



Universidad de Guanajuato

Campus Irapuato-Salamanca

División de Ingenierías

**Análisis experimental y simulación por elemento finito
del proceso de soldadura por fricción (FSW).**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE DOCTOR EN
INGENIERÍA MECÁNICA**

PRESENTA

M.I. GILBERTO VILLALOBOS LLAMAS

ASESORES

DR. ELIAS RIGOBERTO LEDESMA OROZCO

DR. EDUARDO AGUILERA GOMEZ.

SALAMANCA, GTO., DICIEMBRE 2017

ÍNDICE

RESUMEN	1
---------	---

CAPÍTULO 1.

ESTADO DEL ARTE, JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS

1.1 ESTADO DEL ARTE	3
1.2 JUSTIFICACIÓN	3
1.3 OBJETIVOS	4
1.3.1 OBJETIVO GENERAL	4
1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	4

CAPÍTULO 2.

INTRODUCCIÓN

2.1 ANTECEDENTES	5
2.2 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO	6
2.3 VENTAJAS Y DESVENTAJAS	8
2.4 CARACTERÍSTICAS DE LA HERRAMIENTA	9
2.4.1 MATERIALES	9
2.4.2 DIMENSIONES	10
2.4.3 GEOMETRÍA	11

CAPÍTULO 3.

SIMULACIÓN POR ELEMENTO FINITO.

3.1 INTRODUCCIÓN	13
3.2 FORMULACIÓN ALEATORIA LAGRANGIANA EULERIANA (ALE)	13
3.2.1 DESCRIPCIÓN CINEMÁTICA	14
3.2.2 METODOS DE SOLUCIÓN	16
3.3 ECUACIONES CONSTITUTIVAS DEL PROCESO	18
3.4 DESCRIPCIÓN DE LOS MODELOS DE ELEMENTO FINITO	21
3.5 PRIMER MODELO	23
3.5.1 PRUEBA 1	26
3.5.2 PRUEBA 2	30
3.5.3 PRUEBA 3	34
3.6 SEGUNDO MODELO	37
3.6.1 PRUEBA 1	39
3.6.2 PRUEBA 2	42

CAPÍTULO 4.

ANÁLISIS EXPERIMENTAL

4.1 INTRODUCCIÓN	46
4.2 HERRAMIENTAS Y MONTAJE	47
4.3 PRIMER DISEÑO DE EXPERIMENTO	49
4.4 SEGUNDO DISEÑO DE EXPERIMENTO	59

4.5 TERCER DISEÑO DE EXPERIMENTO	73
4.6 MEDICIÓN DE ESFUERZOS RESIDUALES	86

CAPÍTULO 5.

ANÁLISIS TÉRMICO

5.1 ANÁLISIS TEÓRICO	86
5.2 ANÁLISIS EXPERIMENTAL	95

CAPÍTULO 6.

CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

6.1 CONCLUSIONES	98
6.2 TRABAJOS FUTUROS	100

BIBLIOGRAFÍA	100
---------------------	------------

RESUMEN.

En el presente trabajo se propone un método para determinar los parámetros de soldadura que garanticen la calidad en la junta lograda por el proceso de soldadura por fricción (FSW por sus siglas en inglés), medible con las pruebas normalizadas de resistencia a la tensión, dureza e inspección radiográfica. Se desarrollaron modelos por elemento finito para analizar el comportamiento de las deformaciones plásticas utilizando la formulación ALE (Aleatory Lagrangian Eulerian) y obtener intervalos de velocidades de avance y rotación.

Con los parámetros que se obtienen en los modelos, se realizaron diseños de experimentos evaluando la calidad de la soldadura en aleaciones de aluminio 6061 con espesor nominal de 3 mm, mediante pruebas de inspección por rayos x en la zona de soldadura, resistencia a la tensión, medición de dureza y de esfuerzos residuales también en la zona de soldadura. Se considera también un análisis térmico teórico experimental. Se concluye el trabajo con las recomendaciones y método propuesto.

ABSTRACT.

This work presents a method to determine the welding parameters that ensure the quality of the joint achieved by the friction welding process, measured with standardized tests of tensile strength, hardness and radiographic inspection. To this end, finite element models were developed to analyze the behavior of the plastic deformations using ALE formulation (Aleatory Lagrangian Eulerian) and get intervals advancement and rotation speeds.

With the parameters obtained in the models were performed designs experiments evaluating the quality of the joint obtained in 6061 aluminum alloy with a nominal thickness of 3 mm, by testing for x-ray inspection in the welding zone, tensile , measurement of hardness and residual stress also in the welding zone. Is also considered a theoretical and experimental thermal analysis, even the temperature is the result of combinations of speed and friction force. The work concludes with recommendations and proposed method.

El documento se organizó en ocho capítulos con la información obtenida en el desarrollo del trabajo.

El **capítulo dos** describe el proceso de FSW, sus ventajas y desventajas, dando un amplio panorama de este. Menciona los tipos de materiales para la herramienta y sus posibles dimensiones y geometrías.

El **capítulo uno** presenta un resumen de la revisión bibliográfica realizada en trabajos afines al proyecto, tanto de simulaciones en herramientas de computación de elemento finito y trabajos experimentales. Contiene la justificación y los objetivos del proyecto especificando la importancia del desarrollo de este trabajo de investigación, las necesidades que existen alrededor de él y la definición de su alcance. En este apartado se establecen las bases y se plantean las metas a alcanzar.

En el **capítulo tres** se analiza la teoría de la formulación Aleatoria Lagrangiana Euleriana (ALE), se describe las ecuaciones cinemáticas y sus métodos de solución. Esta formulación es la que se utiliza para realizar el modelo de elemento finito del proceso.

El **capítulo cuatro** proporciona información de los modelos a resolver, mostrando de manera estructurada la ecuación constitutiva del proceso, las formas de los modelos, sus dimensiones y propiedades de los materiales y elementos utilizados. Finalmente se mencionan los resultados obtenidos en cada modelo.

El **capítulo cinco** contiene la parte experimental, tales como los diseños de experimentos, inspección por rayos x, medición de dureza y los resultados de las pruebas de tensión realizadas y medición de esfuerzos residuales validando los parámetros del proceso obtenidos en la simulación.

En el **capítulo seis** se hace un análisis teórico-experimental de las temperaturas máximas alcanzadas en el material de trabajo determinando las temperaturas propias para obtener una buena calidad en la soldadura.

En el **capítulo siete** se resumen las conclusiones obtenidas durante y al final de este proyecto y se hace un listado de posibles trabajos a desarrollarse bajo la misma temática.

CAPÍTULO 1.

ESTADO DEL ARTE, JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS

1.1 ESTADO DEL ARTE.

Al iniciar con la investigación y desarrollo del tema se hizo un estudio y análisis de artículos y trabajos que permitió clarificar ideas y definir el desarrollo de este trabajo.

En la mayoría de los trabajos estudiados se aprecian análisis del proceso por medio de simulaciones numéricas obteniendo como resultados flujo plástico del material, esfuerzos, temperaturas, la mayoría de estos trabajos manejan sus modelos de temperatura y deformaciones mecánicas de forma desacoplada.

En la parte experimental nos muestra varios trabajos y publicaciones tanto de pruebas mecánicas como térmicas todo esto de manera no conjunta.

Los trabajos estudiados se muestran en la bibliografía de este documento [5] a [22].

Con base a este estudio se considera que el aporte del presente trabajo es establecer un método de análisis por simulación y experimental que determine parámetros con los cuales se alcance una soldadura por fricción (FSW) de calidad medible bajo pruebas normalizadas y de esta manera pueda ser utilizada en la industria nacional.

1.2 JUSTIFICACIÓN.

El método de FSW ha supuesto una verdadera revolución en las técnicas de unión de metales y más en concreto en la unión de aleaciones ligeras.

El interés suscitado por esta nueva técnica ha sido muy relevante en muchos sectores, y ha puesto en evidencia la necesidad de métodos que garanticen la calidad del proceso.

El proceso es un método relativamente nuevo, desconocido en la industria metal mecánica nacional en el cual se incorpora un conjunto difícil de fenómenos físicos, algunos de estos fenómenos son: grandes deformaciones no lineales del material y propiedades del material dependientes de la temperatura.

Con base en la complejidad que conlleva el análisis de este tipo de fenómenos, es que se piensa en la modelación numérica del proceso y por tanto debe seleccionarse adecuadamente el método de análisis.

El trabajo previo en el campo de la soldadura por fricción ha demostrado que el proceso es un reto formidable para su modelado. En este sentido, tomando como referencia el poco trabajo de investigación a nivel nacional en el tema, la justificación de este trabajo se maneja bajo la perspectiva del proceso, buscando los parámetros adecuados para la obtención de una soldadura de calidad medible bajo la normativa correspondiente y su divulgación en la industria nacional para su explotación.

1.3 OBJETIVOS.

1.3.1 OBJETIVO GENERAL

- Desarrollar un método con el que se obtengan parámetros que garanticen una soldadura de calidad en el proceso FSW (Friction Stir Welding).

1.3.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Desarrollar un modelo en elemento finito que apoye a determinar intervalos de parámetros independientes de soldadura para ser probados experimentalmente en el proceso FSW.
- Realizar un diseño de experimentos para determinar los efectos de los parámetros del proceso en la calidad de la unión y validar los modelos de simulación.
- Determinar mediante un estudio teórico-experimental las temperaturas alcanzadas en el proceso y su influencia como parámetro dependiente, en la calidad de la unión obtenida.

En este estudio se consideraron los parámetros de velocidad de avance y de rotación de la herramienta, así como el de la fuerza de forja como parámetros independientes los cuales se pueden variar sin afectarse uno al otro por eso es que se considera como los parámetros de mayor importancia en su análisis.

Parámetros como la temperatura y la fuerza de fricción, son el resultado de la variación de los anteriores y de las propiedades del material.

CAPÍTULO 2.

INTRODUCCIÓN.

2.1 ANTECEDENTES.

El proceso de soldadura se puede definir, en general, como el procedimiento por el cual dos o más piezas de metal se unen. Esto es por aplicación de calor, presión, o una combinación de ambos, con o sin el aporte de otro metal [1].

Los procesos de soldadura pueden ser clasificados de manera general en tres tipos básicos: [1]

- Soldadura por fusión.
- Soldadura fuerte y soldadura blanda.
- Soldadura de estado sólido.

La soldadura por fusión se define como la coalescencia y fusión conjunta de materiales por medio de calor, provisto por medios químicos o eléctricos. Pueden utilizarse o no metales de aporte. La unión soldada sufre importantes cambios metalúrgicos y físicos que a su vez tienen efecto importante en las propiedades y el desempeño del componente o la estructura soldada.

La soldadura fuerte es un proceso de unión en el que un metal de aporte se coloca entre las superficies a unirse y la temperatura se eleva lo suficiente para fundir dicho metal, pero no los componentes. Por lo tanto, es un proceso de unión de estados sólido y líquido. En la soldadura blanda, el metal de aporte se funde a una temperatura relativamente baja y en la soldadura de estado sólido la unión se efectúa sin fusión en la interfaz de las partes a soldar. Es decir que no existe una fase líquida en la unión.

En la unión de estado sólido la unión se produce esencialmente a temperaturas inferiores al punto de fusión de los metales base sin adición de metal de aporte y comprende uno o más de los siguientes fenómenos [1]:

Difusión: Transferencia de átomos a través de una interfaz; por ello, la aplicación de calor externo mejora la resistencia de la unión. El calor se puede generar en forma interna, por fricción y de manera externa mediante calentamiento por inducción.

Presión: Cuanto mayor sea la presión, más fuerte será la interfaz. Se puede combinar la presión y el calentamiento.

El tipo de soldadura analizado, en este proyecto, es el de soldadura por fricción y agitación (FSW por sus siglas en inglés). Este tipo de soldadura está catalogado como un proceso de soldadura en estado sólido, ya que no existe fase líquida durante su desarrollo. El proceso fue patentado en 1991 por el Instituto de soldadura (TWI, por sus siglas en inglés) en Cambridge, Inglaterra [2].

El método de FSW sin aporte de material, ha supuesto una verdadera revolución en las técnicas de unión de metales y más en concreto en la unión de aleaciones ligeras. A pesar de su corta vida, la soldadura por fricción consiguió hacerse un hueco considerable en la industria internacional, sustituyendo a otros procesos más tradicionales.

Aunque a nivel industrial sólo se emplea el FSW fundamentalmente para soldar aluminio son varios los tipos de materiales susceptibles de ser soldados, como aplicaciones en cobre y magnesio; además, existen experiencias en laboratorio soldando titanio o acero con resultados satisfactorios.

Del mismo modo, existe gran diversidad en cuanto a sectores en los que se puede aplicar la soldadura por fricción. Entre otros, destacan: sector ferroviario (perfiles extruidos para trenes con estructura de aluminio), marina y construcción naval (perfiles extruidos, paneles para cubiertas), construcción (puentes de aluminio, paneles fachada, etc.), transporte terrestre (llantas de aluminio, brazos de suspensión, planchas a medida, etc.), aeronáutico / aeroespacial (alas y fuselajes, depósitos de combustible), otros (industria eléctrica, mobiliario, equipamientos de cocina, etc.).

2.2 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO.

El desarrollo del proceso para soldar se da mediante una herramienta rotatoria (Figura 2.1) [3], que consta de dos partes: Un pasador que se introduce entre las placas de material a soldar y un hombro el cual se encarga de ejercer fricción e impedir fugas de material.

Durante el proceso, la fuerza de forja que la herramienta proporciona y que es necesaria para lograr fricción y evitar fugas, deforma plásticamente el material, agitándolo alrededor del pasador de la herramienta y contra el hombro, uniendo así las partes acopladas provocando grandes fuerzas cortantes en el material plásticamente deformado, aumentando su temperatura, esto sin alcanzar la temperatura de fusión. En la Figura 2.1 [3] se muestra un esquema.

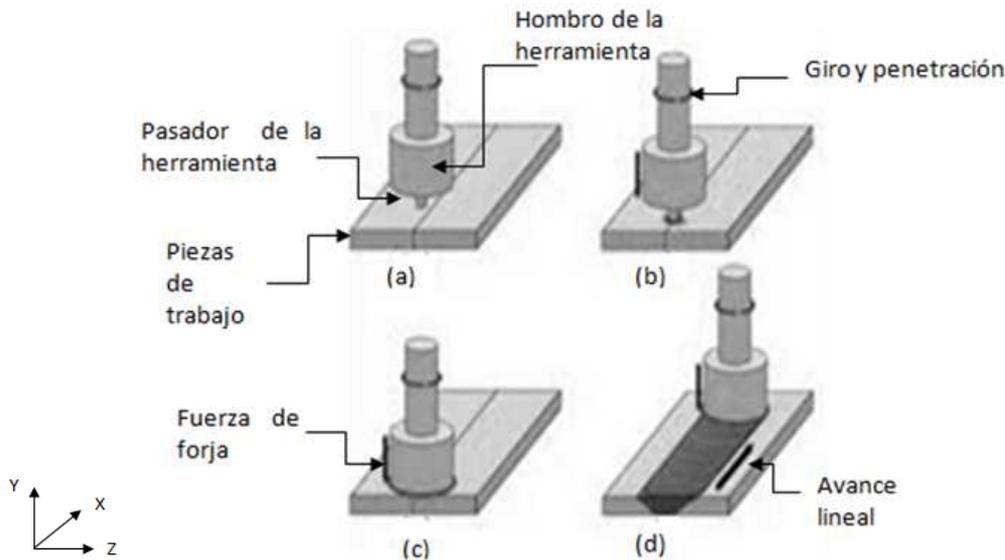


Figura 2.1. Ilustración gráfica del proceso. a) Inicio, b) inserción del pasador c) aplicación de fuerza de forja, d) inicio de avance lineal y soldadura [3].

Es necesario, identificar los lados de avance y retroceso, para esto se requiere conocimiento de la dirección de rotación y de desplazamiento de la herramienta, en la Figura 2.2 [3]. Con referencia al sistema coordenado mostrado; la herramienta gira en sentido positivo en torno al eje Y, de acuerdo a la regla de la mano derecha y se desplaza en la dirección positiva del eje X, por lo que el lado de avance está en la placa del lado derecho, donde la herramienta gira en la misma dirección en que se desplaza y el lado de retroceso se encuentra en la placa del lado izquierdo donde el sentido de rotación es contrario al de avance de la herramienta.

El efecto de la soldadura sobre las placas o material de trabajo, se clasifica en básicamente cuatro zonas microestructurales, las cuales se muestran en la Figura 2.2 [3] y se describen a continuación:

(A) Material no afectado: Material que no ha sido deformado.

(B) Zona afectada térmicamente: En esta región, el material ha experimentado un ciclo térmico que ha modificado la microestructura y/o propiedades mecánicas; sin embargo, no hay deformación plástica en esta área.

(C) Zona afectada termomecánicamente: En esta región, la herramienta ha deformado plásticamente el material, y el calor del proceso también ha ejercido alguna influencia en el material.

(D) Zona núcleo: La zona totalmente recrystalizada, a veces llamada la zona de agitación, se refiere a la ocupada anteriormente por el pasador de la herramienta.



Figura 2.2. Regiones microestructurales en la sección transversal de un material soldado por fricción. (A) material no afectado o metal base. (B) Zona afectada por el calor. (C) Zona afectada termomecánicamente. (D) Zona núcleo [3].

2.3 VENTAJAS Y DESVENTAJAS.

Las ventajas más significativas de este proceso en comparación con otros métodos de soldadura se pueden clasificar en las siguientes tres categorías [3]:

Beneficios metalúrgicos:

- Es un proceso realizado en fase sólida.
- Existe baja distorsión.
- Buena estabilidad dimensional al no existir pérdidas de elementos de aleación.
- Excelentes propiedades mecánicas del área de articulación.
- Microestructura fina recrystalizada.
- Ausencia de grietas de solidificación.

Beneficios ambientales:

- No hay emisión de gases.
- La limpieza de las superficies requerida es mínima.
- Elimina los residuos de molienda.
- Favorece la no utilización de disolventes necesarios para desengrasar.

Beneficios energéticos:

- Bajo consumo energético.

Como todo proceso perfectible este cuenta también con limitaciones de las cuales se hace mención de las detectadas durante el desarrollo de este trabajo:

- Solo se puede utilizar en uniones a tope.
- Debido a las grandes fuerzas laterales y normales desarrolladas en el proceso, se debe tener especial cuidado en la sujeción de las placas o material a soldar, así como el soporte de éstas.
- En general la herramienta debe mantenerse en una dirección perpendicular a las superficies de los materiales.
- De acuerdo a las propiedades del material que se va a soldar es necesario considerar la capacidad de la máquina a utilizar. Llegando incluso a necesitar maquinaria especializada.
- No existen máquinas portátiles de tal manera que el proceso pueda ser llevado a campo.

2.4 CARACTERÍSTICAS DE LA HERRAMIENTA.

El diseño de la herramienta es un factor importante para llevar a cabo el proceso de FSW, debe cumplir características de acuerdo a las dimensiones y material de la pieza de trabajo. Es decir, el material a soldar así como su espesor define el material y dimensiones de la herramienta a utilizar además de la geometría tanto del hombro como del pasador de la herramienta.

2.4.1 MATERIALES.

Como se menciona anteriormente, el material seleccionado para la herramienta depende de los materiales de la pieza de trabajo, ya que este debe tener mayor dureza y mayor temperatura de fusión.

Otros parámetros que se consideran importantes para la selección del material de la herramienta son: Resistencia al desgaste, reacción nula con la pieza de trabajo o el medio ambiente, presentar buena resistencia a la fractura y que sea relativamente fácil de manufacturar.

En la Tabla 2.1 se muestran recomendaciones de materiales utilizables para la fabricación de herramientas de acuerdo al material de trabajo y su espesor [4].

Tabla 2.1 Materiales para herramientas [4].

MATERIAL DE TRABAJO	ESPESOR DEL MATERIAL mm	MATERIAL DE LA HERRAMIENTA
Aleaciones de Aluminio	< 12	Aceros para herramienta
Aleaciones de Cobre	< 6	Aceros para herramienta
Aleaciones de Titanium	< 6	Aleaciones de Tungsteno
Aceros Inoxidables	< 6	Aleaciones de Tungsteno
Aleaciones de Niquel	< 6	Nitruro de Boro Cúbico Policristalino (PCBN)

2.4.2 DIMENSIONES.

En el rubro de las dimensiones de la herramienta se encuentran tres de ellas muy importantes a considerar: Longitud del pasador, diámetro del pasador y diámetro del hombro.

La longitud del pasador la determina el espesor del material de trabajo, la inclinación de la herramienta (si se considera ésta) y el espacio libre deseado entre el extremo del pasador y la base de apoyo del material de trabajo.

El diámetro del pasador debe ser lo suficientemente grande para no fracturar; pero suficientemente pequeño para permitir que el material se mezcle detrás del pasador antes de que se enfríe.

Para el diámetro del hombro es recomendable una relación con el diámetro del pasador de 3:1 dependiendo del material de trabajo a utilizar así como su espesor. En la Tabla 2.2 se muestran algunas relaciones de diámetros para la herramienta [4].

Tabla 2.2 Recomendaciones de relación de diámetros para la herramienta [4].

DIÁMETRO DEL HOMBRO mm	DIÁMETRO DEL PASADOR mm	MATERIAL DE TRABAJO, ESPESOR (mm)
13	5	Aluminio 6061-T6, 3mm
20-30	8-12	Aluminio 7050, 2195, 5083, 2024, 7075, 6.35mm
20-16	6	Aluminio 5083 Y 6061, 5.5mm
12	4	Aluminio 1050 Y COBRE, 1.8mm

2.4.3 GEOMETRÍA.

Es factible variar considerando a las necesidades, la geometría tanto del hombro como el pasador de la herramienta. La geometría más simple es la forma cilíndrica tanto para el hombro como para el pasador.

Para el caso del hombro las siguientes geometrías son comúnmente usadas [4] :

Cóncavo: Produce una buena soldadura y es de fácil manufactura. Durante el proceso el material removido por el pasador es atrapado en la concavidad del hombro evitando fugas de material hacia los lados además de aumentar la superficie de fricción entre la herramienta y el material de trabajo.

Caracterizado: El hombro en su superficie de contacto puede también presentar ciertas características maquinadas para alcanzar mejoras en el proceso.

Las variaciones en la geometría del pasador son para lograr una mejora en el flujo del material; por lo tanto se puede realizar un pasador cónico o también realizar rosca alrededor de este. En la Figura 2.3 se muestra algunas de las geometrías de herramientas.

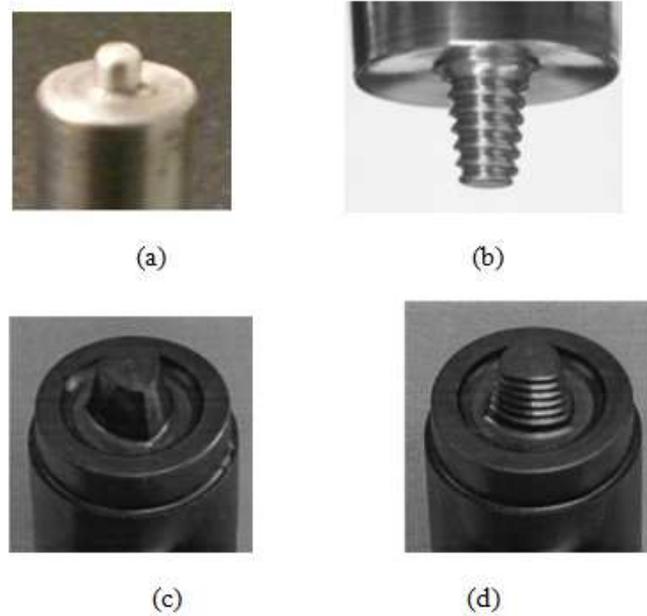


Figura 2.3. Geometrías de la herramienta para el proceso de soldadura por fricción (FSW). (a) Hombro y pasador cilíndrico. (b) Hombro cóncavo con pasador cónico y roscado [4]. (c) Hombro caracterizado y pasador triangular [4]. (d) Hombro caracterizado y pasador triangular roscado [4].

CAPÍTULO 3.

SIMULACIÓN POR ELEMENTO FINITO

3.1 INTRODUCCIÓN.

El proceso de soldadura por fricción incorpora fenómenos físicos tales como: propiedades altamente dependientes de la temperatura del material, grandes deformaciones no lineales, las cuales ocurren alrededor de la herramienta envolviendo el pasador de este sin afectar más allá del diámetro del hombro y eliminando fugas de material.

Se define la siguiente secuencia para modelar el proceso de soldadura por fricción y hacer su análisis por elemento finito:

- 1.- Se define el modelo físico del proceso, estableciendo la geometría de sus componentes, magnitudes físicas, empleo de materiales, sus propiedades físico-mecánicas y los parámetros de régimen.
- 2.- Sobre la base del modelo físico se establece el modelo de elemento finito, definiendo las condiciones de frontera adecuadas, de manera que el modelo se aproxime al modelo físico.
- 3.- Establecidas las condiciones de frontera (pieza, herramienta) son discretizadas mediante elementos.
- 4.- Conocido el comportamiento del sistema físico, el cual es de naturaleza no-lineal, debido a la presencia de grandes deformaciones plásticas, altas tasas de deformación, grandes desplazamientos con rotaciones, generación de calor con un considerable aumento de temperatura y superficies de contacto con alto valor de fricción se determina el tipo de solución a emplear.

3.2 FORMULACIÓN ALEATORIA LAGRANGIANA EULERIANA (ALE).

El análisis de las formulaciones de Lagrange y Euler ha puesto en evidencia las ventajas y desventajas de cada una de ellas, demostrando también la necesidad de una descripción generalizada capaz de combinar lo mejor de los aspectos de las anteriores y reducir al mínimo sus inconvenientes. Tal descripción generalizada se denomina Aleatoria Lagrangiana-euleriana (ALE).

En la formulación ALE los nodos de la malla no son unidos ni a las partículas del material, ni fijos en el espacio en su lugar pueden tener un movimiento independiente y arbitrario. Por lo general, los nodos de la frontera se mueven para permanecer en la frontera, mientras que los nodos interiores se mueven para minimizar la distorsión de la malla. La Figura 3.1 ilustra esta formulación.

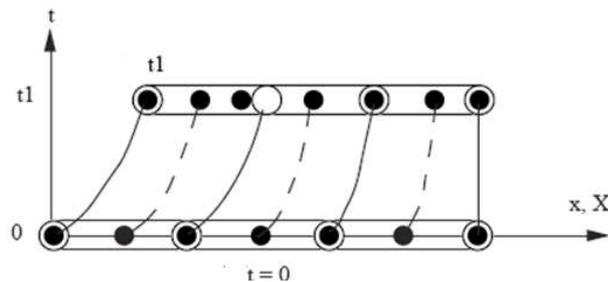


Figura 3.1. Representación de la formulación de ALE. Donde \circ es el nodo de la malla de elementos finitos y \bullet es el punto del material [23].

3.2.1 DESCRIPCIÓN CINEMÁTICA.

En la descripción ALE del movimiento, no se toman como referencia ni la configuración del material R_x ni la espacial R_x , es necesario un tercer dominio el referencial R_χ donde, las coordenadas de referencia χ son introducidas para identificar los puntos de la malla. La Figura 3.2 muestra estos dominios y su interacción entre ellos.

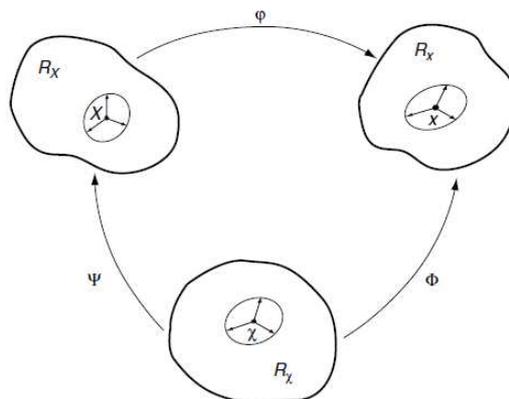


Figura 3.2. El movimiento de la malla es independiente del movimiento del material [23].

El dominio referencial está relacionado con los dominios material y espacial por las funciones ψ y Φ respectivamente. El movimiento de la partícula puede ser expresado entonces con la ecuación 3.1. [23].

$$\varphi = \Phi \circ \psi^{-1} \quad 3.1$$

El mapeo de Φ desde el dominio referencial para el dominio espacial, puede ser entendido como el movimiento de los puntos de malla en el dominio espacial, está representado por ecuación 3.2 [23].

$$(\chi, t) \mapsto \Phi(\chi, t) = (x, t) \quad 3.2$$

Y la velocidad de la malla es entonces de acuerdo a la ecuación 3.3:

$$\hat{v}(\chi, t) = \left. \frac{\partial x}{\partial t} \right|_{\chi} \quad 3.3$$

La parte ψ^{-1} de 1 puede interpretarse como el movimiento de las partículas de material en el dominio de referencia, ya que mide la variación temporal de la coordenada referencial χ manteniendo fija las coordenadas X del material como lo muestra la ecuación 3.4 [23].

$$(X, t) \mapsto \psi^{-1}(X, t) = (\chi, t) \quad 3.4$$

Donde la velocidad está definida por la ecuación 3.5.

$$\omega = \left. \frac{\partial \chi}{\partial t} \right|_X \quad 3.5$$

La relación entre velocidades v , \hat{v} , ω se obtiene por derivación de la ecuación 3.1 como se observa en la ecuación 3.6 [23].

$$\begin{aligned} \frac{\partial \varphi}{\partial (X,t)}(X,t) &= \frac{\partial \Phi}{\partial (\chi,t)}(\psi^{-1}(X,t)) \frac{\partial \psi^{-1}}{\partial (X,t)}(X,t) \\ &= \frac{\partial \Phi}{\partial (\chi,t)}(\chi,t) \frac{\partial \psi^{-1}}{\partial (X,t)}(X,t) \end{aligned} \quad 3.6$$

Esta ecuación 3.6 puede ser expresada como se indica en la ecuación 3.7.

$$v = \hat{v} + \frac{\partial x}{\partial \chi} \cdot \omega \quad 3.7$$

Y también puede ser escrita como la ecuación 3.8:

$$c := v - \hat{v} = \frac{\partial x}{\partial \chi} \cdot \omega \quad 3.8$$

Donde c es la velocidad convectiva que se define como la velocidad relativa del material y la malla.

3.2.2 MÉTODOS DE SOLUCIÓN.

En la formulación ALE las ecuaciones constitutivas del sistema pueden ser derivadas por sustitución de 6 en las ecuaciones gobernantes de la mecánica continua [24].

Existen dos métodos para la solución de estas ecuaciones:

- 1.- Totalmente acopladas:** Resuelve las ecuaciones como están escritas sin hacer simplificaciones.
- 2.- Operador de división:** Utiliza primero un paso Lagrangiano sin utilizar términos convectivos y secuencialmente un paso advectivo considerando efectos convectivos.

Esta parte consiste de dos subpasos: Suavizado y Remapeo:

SUAVIZADO: La distorsión causada en la malla por el paso Lagrangiano es suavizada con el uso de algoritmos suavizantes.

Algunos de estos algoritmos suavizantes son:

- Promedio simple: Las coordenadas de un nodo son el promedio de las coordenadas de sus nodos vecinos.

$$x_{SA}^{n+1} = \frac{1}{m^{tot}} \sum_{m=1}^{m^{tot}} x_m^n \quad 3.9$$

- Kikuchi (Volumen ponderado): Usa un promedio ponderado por volumen de las coordenadas de los centroides de los elementos del entorno de un nodo.

$$\bar{x}_\alpha^n = \frac{1}{8} \sum_A \bar{x}_A^n \quad 3.10$$

$$\bar{x}_K^{n+1} = \frac{\sum_{\alpha=1}^{\alpha^{tot}} V_\alpha \bar{x}_\alpha^n}{\sum_{\alpha=1}^{\alpha^{tot}} V_\alpha}$$

- Zona equipotencial: Fabrica una malla estructurada usando las soluciones de las ecuaciones de Laplace como líneas de malla.
- Equilibrio: Resortes artificiales son atados para cada nodo de los elementos ALE. Los resortes ajustan la posición de cada nodo de la solución equilibrio.

REMAPEO: En este paso se mapea la solución de una malla Lagrangiana distorsionada en la nueva malla. Los algoritmos para el remapeo son referidos como logaritmos de advección.

- Algoritmo Donor Cell: Es un algoritmo de primer orden, en todos los casos un buen algoritmo de advección, estable y simple.
- Algoritmo Van Leer MUSCL: Es un algoritmo de segundo orden.

3.3 ECUACIONES CONSTITUTIVAS.

Considerando tres leyes de conservación relacionadas con el problema de FSW [8]:

Donde:

v_i, v_j Razón de velocidad del movimiento del material.

ρ Densidad de masa.

σ_{ji} Esfuerzos de Cauchy.

b_i Fuerzas por unidad de volumen.

ρw^{int} Energía interna total por unidad de volumen.

D_{ji} Razón de deformación.

q_i Flujo de calor por unidad de área.

ρs Fuente de calor por unidad de volumen.

- **Conservación de la masa**, establece que la masa de cualquier cuerpo es constante, ya que no fluye material fuera de las fronteras.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\rho \frac{\partial v_j}{\partial x_j} \quad 3.11$$

- **Conservación de momento**, establece que la derivada de material es igual a la fuerza neta, es equivalente a la segunda ley de Newton.

$$\rho \frac{\partial v_i}{\partial t} = \frac{\partial \sigma_{ji}}{\partial x_j} + \rho b_i \quad 3.12$$

- **Conservación de la energía**, establece que la tasa de cambio de la energía total (las energías internas, más cinética) en el cuerpo es igual al trabajo realizado por las fuerzas externas y la tasa de trabajo proporcionado por el flujo de calor y las fuentes de calor.

$$\rho \frac{\partial w^{\text{int}}}{\partial t} = D_{ji} \sigma_{ji} - \frac{\partial q_i}{\partial x_i} + \rho s \quad 3.13$$

Ecuación constitutiva:

El comportamiento del material durante la FSW se modela como un material elástico-plástico. La descomposición aditiva de la tasa de deformación en las piezas se supone como en ecuación 3.14, para facilitar su deducción en esta ecuación fue desacoplado el termino correspondiente a la deformación por temperatura [9].

$$D_{ij} = D_{ij}^e + D_{ij}^p \quad 3.14$$

Donde:

$$D_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) \quad 3.15$$

En las soluciones incrementales las ecuaciones constitutivas son comúnmente expresadas en términos de la razón objetiva de esfuerzos de Cauchy, y de la razón total de deformación como se muestra en la ecuación 3.16.

$$\sigma_{ij}^{\nabla} = C_{ijkl}^{\sigma} D_{kl} \quad 3.16$$

Donde:

σ_{ij}^{∇} Razón objetiva de esfuerzos de Cauchy.

C_{ijkl}^{σ} Modulo tangente elasto-plástico.

Un tensor espacial se dice objetivo cuando ante un movimiento de cuerpo rígido se transforma según las reglas de transformación de tensores, es decir, para tensores de segundo orden, según el doble producto de matrices de rotación:

$$\sigma_{ij}^{\nabla} = Q(t) \cdot \sigma_{ij} \cdot Q(t)^T \quad 3.17$$

Utilizando la razón objetiva de Jaumann que se muestra en la ecuación 3.18.

$$\sigma_{ij}^{\nabla J} = \frac{d\sigma_{ij}}{dt} - W_{ik} \sigma_{kj} - \sigma_{ik} W_{kj}^T \quad 3.18$$

Donde:

$$W_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} - \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) \quad 3.19$$

Sustituyendo 3.18 en 3.19 y ordenando términos se obtiene en la ecuación 3.20 que representa la derivada del tensor de tensiones de Cauchy y que es la ecuación constitutiva del proceso de FSW:

$$\frac{d\sigma_{ij}}{dt} = \underbrace{C_{ijkl}^{\sigma J} D_{kl}}_{Material} + \underbrace{W_{ik} \sigma_{kj} + \sigma_{ik} W_{kj}^T}_{Rotación} \quad 3.20$$

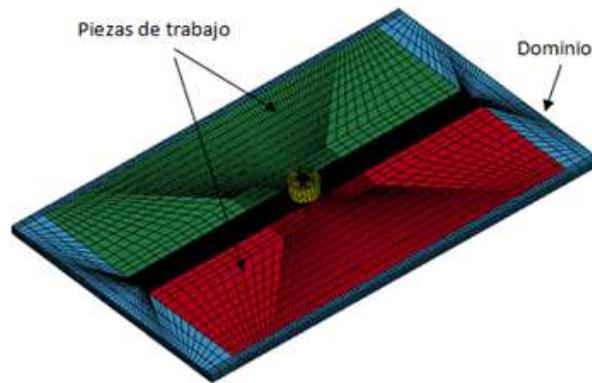
En 3.20, la derivada de la tensión de Cauchy consta de dos partes: la tasa de cambio debido a una respuesta material que se refleja en la razón objetiva y el cambio de tensión debido a la rotación correspondiente a los dos últimos términos.

Para su solución, utilizando una formulación ALE, se hace la sustitución de la ecuación 3.20 en las ecuaciones correspondientes a la cinemática de ALE descritas en ecuaciones 3.6, 3.7 y 3.8.

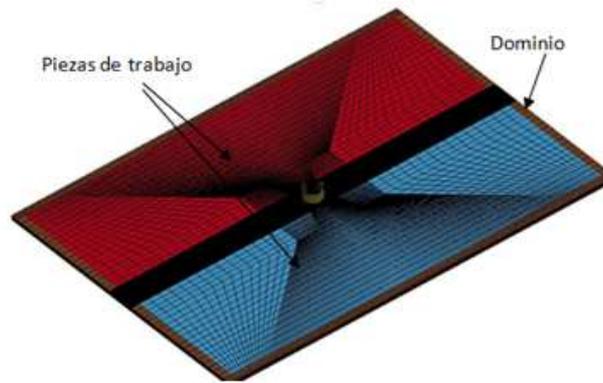
3.4 DESCRIPCIÓN DE LOS MODELOS DE ELEMENTO FINITO.

A continuación se muestran los modelos desarrollados por medio del software Ls-Dyna, el cual es un paquete de computación para la solución de sistemas dinámicos utilizando el método de los elementos finitos.

De acuerdo a la teoría de la formulación ALE, es necesario, además del dominio espacial hacer uso de un dominio de malla. En la Figura 3.3 se muestran los modelos utilizados y sus dominios.



(a) Primer modelo y su dominio (placa de 6 mm).



(b) Segundo Modelo y su dominio (placa de 3mm).

Figura 3.3. Modelos utilizados y sus dominios.

3.5 PRIMER MODELO.

El primer modelo se realizó para placas de aleación de aluminio 6061 con 6 mm de espesor, se colocó la herramienta en un barreno central entre las placas. La Figura 3.4 muestra el modelo correspondiente y la Tabla 3.1 las características geométricas tanto de las placas o piezas de trabajo, así como las de la herramienta utilizada. Las dimensiones de la herramienta se seleccionan de acuerdo al espesor de las piezas de trabajo.

Tabla 3.1 Geometría de las piezas de trabajo y herramienta para el primer modelo.

PIEZAS DE TRABAJO (PLACAS)		HERRAMIENTA [4]	
DIMENSIONES		DIMENSIONES	
Largo	250 mm	Diámetro de Hombro	20 mm
Ancho	90 mm	Diámetro de Pasador	7 mm
Espesor	6 mm	Longitud del Pasador	5.8 mm

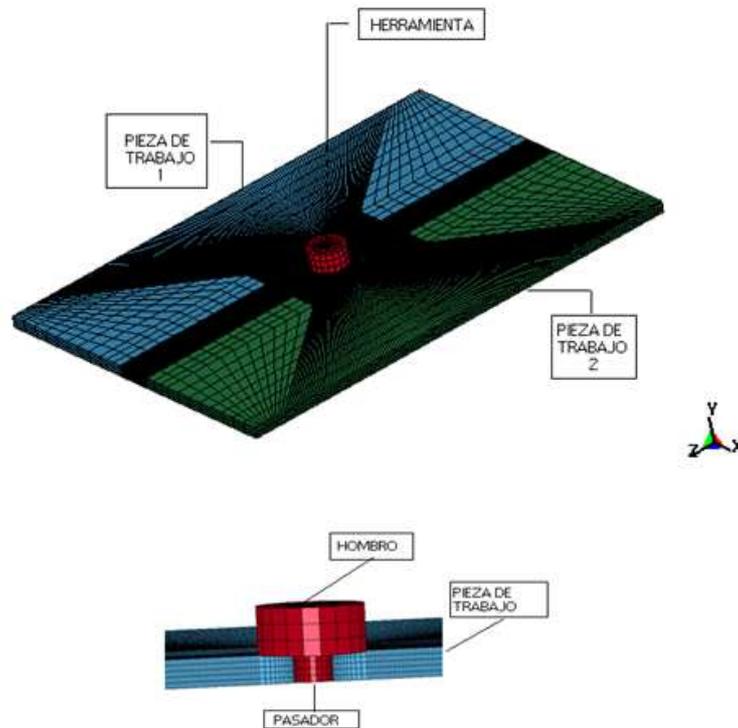


Figura 3.4. Geometría de Primer modelo.

Las características de la malla utilizada en los componentes que conforman el modelo se describen y se justifican a continuación.

Piezas de trabajo:

Para el caso de las piezas de trabajo se utilizó un elemento SOLID183 de 8 nodos, el material para estas piezas fue elasto-plástico debido a las deformaciones plásticas presentes en este proceso.

Las propiedades mecánicas mostradas en la Tabla 3.2 son para una aleación de aluminio 6061 a temperaturas cercanas a 300° C, las cuales se utilizan en el modelo para caracterizar las piezas de trabajo.

Herramienta:

Para la malla que conforma la herramienta se utilizó un elemento Shell 64 y el material fue un cuerpo rígido esto a causa de la necesidad del grado de libertad de rotación y que no se realiza ningún análisis a la herramienta.

Tabla 3.2. Propiedades mecánicas de los elementos. [9].

MATERIAL	DENSIDAD ρ (Kg/mm ³)	ESFUERZO DE FLUENCIA σ_s (N/mm ²)	MÓDULO DE ELASTICIDAD E (N/mm ²)	MÓDULO DE POISSON ν	MÓDULO TANGENCIAL E _T (N/mm ²)
Aluminio 6061	2.7 e-6	240	6.8 e 4	0.33	690
Acero H13	7.7 e-6	---	2.07e5	0.28	

Cargas y restricciones.

Las curvas de movimiento o parámetros del proceso se aplican en la herramienta según se muestra en la Tabla 3.3, de acuerdo al sistema coordinado mostrado en la Figura 3.4.

Se restringen todos los grados de libertad de las áreas laterales e inferiores de las placas o piezas de trabajo para evitar movimientos no requeridos en el transcurso del proceso.

Tabla 3.3. Parámetros de carga del proceso.

PRUEBA	VELOCIDAD LÍNEAL. (mm/s) DIRECCIÓN POSITIVA DEL eje Z.	VELOCIDAD DE ROTACIÓN. (rad/s) DIRECCIÓN POSITIVA EN EL EJE Y DE ACUERDO A LA REGLA DE LA MANO	DESPLAZAMIENTO QUE PROPORCIONA LA FUERZA DE FORJA. (mm) DIRECCIÓN NEGATIVA DEL EJE Y	COEFICIENTE DE FRICCIÓN
1	15	100 (1200rpm)	0.2 8.7 – 9.9 MPa [31]	0.47
2	5	100 (1200rpm)	0.2 8.7 – 9.9 MPa [31]	0.47
3	2	100 (1200rpm)	0.2 8.7 – 9.9 MPa [31]	0.47

En la Figura 3.5 se muestra el modelo con sus restricciones y las cargas dispuestas en la herramienta.

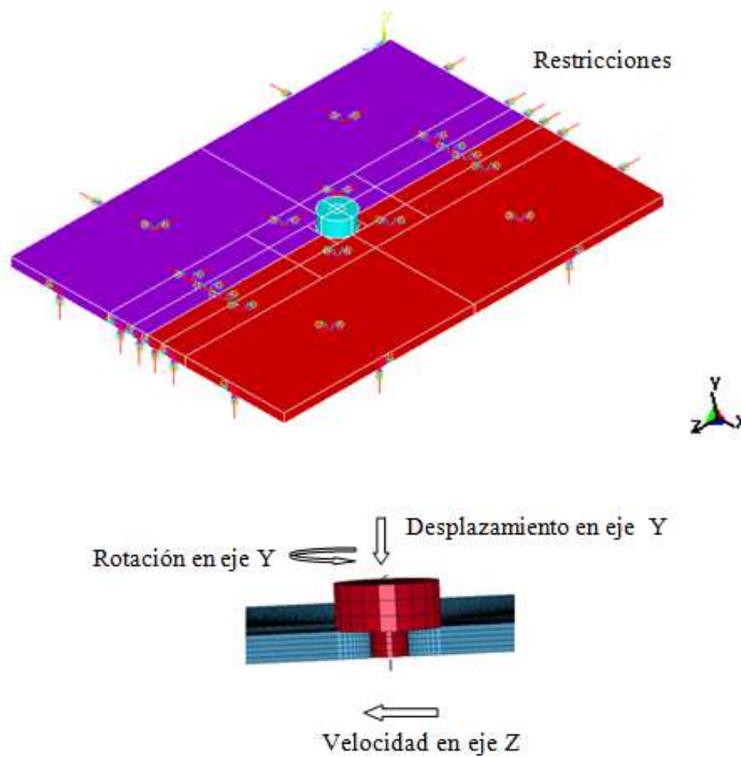


Figura 3.5. Restricciones y cargas del modelo.

3.5.1 PRUEBA 1.

En la prueba 1 se utilizan los parámetros de soldadura y el coeficiente de fricción que se mencionan en la Tabla 3.3.

En la Figura 3.6 se muestra los valores y distribuciones de los esfuerzos de Von Mises de acuerdo al avance de la herramienta, se observa que los esfuerzos de mayor valor se encuentran en la pieza de trabajo que representa el lado de retroceso.

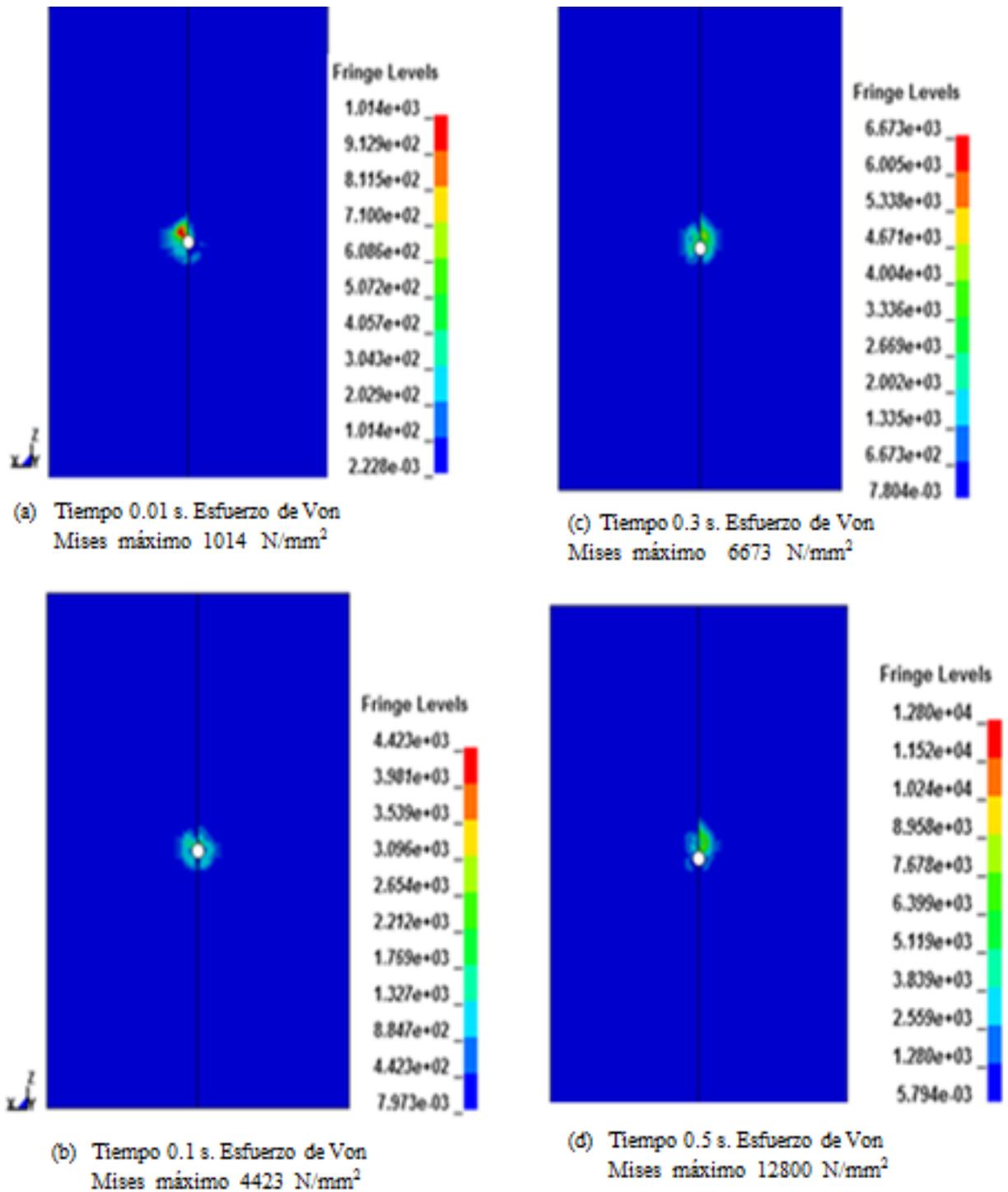


Figura 3.6. Distribución de los esfuerzos de Von Mises en un intervalo de tiempo 0.01s - 0.5s.

De acuerdo a esto empiezan a surgir las deformaciones plásticas en el lado de retroceso esto se aprecia en la Figura 3.7.

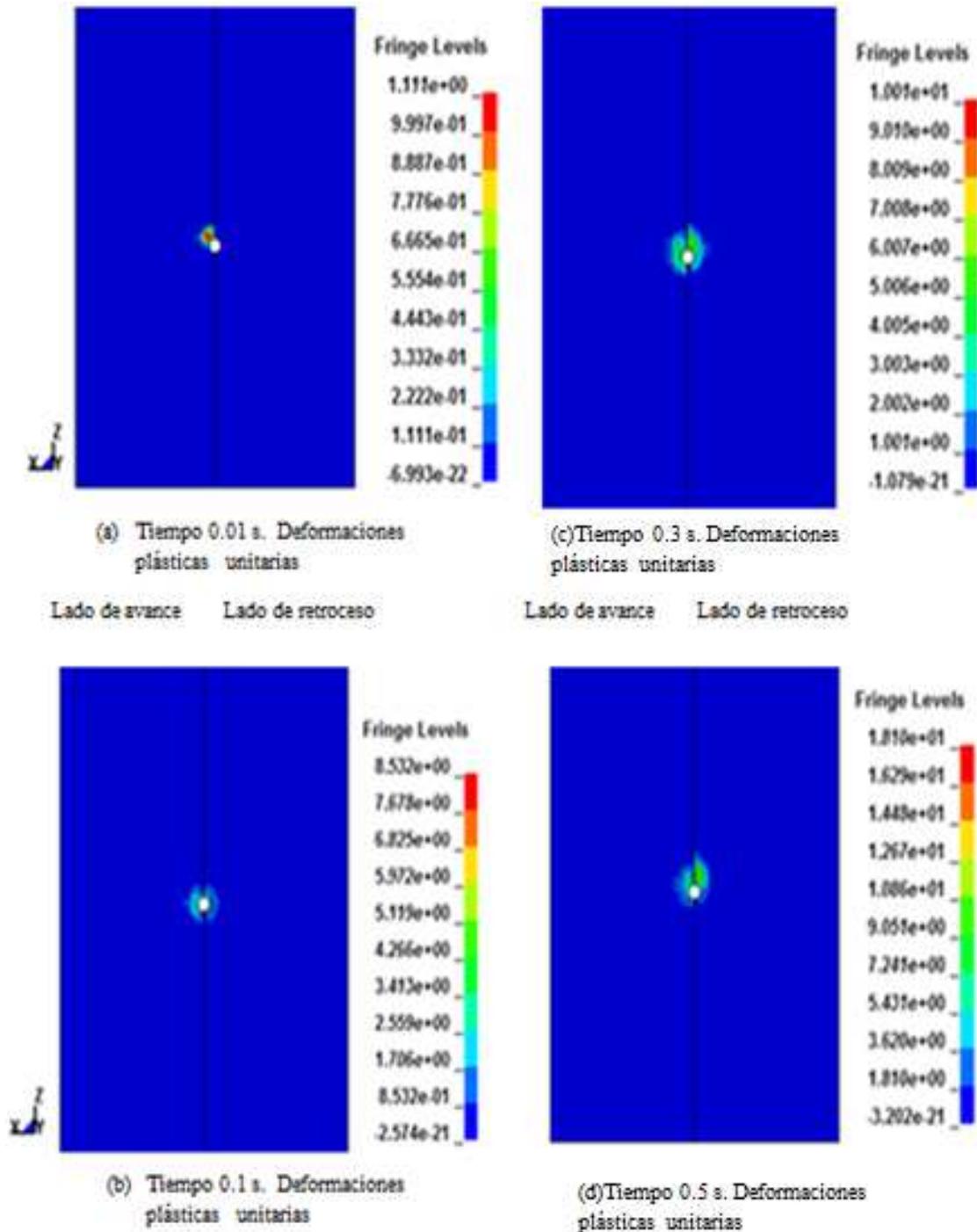


Figura 3.7. Deformaciones plásticas presentes en el intervalo de tiempo de 0.01s – 0.5 s.

La Figura 3.8 muestra una ampliación y acercamiento a la zona de deformaciones y se puede apreciar una distribución no uniforme de ellas, esto se interpreta como rompimiento del material.

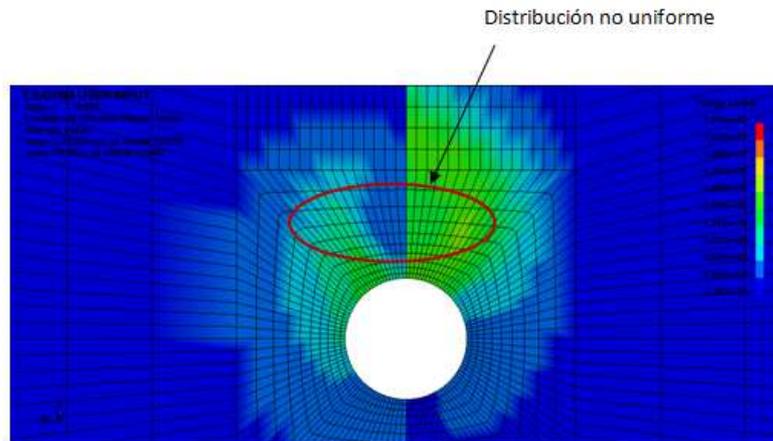


Figura 3.8. Deformaciones plásticas presentes en 0.5 s.

En la Figura 3.9 se visualiza en isosuperficies el avance irregular de las deformaciones plásticas, de acuerdo a esto no se puede lograr la unión de los materiales con la velocidad de avance de 15 mm/s, por considerarse alta.

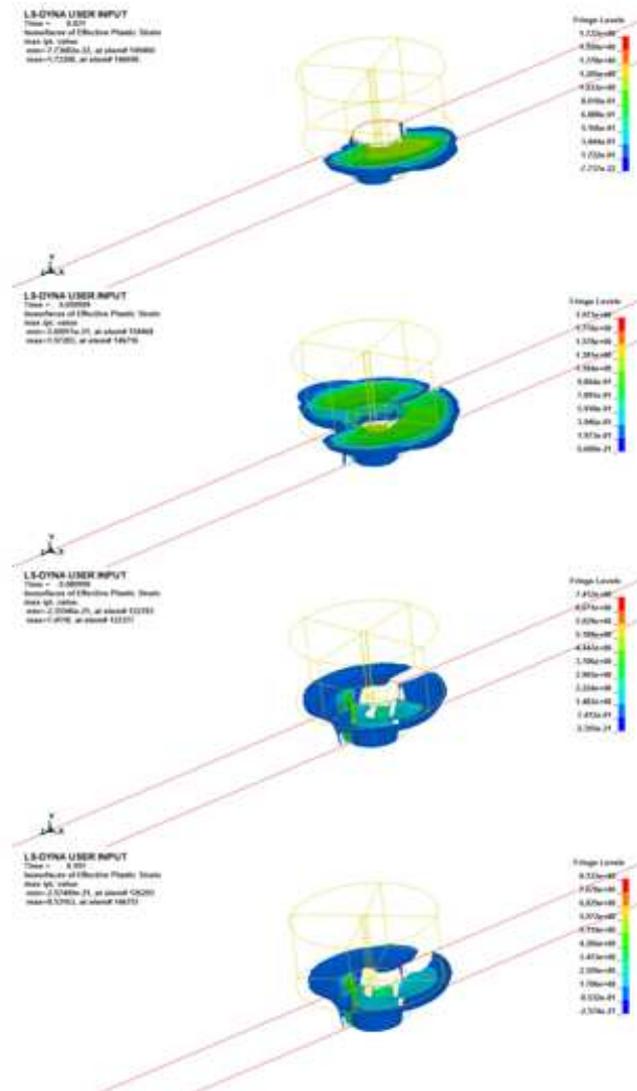


Figura 3.9. Isosuperficie de las deformaciones plásticas.

3.5.2 PRUEBA 2.

Para la prueba 2 se toman los parámetros de la Tabla 3.3. En la Figura 3.10 se muestran los valores y distribuciones de los esfuerzos de Von Mises de acuerdo al avance de la herramienta.

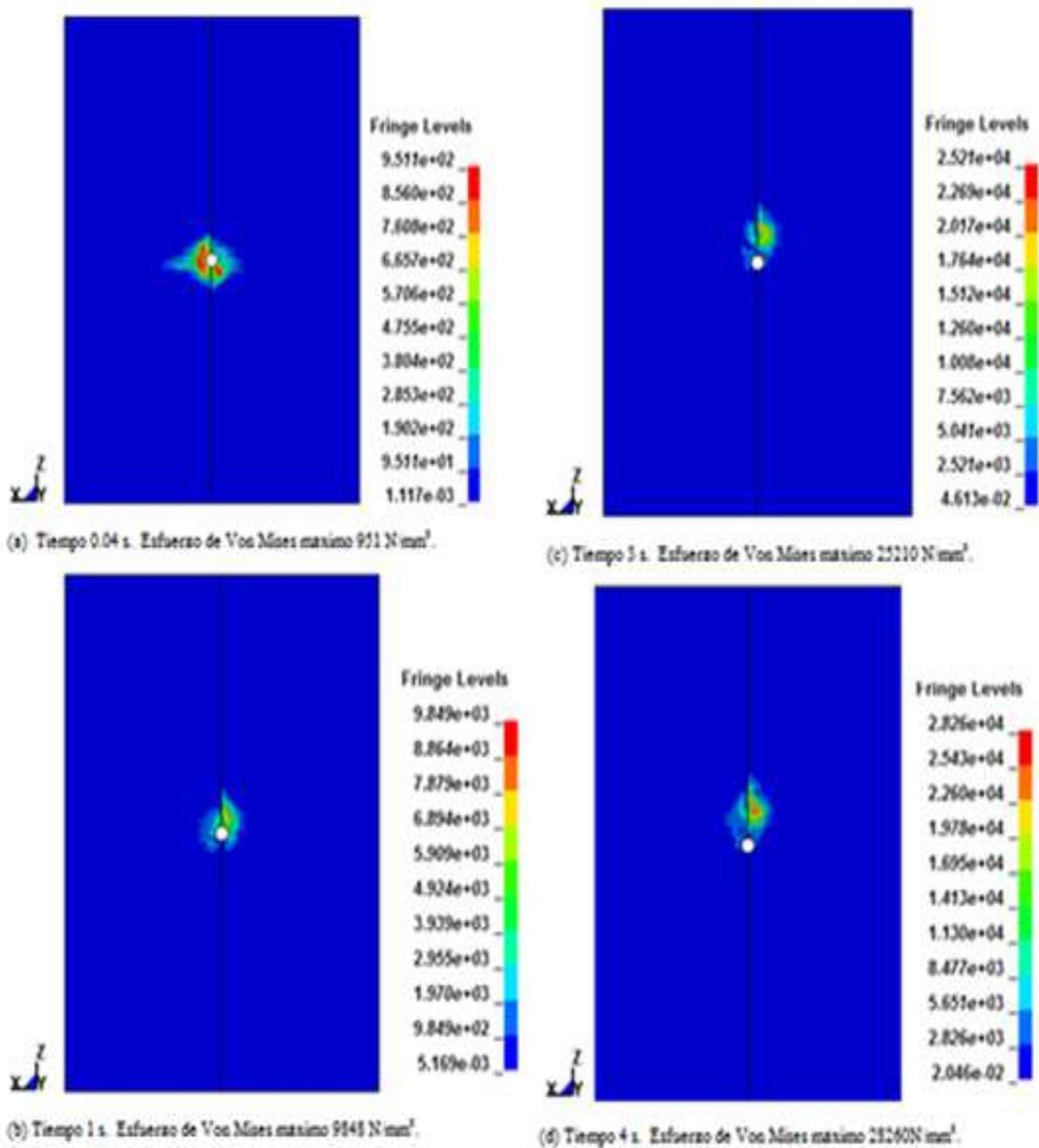


Figura 3.10. Distribución de los esfuerzos de Von Mises en un intervalo de tiempo 0.04 s – 4 s.

La distribución de las deformaciones plásticas se muestran en la Figura 3.11, donde se empieza a ver uniformidad en ellas y que se confirma en la Figura 3.12 que muestra una ampliación y acercamiento a la zona de deformaciones y la figura 3.13 que muestra isosuperficies de ellas.

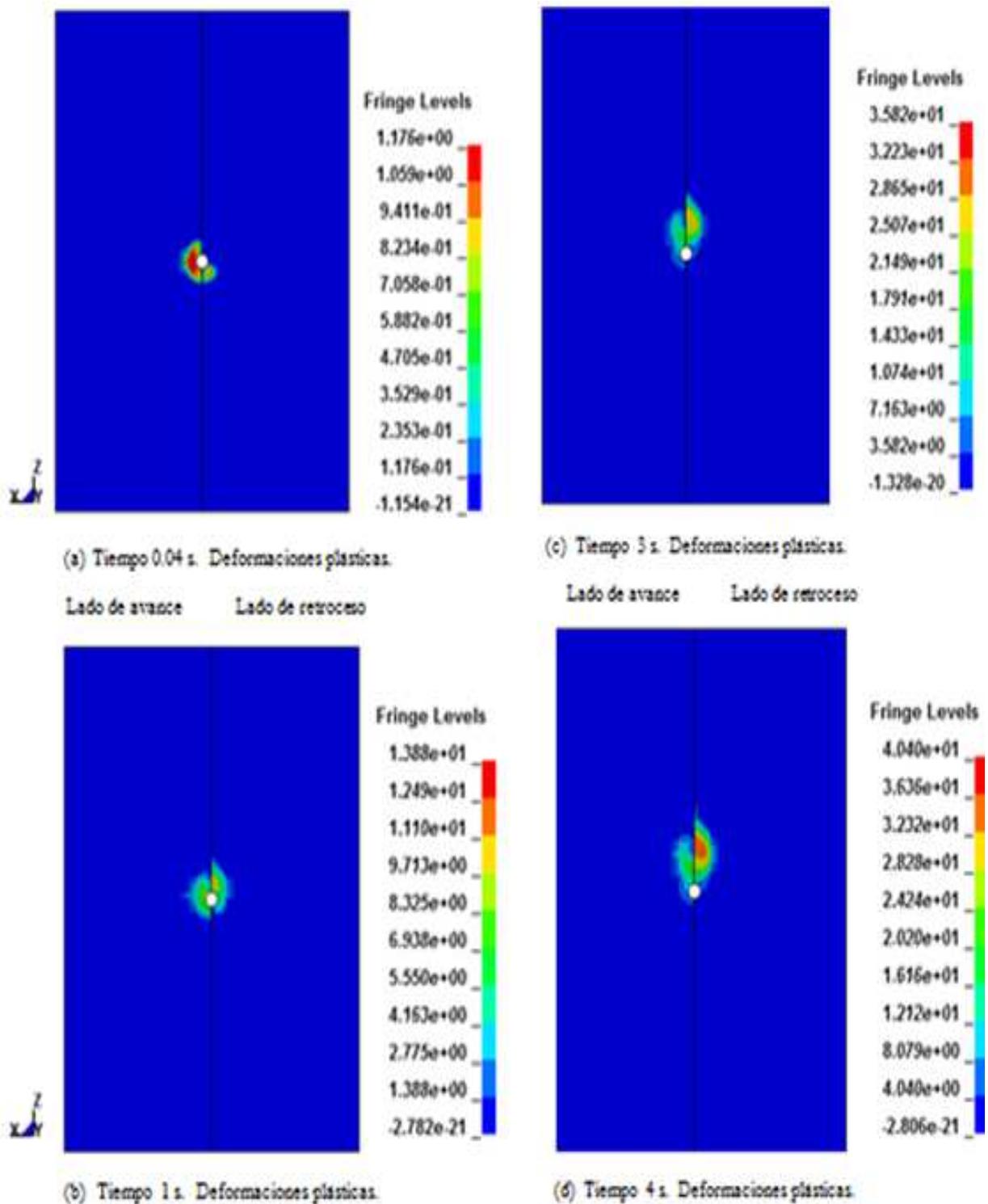
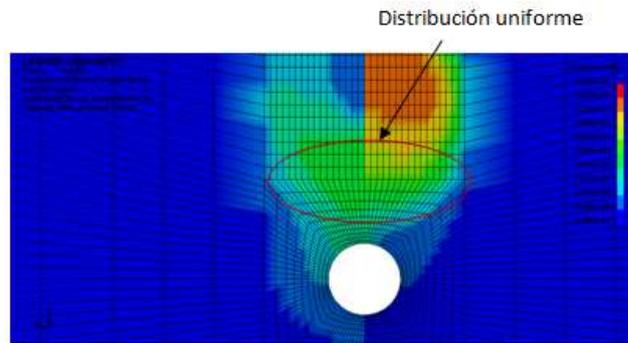


Figura 3.11. Deformaciones plásticas presentes en el intervalo de tiempo de 0.04s- 4s.



3.12. Deformaciones plásticas presentes en 4 s.

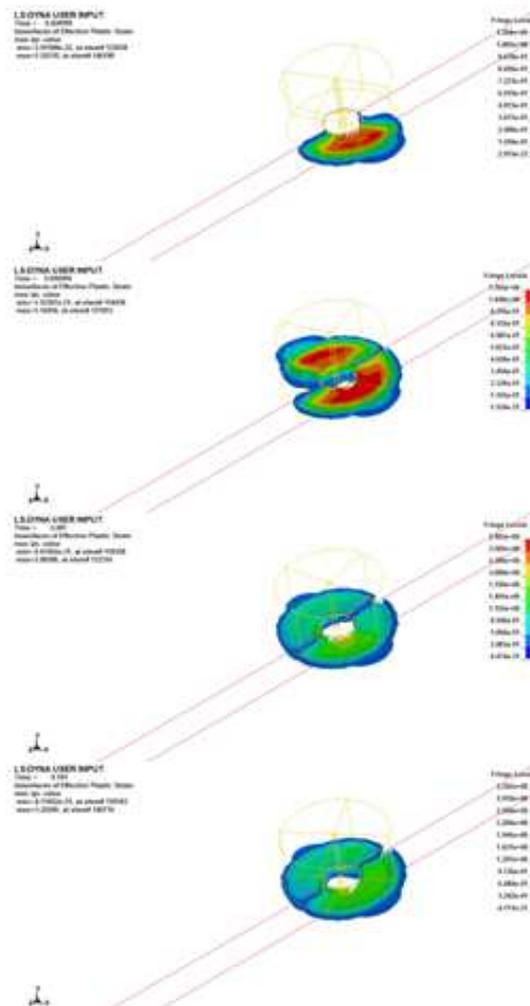


Figura 3.13. Isosuperficie de las deformaciones plásticas.

3.5.3 PRUEBA 3.

Se toman los parámetros correspondientes de la Tabla 3.3 y en la Figura 3.14 se muestran los valores y distribuciones de los esfuerzos de Von Mises obtenidos en el intervalo de tiempo dado en ella.

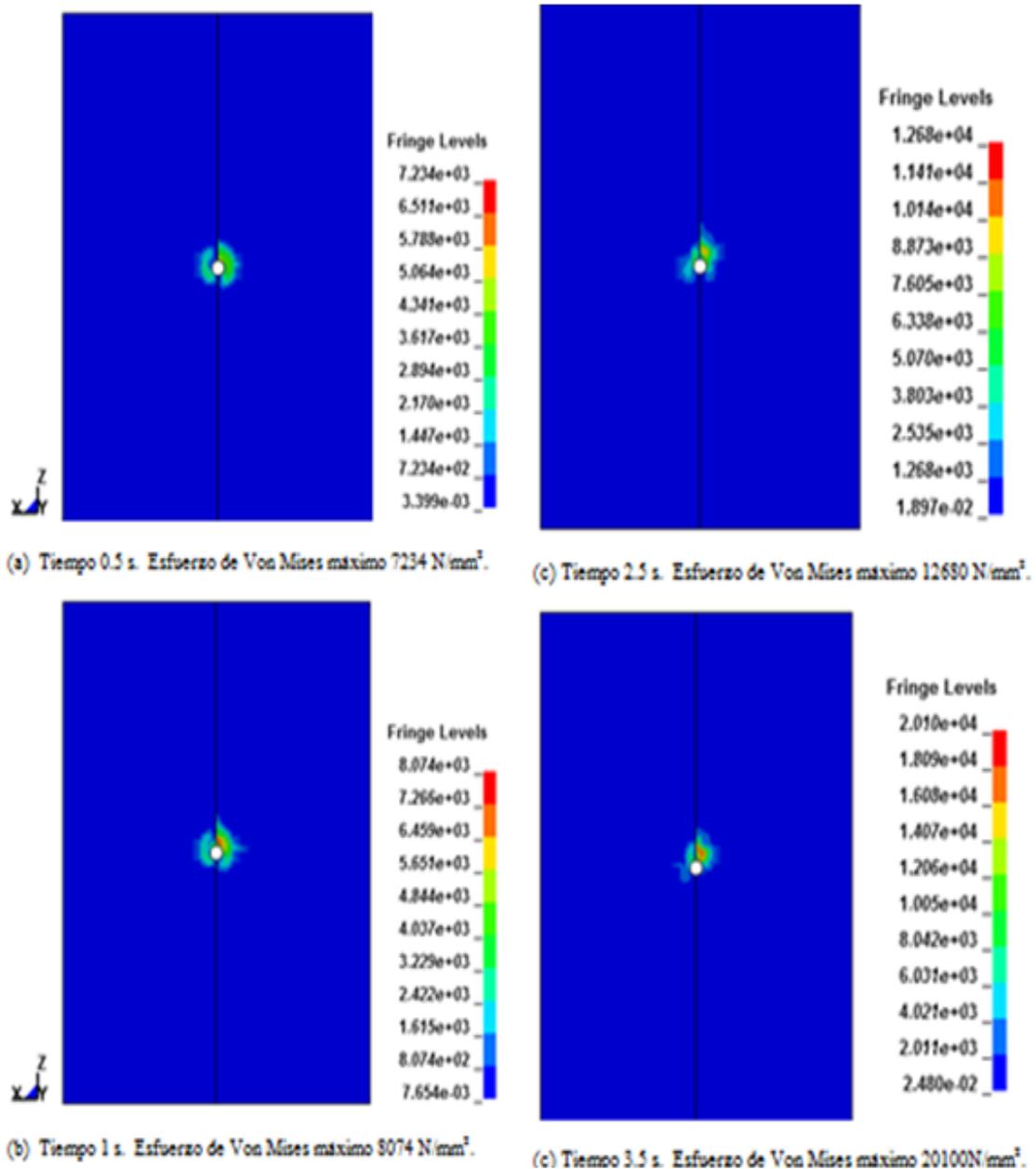


Figura 3.14. Distribución de los esfuerzos de Von Mises en un intervalo de tiempo 0.5 s – 3.5 s.

En la Figura 3.15 se tiene la distribución de deformaciones plásticas y en la Figura 3.16 se observan en isosuperficies deformaciones uniformes.

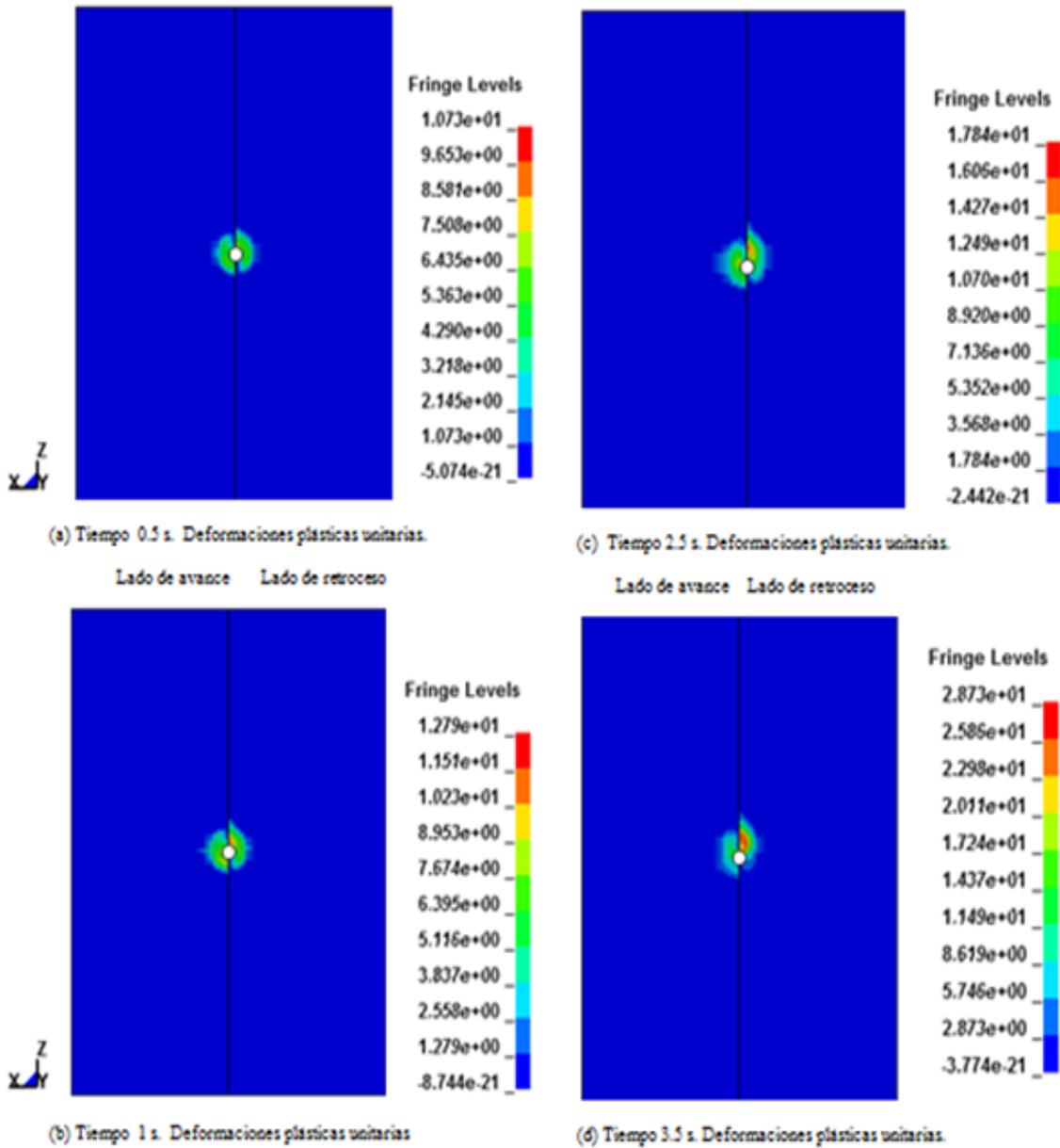


Figura 3.15. Deformaciones plásticas presentes en el intervalo de tiempo de 0.5s- 3.5s.

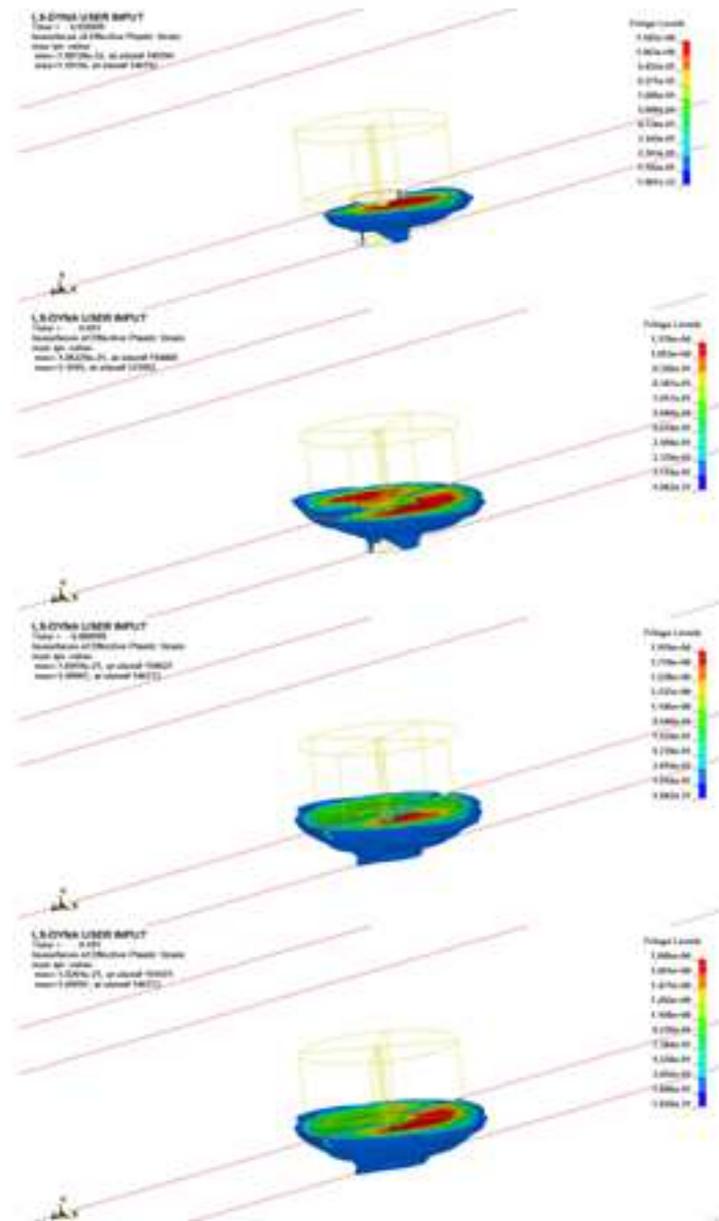


Figura 3.16. Isosuperficie de las deformaciones plásticas.

3.6 SEGUNDO MODELO.

El segundo modelo se realizó para aleación de aluminio 6061 con 3 mm de espesor.

La Figura 3.17 muestra el modelo correspondiente y en la Tabla 3.4 se dan las características geométricas de las piezas de trabajo, así como las de la herramienta utilizadas en este modelo que están de acuerdo al espesor de las piezas de trabajo.

Tabla 3.4. Geometría de las piezas de trabajo y herramienta para el segundo modelo.

PIEZAS DE TRABAJO (PLACAS)		HERRAMIENTA [4]	
DIMENSIONES		DIMENSIONES	
Largo	60 mm	Diámetro de Hombro	13 mm
Ancho	30 mm	Diámetro de Pasador	4 mm
Espesor	3 mm	Longitud del Pasador	2.8 mm

Las características de la malla son las mismas que se utilizan en el primer modelo y sus propiedades se muestran en la Tabla 3.2.

Cargas y restricciones.

Las curvas de movimiento se aplican en la herramienta según se muestra en la Tabla 3.5, de acuerdo al sistema coordinado mostrado en la Figura 3.17.

Se restringen todos los grados de libertad de las áreas laterales e inferiores de las placas o piezas de trabajo para evitar movimientos no requeridos en el transcurso del proceso.

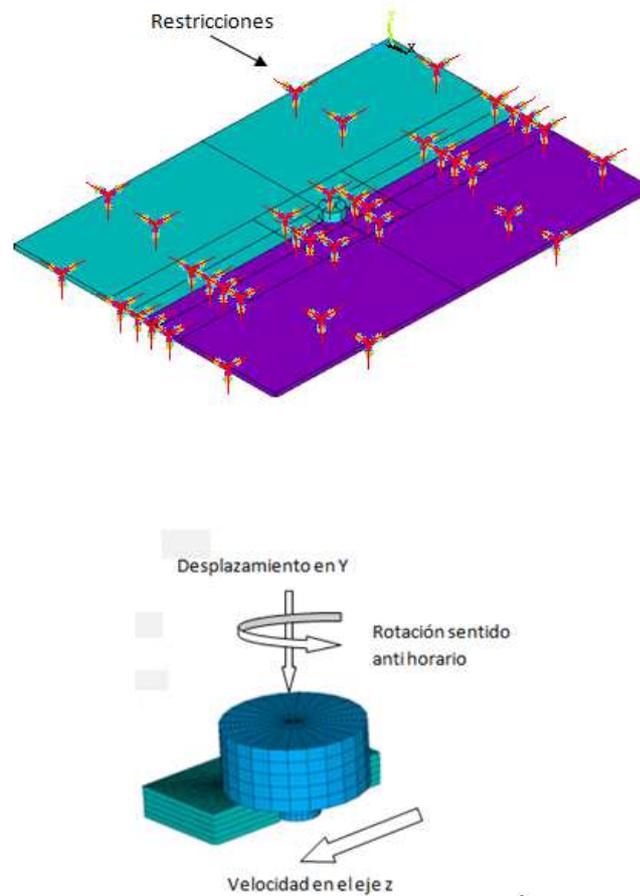


Figura 3.17. Geometría del segundo modelo y sus cargas y restricciones.

Tabla 3.5. Parámetros de carga del proceso para el modelo 2.

PRUEBAS	VELOCIDAD LINEAL. (mm/s) DIRECCIÓN POSITIVA DEL EJE Z.	VELOCIDAD DE ROTACIÓN. (rad/s) DIRECCIÓN POSITIVA DE ACUERDO A LA REGLA DE LA MANO DERECHA EN EL EJE Y.	DESPLAZAMIENTO QUE PROPORCIONA LA FUERZA DE FORJA. (mm) DIRECCIÓN NEGATIVA DEL EJE Y
1	15	62 (600rpm)	0.2 8.7 – 9.9 MPa [31]
2	2	62 (600rpm)	0.2 8.7 – 9.9 MPa [31].

3.6.1 PRUEBA 1.

La prueba 1 se realiza con los parámetros mostrados en la Tabla 3.5 y en la Figura 3.18 se da la distribución de los esfuerzos de Von Mises que se obtienen en el intervalo mostrado.

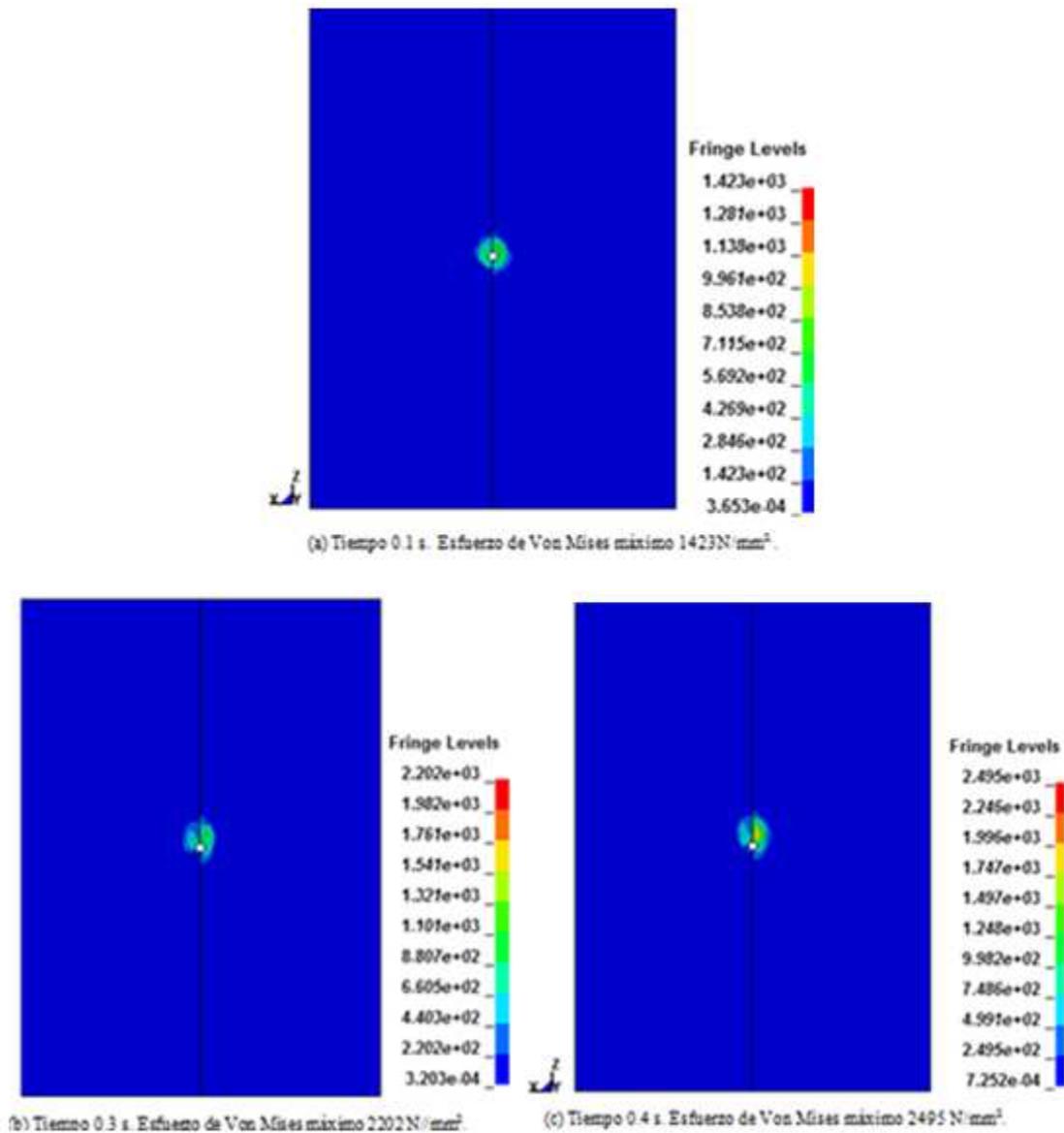


Figura 3.18. Distribución de los esfuerzos de Von Mises en un intervalo de tiempo 0.1 s – 0.4 s.

En la Figura 3.19 se aprecia un rompimiento del material debido a la distribución de deformaciones plásticas no uniforme y del cual se tiene una mejor apreciación en la Figura 3.20 ya que muestra una ampliación y acercamiento a la zona. Las isosuperficies de estas deformaciones se muestran en la Figura 3.21.

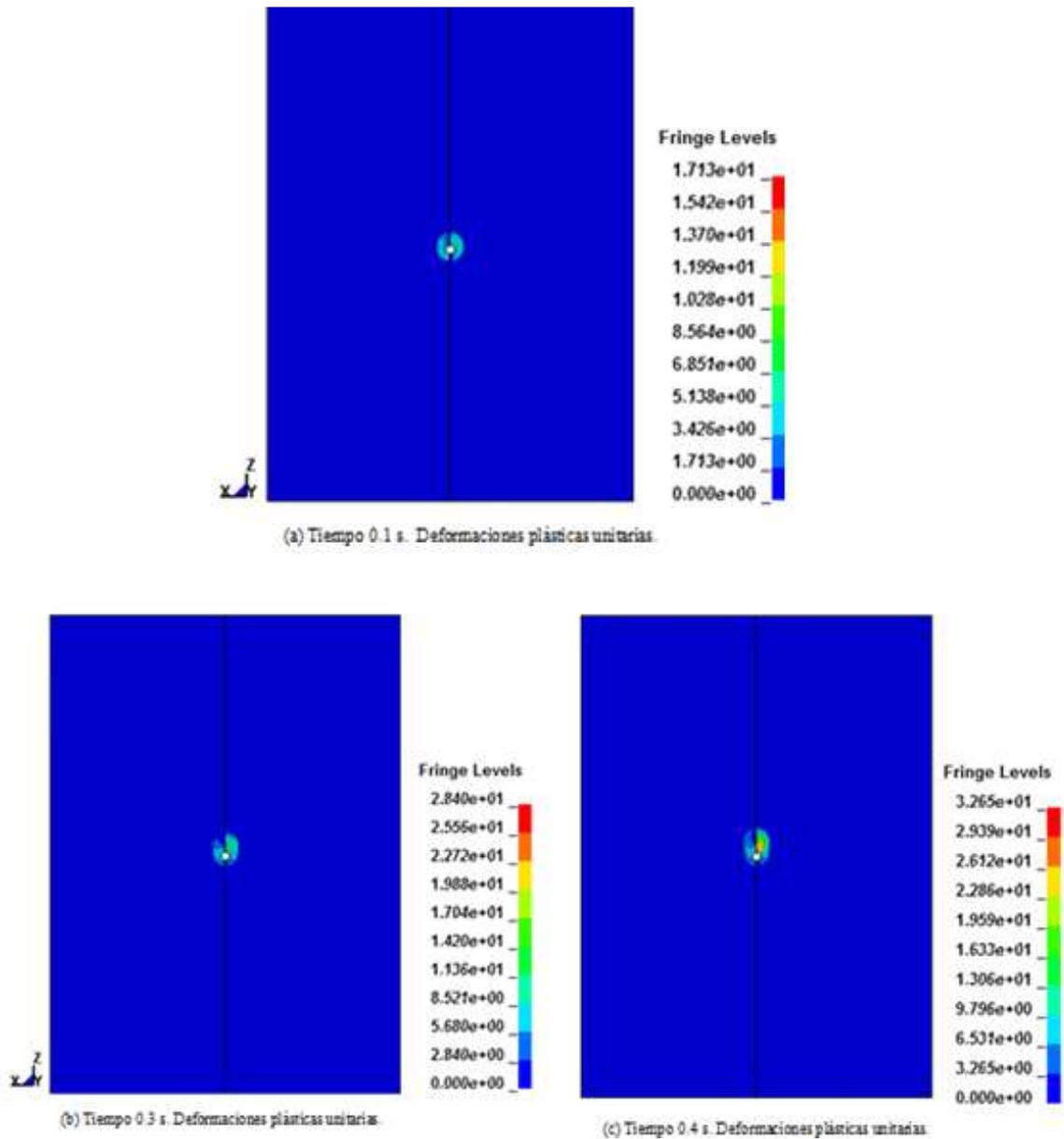


Figura 3.19. Deformaciones plásticas presentes en el intervalo de tiempo de 0.1s- 0.4s.

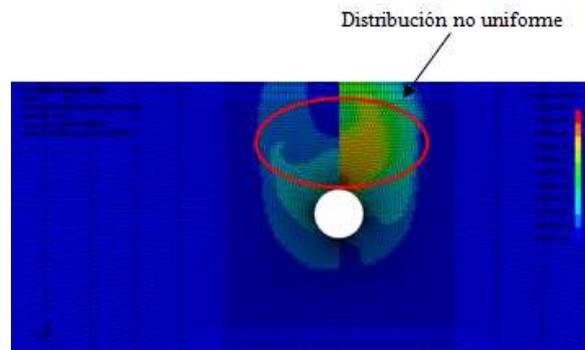


Figura 20. Deformaciones plásticas presentes en 0.4 s.

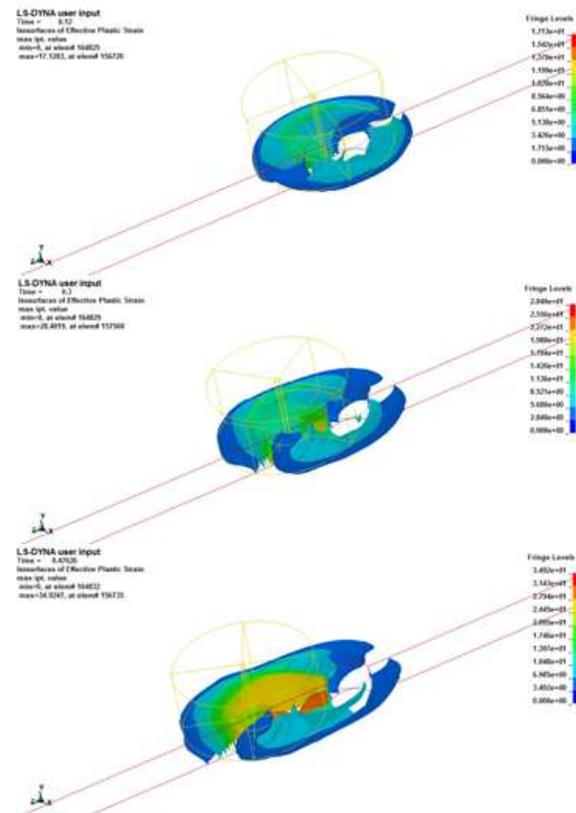


Figura 3.21. Isosuperficies de las deformaciones plásticas.

3.6.2 PRUEBA 2.

La prueba 2 se realiza con los parámetros mostrados en la Tabla 3.5 que corresponde a una velocidad de 2 mm/s y en la Figura 3.22 se observa la distribución de los esfuerzos de Von Mises que se obtienen en el intervalo mostrado.

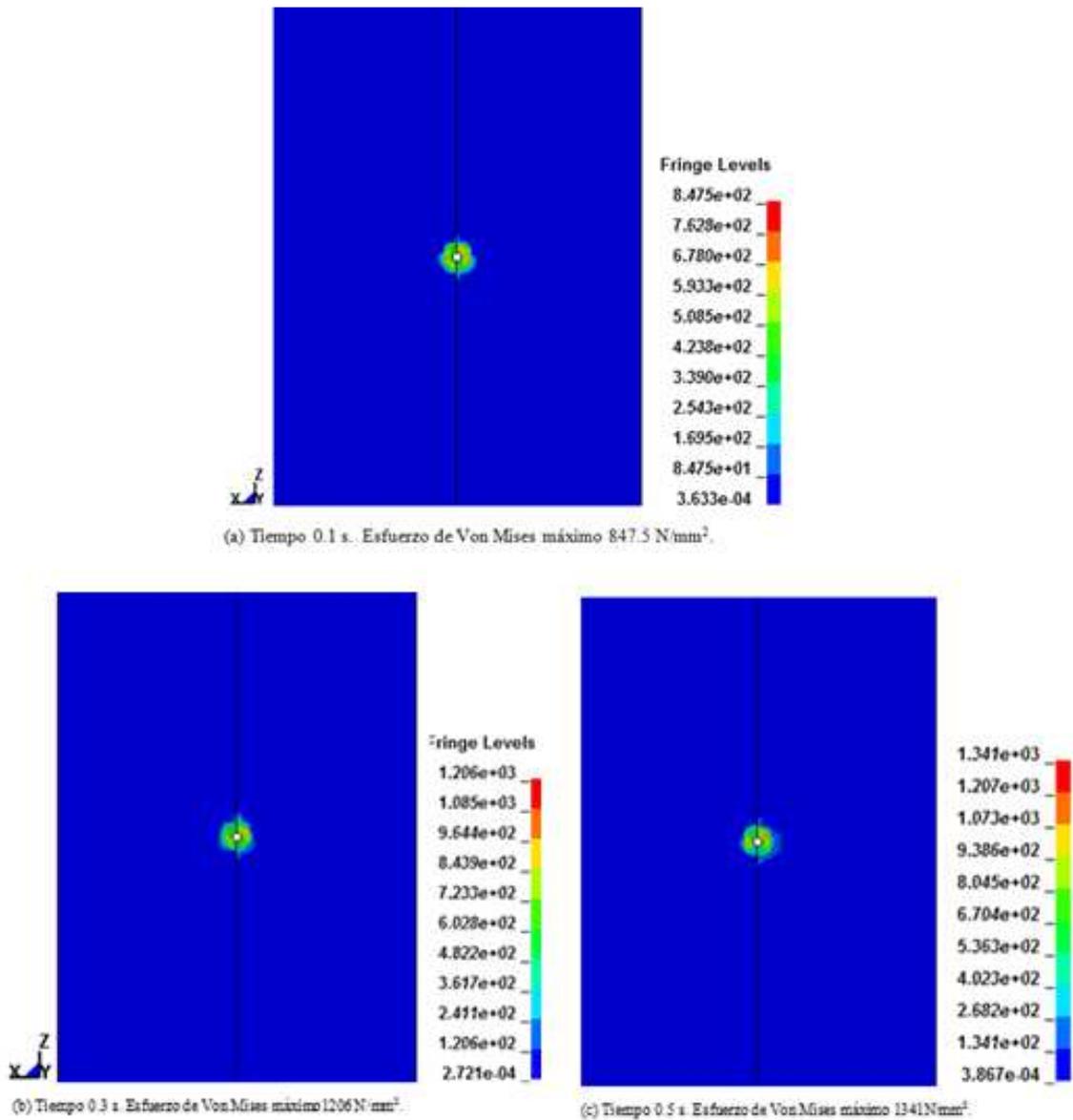
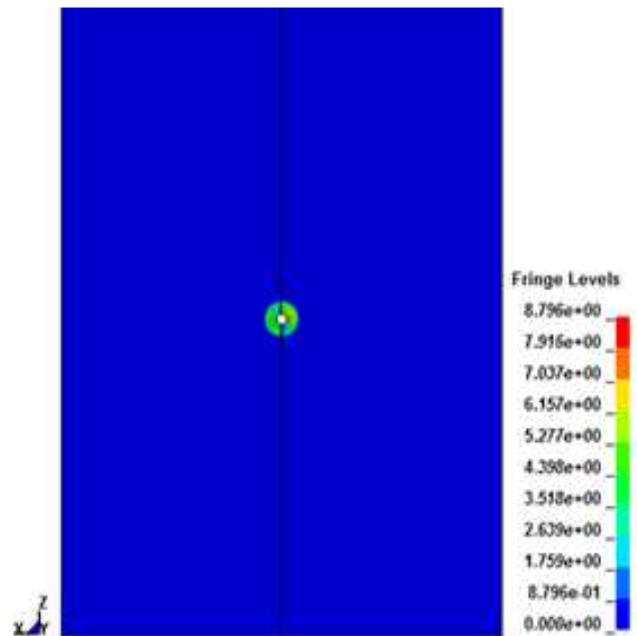
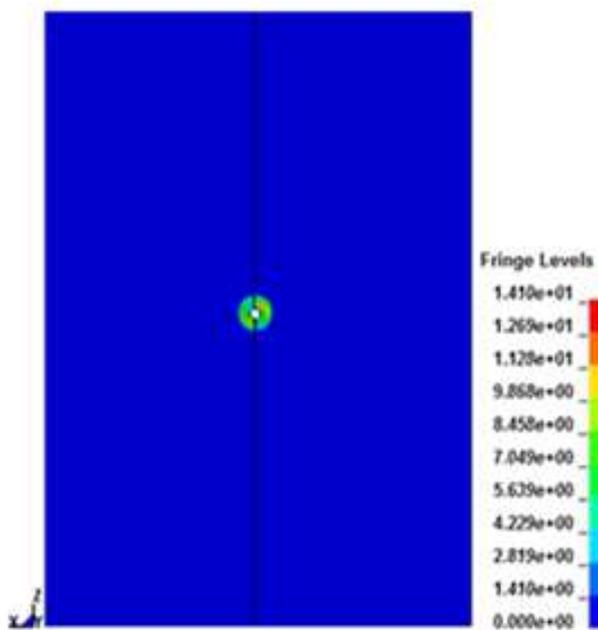


Figura 3.22. Esfuerzos de Von Mises presentados en el intervalo de 0.1 s – 0.5 s.

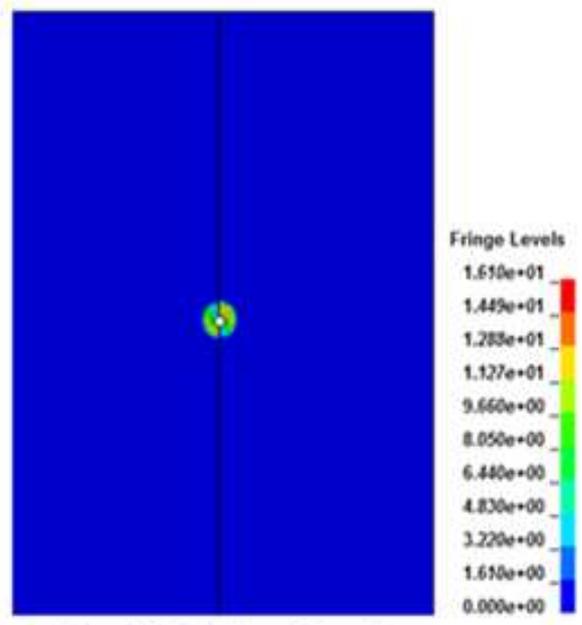
En la Figura 3.23 3.24 y 3.25 se aprecia uniformidad en las deformaciones plásticas correspondientes, por lo que podría garantizar que la unión de los elementos se lleva a cabo, es decir, existe soldadura..



(a) Tiempo 0.1 s. Deformaciones plásticas unitarias.



(b) Tiempo 0.3 s. Deformaciones plásticas unitarias.



(c) Tiempo 0.5 s. Deformaciones plásticas unitarias.

Figura 3.23. Deformaciones plásticas obtenidas en el intervalo 0.1 s – 0.5 s.

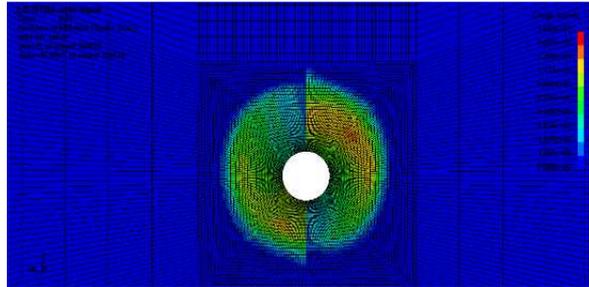


Figura 3.24. Deformaciones plásticas obtenidas en 0.5 s.

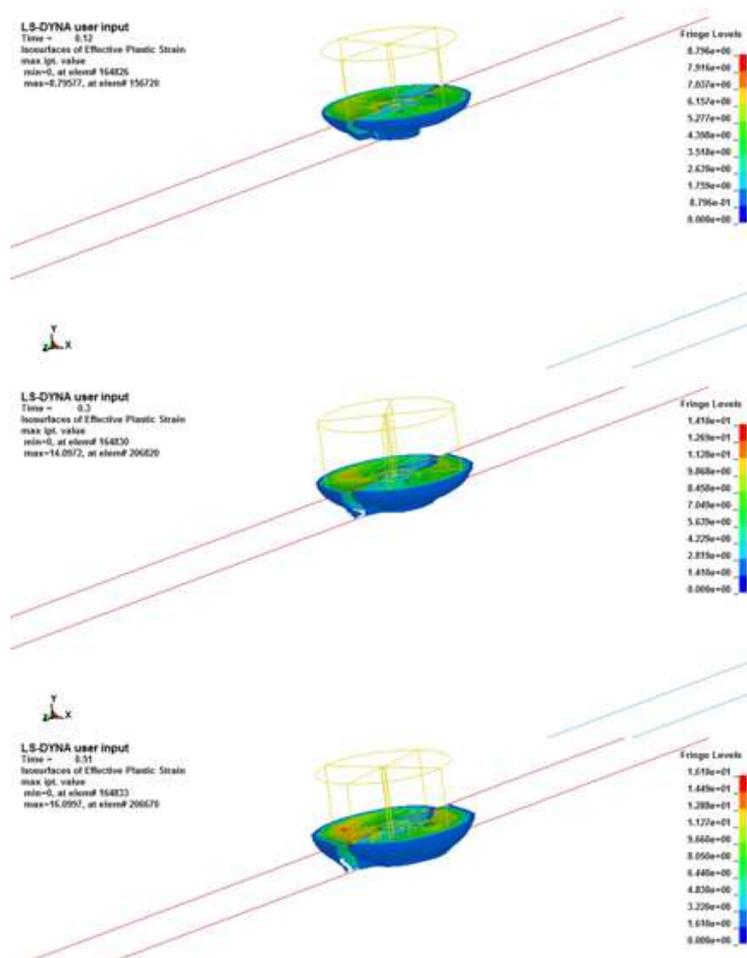
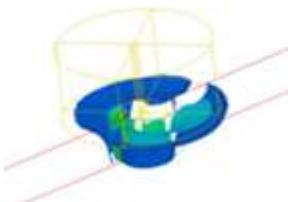
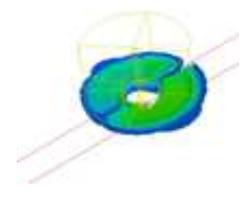
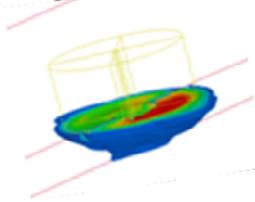
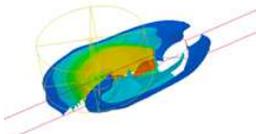
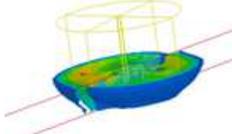


Figura 3.25. Isosuperficies de las deformaciones plásticas

Con base a los resultados observados en todas las simulaciones y que se resumen en la tabla 3.6 se concluye realizar los diseños de experimentos tomando parámetros de velocidades de avance de 2 a 5 mm/s y con un intervalo de velocidades angulares de 62 rad/s a 100 rad/s (600 a 1200 rpm) a la presión que genere el desplazamiento vertical de 0.2 mm, que es aproximadamente de 8.7 – 9.9 MPa [32].

Tabla 3.6. Resumen de resultados de los modelos de elemento finito.

	Prueba 1 (15mm/s -100 rad/s) 8.7 – 9.9 MPa	Prueba 2 (5mm/s - 100 rad/s) 8.7 – 9.9 MPa	Prueba 3 (2mm/s - 100 rad/s) 8.7 – 9.9 MPa
Primer modelo (6mm de espesor)	Deformaciones plásticas no uniformes se presenta rompimiento	Deformaciones plásticas uniformes	Deformaciones plásticas uniformes
			
	Prueba 1 (15mm/s - 62 rad/s) 8.7 – 9.9 MPa	Prueba 2 (2mm/s - 62 rad/s) 8.7 – 9.9 MPa	
Segundo modelo (3mm de espesor)	Deformaciones plásticas no uniformes se presenta rompimiento	Deformaciones plásticas uniformes	
			

CAPÍTULO 4.

ANÁLISIS EXPERIMENTAL

4.1 INTRODUCCIÓN.

De acuerdo a Douglas C. Montgomery [25], para que un experimento se realice en la forma eficiente, es necesario emplear métodos científicos en su planeación, el diseño estadístico de experimentos es el proceso de planear un experimento para obtener datos apropiados que puedan ser analizados mediante métodos estadísticos con el objeto de producir conclusiones válidas y objetivas se requiere de un enfoque estadístico del diseño de experimentos para obtener conclusiones significativas a partir de los datos. La metodología estadística es el único enfoque objetivo para analizar un problema que involucre datos sujetos a errores experimentales. Así que hay dos aspectos en cualquier problema experimental: el diseño del experimento y el análisis estadístico de los datos.

En la Tabla 4.1 se muestra un esquema general del procedimiento que Douglas C. Montgomery [25] recomienda para aplicar un enfoque estadístico en el diseño y análisis de un experimento.

Tabla 4.1. Esquema general para diseñar un experimento.

1 Identificación y exposición del problema.	Planeación previa al experimento
2 Elección de los factores, los niveles y los rangos.	Planeación previa al experimento
3 Selección de la variable de respuesta.	Planeación previa al experimento
4 Elección del diseño experimental.	
5 Realización del experimento.	
6 Análisis estadístico de los datos.	
7 Conclusiones y recomendaciones.	

4.2 HERRAMIENTAS Y MONTAJE.

Para la manufactura de las herramientas se tomó en cuenta las recomendaciones y referencias hechas en el Capítulo 1 de este documento.

Las herramientas se manufacturaron con acero denominado H13 y cuyas características se muestran en la Tabla 4.2 [26].

Tabla 4.2. Propiedades mecánicas y térmicas del acero H13 [27].

PROPIEDADES	VALOR
Módulo de elasticidad	207 GPa.
Densidad	7750 Kg/m ³
Conductividad térmica	0.066 cal/cm-s- ⁰ C
Dureza después de templado	52 HRC

Las dimensiones de las herramientas se muestran en la Tabla 4.3 las cuales se utilizaron también en los modelos de elemento finito del Capítulo 5. La longitud total de la herramienta depende del espacio que proporciona la máquina donde se monta el proceso.

Tabla 4.3. Dimensiones de las herramientas para el proceso de FSW.

HERRAMIENTA	DIMENSIONES
	<p>Para placas de 6 mm de espesor</p> <p>Diámetro del hombro : 20 mm Diámetro del pasador: 7 mm Longitud del pasador: 5.8 mm</p>
	<p>Para placas de 3mm de espesor</p> <p>Diámetro del hombro : 13 mm Diámetro del pasador: 4 mm Longitud del pasador: 2.8 mm</p>

Cabe hacer mención que el tratamiento térmico de templado necesario para aumentar la dureza del material de la herramienta se llevó a cabo en el laboratorio

de manufactura de la División de Ingeniería Campus Irapuato-Salamanca de la Universidad de Guanajuato, con lo cual se obtuvo la dureza marcada en la Tabla 4.2. En la Figura 4.1 se muestra una serie de fotografías del evento.

El templado se realizó [26] con un precalentamiento de 675°C para después alcanzar la temperatura de temple de 1025°C manteniéndola por un tiempo de 30 minutos, una vez terminado este tiempo se saca del horno y se deja enfriar al aire libre.



Figura 4.1. Proceso de temple de las herramientas.

El proceso de FSW se realizó en el taller de máquinas y herramientas de la misma dependencia y se montó en la máquina de fresado. Con respecto a las placas de 6 mm de espesor no pudo desarrollarse prácticas porque se generaba vibraciones que ponían en riesgo de daño al equipo, por lo tanto, únicamente se hicieron pruebas con placas de 3 mm de espesor.

Se fabricó una base de acero en la cual se sujetaron por medio de tornillos y arandelas las placas de aluminio. Asimismo se sostuvo con un tornillo de banco tal como se muestra en la Figura 4.2.



Figura 4.2. Montaje del proceso FSW.

4.3 PRIMER DISEÑO DE EXPERIMENTO.

La selección de los valores de los parámetros a analizar se realiza con base a los modelos mencionados en el Capítulo 5, tal es el caso de la velocidad lineal, en donde se seleccionan dos niveles, para las revoluciones dos y el desplazamiento se mantuvo en un valor fijo.

1 Velocidad lineal: 2mm/s y 5 mm/s.

2 Revoluciones: 600 y 1200 rpm (62- 100 rad/s).

3 Desplazamiento vertical de la herramienta: 0.2 mm. Presión de forja de 8.7 – 9.9 MPa [31].

Utilizando el software MINITAB para el diseño de experimento se hizo la combinación de los parámetros de manera aleatoria, repitiendo cada uno de ellos cuatro veces, resulto las corridas que se muestran en la Tabla 4.4.

Tabla 4.4. Primer diseño de experimentos. Corridas en MINITAB.

	StdOrder	RunOrder	CenterPt	Blocks	mm/s	RPM
1	1	1	1	1	2	600
2	6	2	1	1	5	600
3	2	3	1	1	5	600
4	7	4	1	1	2	1200
5	5	5	1	1	2	600
6	8	6	1	1	5	1200
7	3	7	1	1	2	1200
8	4	8	1	1	5	1200

En la Figura 4.3 se observa el desarrollo del experimento y sus resultados.



Figura 4.4. Desarrollo del primer diseño de experimentos.

Una vez obtenidas las muestras experimentales con los parámetros que se proponen con base a los resultados de deformaciones obtenidos en los modelos, se procede a realizar pruebas de inspección de la calidad de soldadura para de esta manera verificar dichos resultados o hipótesis.

Las pruebas van desde las no destructivas a las destructivas y se enlistan a continuación:

Inspección Radiográfica.

Medición de Dureza.

Pruebas de Tensión.

INSPECCIÓN RADIOGRÁFICA:

Este método de prueba aprovecha la posibilidad que ofrecen las radiaciones de onda corta, como los rayos X, de penetrar a través de objetos opacos a luz ordinaria. No toda la radiación penetra a través de la soldadura; parte de ella es absorbida. La magnitud de la absorción es función de la densidad y del espesor de la soldadura. Si hay una cavidad o poro en el interior de la soldadura, el haz de radiación tendrá menos metal que traspasar que en una soldadura sana. Consecuentemente, habrá una variación, que al registrarse en una película dará una sombra que indicará la presencia del defecto.

La revisión de las radiografías se hace como se muestra en la Figura 4.5: En la Figura 4.5 (a) además de la huella de la herramienta no se ven imperfecciones en la soldadura ni líneas que marcan división, por lo que se concluye que la soldadura tiene buena penetración y en el caso de Figura 4.5 (b) existen imperfecciones por lo que la soldadura no se considera de buena calidad.

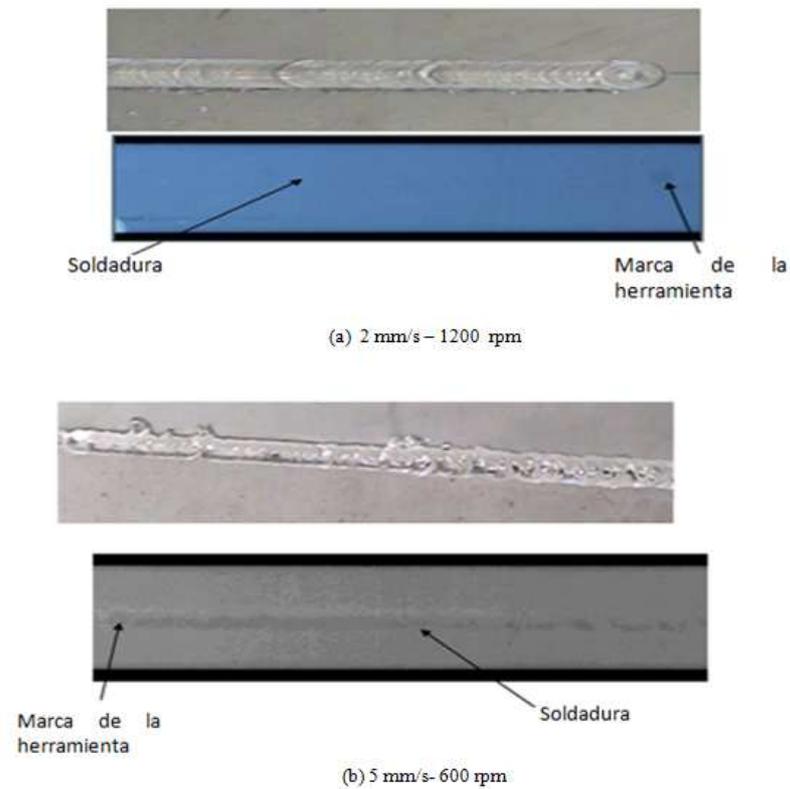
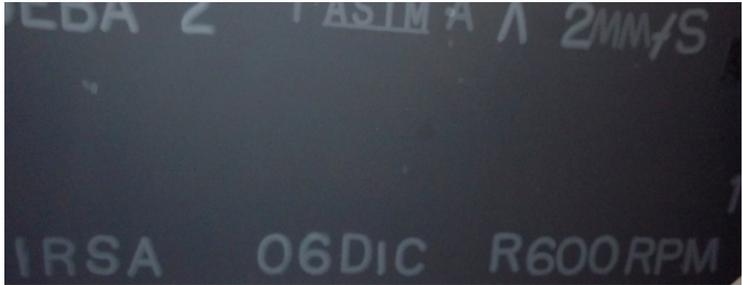
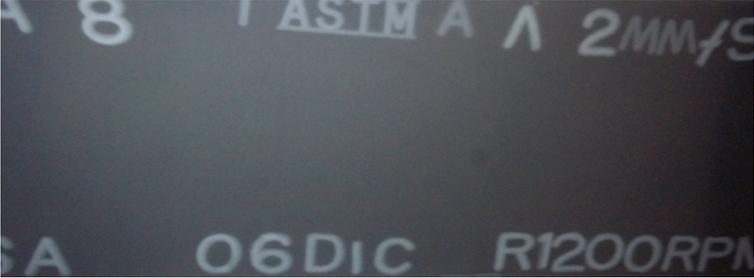
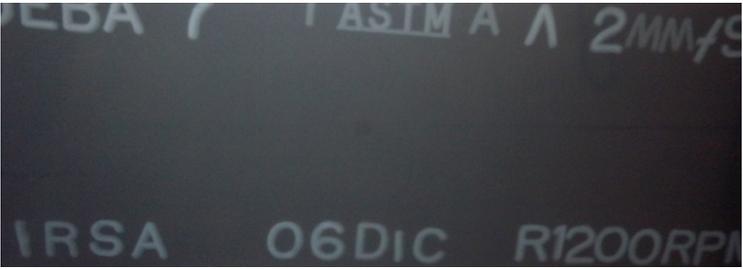


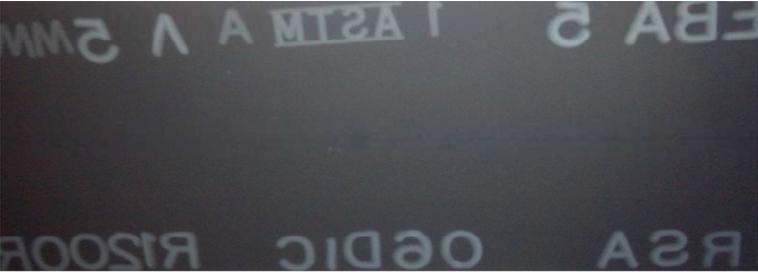
Figura 4.5. Detalle de dos radiografías obtenidas en el proceso de inspección por rayos X. Primer diseño de experimentos.

Con base en esta introducción al análisis de una inspección por rayos X se obtienen las radiografías que se muestran en la Tabla 4.5 para el primer lote de placas soldadas en el desarrollo del primer diseño de experimento.

Tabla 4.5. Prueba de inspección por rayos X del primer diseño de experimentos.

<p>PARÁMETROS</p> <p>Comentarios de la inspección visual</p>	<p>RADIOGRAFÍA</p> <div style="text-align: center;">  </div>		
<p>Velocidad lineal 2mm/s Revoluciones 600 rpm</p> <p>No se observa imperfecciones o poros en la Zona de soldadura.</p>			
<p>Velocidad lineal 5mm/s Revoluciones 600 rpm</p> <p>Se observa una mala unión y defectos en la zona de soldadura</p>			
<p>Velocidad lineal 5mm/s Revoluciones 600rpm</p> <p>Se observa una mala unión y defectos en la zona de soldadura</p>			

<p>Velocidad lineal 2mm/s Revoluciones 1200 rpm</p> <p>Se observa imperfecciones o poros en la Zona de soldadura</p>	
<p>Velocidad lineal 2mm/s Revoluciones 600 rpm</p> <p>No se observa imperfecciones o poros en la Zona de soldadura</p>	
<p>Velocidad lineal 5mm/s Revoluciones 1200 rpm</p> <p>Se observa imperfecciones o poros en la Zona de soldadura</p>	
<p>Velocidad lineal 2mm/s Revoluciones 1200 rpm</p> <p>No se observa imperfecciones o poros en la Zona de soldadura</p>	

<p>Velocidad lineal 5 mm/s Revoluciones 1200 rpm</p> <p>No se observa imperfecciones o poros en la Zona de soldadura</p>	
--	--

De acuerdo al análisis visual de las radiografías los parámetros seleccionados para las siguientes pruebas se mencionan a continuación.

- Corrida 1 velocidad lineal 2 mm/s y 600 rpm.
- Corrida 4 velocidad lineal 2 mm/s y 1200 rpm.
- Corrida 5 velocidad lineal 2 mm/s y 600 rpm.
- Corrida 7 velocidad lineal 2 mm/s y 1200 rpm.
- Corrida 8 velocidad lineal 5 mm/s y 1200 rpm.

PRUEBAS DE DUREZA:

Esta prueba se hace con el objetivo de verificar la variación de propiedades mecánicas dentro del cordón de soldadura y sus laterales. La escala seleccionada para medir la dureza fue la Rockwell B.

En la Figura 4.6 se dan los resultados de la medición de dureza a las placas seleccionadas y se observa que la variación de dureza no es muy significativa, aunque del lado de retroceso se nota un aumento en comparación con el cordón y el lado de avance, esto ocurre en la mayoría de las muestras obtenidas.

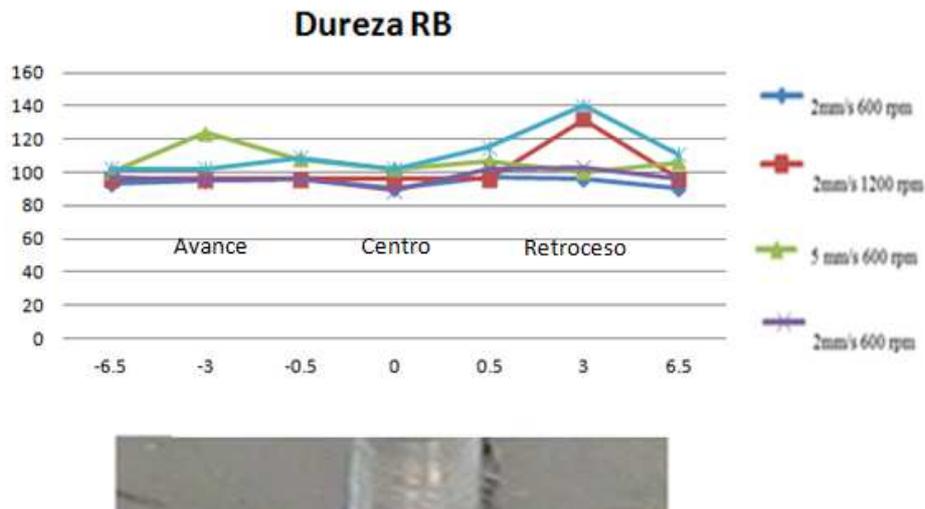


Figura 4.6. Gráficas de dureza en las placas seleccionadas del primer diseño de experimentos.

La medición de dureza en este caso no arroja un dato selectivo, ya que se nota que todas las placas tienen comportamiento semejante.

PRUEBAS DE RESISTENCIA A LA TENSIÓN:

Para realizar la prueba se cortan las probetas con las dimensiones que recomienda la norma ASTM-E8-03 [27], como se muestra en la Figura 4.7 [27].

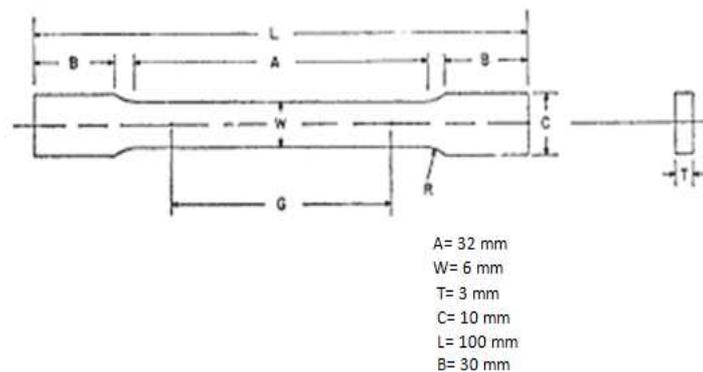


Figura 4.7. Especimen para pruebas de tensión placa de 3 mm de espesor norma ASTM E8-03 [28].

Cabe hacer mención que las probetas se maquinaron en una fresadora convencional, por lo tanto, existieron variaciones en las dimensiones de las probetas.

Una vez obtenidas las probetas se realiza la prueba en una máquina universal para pruebas mecánicas, la cual otorga gráficas de fuerza (Kgf) contra desplazamiento (mm) y que se muestra en la Figura 4.8. La velocidad de prueba fue de 1 mm/min.



Figura 4.8. Máquina universal para pruebas mecánicas.

En la Figura 4.9 se muestran las gráficas fuerza-desplazamiento (Kgf-mm) obtenidas con las probetas de los parámetros seleccionados, de cada muestra de soldadura se maquinaron dos probetas.

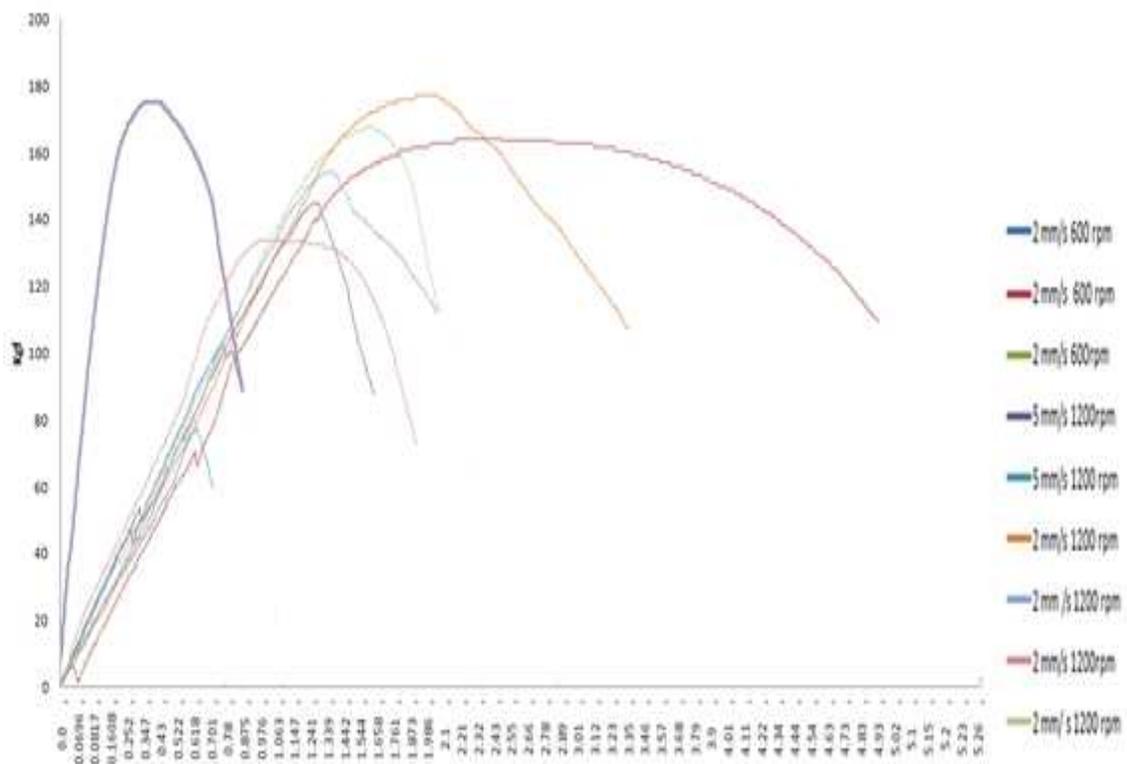


Figura 4.9. Gráficas de las pruebas de tensión del primer diseño de experimentos

En la Figura 4.10 se muestra la gráfica y la probeta de la aleación de aluminio 6061 esto con el fin de hacer una comparación entre ésta y las probetas con la soldadura.

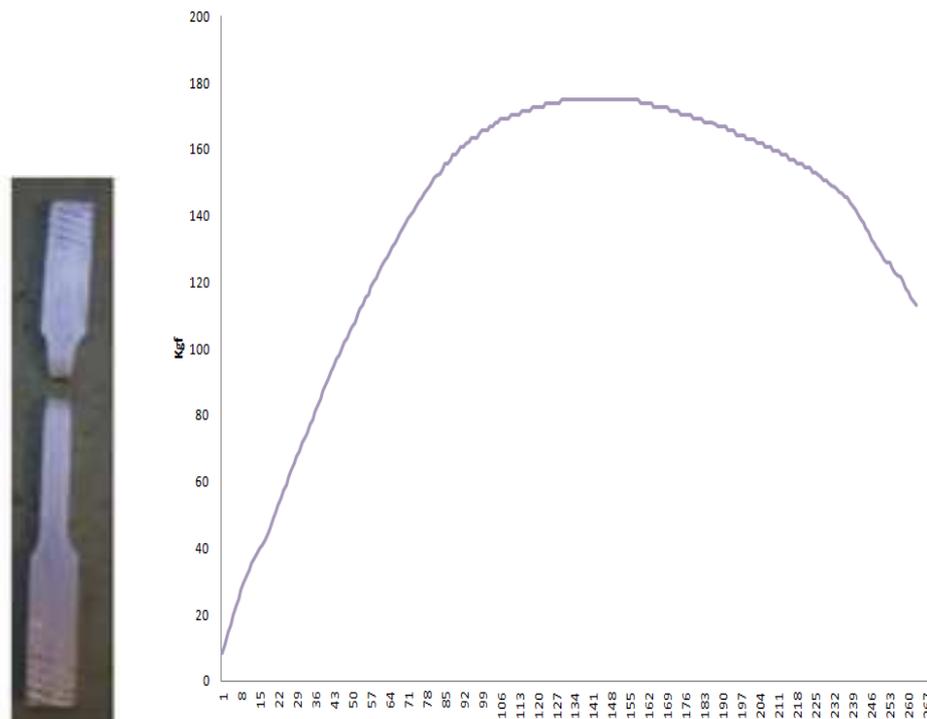


Figura 4.10. Prueba de tensión en aleación de aluminio 6061.

De esta manera comparando la fuerza máxima de tensión de la aleación de aluminio y las obtenidas en las pruebas con la soldadura, se observa que las de menor fuerza aún por debajo de la de aluminio y que incluso se repite en sus dos pruebas, son las realizadas con los parámetros de 5mm/s de avance lineal y 1200 rpm de velocidad angular.

Tomando en cuenta las observaciones y conclusiones de la prueba de radiografiado y la prueba de tensión, en los siguientes experimentos se conserva fija la velocidad lineal de 2 mm/s y se hacen variaciones en los parámetros de velocidad angular. En este primer diseño de experimentos no se hace un análisis estadístico con los resultados, ya que se fue haciendo una eliminación de acuerdo al avance de las pruebas de inspección.

Algunas probetas antes y después de la prueba de tensión se muestran en la Figura 4.11, las probetas en las cuales se utilizó el parámetro de 2 mm/s de avance lineal fueron las que más se acercaron a la máxima fuerza de tensión de aleación de aluminio, incluso la probeta de parámetros de 2 mm/s y 600 rpm muestra la falla fuera de la región de soldadura lo cual podría indicarnos mejoras en la resistencia a la tensión de la soldadura.

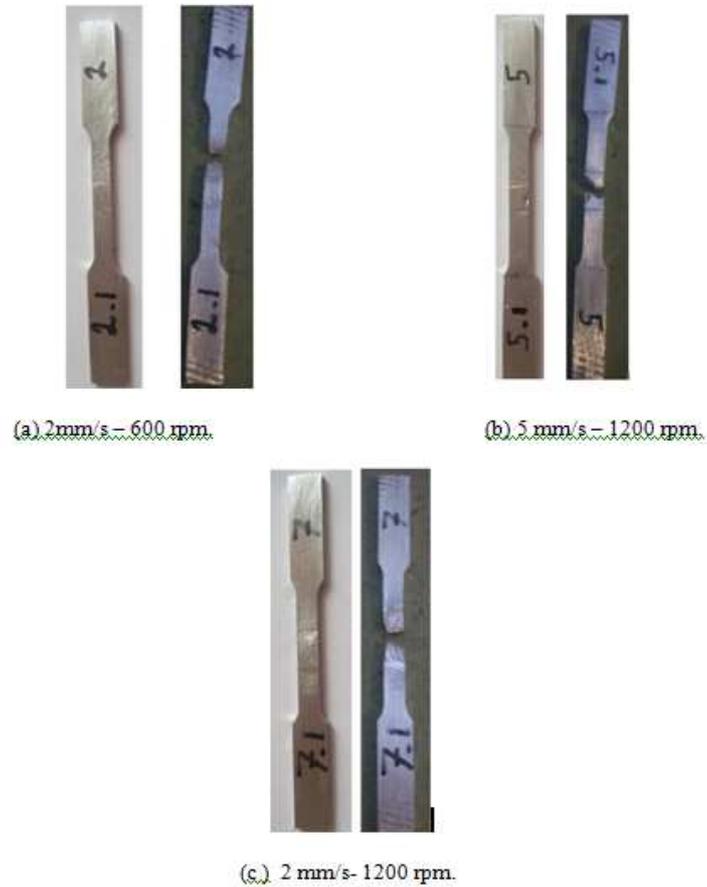


Figura 4.11. Muestras de la falla por tensión de las probetas.

4.4 SEGUNDO DISEÑO DE EXPERIMENTO.

Para el segundo diseño de experimentos se tomó como parámetro fijo la velocidad lineal de 2 mm/s, esto tomando como referencia los resultados obtenidos en el primer diseño de experimentos.

De esta manera los parámetros a evaluar serían los que a continuación se mencionan:

- Velocidad lineal: 2mm/s
- Revoluciones: 600, 756, 960 y 1200 rpm.
- Desplazamiento vertical de la herramienta: 0.25 mm.

Utilizando nuevamente el software MINITAB para el diseño de experimento se hizo la combinación de los parámetros de manera aleatoria, repitiendo cada uno de ellos tres veces, resultó las corridas que se muestran en la Tabla 4.5.

Tabla 4.5 Segundo diseño de experimentos. Corridas en MINITAB.

		StdOrder	RunOrder	CenterPt	Blocks	RPM
1	600		1	1	1	600
2	600		2	1	1	960
3	600		3	1	1	960
4	756		4	1	1	756
5	756		5	1	1	1200
6	756		6	1	1	1200
7	960		7	1	1	600
8	960		8	1	1	960
9	960		9	1	1	600
10	1200		10	1	1	756
11	1200		11	1	1	1200
12	1200		12	1	1	756

Se hace el montaje y de esta manera se obtienen las placas soldadas que se muestran en la Figura 4.12 (a), (b) y (c).



Vista Frontal



Vista trasera

(a) 2 mm/s - 600 rpm.



Vista Frontal

Vista trasera

(b) 2 mm/s - 756 rpm.



Vista Frontal

Vista trasera

(c) 2 mm/s - 960 rpm.

Figura 4.12. Placas soldadas con el proceso FSW a diferentes parámetros.

INSPECCIÓN POR RAYOS X:

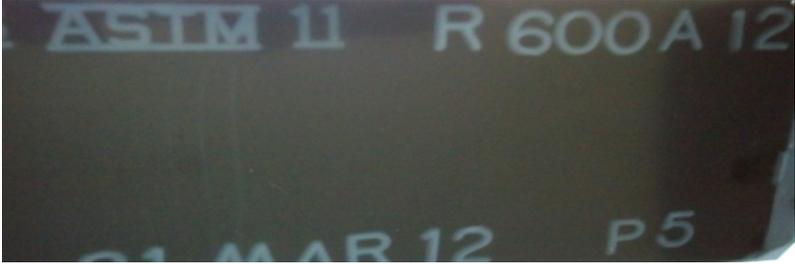
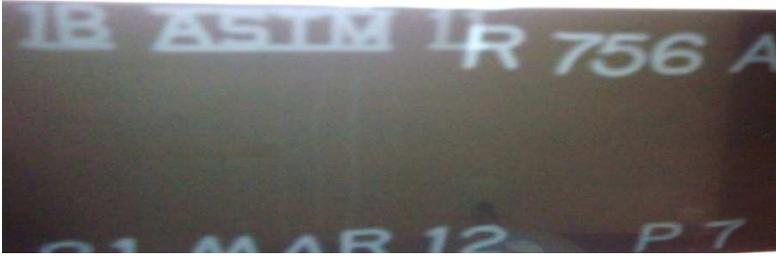
Una vez terminado el experimento se realizan nuevamente las pruebas para verificar la calidad de la soldadura de acuerdo a los resultados de dureza (medición de dureza), resistencia a la tensión (pruebas de tensión) y apreciación visual de defectos y poros (inspección radiográfica o rayos X), igual que en el primer diseño de experimentos de este trabajo la primera prueba corresponde a una inspección por rayos X obteniendo las radiografías que se muestran en la Tabla 4.6. En la Figura 4.13 se muestra un ejemplo de análisis de radiografía.

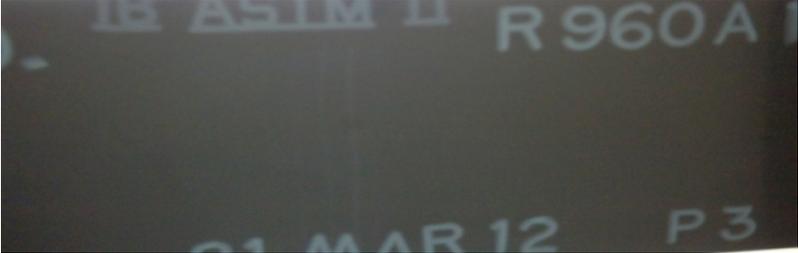
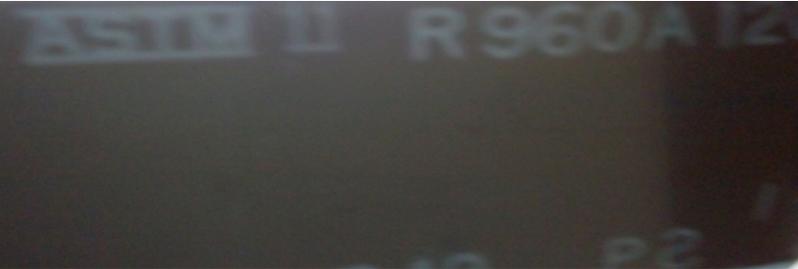


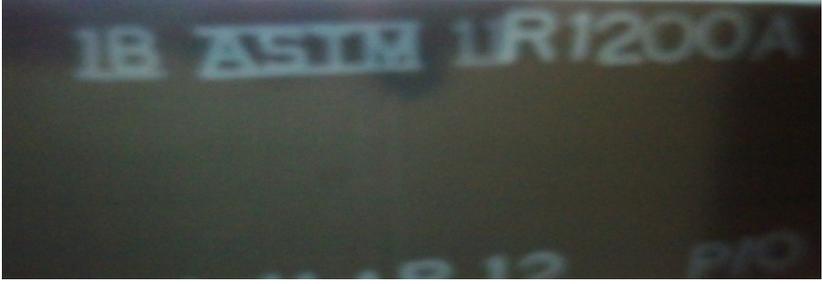
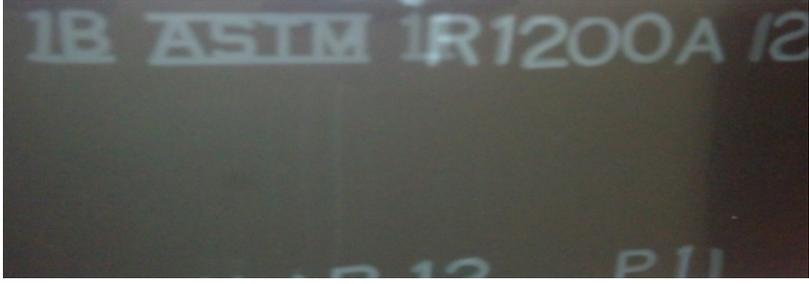
Figura 4.13. Análisis de radiografía del experimento dos.

Tabla 4.6. Prueba de radiografía para el segundo diseño de experimentos.

PARÁMETROS Comentarios de la inspección visual	RADIOGRAFÍA		
	Línea de división	Salida de la herramienta	Zona de soldadura
Velocidad lineal 2mm/s Revoluciones 600 rpm No se observa imperfecciones o poros en la Zona de soldadura			
Velocidad lineal 2mm/s Revoluciones 600 rpm No se observa imperfecciones o poros en la Zona de soldadura			

<p>Velocidad lineal 2mm/s Revoluciones 600 rpm</p> <p>No se observa imperfecciones o poros en la Zona de soldadura</p>	
<p>Velocidad lineal 2mm/s Revoluciones 756 rpm</p> <p>No se observa imperfecciones o poros en la Zona de soldadura</p>	
<p>Velocidad lineal 2mm/s Revoluciones 756 rpm</p> <p>No se observa imperfecciones o poros en la Zona de soldadura</p>	
<p>Velocidad lineal 2mm/s Revoluciones 756 rpm</p> <p>No se observa imperfecciones o poros en la Zona de soldadura</p>	

<p>Velocidad lineal 2mm/s Revoluciones 960 rpm</p> <p>No se observa imperfecciones o poros en la Zona de soldadura</p>	
<p>Velocidad lineal 2mm/s Revoluciones 960 rpm</p> <p>No se observa imperfecciones o poros en la Zona de soldadura</p>	
<p>Velocidad lineal 2mm/s Revoluciones 960 rpm</p> <p>No se observa imperfecciones o poros en la Zona de soldadura</p>	
<p>Velocidad lineal 2mm/s Revoluciones 1200 rpm</p> <p>No se observa imperfecciones o poros en la Zona de soldadura</p>	

<p>Velocidad lineal 2mm/s Revoluciones 1200 rpm</p> <p>No se observa imperfecciones o poros en la Zona de soldadura</p>	
<p>Velocidad lineal 2mm/s Revoluciones 1200 rpm</p> <p>No se observa imperfecciones o poros en la Zona de soldadura</p>	

Con el análisis visual de las radiografías se observa que en ninguna de las variaciones de los parámetros existen imperfecciones en la soldadura, sólo se ve la marca de la herramienta y no se aprecia división entre las placas en la zona soldada.

PRUEBAS DE RESISTENCIA A LA TENSIÓN:

Nuevamente se hace el corte de las probetas bajo la norma ASTM-E8-03., en esta ocasión se ejecutó en una máquina de control numérico (CNC). La prueba de tensión se realizó con una velocidad de avance de 1 mm/min y se cortaron dos probetas para cada cordón de soldadura de los diferentes parámetros como se muestra en la Figura 4.14.



Figura 4.14. Corte de las probetas para pruebas de tensión del segundo diseño de experimentos.

El dato a comparar es el valor de la fuerza máxima que se muestran en la tabla 4.7 y que se obtiene de las curvas fuerza-desplazamiento de las tablas 4.8 a la 4.11.

La comparación se realiza entre las fuerzas de las probetas con soldadura contra la de la probeta de aluminio sin soldadura.

Tabla 4.7 Fuerzas Máximas alcanzadas en la prueba de tensión del segundo diseño de experimentos.

PRUEBA	REVOLUCIONES R.P.M.	FUERZAS MÁXIMAS ALCANZADAS (Kg f)	
Aluminio		176.9	
1	600	174.5	174.4
7	600	178	177.4
9	600	174.8	174.7
4	756	43	45.5
10	756	155	154
12	756	177.4	187.5
2	960	152.4	153.5
3	960	175.7	186.5
8	960	173.5	165.8
5	1200	144.3	148.7
6	1200	158.7	146.4
11	1200	132.5	144.7

Tabla 4.8. Diagramas fuerza-Desplazamiento para las probetas con soldadura realizada a 600 rpm. Segundo experimento.

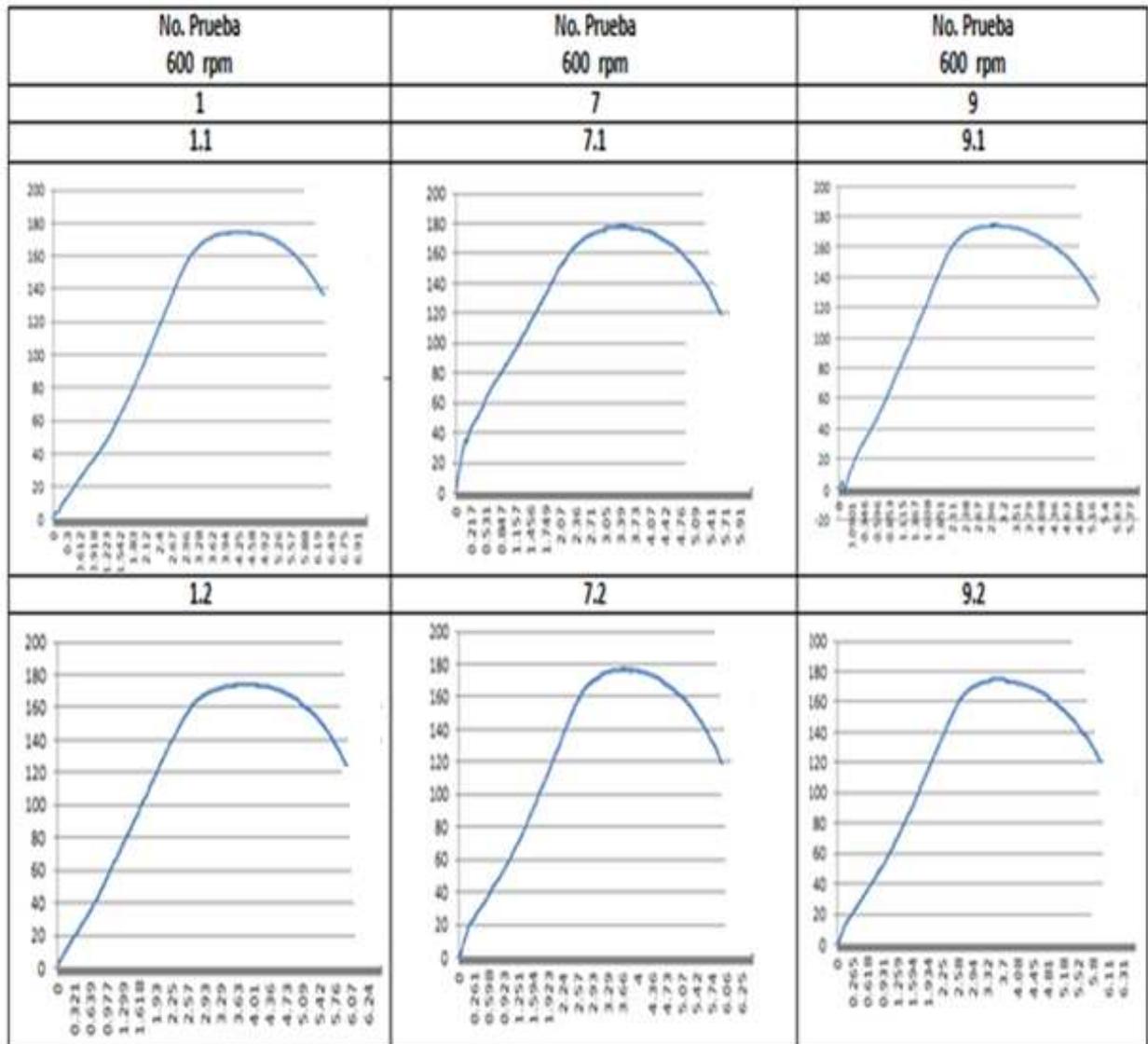


Tabla 4.9. Diagramas fuerza-Desplazamiento para las probetas con soldadura realizada a 756 rpm. Segundo experimento.

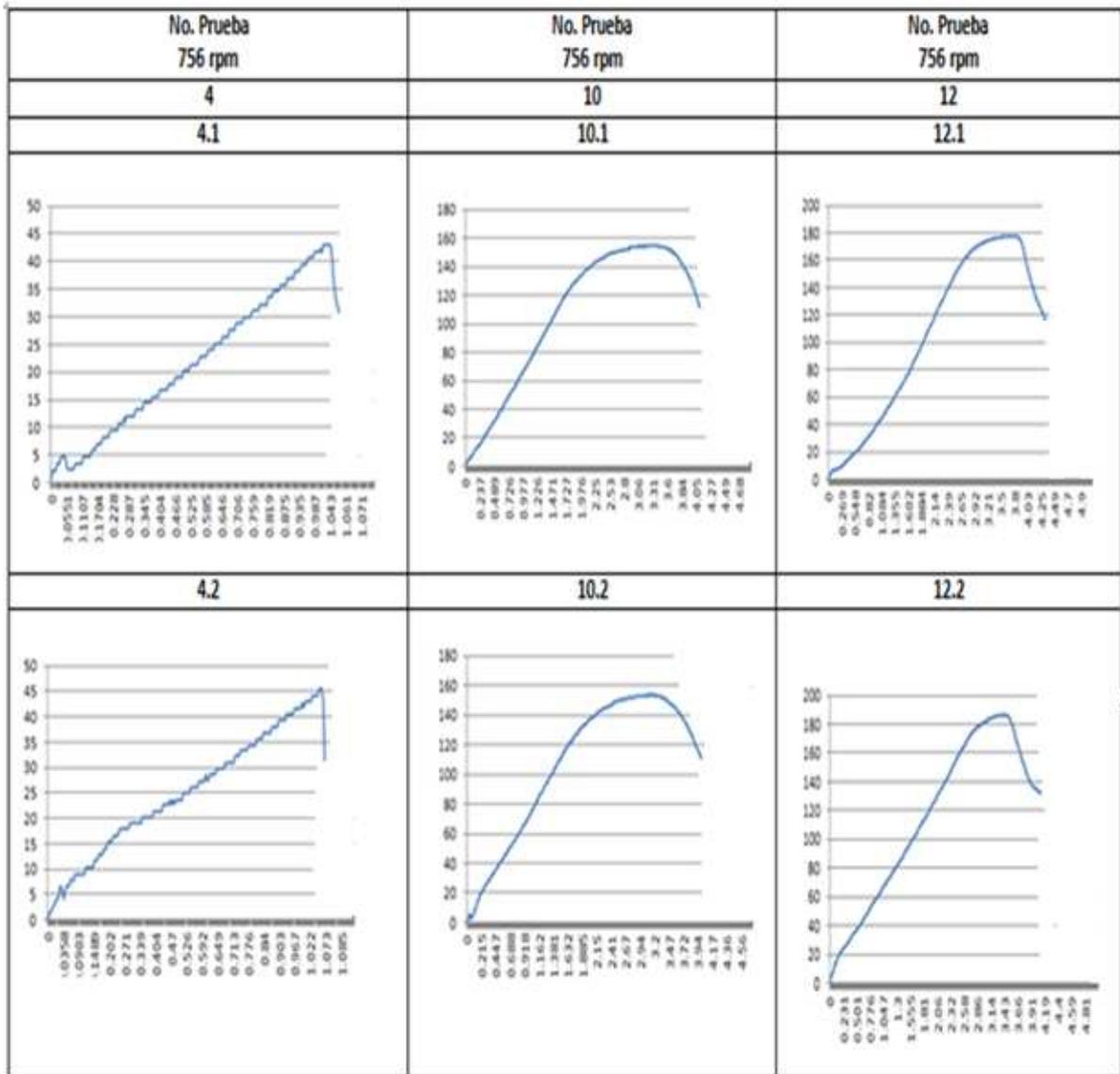


Tabla 4.10. Diagramas fuerza-Desplazamiento para las probetas con soldadura realizada a 960 rpm. Segundo experimento.

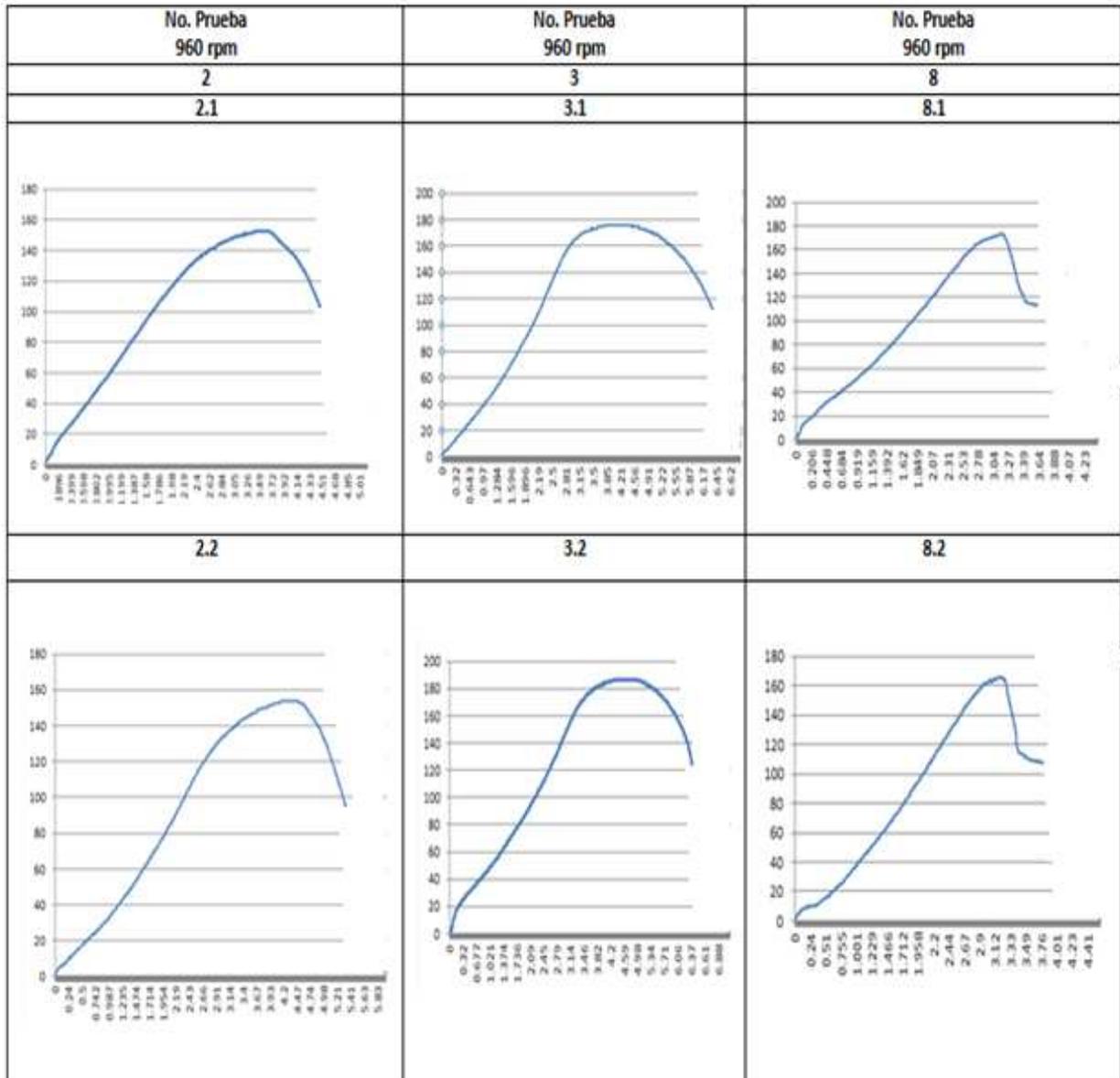
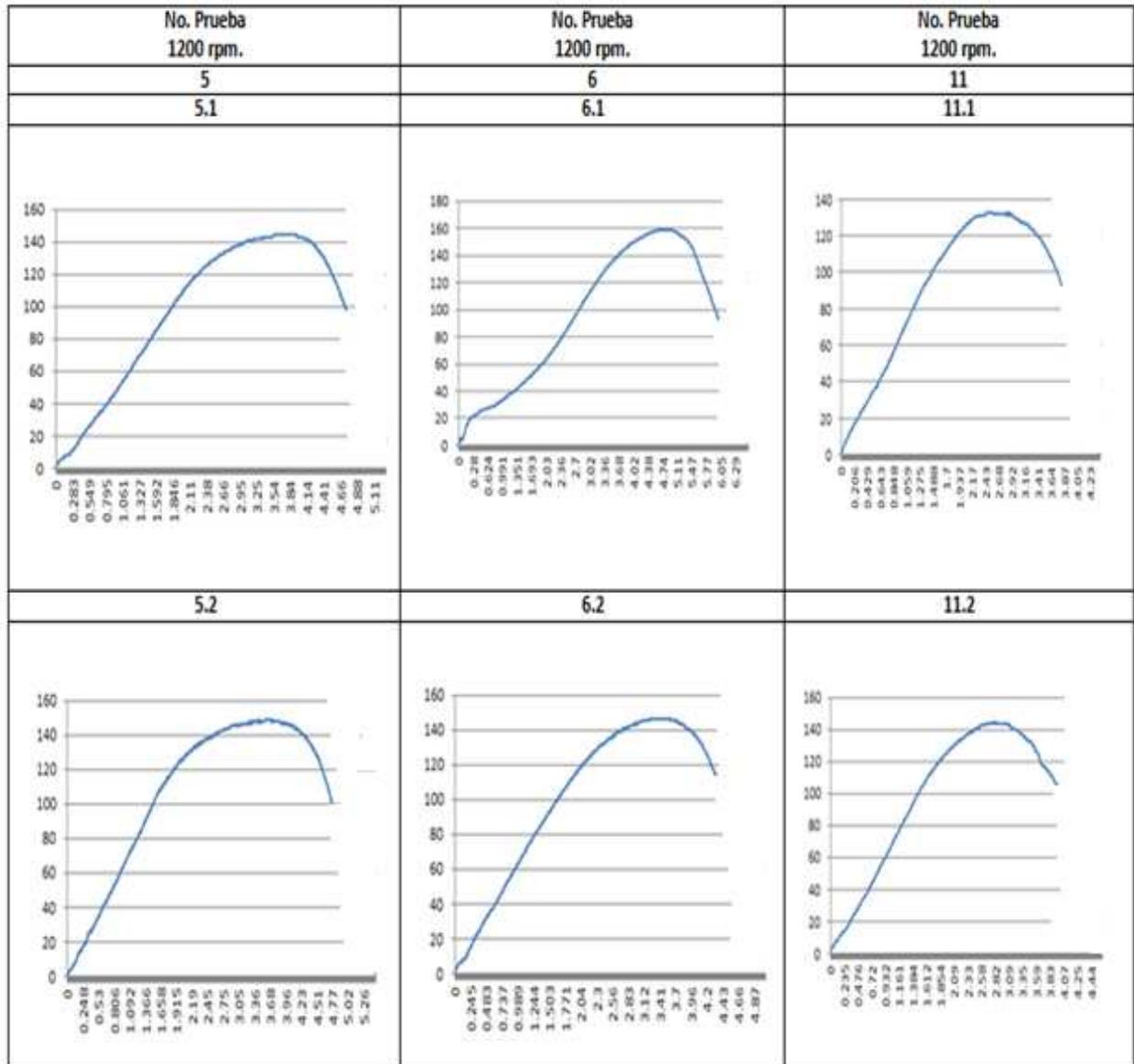


Tabla 4.11. Diagramas fuerza-Desplazamiento para las probetas con soldadura realizada a 1200 rpm. Segundo experimento



En la Figura 4.15 se observa la variación de los resultados obtenidos de la prueba de tensión.

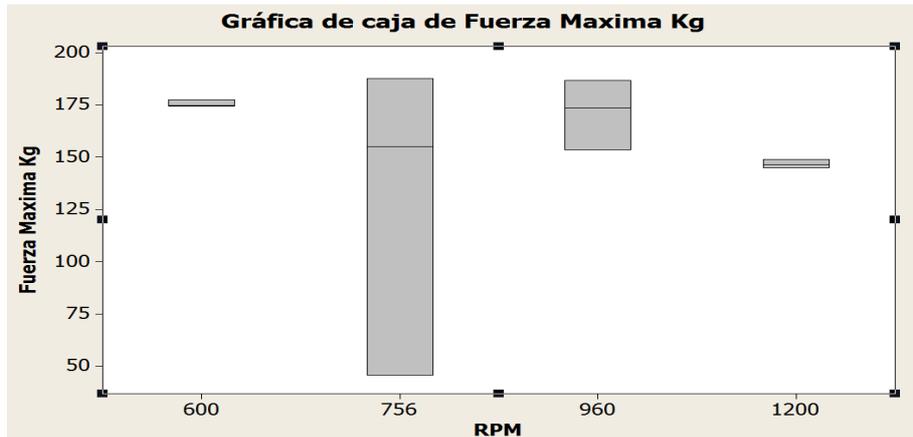


Figura 4.15. Gráfica de caja para el análisis de resultado de la prueba de tensión del segundo experimento.

El avance lineal en todas las pruebas fue de 2mm/s con un desplazamiento vertical de 0.25 mm., se aprecia que el valor de 600 rpm obtiene uno de los resultados más altos y la falla se presenta fuera de la soldadura en la parte de aluminio 6061 como se muestra en la Figura 4.16, lo que da una prueba de la calidad de la soldadura.

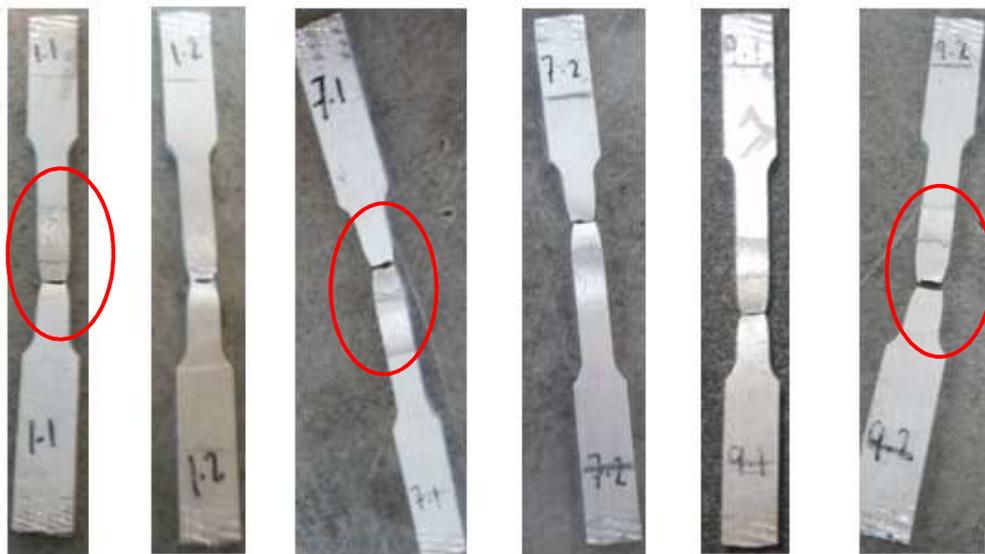


Figura 4.16. Prueba de 2mm/s – 600 rpm, fuerza máxima = 178 Kgf. La elipse roja muestra que la falla sucede fuera de la soldadura.

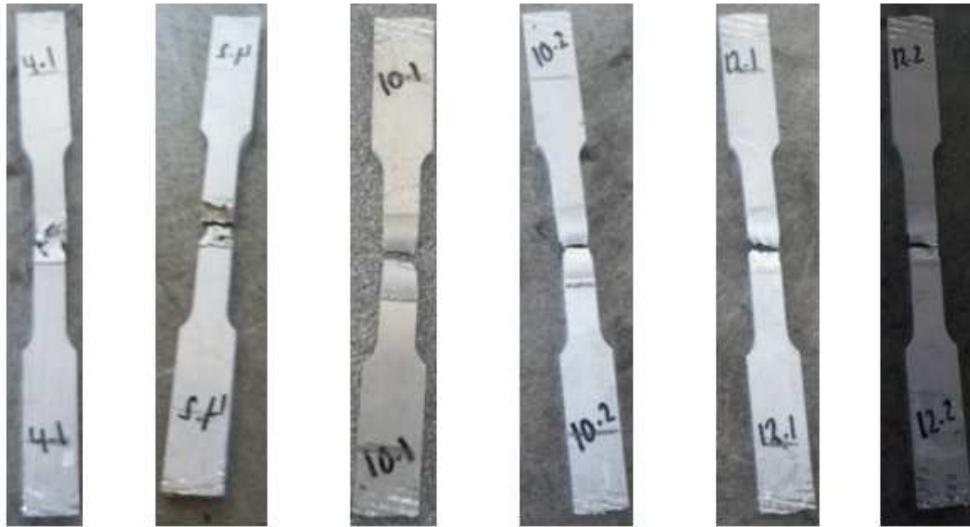


Figura 4.17. Prueba de 2 mm/s – 756 rpm, fuerza máxima = 187 Kgf.



Figura 4.18. Prueba de 2 mm/s – 960 rpm, fuerza máxima = 187.5 Kgf.

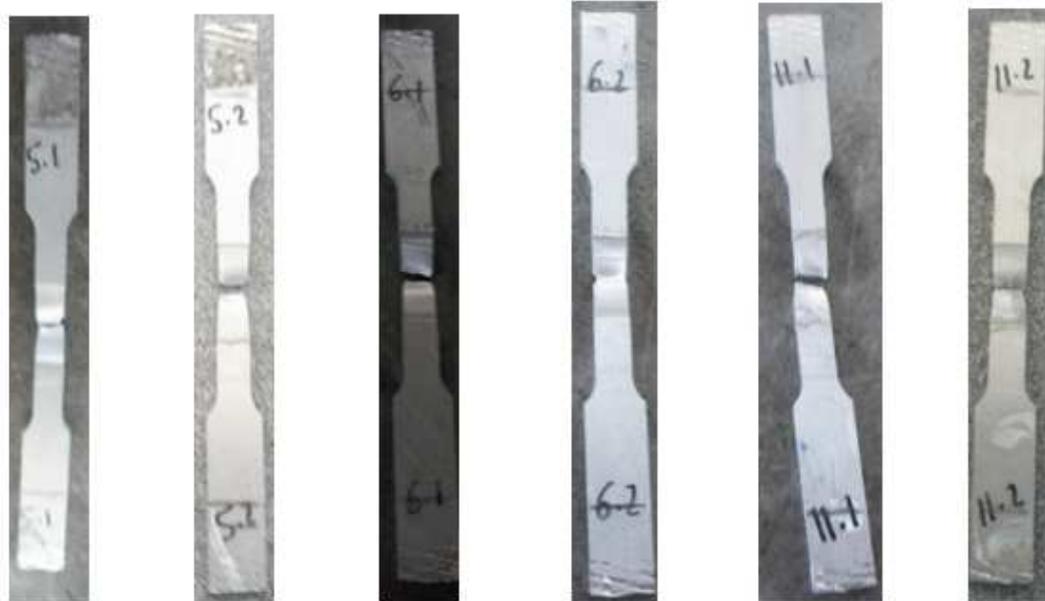


Figura 4.19. Prueba de 2mm/s- 1200 rpm, fuerza máxima = 156.7Kgf.

4.5 TERCER DISEÑO DE EXPERIMENTO.

Se lleva a cabo un tercer diseño de experimentos con los siguientes parámetros:

- Velocidad lineal: 2mm/s
- Revoluciones: 600, 960 y 1500 rpm.
- Desplazamiento vertical de la herramienta: 0.25 mm.

Se hizo la combinación de los parámetros de manera aleatoria, repitiendo cada uno de ellos dos veces, resultó las corridas que se muestran en la Tabla 4.12.

Tabla 4.12 Tercer diseño de experimentos. Corridas en MINITAB.

		StdOrder	RunOrder	CenterPt	Blocks	RPM
1	1500		1	1	1	960
2	1500		2	1	1	1500
3	960		3	1	1	600
4	960		4	1	1	1500
5	600		5	1	1	960
6	600		6	1	1	600

INSPECCIÓN POR RAYOS X:

Se realizan nuevamente las pruebas para verificar la calidad de la soldadura, igual que en los demás experimentos de este trabajo la primera prueba corresponde a una inspección por rayos X obteniendo las radiografías que se muestran en la Tabla 4.13. En la Figura 4.20 se ejemplifica el análisis de cada una de las radiografías.

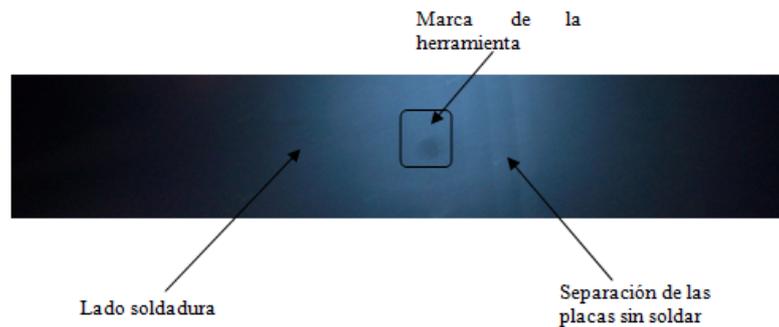
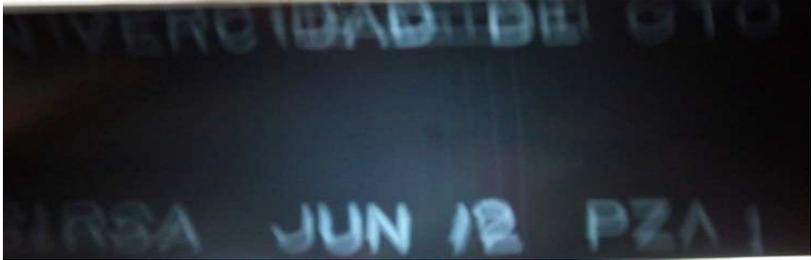
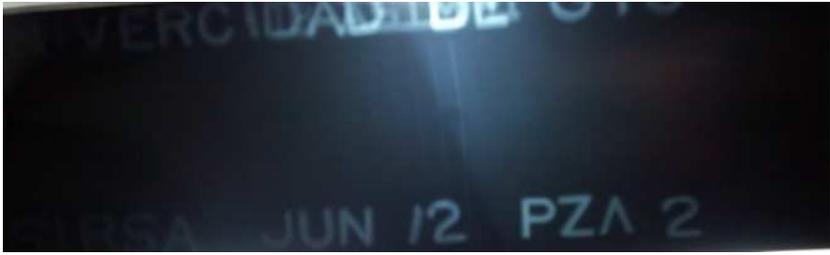
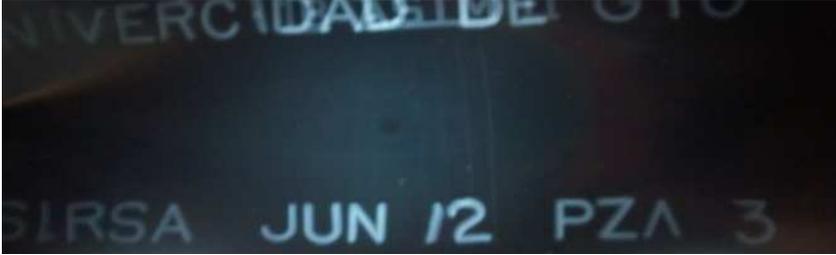
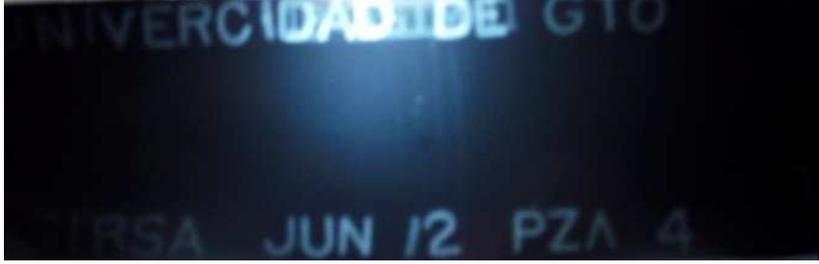


Figura 4.20. Análisis de una radiografía del tercer diseño de experimentos.

Tabla 4.13. Prueba de radiografía para el tercer diseño de experimentos.

<p>PARÁMETROS</p> <p>Comentarios de la inspección visual</p>	<p>RADIOGRAFÍA</p> <p style="text-align: center;">  </p>		
<p>Velocidad lineal 2mm/s</p> <p>Revoluciones 960 rpm</p> <p>No se observa imperfecciones o poros en la Zona de soldadura</p>			
<p>Velocidad lineal 2mm/s</p> <p>Revoluciones 1500 rpm</p> <p>No se observa imperfecciones o poros en la Zona de soldadura</p>			
<p>Velocidad lineal 2mm/s</p> <p>Revoluciones 600 rpm</p> <p>No se observa imperfecciones o poros en la Zona de soldadura</p>			

<p>Velocidad lineal 2mm/s Revoluciones 1500 rpm</p> <p>No se observa imperfecciones o poros en la Zona de soldadura</p>	
<p>Velocidad lineal 2mm/s Revoluciones 960 rpm</p> <p>No se observa imperfecciones o poros en la Zona de soldadura</p>	
<p>Velocidad lineal 2mm/s Revoluciones 600 rpm</p> <p>No se observa imperfecciones o poros en la Zona de soldadura</p>	

En las radiografías no se observa ningún defecto de soldadura, solo la marca de salida de la herramienta, por lo que en esta prueba todas las placas se encuentran en un estado aceptable.

PRUEBAS DE DUREZA:

A continuación se muestra la medición de dureza la escala seleccionada fue la Rockwell B igual que en el primer experimento, esta prueba se hace con el objetivo de visualizar la variación de propiedades mecánicas dentro del cordón de soldadura y en las laterales cercanas a él.

En la Figura 4.21 se dan los resultados de la medición de dureza a las placas seleccionadas observando que la dureza es menor en la parte más alejada del cordón de soldadura aumentando en las laterales cercanas a él. Todas las pruebas muestran aproximadamente los mismos resultados con una ligera disminución dentro del cordón.

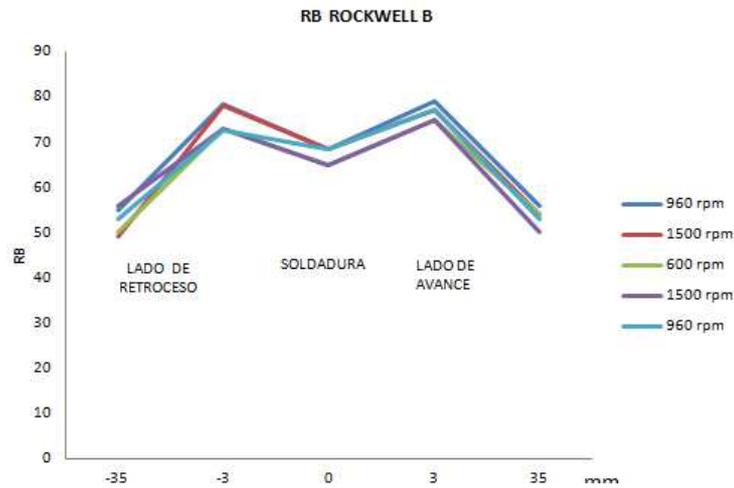


Figura 4.21. Gráfica de medición de dureza.

PRUEBAS DE RESISTENCIA A LA TENSIÓN:

Nuevamente se hace el corte de las probetas bajo la norma ASTM-E8-03 en una máquina de control numérico (CNC). La prueba se realizó con una velocidad de 1mm/min, se cortaron dos probetas para cada cordón de soldadura. En la Figura 4.22 se muestra una vista lateral de las probetas apreciando que en la mayoría la soldadura no muestra defectos.

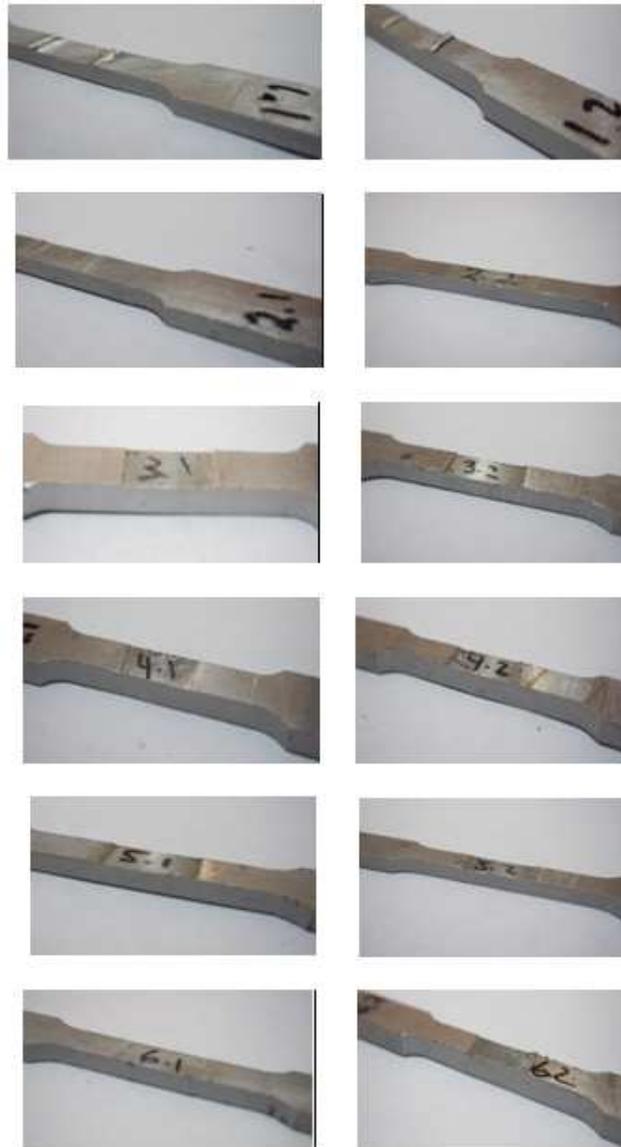


Figura 4.22. Vista lateral de las probetas para la prueba de tensión. Tercer experimento.

La Figura 4.23 muestra el montaje de la probeta realizada en una máquina universal diferente a las pruebas anteriores la cual nos da gráficas de esfuerzo (Pa) - deformación unitaria las cuales se muestran en la Tabla 4.14, 4.15 y 4.16.

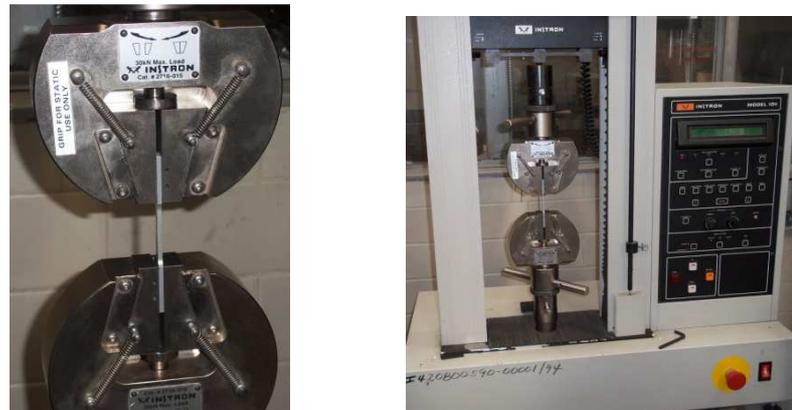


Figura 4.23. Montaje de la probeta en la maquina universal para pruebas mecánicas.

En la Figura 4.24 se muestra la gráfica correspondiente a la probeta de la aleación de aluminio 6061 con el fin de hacer una comparación entre ésta y las probetas con la soldadura.

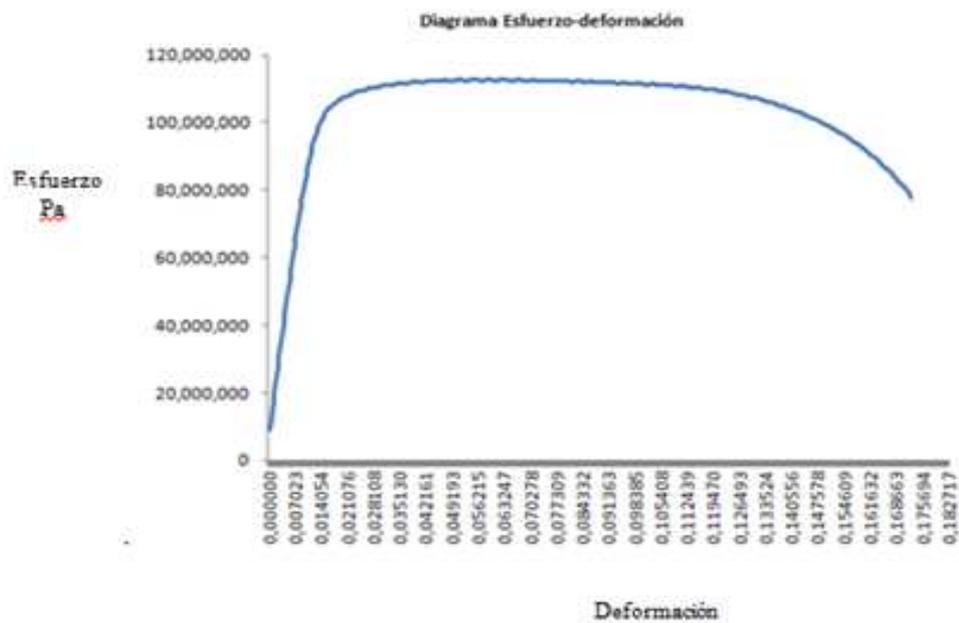


Figura 4.24. Diagrama Esfuerzo-Deformación de aluminio 6061.

En la Tabla 4.14 se muestran los esfuerzos máximos obtenidos en cada una de las pruebas de acuerdo a los diagramas esfuerzo-deformación que se muestran en las tablas 4.15 a la 4.17.

Tabla 4.14 Esfuerzos (MPa) máximos alcanzados en la prueba de tensión del tercer diseño de experimentos.

PRUEBA	REVOLUCIONES R.P.M.	ESFUERZOS MÁXIMOS (MPa.)	
Aluminio		176.9	
Ver figura 37			
1	600	174.5	174.4
7	600	178	177.4
Ver figura 38			
4	756	43	45.5
10	756	155	154
Ver figura 39			
2	960	152.4	153.5
3	960	175.7	186.5
Ver figura 40			
5	1200	144.3	148.7
6	1200	158.7	146.4

Tabla 4.15. Diagramas Esfuerzo-Desplazamiento para las probetas con soldadura realizada a 600 rpm. Tercer experimento.

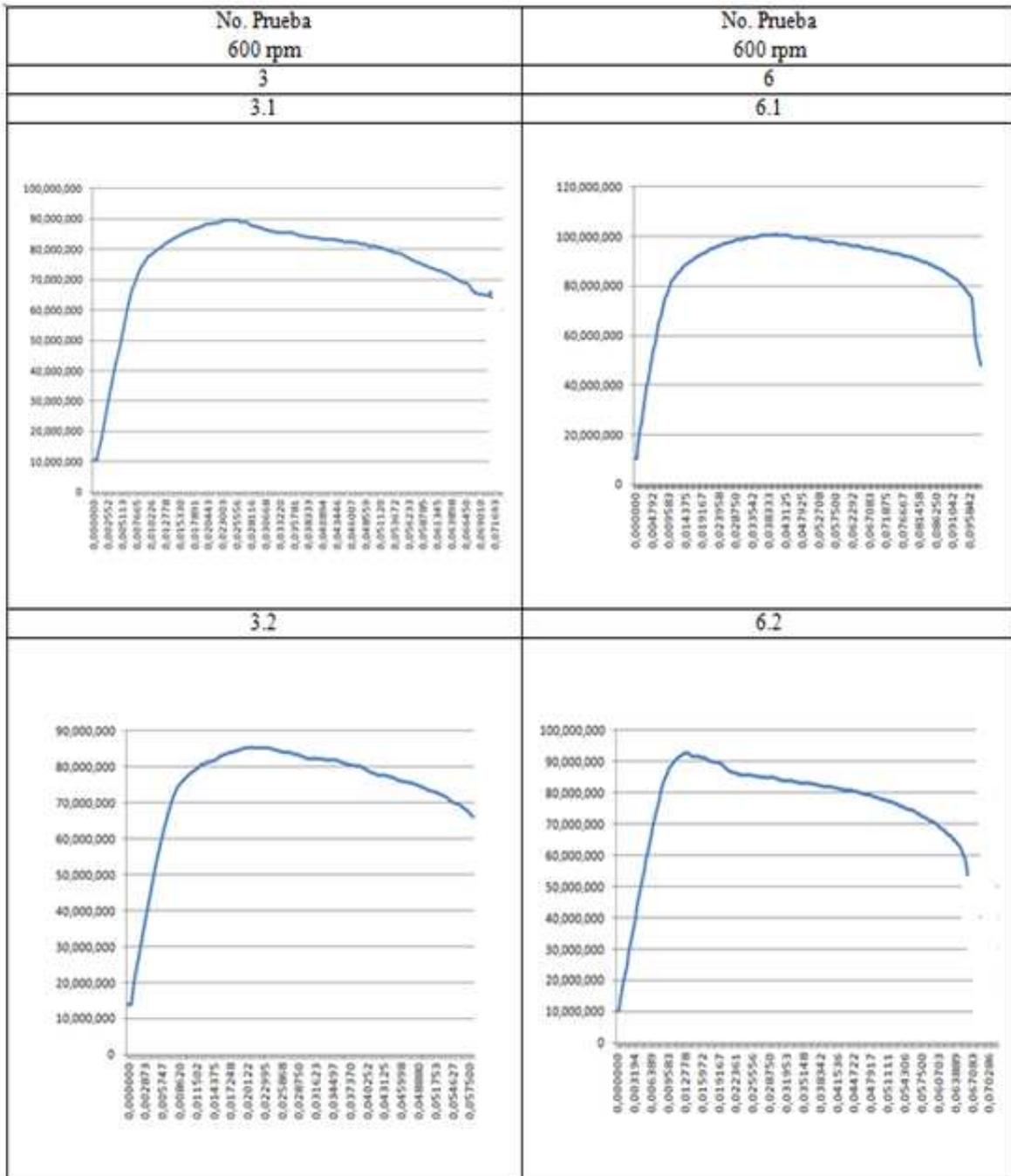


Tabla 4.16. Diagramas fuerza-Desplazamiento para las probetas con soldadura realizada a 960 rpm. Tercer experimento.

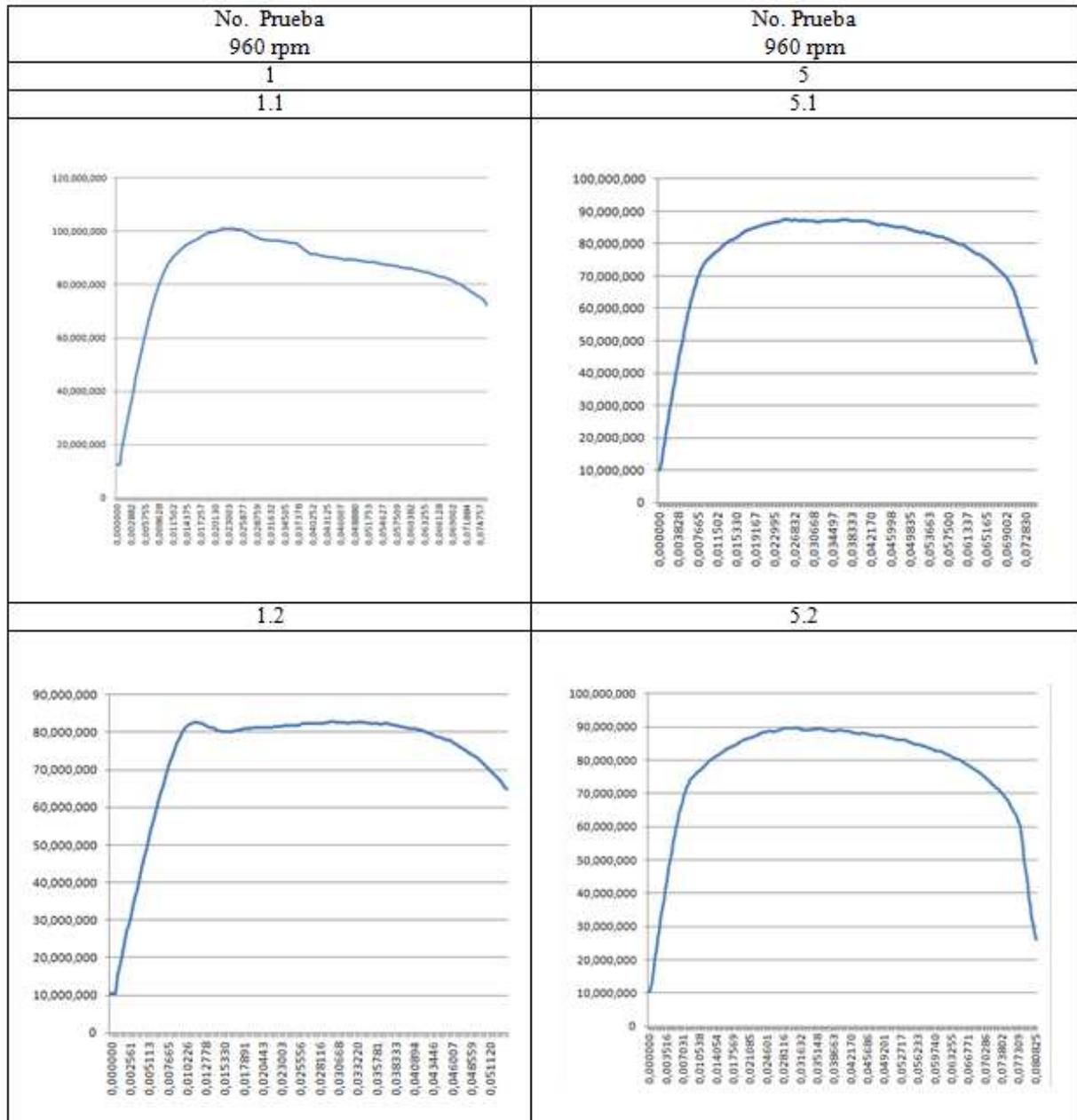
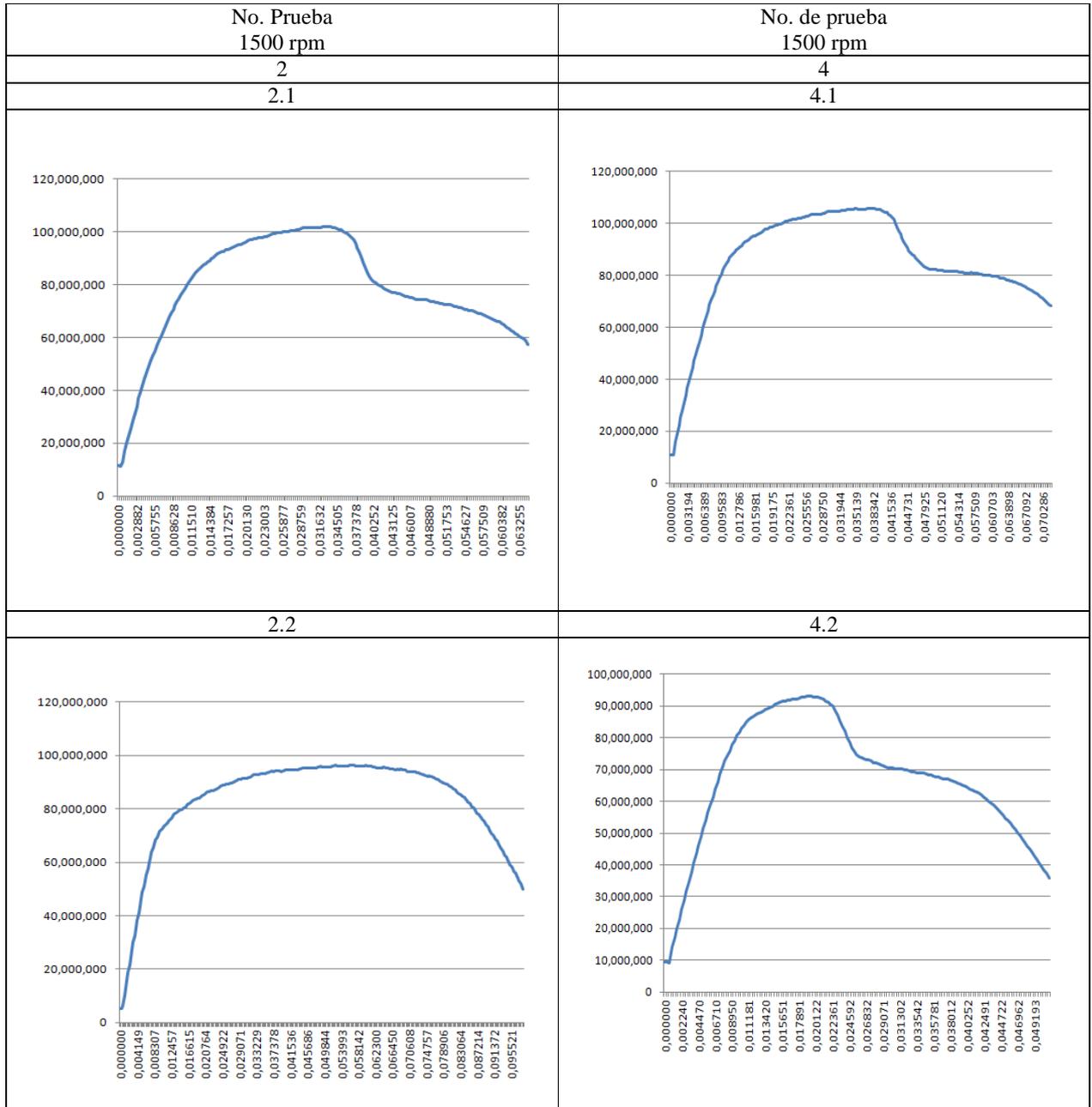


Tabla 4.17. Diagramas fuerza-Desplazamiento para las probetas con soldadura realizada a 1500 rpm. Tercer experimento.



En la Figura 4.25 se observa la variación de los resultados obtenidos de la prueba de tensión.

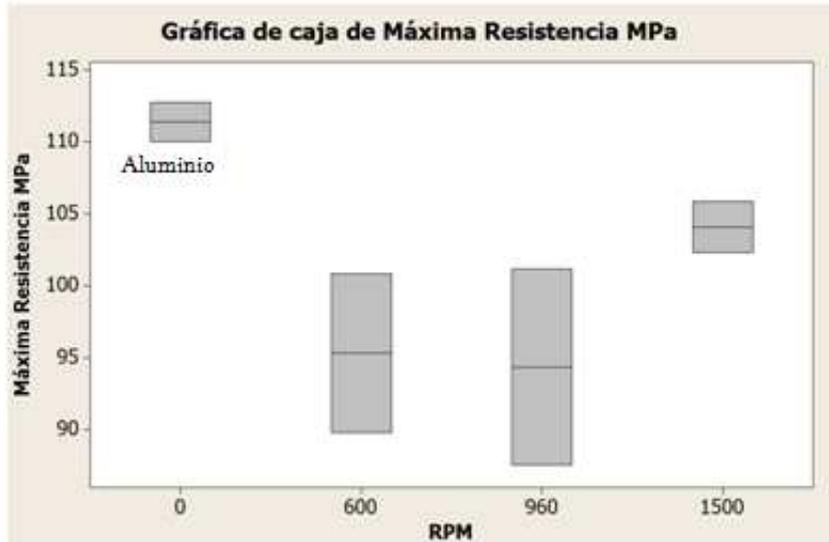
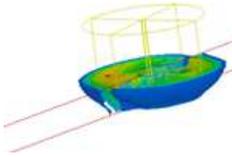


Figura 4.25. Gráfica de caja para el análisis de resultado de la prueba de tensión del tercer experimento.

De acuerdo con los resultados obtenidos con las pruebas de calidad (radiografía, pruebas de resistencia a la tensión y dureza) realizadas a la soldadura, durante el desarrollo de los diseños de experimentos, se da validez a los modelos de elemento finito, ya que se comprueba la hipótesis planteada en ellos de que con una velocidad de avance relativamente baja (2 - 5 mm/s), velocidades de rotación de entre 1200 y 600 rpm y una presión de forja de 8.7 – 9.9 MPa se consiguen los estándares de una soldadura de calidad en placas de aluminio. En la tabla 4.18 se muestra un comparativo de los resultados del modelo 2 y la prueba 2 de este contra los datos experimentales de la prueba de tensión y radiografiado y en el capítulo de conclusiones se amplian en la tabla

Tabla 4.18 comparativo de la distribución de deformaciones del modelo con algunas de las pruebas físicas realizadas.

Parámetros Seleccionados	Modelo 2 Isosuperficies 3mm de espesor	Prueba de Tensión Diseño de experimento Segundo	Radiografía (No muestra falla) Dirección de soldadura ↓
2mm/s 600rpm			
Comentarios	Deformaciones plásticas uniformes	Falla fuera de la soldadura con un valor de fuerza máxima 178 KgF	Placa de radiografía que no presenta imperfecciones en soldadura

4.6 MEDICIÓN DE ESFUERZOS RESIDUALES.

Para la medición de esfuerzos residuales se utiliza la técnica conocida como barrenado ciego la cual es realizada bajo la norma ASTM E837 [29].

El método de barrenado ciego mide tensiones residuales cerca de la superficie de un material, además implica la colocación de galgas en la superficie, la perforación de un agujero en la vecindad de las galgas, y la medición de deformaciones que se relacionan con los esfuerzos principales a través de una serie de ecuaciones.

Este método de ensayo cubre el procedimiento para determinar tensiones residuales cerca de la superficie de materiales isotrópicos linealmente elásticos. Aunque el concepto es bastante general, el método aquí descrito es aplicable en los casos en que las tensiones no varían significativamente con la profundidad y no excedan la resistencia a la fluencia.

El método de ensayo a menudo se describe como "semi-destructivo" porque el daño que causa es muy localizado y en muchos casos no afectará de manera significativa la utilidad de la muestra.

Para este caso particular de la soldadura por fricción (FSW) se pretende determinar los esfuerzos residuales en la soldadura y obtener una referencia de su magnitud.

Cabe mencionar que se realizó solo una prueba utilizando una roseta cuya denominación es EA-06-062RE-120 y su selección fue de acuerdo al tipo de material y espesor de la placa donde se monta en este caso aluminio de aproximadamente 3mm de espesor. En la Figura 4.26 se muestra la secuencia para el pegado de la roseta y su conexión.



Figura 4.26. Secuencia de pegado y conexión de la roseta para medición de esfuerzos residuales.

Una vez colocada la roseta y sus cables para la conexión se conecta a una tarjeta de adquisición de datos, la cual es a su vez conectada a una computadora y las placas fueron montadas en el banco de un taladro, como se muestra en la Figura 4.27.

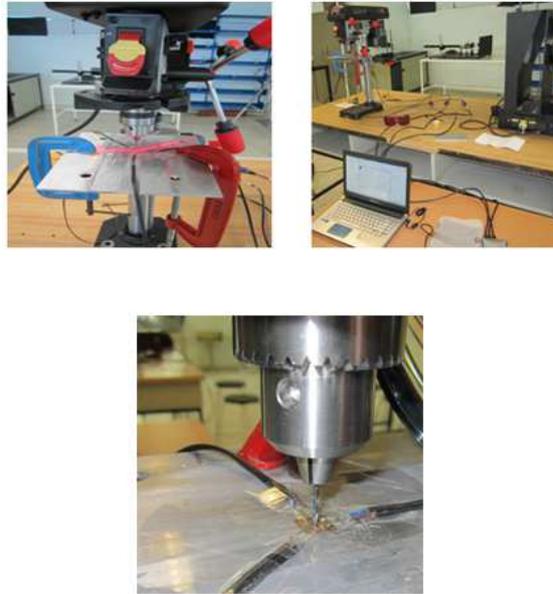


Figura 4.27. Montaje y conexión de las placas.

Una vez montada y considerando un espécimen delgado se procede a realizar el barrenado completo de la placa obteniendo una sola lectura con las siguientes deformaciones marcadas por las galgas:

$$\epsilon_1 = 0.0002760.$$

$$\epsilon_2 = 0.0001517.$$

$$\epsilon_3 = 0.0001631.$$

Con la ecuación 4.1 [28] se obtienen los esfuerzos residuales correspondientes a las deformaciones unitarias obtenidas.

$$\sigma_{\min, \max} = - \left[\frac{p}{\bar{a}(1+\nu)} \pm \frac{\sqrt{(q^2 + t^2)}}{\bar{b}} \right] E \quad 4.1$$

Donde:

ν = módulo de Poisson para el aluminio = 0.33.

E = módulo de elasticidad para aluminio = 68000 N/mm².

\bar{a} = Para un barreno completo de [28] = 0.122.

\bar{b} = Para un barreno completo de [28] = 0.377.

$p = 2.195 * 10^{-4}$.

$q = - 5.645 * 10^{-5}$.

$t = 6.785 * 10^{-5}$.

Dónde los coeficientes p , q y t se calculan con las ecuaciones como se menciona a continuación y que fueron también tomadas de la referencia [28]:

$$p = \frac{\varepsilon_3 + \varepsilon_1}{2} \quad 4.2$$

$$q = \frac{\varepsilon_3 - \varepsilon_1}{2} \quad 4.3$$

$$t = \frac{\varepsilon_3 + \varepsilon_1 - 2 \varepsilon_2}{2} \quad 4.4$$

Sustituyendo estos valores en 20 se tiene:

$$\sigma_{\max} = -108.05 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{\min} = -76.21 \text{ N/mm}^2$$

Por recomendación de la norma, cuando se hace el barreno con velocidades bajas como lo son en un taladro que se manejó en aproximadamente 1500 rpm se debe hacer varias pruebas para validar los resultados obtenidos. Pero en este caso se pueden observar esfuerzo residuales menores al esfuerzo de fluencia del material definido en la Tabla 3.2.

CAPÍTULO 5.

ANÁLISIS TÉRMICO

5.1 ANÁLISIS TEÓRICO.

Para representar correctamente la generación de calor del proceso de soldadura por fricción (FSW), es importante el estudio de la evolución de calor entre la herramienta y la pieza de trabajo.

En este análisis se considera la transferencia de calor por conducción, ya que el modelo matemático basado en la ley de Fourier [29] se desarrolla bajo las siguientes condiciones:

- Una distribución constante de presión a través de las superficies en contacto.
- Una distribución uniforme de calor a través de la superficie del hombro.

Considerando el caso unidimensional, y un sistema de coordenadas cilíndricas, la ecuación de la Ley de Fourier se reescribe como se observa en la ecuación 5.1 [30]:

$$\frac{k}{\rho c} \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \theta}{\partial r} \right) = \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad 5.1$$

Donde:

$$\theta = T(r, t) - T_i \quad 5.2$$

Condición inicial:

Inicialmente la temperatura del cuerpo es uniforme, constante y se encuentra en equilibrio térmico con el medio que lo rodea:

$T(r,0) = T_i$ Por lo que se tiene:

$$\theta(r, 0) = 0$$

Condiciones de frontera:

Debido al segundo orden de la ecuación diferencial presentada en 24 son necesarias dos condiciones de frontera para su solución:

Condición 1. Cuando se somete a una energía de calor la condición de frontera en la superficie puede escribirse como se indica en la ecuación 5.3:

$$\int_0^{\text{inf } \textit{inito}} -2\pi k r \frac{\partial \theta}{\partial r} dt = \frac{Q}{e} \quad 5.3$$

Condición 2. Al considerarse un sólido infinitamente grande en la dirección radial tenemos la siguiente condición de frontera dada en la ecuación 5.4:

$$\left. \frac{\partial}{\partial r} \theta(r, t) \right|_{r=\text{inf } \textit{inito}} = 0 \quad 5.4$$

Estas condiciones de frontera junto con la condición inicial conducen a la solución de la ecuación diferencial que se presenta en 5.5 y que se deduce en la referencia [31].

$$T(r, t) = \frac{Q}{e} \frac{1}{4\pi kt} \exp\left(\frac{-r^2}{4\alpha t}\right) \quad 5.5$$

Donde:

e = espesor de placa, mm .

$\alpha = \frac{K}{\rho C}$ = coeficiente de difusión térmica, m^2/s .

K = conductividad térmica, W/m^0c .

Q = la entrada de calor promedio por unidad de área y tiempo.

A continuación se deduce la ecuación para el cálculo de la entrada de calor. Si todo el trabajo de cizallamiento en la interface se convierte en calor de fricción, la entrada de calor promedio por unidad de área y tiempo se convierte en la ecuación 5.6 [10]:

$$Q = \int_0^{M_R} \omega dM \quad 5.6$$

Donde :

M es el par requerido para hacer girar un eje circular con relación a la superficie de la placa bajo la acción de una carga axial y está dado por la ecuación 5.7.

$$\int_0^{M_r} dM = \int_0^R \mu P 2\pi r^2 dr = \frac{2}{3} \mu \pi P r^3 \quad 5.7$$

Donde:

μ coeficiente de fricción.

r radio de la superficie en contacto.

P presión a través de la interfaz (se supone constante).

Sustituyendo la ecuación 5.7 en 5.6 obtenemos la ecuación 5.8 como se ve a continuación:

$$Q = \int_0^{M_r} \omega dM = \int_0^r \omega 2\pi \mu P r^2 dr \quad 5.8$$

Expresando la ecuación 5.8 en términos de la velocidad angular se obtiene 5.9 para el cálculo de la entrada de calor por la fricción.

$$Q = \int_0^R 4\pi^2 \mu P N r^2 dr = \frac{4}{3} \pi \mu P \omega r^3 \quad 5.9$$

Al sustituir la ecuación 5.9 en 5.6 se obtiene la ecuación de temperatura en función del radio de contacto y el tiempo que se muestra en la ecuación 5.10.

$$T(r,t) = \frac{\mu P \omega r^3}{3eKt} \exp\left(\frac{-r^2}{4\alpha t}\right) \quad 5.10$$

A continuación se definen los valores de los parámetros a utilizar a temperatura ambiente:

Propiedades térmicas del aluminio 6061:

Coefficiente de difusión térmica $\alpha = 97 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$.

Conductividad térmica $K = 238 \text{ W/m } ^\circ\text{C}$.

Constantes del proceso:

Presión de la herramienta sobre las piezas $P = 8.7 - 9.9 \text{ MPa}$ [32].

Coefficiente de rozamiento $\mu = 0.47$.

Velocidad angular en $\omega = 120 - 60 \text{ rad/s}$

Radio del hombro de la herramienta $r = 0.0065 - 0.01 \text{ m}$.

Espesor de las placas $e = 0.003 - 0.006 \text{ m}$.

Al utilizar la ecuación 5.10 para placas de 0.006 m de espesor, a una velocidad angular de 120 rad/s , un radio de hombro en la herramienta de 0.01 m y una presión estimada de 9.9 MPa, se obtiene la gráfica mostrada en la figura 5.1, en la cual se observa una temperatura máxima de aproximadamente 185 °C .

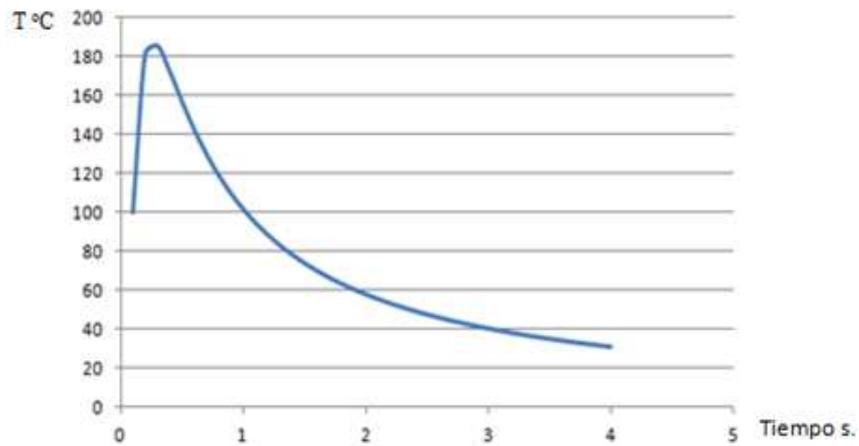


Figura 5.1. Diagrama tiempo-temperatura para 120 rad/s y espesor de placa de 0.006 m.

Continuando con el espesor de placas de 0.006 m de espesor a una velocidad angular de 60 rad/s se obtiene la gráfica mostrada en la Figura 5.2, en donde se obtiene una temperatura máxima de 92 °C.

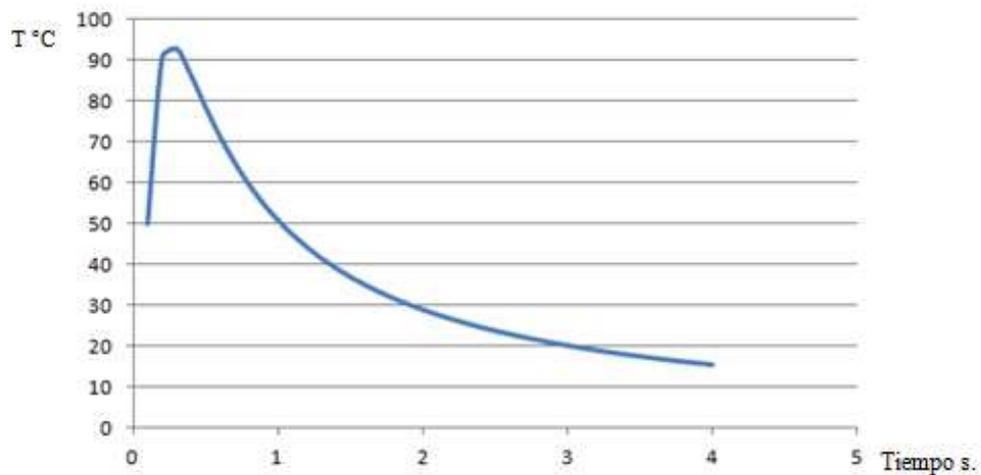


Figura 5.2. Diagrama tiempo-temperatura para 60 rad/s y espesor de placa de 0.006 m

Para placas de 0.003 m de espesor, un radio de hombro de 0.0065 m, una presión estimada del hombro sobre las placas de 8.7 MPa y una velocidad angular de 120 rad/s la temperatura máxima alcanzada, según se ve en la figura 5.3, es de 213°C.

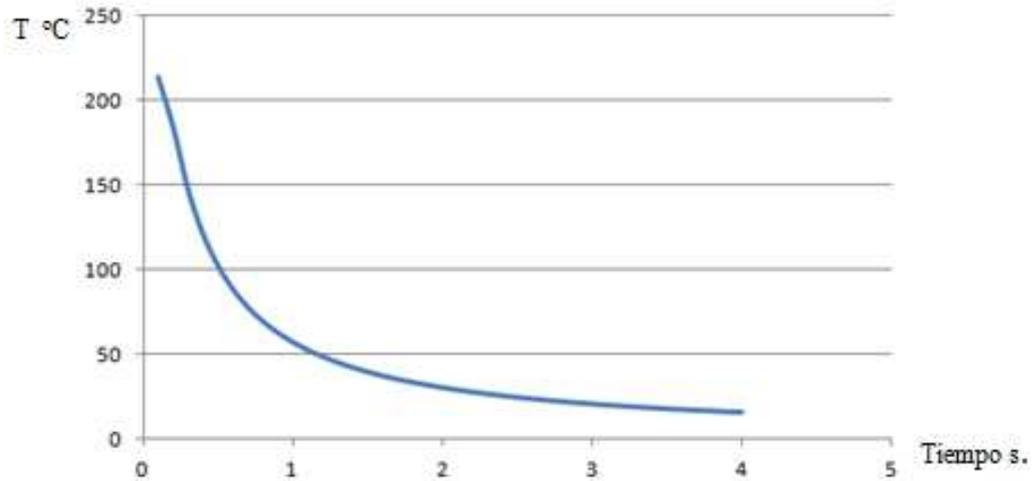


Figura 5.3. Diagrama tiempo-temperatura para 120 rad/s y espesor de placa de 0.003 m.

Con una velocidad angular de 60 rad/s se obtiene la gráfica mostrada en la figura 5.4, en la cual se observa una temperatura máxima de aproximadamente 106 °C.

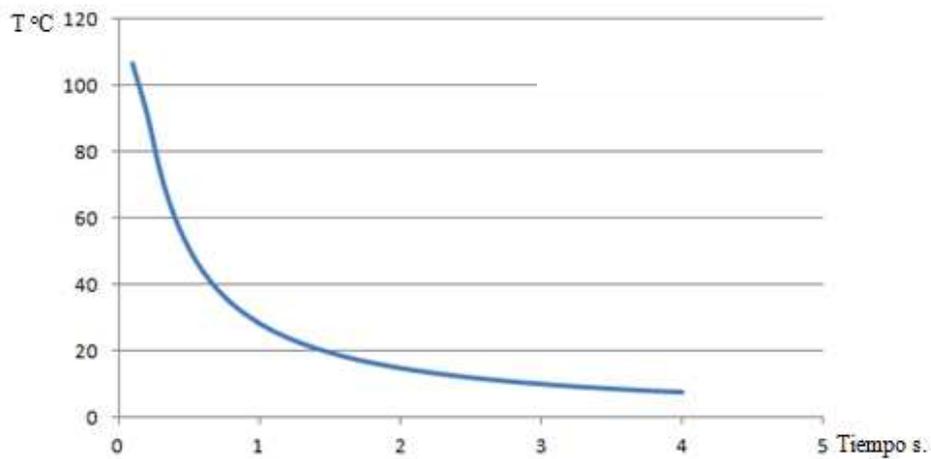


Figura 5.4. Diagrama tiempo-temperatura para 60 rad/s y espesor de placa de 0.003 m.

5.2 ANÁLISIS EXPERIMENTAL.

En la Tabla 5.1 se muestra la comparación de las tres pruebas experimentales con la obtenida con el cálculo teórico.

Tabla 5.1. Comparación de las tres pruebas experimentales con la obtenida en el cálculo teórico.

ESPESOR 0.003 m	PRUEBA 1 EXPERIMENTAL % error	PRUEBA 2 EXPERIMENTAL % error	PRUEBA 3 EXPERIMENTAL % error	ANÁLISIS TEÓRICO
120 rad/s	192° C 10 % error	192° C 10 % error	192° C 10 % error	213° C
60 rad/s	113° C 6.6 % error	142° C 33.9 % error	111° C 4.7 % error	106° C

El análisis experimental se realizó con los parámetros de 120 y 60 rad/s con una velocidad lineal de 2mm/s y se midió la temperatura utilizando una cámara termográfica.

Las imágenes que se muestran en las Figuras 5.5 y 5.6 para 120 y 60 rad/s respectivamente muestran las temperaturas máximas alcanzadas en tres diferentes procesos.

Se menciona que las probetas obtenidas, en el desarrollo del proceso fueron evaluadas en su calidad, obteniendo resultados satisfactorios. Por lo anterior, se puede considerar la temperatura como un parámetro identificado que garantiza que la soldadura se ha realizado correctamente y que debe tener valores dentro de los rangos encontrados de 106 a 213 °C para las placas de 0.003 m de espesor.

Este probablemente no sea el caso para una velocidad de 60 rad/s en una placa de 0.006 m o más, ya que las temperaturas no son mayores a 100° C.

Los resultados obtenidos por autores de otros trabajos que se presentan en la bibliografía [9-15] son arriba de 200° C para espesores mayores a los que se utilizan en este trabajo además de diferentes características geométricas de la herramienta



Figura 5.5. Medición de tres procesos con sus respectivas temperaturas alcanzadas en 120 rad/s.



Figura 5.6. Medición de tres procesos con sus respectivas temperaturas alcanzadas en 60 rad/s.

CAPÍTULO 6.

CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

6.1 CONCLUSIONES.

El objetivo planteado en este trabajo se logró alcanzar al desarrollar un método para conseguir los parámetros adecuados a utilizar para la soldadura de materiales con el proceso FSW. Este método de estudio que incluye el análisis del proceso de soldadura por medio de un modelo de simulación desarrollado en elemento finito, las pruebas experimentales con parámetros obtenidos previamente en la simulación y las temperaturas alcanzadas es un aporte importante al método de soldadura FSW el cuál se considera poco explotado en la industria metal mecánica nacional.

De acuerdo con lo comentado anteriormente, se obtienen las siguientes conclusiones:

1.- En este caso de estudio se utiliza en los modelos desarrollados la metodología Aleatoria Lagrangiana- Euleriana (ALE) de esta manera se eliminan los problemas de no convergencia por grandes deformaciones.

2.- De acuerdo con los resultados del Capítulo 3, mostrados en el resumen de la tabla 3.6, se obtienen los intervalos de los parámetros de operación a comprobar mediante la fase experimental que se muestran en la Tabla 6.1.

Tabla 6.1. Parámetros obtenidos mediante la simulación en el capítulo 5.

ESPEJOR DE PLACA Mm	VELOCIDAD DE AVANCE LINEAL mm/s	VELOCIDAD ANGULAR rad/s	DESPLAZAMIENTO mm
6	2 - 5	60 - 120	8.7 – 9.9 MPa [32].
3	2 - 5	60 - 120	8.7 – 9.9 MPa [32].

4.- La fase experimental únicamente se pudo realizar para placas de 3 mm donde al aplicar las pruebas de calidad de soldadura se elimina la velocidad de avance de 5 mm/s, quedando entonces los parámetros mostrados en la Tabla 6.2.

Tabla 6.2. Parámetros obtenidos mediante las pruebas físicas de calidad de soldadura.

ESPESOR DE PLACA mm	VELOCIDAD DE AVANCE LINEAL mm/s	VELOCIDAD ANGULAR rad/s	DESPLAZAMIENTO mm
3	2	60 -120	8.7 – 9.9 MPa [32].

5.- De acuerdo a la temperatura máxima que se obtiene con los parámetros ya comprobados experimentalmente se confirman las temperaturas que garantizan la soldadura y es de arriba de 100° C hasta aproximadamente 250° C. Con este criterio se elimina el parámetro de 60 rad/s para placas de aluminio de 6 mm de espesor ya que su temperatura máxima se considera baja para lograr una buena soldadura.

6.- Agrupando los criterios del modelo, de la fase experimental como se mostró en el ejemplo de la tabla 4.18 y agregando el análisis de temperatura, se tienen que los parámetros mostrados en la Tabla 6.3 son los adecuados para lograr la calidad de soldadura deseada.

Tabla 6.3. Parámetros obtenidos mediante la simulación en el Capítulo 5.

ESPESOR DE PLACA Mm	VELOCIDAD DE AVANCE LINEAL mm/s	VELOCIDAD ANGULAR rad/s	PRESIÓN DE FORJA MPa
6	2	120	8.7 – 9.9 MPa [32].
3	2	60 - 120 rad/s	8.7 – 9.9 MPa [32].

6.2 TRABAJOS FUTUROS.

Aún que se han alcanzado los objetivos en este proyecto en el cual se han obtenido conclusiones satisfactorias, se puede pensar que siempre quedan inquietudes, ideas y posibles aportes a él, pero sin embargo estas ideas si pueden llegar a desarrollarse en trabajos futuros de los cuales algunos de ellos se enlistan a continuación:

- 1.- Realizar modelos en elemento finito donde se realicen análisis térmicos. Este no se desarrolló en el modelo aquí presentado por el uso de la metodología ALE que no genera contactos para el análisis térmico.
- 2.- Realizar el proceso de soldadura por fricción para la soldadura de materiales disimiles. Esto se puede llevar a cabo con la metodología implementada.
- 3.- Desarrollo de equipo para lograr la soldadura en elementos tubulares. Con los parámetros de soldadura señalados en este trabajo.
- 4.- Desarrollo de equipo portátil para llevar a cabo el proceso.

Bibliografía:

- [1] S. Kalpakjian, S.R. Schmid, “Manufactura, Ingeniería y Tecnología”, quinta edición, Ed. Pearson Prentice Hall, México 2008.
- [2] Thomas W.M., E.D. Nicholas, J.C. Needham, M.G. Murch, P. Templesmith, and C.J. Daws, “Friction Stir Butt Welding”, GB Patent Application No. 9125978.8, Dec. 1991, U. S. Patent No. 5460317, Oct. 1995.
- [3] Rajiv S. Mishra, “Chapter 1 Introduction, Friction Stir Welding and Processing”, Rajiv S. Mishra, Murray W. Mahoney, editors, p 1-5,2007.
- [4] Christian B. Fuller, “Chapter 2 Friction Stir Tooling: Tool Materials and Designs” Rajiv S. Mishra, Murray W. Mahoney, editors, p 7-35, 2007.
- [5] S. Guerdoux y L. Fourment, “ALE formulation for the numerical simulation of Friction Stir Welding”, VIII International Conference on Computational Plasticity COMPLAS VIII CIMNE, Barcelona, 2005.
- [6] Alma H. Oliphant, “Numerical Modeling of Friction Stir Welding: a comparison of Alegra and Forge3”, Thesis submitted to the Brigham Young University, Department of Mechanical Engineering, 2004.
- [7] Manthan Malde, “Thermomechanical Modeling and Optimization of Friction Stir Welding”, Thesis submitted to the Louisiana State University and Agricultural and Mechanical College, 2009.
- [8] Hua Zhao, “Friction Stir Welding (FSW) Simulation Using an Arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE) Moving Mesh Approach”, Dissertation submitted to the College of Engineering and Mineral Resources at West Virginia University, 2005.

- [9] R. Nandan¹, G. G. Roy, T. J. Lienert, T. DebRoy, “Numerical modelling of 3D plastic flow and heat transfer during friction stir welding of stainless steel”, *Science and Technology of Welding and Joining*, vol. 11 No. 5, p. 526, 2006.
- [10] P. Prasanna, B. Subba Rao, G. Krishna Mohana Rao, “Finite element modeling for maximum temperature in friction stir welding and its validation”, Springer-Verlag London Limited, *Int J Adv Manuf Technol*, 2010.
- [11] Yuh J. Chao, X. Qi, W. Tang, “Heat Transfer in Friction Stir Welding—Experimental and Numerical Studies”, ASME, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2003.
- [12] Xiaomin Deng, Shaowen Xu, “Two-Dimensional Finite Element Simulation of Material Flow in the Friction Stir Welding Process”, *Journal of Manufacturing Processes* vol. 6 No. 2, 2004.
- [13] Diego H. Santiago, Guillermo Lombera, Santiago Urquiza, Luis A. de Vedia, “Modelado Numérico de uniones soldadas por Friction Stir Welding”, *Mecánica Computacional Vol. XXII M. B. Rosales, V. H. Cortéz y D. V. Bambill (Editores), Bahía Blanca, Argentina*, 2003.
- [14] D. Santiago G. Lombera, A. Cassanelli, S. Urquiza, L. A. de Vedia, “Análisis Bidimensional del flujo de material en Soldadura por Fricción-Agitación”, *Asociación Argentina de Materiales, Volumen 4, No. 3*, 2007.
- [15] M. Esmaily, A. Shokuhfar, “Numerical simulation of heat transfer in friction stir welding of 7075-T6 aluminum alloy and high carbon steel using Arbitrary Lagrangian Eulerian technique”, WILEY-VCH Verlag GmbH and Co. KGaA, Weinheim, Vol. 41, No. 5, 2010.
- [16] S. Rajakumar, C. Muralidharan, V. Balasubramanian, “Influence of friction stir welding process and tool parameters on strength properties of AA7075-T6 aluminium alloy joints”, Elsevier, *Materials and Design*, 32, 2010.
- [17] Fernando Franco, Hugo Sánchez, Diana Betancourt, “Comparación de la junta en estado sólido mediante FSW y arco eléctrico en aleación AZ31”, *Scientia et Technica Año XIII, No 36, Universidad Tecnológica de Pereira*, 2007.
- [18] M.T. Milan, W.W. Bose Filho, J.R. Tarpani, A.M.S. Malafaia, C.P.O. Silva, B.C. Pellizer, L.E. Pereira, “Residual Stress Evaluation of AA2024-T3 Friction Stir Welded Joints”,
- [19] Pedro Cabot, Alberto Moglioni, Eduardo Carella, “Soldadura Por Friccion Agitacion (FSW) De AA 6061 T6”, *Revista Matéria, Vol 8, No. 2*, pp. 187-195, 2003.
- [20] T. Venugopal, K. Srinivasa Rao, K. Prasad Rao, “Studies on Friction Stir Welded AA7075 aluminum alloy”, *Trans. Indian Inst. Met. Vol.57, No. 6*, pp. 659-663, 2004.
- [21] S. Vijayan, R. Raju, K.Subbaiah, N. Sridhar, S.R.K. Rao, “Friction Stir Welding of AL-Mg alloy optimization of process parameters using Taguchi Method”, *Experimental Techniques*, Vol. 34, No. 5, pp. 37-44, 2010.
- [22] Colin J. Sterling, “Effects of Friction Stir Processing on the Microstructure and Mechanical Properties of Fusion Welded 304l stainless steel”, Thesis submitted to the Faculty of Brigham Young University, Department of Mechanical Engineering, 2004.
- [23] J. Donea, Antonio Huerta, J.-Ph. Ponthot, A. Rodríguez-Ferran, “Arbitrary Lagrangian Eulerian Methods”, *Encyclopedia of Computational Mechanics*, Editada por Erwin Stein, René de Borst, Thomas J.R. Hughes. John Wiley & Sons, Ltd. ISBN: 0-470-84699-2. Volumen 1, 2004.

- [24] Ls-Dyna, Theory Manual, Compiled by John O. Hallquist, Marzo 2006.
- [25] Douglas C. Montgomery, “Diseño y análisis de experimentos” Segunda edición en español, Ed. LIMUSA Wiley, 2010.
- [26] [www. sisa1.com.mx/pdf/Acero SISA H13.pdf](http://www.sisa1.com.mx/pdf/Acero_SISA_H13.pdf), Hoja técnica, Aceros SISA, Servicio Industrial S.A. de C.V.
- [27] ASTM International, Designation E8-034.
- [28] ASTM International, Designation E837.
- [29] John H. Lienhard IV, John H. Lienhard V, “A heat transfer textbook”, third edition, Cambridge, MA: Phloginston Press, 2001.
- [30] A. Sluzalec, “Theory of thermomechanical processes in welding”, Ed. Springer-Verlag New York Inc., New York, NY, 2005.