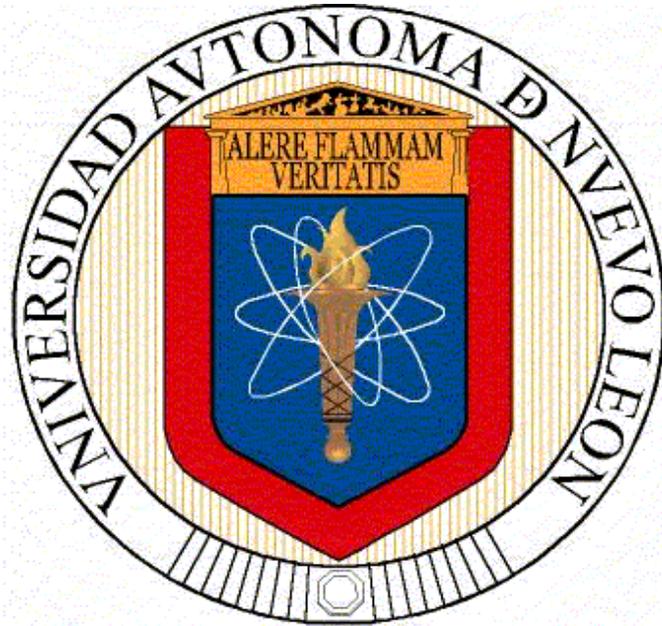


**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA**



**TESIS**

**COMPORTAMIENTO TERMOMECAÁNICO DE UNA FUNDA PARA  
EJE MOTRIZ DURANTE EL PROCESO DE SOLDADURA POR  
FRICCIÓN ROTATIVA DIRECTA**

**POR**

**PEDRO DANIEL CÁRDENAS CÁRDENAS**

**COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRÍA EN  
CIENCIAS DE LA INGENIERÍA AUTOMOTRIZ**

**DICIEMBRE, 2015**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA  
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**



**TESIS**

**COMPORTAMIENTO TERMOMECÁNICO DE UNA FUNDA PARA  
EJE MOTRIZ DURANTE EL PROCESO DE SOLDADURA POR  
FRICCIÓN ROTATIVA DIRECTA**

**POR**

**PEDRO DANIEL CÁRDENAS CÁRDENAS**

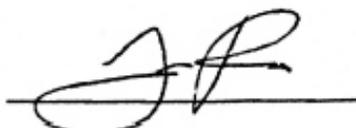
**COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRÍA EN  
CIENCIAS DE LA INGENIERÍA AUTOMOTRIZ**

**DICIEMBRE, 2015**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA**

**SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSTGRADO**

Los miembros del comité de tesis recomendamos que la tesis **“COMPORTAMIENTO TERMOMECAÁNICO DE UNA FUNDA PARA EJE MOTRIZ DURANTE EL PROCESO DE SOLDADURA POR FRICCIÓN ROTATIVA DIRECTA”** realizada por el alumno PEDRO DANIEL CÁRDENAS CÁRDENAS, matrícula 1377622, sea aceptada para su defensa como opción al grado de Maestro en Ciencias de la Ingeniería Automotriz.



Dr. Luis Arturo Reyes Osorio

Asesor



Dra. Adriana Salas Zamarripa

Co-asesor



Dr. Jesús Manuel Orona Hinojosa

Asesor externo

El comité de tesis

Vo. Bo.



Dr. Simón Martínez Martínez

Subdirector de estudios de posgrado

Ciudad Universitaria, San Nicolás de los Garza, Nuevo León, Junio del 2015

## **DEDICADA A:**

DIOS Y A MIS PADRES QUIENES SIEMPRE ME HAN APOYADO, ME HAN DADO SU CARIÑO Y HAN CREIDO EN MÍ INCONDICIONALMENTE.

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco primeramente a Dios, por estar a mi lado en cada paso de mi vida.

A la Universidad Autónoma de Nuevo León por el apoyo brindado en mis estudios de postgrado a si mismo agradezco a la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica.

Al CONACYT por el apoyo económico otorgado para realizar este proyecto.

A la empresa Sistemas Automotrices de México, S. A. de C. V. por permitirme trabajar en conjunto y por el material proporcionado para esta investigación, de igual manera al Dr. Jesús Manuel Orona Hinojosa y a todas las personas involucradas para hacer posible este proyecto.

A mis asesores la Dra. Adriana Salas Zamarripa quien siempre me ha orientado, especialmente al Dr. Luis Arturo Reyes Osorio, en quien he encontrado una gran amistad el cual siempre me ha apoyado y orientado a lo largo de esta investigación y agradezco a todos mis compañeros del postgrado a quienes les he aprendido mucho y he compartido una excelente amistad.

A toda mi familia especialmente por todo el cariño, comprensión y apoyo que me han dado de una manera incondicional y sincera.

A mi novia porque siempre estuvo a mi lado apoyándome incondicionalmente y por demostrarme su cariño día a día.

A mis mejores amigos que siempre han creído en mí y que fueron un gran apoyo en los momentos difíciles.

# TABLA DE CONTENIDO

	pág
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSTGRADO .....	i
DEDICADA A: .....	i
AGRADECIMIENTO .....	ii
TABLA DE CONTENIDO .....	iii
RESUMEN .....	v
CAPÍTULO 1 .....	1
INTRODUCCIÓN .....	1
1.1 Antecedentes .....	1
1.2 Objetivo General .....	3
1.2.1 Objetivo Específico .....	3
1.3 Hipótesis .....	3
CAPÍTULO 2 .....	5
PROCESOS DE UNIÓN EN ESTADO SÓLIDO .....	5
2.1 Soldadura por Fricción .....	7
2.1.1 Soldadura por Fricción Lineal .....	11
2.1.2 Soldadura por Fricción Rotativa .....	14
2.1.3 Soldadura por Fricción Orbital .....	20
CAPÍTULO 3 .....	22
Diseño de Herramientales .....	22
3.1 Herramientales para Soldadura por Fricción Rotativa .....	25
3.2 Simulación numérica en procesos de formado .....	27
Capítulo 4 .....	30
Metodología .....	30

4.1	Diseño geométrico de componentes en el proceso DRFW .....	31
4.2	Análisis del proceso DRFW .....	32
4.3	Análisis CAE del proceso DRFW .....	37
4.3.1	Fórmulas del paquete comercial CAE .....	37
4.4	Diseño de Experimentos .....	40
CAPÍTULO 5 .....		46
RESULTADOS y discusión .....		46
5.1	Análisis numérico 2D de la zona unión funda-husillo .....	46
5.1.1	Flujo de material durante el proceso de fricción rotativa .....	47
5.2	Resultados experimentales de desplazamiento durante el proceso de unión funda-husillo .....	54
5.3	Validación del DOE con Análisis numérico 3D durante el proceso de unión funda-husillo .....	57
CAPÍTULO 6 .....		75
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....		75
REFERENCIAS .....		78
LISTA DE TABLAS .....		87
LISTA DE FIGURAS .....		89

## RESUMEN

La industria automotriz requiere una alta calidad en la fabricación de sus productos, tales como las fundas para diferencial, por lo que es de suma importancia tener un control sobre el comportamiento mecánico de estos productos. Los procesos de unión en estado sólido, son conocidos como procesos de unión permanente, o procesos de soldadura. Estos procesos son utilizados debido a su diversa aplicación en distintos tipos de industrias así como también en la unión permanente de materiales ferrosos y no ferrosos.

La razón esencial que impulsa esta investigación es el impacto que presentan ciertas anomalías mecánicas en piezas del giro automotriz, afectando no solo la producción de estas, sino también sus costos finales. Motivo por el que se buscó desarrollar una metodología que permitió el análisis numérico de las deformaciones y deflexiones presentes así como esfuerzos y cargas en el proceso de soldadura por fricción rotativa que se encuentra en la línea 2 de la planta de SISAMEX, S.A. de C.V.

En este estudio se logró desarrollar un modelo computacional para estudiar el conjunto de elementos durante el proceso de soldadura por fricción rotativa directa. La geometría de la funda-husillo influyó considerablemente en el comportamiento mecánico durante el proceso de unión. De acuerdo a los resultados experimentales y el análisis numérico se observó que los desplazamientos mayores se generan durante la fase 2, siendo en la fase 3 mínimos o nulos. Se logró replicar con éxito el proceso de soldadura por fricción rotativa mediante un análisis numérico 2D mediante un paquete comercial CAE, así mismo se realizó la simulación del proceso en condiciones ideales y modificadas mediante un análisis 3D y se validó a través de pruebas experimentales en planta

# CAPÍTULO 1

## INTRODUCCIÓN

### 1.1 Antecedentes

El desarrollo tecnológico en la industria actual demanda, cada vez más, la puesta en marcha de nuevas tecnologías, a fin de crear en la sociedad una mejor calidad de vida. Para ello las distintas empresas realizan numerosas investigaciones, con el fin de mejorar e innovar sus procesos de producción y así obtener productos de mejor calidad y de coste más económicos.

La industria automotriz requiere una alta calidad en la fabricación de sus productos, tales como las fundas para diferencial, por lo que es de suma importancia tener un control sobre el comportamiento mecánico de estos productos.

La elaboración de fundas mediante forja, maquinado, soldadura, etc., dentro de la industria automotriz, últimamente ha requerido atención especial ya que muchas pérdidas económicas se deben al desperdicio de la materia prima durante el procesamiento del producto. Por ello la investigación actual se enfoca en el proceso de soldadura por fricción rotacional, ya que no se conoce el efecto mecánico que tiene esta operación sobre el producto ni su herramental, buscando así, el aminorar dicho problema [1].

Las fundas para diferencial o eje motriz trasero, conocidas también como “carcasa” o “carter”, son las que contienen alineado todo el mecanismo de tracción y están compuestas por una parte central donde se ubican el piñón, la corona y un conjunto de engranajes denominados “satélites planetarios”. En la funda, se unen dos husillos a sus extremos; a su vez permiten la correcta lubricación de los elementos ya que tienen la capacidad para alojar y retener el aceite necesario [2].

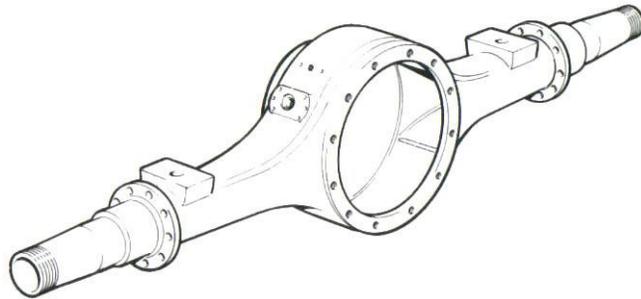


Figura 1. Visualización de funda [2].

Existen distintas investigaciones enfocadas en procesos, donde por medio de técnicas de elemento finito (FEM, por sus siglas en inglés, FiniteElementMethods), predicen el comportamiento mecánico de un producto bajo las condiciones de dicho proceso.

Las técnicas FEM, de acuerdo a los autores en su libro “*Introduction to FiniteElement in Engineering*”, se ha vuelto una herramienta de soluciones numéricas, muy utilizada y útil en las industrias de construcción, aeronáutica, pero sobre todo en la automotriz, donde se busca dar solución a un gran número de problemas ingenieriles o bien para la generación de nuevos productos, que con ayuda del gran desarrollo tecnológico y en los sistemas CAD por sus siglas en inglés, es posible tanto modelar como resolverlos de una manera relativamente sencilla.

Sin olvidar que es posible crear un gran número de configuraciones alternas para probar en la computadora, antes de comenzar con la fase de generación de prototipos, reduciendo así costos y tiempos [3].

La presente investigación está enfocada en determinar y predecir el comportamiento mecánico presente en las fundas traseras para un eje motriz durante la operación de soldadura por fricción rotacional, con el fin de entender qué está sucediendo en dicho proceso y poder dar pie a su optimización según sea el caso.

## **1.2 Objetivo General**

Desarrollar una metodología que permita el análisis numérico de las deformaciones y deflexiones presentes en los componentes mecánicos, así como la validación de los utillajes de accionamiento hidráulico – mecánico sometido a los distintos esfuerzos y cargas en el proceso de soldadura por fricción rotacional continua.

### **1.2.1 Objetivo Específico**

- I. Análisis, predicción y validación de las diferentes deformaciones y desplazamientos presentados en la funda para eje motriz, en los procesos de soldado por fricción de los husillos.
- II. Investigar la respuesta mecánica en el ensamblaje de las piezas.

## **1.3 Hipótesis**

De acuerdo a los estándares de calidad de la empresa SISAMEX, se observan deformaciones y desplazamientos ocurrentes en sus productos. Los espacios

entre los componentes del herramental (sistema de sujeción) y la pieza, así como el área de contacto donde se ejerce la fuerza para la unión podrían ser los causantes de dichas fallas provocando pérdidas de producto dentro de su proceso de producción.

Por lo tanto se propone una metodología en la que se utilice la modelación FEM de pieza – herramental, como ayuda para entender el comportamiento de los componentes, y así proponer la corrección de los mismos.

## **CAPÍTULO 2**

### **PROCESOS DE UNIÓN EN ESTADO SÓLIDO**

Los procesos de unión en estado sólido, son conocidos como procesos de unión permanente, o procesos de soldadura. Estos procesos son utilizados debido a la gran variedad que se tiene y su diversa aplicación en distintos tipos de industrias así como también en la unión permanente de materiales no ferrosos [4].

Existen autores, como Julián Rodríguez y Lucas Castro que dan especial hincapié en que, soldar elementos es una buena opción, pero el no hacerlo es mejor, es decir, que la unión permanente debe ser la última opción cuando no hay alguna otra solución para una unión temporal de calidad [5].

En este tipo de uniones, para elementos metálicos, destaca la fuerza que se le da a la unión y la variedad de herramientas utilizadas para su correcto desempeño, pero todos los procesos de unión permanente comparten el mismo pilar base para su aplicación. Este tiene lugar en la fusión del metal, el calor del sistema de soldar crea un gradiente elevado de temperatura, donde parte del metal a soldar se funde y origina de esta manera el característico “cordón” de soldadura.

Los efectos de la soldadura debido a los ciclos de calentamiento y enfriamiento en el metal base, adyacente al cordón, dependerán de la naturaleza del metal soldado y de las condiciones de la operación.

Existen distintos tipos de procesos de soldadura, como se observa en la tabla 1, cada una tiene sus propias ventajas y desventajas según la aplicación que se le asigne.

Tabla 1. Procedimientos de soldadura comúnmente utilizados [6]

<i>Clase</i>	<i>Sub-clase</i>
<i>Autógena / A gas</i>	-
<i>Arco</i>	Eléctrico: TIG (del inglés tungsteninert gas), MIG (del inglés metal inert gas), MAG (del inglés metal active gas), Revestido, Sumergido) y Plasma.
<i>Resistencias</i>	A tope (Recalcado, Chispa), puntos, protuberancia, roldanas y con costura.
<i>Soldadura dura</i>	Inmersión (baño metálico y baño salino), infrarrojo, soplete, eléctrica (Resistencia e inducción), difusión, bloque, homogénea y por derrame.
<i>Soldadura blanda / Recargue / HIP</i>	Por soplete, en horno, por inmersión, por infrarrojos, por ultrasonido, con pasta, con olas, etc.
<i>Fricción</i>	Lineal, orbital, rotacional (directa, por inercia e híbrida), lineal-rotacional, agitación.

Las técnicas de soldadura modernas se emplean en la construcción de una gran cantidad de productos, que van desde aparatos recreativos y puentes, hasta barcos, aviones y automóviles [6-8].

Esta investigación se ha enfocado a un proceso de soldadura en específico, debido al gran auge que la soldadura por fricción ha tenido dentro de la industria automotriz, aunque siendo un proceso complejo sigue habiendo distintas dudas del comportamiento mecánico de las piezas involucradas que se encuentran bajo las condiciones de implementación y sus posibles efectos en las mismas.

## 2.1 Soldadura por Fricción

La soldadura por fricción como tal, es un proceso de unión en estado sólido de reciente aplicación, pues su tecnología fue patentada en el año 1991. Es un proceso por el cual es posible la unión de materiales similares y disimiles por lo cual ha tenido una gran importancia y auge en la industria aeroespacial, automotriz, agrícola, marina, militar por mencionar algunas, debido a la gran resistencia a la fatiga y fractura de la unión obtenida.

A pesar de no ser una tecnología tan conocida debido al equipo complejo que utiliza y a la difusión que se tiene en el mercado sobre la misma. Aun así, es un método de gran importancia en la industria y de una sobresaliente mejora en el balance que existe de costo-beneficio.

Como se mencionó el enfoque de esta investigación es la aplicación de la soldadura por fricción en el sector automotriz, donde se utiliza en uniones de piezas de aluminio y sus aleaciones, así como en otras aleaciones metálicas, reduciendo pesos y aumentando la resistencia de la unión [9-13].



Figura 2. Aplicación FW en la industria automotriz en general.

El proceso involucra, como su nombre hace mención, dos piezas que entran en contacto en frío, permitiendo la coalescencia de los materiales obtenida a través de los efectos combinados de la presión y movimiento entre las dos piezas.

Hay distintos estudios realizados que determinan que soldar materiales diferentes entre sí no afecta la calidad de la unión, al contrario, esta es beneficiada al agregársele propiedades de ambas partes [14].

En la figura 3 se observan piezas unidas por FW, variando material y geometría. La calidad del forjado producida por la soldadura por fricción, es una unión del 100% en el área de contacto como se puede observar en la figura 4.

Los principales fabricantes de equipo para esta tecnología en distintas de sus presentaciones más comunes, mencionan una serie de ventajas generales en la soldadura por fricción, a continuación se mencionan las principales y más importantes.

- 1) Materiales similares y disimiles pueden ser soldados conservando la fortaleza de la unión.
- 2) No requiere consumibles por lo que a largo plazo el costo invertido se recupera.
- 3) No es necesario un pre-maquinado para ingresar al método, es decir, superficies cortadas con sierra, sin maquinar, incluso superficies cizalladas. Ni se requiere un post maquinado en la mayoría de los casos.
- 4) Ya que no hay punto de fusión, no se presentan los defectos de solidificación, por ejemplo, porosidad, inclusiones, etc.
- 5) Es un proceso completamente automatizado, limitando el entrenamiento requerido de los operadores [15, 16].

Al decir que se obtienen uniones de mayor resistencia a la fatiga y fractura, implica que el proceso de soldadura por fricción es sumamente complejo, es decir, genera esfuerzos residuales debido a la presión ejercida, dureza por comportamiento mecánico de los materiales por las altas temperaturas alcanzadas, etc. En la tabla 2 se observan la combinación de los materiales posibles en la soldadura por fricción.





Figura 3. Aplicación de FW con materiales similares y disimiles [15, 16].

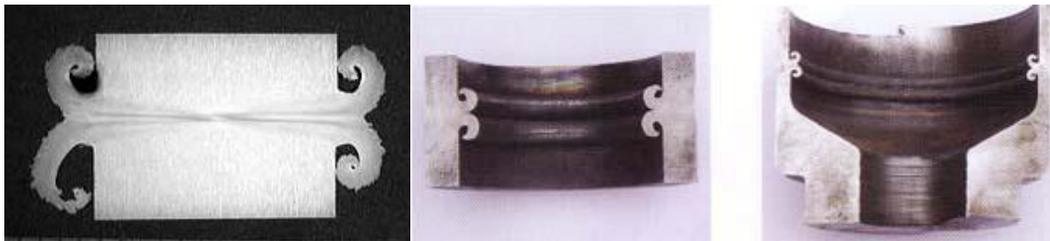


Figura 4. Sección de piezas soldadas por fricción [10].

Por lo que es de gran ayuda incorporar otra de las nuevas tecnologías computacionales que vienen a revolucionar la ingeniería en esta investigación, se habla del Elemento Finito, donde es posible replicar las condiciones casi exactas de un proceso y obtener el comportamiento termomecánico de las piezas implicadas en el mismo, reduciendo costos en el diseño de producto y en la mejora de procesos [17].

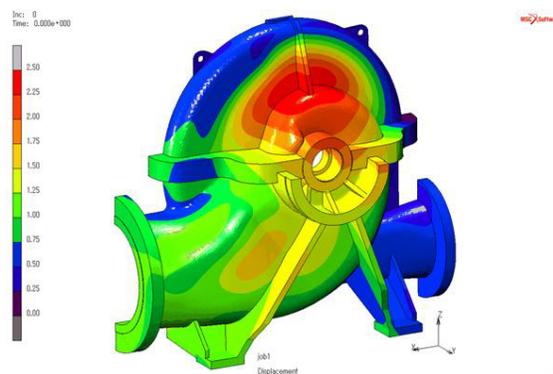


Figura 5. Aplicación FEM en la industria automotriz.

La soldadura por fricción se caracteriza por la combinación de movimiento y presión. El movimiento se puede variar y aplicar para determinadas circunstancias según las necesidades que exige el producto. Se caracteriza generalmente en 3 tipos de movimientos: Lineal, Rotacional y Orbital.

Más adelante, dentro de este capítulo, se hablará de estos tipos de soldadura por fricción y sus distintas características de proceso.

### 2.1.1 Soldadura por Fricción Lineal

La soldadura por fricción lineal o LFW por sus siglas en inglés, consiste en mantener un componente en movimiento lineal repetidamente a través de la superficie de contacto del segundo componente, siendo este último el que se mantiene sujeto rígidamente, como se muestra en la figura 6. Estos parámetros son utilizados hasta que sea calentado adecuadamente y el flujo del metal comience a ser visible, ahí es cuando el componente en movimiento retoma el eje deseado conforme a la pieza fija y se mantiene o incrementa la presión para finalizar la secuencia de soldado.

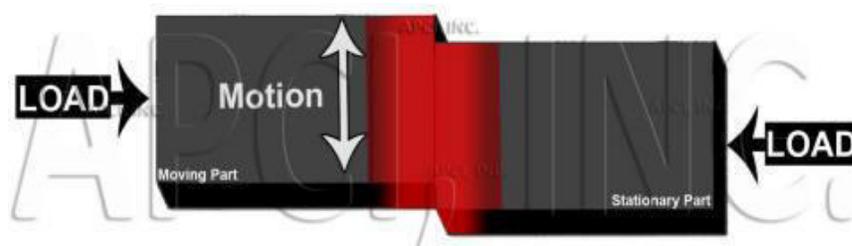


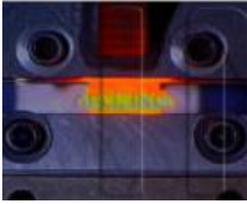
Figura 6. Visualización de soldadura por fricción lineal [19].

Estos parámetros son utilizados hasta que sea calentado adecuadamente y el flujo del metal comience a hacerse visible, ahí es cuando el componente en

movimiento retoma el eje deseado conforme a la pieza fija y se mantiene o incrementa la presión para finalizar la secuencia de soldado.

En la tabla 3 se describen las fases de proceso de acuerdo a la explicación anteriormente mencionada.

*Tabla 3. Fases de soldadura por fricción lineal (LFW) [19].*

	<p><b>Fase 1 – Pre calentamiento.</b></p> <p>En esta fase se aplica una pequeña presión pero suficiente para mantener ambas piezas en contacto constante con un movimiento lineal para originar el calor adecuado con ayuda del coeficiente de fricción</p>
	<p><b>Fase 2 – Depurar.</b></p> <p>Durante esta etapa se aumenta la presión ejercida y con ella el calor en el área de contacto, esto ayudará a depurar cualquier contaminación de los materiales.</p>
	<p><b>Fase 3 – Quemado.</b></p> <p>Se caracteriza por ser el momento en el que la Temperatura máxima es alcanzada sin llegar la fusión pero si al punto de plasticidad, así como la pieza móvil retoma la posición final deteniendo el movimiento de fricción.</p>
	<p><b>Fase 4 – Forja.</b></p> <p>Una vez alineadas las piezas de acuerdo a sus determinadas especificaciones, se mantiene o incrementa la presión ejercida, uniendo ambas piezas y generando lo que se conoce como “rizo”.</p>

Elrizo, no es nada más que el material excedente que cedió ante la presión de una pieza contra otra, en algunas ocasiones este materiales es retirado como

continuación de la fase de forja, evitando se solidifique y sea necesario el maquinado, pero esto es determinado por la complejidad de la pieza.



Figura 7. Visualización de rizo en pieza unida por LFW [19].

Al igual que cualquier proceso de soldadura por fricción, no se requiere ningún material adicional de aporte, ya que esta sucede en el estado sólido, así también no es visible el punto de fusión en el material.

La soldadura por fricción lineal es más adecuada para piezas rectangulares e irregulares, y usada en piezas complejas con varios números de soldadura y múltiples piezas a unir, por ejemplo, discos de freno, rin para llanta, engranajes, entre otros [18, 19].

Al ser un proceso aparentemente simple y no presentar grandes deformaciones en las piezas soldadas, se debe tener en cuenta el comportamiento del flujo mecánico de los distintos materiales utilizados. Para esto las técnicas FEM son muy útiles, pues han llegado a ser una herramienta para la ingeniería de producto reduciendo costos de fabricación y mejoras.

Como sugieren ciertas investigaciones, las ventajas y limitaciones del uso del FEM en este proceso son: la observación de la naturaleza del proceso de unión en estado sólido, el comportamiento mecánico de los materiales soldados cuya

estructura y propiedades se degrada conforme la temperatura aumenta, la determinación de la distorsión (la cuál es mínima en este proceso), bajos los niveles de estrés residual obtenido, la mejora de herramientas sin prototipo, entre muchas otras más[20].

### **2.1.2 Soldadura por Fricción Rotativa**

Según las empresas líderes en el mercado en el diseño y manufactura de soldadoras por fricción, *Thompson* y *ManufacturingTechnology*, se refieren a la Soldadura por Fricción Rotacional, o RFW (RotationalFrictionWelding), como un proceso de unión en estado sólido que produce coalescencia en metales elevando la temperatura entre las dos superficies inducida por medio de una combinación mecánica – movimiento giratorio de frotación y cargas aplicadas. Bajo condiciones idóneas, las superficies no deben fundirse [21, 22].

En la práctica, esta tecnología consiste en que un componente se mantiene estacionario mientras que un segundo componente rotando rápidamente entra en contacto con el primero. Utilizando una serie de cargas y giros por un determinado tiempo. El componente giratorio es inmediatamente detenido cuando se ha generado suficiente calor como para reducir la interferencia del metal a un estado plástico, pero, sin sobrepasarlo para evitar su fusión. Seguido de un incremento considerable de presión entre los componentes, esto ocasiona la integración de los mismos logrando así una fuerte unión de soldadura por fricción. En la figura 8 se puede observar la serie de pasos [23].

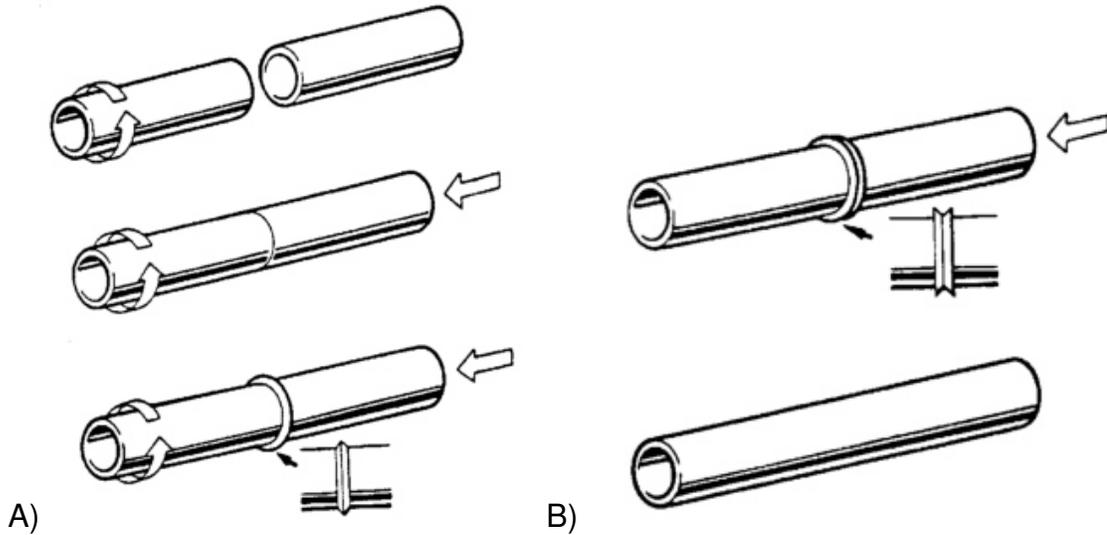


Figura 8. Visualización del proceso RFW (A, B).

*Paduan Alves, et al.*, determinan que la RFW se rige en una serie de parámetros base, adaptables según los materiales utilizados y sus especificaciones físicas y químicas [24]. Estas son la presión ( $P$ ) que ejerce un componente a otro, la velocidad angular ( $\omega$ ) con la que gira el componente durante el tiempo ( $t$ ) que dura aplicación dentro del proceso.

Y al igual que *Thompson*, indican la importancia de la generación y aumento gradualmente constante de la temperatura, pues, esta característica dada por el coeficiente de fricción que existe entre los materiales a soldar, no solo es útil para permitir que estos entren en un estado plástico y se logren fusionar entre sí, evitando así el punto de fusión y enfriamiento de los componentes lo que ocasionaría fallas debido a porosidades; sino que además sirve para depurar la zona de unión de imperfecciones encontradas en el material y de esta manera lograr una integración microestructural de mayor calidad.

Existen 3 variaciones de Soldadura por fricción rotacional dependiendo su aplicación, las cuales se describirán a continuación [21, 25, 26].

1) Unidad Directa (DRFW – DirectRotationalFrictionWelding)- La energía de soldadura es infinita pues se provee desde una unidad directa de motor. Este proceso de soldadura es aplicado a barras solidas arriba de 250 mm de diámetro. Para una mejor aplicación, el componente rotativo puede girar durante la etapa de forja.

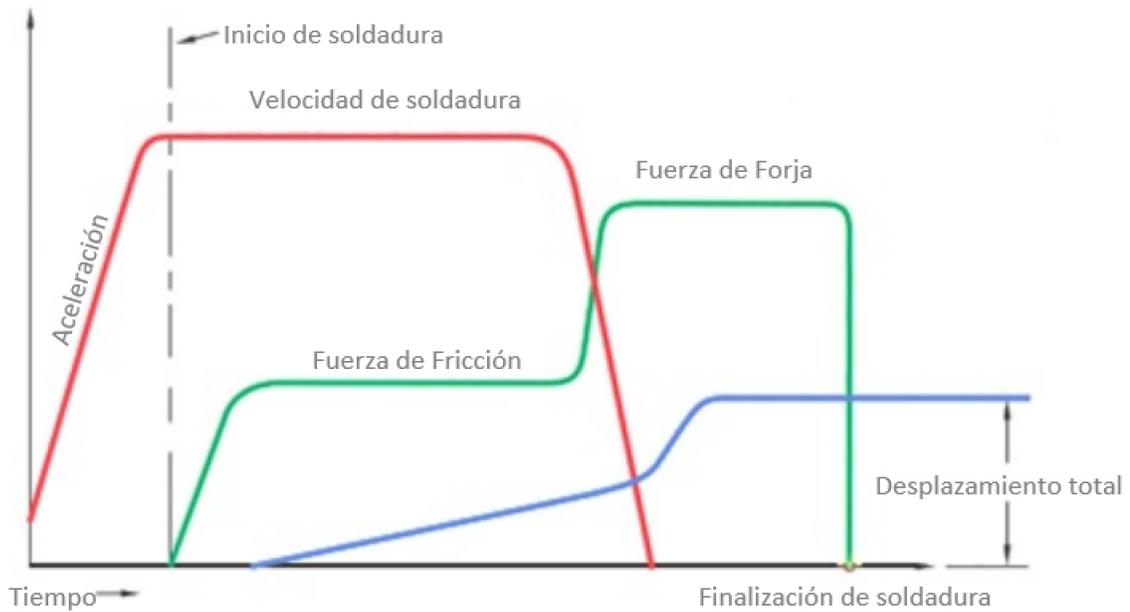


Figura 9. Comportamiento en tiempo (t) de la Unidad Directa.

2) Unidad por Inercia (IRFW – InertiaRotationalFrictionWelding) – En este caso la energía de soldadura es almacenada por el volante o mandril. La IRFW normalmente se reduce a utilizar solo dos parámetros, la velocidad angular y la presión. La presión de forja es la misma utilizada para ocasionar el frotamiento entre los componentes utilizados. Este proceso es mejor aplicado para secciones tubulares largas sin considerar la medida de ningún componente. El volante entremezcla más material caliente al final del ciclo de soldado que la unidad directa.

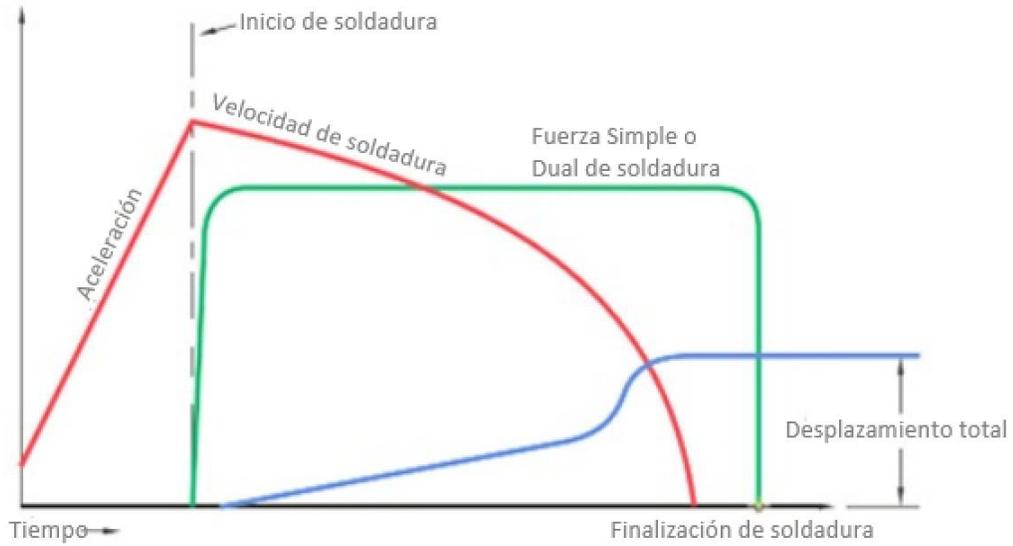


Figura 10. Comportamiento en tiempo (t) de la Unidad por Inercia.

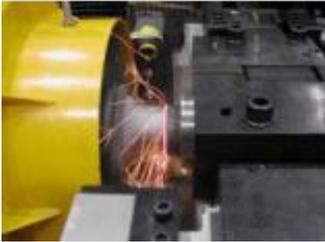
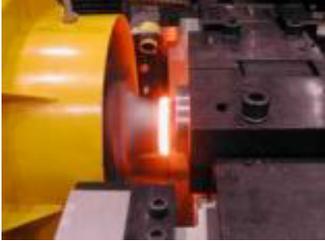
3) Unidad Híbrida (HRFW – HybridRotationalFrictionWelding) – Esta variación combina la Fuente infinita de energía de soldadura de la unidad directa con el volante de la efecto por inercia. Su aplicación es mejor cuando se utiliza en materiales pre-calentados los cuales necesitan menos tiempo de enfriamientos después de la soldadura, o son frágiles a temperatura ambiente. La HRFW también es utilizada para combinaciones de súperaleaciones.



Figura 11. Comportamiento en tiempo (t) de la Unidad Híbrida.

Con todo lo anterior mencionado, es posible determinar y fijar los pasos que rigen a la RFW independientemente su aplicación, separándola en periodos o “fases”, donde se cubre todo lo necesario para lograr una unión de calidad.

*Tabla 4. Fases generales para el proceso de RFW.*

	<p><b>Pre – Contacto</b></p> <p>La máquina reconoce y valida las distancias establecidas según las especificaciones de los componentes.</p>
	<p><b>Pre - Calentamiento</b></p> <p>El componente giratorio comienza a moverse y aplicar cargas para generar el primer contacto entre las piezas y preparar la superficie para el proceso.</p>
	<p><b>Depuración</b></p> <p>El giro se reduce y la presión aumenta, desde este punto se mantiene constante calentando gradualmente la temperatura de contacto depurando cualquier imperfección de la zona de los materiales involucrados.</p>
	<p><b>Quemado</b></p> <p>La presión y velocidad angular son mantenidas, la temperatura máxima es alcanzada, esto ocasiona que los materiales entren en estado plástico, dando pie a la forja.</p>
	<p><b>Forja</b></p> <p>Dependiendo la variación de la RFW ideal para las especificaciones que se tienen de los componentes, la presión se mantiene o aumenta considerablemente, a su vez la velocidad angular es detenida</p>

inmediatamente, se mantiene pero en reducción gradual por la presión o sigue con su giro constante. Aquí es donde las piezas se funden entre ellas, dando pie al enfriamiento.



#### Soldadura completa

Dependiendo las especificaciones de producto o proceso, se procede a remover el rizo formado de material excedente antes que este se solidifique por completo y su eliminación deba ser con un proceso alterno como lo es el maquinado.

La información obtenida para la tabla 4, fue gracias a vídeos del proceso de soldadura por fricción con distinta variación, remarcando las similitudes e identificándolas como fases imprescindibles para el proceso de RFW sin importar su variación [27, 28].

En el mercado de fabricantes de maquinaria para soldadura por fricción, la empresa Thompson se destaca por ser la única que diseñó y fabricó maquinaria que suelda dos piezas giratorias a la vez en los extremos de cada componente estático.

La aplicación que se le da a la RFW en la industria automotriz es tan extensa que va desde piezas para automóviles ligeros hasta vehículos pesados, como lo son ejes, cubiertas, flechas de dirección, componentes de suspensión, turbo cargadores, cabezales para válvulas, entre otros más[12, 16, 22].



Figura 12. Muestra de piezas soldadas por RFW.

### 2.1.3 Soldadura por Fricción Orbital

La soldadura por fricción orbital (OFW, Orbital FrictionWelding) es similar al método de soldadura rotativa por fricción, solo que en este caso ambas piezas se mantienen girando en la misma dirección y a la misma velocidad, pero con sus ejes desplazados arriba de 3 mm (figura 13). Al final de esta técnica de soldadura el movimiento relativo utilizado es finalizado devolviendo las piezas a su eje original, aumentando o manteniendo la presión para forjar las piezas entre sí [26, 29, 30].

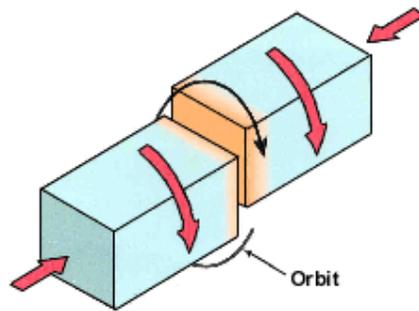


Figura 13. Visualización de proceso OFW.

Existen distintos autores que mencionan a la OFW no solo como un método similar a la rotacional o lineal, sino que esta reciente tecnología es de mayor eficiencia en su aplicación, pues requiere menor tiempo de calentamiento debido al comportamiento velocidad-presión por ciclo de las piezas durante el proceso. Pero al ser comparada con la rotacional, se observa que esta técnica está ligada al diámetro de la órbita en la cual giran los componentes y no al eje de los mismos [31, 32].

La temperatura alcanzada por la fricción durante el proceso es más uniforme que los demás métodos, debido a la órbita generada y sus parámetros utilizados, en la figura 14 se describe el proceso de OFW, mientras que en la figura 15 se observa la fase de fricción y forja en una relación de Fuerza-Tiempo [33].

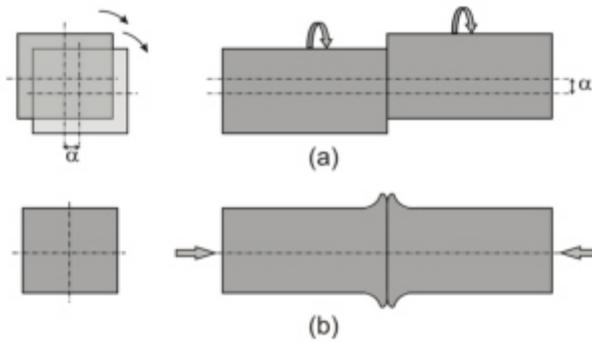


Figura 14. Proceso de soldadura por fricción orbital. (a) la fase de fricción con los ejes de rotación separados ( $\alpha$ ) para producir movimiento relativo y (b) la fase de forja con los ejes realineados.

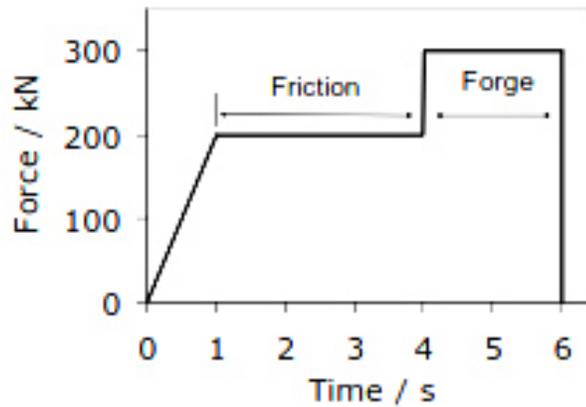


Figura 15. Fricción y forja del proceso soldadura por fricción orbital en una correlación de Fuerza (F) –Tiempo (t)

## CAPÍTULO 3

### DISEÑO DE HERRAMENTALES

El diseño de herramientas, como lo define Edward Hoffman en su libro, es el proceso de diseñar y desarrollar herramientas, métodos, y técnicas necesarias para mejorar la eficiencia de la manufactura y la productividad [34]. Considerando que una sola herramienta puede funcionar para cada proceso, el diseño de herramientas se define a su vez como un proceso que siempre cambia y crece para la resolución creativa de problemas en la industria. El objetivo principal de esta rama especializada de la manufactura es el incrementar la producción manteniendo la calidad y los bajos costos.

Existen distintas especificaciones para el diseño de cada tipo de herramienta, pero, los autores John G. Nee, et al., dicen que el proceso de diseño consiste en 5 pasos básicos[35]. La figura 16 indica los pasos a seguir durante el proceso de diseño.

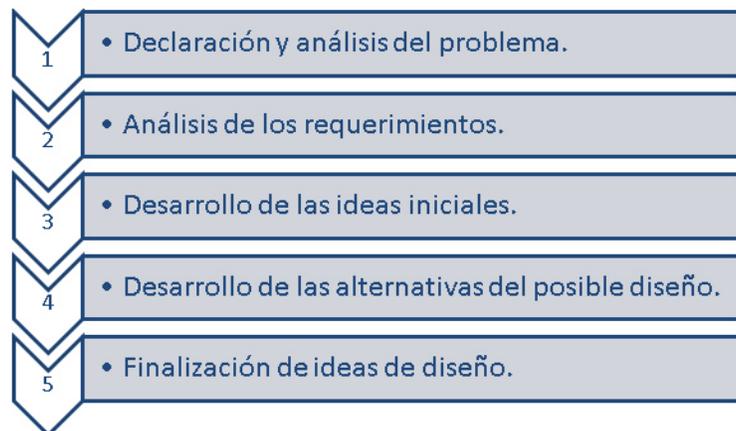


Figura 16. Paso a seguir para el diseño de un nuevo herramienta.

Sin olvidar que un diseñador de herramientas debe tener un fuerte respaldo en el diseño de ingeniería, dimensionamiento, documentación y análisis de partes dibujadas y las especificaciones para presentar técnica y propiamente la idea a quienes se suponen la fabricarán.

La importancia de la técnica de Dibujo Asistido por Computadora, CAD (ComputerAidedDrawing, por sus siglas en inglés), dentro de esta rama es crítica, debido a que la idea conceptual del diseñador es plasmada geoméricamente correcta gracias a un software especializado que permite su modificación en caso de ser necesaria sin la necesidad de gastar dinero en un prototipo nuevo. Esta técnica permite que un plano productivo sea más legible, pues, con ayuda de las reglas de dimensionamiento presenta un plano más limpio, claro y correcto que haciéndose a mano alzada [36].

Gracias al CAD es posible darle la importancia que se merecen las tolerancias geométricas al momento de diseñar un herramienta, pues estas tolerancias consideradas son críticas, ya que permiten el correcto funcionamiento de las piezas en cuestión a otras o en un determinado uso; comúnmente representada por “±”.

Si la tolerancia dada no es respetada, se corre el riesgo de que determinada pieza no cumpla su función, pues hasta la más pequeña dimensión por arriba o debajo de la cota idea, puede causar pérdidas en el costo de fabricación. [37]

Otra de las herramientas dentro del diseño de herramientas que se considera altamente útil y algo más reciente que el CAD, es lo que se conoce como CAE (ComputerAidedEngineering) o ingeniería asistida por computadora por sus siglas en inglés.

Gracias a la ayuda del paso “Análisis de requerimientos” obteniendo las propiedades físicas (densidad, color, conductividad térmica y eléctrica,

coeficiente de expansión térmica, punto de fusión) y las propiedades mecánicas (fuerza, fuerza máxima a la tensión, fuerza de compresión, fuerza de corte, límite elástico, dureza, tenacidad, plasticidad, módulo de Young) necesarias, se puede utilizar la herramienta CAE, pues esta consiste en tomar estas propiedades del material implementadas en geometrías virtuales bajo las condiciones del proceso en cuestión, resultando así en información valiosa sobre los límites del herramental, es decir, permite observar el comportamiento mecánico de piezas bajo condiciones específicas y validar si son aptas para el objetivo que se les dio o si requieren alguna mejora [38 - 40].

Esto permite mantener los costos de diseño bajos, ya que el prototipo no será fabricado hasta que los ingenieros hayan corroborado tanto el CAD como el CAE.

En el diseño de herramientas también se requiere establecer un sistema de calidad comprensible que cubra todos los estándares, procesos, y procedimientos utilizados para producir un producto o un servicio, garantizando así como resultados consistentes.

El uso de herramientas bien diseñados a lo largo de todo un proceso de fabricación, mantiene la calidad del producto final, y es por eso que la organización internacional para la estandarización (ISO, International Standards Organization) hace mención del uso de una pirámide de calidad (figura 17) para determinar un correcto sistema [41].

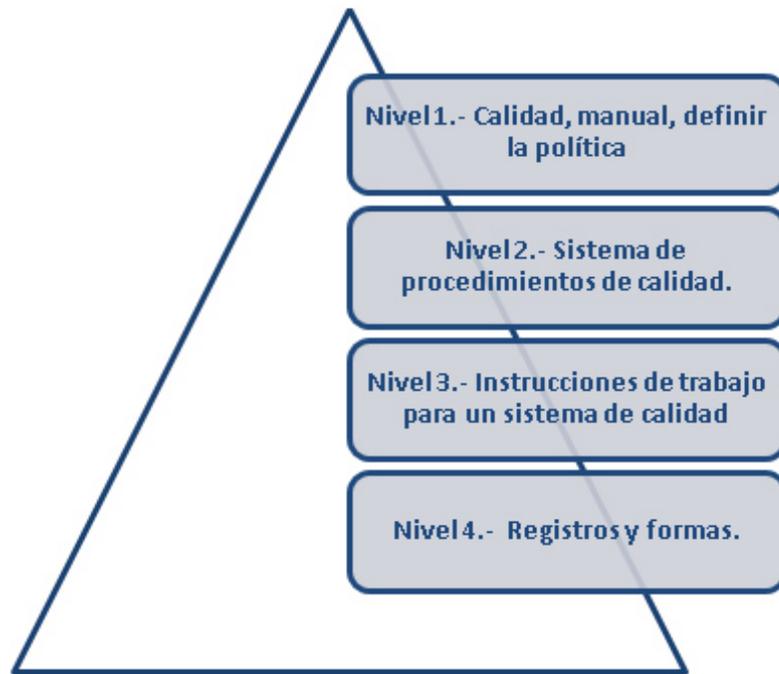


Figura 17. Pirámide de calidad según ISO [41]

### 3.1 Herramientales para Soldadura por Fricción Rotativa

Para llevar a cabo el proceso de soldadura por fricción rotativa, es necesario utilizar diversos herramientas; considerando las bases del proceso de RFW y la maquinaria construida por la empresa *Thompson FrictionWelding*[23], estos herramientas deben cumplir algunos requisitos:

1. Permitir que una pieza (por lo menos) rote a una determinada velocidad.
2. Mantener firmemente una pieza completamente estática.
3. Deben soportar temperaturas muy altas, ya que aunque estas no están en contacto directo durante el proceso se genera calor que puede afectar su desempeño.
4. Permitir su sencilla automatización.

Definidos estos requisitos es posible utilizar los diferentes tipos de herramientas descritas en la figura 18.



Figura 18. Herramiental comúnmente utilizado para el proceso RFW.

Un mandril, o chucks en inglés, es un porta piezas generalmente utilizado para sujetar el exterior-interior o al final de una pieza de trabajo, y por lo general está conectado a un husillo de la máquina-herramienta (figura 18<sup>a</sup>). Consta de un cuerpo con mandíbulas de sujeción de piezas insertadas que se deslizan radialmente en ranuras y son accionados por diversos mecanismos. El número de mordazas puede variar [42, 43].

Los elementos de sujeción, o clamps en inglés, sostienen la pieza de trabajo firmemente comprometidos con los elementos de colocación durante el funcionamiento (figura 18b). El sistema de sujeción debe ser lo suficientemente rígido como para resistir las fuerzas desarrolladas durante el funcionamiento. Al mismo tiempo, la fuerza de sujeción no debe marcar o dañar la pieza de trabajo. La velocidad de funcionamiento, la fatiga del operador y el posicionamiento estratégico son otras consideraciones importantes para idear un sistema de sujeción [44, 45].

Según se ha observado, estos herramientas con la fuerza correcta aplicada deben ser suficientes para la correcta sujeción y posicionamiento de las piezas durante las condiciones de la RFW, sin embargo, cumpliendo con los pasos básicos anteriormente mencionados, algunas piezas requieren de la eliminación

del rizo formado por el flujo mecánico excedente de las piezas al forjarse una contra la otra.

Los cortadores de rizo (figura 18c), son herramientas que ejercen un punto de corte sobre estos excedentes de material justo después de la unión de las piezas, aprovechando así la baja dureza que presentan debido al calentamiento máximo que alcanza el proceso y evita que la pieza deba maquinarse posteriormente [22, 23, 37].

### **3.2 Simulación numérica en procesos de formado**

La gran relevancia de los procesos de simulación se debe en parte a su eficiencia, comparada con otras técnicas de soporte en manufactura. Los altos costos en herramientas y equipos de formado son el sustento del intenso uso de procedimientos y métodos eficientes de simulación. Sin embargo, la variedad de elementos en el sistema de formado y la complejidad de las operaciones mecánicas hace difícil la valoración de la problemática [46].

El desarrollo histórico de los métodos y técnicas de simulación de formado se divide en dos periodos de acuerdo a la figura 19. En el periodo previo al uso computacional (anterior a la década de 1960) fueron desarrollados la mayoría de los procedimientos empíricos. Los métodos de simulación teórica se basaron principalmente en la teoría de plasticidad para el cálculo de fuerzas y estimación de esfuerzos. Thomas et al., presenta una descripción detallada de la teoría de plasticidad, los métodos de línea de deslizamiento y fronteras son tratados brevemente por el autor Messner [47, 48].

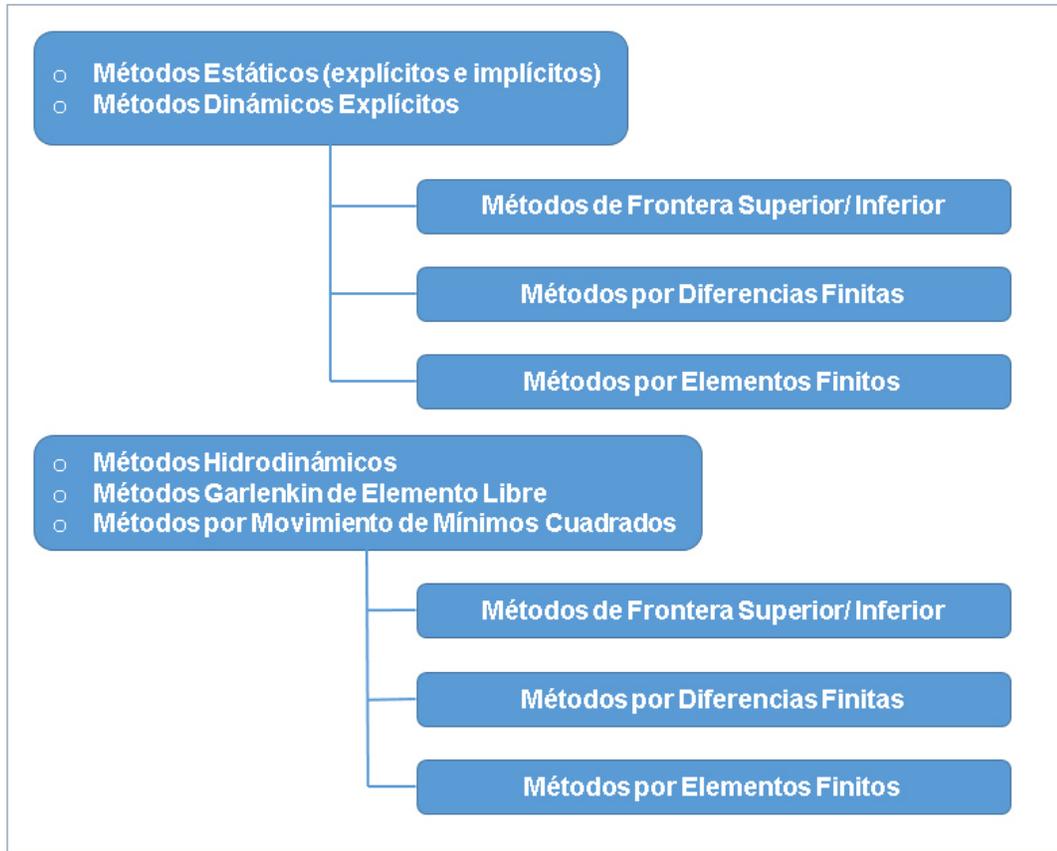


Figura 19. Técnicas de simulación en formado metálico [46].

Debido a la complejidad mecánica de deformación durante el formado, las técnicas de simulación teórica necesitaron un mayor número de simplificaciones llevando a la invalidez de resultados. A principios de la década de 1950 se llevaron a cabo los primeros experimentos para simular procesos de formado en conjunto con la modelación de materiales [49].

Con la presente disposición computacional surgió una revolución en el campo de la simulación de procesos de formado. Las teorías de plasticidad fueron reformuladas para incluir técnicas numéricas que permitieran mayor facilidad en el proceso de cálculo. Uno de los primeros métodos desarrollados fue la técnica por diferencias finitas, el avance en las técnicas numéricas llevo en el año de 1970 a la aplicación de los métodos por elementos finitos.

El método por Elementos Finitos (FEM por sus siglas en inglés) es una técnica numérica para el cálculo mayoritariamente de esfuerzos y deformaciones en estructuras geométricas complejas. La estructura del método se basa en la división de elementos conectados a través de nodos. Los factores físicos del modelo se describen en base a las condiciones iniciales o frontera de cada elemento. La definición de todos los elementos se resume en un sistema global de ecuaciones que deberá aproximarse. Los Programas comerciales; Ansys, Mark, Deform y Forge utilizan este algoritmo para predecir flujo, esfuerzos, deformaciones y distribuciones térmicas [50-53].

El desarrollo de la tecnología de simulación en el área de forja inició a finales de 1960. Durante la década de 1970 y principios de 1980 se desarrollaron simulaciones bidimensionales en estado estable para procesos de extrusión y estirado de barras redondas y rolado de láminas [54-56]. Posteriormente se aplicaron métodos no estacionarios con técnicas de regeneración de malla para proceso de forja en caliente de componentes aeroespaciales [57, 58]. El surgimiento de técnicas de creación automática de mallas y remallado a finales de 1980 y principios e 1990 [59] ayudo a la expansión de estaciones de trabajo para aplicaciones FEM.

Existe un gran compendio de estudios en procesos de forja mediante elementos finitos. Golker desarrolló un sistema para el diseño de secuencias de operación en equipos de forja horizontal [60]. La forja abierta en caliente con secciones no circulares fue estudiada por Kazanci [61] e incluye el diseño de dados. Shivpuri, por su parte, estudió las técnicas de modelación de forja en frío y a temperaturas por debajo de recristalización utilizando los paquetes comerciales Deform, Ansys y Abaqus[62].

# CAPÍTULO 4

## METODOLOGÍA

En este capítulo se plantea la metodología general que se llevó a cabo para el desarrollo de esta investigación cumpliendo con ello los distintos objetivos planteados para la misma (figura 20).

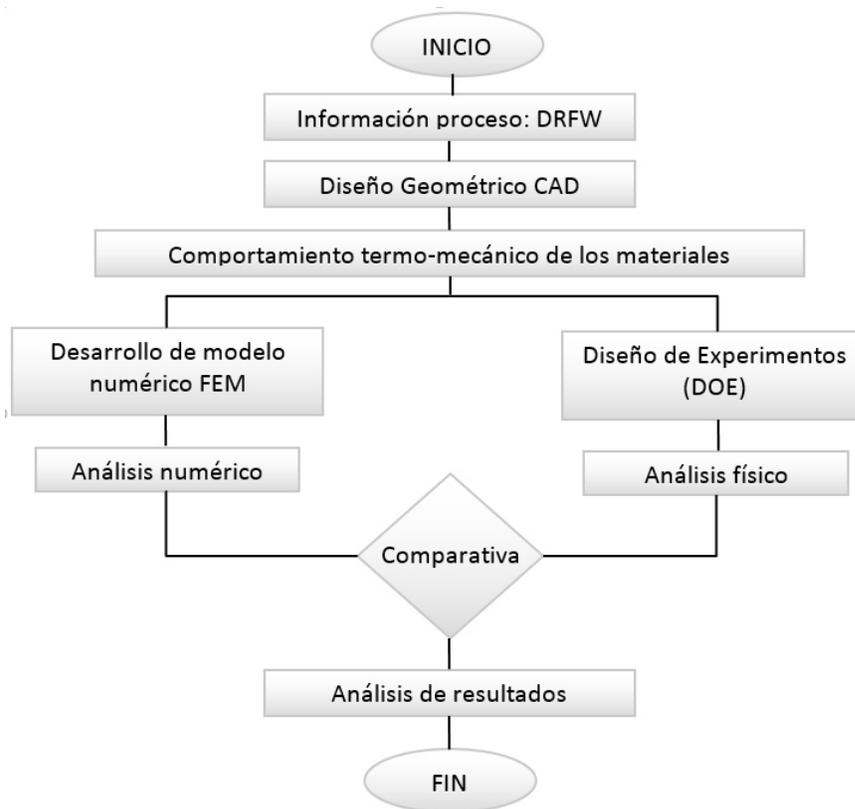


Figura 20. Metodología general.

Para iniciar lo que describe la metodología en la figura 20, es preciso dejar claro que el proceso al que se enfoca esta investigación, es el método de soldadura por fricción rotacional directa.

En este paso de la metodología se recopila toda la información de la DRFW a la que se pueda acceder para una mayor comprensión del proceso así como también para llevar a cabo pasos posteriores de la metodología planteada.

#### **4.1 Diseño geométrico de componentes en el proceso DRFW**

Este paso orientado al diseño geométrico CAD en el proyecto, se enfoca a las piezas llamadas “fundas 160 de 16 mm” y a los husillos que se unirán a estas, por lo que es necesario conocer si estos modelos virtuales se encuentran en existencia o no, por lo que se hizo una búsqueda minuciosa dentro de la base de datos de la empresa.

De esta manera se encontraron únicamente piezas representativas utilizadas para visualización, pero, no críticas para el desarrollo de esta investigación con excepción de la pieza “Husillo”.

En la figura 21 es posible observar una representación de las piezas modeladas por medio de un software CAD 3D, las cuales no solo son útiles para pasos posteriores de esta metodología sino también para la empresa, ya que de esta manera puede tener una representación más viable dentro de la optimización del proceso. Cabe señalar, que por motivos de confidencialidad con la empresa, las medidas de los distintos aditamentos, así como de las fundas no son indicadas en los esquemas y dibujos descritos en esta tesis.

También se modeló el herramental de sujeción involucrado en el proceso de DRFW, así como todas las piezas que se encuentran en contacto con el producto “husillo – funda”.

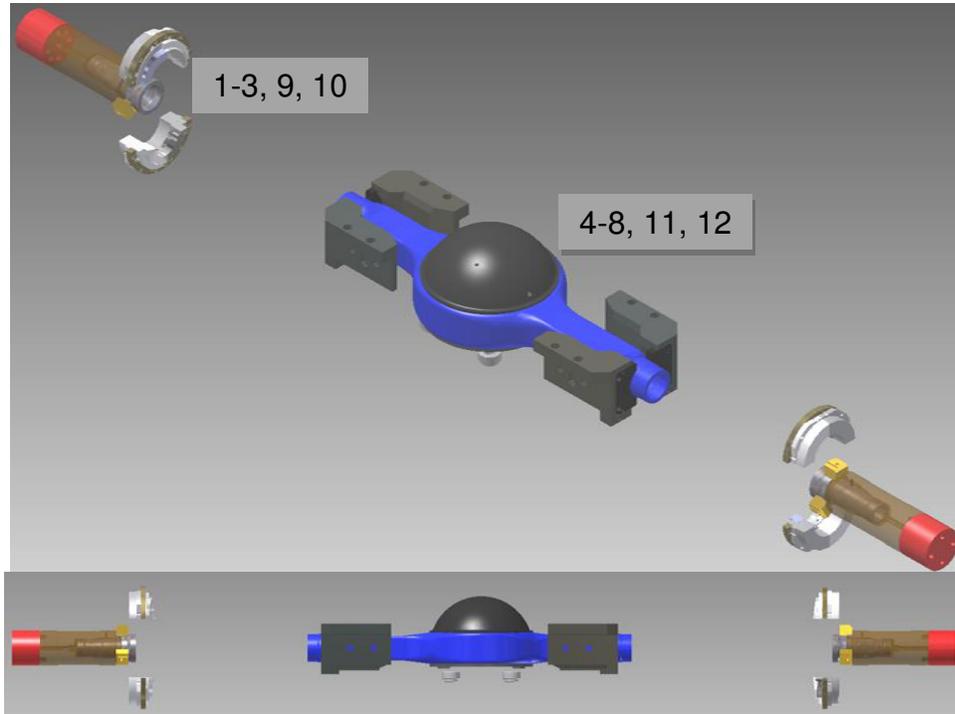


Figura 21. Piezas modeladas geoméricamente en CAD. Soporte de buje (1), buje para mandril (2), mordazas (3), anillo (4), funda 160-16mm (5), cubierta cerrada (6), soporte para pinzas (7), pinzas de sujeción (8), cortadores de rizo (9), husillo (10), pinzas inferiores de sujeción (11) y niveladores de funda (12).

## 4.2 Análisis del proceso DRFW

El elemento finito o FEA (FiniteElementAnalysis), se encuentra comprendido por dos pasos de la metodología planteada anteriormente: Determinación del comportamiento termomecánico de los materiales y elaboración de modelo numérico por FEM.

En el comportamiento termomecánico de ciertos materiales se hace mención a las propiedades químicas y físicas de los materiales de todas las piezas involucradas en el proceso, ya que sin esta información es imposible saber el cómo se comportará mecánicamente un objeto bajo las determinadas condiciones del proceso de DRFW.

En la tabla 5 se determina el material utilizado en cada pieza de la figura anterior, con esta información es posible obtener las propiedades físicas de las piezas utilizadas dentro del proceso DRFW. Como se puede observar, la definición de los materiales es general debido a que esta información es sensible para la compañía y puede perjudicar su competitividad.

Con esta información es posible obtener el comportamiento físico, mecánico y térmico de los materiales permitiendo así un correcto análisis del proceso. El software CAE, utilizado para lograr un FEA exitoso, es el llamado DEFORM2D3D en el cual se busca reproducir el proceso de soldadura por fricción rotativa directa.

Para ello es necesario el proceso DRFW Thompson ya que en este se buscó basar el modelo numérico; ese proceso fue descrito en el capítulo 2 de manera general, en cambio para traducir el proceso a datos útiles para un FEM, se requiere ser más específico, en la figura 22 se muestra un diagrama de la velocidad, presión y desplazamiento con relación en el tiempo (t) [16].

Tabla 5. Materiales utilizados de piezas involucradas en el proceso DRFW.

#	Nombre de Pieza	Material
1	Soporte de buje	Acero comercial
2	Buje para mandril	Acero comercial con temple
3	Mordazas	Acero comercial
4	Anillo	Acero comercial con contenido de carbono y manganeso
5	Funda 160 – 16mm	Acero con contenido de manganeso
6	Cubierta Cerrada	Acero con contenido de manganeso
7	Soporte para pinzas	Acero comercial con temple
8	Pinzas de sujeción	Acero comercial con gran contenido de cromo, manganeso y temple
9	Cortadores de rizo	Acero comercial con temple
10	Husillo	Acero modificado con contenido de manganeso
11	Pinzas inferiores de sujeción	Acero comercial con gran contenido de manganeso y carbono
12	Niveladores de funda	Acero comercial

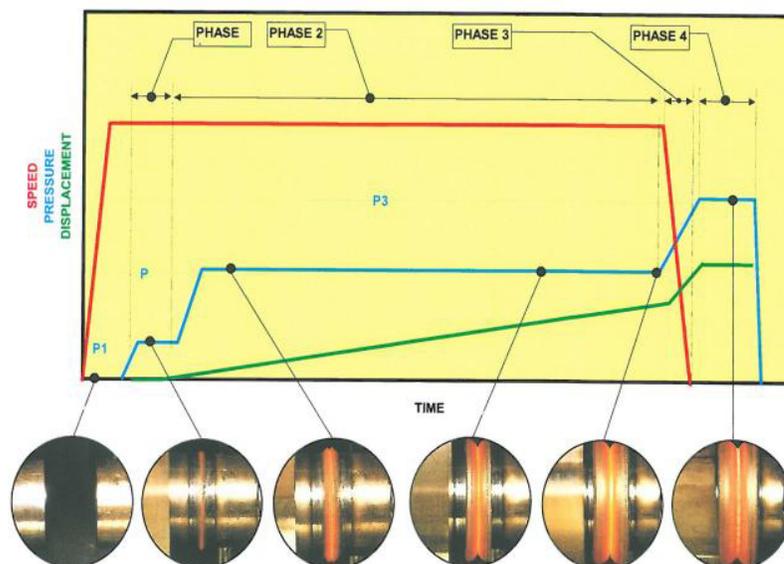


Figura 22. Fases proceso DRFW según Thompson [16].

De acuerdo a la figura 22 es posible describir las fases del proceso específicamente en el de soldadura por fricción rotativa directa (tabla 6), donde se explica el comportamiento de las piezas durante un tiempo determinado.

Tabla 6. Fases utilizadas por Thompson en la DRFW.

Fases del Ciclo de Soldadura	Función
Fase 1 (Primera etapa de Fricción)	"Acondicionamiento" de las etapas de soldadura en orden para producir un precalentamiento y reducir el coeficiente de fricción antes de comenzar la Fase 2.
Fase 2 (Segunda etapa de Fricción)	Para liberar el calor generado por el proceso de fricción con el fin de plastificar los materiales que serán unidos, esta fase del ciclo de soldadura es acompañada por la expulsión de material caliente para formar un "destello" característico. Este desplazamiento de material asegura la purga de los contaminantes de la interfaz de la soldadura.
Fase 3 (Paro / Detención)	Esta fase del ciclo de soldadura asegura que el movimiento relativo entre las partes haya sido detenido para la completa aplicación de la "Fase de Forja"
Fase 4 (Forja)	Se logra la completa aplicación de la presión de Forja después que el movimiento relativo haya cesado. Esta fase del ciclo de soldadura proporciona trabajo mecánico adicional de la unión sin calor de entrada que promueve el refinamiento de la microestructura.

La tabla 7 muestra únicamente el proceso directamente en la pieza justo antes del corte de rizo, es decir, desde que la soldadura por fricción comienza entre las piezas, hasta que estas se encuentran unidas entre sí.

Con esta información se determinó la configuración guía para el análisis de elemento finito con enfoque en la DRFW (tabla 7), resumiendo las fases útiles de pre-procesamiento dentro del DEFORM2D3D para la agilización del mismo.

En la tabla 8 se observan las variables utilizadas para describir numéricamente los parámetros de la DRFW según la fase en la que se encuentre el proceso. Se puede observar la falta de la fase de paro o detención según la tabla 6, esto debido al mejor procesamiento de los datos y que gracias al software, se puede realizar el paro del giro sin la necesidad de su procesamiento.

Tabla 7. Esquema de fases DRFW según Thompson.

HERRAMENTAL		Tapón Localizador Inferior			Pinza Auto-centrante	
		F2	272 025.6	N	F3	362 700.8 N
<b>FASE I : PRE - CALENTAMIENTO</b>						
F1-1	100	KN	$\omega_1$	498	RPM	t1 6 seg
<b>FASE II : CALENTAMIENTO</b>						
F1-2	355	KN	$\omega_2$	478	RPM	t2 22 seg
<b>FASE III : FORJA</b>						
F1-3	715	KN	$\omega_3$	0	RPM	t3 5 seg

Tabla 8. Descripción Variables utilizadas en el esquema de fases.

Variable	Descripción	Unidades
T	Temperatura en la que se encuentra el proceso	°C
F1-1	Fuerza aplicada por el husillo en la 1ª fricción	KN
F1-2	Fuerza aplicada por el husillo en la 2ª fricción	KN
F1-3	Fuerza aplicada por el husillo en la fase de forja	KN
F2	Fuerza utilizada por las pinzas de sujeción	N
F3	Fuerza utilizada por las pinzas inferiores	N
$\omega_1$	Velocidad angular utilizada durante la primera fricción	RPM
$\omega_2$	Velocidad angular utilizada durante la 2ª fricción	RPM
$\omega_3$	Velocidad angular utilizada durante la fase de forja	RPM
t1	tiempo de duración de la 1ª fricción	seg
t2	tiempo de duración de la 2ª fricción	seg
t3	tiempo de duración de la fase de forja	seg

### 4.3 Análisis CAE del proceso DRFW

Como mencionan los autores Schmicker, et al. de la Universidad de Magdeburg, Alemania, la simulación de la DRFW es un tema desafiante ya que indica un problema acoplado de fenómenos como largas deformaciones plásticas, flujo de calor, contacto y fricción [63, 64].

A diferencia de estos autores, que utilizan un modelo basado en la ley de fluido Carreau y un personalizado mapeo para concebir las complicadas deformaciones presentes en el proceso así como también el uso de una simulación de fluidez con piezas de muy alta viscosidad no-Newtoniana. En esta investigación se buscó utilizar un software enfocado en procesos de formado y utilizar su configuración predeterminada en la interpretación de datos a continuación se muestran las ecuaciones utilizadas por el software DEFORM 2D3D [65].

#### 4.3.1 Fórmulas del paquete comercial CAE

El coeficiente de expansión térmica define la deformación volumétrica debido a cambios en la temperatura, se encuentra definido por:

$$\varepsilon^{th}$$

Donde  $\alpha$  es el coeficiente de expansión térmica,  $T_0$  es la referencia de temperatura y  $T$  es la temperatura del material.

La fuerza por unidad de volumen es basada en la siguiente ecuación:

$$F = \int \rho f_{vol} dV$$

Donde  $F$  es la fuerza con unidades de Newtons (N) para el Sistema Internacional (SI),  $f_{vol}$  es la fuerza por unidad de volumen y  $\rho$  es la densidad del material.

Cuando un material es conformado, este es deformado plásticamente reduciendo el estrés más que la fluidez. Este fenómeno es conocido como Deformación plástica. El cambio de dimensiones de una pieza debido a la transformación plástica ocurre en combinación con el cambio de dimensiones debido a la deformación inducida por cambio de volumen. En software CAE la ecuación para la deformación plástica es la siguiente:

$$\dot{\epsilon}_{IJ}^{Tp} = \frac{3}{2} K_{IJ} h(\xi_J) \dot{\xi}_J \delta_{IJ}$$

Donde;  $\dot{\epsilon}_{IJ}^{Tp}$  = deformación plástica;  $K_{IJ} h$  = Coeficiente de transformación plástica de fase I a fase J;  $\dot{\xi}_J$  tasa de fracción volumetrica;  $\delta_{IJ}$  es la .

La información del esfuerzo de flujo es fundamental para casi todas las simulaciones en la plataforma de elemento finito. Este determina la deformación y el comportamiento de flujo para cualquier material sometido a deformación permanente, la ecuación que lo determina es:

$$\bar{\sigma} = \bar{\sigma}(\bar{\epsilon}, \dot{\bar{\epsilon}}, T)$$

Donde,  $\bar{\sigma}$  == Esfuerzo de flujo;  $\dot{\bar{\epsilon}}$  = velocidad de deformación;  $\bar{\epsilon}$  =deformación; T= temperatura.

Según Schmicker, se recomienda utilizar incrementales Langrangianas para resolver un modelo de soldadura por fricción, estas DEFORM las define para ser usadas para todo el formado convencional, transferencia de calor y aplicaciones de tratamientos térmicos, por lo que será utilizada como base en el análisis numérico [63, 65].

Existen distintos solucionadores (solvers), que como su nombre lo indica, ayudan a resolver los análisis numéricos, existiendo así varios de estos y cada uno con una aplicación específica.

DEFORM recomienda los siguientes para 3D:

- NR : Iteraciones de Newton Raphson.
- DI : Interacciones Directas.
- SP : Solucionador Sparse.
- CG : Solucionador Gradiente Conjugado.
- STD : Formulaciones Estándar Elasto-plásticas.
- MIX : Formulaciones Mixtas Elasto-plásticas.
- CC : Conformación de acoplamiento (CC) para limitaciones de contacto.
- PEN : Penalización basaa en restricciones de contacto.

Una vez identificado cada solucionador e iterador, se clasifica su utilidad en un determinado escenario (tabla 9).

Tabla 9. Solucionadores (solvers) recomendados según su aplicación.

Información del modelo	Recomendado	Puede usarse	No usarse
Modelos de formado general con objetos plásticos	CG, DI	NR, SP	
Formado general con objetos elasto-plásticos	SP, NR ,STD		DI
Matrices de resorte	SP		CG
troqueles por fuerza	SP		CG
Tratamiento térmico con MallaTetraedraelasto-plástica	SP, NR, MIX	CG, NR	
Tratamiento térmico con Malla de ladrillo elasto-plástica	SP, NR	CG, NR	

Objetos de deformación plástica múltiple + grandes deformaciones plásticas	SP, DI, CC	CG	
Objetos de deformación plástica múltiple + pequeñas deformaciones	SP, NR, PEN	DI	
Múltiples objetos de deformación elasto-plástica	SP, NR, PEN		DI, CC
Modelos de estrés en dados elásticos + objetos elásticos	SP, NR	CG	
Modelos simetría rotacional (objetos elasto-plásticos)	SP, NR, PEN		CG, CC
Modelos simetría rotacional (objetos plásticos)	SP, DI, CC	CG, NR	
Modelos de transferencia pura de calor	CG	NR	

#### 4.4 Diseño de Experimentos

La experimentación es un método científico de investigación que consiste en hacer operaciones y prácticas destinadas a demostrar, comprobar o descubrir fenómenos o principios básicos.

En esta investigación es aplicado el método deductivo, ya que este consiste en clasificar y ordenar los hechos por medio de una relación, de manera que se pueda predecir un hecho y confirmarlo mediante la experimentación [66].

La razón de esta propuesta para pruebas experimentales, es con la finalidad de validar la información mecánica obtenida por el análisis numérico del proceso – pieza. A su vez, esto ayudó a comprender parcialmente el comportamiento

mecánico de los componentes conforme al proceso de soldadura por fricción rotativa directa.

Se planteó en la figura 23 una metodología para lograr cumplir con el objetivo del DOE (Design Output Experimental), por sus siglas en inglés.

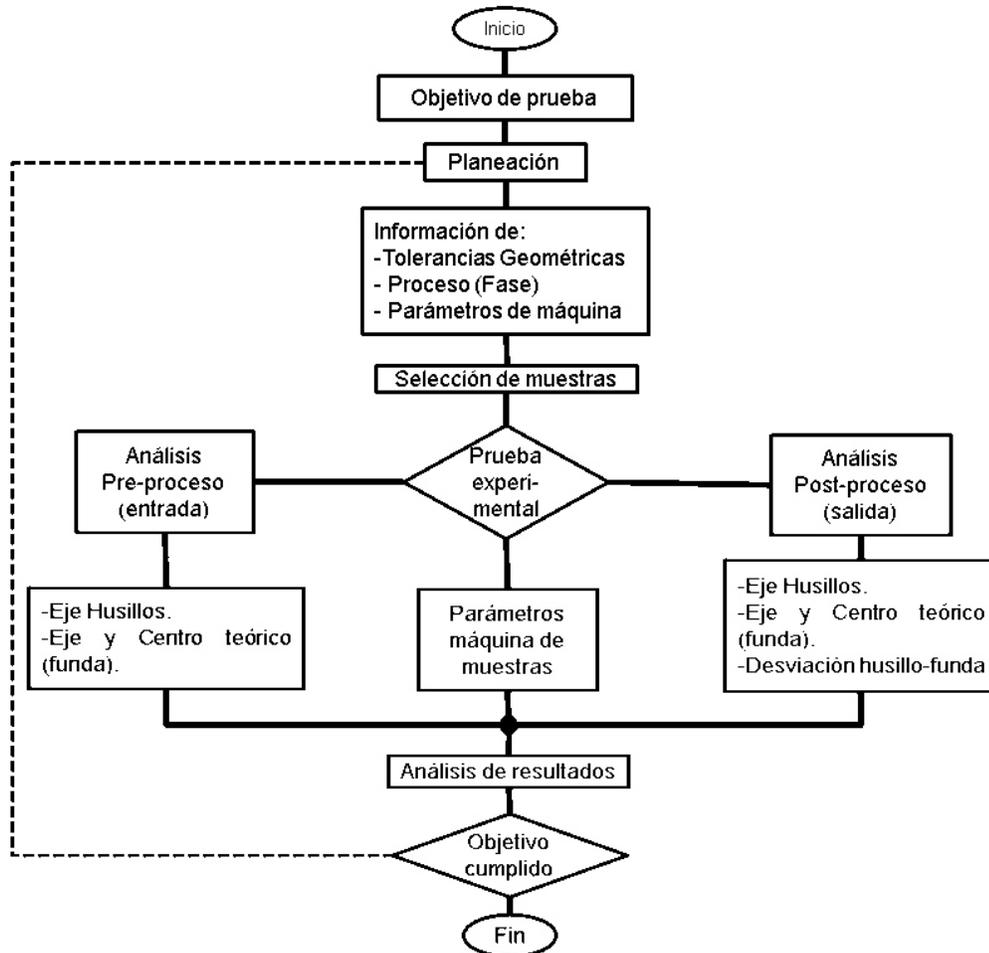


Figura 23. Metodología DOE.

El diseño de experimentos o DOE, es basado en un diseño factorial  $2^k$ , esto para cumplir con el objetivo planteado en este capítulo.

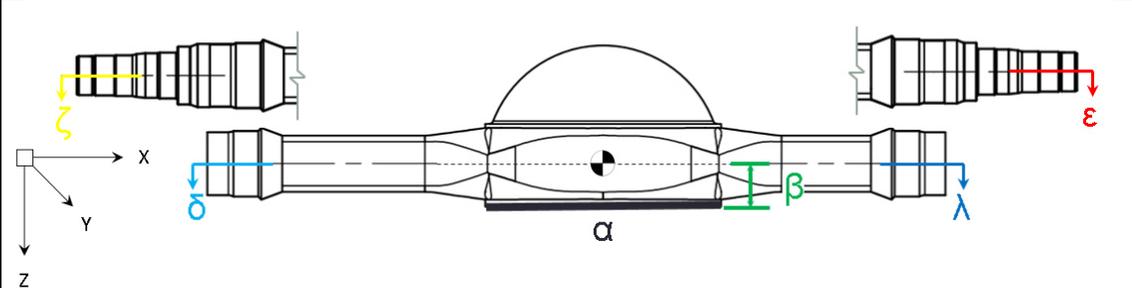
Los diseños factoriales  $2^k$  son una clase especial de los diseños factoriales en los que se tienen  $k$  factores de interés a dos niveles cada uno. Esto es por que

se quiere investigar la forma como influyen  $k$  factores candidatos sobre una variable respuesta y en cada factor se deben considerar dos niveles únicamente [67-69].

Con base de lo que se sabe del DRFW y las tabla 7, se buscó realizar un análisis Pre-proceso, donde la pieza (funda) es verificada dimensionalmente justo antes de entrar en la maquina encargada de la DRFW, así como también se verificó dimensionalmente la pieza Post-proceso, es decir, tal cual sale de la DRFW. La tabla 10 detalla la verificación dimensional del pre/post-proceso, como se indicó anteriormente las dimensiones no pueden ser detalladas ya que comprometen la competitividad de la compañía SISAMEX.

En la tabla 10 se observan los parámetros a analizar dimensionalmente, los cuales ayudarán a validar el modelo numérico, así como también observar cómo se comportan mecánicamente las piezas dentro del proceso real.

Tabla 10. Verificación dimensional pre/post-proceso.



Color	Variable	Descripción
		Centro teórico (origen)
	$\alpha$	Movimiento en Z del carrier (anillo)
	$\beta$	Distancia del anillo hacia el eje de las patas(altura)
	$\lambda$	Distancia en Z de eje pata corta contra el origen
	$\delta$	Distancia en Z de eje pata larga contra el origen
	$\epsilon$	Distancia en Z de eje husillo pata corta contra origen
	$\zeta$	Distancia en Z de eje husillo pata larga contra origen

En la tabla 11 se observan las áreas críticas para un buen funcionamiento dentro de una funda para eje motriz, siendo estos a lo que se enfoca el análisis de entrada y salida en este diseño de experimentos.

Tabla 11. Entrada y salida dimensional (Pre-proceso y post proceso) en el proceso de soldadura por fricción

Funda	Eje pata	Corta
		Larga
	Centro teórico	
	Asiento de anillo	

Los parámetros cambiantes – fijos dentro de este sistema de la DRFW se definen en la tabla 12, donde 0 significa un valor menor al original establecido y 1 significa un valor mayor al establecido por el proceso DRFW según Thompson.

Tabla 12. Parámetros del sistema DRFW.

Parámetro	Nomenclatura	Observaciones	Identificación DOE
F1-1 / F1-2 / F1-3	0	Cambiante	A
	1		
$\omega 1 / \omega 2 / \omega 3$	0	Cambiante	B
	1		
t1 / t2 / t3	0	Cambiante	C
	1		
F2	-	Fijo	-
F3	-	Fijo	-

Descrito esto, es posible definir que el diseño factorial  $2^3$  es el idóneo para el correcto cumplimiento del objetivo propuesto para el DOE. En la tabla 13 se puede observar el plan  $2^3$  propuesto.

Cabe mencionar que a estos 8 experimentos no se les dará una segunda réplica, sino que se cambiarán algunos parámetros en distintas fases, haciéndolos a cada experimento único, esto debido al cumplimiento de entrega establecido. Así también a estas muestras se agregarán 2 más, las cuales pasarán por el proceso bajo los parámetros establecidos con anterioridad.

Tabla 13. Diseño factorial  $2^3$  en el análisis del proceso de soldadura por fricción rotatoria.

<b>Experimento</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>
1	-	-	-
2	+	+	+
3	-	-	+
4	-	+	+
5	+	+	-
6	+	-	-
7	-	+	-
8	+	-	+
9	n/a	n/a	n/a
10	n/a	n/a	n/a

En los 8 experimentos planteados para este diseño factorial se mantendrá el rizo, debido a que el FEA no comprende esta operación durante la DRFW. Por el contrario de las 2 muestras restantes las cuales no modifican parámetros, únicamente una se mantendrá con rizo, mientras que la otra lo eliminará, ayudando a lograr el entendimiento de los esfuerzos dentro de la DRFW.

Es necesario recordar de capítulos anteriores los parámetros típicos en el proceso de DRFW idóneos mostrados en la tabla 14, los cuales sirven como base para la etapa experimental.

La tabla 15 presenta las cargas y tiempos utilizados en el desarrollo experimental para las 10 pruebas en la segunda y tercera fase de operación del proceso de soldadura por fricción rotativa.

Tabla 14. Parámetros típicos en el proceso de soldadura por fricción rotativa.

Descripción	Número de fase	Velocidad (rpm)	Carga (KN)	Tiempo (seg)
Pre-calentamiento	1	498	100	6
Calentamiento	2	478	355	22
Forja	3	--	715	5

Tabla 15. Parámetros experimentales en el proceso de soldadura por fricción rotativa (segunda y tercera fase).

Experimento	F (KN)		$\omega$ (RPM)		T (seg)	
	2a	3a	2a	3a	2a	3 <sup>a</sup>
1	355	715	478	N/A	22	6.5
2	355	715	478	N/A	22	3.5
3	355	665	478	N/A	22	3.5
4	305	715	478	N/A	25	5
5	405	715	478	N/A	19	5
6	405	715	478	N/A	25	5
7	305	715	478	N/A	19	5
<u>8</u>	355	715	478	N/A	22	5
9	355	665	478	N/A	22	6.5
<u>10</u>	355	715	478	N/A	22	5

La fuerza modificada en la fase 3 de forja, como se muestra en el DOE, se debió mantener igual que la idónea en vez de aumentarla como se planeó, esto

es debido a que las tolerancias de la máquina no permiten aumentarla más para no comprometer la integridad de la misma.

## **CAPÍTULO 5**

### **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

En este capítulo se presentan y discuten los principales resultados de los modelos numéricos desarrollados en el proceso de soldadura por fricción rotativa. Inicialmente se exponen los resultados numéricos de la interacción del proceso de fricción y las principales herramientas de soporte, mostrando los cambios de posición y estado de esfuerzos en la unión. La evaluación del comportamiento de la soldadura por fricción rotativa se realiza a través de modelos 2D de las diferentes etapas presentes en el desarrollo de la unión. La validación de los modelos numéricos se realiza a través de la evaluación experimental del posicionamiento de la unión funda-husillo y su relación con las principales variables de proceso tales como; temperatura, fuerza y velocidad de rotación en modelos numéricos 3D.

#### **5.1 Análisis numérico 2D de la zona unión funda-husillo**

Debido a la complejidad del proceso DRFW y lo que implica poder observar el comportamiento mecánico de los materiales, es decir, el flujo de los mismos, se

optó por validar primeramente el proceso por medio de un análisis numérico bidimensional.

### 5.1.1 Flujo de material durante el proceso de fricción rotativa

Existe un comportamiento mecánico característico de la DRFW, el cual se encarga de formar el rizo (figura 24), lograr esta representación fue posible en un análisis 2D, a continuación en la figura 25 se muestra el sistema utilizado para representar al husillo y la funda, siendo estos representados en un sistema axi-simétrico, una geometría de torsión, deformación y transferencia de calor activos, un sistema langrangiano en incremento con un método Newton-Raphson con el solucionador (solver) de “skyline”, justo como lo determina DEFORM en su manual respetando las dimensiones generales de lo que es la mitad de la funda (una pata) y el husillo [65].



Figura 24. Flujo mecánico (rizo) debido a proceso DRFW.

Para lograr este análisis numérico bidimensional, así como ejercicios previos y posteriores, se utilizó un CPU con un procesador Intel Xeón @ 2.8 GHz 2.8 GHz, 11Gb de memoria RAM y un disco en estado sólido, permitiendo así el procesamiento varíe de 30 min a 4 horas dependiendo la fase en cuestión.



Figura 25. Sistema 2D Husillo-Funda simplificado. a) Dado de desplazamiento; b) Representación de husillo; c) Representación de media funda (la mitad del largo de la funda completa); d) Dado fijo usado de restricción.

Debido a las restricciones del software DEFORM2D3D, la optimización de procesamiento y correcta visualización del flujo mecánico de los materiales, se determinó con ayuda de la planta SMX que el desplazamiento total del husillo en la funda es de 18.1 milímetros, es decir, que por limitantes del software conforme a este proceso como lo dice Schmicker, es demasiado complejo para ser simulado con facilidad, se procedió a tomar los desplazamientos del chuck-husillo hacia la funda en vez de la fuerza ejercida permitiendo así permitir que el flujo del material sea el adecuado.

El coeficiente de fricción es aquel factor que muestra la tracción o “agarre” que tiene una superficie con otra, donde un valor muy pequeño podría describirse como una fricción mínima (por ejemplo, un hielo deslizándose sobre una superficie lisa) y un valor mayor demuestra una mayor resistencia entre superficies (por ejemplo, una llanta en el pavimento) [70]

SatoruMaegawa et. al, nos hablan de la importancia que tiene el coeficiente de fricción en procesos donde las piezas entran en contacto entre sí, pues, es esta la base del proceso, junto a distintos parámetros como lo son la fuerza, tiempo, velocidad angular y desplazamiento de la superficie quemada [71].

Por esta razón se validaron distintos coeficientes de fricción únicamente en la fase de calentamiento, ya que en esta, es donde el proceso alcanza la temperatura máxima así como también es cuando el material fluye debido a un desplazamiento considerable, por lo que es donde se considera que el coeficiente de fricción puede variar.

Existen trabajos previos de autores como Hong-yu Wang et. al, RahmanSeifi et. al, y Gianluca Buffa, et. al, quienes recomiendan realizar un análisis que permita encontrar el coeficiente correcto para el proceso de DRFW, aunque podría decirse que este es el protocolo ideal a seguir, desvía los objetivos de la investigación [72-74].

Por lo que se decidió hacerlo de acuerdo a lo que dicta DEFORM según su manual, pues deja muy claro que aunque existen recomendaciones dadas según el proceso, las condiciones del mismo, o el material utilizado, este coeficiente no puede obtenerse de una manera exacta más que el de la experimentación, es decir, recomienda considerar un coeficiente mínimo y uno máximo e ir probando distintos para determinar el idóneo según nuestros requerimientos [65].

Para determinar cuál coeficiente de fricción es el ideal para este proceso, es necesario considerar la temperatura máxima alcanzada, según Thompson y P. M. Ajith et. al, esta debe ser de 1200-1350°C, ya que se debe considerar siempre al material por debajo del punto de fusión para no comprometer la integridad del material ocasionando que este entre en cambios de fase.[22, 75]

De entre estos coeficientes se determinó utilizar como coeficiente de fricción cortante un valor de 1.0 en todas las fases, esto debido a una serie de ejercicios experimentando posibilidades de flujo mecánico del material en la fase 2, coincidiendo con el autor Bahmji, I. et. al [76]. En estudios previos VijaySoundararajan, et. al, y P. M. Ajith, determinaron que la fase 2 es la de mayor importancia en la DRFW, a su vez que mencionan que los coeficientes de 0.4 y 0.5 son idóneos para soldadura por fricción, pero, estos valores fueron probados y no permitían un pre-calentamiento ideal para las condiciones del proceso, y fueron descartados [75, 77, 78].

Con esta información se obtuvieron los siguientes resultados que se pueden observar en las tablas siguientes, donde se muestra el desplazamiento ( $d$ ) en mm, la velocidad angular ( $\omega$ ) en rpm y el tiempo ( $t$ ) de fase en segundos, el tipo de malla utilizado, coeficiente de fricción y la temperatura (del área de contacto) sin olvidar que en la fase 3 se considera la mínima debido al enfriamiento.

En la tabla 16 y figura 26 se puede observar la fase 1 del proceso DRFW con las condiciones idóneas del mismo según *Thompson FrictionWelding*, estos parámetros tienen por diferencia el uso de desplazamientos en vez de Fuerza, pues se busca validar el proceso por medio del correcto flujo del material, sin tener en cuenta las cargas ejercidas, y un aumento de temperatura considerable sin un avance lineal [22].

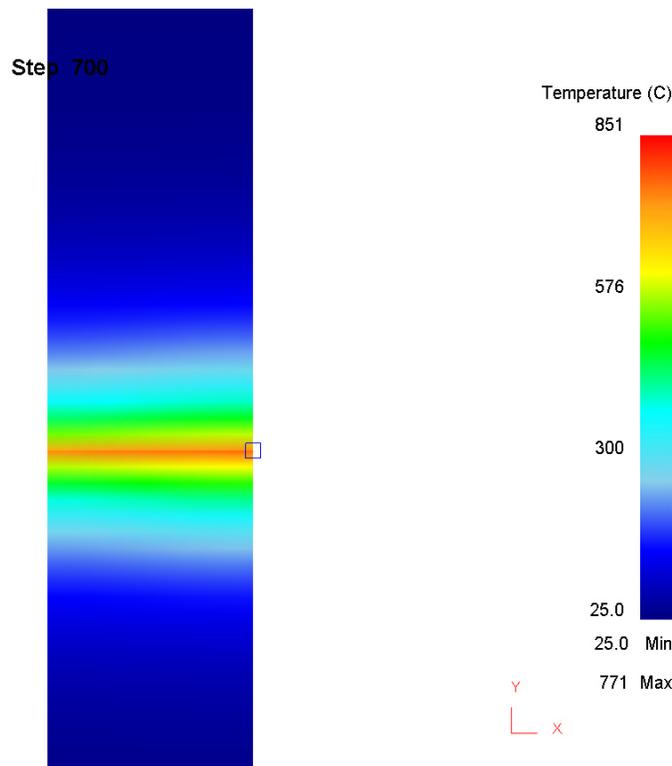


Figura 26. Unión 2D funda-husillo en fase 1 (pre-calentamiento).

Tabla 16. Unión 2D Funda-Husillo en Fase 1 (pre-calentamiento).

<b>Parámetros</b>					
<b>d</b>	0mm	<b><math>\omega</math></b>	498rpm	<b>t</b>	6seg
<b>Malla utilizada</b>					
<i>Tetrahedra</i>					
<b>Husillo</b>	2832		Elementos		
<b>Funda</b>	7755		Elementos		
<b>Coefficiente de Fricción</b>			Shear	1.0	
<b>Temperatura alcanzada</b>				771°C	

Por otro lado, en la tabla 17 y figura 27 se muestra la fase 2 idónea del mismo proceso, es aquí donde se muestra el mayor avance lineal de todas las fases así como también mayor duración y por ende donde se muestra un flujo considerable de material, esta fase es donde el proceso alcanza su temperatura máxima.

Aunque la temperatura máxima es aún mayor a lo que considera el proceso, cabe mencionar que este coeficiente es donde mejor fluye el material y la temperatura máxima que determina el análisis es la del área central del contacto por lo que es difícil validar este dato de manera experimental. Pues como mencionan Xiawey Yang, et. al, la temperatura en la DRFW se concentra al centro del área de contacto, permitiendo únicamente verificar la temperatura del rizo formado[78, 79].

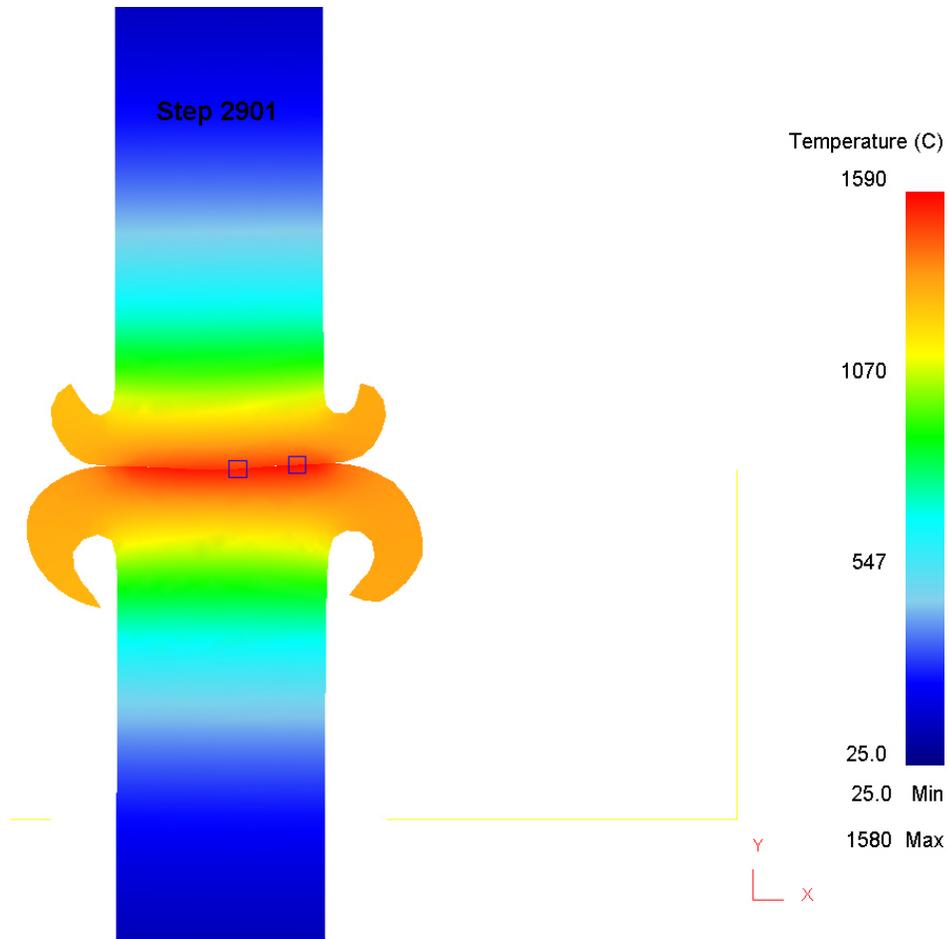


Figura 27 Unión 2D funda-husillo en fase 2 (calentamiento).

Tabla 17. Unión 2D Funda-Husillo en Fase 2 (calentamiento).

<b>Parámetros</b>					
<b>d</b>	14.4mm	<b><math>\omega</math></b>	478rpm	<b>t</b>	22seg
<b>Malla utilizada</b>					
<i>Tetrahedra</i>					
<b>Husillo</b>	2832		Elementos		
<b>Funda</b>	7755		Elementos		
<b>Coefficiente de Fricción</b>				Shear	1.0
<b>Temperatura alcanzada</b>					1560°C

Por ultimo en la tabla 18 y figura 28 se observa la fase final del proceso en cuestión, la fase 3, en esta se considera una duración menor que en todas las fases pero un avance considerable en cuestión al tiempo. Por otro lado la temperatura máxima va decreciendo de acuerdo a la transferencia de calor que existe con el ambiente.

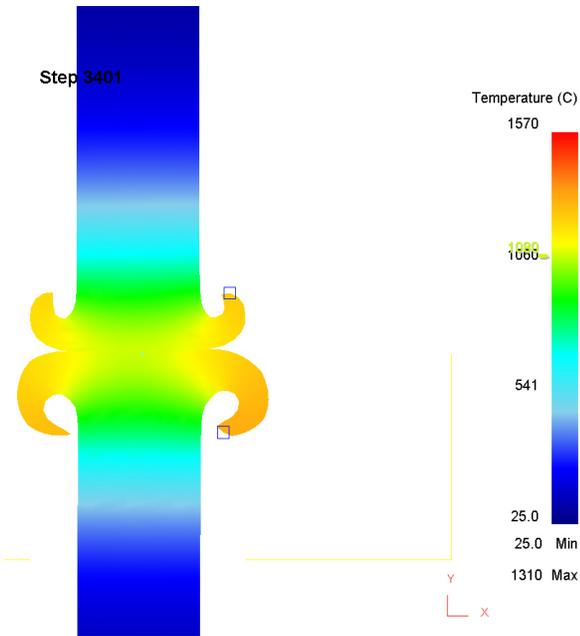


Figura 28. Unión 2D funda-husillo en fase 3 (forja)

Tabla 18. Unión 2D Funda-Husillo en Fase 3 (Forja).

<b>Parámetros</b>					
<b>d</b>	3.7mm	<b>ω</b>	0rpm	<b>t</b>	5seg
<b>Malla utilizada</b>					
<i>Tetrahedra</i>					
<b>Husillo</b>	2832		Elementos		
<b>Funda</b>	7755		Elementos		
<b>Coefficiente de Fricción</b>			Shear	1.0	
<b>Temperatura mínima</b>				1080°C	

En la figura 29 es posible observar la representación 3D de los resultados de las tablas anteriores, de esta forma se logra una mejor comprensión del flujo mecánico de los materiales implicados en el proceso.

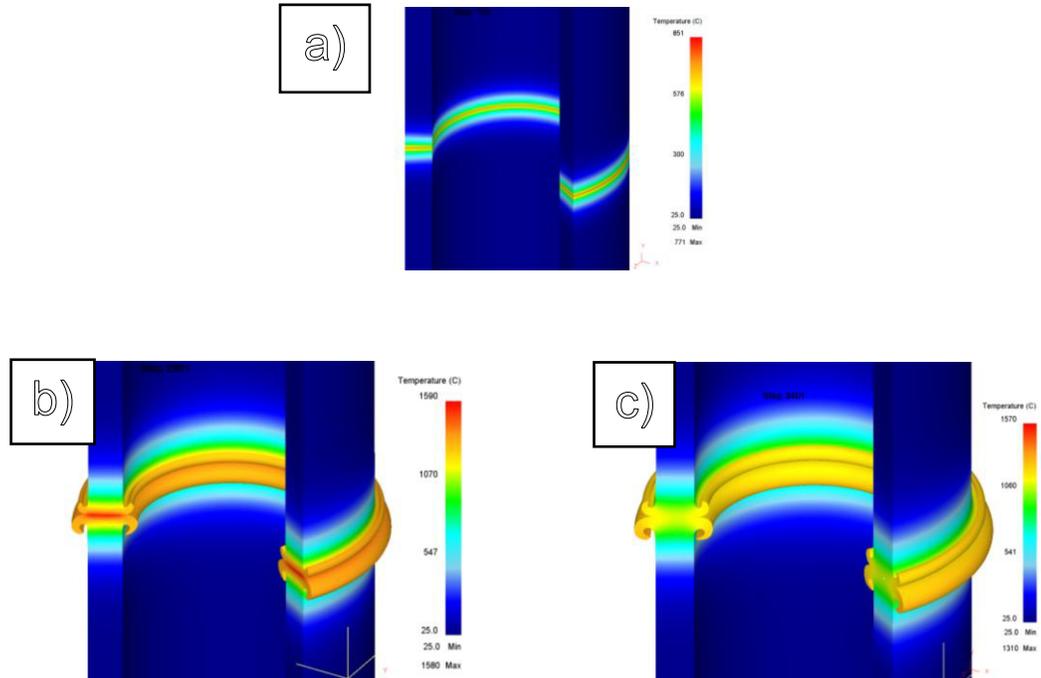


Figura 29. Representación 3D de las fases DRFW en análisis bidimensional.  
a) Fase 1: Pre-calentamiento; b) Fase 2: Calentamiento; c) Fase 3: Forja.

## 5.2 Resultados experimentales de desplazamiento durante el proceso de unión funda-husillo

De acuerdo a la metodología experimental y con ayuda del departamento de metrología de SMX se logró tomar los desplazamientos en Z de la Funda-Husillo tanto de entrada como de salida, es decir, antes y después del proceso de soldadura por fricción (figura 30).



Figura 30. Preparación de Funda para su medición.

De acuerdo a los autores Serdar Mercan, et. al, y Nirmal S. Kalsi y asociado, la evaluación sistemática de parámetros en un proceso pueden permitir la optimización del mismo, pero para ello, es necesario realizar una serie de pruebas pertinentes a las exigencias del producto en cuestión. A su vez es necesario mantener estos parámetros dentro de los valores óptimos según sea el caso, de esta manera la aplicación de la soldadura tendrá una buena calidad [80, 81].

En la tabla 19 se muestra el desplazamiento en Z antes de ingresar al proceso, esto de acuerdo al DOE propuesto en el capítulo 4, mientras que en la tabla 20 se muestra el desplazamiento después del proceso.

Tabla 19. Desplazamiento pre proceso del centro teórico de la unión fundahusillo (mm)

Muestra	$\alpha$	$\beta$	$\lambda$	$\Delta$
1	0.97	81.83	0.76	0.09
2	0.40	79.05	1.20	1.30
3	0.97	85.87	1.13	1.54
4	1.00	78.66	0.70	0.45
5	0.60	89.90	0.33	0.23
6	0.93	80.22	1.31	0.21

7	1.36	83.97	0.55	0.24
8	0.73	81.91	0.37	0.073
9	0.24	78.91	1.92	0.10
10	0.24	77.05	0.24	1.38

Tabla 20. Desplazamiento post proceso del centro teórico de la unión fundam - husillo (mm)

Muestra	$\alpha$	$\beta$	$\epsilon$	$\zeta$
1	0.07	88.25	0.46	1.05
2	0.64	91.70	0.21	0.56
3	0.53	83.95	0.59	1.26
4	0.15	77.89	0.78	0.87
5	0.05	84.95	0.17	0.72
6	0.11	84.15	0.96	1.05
7	0.11	79.43	0.60	1.14
8	0.61	78.63	0.08	0.18
9	0.60	84.74	0.29	0.47
10	0.27	90.76	0.36	0.80

Para poder realizar una comparación de lo experimental contra el análisis numérico es necesario determinar la diferencia que existe de los datos de entrada contra los datos de salida de los 10 experimentos realizados, esta información es mostrada en la tabla 21.

Tabla 21. Desviación del desplazamiento del centro teórico de la unión fundam - husillo (mm).

Muestra	$\alpha$	$\beta$	$\lambda - \epsilon$	$\delta - \zeta$
1	0.90	6.42	0.3	0.96
2	0.24	12.65	0.99	0.74
3	0.44	1.92	0.54	0.28
4	0.85	0.77	0.08	0.42
5	0.55	4.95	0.16	0.49
6	0.82	3.93	0.35	0.84

7	1.25	4.54	0.05	0.90
8	0.12	3.28	0.29	0.11
9	0.36	5.83	1.63	0.37
10	0.03	13.71	0.12	0.58

### 5.3 Validación del DOE con Análisis numérico 3D durante el proceso de unión funda-husillo

Para cumplir con los objetivos establecidos para esta investigación, es preciso realizar una validación del DOE con ayuda del FEM. Es por eso que gracias al entendimiento del proceso DRFW por medio del análisis 2D previo, es posible determinar la mejor forma de realizar un análisis tridimensional que permita ser acoplado con el DOE en cada experimento realizado.

Para el análisis numérico 3D se optó por utilizar un ordenador con un procesador Intel Xeon@ 2.4 GHz 2.4GHz, 32 Gb memoria RAM y un disco en estado sólido, permitiendo simulaciones de 2-3 horas cada una, en este análisis sólo se varía el solucionador (solver), utilizando “sparse”, de acuerdo a lo que recomienda DEFORM en su manual [65].

A diferencia del análisis 2D, donde las piezas en interacción son tomadas como plásticas, el análisis tridimensional sólo utilizó la funda como componente plástico, dejando con características rígidas al husillo y herramienta usado. Esto debido a que es necesario optimizar tiempos de análisis, debido a la complejidad del proceso.

La complejidad de replicar o simular la DRFW con un paquete comercial CAE se hace evidente al observar las investigaciones recientes de los autores Schmickers, et. al, P. Ulysse y MüminSahin, donde utilizan distintos paquetes

ajenos al FEM, bajo régimen de de fluidos o visco-plásticos, replicando el proceso hasta ajustan las condiciones que son cercanas a la realidad [82-84].

A diferencia de Medhat A. Et Hadek quién prioriza la velocidad angular como parámetro clave para el proceso, RadoslawWiniczenko, et. al, mencionan que el material fluye hacia ambas direcciones de las piezas mientras estas se encuentran en contacto, lo que al ser una pieza rígida y otra plástica, con la rotación el flujo no sería correcto, pues este fluiría cubriendo a la pieza rígida ocasionando tomas erróneas de datos, esto fue comprobado con pruebas en el software [85, 86].

Por ende se decidió analizar el proceso conforme a la Fuerza ( $t$ ), ya que en este análisis es no considerado la formación del rizo, siendo los desplazamientos que existen durante la DRFW el tema de estudio.

Se consideró que la fase 1 (pre calentamiento) nunca cambia, por lo que se consideraron las condiciones finales de la misma como inicio de la simulación directamente en la fase 2 (calentamiento).

Estas condiciones iniciales son una temperatura inicial de  $600^{\circ}\text{C}$ , y los parámetros según el DOE y la fase en la cual se encuentra la modificación. En ninguno de los experimentos a continuación no se considero la velocidad angular ( $\omega$ ), por lo mencionado anteriormente.

Se propuso compensar el aumento de temperatura debido a la rotación en la fase 2 de calentamiento se tomó en cuenta la temperatura máxima según Thompson y se aplicó en función del tiempo, eliminando esta función al momento de comenzar la Fase 3 de forja, para permitir un correcto intercambio de temperatura con el ambiente [22].

Por motivos de optimización de procesamiento y de mejorar los resultados, se utilizó una funda como pieza única, es decir, no fue realizada como ensamble, esto ocasiona que el anillo no presente un movimiento fidedigno en la simulación, por lo que con la información obtenida es imposible determinar  $\alpha$ .

#### Prueba experimental No. 8 y 10

En esta prueba experimental se consideran por igual la 8 y 10, esto debido a que ambas en el DOE son realizadas bajo parámetros idóneos del proceso, es decir no hubo una modificación en los parámetros en ninguna fase, siendo el análisis numérico de estas es la base para las demás pruebas experimentales.

En la figura 31 se observa la visualización del comportamiento mecánico (flujo) que tiene el material de la funda al finalizar el proceso completo de DRFW.

Mientras que en la figura 32 se visualizan los esfuerzos generados durante la soldadura por fricción rotativa directa, se muestra como las cargas ejercen presión directamente en la parte central de la funda, ocasionando los desplazamientos en Z, efecto conocido coloquialmente como “pandeo”.

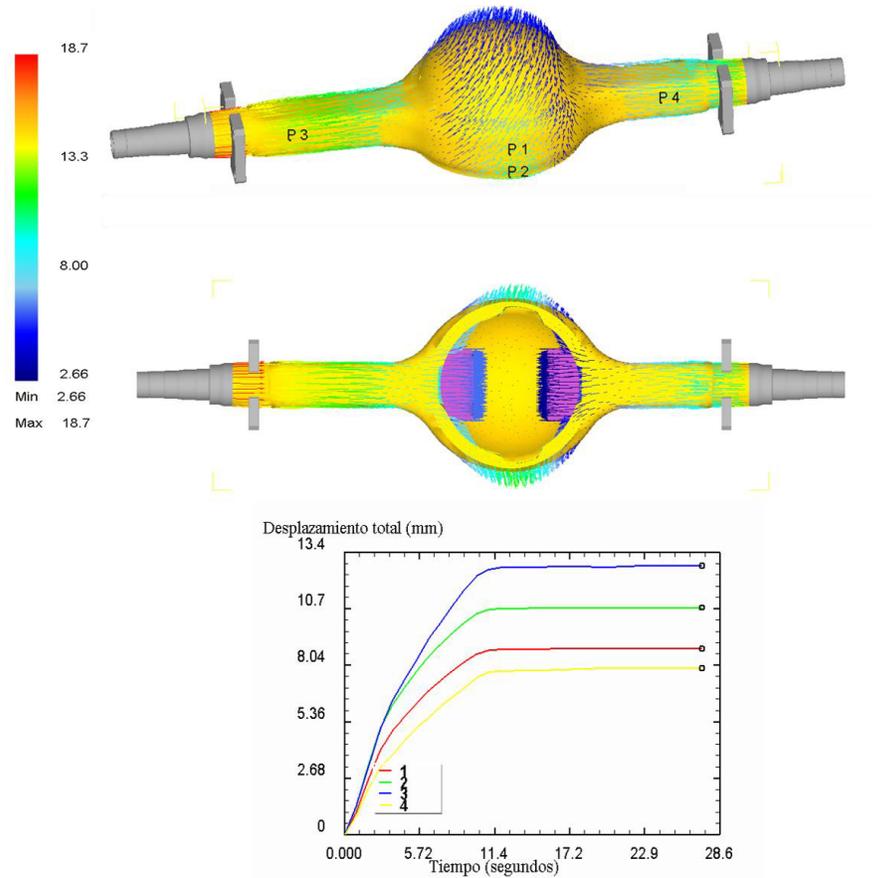


Figura 31. Desplazamiento total (mm) durante el proceso DRFW.

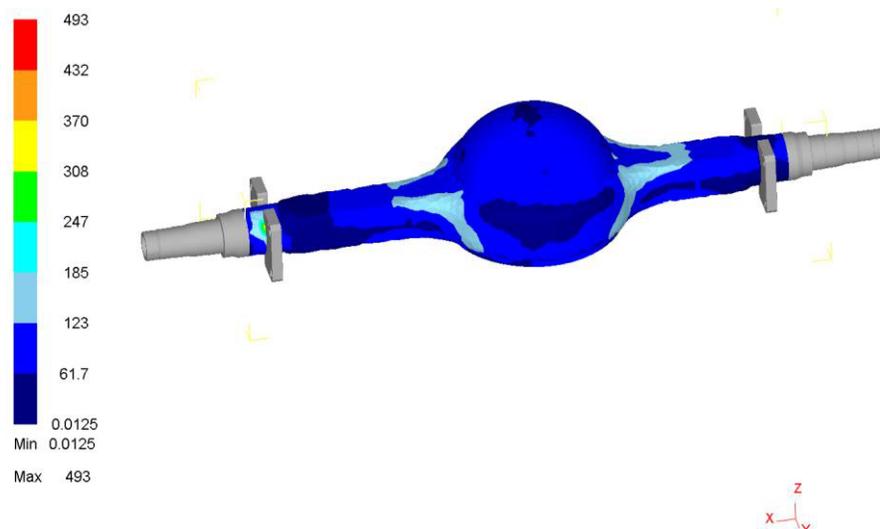


Figura 32. Esfuerzos presentes durante la DRFW

Con ayuda de un seguimiento de puntos durante el proceso, se logra determinar el desplazamiento que existe en cada uno de los experimentos, en la figura 33 se muestra el rastreo de puntos para el experimento 8 y 10. De esta manera se realiza la comparación simulación vs prueba experimental.

Cabe mencionar que en la muestra 8 se consideró un corte del rizo, tal cual el proceso comprende, siendo esta muestra la única que lo toma en cuenta.

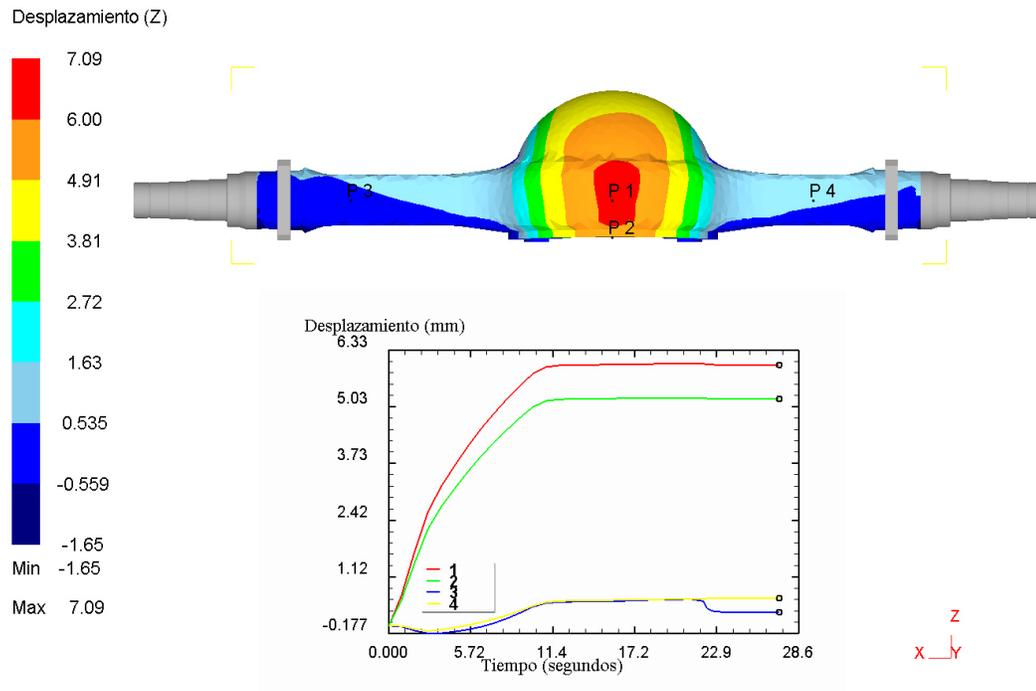


Figura 33. Desplazamiento en Z (mm), experimentación 8 y 10.

La tabla 22 muestra los datos registrado para el experimento 8 y 10, así como la información obtenida en el DOE y la diferencia que existe entre las mismas. Como se mencionó anteriormente, debido a que la pieza analizada fue ingresada como única y no como un ensamble, no se puede registrar un movimiento real en el anillo o lo que el DOE determina como  $\alpha$ .

Tabla 22. Resultados del desplazamiento durante el proceso de soldadura por fricción para las condiciones convencionales 8 y 10.

Dirección	Condición Experimental 8 (mm)	Simulación Condición 8 (mm)	Cambio (mm)	Experimental Condición 10 (mm)	Simulación Condición 10 (mm)	Cambio (mm)
$\alpha$	0.12	--	--	0.03	--	--
$\beta$	3.28	5.99	2.71	13.71	5.99	7.72
$\lambda - \epsilon$	0.29	0.31	0.02	0.12	0.31	0.19
$\delta - \zeta$	0.11	0.63	0.52	0.58	0.63	0.05

Es clara la diferencia en la muestra 10, y según los datos del DOE se determina que esta deformación fue post proceso. Pero, un dato a considerar es que la muestra 8 fue realizada durante la planta corría este modelo, y no hubo necesidad de realizar un acomodo de herramientas y parámetros para el cambio de modelo, mientras que en la 10, se realizó en otra fecha ajustando el modelo a esta, pudiendo ser una variación ocasionada al ajuste. Con esta información es posible validar que el corte de rizo no genera un esfuerzo considerable para deformar más de lo que ya hizo el proceso,

#### *Experimento No.1- Modificación de la fase 3: de forja*

En el experimento número 1, se considera un cambio únicamente en la fase 3 de forja, es decir, la fase 2 de calentamiento debe ser con parámetros idóneos y deben ser calculadas ambas para obtener un desplazamiento más exacto.

En la fase 3 según el DOE mantiene la Fuerza, debido a que es necesario cuidar la integridad de la máquina, modificando la duración de la misma a 6.5 seg.

Se observa en la figura 34 el desplazamiento de cada parámetro de Z contra el centro teórico de la funda. Mostrando estos datos obtenidos por el rastreo de puntos en la tabla 23.

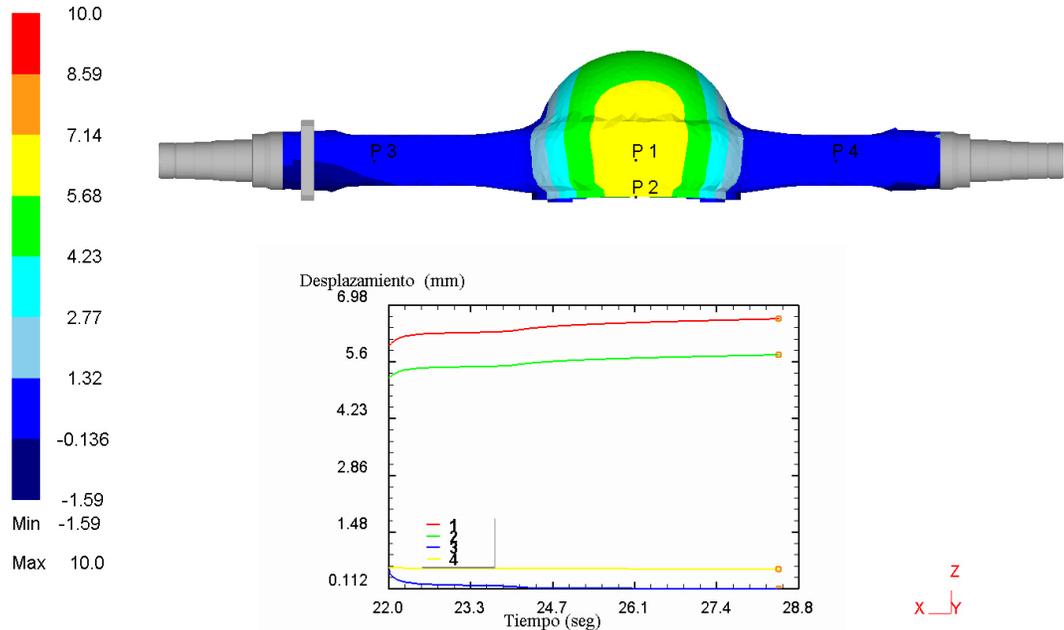


Figura 34. Desplazamiento en Z en el experimento 1.

Tabla 23. Tabla Resultados del desplazamiento durante el proceso de soldadura por fricción para la condición experimental No.1

Dirección	Experimental (mm)	Simulación (mm)	Cambio (mm)
$\alpha$	0.90	--	--
$\beta$	6.42	6.65	0.23
$\lambda - \epsilon$	0.3	0.11	0.19
$\delta - \zeta$	0.96	0.60	0.36

Se observa como el valor de beta ( $\beta$ ) en la simulación tiene un valor mayor al del experimental, aunque este es muy pequeño a comparación del total de ambos valores, mientras que gama – épsilon ( $\lambda - \epsilon$ ) presentan un mayor acercamiento a lo real.

El valor presentado en la pata larga representado por delta – dseta ( $\delta - \zeta$ ) sigue la tendencia a ser mayor al de la corta, debido a la longitud que tiene, es más sencillo se flexione.

### Experimento No.2- Modificación de la fase de forja 3

En el experimento número dos, al igual que el anterior, la modificación se realiza en la fase 3 de forja, donde la fuerza se mantiene como parámetro idóneo, pero la duración de aplicación de la fase reduce a 3.5 segundos (figura 35).

Fue necesario simular la fase 2 con parámetros idóneos antes de modificar la fase 3 como se pide.

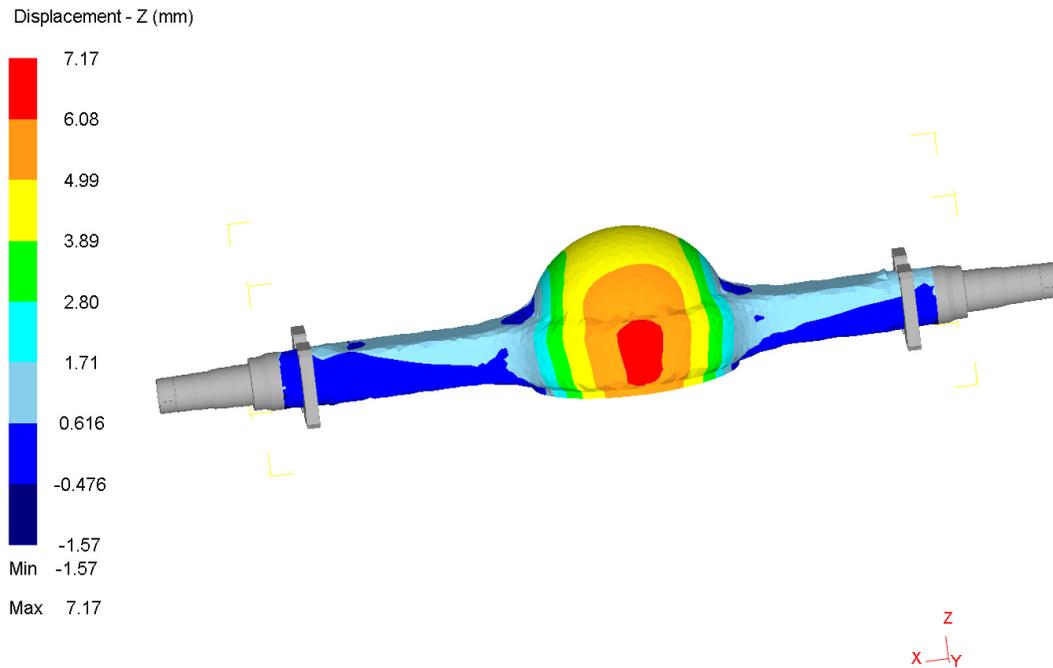


Figura 35. Desplazamiento en Z contra centro teórico, prueba experimental No 2

Los datos recopilados de salida de este experimento se encuentran en la tabla 24, donde se observa una diferencia considerable en la distancia beta, así como en la pata corta.

El comportamiento de la simulación es muy similar al del experimento anterior, pero en el experimental se registran grandes deformaciones, esto puede ser

debido a que la máquina ajuste grandes Fuerzas para lograr la correcta unión en menor tiempo, mientras que en la simulación solo se utilizan los parámetros idóneos reducidos al tiempo definido por el DOE.

Tabla 24. Tabla Resultados del desplazamiento durante el proceso de soldadura por fricción para la condición experimental No.2

Dirección	Experimental (mm)	Simulación (mm)	Cambio (mm)
$\alpha$	0.24	--	--
$\beta$	12.65	6.06	6.59
$\lambda - \epsilon$	0.99	0.34	0.65
$\delta - \zeta$	0.74	0.62	0.12

*Experimento No.3- Modificación de la fase 3 de forja*

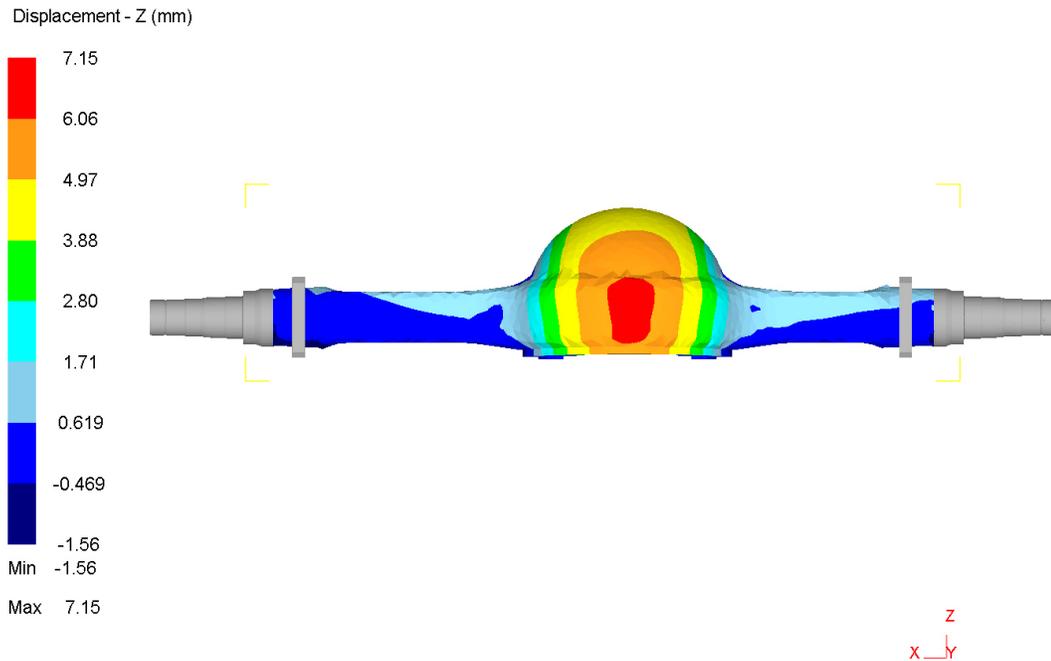


Figura 36. Desplazamiento en Z en prueba experimental No 3

Durante el experimento 3 (figura 36) se utiliza la fase 2 ideales del proceso, y se realizó un ajuste en la fase 3 de forja, reduciendo la F máxima aplicada a

665KN, durante una duración de 3.5 segundos, es decir, menos fuerza y tiempo del ideal.

En la tabla 25 se muestra claramente un acercamiento muy marcado en la deformación de las patas tanto corta como larga, mientras que la simulación muestra un desplazamiento muy marcado en beta, resultando en algo considerable contra el experimental. Esto pudo ser ocasionado a la programación de la simulación debido a intercambiar las fuerzas ideales las cuales se encuentran fluctuando de acuerdo al requerimiento del proceso, por fuerzas constantes máximas.

Tabla 25. Tabla Resultados del desplazamiento durante el proceso de soldadura por fricción para la condición experimental No.3

Dirección	Experimental (mm)	Simulación (mm)	Cambio (mm)
$\alpha$	0.44	--	--
$\beta$	1.92	6.0	4.08
$\lambda - \epsilon$	0.54	0.62	0.08
$\delta - \zeta$	0.28	0.29	0.01

*Experimento No.4- Modificación de la fase de fricción 2*

En este tipo de experimentos, donde se modifica la fase de fricción 2 (calentamiento), se debe considerar cerrar el proceso para poder observar el cambio de acuerdo al proceso completo, es decir, aunque la modificación sea en la fase 2, es necesario correr la fase 3 ideal para tomar los desplazamientos.

Dicho esto, para su configuración se utiliza una Fuerza de 305KN en la fase 2, con una duración mayor a la ideal de 25 segundos.

En la figura 37 se muestra la concentración del movimiento en Z de la funda durante el proceso DRFW bajo las condiciones modificadas del experimento.

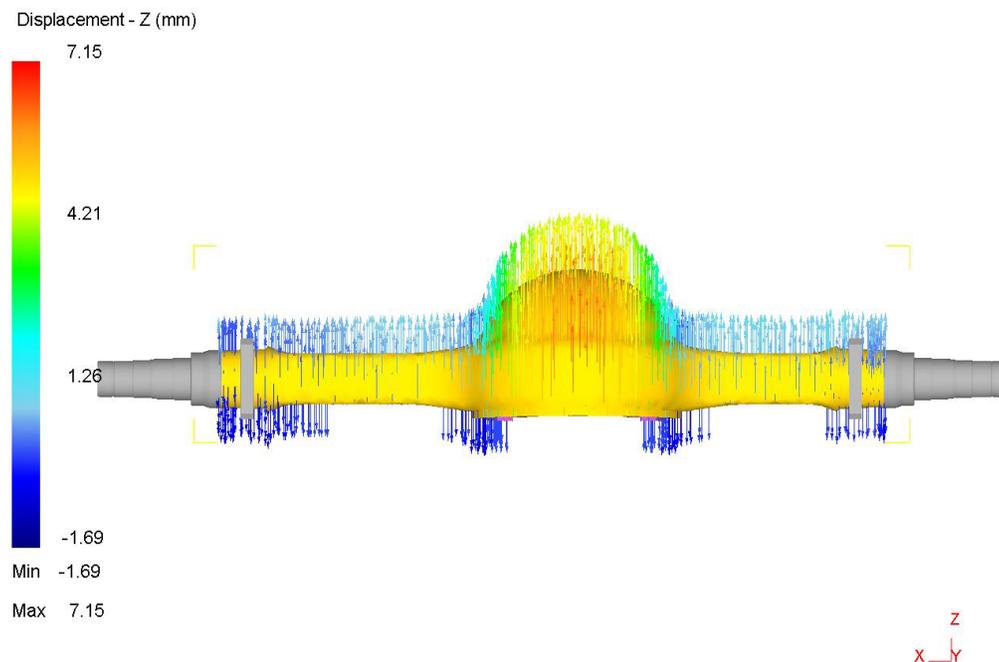


Figura 37. Desplazamiento en Z en prueba experimental 4

En la tabla 26 se muestran los resultados de este experimento, lo cual muestra una diferencia marcada de la simulación contra lo experimental.

Tabla 26. Tabla Resultados del desplazamiento durante Fase 2 del proceso DRFW para la condición experimental No.4

Dirección	Experimental (mm)	Simulación (mm)	Cambio (mm)
$\alpha$	0.85	--	--
$\beta$	0.77	6.04	5.27
$\lambda - \epsilon$	0.08	0.24	0.16
$\delta - \zeta$	0.42	0.67	0.25

Esta diferencia puede deberse a utilizar la fuerza constante cuando esta rebasaba el límite establecido por el DOE, sin fluctuar como lo haría el sistema real del proceso.

En la Tabla 27 se observan los resultados ya contra el proceso completo finalizado, donde claramente se aprecia que la Fase 3 no genera una gran diferencia en el proceso cuando se trata de ocasionar una deformación.

Tabla 27. Tabla Resultados del desplazamiento durante Fase 3 del proceso DRFW para la condición experimental No.4

Dirección	Experimental (mm)	Simulación (mm)	Cambio (mm)
$\alpha$	0.85	--	--
$\beta$	0.77	6.05	5.28
$\lambda - \epsilon$	0.08	0.24	0.16
$\delta - \zeta$	0.42	0.67	0.25

*Experimento No.5- Modificación de la fase de fricción 2*

Para el experimento 5 se considera de igual manera una modificación únicamente en la fase 2 del proceso, considerando analizarse lo resultante con una fase 3 ideal (figura 38).

Dicho esto se considera una Fuerza máxima de 405KN con una duración de 19 segundos, es decir, una fuerza mayor a la ideal pero con una duración menor.

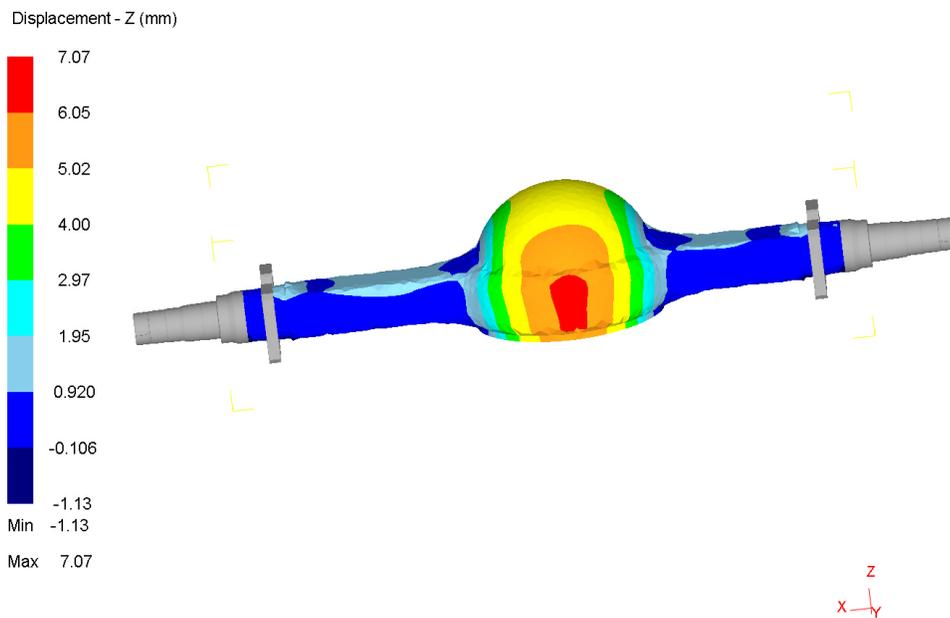


Figura 38. Desplazamiento en Z de prueba experimental No 5

Acorde a la tabla 28 la simulación presenta desplazamientos mayores en comparación a la experimental, aunque siendo estos no tan diferentes dando una idea clara de cómo se comporta la pieza bajo estas condiciones modificadas.

Tabla 28. Tabla Resultados del desplazamiento durante fase 2 del proceso DRFW para la condición experimental No.5

Dirección	Experimental (mm)	Simulación (mm)	Cambio (mm)
$\alpha$	0.55	--	--
$\beta$	4.95	5.98	1.03
$\lambda - \epsilon$	0.16	0.59	0.43
$\delta - \zeta$	0.49	0.58	0.09

Aún es necesario calcular la fase 3, por lo que en la tabla 29 se presenta el desplazamiento ya finalizado el proceso.

Tabla 29. Tabla Resultados del desplazamiento durante fase 3 del proceso DRFW para la condición experimental No.5

Dirección	Experimental (mm)	Simulación (mm)	Cambio (mm)
$\alpha$	0.55	--	--
$\beta$	4.95	6.0	1.05
$\lambda - \epsilon$	0.16	0.6	0.44
$\delta - \zeta$	0.49	0.59	0.10

### *Experimento No.6- Modificación de la fase de fricción 2*

El experimento 6 que se observa en la figura 39 es similar que el anterior, pues modifica su fase dos con una fuerza máxima de 405 KN, mayor a la ideal, y con una duración de fase de 25 segundos, también mayor a la duración ideal.

La fase 3 se mantiene con los parámetros ideales.

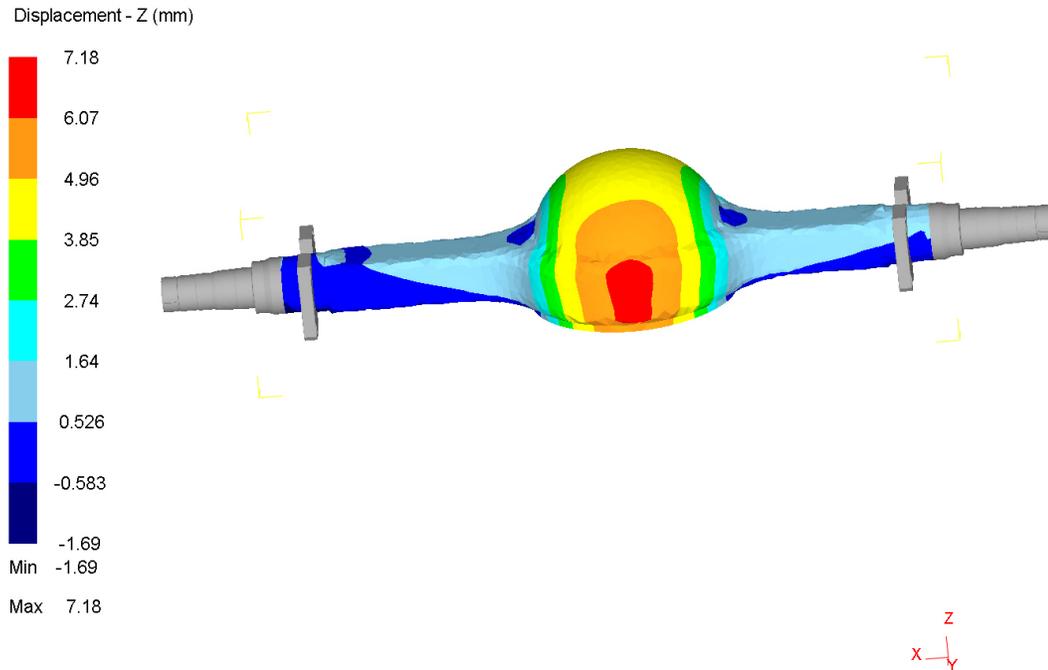


Figura 39. Desplazamiento en Z de prueba experimental No 6

En la tabla 30, se muestran los valores a completar el proceso de DRFW, la información obtenida muestra un aumento muy similar en beta a las anteriores, pero este comportamiento no se observa de manera experimental, puede ser debido a las fluctuaciones de fuerza ( $t$ ) que tiene el proceso ideal, mientras que la simulación utiliza fuerzas constantes.

Tabla 30. Tabla Resultados del desplazamiento durante Fase 2 y 3 del proceso DRFW para la condición experimental No.6

Dirección	Experimental (mm)	Simulación (mm)	Cambio (mm)
$\alpha$	0.82	--	--
$\beta$	3.93	6.07	2.14
$\lambda - \epsilon$	0.35	0.23	0.12
$\delta - \zeta$	0.84	0.67	0.17

Una vez finalizado el proceso con todas sus fases correspondientes, se observó que no hubo ningún cambio en la información obtenida, por lo que la tabla 30 muestra el desplazamiento tanto en la fase 2 como en la 3.

*Experimento No.7- Modificación de la fase de fricción 2*

Para el experimento 7 se consideró una modificación en la fase 2, donde la F ideal se reduce a 305 KN a la par de la duración menor a la ideal definida en 19 segundos (figura 40).

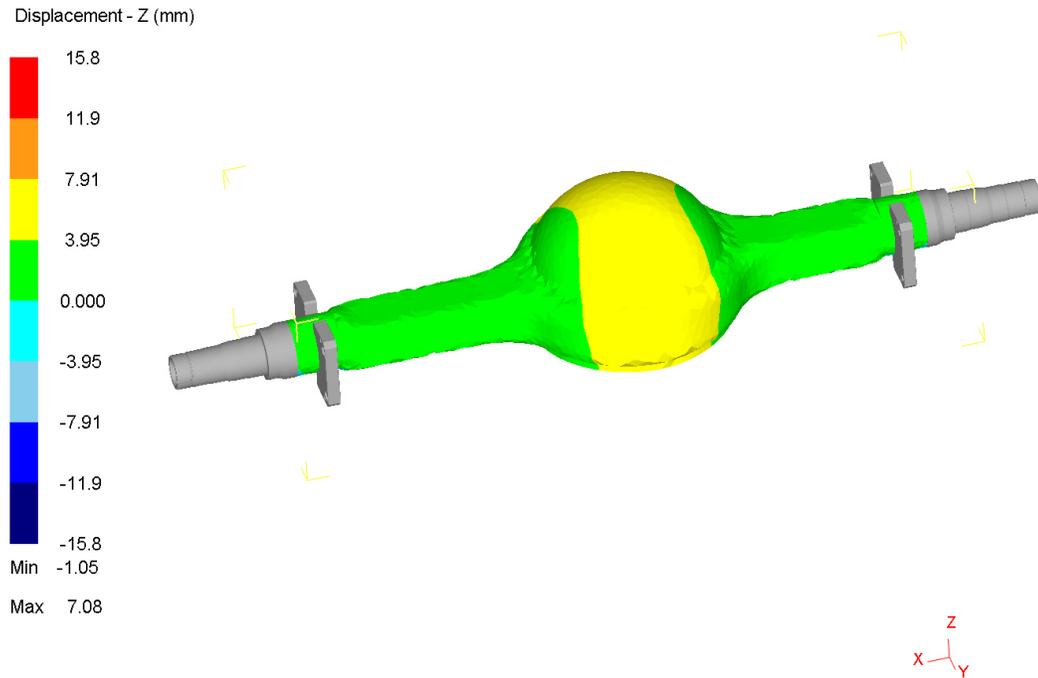


Figura 40. Desplazamiento en Z en la prueba experimental No 7

Los resultados preliminares, es decir, de la fase 2 son recopilados en la tabla 31, donde aún es preciso analizar la fase 3 ideal para cerrar el proceso

Tabla 31. Tabla Resultados del desplazamiento durante Fase 2 del proceso DRFW para la condición experimental No.6

Dirección	Experimental (mm)	Simulación (mm)	Cambio (mm)
$\alpha$	1.25	--	--
$\beta$	4.54	5.99	1.45
$\lambda - \epsilon$	0.05	0.58	0.53
$\delta - \zeta$	0.90	0.58	0.32

Tabla 32. Tabla Resultados del desplazamiento durante Fase 3 del proceso DRFW para la condición experimental No.6

Dirección	Experimental (mm)	Simulación (mm)	Cambio (mm)
$\alpha$	1.25	--	--
$\beta$	4.54	5.99	1.45
$\lambda - \epsilon$	0.05	0.59	0.54
$\delta - \zeta$	0.90	0.59	0.31

Acorde a la tabla 32 que muestra los datos finales del experimento, es posible determinar la diferencia aunque no muy considerable de la simulación contra lo experimental, pero la variación en beta es al igual que en los demás experimentos, muy marcada y similar.

*Experimento No.9- Modificación de la fase de forja 3*

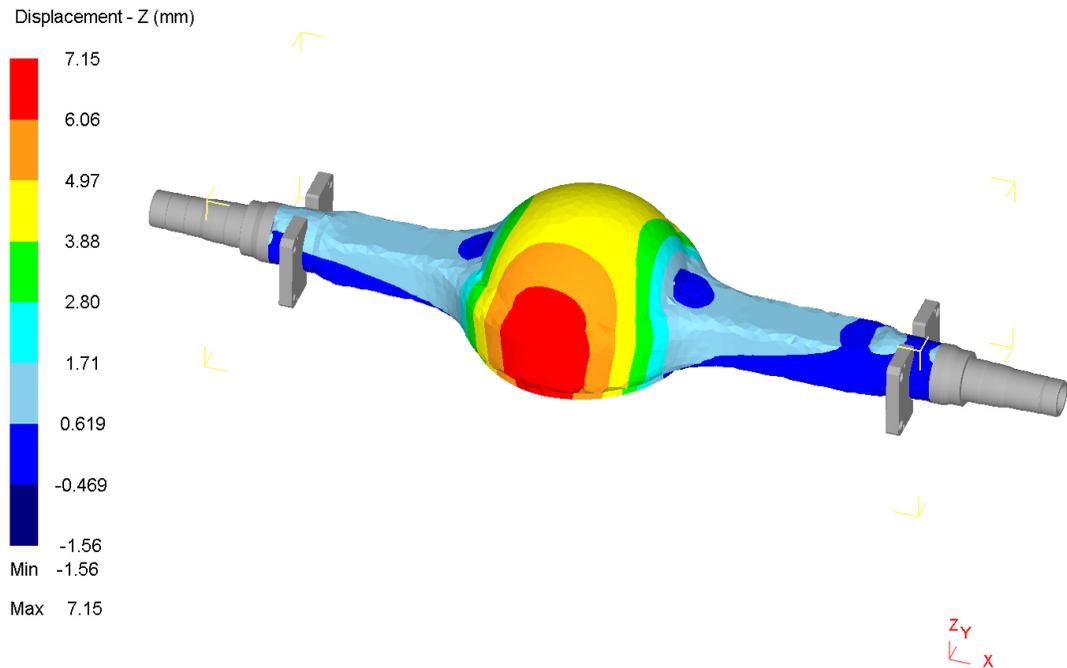


Figura 41. Desplazamiento en Z de la prueba experimental No 9

En este experimento se considera la modificación en la Fase 3, por lo que la fase 2 pasa a ser la ideal, siendo los parámetros utilizados para la forja los siguientes: 605 KN (menor que la ideal) durante 6.5 segundos (mayor a la duración ideal), se puede observar en la figura 41.

Obteniendo como valores finales los siguientes mostrados en la tabla 33.

Tabla 33. Tabla Resultados del desplazamiento durante el proceso de soldadura por fricción para la condición experimental No. 9

Dirección	Experimental (mm)	Simulación (mm)	Cambio (mm)
$\alpha$	0.36	--	--
$\beta$	5.83	6.04	0.21
$\lambda - \epsilon$	1.63	0.30	1.33
$\delta - \zeta$	0.37	0.62	0.25

El comportamiento en Z en el análisis numérico es de acuerdo a lo esperado debido a los anteriores casos, la variación se consideró deberse al cambio de fuerzas utilizadas, donde al ser menor no afecta de igual manera a la pata corta como a la larga, siendo esta última más susceptible a la deflexión debido a su longitud mayor en comparación a la pata corta.

Para poder determinar si las simulaciones tienen una diferencia significativa o no de acuerdo a los experimentos, se utilizaron las pruebas t (t-test en inglés), las cuales permiten comparar una serie de datos con otra y verificar si hay diferencia o no entre ellas.

De acuerdo a la información obtenida en el portal de la Universidad de Vermont, se determina que si el valor en P obtenido en el t-test es mayor a 0.05, no hay una diferencia significativa, mientras que si el valor es menor de 0.01, existe una diferencia ampliamente significativa [87].

En la tabla 34 se muestra el valor en P de cada experimento-simulación, determinando si existe una diferencia significativa entre ellos.

Tabla 34. Prueba 't' de experimentación vs simulación.

<b>NOMBRE</b>	<b>VALOR P</b>	<b>DIFERENCIA SIGNIFICATIVA</b>
Experimento 1	0.972	No
Experimento 2	0.603	No
Experimento 3	0.509	No
Experimento 4	0.370	No
Experimento 5	0.834	No
Experimento 6	0.792	No
Experimento 7	0.817	No
Experimento 8	0.635	No
Experimento 9	0.913	No
Experimento 10	0.632	No

Según la prueba t que se realizó, es posible determinar que cada uno de los experimentos no presentan una diferencia significativa contra la simulación hecha para cada caso en específico.

El experimento que se considera como “mejor” es el experimento 3, esto debido a la observación de las cantidades de la distancia, cuyo cambio de dimensiones es muy pequeñas en comparación a los demás experimentos.

## CAPÍTULO 6

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se logró desarrollar un modelo computacional para estudiar el conjunto de elementos durante el proceso de soldadura por fricción rotativa directa.

La geometría de la funda-husillo influyó considerablemente en el comportamiento mecánico durante el análisis estructural, medidas que se pueden tomar sin tener que adoptar un material con altas propiedades mecánicas para mejorar el desempeño mecánico general del ensamble.

Entre más área de contacto y deslizamiento tenga la funda, se obtendrá mayores esfuerzos, y si el husillo cuenta con poca área de apoyo y deslizamiento.

Se lograrán mejores resultados en cuestión al flujo mecánico del material cuando se utiliza un desplazamiento ( $t$ ) en un análisis axi-simétrico de torsión bidimensional, pero cuando se utiliza un análisis 3D, se opta por utilizar fuerza ( $t$ ) debido a que de esta manera se asegura obtener un esfuerzo y un desplazamiento muy cercano al registrado experimentalmente.

Se recomienda hacer un estudio de variables de proceso ya que se comprobó que juega un papel muy importante durante la unión, por lo que se sugiere hacer una prueba uniaxial y reproducir su comportamiento.

De acuerdo a los resultados en la experimentación contra el análisis numérico se observó que los desplazamientos mayores se generan durante la fase 2, siendo en la fase 3 muy mínimos o nulos. Y considerando ver una mejora en el experimento 3, se recomienda reproducir a detalle esta fase para considerar un punto de partida en la optimización del proceso acorde a las especificaciones del producto.

El coeficiente de fricción juega un papel muy importante dentro de este proceso, y siendo un valor que solo puede obtenerse a base de prueba y error, se sugiere ampliamente el determinar el correcto para cada una de las fases de la DRFW.

Se recomienda realizar adaptaciones de herramientas que permitan restringir las deflexiones generadas durante el proceso sin comprometer la integridad del producto, enfocando el punto de la simulación en la fase 2.

## REFERENCIAS

- [1] Sistemas Automotrices de México, S. A. de C.V.; recuperado de [www.sisamex.com.mx/es/productos.html](http://www.sisamex.com.mx/es/productos.html). Productos, fundas para eje motriz. 2011.
- [2] Consultor: Manejo Inteligente. El diferencial, recuperado de [www.manejointeligente.com](http://www.manejointeligente.com); julio 2012.
- [3] Chandrupatla, T. R., Belegundu, A. D., (2012), Introduction to Finite Elements in Engineering, Fourth Edition, Rowan University en Glassboro, New Jersey, y The Pennsylvania State University en University Park, Pennsylvania.
- [4] Rodríguez Montes, J., Castro Martínez, L. y del Real Romero, J.C., (2006), Procesos industriales para materiales metálicos, Segunda Edición, Editorial Vision Net.
- [5] Groover, M.P., (2007), Fundamentos de manufactura moderna, Lehigh University, Tercera Edición, Editorial Mc GrewHill, pp. 1022.
- [6] Molera Solà, P., (1992), Soldadura Industrial: clases y aplicaciones, MarcomboBoixareu Editores, Productica, pp. 128.
- [7] Jeffus, L., (2009), Soldadura: principios y aplicaciones, Editorial Paraninfo, pp. 944.
- [8] Wang, R., Zhang, J., Serizawa, H., Murakawa, H., (2009), Study of welding inherent deformations in thin plates based on finite element analysis using interactive substructure method, Materials and design, volumen 30, pp. 3474-3481.
- [9] Chen, C. M, Kovacevic, R., (2003), Finite element modeling of friction stir welding-thermal and thermomechanical analysis, International Journal of Machine Tools & Manufacture, volumen 43, pp. 1319-1326.
- [10] Mishra, R. S., Ma, Z. Y., (2005), Friction stir welding and processing, Materials Science and Engineering R50, pp. 1-78.

- [11] González León, J.A., Domínguez González, A., Hernández Franco, R. A., Calero Ramírez, P.G., (2003), Soldadura por fricción en materiales metálicos y polímeros, Universidad Autónoma de Querétaro, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Instituto tecnológico de Celaya, pp. 5.
- [12] Johnson, R. y Kallee, S., (1999), Friction Stir Welding, AZoM: Materials Science and Engineering Information, Materials World, Volumen 7 No. 12, pp. 751-753.
- [13] W. M. Thomas y E. D. Nicholas, (1997), Friction stir welding for the transportation industries, Materials and Design, Volumen 18, No. 4 6, pp. 269-273.
- [14] D'Alvise, L., Massoni, E., Walløe, S. J., (2002), Finite element modelling of the inertia friction welding process between dissimilar materials, Journal of Materials Processing Technology 125-126, pp. 387-391.
- [15] Manufacturing Technology, Inc., (1999), Friction Welding Manual, recuperado de [www.mtiwelding.com](http://www.mtiwelding.com), pp.60.
- [16] Thompson Friction Welding, Friction Welding, recuperado de [www.thompson-friction-welding.co.uk](http://www.thompson-friction-welding.co.uk), pp. 8.
- [17] Shugen Xu, Weiqiang Wang, Yinglei Chang, (2014), Using FEM to predict residual stresses in girth welding joint of layered cylindrical vessels, International Journal of Pressure Vessels and Piping, pp. 1-7.
- [18] The Welding Institute (TWI), What is linear friction welding, technical knowledge recuperado <http://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/process-faqs/faq-what-is-linear-friction-welding/>.
- [19] APCI, LLC, A Subsidiary of StuppBros., Inc., (2009), Linear frictionweldingtechnology, con apoyo del Instituto de Soldadura Edison y la Universidad Purde, recuperado de [www.apcisystems.com/LFW.htm](http://www.apcisystems.com/LFW.htm).
- [20] Vilaça, P., Gandra, J., Vidal, C., (2012), Linear friction based processing technologies for aluminum alloys: surfacing, stir welding and stir channeling, Aluminium Alloys – New Trends in Fabrication and Applications, Capítulo 7, pp. 159-197.

- [21] Manufacturing Technology, Inc., (S.F.), Rotational Friction Welding, recuperado de [www.mtiwelding.com](http://www.mtiwelding.com).
- [22] B.A. Humphreys BSc., MSc., PhD, (2007), A practical guide to friction welding, Thompson Friction Welding, Hereward Rise, Halesowen, West Midlands, B62 8AN, pp. 38
- [23] Thompson Friction Welding, (2013), Operation, Installation and Maintenance Manual.
- [24] PaduanAlves, E., PiorinoNeto, F., Ying An, C., Castorino da Silva, E., (2012), Experimental determination of temperatura during rotary friction welding of AA1050 aliminum with AISI 304 Stainless Steel, J. Aerosp. Technology Management, Sao José dos Campos, Volumen 4, No. 1, pp. 61-67.
- [25] Kalle, S. y Nicholas, D., TWI (1999), Friction and forgeweldingprocessesfortheautomotiveindustry, presentado en la conferencia del cuerpo de ingeniería, celebrado en Detroit, EUA, paper No.99-IBECC-13).
- [26] ISO Online BrowsingPlatform (OBP), (S.F.), recuperado de <http://www.iso.org/obp/ui#iso:std:iso:857:-1:ed-1:v1:en>
- [27] Inertia friction welding demonstration, Manufacturing Technology, Inc., (2009). Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=-aEuAK8bsQg>. (2015).
- [28] Friction welding API drill pipe for oil exploration, (2008), Thompson Friction Welding, recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=51Zs8iaydt0>, (2015).
- [29] The Welding Institute, What is Orbital friction welding, thecnicla knowledge recuperado <http://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/process-faqs/faq-what-is-orbital-friction-welding/>.
- [30] Ding, R. J., Carter, R. W., (2001), Orbital friction stir weld system, Número de patente: US 6,259,052 B1, pp.5.

- [31] Raab, U., Levin, S., Wagner, L., Heinze, C., (2014), Orbital friction welding as an alternative process for blisk manufacturing, *Journal of Materials Processing Technology*, pp. 189-192.
- [32] Dynamic Connecting (Dyconn), (S.F.), (Multi)orbital friction welding, The difference between orbital and spin friction welding, recuperado de <http://www.dyconn.de/en/index.php?page=502/>.
- [33] Maalekian, M., Cerjak, H., (2015), Modelling the orbital friction welding of pearlitic Steel bars, *Trends in Welding Research, Proceedings of the 8th conference*, pp.736-741.
- [34] Hoffman, E. G., (2011), *Jig and Fixture Design, Delmar Learning Drafting Series, Quinta Edición*, pp. 370.
- [35] Nee, G. J., Dufraine, W., Evans, y J. V., Hill, M., (2010), *Fundamentals of Tool Design, Society of Manufacturing Engineers (SME), SextaEdición*, pp.446.
- [36] Madsen, D. P., y Madsen, D. A. (2012), *Engineering Drawing Design, Delmar, Cengage Learning, SextaEdición*, pp. 1297.
- [37] Boyes, W. E., y Bakerjia, R., (1989), *Handbook of Jig and Fixture Design, Society of Manufacturing Engineers (SME), SegundaEdición*.
- [38] Chandrupatla, T. R., Belegundu, A. D., (2002), *Introduction to Finite Elements in Engineering, Editorial Prentice-Hall, Inc., TerceraEdición*, pp. 455.
- [39] C. Chapra, S., P. Canale, R., (2007), *Numerical Methods for Engineers, Quinta edición, Editorial Mc Graw Hill*, pp. 965.
- [40] T. Pepelnjak, K. Kuzman, (1998), Adaptable tooling sets for metal forming of geometrically similar products, *Journal of Materials Processing Technology* 80-81, pp. 413-420.
- [41] Leed, R. M., (2003), *Tool and die making troubleshooter, Society of Manufacturing Engineers*, pp. 264.
- [42] Spitler, D., Lantrip, J., Nee, J., Smith, A. David (S.F.), *fundamentals of tool design, Quinta Edición, Society of Manufacturing Engineers*, pp. 404.

- [43] Rivin, E. (2000), Tooling Structure: Interface between cutting edge and machine tool, Annals of the CIRP, Volumen 49, pp. 591-634.
- [44] P. H. Joshi, (2010), Jigs and Fixtures, Tercera Ediciòn, Editorial Tata McGraw Hill Education Private, pp. 276
- [45] Freivalds, A., Niebel, B., (S.F.), Niebel's Methods, Standars, and Work Design, Doceava Ediciòn, pp. 722.
- [46] Martin C. Mataya, (1999), Simulating microstructural evolution during the hot working of alloy 718, JOM Volumen 51, No. 1, pp. 18-26.
- [47] Jaeger et al., (2012), Inconel 718 Single and Multipass Modelling of Hot Forging, Superalloys 2012 International Symposium, TMS, pp. 663-673.
- [48] Alexander R. Bandar, et al., (2007), Microstructure Modeling of the Superalloys Ingot Breakdown Process, TMS, pp. 1-10.
- [49] Luis Reyes Osorio, et al., (2012) Microstructural Analysis of Near Delta Solvus Thermo mechanical Compresion of Iconel 718 Superalloy, MS&T CD: Proceeding from the Materials Science & Technology Conference, Pittsburg PA.
- [50] W. Roberts, H. Boden y B. Ahlblom, (1979), Dynamic Recrystallization Kinetics, Met. Science, Volumen 13, pp. 195-205.
- [51] M. J. Luton y C. M. Sellars, (1969), Dynamic recrystallization in Nickel and Nickel-Iron Alloys during High-Temperature Deformation, Acta Met., Volumen 17, pp. 1033.
- [52] Heck K., Smith D., Smith J., Wells, D., Holderby, M., (1988), The physical metallurgy of a silicon-containing low expansion superalloy, The Metallurgical Society Superalloys, pp. 151-160.
- [53] Kusabiraki K., Amada E., Oka T., (1996), Precipitation and Growth of "γ" Phase in an Fe-38-Ni-13Co-4.7Nb Superalloy, ISIJ International, Volumen 36, No. 2, pp. 208-214.
- [54] Luis Reyes Osorio et al., (2012), Microstructural Modeling of Fe-Ni-Co Alloy during Hot Compression, MS&T 2012 CD: Proceedings from the Materials Science & Technology Conference, Pittsburgh, PA.

- [55] Carlos A. Martínez Soto, (2008), Efectos Microestructurales en los Procesos de Deformado en Caliente y Tratamiento Térmico en la Aleación de Inconel 909, Tesis de Maestría, UANL.
- [56] A. Kluge, et al., (1994), Control of Strain and Temperature Distribution in the Ring Rolling Process, *J. Mater. Process. Technol.* 45, pp. 137-141.
- [57] S. G. Xu, Q. X. Cao, (1994), Numerical simulation of the microstructure in the ring rolling of hot steel, *Journal of Materials Processing Technology*, 43, pp. 221-235.
- [58] J. Huez, J-L. Noyes y J. Coupu, (2001), Three-Dimensional Finite-Element Simulation of Hot Ring Rolling, *Superalloy 718*, 625, 706
- [59] Jong-TaekYeom, Eun-Jeoung Jung, (2010), FE simulation of Microstructure Evolution During Ring Rolling Process of Iconel Alloy 783, 7o SimposiumInternacional en Superaleación 718 y derivados en TMS.
- [60] Ho Won Lee, Yong-TaekIm, (2010), Cellullar Automata Modelling of Grain Coarsening and Refinement during the Dynamic Recrystallization of Pure Copper, *Materials Transactions*, Volumen 51, No. 9, pp. 1614-1620.
- [61] Yang He, et al. (2011), Review on cellular automata simulations of microstructure evolution during metal forming process: Grain coarsening, recrystallization and phase transformation, *Science China, Technological Sciences* Vol. 54 N8, pp. 2107-2118.
- [62] D. Huang, W.T. Wu, D. Lambert, y S. L. Semiatin, (2001), Computer simulation of microstructure evolution during hot forging of Waspaloy and nickel alloy 718, *Microstructure Modeling and Prediction during Thermomechanical Processing, Proceedings*, Eds. R. Srinivasan, S. L. Semiatin, A. Beaudoin, S. Fox y Z. Jin, TMS, pp. 137-146.
- [63] Schmicker, D., Persson, P.-O., Strackeljan, J., (2014), Implicit Geometry Meshing for the simulation of Rotary Friction Welding, *Journal of Computational Physics* 270, pp. 478-489.
- [64] Schmicker, D., Naumenko, K., Strackeljan, J., (2013), A robust simultion of Direct Drive Friction Welding with a modified Carreu fluid constitutive

- model, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Volumen 265, pp. 186-194.
- [65] Scientific Forming Technologies Corporation, (2014), DEFORM v11.0 integrated 2d3d system manual, 2545 Farmers Drive, Suite 200, Columbus, Ohio 43235, pp.4224
- [66] Reyes Castañeda, P., (1980), Diseño de experimentos aplicados, Editorial Trillas México, 2ª Edición.
- [67] Reyes, P., (2007), Diseño de Experimentos Factoriales 2K, pp. 17.
- [68] Ferré, J., (S.F.), El diseño factorial completo 2k, Grupo de Quimiometría y química orgánica, Universidad Rovira i Virgili (Tarragona), pp. 10
- [69] Anónimo, (S.F.), Capítulo 6: Diseños Factoriales 2k.
- [70] The Engineering ToolBox (S.F.) Recuperado de la web [http://www.engineeringtoolbox.com/friction-coefficients-d\\_778.html](http://www.engineeringtoolbox.com/friction-coefficients-d_778.html)
- [71] Maegawa, S., Itoigawa, F., Nakamura, T., (2015), Effect of normal load on friction coefficient for sliding contact between rough rubber surface and rigid smooth plane, Trilogry International 92, pp. 335-343
- [72] Maegawa, S., Itoigawa, F., Nakamura, T., (2015), Effect of normal load on friction coefficient for sliding contact between rough rubber surface and rigid smooth plane, Trilogry International 92, pp. 335-343
- [73] Seifi, R., Abbasi, K., (2015), Friction coefficient estimation in shaft/bush interference using finite element model updating, Engineering Failure Analysis 57, pp. 310-332
- [74] Buffa, G., Cammalleri, M., Campanella, D., Fratini, L., (2015), Shear coefficient determination in linear friction welding of aluminum alloys, Materials and Design 82, pp. 238-246
- [75] Ajith, P. M., Husain, T. M., Sathiya, P., Aravindan, S., (2015), Multi-objective optimization of continuous drive friction welding process parameters using response surface methodology with intelligent optimization algorithm, Journal of Iron and Steel Research, International, Volumen 22, pp. 954-960

- [76] Bhamji, I., Preuss, M., Threadgill, P. L., Moat, R. J., Adisson, A. C., Peel, M. J., (2010), Linear friction welding of AISI 316L stainless steel, *Materials Science and Engineering: A*, Volumen 528, pp. 680-690
- [77] Soundararajan, V., Zekovic, S., Kovacevic, R., (2005), Thermo-mechanical model with adaptive boundary conditions for friction stir welding of A1 6061, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 45, pp. 1577-1587
- [78] Yang, X., Li, W., Li, J., Xiao, B., Ma, T., Huang, Z., Guo, J., (2015), Finite element modeling of the linear friction welding of GH4169 superalloy, *Materials and Design* 87, pp. 215-230
- [79] Tamai, Y., Inazumi, T., Manabe, K., (2015), FE forming analysis with nonlinear friction coefficient model considering contact pressure, sliding velocity and sliding length, *Journal of Materials Processing Technology* 227, pp. 161-168
- [80] Maegawa, S., Itoigawa, F., Nakamura, T., (2015), Effect of normal load on friction coefficient for sliding contact between rough rubber surface and rigid smooth plane, *Tribology International* 92, pp. 335-343
- [81] Kalsi, N. S., Sharma, V. S., (2011), A statical analysis of rotary friction welding of steel with varying carbon in workpieces, *International Journal Advance Manufacture Technology* 57, pp. 957-967
- [82] Schmicker, D., Naumenko, K., Strackeljan, J., (2013), A robust simulation of direct drive friction welding with a modified Carreau fluid constitutive model, *Comp. Methods Appl. Mech. Engrg.* 265, pp. 186-194
- [83] Ulysse, P., (2002), Three-dimensional modeling of the friction stir-welding process, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 42, pp. 1549-1557
- [84] Sahin, M., (2004), Simulation of friction welding using a developed computer program, *Journal of Materials Processing Technology* 153-154, pp. 1011-1018

- [85] El-Hadek, M. A., (2014), Numerical Simulation of the inertia friction welding process of dissimilar materials, The Minerals, Metals & Materials Society and ASM International. pp. 2346-2356
- [86] Winiczenko, R., Kaczorowski, M., (2013), Friction welding of ductile iron with stainless steel, Journal of Materials Processing Technology 213, pp. 453-462
- [87] University of Vermont, (S.F.), Chapter 7: Comparing means using t-tests, Fundamental textbook.

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Procedimientos de soldadura comúnmente utilizados [6] .....	6
Tabla 2. Combinación de materiales posibles en la soldadura por fricción.....	9
<i>Tabla 3. Fases de soldadura por fricción lineal (LFW) [19].</i> .....	12
<i>Tabla 4. Fases generales para el proceso de RFW.</i> .....	18
Tabla 5. Materiales utilizados de piezas involucradas en el proceso DRFW. ...	34
Tabla 6. Fases utilizadas por Thompson en la DRFW. ....	35
Tabla 7. Esquema de fases DRFW según Thompson. ....	36
Tabla 8. Descripción Variables utilizadas en el esquema de fases.....	36
Tabla 9. Solucionadores (solvers) recomendados según su aplicación.....	39
Tabla 10. Verificación dimensional pre/post-proceso.....	42
Tabla 11. Entrada y salida dimensional (Pre-proceso y post proceso) en el proceso de soldadura por fricción .....	43
Tabla 12. Parámetros del sistema DRFW.....	43
Tabla 13. Diseño factorial $2^3$ en el análisis del proceso de soldadura por fricción rotatoria. ....	44
Tabla 14. Parámetros típicos en el proceso de soldadura por fricción rotativa. .	45
Tabla 15. Parámetros experimentales en el proceso de soldadura por fricción rotativa (segunda y tercera fase). ....	45
Tabla 16. Unión 2D Funda-Husillo en Fase 1 (pre-calentamiento). ....	50
Tabla 17. Unión 2D Funda-Husillo en Fase 2 (calentamiento).....	52
Tabla 18. Unión 2D Funda-Husillo en Fase 3 (Forja).....	53
Tabla 19. Desplazamiento pre proceso del centro teórico de la unión funda - husillo (mm) .....	55
Tabla 20. Desplazamiento post proceso del centro teórico de la unión funda - husillo (mm) .....	56
Tabla 21. Desviación del desplazamiento del centro teórico de la unión funda-husillo (mm). ....	56

Tabla 22. Resultados del desplazamiento durante el proceso de soldadura por fricción para las condiciones convencionales 8 y 10.....	62
Tabla 23.Tabla Resultados del desplazamiento durante el proceso de soldadura por fricción para la condición experimental No.1 .....	63
Tabla 24. Tabla Resultados del desplazamiento durante el proceso de soldadura por fricción para la condición experimental No.2.....	65
Tabla 25.Tabla Resultados del desplazamiento durante el proceso de soldadura por fricción para la condición experimental No.3 .....	66
Tabla 26. Tabla Resultados del desplazamiento durante Fase 2 del proceso DRFW para la condición experimental No.4 .....	67
Tabla 27. Tabla Resultados del desplazamiento durante Fase 3 del proceso DRFW para la condición experimental No.4 .....	68
Tabla 28. Tabla Resultados del desplazamiento durante Fase 2 del proceso DRFW para la condición experimental No.5 .....	69
Tabla 29. Tabla Resultados del desplazamiento durante Fase 3 del proceso DRFW para la condición experimental No.5 .....	69
Tabla 30. Tabla Resultados del desplazamiento durante Fase 2 y 3 del proceso DRFW para la condición experimental No.6 .....	70
Tabla 31. Tabla Resultados del desplazamiento durante Fase 2 del proceso DRFW para la condición experimental No.6 .....	71
Tabla 32. Tabla Resultados del desplazamiento durante Fase 3 del proceso DRFW para la condición experimental No.6 .....	72
Tabla 33. Tabla Resultados del desplazamiento durante el proceso de soldadura por fricción para la condición experimental No. 9.....	73
Tabla 34. Prueba 't' de experimentación vs simulación.....	74

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Visualización de funda [2].	2
Figura 2. Aplicación FW en la industria automotriz en general.	7
Figura 3. Aplicación de FW con materiales similares y disimiles [15, 16].	10
Figura 4. Sección de piezas soldadas por fricción [10].	10
Figura 5. Aplicación FEM en la industria automotriz.	10
Figura 6. Visualización de soldadura por fricción lineal [19].	11
Figura 7. Visualización de rizo en pieza unida por LFW [19].	13
Figura 8. Visualización del proceso RFW (A, B).	15
Figura 9. Comportamiento en tiempo (t) de la Unidad Directa.	16
Figura 10. Comportamiento en tiempo (t) de la Unidad por Inercia.	17
Figura 11. Comportamiento en tiempo (t) de la Unidad Híbrida.	17
Figura 12. Muestra de piezas soldadas por RFW.	19
Figura 13. Visualización de proceso OFW.	20
Figura 14. Proceso de soldadura por fricción orbital. (a) la fase de fricción con los ejes de rotación separados ( $\alpha$ ) para producir movimiento relativo y (b) la fase de forja con los ejes realineados.	21
Figura 15. Fricción y forja del proceso soldadura por fricción orbital en una correlación de Fuerza (F) –Tiempo (t).	21
Figura 16. Paso a seguir para el diseño de un nuevo herramental.	22
Figura 17. Pirámide de calidad según ISO [41].	25
Figura 18. Herramental comúnmente utilizado para el proceso RFW.	26
Figura 19. Técnicas de simulación en formado metálico [46].	28
Figura 20. Metodología general.	30
Figura 21. Piezas modeladas geoméricamente en CAD. Soporte de buje (1), buje para mandril (2), mordazas (3), anillo (4), funda 160-16mm (5), cubierta cerrada (6), soporte para pinzas (7), pinzas de sujeción (8), cortadores de rizo (9), husillo (10), pinzas inferiores de sujeción (11) y niveladores de funda (12).	32

Figura 22. Fases proceso DRFW según Thompson [16].	34
Figura 23. Metodología DOE.	41
Figura 24. Flujo mecánico (rizo) debido a proceso DRFW.	47
Figura 25. Sistema 2D Husillo-Funda simplificado. a) Dado de desplazamiento; b) Representación de husillo; c) Representación de media funda (la mitad del largo de la funda completa); d) Dado fijo usado de restricción.	48
Figura 26. Unión 2D funda-husillo en fase 1 (pre-calentamiento).	50
Figura 27. Unión 2D funda-husillo en fase 2 (calentamiento).	52
Figura 28. Unión 2D funda-husillo en fase 3 (forja).	53
Figura 29. Representación 3D de las fases DRFW en análisis bidimensional. a) Fase 1: Pre-calentamiento; b) Fase 2: Calentamiento; c) Fase 3: Forja.	54
Figura 30. Preparación de Funda para su medición.	55
Figura 31. Desplazamiento total (mm) durante el proceso DRFW.	60
Figura 32. Esfuerzos presentes durante la DRFW.	60
Figura 33. Desplazamiento en Z (mm), experimentación 8 y 10.	61
Figura 34. Desplazamiento en Z en el experimento 1.	63
Figura 35. Desplazamiento en Z contra centro teórico, prueba experimental No 2	64
Figura 36. Desplazamiento en Z en prueba experimental No 3	65
Figura 37. Desplazamiento en Z en prueba experimental 4.	67
Figura 38. Desplazamiento en Z de prueba experimental No 5	68
Figura 39. Desplazamiento en Z de prueba experimental No 6	70
Figura 40. Desplazamiento en Z en la prueba experimental No 7	71
Figura 41. Desplazamiento en Z de la prueba experimental No 9	72