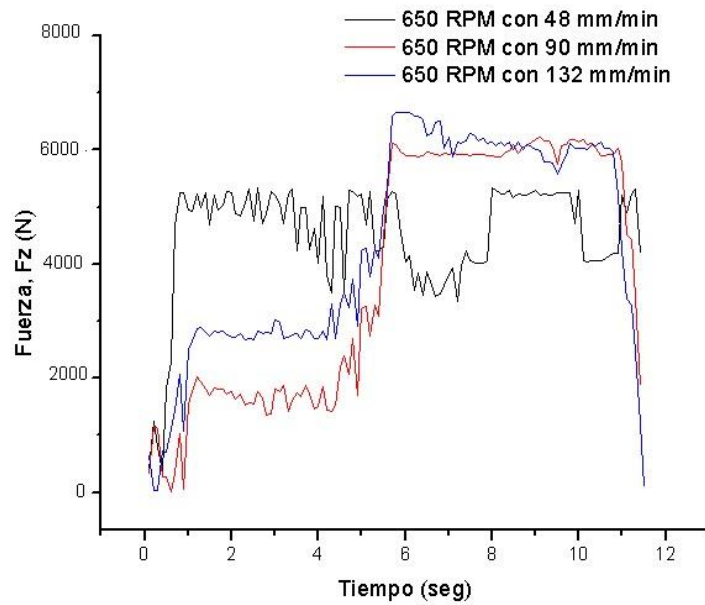


Figura 5.23 Fuerza de penetración de la uniones a 650 rpm con diferentes valores de velocidad de profundidad donde se aprecia los valores alcanzados

Los resultados de la fuerza sobre los puntos de soldadura se observan en la gráfica en la Figura 5.24, las curvas correspondiente a la soldadura con 800 rpm y 60 mm/min muestra un valor máximo de 7350 N, la unión con 800 rpm y 120 mm/min alcanzó 7820 N y la soldadura con 863 rpm con 90 mm/min fue de 7670 N.

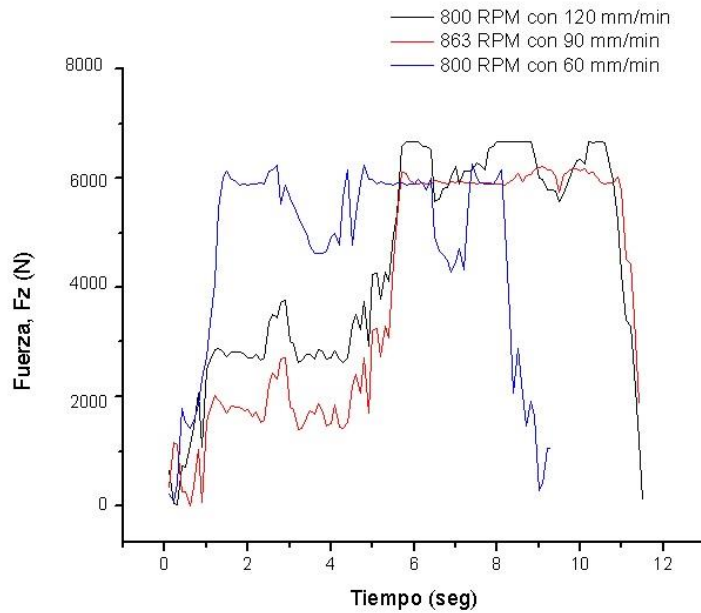


Figura 5.24 Fuerza de penetración de la uniones a 800 rpm y 863 rpm con diferentes valores de velocidad de profundidad donde se aprecia los valores alcanzados

## 5.5 Resultados mediante la simulación por MEF

En esta sección se presentan los resultados numéricos obtenidos a partir del modelo MEF tridimensional desarrollado para llevar a cabo el estudio de la temperatura y el flujo del material en la soldadura mediante el proceso FSSW, los resultados del modelo MEF a diferentes parámetros de operación han sido comparados con los resultados experimentales. En la Figura 5.25 se observa el modelo MEF que consta de una herramienta a la que se le asignó la velocidad de penetración y las láminas a unir, donde se aprecia que el modelo dispone de un mallado más fino o denso en la zona de contacto entre el hombro de la herramienta y las láminas, mientras que el mallado del resto de las láminas es menos denso o fino.

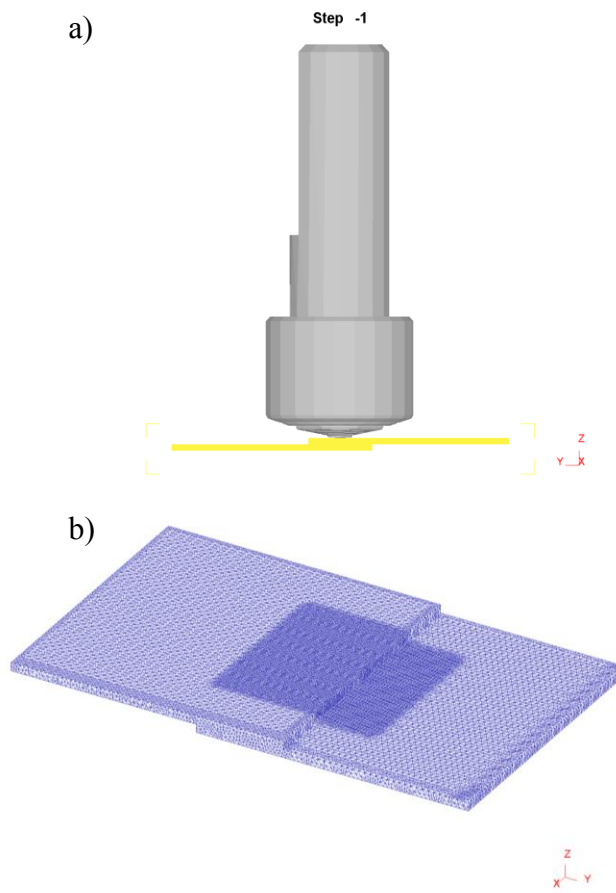


Figura 5.25 a) Modelo tridimensional del proceso de soldadura FSSW, b) Imagen de las láminas donde se observa el área del mallado más fino en la zona de contacto .

### 5.5.1 Perfil de temperatura

Los resultados de temperatura del proceso FSSW del modelo MEF han sido comparados con los resultados experimentales. Para mantener la coherencia, las dimensiones de la pieza de trabajo, las propiedades del material, condiciones del proceso de soldadura y las condiciones del entorno, se utilizaron los mismos que en los experimentos. Una comparación entre los datos de temperatura medidos en la zona de agitación y los resultados calculados a partir del modelo MEF a una velocidad de rotación de la herramienta y velocidad de penetración de a) 650 rpm y 90 mm/min, b) 650 rpm y 48 mm/min, c) 800 rpm y 120 mm/min, e) 500 rpm y 120 mm/min, f) 438 rpm y 90 mm/min, j) 650 rpm y 132 mm/min, k) 800 rpm y 60 mm/min, l) 500 rpm y 60 mm/min y m) 863 rpm y 90 mm/min, donde se muestra la distribución de temperaturas generadas durante el proceso FSSW, la temperatura máxima observada en las uniones se ubica entre 638.569°C a 1278.71°C . Los resultados numéricos fueron 726.98°C a 1380°C. Eso indica una buena aproximación entre los resultados experimentales y los datos calculados. La Figura 5.26 ilustra la colocación de los termopares en el modelo numérico y en la experimentación realizada para unir las láminas de la aleación de titanio.

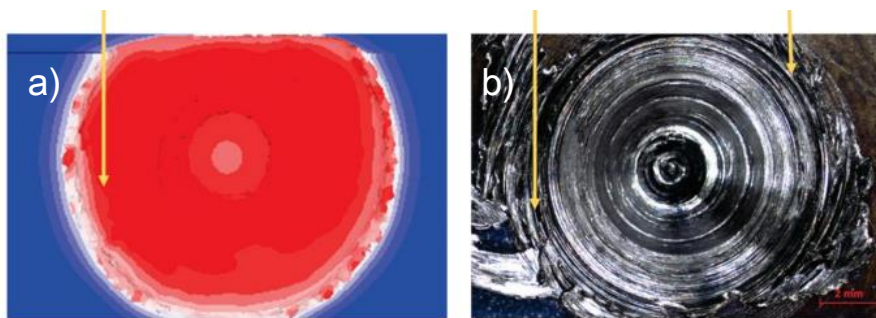


Figura 5.26 a) Modelo tridimensional del punto de soldadura, b) Imagen del punto de soldadura generado mediante el proceso FSSW.



Los resultados del modelo MEF del punto de soldadura mediante proceso FSSW es ilustrado en la Figura 5.27, donde se muestra la distribución de temperaturas generadas durante el proceso FSSW en la unión con parámetros de 650 rpm y 90 mm/min, con estas condiciones de proceso se observa una temperatura máxima de 1210°C, presentando una diferencia de 4.30 % con respecto al resultado experimental.

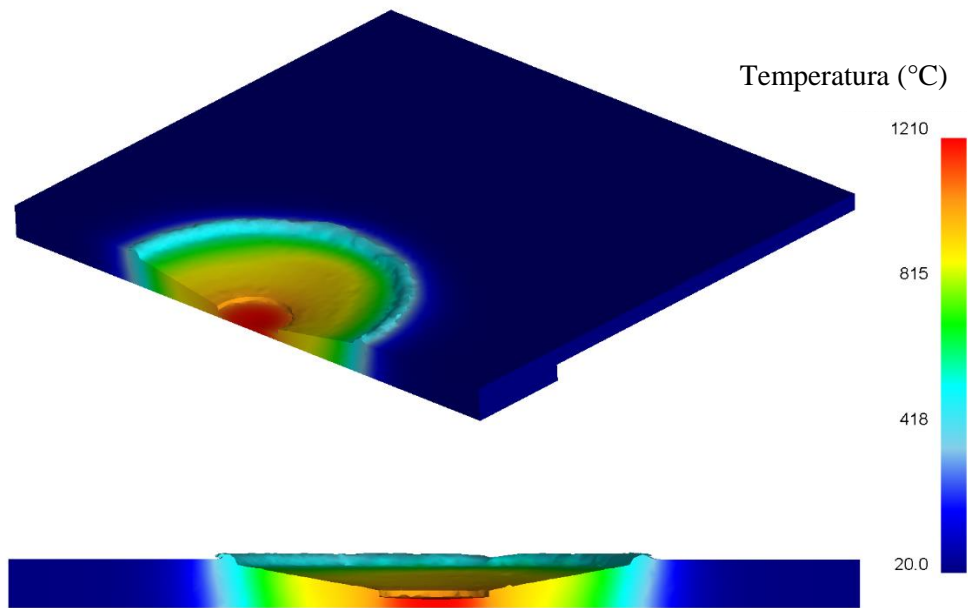


Figura 5.27 Distribución de temperaturas generadas durante el proceso FSSW en la unión con parámetros de 650 rpm y 90 mm/min

En la Figura 5.28 se presentan el historial térmico de las simulaciones con parámetro de proceso de velocidad de rotación de 500 rpm con 60 y 120 mm/min y 438 rpm con 132 mm/min, en donde según se observa una temperatura de 1380 °C alcanzada en el centro del punto de soldadura en la unión con parámetros de 500 rpm con 60 mm/min, 1210 °C en la unión con parámetros de 500 rpm con 120 mm/min y 726 °C en la unión con parámetros de 438 rpm y 90 mm/min, la temperatura tiene una gran dependencia con la velocidad de rotación, a mayor velocidad de rotación mayor será el calor generado y la temperatura alcanzada, con esta combinación de valores en parámetros de velocidad de rotación y velocidad de penetración se observó que a mayor rpm y menor valor en la velocidad de penetración la temperatura es mayor, estos resultados difieren con las conclusiones del trabajo de Edwards y Ramulu (2013) que en su investigación en soldadura lineal encontraron que la velocidad de desplazamiento tuvo menos influencia sobre las temperaturas obtenidas, ya que esperaban que a velocidades de desplazamiento más lento permitiría más tiempo para calentar el material y por lo tanto dar lugar a temperaturas más altas, pero no se observó.

En las simulaciones para la combinación de 500 rpm con 60 mm/min y 500 rpm con 120 mm/min se observó que a menor velocidad de penetración la temperatura alcanzada es mayor, en esta caso 1268.265 °C y 904.487 °C en la uniones relizadas en la parte de la experimentación y 1380 °C y 1210 °C en los modelos numéricos respectivamente. Y para los parámetros de 438 rpm con 90 mm/min la temperatura en la experimentación fue de 638.539 °C y en la 726 °C en el modelo numérico, donde se observa la gran influencia que tiene la velocidad de rotación, Dialami et al. (2015).

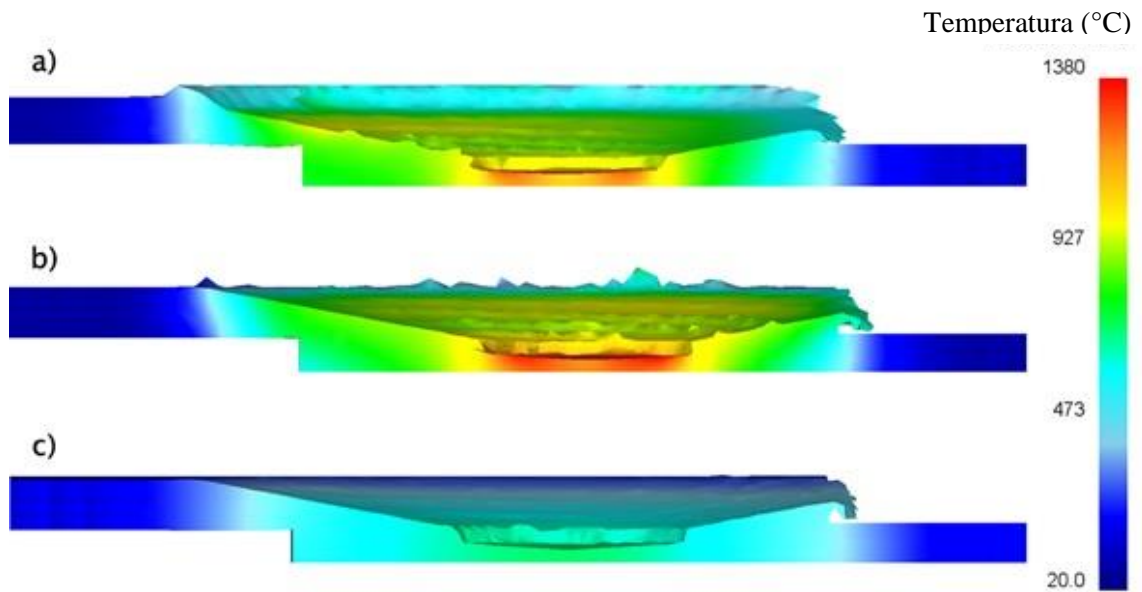


Figura 5.28 Temperaturas de los modelos a 500 y 438 rpm con diferentes valores de velocidad de profundidad donde se aprecia los valores alcanzados. a) 500 rpm con 60 mm/min, b) 500 rpm con 120 mm/min y c) 438 rpm con 90 mm/min.

En la Figura 5.29 se comparan las temperaturas de los modelos con parámetro de proceso de velocidad de rotación de a) 650 rpm y 90 mm/min, b) 650 rpm y 48 mm/min y c) 650 rpm y 132 mm/min, en donde se observa para la combinación de parámetros de 650 rpm con 90 mm/min una temperatura máxima de 1230 °C, una temperatura máxima de 1020 °C para los parámetros de 650 rpm y 48 mm/min y 1360 °C para la soldadura de 650 rpm con 132 mm/min, donde se observa la influencia de que a mayor velocidad de penetración aumentó la temperatura, esto puede atribuirse a la baja conductividad térmica que tienen las aleaciones de titanio, Liu et al. (2010).

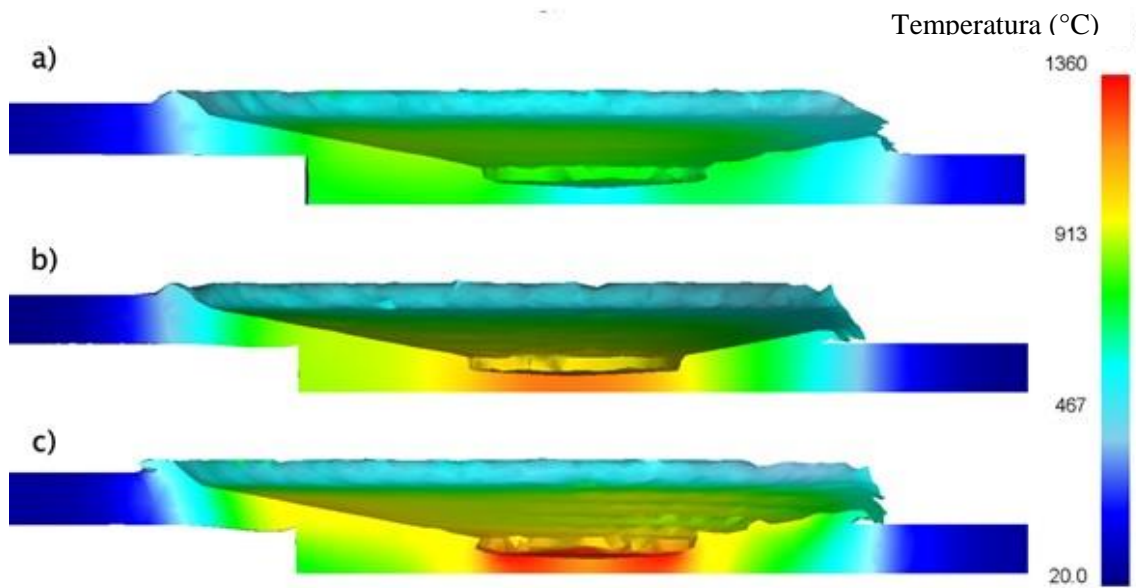


Figura 5.29 Temperaturas de los modelos a 650 rpm con diferentes valores de velocidad de profundidad donde se aprecia los valores alcanzados. a) 650 rpm y 90 mm/min, b) 650 rpm y 48 mm/min y c) 650 rpm y 132 mm/min.

En la Figura 5.30 se comparan las temperaturas de los modelos con parámetro de proceso de velocidad de rotación de a) 800 rpm y 120 mm/min, b) 800 RPM y 60 mm/min y c) 863 rpm y 90 mm/min, en donde se observa para la combinación de parámetros de 800 RPM con 120 mm/min una temperatura máxima de 1380 °C, una temperatura máxima de 1200 °C para los parámetros de 800 RPM y 60 mm/min y 1290 °C para la soldadura de 863 rpm con 90 mm/min, donde se observa la influencia de que a mayor velocidad de penetración con respecto al aumento en el valor de la temperatura, se observa un comportamiento similar a los resultados del grupo anterior.

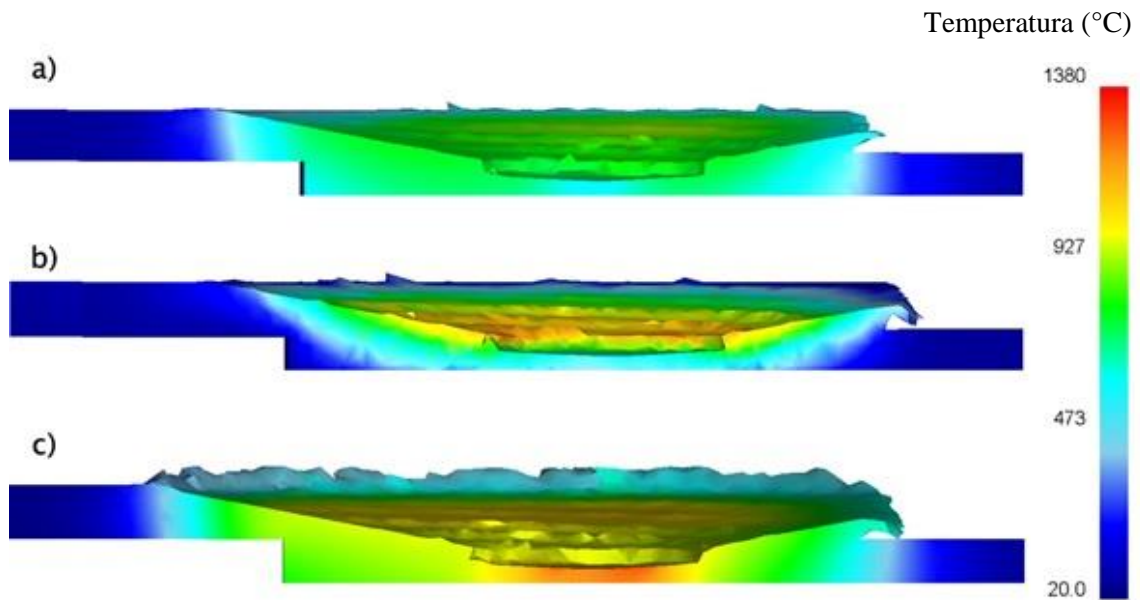


Figura 5.30 Temperaturas de los modelos a 800 y 863 rpm con diferentes valores de velocidad de profundidad donde se aprecia los valores alcanzados. a) 800 rpm y 120 mm/min, b) 800 rpm y 60 mm-min-1 y c) 863 rpm y 90 mm/min.

### 5.5.2 Esfuerzo efectivo y deformación efectiva

La Figura 5.31, 5.32 y 5.33 muestra el resultado del cálculo numérico para la determinación del esfuerzo efectivo en las uniones con los diferentes parámetros de proceso, en la Figura 5.31 se observan los resultados para las uniones con valores en los parámetros de a) 500 rpm y 120 mm/min, b) 500 rpm y 60 mm/min, c) 438 rpm y 90 mm/min, la región del centro en la zona ZA donde se produce el contacto con la herramienta presentan un mayor esfuerzo efectivo, como se observa en la región de la huella que esta coloreada en rojo, el punto de análisis ubicado en el centro del nugget presenta un esfuerzo efectivo máximo de 503 MPa en la unión con parámetros de 500 RPM con 120 mm/min, adicional se observa en un esfuerzo de 501 MPa en el lado de izquierdo (RS- retroceso). En los puntos de soldadura con parámetros de 500 rpm con

60 mm/min y 438 rpm con 90 mm/min presentan un esfuerzo efectivo máximo en la zona central de 498 MPa y 294 MPa, respectivamente.

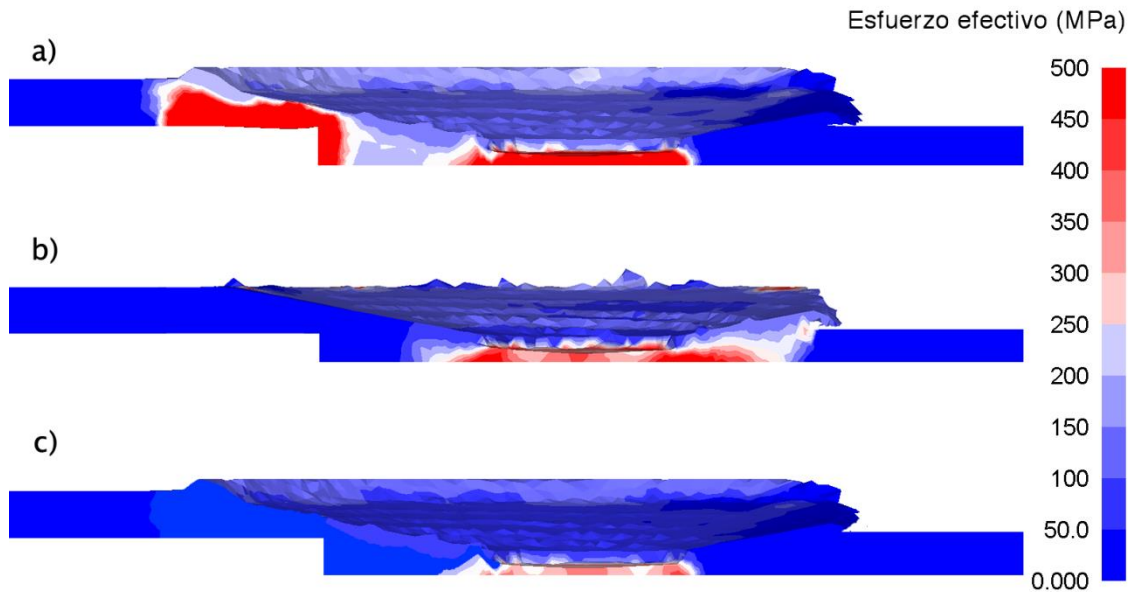


Figura 5.31 Simulación del esfuerzo efectivo en la unión de los puntos de soldadura con los parámetros a 500 rpm y 438 rpm con diferentes velocidades de penetración donde se aprecia los valores alcanzados en a) 500 rpm y 120 mm/min, b) 500 rpm y 60 mm/min y c) 438 rpm y 90 mm/min.

En la Figura 5.32 se observan los resultados para las uniones con valores en los parámetros de a) 650 rpm con 48 mm/min, b) 650 rpm con 90 mm/min y c) 650 rpm y 132 mm/min, la región del centro en la zona ZA donde se produce el contacto con la herramienta presentan un mayor esfuerzo efectivo, como se observa en la región de la huella, el punto de análisis ubicado en el centro del punto presenta un esfuerzo efectivo máximo de 150 MPa en la unión con parámetros de 650 rpm con 48 mm/min, En las uniones con parámetros de 650 rpm con 90 mm/min y 650 rpm con 120 mm/min presentan un esfuerzo efectivo máximo en la zona central de 8 MPa y 528 MPa, respectivamente.

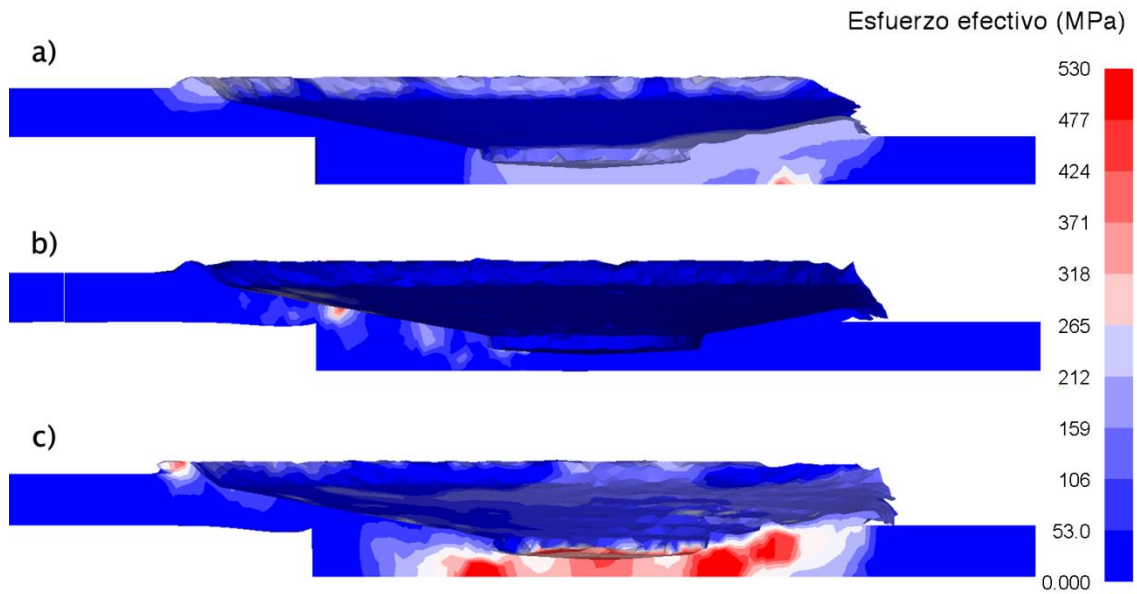


Figura 5.32 Simulación del esfuerzo efectivo en la unión de los puntos de soldadura con los parámetros a 650 rpm con diferentes velocidades de penetración donde se aprecia los valores alcanzados en a) 650 rpm y 48 mm/min, b) 650 rpm y 90 mm/min, y c) 650 rpm y 132 mm/min.

En la Figura 5.33 se observan los resultados para las uniones con valores en los parámetros de a) 800 rpm con 60 mm/min, b) 800 rpm con 120 mm/min y c) 863 rpm y 90 mm/min. El máximo esfuerzo efectivo calculado en la la unión con parámetros de 800 rpm con 60 mm/min es de 157 MPa, en la soldadura con parámetros de 800 rpm con 120 mm/min presenta un esfuerzo efectivo máximo de 517 MPa y para la unión de 863 rpm con 90 mm/min presentan un esfuerzo efectivo máximo en la zona central de 576 MPa y 736 MPa en la región de retroceso (rs).

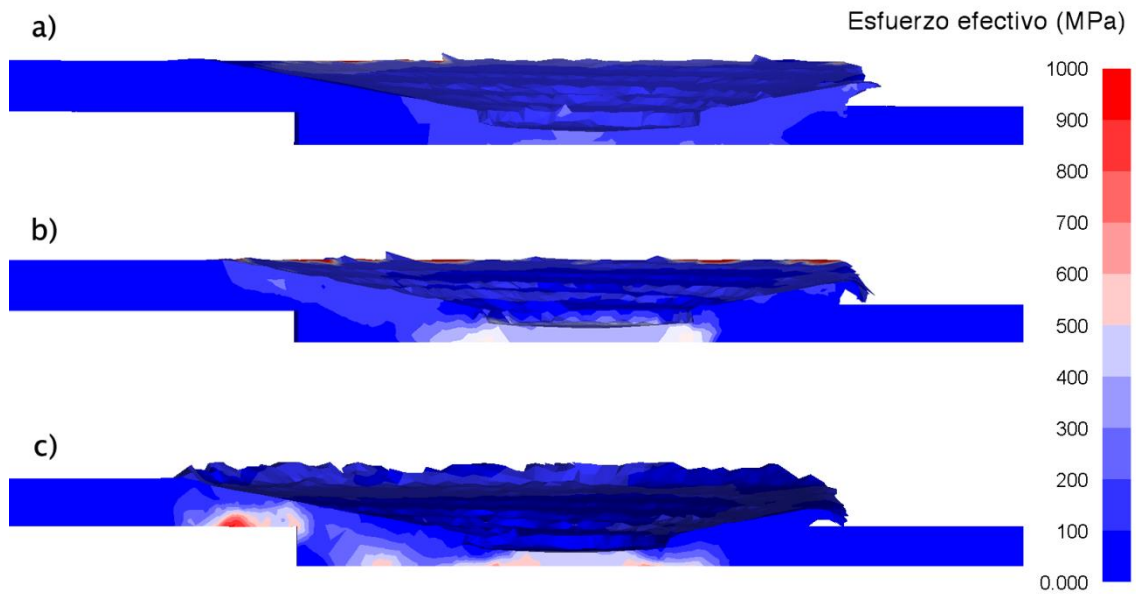


Figura 5.33 Simulación del esfuerzo efectivo en la unión de los puntos de soldadura con los parámetros a 800 y 863 rpm con diferentes valores de velocidad de penetración donde se aprecia los valores alcanzados en a) 800 rpm con 60 mm/min, b) 800 rpm con 120 mm/min, y c) 863 rpm con 90 mm/min.

La Figura 5.34, 5.35 y 5.36 muestra la simulación del comportamiento mecánico de la deformación efectiva en las uniones realizadas mediante el proceso de soldadura FSSW a diferentes parámetros de operación. La Figura 5.34 muestra los resultados de la simulación del comportamiento del Ti-6Al-4V en el proceso FSSW a diferentes velocidades de rotación y velocidades de penetración, donde en el gráfico a) 500 rpm con 120 mm/min se observa en la región de contacto entre la herramienta y las láminas una deformación efectiva de 9 mm/mm, para la unión de b) 500 rpm con 60 mm/min se observa una deformación efectiva de 10.34 mm/mm y para la unión de c) 438 rpm con 90 mm/min se aprecia una deformación efectiva aproximada 6 mm/mm. En todos los casos se observa que la máxima deformación efectiva se presenta en el área de contacto entre el hombro de la herramienta y las láminas a unir, esto puede atribuirse a que existe más área de contacto entre el hombro de la herramienta que el contacto del pin de la herramienta en la zona de agitación, de acuerdo a los resultados la deformación efectiva oscila entre 8 y 11 mm/mm.



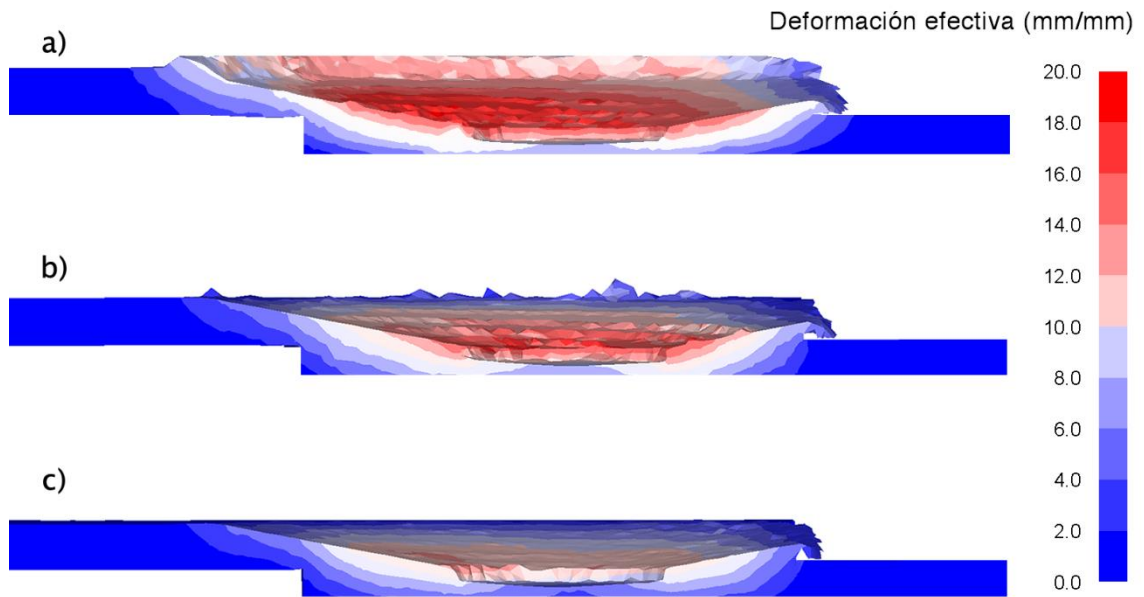


Figura 5.34 Resultados de FE de la deformación efectiva en la unión mediante el proceso de soldadura FSSW a 500 rpm y 438 rpm con diferentes valores de velocidad de penetración donde se aprecia los valores alcanzados. a) 500 rpm con 60 mm/min, b) 500 rpm con 120 mm/min y c) 438 rpm con 90 mm/min.

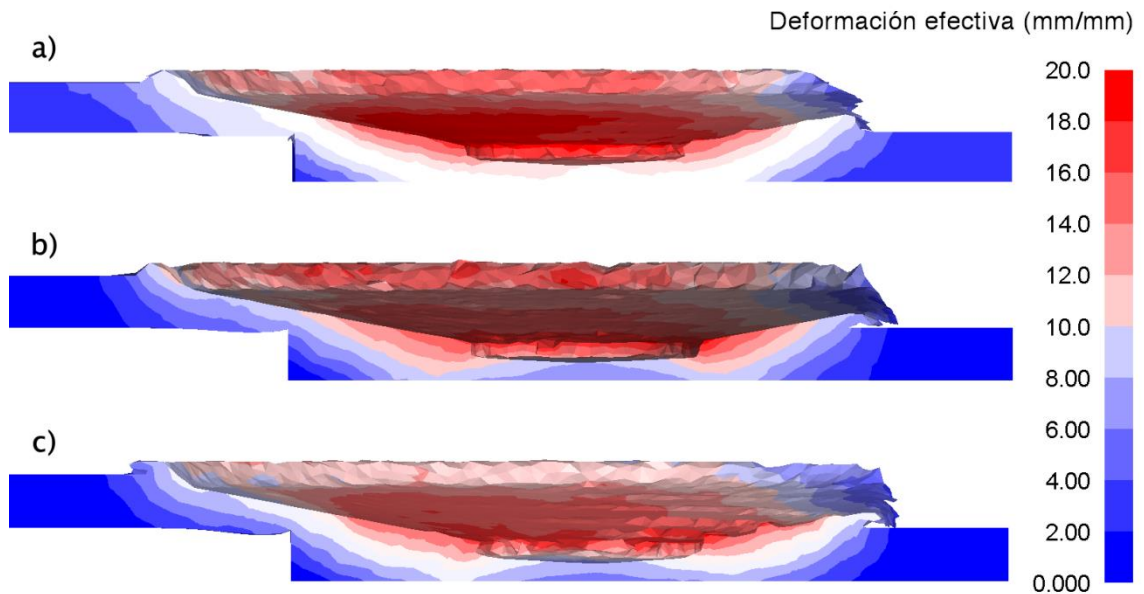


Figura 5.35 Resultados de FE de la deformación efectiva en la unión mediante el proceso de soldadura FSSW a 650 rpm con diferentes valores de velocidad de penetración donde se aprecia los valores alcanzados. a) 650 rpm con 48 mm/min, b) 650 rpm con 90 mm/min y c) 650 rpm con 132 mm/min.

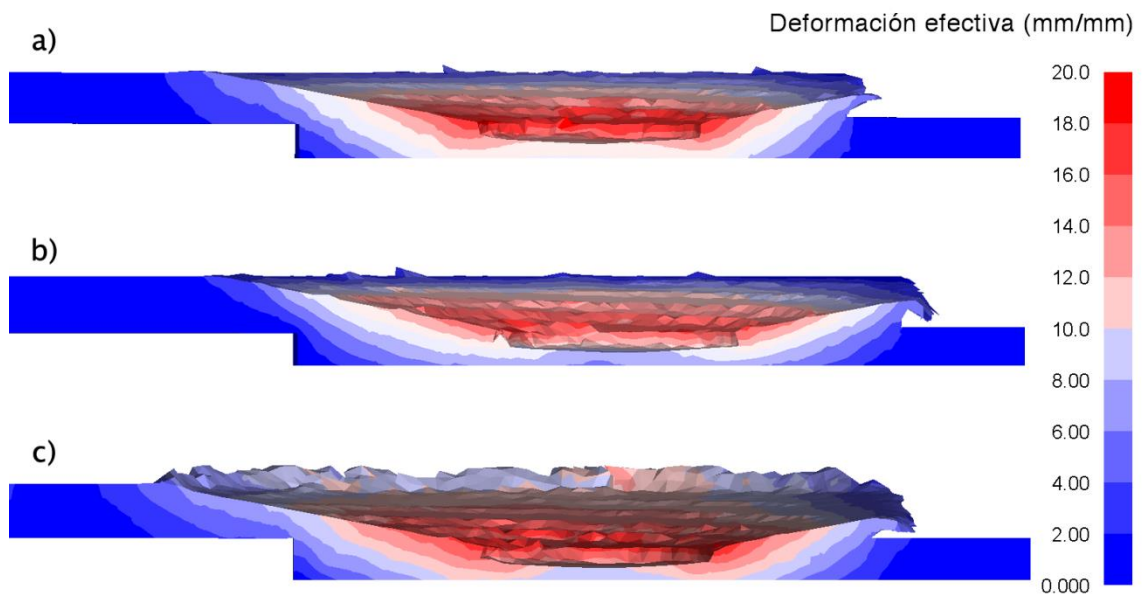


Figura 5.36 Resultados de FE de la deformación efectiva en la unión mediante el proceso de soldadura FSSW a 800 rpm y 863 rpm con diferentes valores de velocidad de penetración donde se aprecia los valores alcanzados. a) 800 rpm con 60 mm/min, b) 800 rpm con 120 mm/min y c) 863 rpm con 90 mm/min.

### 5.5.4 Flujo del Material

El flujo del material desempeña un papel fundamental en el proceso de soldadura por fricción-agitación ya que determina la eficacia de la unión. El flujo del material alrededor de la herramienta es muy complejo, los resultados dependen de la correcta selección de la geometría de la herramienta y los parámetros de operación considerando las propiedades del material a unir, He (2013). Los resultados del flujo del material muestran que la geometría de la herramienta en la zona del punto generado por el proceso de soldadura FSSW fue reproducido por la simulación, y se encuentra en excelente acuerdo con los resultados experimentales. En la Figura 5.37 se puede concluir que el modelo construido con la geometría real de la herramienta puede predecir el desplazamiento del flujo del material.

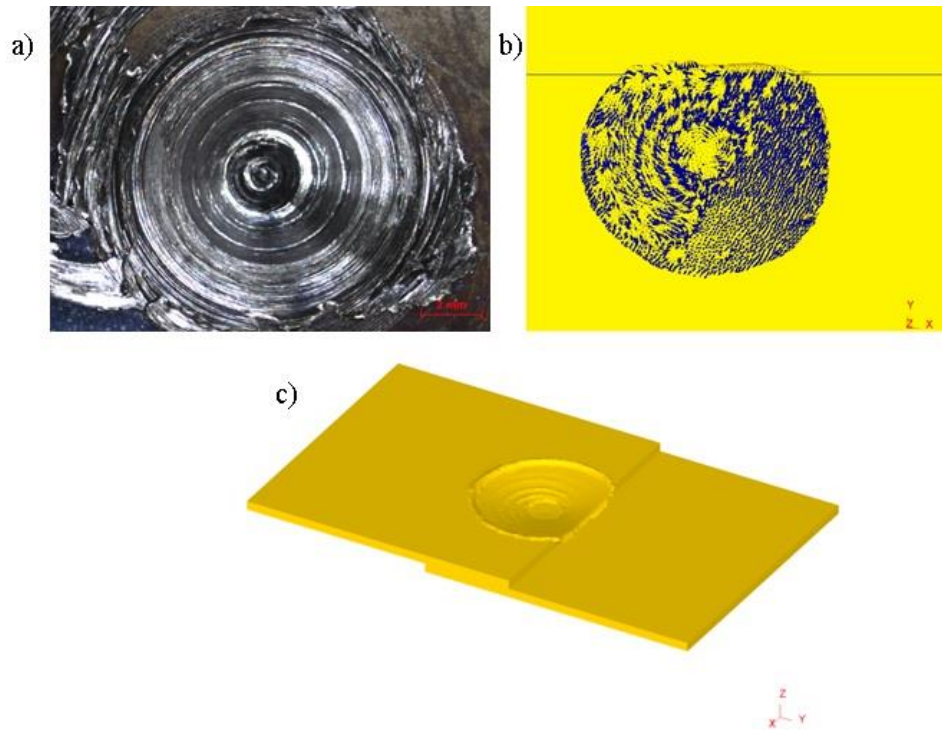


Figura 5.37 Flujo del material en el punto de soldadura mediante el proceso de soldadura FSSW, a) Imagen del punto de soldadura generado mediante el proceso FSSW, b) representación del flujo del material en la unión por MEF y c) huella de la herramienta mediante MEF.

Es muy importante entender las características del material para seleccionar el óptimo diseño de la herramienta y la combinación de los parámetros de proceso. La Figura 5.38 muestra la geometría real del hombro y pin de la herramienta, a) vista alámbrica del hombro y las láminas a unir y b) modelo tridimensional donde se observa la herramienta a la profundidad de 2.5 mm en las láminas.

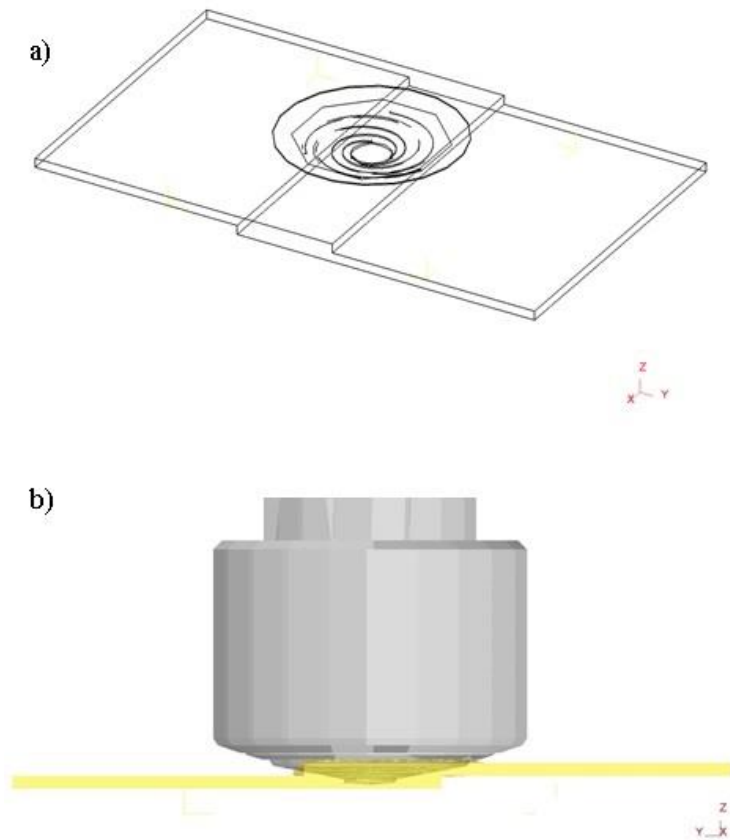


Figura 5.38 Representación en el modelo tridimensional de la geometría real de la herramienta, a) vista alámbrica del hombro y las láminas a unir y b) modelo tridimensional donde se observa la herramienta a la profundidad de 2.5 mm en las láminas.

### 5.5.4 Resultados experimentales comparados con los resultados modelo numérico

Las diferencias de los resultados experimentales y numéricos del historial de temperaturas durante el proceso de soldadura por punto por fricción-agitación en la aleación Ti-6Al-4V se muestran en la tabla 5.6 el modelo muestra una buena aproximación con la parte experimental.

Tabla 5.6 Diferencia en resultados experimentales y numéricos del historial de temperatura

Velocidad de rotación rpm y velocidad de penetración	Máxima temperatura (°C) durante el proceso FSSW		Diferencias %
	Experimentación	Simulación	
650 rpm con 90 mm/min	1179.265	1230	4.3
650 rpm con 48 mm/min	1220.136	1020	16.39
800 rpm con 120 mm/min	1278.71	1380	7.92
500 rpm con 120 mm/min	904.487	1210	33.77
438 rpm con 90 mm/min	638.569	726	13.69
650 rpm con 132 mm/min	1250.849	1360	8.72
800 rpm con 60 mm/min	1105.122	1200	8.58
500 rpm con 60 mm/min	1268.265	1380	8.81
863 rpm con 90 mm/min	1198.043	1290	7.67

La figura 5.39 muestra la gráfica de los resultados experimentales y numéricos de las temperaturas máximas alcanzadas durante el proceso FSSW, la temperatura máxima registrada se presenta a 1278 °C en la parte experimental y 1380 °C en los cálculos numéricos de la unión con parámetros de 800 rpm con 120 mm/min.

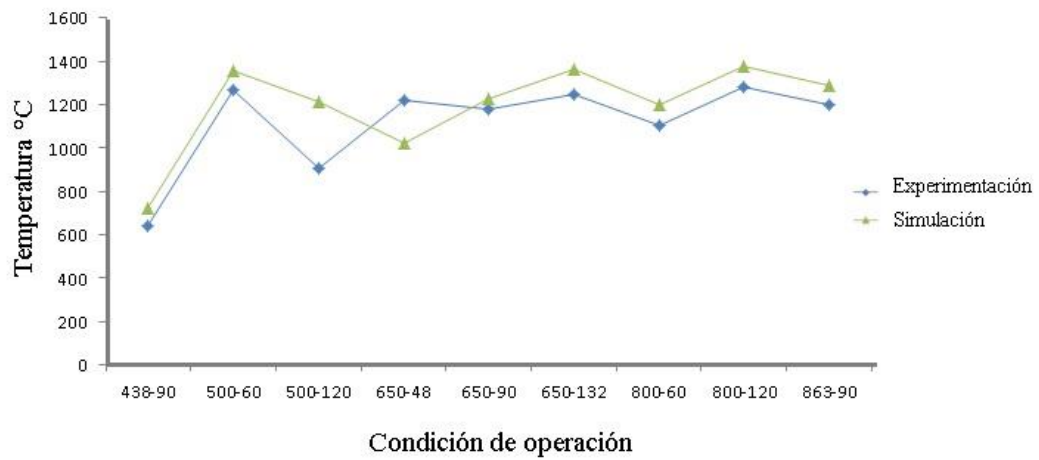


Figura 5.39 Gráfica de los resultados numéricos y experimentales de las máximas temperaturas registradas durante la unión de las láminas de aleación de Ti-6Al-4V

# Capítulo 6

## Conclusiones y recomendaciones

### 6.1 Conclusiones

La simulación por elemento finito permite realizar un seguimiento de la temperatura y el flujo del material durante la aplicación de la tecnología del proceso de soldadura por punto por fricción-agitación. El modelo termomecánico desarrollado en este estudio ha simulado con éxito el proceso FSSW, el flujo del material durante el proceso fue captado a través de la definición de las partículas del material en diferentes lugares y su flujo se trazó con el desplazamiento de la herramienta. Los siguientes resultados se pueden extraer:

- Las micrografías que se tomaron de las probetas prueban que se logró la unión mediante el proceso FSSW en la aleación Ti-6Al-4V.
- Con la combinación de los valores en los parámetros de 650 rpm con 48 mm/min, 650 rpm con 90 mm/min, 650 rpm con 132 mm/min, 800 rpm con 60 mm/min, 800 rpm con 120 mm/min, 863 rpm con 90 mm/min y 500 rpm con 120 mm/min se lograron las uniones en las láminas con espesor de 1.5 mm.
- En los perfiles de microdureza se presentó una disminución en la zona afectada por el calor (ZAC), la disminución de la dureza se dió por el efecto de la relación Hall-Petch que se deriva sobre la base del aumento de la resistencia que resulta del apilamiento de dislocaciones, por lo que la dureza no obedece a la relación de Hall-Petch.

- La falla de las probetas en los ensayos de tracción se produjeron en la zona ZAC, la cual conservó una microestructura similar a la del metal base, las transformaciones microestructurales en la zona ZA y ZATM proporcionaron mejores propiedades mecánicas. Los valores más altos que se obtuvieron en la resistencia a la tracción fueron en los experimentos 6 con 863 rpm con 90 mm/min y en el experimento 2 con 800 rpm a 60 mm/min, con estos resultados se observa una tendencia clara en el aumento de la resistencia a la tracción con el incremento en la velocidad de rotación, teniendo relación con el calor generado a mayores velocidades de rotación, condición en la cual se logra la plastificación del material que produce la unión.
- La combinación entre el cambio en la velocidad de la rotación y la velocidad de penetración muestran un efecto significativo en la temperatura máxima alcanzada.
- El resultado evidencia que el modelo MEF del proceso permite predecir el comportamiento térmico de la soldadura en la aleación Ti-6Al-4V.
- La geometría de la herramienta en la zona del punto generado por el proceso de soldadura FSSW fue reproducido por la simulación, y se encuentra en excelente acuerdo con los resultados experimentales reportados.

En este trabajo se realizó un estudio del proceso de soldadura por punto por fricción-agitación, se realizó la parte experimental y se estableció un modelo a través del método de elemento finito, obteniendo un modelo tridimensional, el cual está compuesto por la herramienta con la geometría real y las láminas a unir. En la actualidad los modelos no consideran la geometría real de la herramienta, por lo que este trabajo representa la generación de conocimiento en el proceso de soldadura por punto por fricción-agitación utilizado actualmente en la industria. El objetivo de obtener un modelo de EF local fue alcanzado y asimismo con la utilización de los parámetros del diseño de experimentos desarrollado para esta investigación se corroboró que se logró un modelo global que puede ser aplicado para obtener resultados en otros materiales.



## 6.2 Recomendaciones

Se recomienda como trabajo futuro realizar más pruebas experimentales con el fin de obtener el mapa de proceso para analizar el efecto de los nuevos rangos en los parámetros y con esto lograr aumentar el campo de operación intentando trabajar con velocidades de rotación mayores. Un complemento para este estudio sería analizar los esfuerzos residuales con la finalidad de determinar el tipo y la magnitud de los mismos a diferentes distancias del centro de la unión soldada.

Se recomienda trabajar en la investigación de la generación de modelos con diferentes valores en las constantes de la ecuación constitutiva de Johnson-Cook, ya que la utilización de una u otra produce importantes variaciones. El trabajo permite a futuro el desarrollo de cálculos sobre las velocidades de rotación, velocidad de penetración, tiempo de sostenimiento, esfuerzos, involucrando las mejoras metalúrgicas de las uniones en la aleación Ti-6Al-4V.

Para trabajos futuros se recomienda rediseñar la herramienta de soldadura y el sistema de sujeción de las placas, además desarrollar un diseños de experimentos que incluya la variación en el tiempo de sostenimiento y el precalentamiento de las placas para analizar el efecto sobre los cambios en la microestructura bajo estas condiciones.

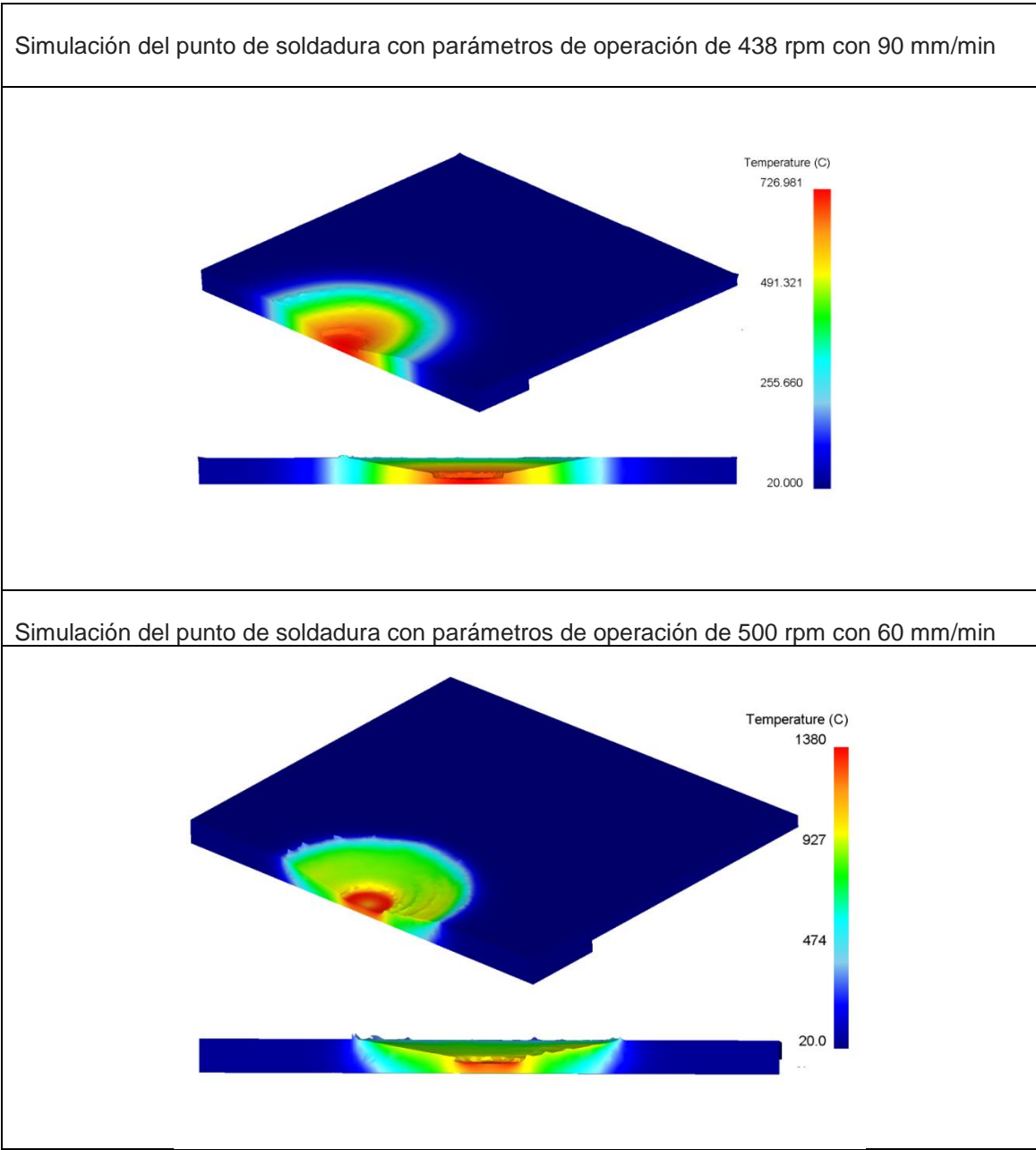
# Anexos

## Anexos 6.1 A Resultados de microdureza, HV.

Microdureza, HV												
a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m
320.6	302.3	357.1	298.7	355.5	308	319.9	306.5	326.1	298.5	355.1	373.3	356.9
328.4	305.9	355.3	320.1	357.6	306	316.4	308.4	321.4	291.4	351.9	371.2	355.1
318.6	301.4	357.6	303.9	353	310	321.2	297.2	319.2	301.2	360.3	376.9	357.6
322.1	306.8	359.4	301.5	358.6	308	317.6	301.5	323.5	298.8	357.6	375.1	355.9
326.9	304.5	355.8	305.4	357.4	306	322.3	310.6	317.4	303.5	358.4	369.3	359.9
345.2	315.5	342.5	322.5	340.1	300.8	349.8	321.5	338.5	316.4	345.8	370.2	355.2
339.8	319.8	352.6	318.9	361.1	309.1	339.5	326.8	344.2	310.9	340.2	366.3	350.8
341.5	321.6	347.7	316.9	355.2	299.8	347.1	331.5	337.6	318.4	348.9	369.7	342.5
345.1	315.9	335.9	324.8	366.8	302.5	331.2	326.4	345.3	305.8	352.1	372.5	340.5
339.4	329.7	345.7	323.3	358.5	303.8	340.5	328.4	337.4	311.9	346.9	368.6	352.6
358.6	338.9	359.1	340.6	341	275.4	362.9	328.9	331.5	316.8	358.4	328.9	340.1
360.5	345.7	364.6	328.9	315.3	278.3	354.6	340.3	328.4	312.2	351.9	325.6	339.5
357.4	339.5	356.7	321.7	317	274.1	361.8	321.9	327.9	321.2	349.9	329.9	342.1
361.1	347.7	360.1	324.7	312.2	285.5	358.4	339.5	338.5	325.8	356.4	330.8	339.9
359.6	344.8	359.7	338.6	328.5	289.2	359.9	329.4	333.4	328.9	345.8	325.4	342.8
368.7	354.8	369.4	348.4	363.2	353.6	353	379.4	353.8	361.7	379.4	353.1	360.8
366.7	358.9	388.1	404.7	369.3	357	359.9	378	361.8	358.7	368.9	359.3	368.9
363.1	352.7	360.1	344.1	353.4	361.1	363.2	370.5	358.1	366.5	360.1	363	365.4
367.3	349.8	359.3	361.8	357	355.6	367.4	369.8	363.9	359.9	366	367.4	361.9
362.5	352.7	382	359.2	360.4	363.4	364	372	355.7	367.4	371.2	358.5	358.9

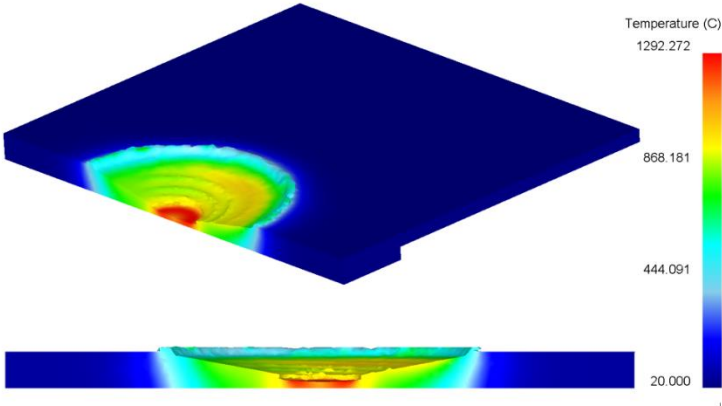
	Zona de agitación
	Zona afectada termomecánicamente
	Zona afectada por el calor
	Metal base

### Anexos 6.2 B Simulación de los puntos de soldadura de 438 y 500 rpm

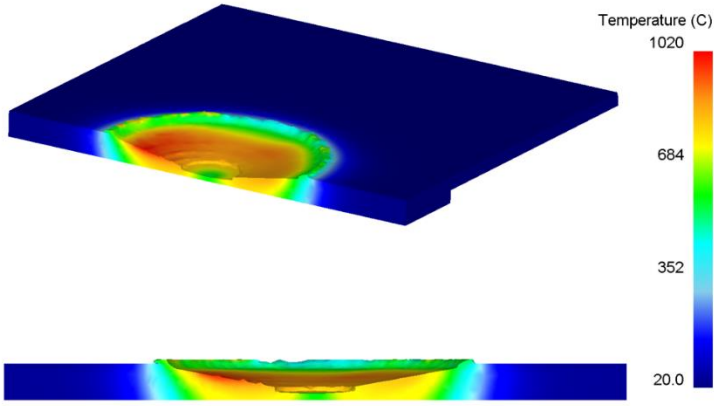


### Anexos 6.3 C Simulación de los puntos de soldadura de 500 y 650 rpm

Simulación del punto de soldadura con parámetros de operación de 500 rpm con 120 mm/min

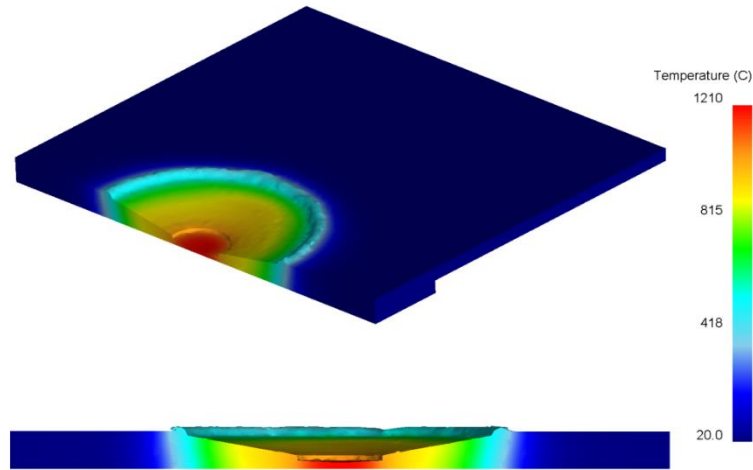


Simulación del punto de soldadura con parámetros de operación de 650 rpm con 48 mm/min

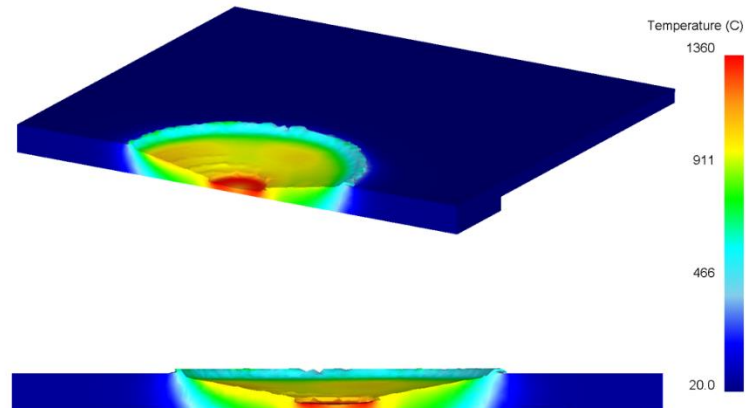


## Anexos 6.4 D Simulación de los puntos de soldadura de 650 rpm

Simulación del punto de soldadura con parámetros de operación de 650 rpm con 90 mm/min

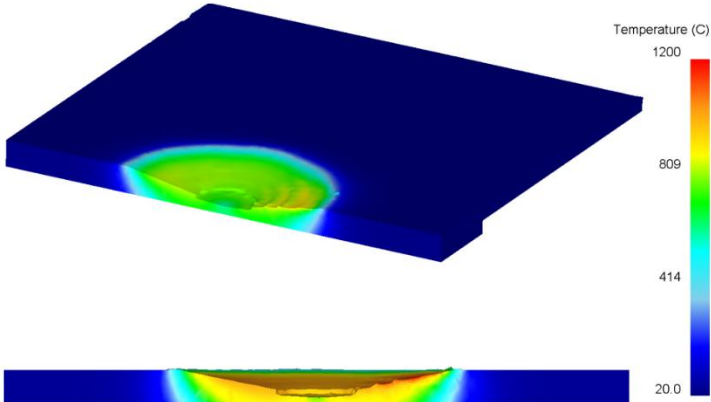


Simulación del punto de soldadura con parámetros de operación de 650 rpm con 132 mm/min

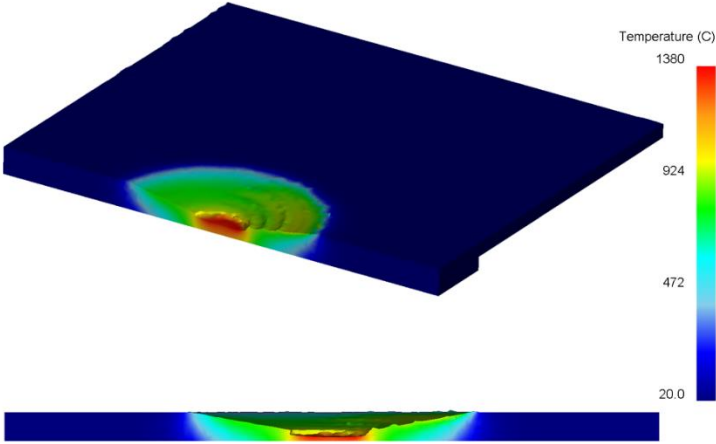


### Anexos 6.5 E Simulación de los puntos de soldadura de 800 rpm

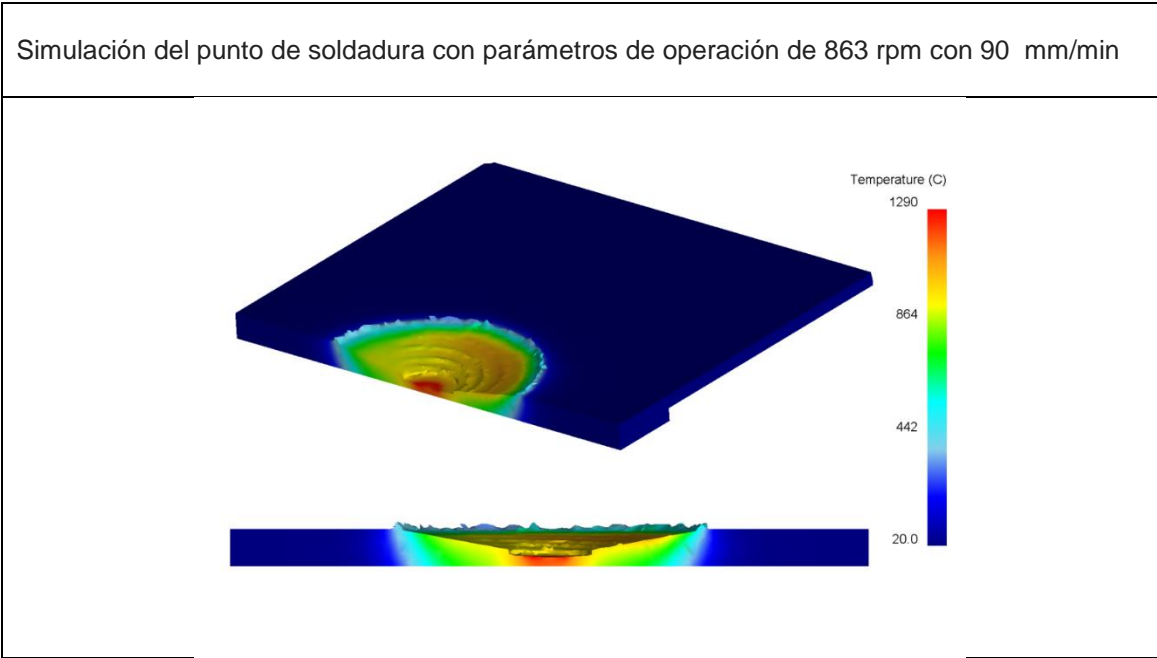
Simulación del punto de soldadura con parámetros de operación de 800 rpm con 60 mm/min



Simulación del punto de soldadura con parámetros de operación de 800 rpm con 120 mm/min



### Anexos 6.6 F Simulación del punto de soldadura de 863 rpm



## Referencias

- Ainsworth, M., & Oden, J. T. (2011). A posteriori error estimation in finite element analysis (Vol. 37). John Wiley & Sons.
- Almanar, I. P. and Hussain Z. "Basic considerations for weldement formation in friction stir welding, 1 Friction Stir Welding TS228.9.A55 2011, 671.5'2—dc23
- Angulo, J. A. V. (2009). Análisis y diseño de piezas de máquinas con CATIA V5:[método de los elemento finito].
- Arora, A., De A. and DebRoy T., "Toward optimum friction stir welding tool shoulder diameter. "Scripta Materialia 64, 2011.
- Awang M, Mucino V H, Feng Z, David S A. Thermo-mechanical modeling of friction stir spot welding (FSSW) process: Use of an explicit adaptive meshing scheme [J]. SAE International, 2005, 45: 1577–1587.
- Badarinarayan H, Hunt F, Okamoto K. Friction stir welding and processing [M]. Novelty, OH: ASM International, 2007: 235–272.
- Ballesteros, M. N. S. (2009). Tecnología de proceso y transformación de materiales. Univ. Politèc. de Catalunya.
- Budinski, K. G. (2013). Friction, Wear, and Erosion Atlas. CRC Press.
- Buhl, N., Wagner, G., Eifler, D., Gutensohn, M., & Zillekens, F. (2013). Microstructural and Mechanical Investigations of Friction Stir Welded Ti/Ti-and Ti-Alloy/Ti-Alloy-Joints. *Friction Stir Welding and Processing VII*, 139-140.
- Calderón, G., & Gallo, R. (2010). Introducción al método de los elemento finito: un enfoque matemático. Ediciones IVIC, Venezuela.
- Campbell Jr, F. C. (2011). Manufacturing technology for aerospace structural materials. Elsevier.



- Campbell, F. C. (Ed.). (2012). Phase diagrams: understanding the basics. ASM International.
- Cellier, F. E., & Kofman, E. (2006). Continuous system simulation. Springer Science & Business Media.
- Colligan K., "Material Flow Behavior during Friction Stir Welding of Aluminum", Welding Journal Research Supplement, 1999, pp.229s-237s.
- Colligan, K. J., & Mishra, R. S. (2008). A conceptual model for the process variables related to heat generation in friction stir welding of aluminum. *Scripta Materialia*, 58(5), 327-331.
- Collings, E. W. (2013). *Applied Superconductivity, Metallurgy, and Physics of Titanium Alloys: Fundamentals Alloy Superconductors: Their Metallurgical, Physical, and Magnetic-Mixed-State Properties*. Springer Science & Business Media.
- Cox, C. D., Gibson, B. T., DeLapp, D. R., Strauss, A. M., & Cook, G. E. (2014). A method for double-sided friction stir spot welding. *Journal of Manufacturing Processes*, 16(2), 241-247.
- D.-A. Wang and S.-C. Lee, "Microstructures and failure mechanisms of friction stir spot welds of aluminum 6061-T6 sheets," *Journal of Materials Processing Technology*, vol.186,no.1–3,pp. 291–297, 2007.
- Da Fonseca Lopes Zeferino, El metodo de los elemento finito: una introducción, 2011 Fondo Editorial Biblioteca Universidad Rafael Urdaneta, ISBN: 978-980-7131-12-4
- Dhatt, G., Lefrançois, E., & Touzot, G. (2012). *Finite element method*. John Wiley & Sons.
- Dickerson T., Q-Y. Shi, H.R. Shercliff, "Heat Flow into Friction Stir Welding Tools", 4th International Symposium on Friction Stir Welding, Park City, Utah, 14-16 Mayo 2003.
- Elangovan, K., & Balasubramanian, V. (2008). Influences of tool pin profile and tool shoulder diameter on the formation of friction stir processing zone in AA6061 aluminium alloy. *Materials & design*, 29(2), 362-373.
- Elmer JW, Palmer TA, Babu SS, Zhang W. Phase transformation dynamics during welding of Ti-6Al-4V. *Journal of Applied Physics*. 2004;95(12):8327-8339. <http://dx.doi.org/10.1063/1.1737476>

- Feng, Z., Santella, M. L., David, S. A., Steel, R. J., Packer, S. M., Pan, T., & Bhatnagar, R. S. (2005). Friction stir spot welding of advanced high-strength steels—a feasibility study. SAE technical paper, (2005-01), 1248.
- Fereiduni, E.; Movahedi, M.; Kokabi, A. H. Aluminum/steel joints made by an alternative friction stir spot welding process. *Journal of Materials Processing Technology*, 2015, vol. 224, p. 1-10.
- Flores, P., Ambrósio, J., Claro, J. P., & Lankarani, H. M. (2008). Kinematics and dynamics of multibody systems with imperfect joints: models and case studies (Vol. 34). Springer Science & Business Media.
- Glaeser, W. A. (2010). Characterization of tribological materials. Momentum Press.
- Groover, M. P. (1997). Fundamentos de manufactura moderna: materiales, procesos y sistemas. Pearson Educación.
- H. Schmidt and J. Hanttel, "A local model for the thermomechanical conditions in friction stir welding", *Model.Simul.Mater.Sci.Eng.* 13:1, 77, 93, 2005.
- Hancock R. Friction welding of aluminum cuts energy cost by 99% [J]. *Welding Journal*, 2004, 83: 40–45
- He, X. C. (2013). Thermo-mechanical modelling of friction stir welding process. In *Advanced Materials Research* (Vol. 774, pp. 1155-1159). Trans Tech Publications.
- Hernández Muñoz Guadalupe Maribel, (2013). Tesis Diseño y Simulación de una Línea de formado en frío de lámina de acero. Ed. Universidad Autónoma de Nuevo León.
- Inglessis, P., & Cerrolaza, M. (2003). Una introducción al método de los elementos de contorno en ingeniería y ciencias aplicadas. Universidad Central de Venezuela.
- Iwashita T. Method and apparatus for joining: US6601751B2 [P]. 2003–08–05.
- John, R., K. V. Jata, and K. Sadananda. "Residual stress effects on near-threshold fatigue crack growth in friction stir welds in aerospace alloys." *International Journal of fatigue* 25.9 (2003): 939-948. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2003.08.002>

- Johnson, C. (2012). *Numerical solution of partial differential equations by the finite element method*. Courier Corporation.
- Johnson, G. R., & Cook, W. H. (1983, April). A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures. In *Proceedings of the 7th International Symposium on Ballistics* (Vol. 21, pp. 541-547).
- K.J. Colligan, R.S. Mishra, A conceptual model for the process variables related to heat generation in friction stir welding of aluminum. *Scripta Mater.* 58, 327–331 (2008).
- Khandkar, M. Z. H., Khan, J. A., & Reynolds, A. P. (2003). Prediction of temperature distribution and thermal history during friction stir welding: input torque based model. *Science and Technology of Welding & Joining*, 8(3), 165-174.
- Knipling KE, Fonda RW. Texture development in the stir zone of near- $\alpha$  titanium friction stir welds. *Scripta Materialia*.2009;60(12):1097-1100.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.scriptamat.2009.02.050>.
- Kossowsky, R., & Wei, W. (1989). Friction and wear. *Surface Modification Engineering*, 1, 145-185.
- Lathabai S, Painter M J, Cantin G M D, Tyagi V K. Friction spot joining of an extruded Al–Mg–Si alloy [J]. *Scripta Materialia*, 2006, 55: 899–902.
- Law, A. M., & Kelton, W. D. (1991). *Simulation modeling and analysis*, McGraw-Hill. New York.
- Lee, W. S., & Lin, C. F., High-temperature deformation behaviour of Ti6Al4V alloy evaluated by high strain-rate compression tests. *Journal of Materials Processing Technology*, 75(1), 127-136 (1998).
- Leyens, C., & Peters, M. (2003). *Titanium and titanium alloys* (p. 8). Wiley-VCH, Weinheim.
- Lienert, T. J., Stellwag Jr, W. L., & Lehman, L. R. (2002). Comparison of heat inputs: friction stir welding vs. arc welding. Columbus, OH, Edison Welding Institute.
- Liu HJ, Zhou L, Liu QW. Microstructural characteristics and mechanical properties of friction stir welded joints of Ti–6Al–4V titanium alloy. *Materials & Design*.2010; 31(3):1650-1655.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2009.08.025>.

- Liu, Q., Steel, R., Peterson, J., Horman, S., Collier, M., Marshall, D. B., Mahoney, M. (2010, January). Advances in friction stir welding tooling materials development. In The Twentieth International Offshore and Polar Engineering Conference. International Society of Offshore and Polar Engineers.
- Lohwasser, D., & Chen, Z. (Eds.). (2009). Friction stir welding: From basics to applications. Elsevier.
- London B., Mahoney M., Bringel W.H., Calabrese M., Waldron D., in: Proceedings of the Third International Symposium on Friction Stir Welding, Kobe, Japan, 27-28 September 2001.
- Lorrain, O., Serri, J., Favier, V., Zahrouni, H., & El Hadrouz, M. (2009). A contribution to a critical review of friction stir welding numerical simulation. *Journal of mechanics of materials and structures*, 4(2), 351-369.
- Lütjering, G., & Williams, J. C. (2003). *Titanium* (Vol. 2). Berlin: Springer.
- Lütjering, G., & Williams, J. C. (2007). *Engineering materials and processes: titanium*.
- Lütjering, G., Williams, J. C., & Gysler, A. (2000). Microstructure and mechanical properties of titanium alloys. *Microstructure and Properties of Materials*, 2, 1-74.
- Lütjering, Gerd; Williams, James Case. *Titanium*. Berlin: Springer, 2003.
- Madenci, E., & Guven, I. (2015). *The finite element method and applications in engineering using ANSYS®*. Springer.
- Malafaia A M S, Milan M T, Oliveira M F, Spinelli D. Fatigue behavior of friction stir spot welding and riveted joints in an Al alloy [J]. *Procedia Engineering*, 2010, 2(1): 1815–1821.
- Mandal S, Williamson K (2006) *J Mater Process Technol* 174:190. doi:10.1016/j.jmatprotec.2005.12.012
- Martínez Mercado, J. J. (2011). Análisis termomecánico mediante elemento finito de procesos de corte ortogonal de Inconel 718.
- Mendez, P. F., & Eagar, T. W. (2001). Welding processes for aeronautics. *Advanced materials and processes*, 159(5), 39-43.

- Millán, Z., Torre, L. D. L., Oliva, L., & Berenguer, M. D. C. (2011). Simulación numérica: ecuación de difusión.
- Mishra, R. S., & Ma, Z. Y. (2005). Friction stir welding and processing. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 50(1), 1-78.
- Mishra, R. S., De, P. S., & Kumar, N. (2014). Friction stir processing. In *Friction Stir Welding and Processing* (pp. 259-296). Springer International Publishing.
- Mishra, R. S., De, P. S., & Kumar, N. (2014). *Friction Stir Welding and Processing: Science and Engineering*. Springer.
- Mishra, R. S., De, P. S., & Kumar, N. (2014). *Fundamentals of the Friction Stir Process* (pp. 13-58). Springer International Publishing.
- Mouritz, A. P. (2012). *Introduction to aerospace materials*. Elsevier.
- Nanda R, DebRoy T and Balasubramanian V, "Recent advances in friction-stir-welding-process", *Weldment structure and properties*, 2008.
- Nieh TG, Wadsworth J. Hall-Petch relation in nanocrystalline solids. *Scripta Metallurgica et Materialia*. 1991;25(4):955-958. [http://dx.doi.org/10.1016/0956-716X\(91\)90256-Z](http://dx.doi.org/10.1016/0956-716X(91)90256-Z).
- Norrish, J. (2006). *Advanced welding processes*. Elsevier.
- O. Frigaard, Ø. Grong, and O. T. Midling. *A process model for friction stir welding of age*, 2005.
- Olivier Lorrain, Jérôme Serri, Véronique Favier, Hamid Zahrouni and Mourad El Hadrouz "A Contribution To A Critical Review Of Friction Stir Welding Numerical Simulation, *Journal of Mechanics of Materials and Structures*, 2009
- P. Edwardsa & M. Ramulu, Effect of process conditions on superplastic forming behaviour in Ti-6Al-4V friction stir welds, *Science and Technology of Welding and Joining*, Volume 14, Issue 7, pages 669-680 (2009).
- Park, Nho-Kwang, Jong-Taek Yeom, and Young-Sang Na. "Characterization of deformation stability in hot forging of conventional Ti-6Al-4V using processing maps." *Journal of Materials Processing Technology* 130 (2002): 540-545.

- Pérez Medina Gladys Yerania, (2012). Tesis Soldabilidad y mecanismos de transformaciones de fase en unions de aceros avanzados de alta Resistencia Martensíticos y TRIP por los proceos de Láser y FSW. Ed. Universidad Autónoma de Nuevo León.
- Persson, B., & Tosatti, E. (Eds.). (2013). Physics of sliding friction (Vol. 311). Springer Science & Business Media.
- Popov, V. (2010). Contact mechanics and friction: physical principles and applications. Springer Science & Business Media.
- R. Nandan, T. DebRoy and H. K. D. H. Bhadeshia. 2008. Recent Advances in Friction Stir Welding – Process, Weldment, Structure and Properties. 52, Pensilvania, Estados Unidos : Progress in Materials Science.
- Rai, R., De, A., Bhadeshia, H. K. D. H., & DebRoy, T. (2011). Review: friction stir welding tools. Science and Technology of welding and Joining, 16(4), 325-342.
- Ramirez AJ, Juhas MC. Microstructural evolution in Ti-6Al-4V friction stir welds. En Materials ScienceForum. 2003; 426-432:2999-3004.  
<http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.426-432.2999>.
- Rao, H. M., Rodriguez, R. I., Jordon, J. B., Barkey, M. E., Guo, Y. B., Badarinarayan, H., & Yuan, W. (2014). Friction stir spot welding of rare-earth containing ZEK100 magnesium alloy sheets. Materials & Design, 56, 750-754.
- Rao, S. S. (2010). The finite element method in engineering. Elsevier.
- Roland, W. L., Nithiarasu, P. E. R. U. M. A. L., & Seetharamu, K. N. (2004). Fundamentals of the finite element method for heat and fluid flow.
- Russell, MJ and Shercliff, HR *Analytical modelling of microstructure development in friction stir welding*. In: 1st Int. Symp. On Friction Stir Welding, -6-1999 to --, Thousand Oaks, California. (Unpublished).
- Salem AA, Semiatin SL. Anisotropy of the hot plastic deformation of Ti–6Al–4V single-colony samples. Materials Science and Engineering A. 2009;508(1):114-120.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2008.12.035>.

- Sánchez, L. M. (2008). Medicina Aeroespacial y factores humanos en aviación. La importancia de una aproximación transdisciplinaria a la salud. *Revista Med*, 16(2), 249-260.
- Schmid, S. R. (2002). *Manufactura, ingeniería y tecnología*. Pearson Educación.
- Seidel, TU; Reynolds, AP (2001). "Visualization of the Material Flow in AA2195 Friction-Stir Welds Using a Marker Insert Technique". *Metallurgical and Material Transactions* 32A (11): 2879–2884.
- Straffelini G. *Friction and Wear-Methodologies for Design and Control*, 86–89 (Springer, 2015).
- Straffelini, G. (2015). *Friction and Wear*.
- Sukumar, N., Moës, N., Moran, B., & Belytschko, T. (2000). Extended finite element method for three- dimensional crack modelling. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 48(11), 1549-1570.
- Suryanarayana C. Nanocrystalline materials. *International Materials Reviews*. 1995;40(2):41-64. <http://dx.doi.org/10.1179/imr.1995.40.2.41>.
- Swab, J. J., Vargas-Gonzalez, L., Wilson, E., & Warner, E. (2015). Properties and Performance of Polycrystalline Cubic Boron Nitride. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 12(S3).
- Toro, J. R. (2007). *Problemas Variacionales y Elemento finito en Ingenieria Mecánica*. Ediciones Uniandes, Bogota.
- Tutum, C. C., Schmidt, H. N. B., Hattel, J. H., & Bendsøe, M. P. 21-25 May 2007, 7th World Congress on Structural and Multidisciplinary Optimization, COEX Seoul, Korea.
- Uematsu Y, Tokaji K , Tozaki Y, Kurita T, Murata S. Effect of re-filling probe hole on tensile failure and fatigue behavior of friction stir spot welded joints in Al–Mg–Si alloy [J]. *International Journal of Fatigue*, 2008, 30: 1956–1966.
- Wilson, J. D. B. (2007). Anthony. *Física*.
- Yang, X. W.; FU, T.; LI, W. Y. Friction stir spot welding: a review on joint macro-and microstructure, property, and process modelling. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2014, vol. 2014.

- Yilbas, B. S., & Sahin, A. Z. (2014). Friction Welding: Thermal and Metallurgical Characteristics. Springer Science+ Business Media.
- Yilbas, B. S., Sahin, A. Z., Coban, A., & Aleem, B. A. (1995). Investigation into the properties of friction-welded aluminium bars. *Journal of materials processing technology*, 54(1), 76-81.
- Yoon, S., Ueji, R., & Fujii, H. (2015). Effect of rotation rate on microstructure and texture evolution during friction stir welding of Ti-6Al-4V plates. *Materials Characterization*, 106, 352-358.
- Yunlian, Qi, et al. "Electron beam welding, laser beam welding and gas tungsten arc welding of titanium sheet." *Materials Science and Engineering: A280.1* (2000): 177-181. [http://dx.doi.org/10.1016/S0921-5093\(99\)00662-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0921-5093(99)00662-0)
- Zettler, R., Lomolino, S., Dos Santos, J. F., Donath, T., Beckmann, F., Lippman, T., & Lohwasser, D. (2004, September). A study on material flow in FSW of AA 2024-T351 and AA 6056-T4 alloys. In 5th International FSW Symposium-Metz, France (pp. 14-16).
- Zhang Wei, Ma Wenlai, Ma Zhitao et al. Numerical simulation of craters produced by projectile hyper velocity impact on aluminum targets [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2006, 20(1): 1-5 (in Chinese).
- Zhang Y, Sato YS, Kokawa H, Park SHC, Hirano S. Microstructural characteristics and mechanical properties of Ti-6Al-4V friction stir welds. *Materials Science and Engineering: A*. 2008;485:448-455.
- Zhu, J. Z., Taylor, Z. R. L., & Zienkiewicz, O. C. (2013). *The finite element method: its basis and fundamentals*. Elsevier.
- Zienkiewicz, O. C., & Cheung, Y. (1967). *Finite Element Methods in Structural and Continuum Mechanics* McGraw-Hill Book Company. Inc., New York.
- Zienkiewicz, O. C., & Taylor, R. L. (2005). *The finite element method for solid and structural mechanics*. Butterworth-heinemann.