 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2013-09-16

# **DISEÑO Y FABRICACIÓN DE HERRAMIENTAS Y PLACA DE APOYO PARA LA REALIZACIÓN DE JUNTAS SOLDADAS DE ALEACIONES DE ALUMINIO MEDIANTE FRICCIÓN-AGITACIÓN**


**JOSÉ DANIEL CARDONA CÁRDENAS**

**Programa Académico  
Ingeniería Electromecánica**

**Director(es) del trabajo de grado  
Ing. EDWAR ANDRÉS TORRES LÓPEZ, Ph.D**

**INSTITUTO TECNOLÓGICO METROPOLITANO**

**01/Agosto/2014**


 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2013-09-16

## RESUMEN

---

En el año de 1991 en *The Welding Institute* (TWI) fue desarrollado un nuevo método de soldadura en estado sólido, llamado soldadura por Fricción-Agitación (*Friction Stir Welding*). En este proceso se logra obtener una unión soldada al introducir una herramienta que rota y avanza sobre un par de placas, generando calor por medio de fricción, el cual plastifica el metal a su alrededor. La herramienta consta de un hombro cilíndrico y un pin en el extremo inferior del hombro. Cuando la herramienta es introducida entre ambas placas el hombro produce calor por la fricción con el metal de base, mientras que el pin promueve la agitación del metal plastificado a medida que éste se desplaza a través de las placas a soldar. A pesar de que en Colombia existen algunas universidades que vienen realizando estudios en esta área, el proceso es desconocido en la mayoría de las instituciones de educación superior y, más aún, en la industria nacional. Por este motivo, en este trabajo se propone el diseño y fabricación de herramientas y de una placa de apoyo, para la soldadura por Fricción-Agitación de aleaciones de aluminio. El diseño de la geometría de la herramienta será realizado con base en cálculos de transferencia de calor realizados por medio de herramientas computacionales; trabajo llevado a cabo en el semillero de investigación SeCADD-ProM, del ITM. La herramienta para FSW fue diseñada y fabricada considerando un sistema modular, o sea, una herramienta compuesta por varios elementos intercambiables; estos elementos son: un cono morse, para su acoplamiento a la fresadora; un vástago, para la disipación del calor; y un inserto, constituido por el hombro y un pin. Igualmente fue diseñada una placa de apoyo, la cual se utilizará para fijar las placas de la junta y para proteger la mesa de la fresadora.

Palabras Claves: Metal plastificado, Transferencia de calor, juntas soldadas.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2013-09-16

## RECONOCIMIENTOS

---


El desarrollo de este trabajo se ha logrado desarrollar satisfactoria mente, gracias al apoyo de varias personas, quienes han aportado parte de su tiempo en el mismo. Quiero manifestar mi más sincero agradecimiento.

Doy gracias primeramente a Dios por permitirme estar culminando unas de las etapas de mi vida.

Seguidamente al director y asesor de la tesis al profesor Edwar Andrés Torres López, por su gran apoyo y dirección durante este largo proceso, por su acompañamiento y compromiso con el desarrollo del mismo y por su paciencia para conmigo.

También agradecer a los compañeros del semillero SeCADD-ProM, por su gran aporte desde la parte de la simulación previa al diseño y construcción de la herramienta.

Y finalmente darle gracias a mi familia, por su acompañamiento incondicional y por su colaboración en todos los aspectos.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2013-09-16

# ACRÓNIMOS

---

MAtyER: Materiales Avanzados y Energía.

TWI: *The Welding institute* (Instituto de soldadura).

FSW: *Friction Stir Welding* (Soldadura por fricción).

PCBN: Polycrystalline Cubic Boron Nitride (Nitruro de boro cúbico policristalino).


CMM: Metal de matriz cerámica.

CFD: *Computational Fluid Dynamics* (Dinámica de Fluidos Computacional).

HRC: Dureza Rockwell.


FSP: *Friction Stir Processing* (Procesamiento por Fricción).

SeCADD-ProM: Semillero de diseño digital asistido por computador, prototipado y manufactura.


 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2013-09-16

## TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
1. INTRODUCCIÓN	7
1.1 PLATEAMIENTO DEL PROBLEMA	7
1.2 JUSTIFICACIÓN	8
1.3 OBJETIVOS	9
1.4 ORGANIZACIÓN DEL TRABAJO	10
2. MARCO TEÓRICO	11
2.1 SOLDADURA POR FRICCIÓN-AGITACIÓN	11
2.1.1 Descripción del proceso	11
2.1.2 Parámetros de soldadura	13
2.1.3 Efecto de la junta en los parámetros de soldadura	15
2.1.4 Efecto de la herramienta en los parámetros de soldadura	17
2.1.5 Efecto de la placa de apoyo	19
2.2 DISEÑO DE HERRAMIENTAS PARA SOLDADURA POR FRICCIÓN-AGITACIÓN	20
2.2.1 Parámetros para el diseño de herramientas	21
2.2.2 Tipos de materiales para la fabricación de las herramientas	24
2.2.3 Geometrías de herramientas	25
2.3 USO DE CFD PARA EL DISEÑO DE HERRAMIENTAS PARA SOLDADURA FSW	29
2.4 FSW EN COLOMBIA	31
3. METODOLOGÍA	34
3.1 DISEÑO DE LAS HERRAMIENTAS	34
3.2 DISEÑO DE LA PLACA DE APOYO	35
3.3 MATERIALES	37

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2013-09-16

3.4 ENSAMBLE DE LAS HERRAMIENTAS Y ENSAYOS DE SOLDADURA POR PUNTO	34
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	39
4.1 DISEÑO Y FABRICACIÓN DE LAS HERRAMIENTAS	40
4.2 ENSAMBLE DE LOS ELEMENTOS Y PRUEBA EN LA FRESADORA	43
4.3 DISEÑO DE LA PLACA DE APOYO Y PLACA REMOVIBLE	46
5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO	48
REFERENCIAS	50
ANEXOS	57

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2013-09-16


# 1. INTRODUCCIÓN

---

## 1.1 PLANTIAMIENTO DEL PROBLEMA

El proceso de soldadura por fricción-agitación ha sido estudiado exhaustivamente a nivel internacional en aleaciones de aluminio y magnesio; su implementación en la industria metalmeccánica avanza lentamente, pero ya se vienen realizando trabajos importantes en la industria aeronáutica, naval y automotriz, buscando reducir el peso de los vehículos, y como consecuencia de esto, reducir el consumo de combustible. Aún se encuentra en desarrollo el proceso para materiales con resistencia mecánica elevada como aceros, aleaciones de cobre, níquel y titanio; para soldar estos materiales se sigue experimentando principalmente en el desarrollo de herramientas, ya que los materiales actuales se degradan rápidamente, por las exigencias a las cuales se someten durante el proceso de soldadura: fuerzas, temperatura y desgaste.


En el ITM, este proceso es desconocido, al igual que en la industria metalmeccánica local. Con esta propuesta se busca diseñar y fabricar herramientas y diseñar una placa de apoyo para la realización de soldaduras por fricción-agitación de aleaciones de aluminio, en una fresadora. En principio será realizado el diseño y la fabricación de las herramientas para este proceso, tomando como punto de partida las características observadas durante la unión de las aleaciones de aluminio, como el espesor de la chapa y parámetros de soldadura como es la velocidad de avance y la velocidad de rotación, reportados en la literatura. También será diseñada una placa de apoyo que permita el soporte y fijación de las placas a soldar, además de proteger la mesa de la fresadora en el caso de una excesiva penetración de la herramienta donde le pin sobrepase el espesor de la placa o chapa a soldar.

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2013-09-16

## 1.2 JUSTIFICACIÓN

La soldadura se constituye como uno de los procesos más importantes para la elaboración de bienes en la industria metalmecánica. No obstante este presenta serias dificultades al momento de unir piezas fabricadas en aluminio y cobre, debido a su elevada conductividad térmica. Para resolver algunas de estas dificultades, fue desarrollado el proceso de soldadura por fricción-agitación, el que se realiza en estado sólido, eludiendo la formación de los defectos inherentes a la solidificación del metal, como es caso de las soldaduras por fusión. Igualmente se ha demostrado como mediante este proceso las propiedades mecánicas de las juntas soldadas son superiores a las alcanzadas con cualquier proceso de unión por fusión. En Colombia se ha desarrollado pocos trabajos con este proceso de soldadura. Uno de los grupos de investigación que viene adelantando estudios en este sentido es el de Tribología y Superficies, de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín, estudió liderado por la docente Diana María López, la cual viene trabajando en el efecto de los parámetros del proceso en la microestructura y esfuerzos residuales de juntas a tope Al-Al y Al-Acero inoxidable. Otra de las propuestas interesantes está siendo desarrollada por la Universidad Autónoma del Caribe, siendo liderado por el docente Jimmy Unfried Silgado, quien viene realizando la adaptación de una fresadora para la realizar soldadura por fricción-agitación para las aplicaciones en aleaciones de aluminio de alta resistencia. Y finalmente, en la Universidad del Valle, el docente Fernando Franco ha ido desarrollando parámetro de soldadura para la unión de aleaciones de magnesio. El estudio de este proceso, busca su implementación para la construcción de elementos a partir del aluminio y sus aplicaciones, lo cual puede ser preponderante por las enormes ventajas que este proceso presenta frente a los proceso de soldadura por fusión, principalmente para metales de baja resistencia mecánica como lo son las aleaciones de aluminio.



	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2013-09-16


### 1.3 OBJETIVOS

#### 1.3.1 Objetivo general

Diseñar y fabricar las herramientas y la placa de apoyo para el procesamiento y soldadura de aleaciones de aluminio, mediante el proceso de soldadura por fricción-agitación (FSW).

#### 1.3.2 Objetivos específicos


- Definir a partir del estudio del estado del arte los parámetros de soldadura más utilizados para la unión de las aleaciones de aluminio.
- Determinar el tipo de material para la fabricación de las herramientas modulares y de la placa de apoyo, a partir de sus características mecánicas y costos para el desarrollo del proceso.
- Diseñar diferentes geometrías de herramientas, por medio de sistemas de modelamiento y simulación computacional, para obtener geometrías con mayor eficiencia en la evacuación de calor durante el proceso de soldadura.
- Fabricar las herramientas y la placa de apoyo para la realización de juntas soldadas mediante soldadura por fricción-agitación.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2013-09-16

#### 1.4 ORGANIZACIÓN DEL TRABAJO

El cronograma contiene un listado de las actividades que serán realizadas durante el proyecto y que permitirán llegar a los objetivos específicos y cómo estos a su vez llevarán al objetivo general. Debe ser presentado con base en una programación en meses y deberá relacionar entre otras actividades la entrega de informes y productos parciales y finales (Esto se puede observar en el siguiente cuadro).

Actividades	1	2	3	4	5	6
1. Revisión bibliográfica del estado del arte	■	■	■	■	■	■
2. Selección de los materiales		■				
3. Modelados preliminares de las herramientas		■				
4. Simulación térmica de herramientas y modelos finales			■			
5. Fabricación de herramientas y placa de apoyo				■	■	
6. Informe final				■	■	■

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2013-09-16

## 2 MARCO TEÓRICO

---


### 2.1 SOLDADURA POR FRICCIÓN-AGITACIÓN

En el Instituto de Soldadura (*The Welding Institute, TWI*), en el Reino Unido, en el año de 1990 fue desarrollado un método de soldadura en estado sólido, es decir; sin la fusión del metal de aporte y/o metal base; este proceso al año siguiente a su desarrollo fue patentado por la misma institución, dicho proceso se conoce como soldadura por fricción-agitación (*Friction Stir Welding, FSW*) (Burgos *et al*, 2010).

Este proceso está enfocado en la realización de uniones entre materiales de baja resistencia mecánica, como las aleaciones de aluminio y magnesio, donde las aleaciones de aluminio ocupan un lugar importante al momento de su aplicación; actualmente se desarrollan investigaciones para su aplicación en materiales de mayor resistencia mecánica como el cobre y los aceros (Nakai & Eto, 2000).

#### 2.1.1 Descripción del proceso

Para desarrollar el procedimiento de soldadura por fricción-agitación se emplea una herramienta no consumible, compuesta por un hombro cilíndrico y un pin en el extremo inferior de dicho hombro (Figura 1), Esta herramienta es introducida en el material a una velocidad de rotación y de entrada determinados, hasta alcanzar una penetración del pin previamente determinada a partir del espesor de la junta a soldar. Cuando está herramienta entra en contacto con la junta produce calentamiento promovido por la fricción, el cual genera el ablandamiento y posterior plastificación del material alrededor de la herramienta, sin generar nunca la fusión del mismo. Posterior al ingreso de la pieza y calentamiento del material de la junta, la herramienta avanza con una velocidad definida,

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2013-09-16

a lo largo de la línea que separa los elementos a soldar, cerrando la brecha entre ambos. En la región donde el material es agitado y mezclado por el pin de la herramienta, se obtiene la unión metalúrgica de los metales (Hirata *et al*, 2007).

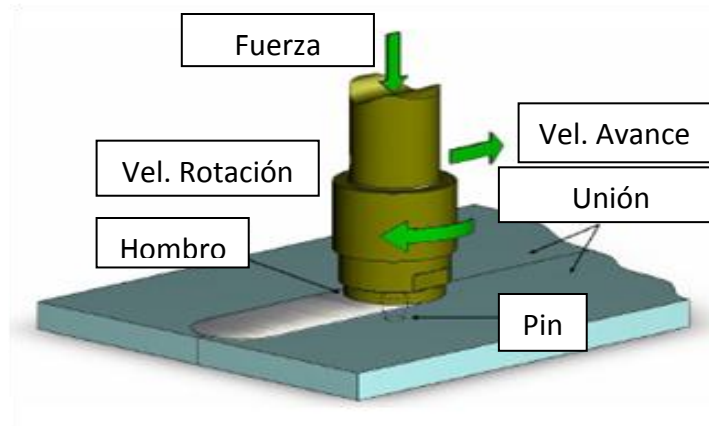



Figura 1. Esquema del proceso de soldadura (FSW). Adaptado de Capelari & Mazzaferro (2006).

La herramienta es un elemento fundamental dentro del proceso de soldadura, pues es con ésta con la que se interviene directamente el material a soldar, la cual dependiendo de su geometría generara el calor y la formación de la junta soldada sin defectos.

Estos aspectos dependerán del diámetro del hombro y de la geometría del pin, los cuales deberán ser diseñados cuidadosamente para poder garantizar una junta soldada sin defectos. Ya que si se aumenta o disminuye el diámetro del hombro este hará que la temperatura aumente o disminuya; por lo tanto, el material de la junta podrá estar muy caliente o muy frío (Renck, 2005). Este proceso de soldadura, normalmente es realizado en fresadoras convencionales, en las cuales se adapta la herramienta. En la Figura 1 se puede observar el proceso y sus principales variables.

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2013-09-16


### 2.1.2 Parámetros de soldadura

Los parámetros de soldadura son aquellos que gobiernan el desarrollo del proceso; los más destacados son las velocidades de rotación y avance, la penetración de la herramienta sobre la junta, la fuerza axial y el ángulo de inclinación de la herramienta.

La velocidad de rotación es una variable directamente vinculada con la generación de calor durante el proceso de soldadura, donde sus unidades de medidas son revoluciones por minuto (rpm). Para este parámetro cuanto mayor es la velocidad de rotación, mayor será la temperatura entre el hombro y la junta, producto de la fricción entre ambos, generando así mayor viscosidad de material al ser soldado, lo que permite una mayor fluidez de material.

Otro parámetro importante es la velocidad de avance, que es aquella a la cual la herramienta se desplaza linealmente a lo largo de la junta, una vez el material a su alrededor es plastificado, cerrando la separación entre ambas placas. Sus unidades de medida son milímetros por minuto (mm/min), para la variación de este parámetro se debe tener en cuenta las propiedades mecánicas del material y su temperatura de fusión. El principal efecto de este parámetro es que a medida que la velocidad aumenta, la temperatura disminuye, pues el tiempo de permanencia de la herramienta en rotación, en cada punto se reduce, disminuyendo la generación de calor (AbbasiGharacherhet *et al*, 2006).

Un parámetro sensible durante este proceso es la penetración de la herramienta, la cual depende de la longitud del pin, el ángulo de inclinación y el espesor de la placa a soldar, siendo uno de los más difíciles de especificar. Este parámetro es extremadamente importante porque si se diseña un pin demasiado largo, el hombro de la herramienta nunca hará contacto con las placas de la junta, evitando la generación de calor y la


	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2013-09-16

plastificación del material. Por otro lado, si el pin es muy corto, la penetración de la herramienta será menor que el espesor de las placas de la junta, dejando un defecto en el fondo de la junta denominado falta de penetración o defecto de raíz.

Existen dos mecanismos para mantener la herramienta en posición dentro de la junta, uno de ellos es la fijación del valor de penetración de la herramienta dentro de las placas y el segundo es con un valor constante de fuerza axial (Figura 1). La fuerza axial es la carga que la herramienta ejerce sobre las juntas durante la soldadura, manteniendo la presión sobre el metal plastificado. Este segundo mecanismo de control de la penetración de la herramienta solo se encuentra disponible en máquinas específicas o modificadas para la realización de soldadura por fricción. Si durante el proceso la fuerza axial cae, el sistema se auto compensa aumentando la penetración de la herramienta para mantener el mismo valor de carga. Si la carga aumenta el sistema corrige la posición de la herramienta realizando la extracción de la misma hasta alcanzar la carga programada. Este parámetro tiene una influencia considerable en la generación de calor durante el proceso, lo cual permitirá la obtención de una unión sin defectos (Kim *et al*, 2006).

La inclinación de la herramienta indica el ángulo entre la herramienta y el vector normal al plano de las placas. En principio este parámetro favorecerá el desplazamiento del material plastificado a través de la junta, pues el metal es empujado por la acción de la velocidad de avance, auxiliando a la consolidación del material plastificado. Sin embargo una inclinación elevada, generalmente mayor a 2º, genera un canal en la línea de la junta, reduciendo su espesor en esa región y por ende su resistencia mecánica (Smith *et al*, 2010).

Existen otros elementos que igualmente deben ser considerados al momento de seleccionar los parámetros para la realización de las juntas soldadas. Algunos de estos

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2013-09-16

parámetros son las características de junta, la herramienta y la forma de apoyar las placas a soldar. Estos son presentados a continuación.


### **2.1.3 Efecto de la junta en los parámetros de soldadura**

Las características de las juntas a ser soldadas, son importantes pues adicionan elementos a considerar a la hora de definir parámetros de soldadura.

Inicialmente el material que se desea soldar es importantísimo, pues define las características geométricas y el material del cual deberá ser fabricada la herramienta. Para metales de menor resistencia como el magnesio y el aluminio, las temperaturas máximas durante la soldadura en la junta rondan los 500 °C; pero a medida que el material a soldar aumenta su resistencia, las temperaturas alcanzadas pueden superar los 1000 °C, lo cual sucede especialmente en el caso de soldaduras de acero, aleaciones de níquel y cobre.

A seguir, el espesor de la junta, es otro elemento fundamental en la configuración de la junta, puesto que no es igual soldar placas gruesas o delgadas, debido a la cantidad de calor que debe ser generado. Además del espesor depende la penetración de la herramienta, lo que determina la longitud del pin.

Finalmente, es importante conocer la configuración de las juntas, la cual indica cómo deben de ser posicionadas las placas antes de la soldadura, siendo las configuraciones más destacadas, las cuales se presentan en la Figura 2. La forma más empleada para el proceso de soldadura por fricción-agitación es la junta a tope, como se puede observar en la Figura 2. Las configuraciones de junta en T, como las presentadas en la Figura 2b-c, son comunes en perfiles de aluminio y en estructuras soldadas, por lo que el proceso de FSW ha tratado de implementar esta configuración dentro de su marco de operaciones, con relativo éxito, pues persiste la formación de defectos en la parte superior del pin, y donde

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2013-09-16

la longitud del pin y la penetración de la herramienta se tornan especialmente sensibles dentro del proceso. Otra forma empleada frecuentemente es la unión entre placas sobrepuestas, como se presenta en la Figura 2d-e, donde la generación de calor por el pin toma importancia, para garantizar la plastificación del metal de las placas inferiores, motivo por el cual las herramientas tienden a presentar diámetros mayor que los usados en soldaduras de juntas a tope. Finalmente las configuraciones en esquina (Figura 2f) y en L (Figura 2g) son frecuentemente empleadas en la industria de los perfiles, pero su implementación en FSW se ha dificultado principalmente por los defectos formados en la raíz de la junta, principalmente en la junta en L.

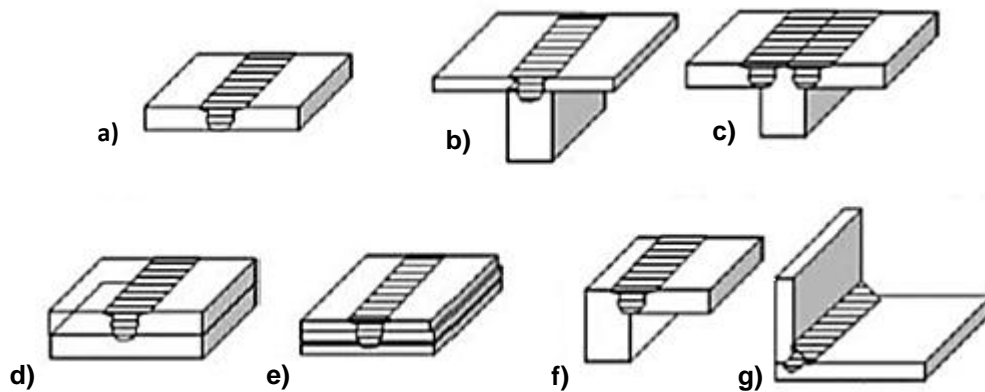



Figura 2. Configuraciones de las juntas para el proceso (FSW). a) Tope, b) en T para soldar un pase, c) en T para soldar en pases, d) sobrepuesta para dos placas, e) sobrepuesta para tres placas, f) en esquina, g) en L. Adaptado de Threadgill (1999).

A partir de este tipo de configuraciones los parámetros como velocidad de avance, rotación, ángulo de inclinación, penetración de la herramienta y la fuerza axial pueden cambiar dependiendo de su aplicación (Gibson *et al*, 2013).



	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2013-09-16

#### 2.1.4 Efecto de la herramienta en los parámetros de soldadura

Tanto la geometría como el material del cual está fabricada la herramienta son fundamentales para la determinación de los parámetros de soldadura. De la herramienta se destacan dos elementos: el material del cual está fabricada y su geometría.


Además de la geometría y del material del cual está fabricada la herramienta, depende únicamente del material que se pretenda soldar. Los materiales empleados para la construcción de herramientas, así como el tipo de metal que permite soldar y su costo son presentados en la Tabla 1.

La geometría de las herramientas es la responsable de lograr una junta soldada sin defectos, ya que los parámetros de soldadura se verán afectados por la geometría del hombro.

Tabla 1. Materiales con los cuales son construidas las herramientas para FSW.

<b>Material de la herramienta</b>	<b>Material que puede ser soldado</b>	<b>Costo de la herramienta (COP\$)</b>
Acero rápido (H13)	Aleaciones de aluminio Aleaciones de magnesio	500.000 a 1.000.000
Carburo de Tungsteno (WC)	Aleaciones de aluminio Aleaciones de magnesio Acero de baja aleación	1.000.000 a 2.000.000
nitruro de boro cúbico policristalino (PCBN)	Cobre Acero inoxidable Aleaciones de níquel Acero de baja aleación	10.000.000 a 15.000.000


El diámetro del hombro de la herramienta, es el encargado de la generación de calor de la junta; por lo tanto, si el hombro es demasiado grande podrá generar tanta fricción con la

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2013-09-16

junta que la temperatura alcanzada genere una viscosidad muy alta del metal plastificado, el cual en el caso del aluminio se traduce en la adherencia del aluminio en la herramienta. Si el hombro es muy pequeño, la velocidad de rotación debe aumentar de forma tal que sea alcanzada la temperatura suficiente para plastificar el aluminio. Adicionalmente, el hombro puede ser liso o con estrías, lo cual mejora el flujo del material plastificado; más aún, pues ser cóncavo o convexo, lo que determinará si la herramienta debe ser inclinada o no, para hacer avanzar el material a través de la ranura que hay entre las placas a soldar (Scialpi *et al*, 2007).

En el mismo sentido, el parámetro más importante del pin es su longitud, pues de éste depende que se alcance la profundidad suficiente en la región soldada. El pin puede ser cilíndrico o cónico, liso o con estrías; todos estos elementos tienen gran importancia pues modifican el grado de agitación del material plastificado dentro de la ranura o separación que hay entre las placas a soldar, pudiendo así mejorar la penetración de la soldadura (Elangovan *et al*, 2008).

Este es otro de los factores importantes dentro del proceso de FSW, porque de ellos dependerá si se logra una junta soldada con defectos o sin defectos, es importante a tener en cuenta el diámetro del hombro de la herramienta, porque si el hombro es demasiado grande podrá generar tanta fricción con el material que puede que éste no se vuelva pastoso sino que se adhiera a él por las altas temperaturas, porque sabes que a mayor superficie de contacto mayor será la fricción, como también si es cóncavo o convexo esté determinara si la herramienta de debe inclinar o no para hacer avanzar el material a través de la ranura que hay entre las placas a soldar (Thomas *et al*, 1991).

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2013-09-16

### 2.1.5 Efecto de la placa de apoyo

La placa de apoyo es un elemento que permite tanto proteger la maquina en la cual se realiza el proceso de soldadura, como garantizar una sujeción adecuada de las placas que evite el desplazamiento de las mismas durante la ejecución de la soldadura. Un ejemplo de placa de apoyo se presenta en la Figura 3.

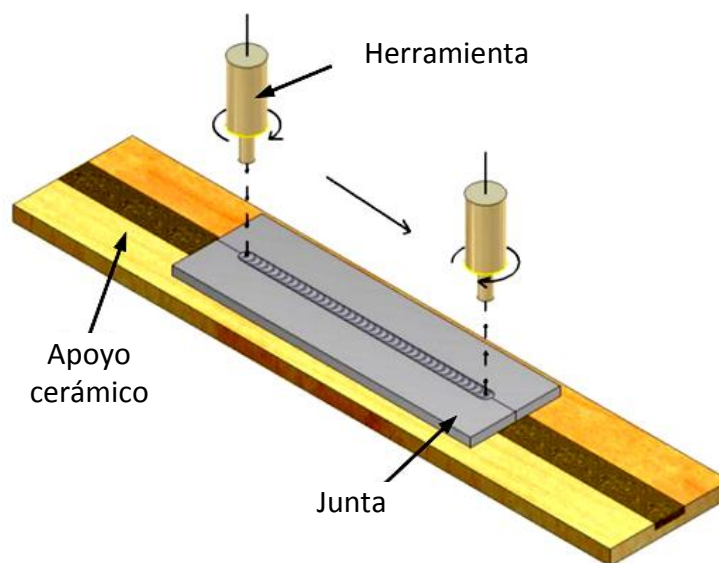



Figura 3. Esquema de placa de apoyo utilizada para la realización de juntas por FSW. Adaptado de Santos *et al* (2014).

El proceso de soldadura FSW es considerado por algunos autores que este es similar a un proceso de extrusión, donde el metal plastificado es contenido por la herramienta y la placa de apoyo (Upadhyay & Reynolds, 2012). Por tal motivo, el apoyo deber ser lo suficientemente rígido para soportar la presión del metal plastificado, y así conseguir cerrar satisfactoriamente la separación entra las placas.

Por lo tanto la placa no debe deformarse como resultado del empuje de la herramienta (fuerza axial), además debe soportar las temperaturas generadas durante la soldadura y

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2013-09-16


presentar una superficie lo suficientemente lisa y duradera, pues el metal empujado por la herramienta adopta las características superficiales de la placa. Es por esto que la placa de apoyo es fundamental para garantizar la obtención de juntas soldadas sin efectos de raíz.

Estas piezas son fabricadas generalmente en acero templado, cuando el metal a soldar es de baja dureza, como las aleaciones de aluminio. A medida que la resistencia del metal de la junta aumenta, así lo hace también la fuerza axial, siendo necesario el empleo de materiales de apoyos más duros. Es así como han sido empleados depósitos cerámicos para la realización de juntas soldadas de aceros de alta resistencia, inoxidable y juntas disimilares acero-aluminio y acero-níquel (Santos *et al*, 2014).

## 2.2 DISEÑO DE HERRAMIENTAS PARA SOLDADURA POR FRICCÓN-AGITACIÓN

El diseño de las herramientas para la soldadura FSW es uno de los factores más importantes dentro de este proceso, ya que la herramienta es la encargada de realizar funciones como la generación de calor, agitación del material y cerrar la brecha que separa las placas a soldar.

Como se ha visto en la sección 2.1.4, las herramientas pueden ser fabricadas empleando diferentes materiales y ser utilizadas para la unión de diferentes tipos de metales. Adicionalmente la geometría de la herramienta es otro factor preponderante dentro del proceso. Sin importar el material o geometría de la herramienta se han realizado la mayoría de estudios, estudios que se han centrado en evaluar la influencia que la geometría de la herramienta ejerce en las propiedades mecánicas de las juntas soldadas. Al parecer la metodología o los elementos considerados para el diseño de las herramientas no es uno de los temas más relevantes para un estudio (Akinlabi *et al*, 2013).

	<p style="text-align: center;">INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</p>	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2013-09-16

A continuación, serán descritos los diferentes parámetros a ser considerados para el diseño de herramientas para FSW, siendo explícito en el efecto que cada uno de estos ejerce sobre el proceso o en el objetivo de producir juntas soldadas sin defectos.

### 2.2.1 Parámetros para el diseño de herramientas

Los elementos fundamentales que se deben tener en cuenta para el diseño de las herramientas son el tipo de material que va a ser soldado y la geometría de la junta. De la combinación de estos dos parámetros se desprende otros igualmente importantes, como la temperatura máxima alcanzada durante el proceso, el grado de desgaste y la magnitud de los esfuerzos sufridos por la herramienta, y el grado de fluidez del metal. A medida que aumenta la resistencia a la tracción y el espesor de las chapas del metal a soldar, así también aumenta la temperatura, las fuerzas generadas entre la herramienta y la junta, y el desgaste sufrido por la herramienta. Al aumentar la temperatura la fluidez del material plastificado también aumenta, permitiendo llenar más fácilmente la separación entre las chapas, pero igualmente produciendo más cantidad de pérdida de metal por formación de rebaba (Figura 4).

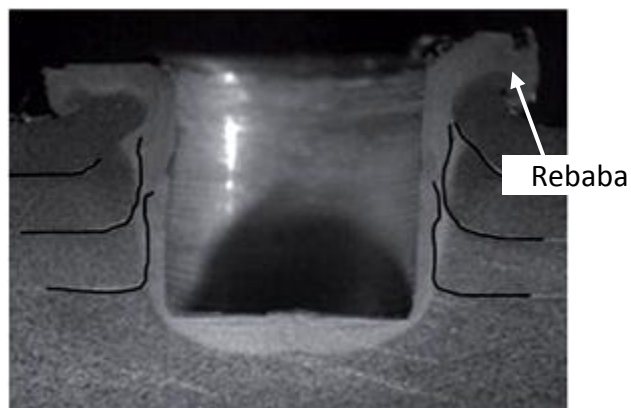



Figura 4. Formación de rebaba significativa durante soldadura de punto por fricción, debido a fluidez excesiva del metal plastificado. Adaptado de Campanelli *et al* (2011).


	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2013-09-16

Igualmente si la temperatura alcanzada en el metal base es mayor, los cambios microestructurales serán más significativos, alterando significativamente las propiedades de la junta soldada respecto a las propiedades iniciales del metal base.

Para determinar cuál es el tipo de material a partir del cual será fabricada una herramienta, son la temperatura máxima alcanzada, los esfuerzos generados durante el proceso y el grado de desgaste sufrido por la herramienta. Para el caso de soldaduras de metales de baja resistencia como lo son las aleaciones de aluminio o de magnesio, las temperaturas alcanzadas oscilan entre 350 y 550 °C; el esfuerzo lateral en las herramientas no superan los 6 kN y el desgaste es insignificante. Por otro lado al soldar aceros la temperatura puede superar los 1100 °C, mientras la fuerza (dependiendo del espesor) se acerca peligrosamente a los 350 kN y el desgaste es severo (Valdivé *et al*, 2012).

Por todo esto, al momento de la selección del material para la fabricación de la herramienta, deberá tenerse en cuenta características importantes como su composición química, geometría, costo de la fabricación y vida útil; con base en estos elementos se podrá lograr la fabricación de una herramienta la cual cumpla con los requerimientos esperados dependiendo su aplicación.


La resistencia al desgaste es uno de los parámetros al cual se debe prestar mucha atención, ya que de éste dependerá si la soldadura obtenga una buena calidad y disminuya los posibles defectos, ya que si se obtiene una herramienta la pueda soportar una alta resistencia al desgaste esto podrá garantizar mucha más durabilidad de la herramienta. El desgaste dependerá de la relación que se produce entre el material de la herramienta y el material de la placa a soldar, es por este motivo que el material con que se fabrica la herramienta debe tener una mayor resistencia al desgaste que el material que se utiliza para la aplicación del proceso (Tozaki *et al*, 2007; Thompson & Babu, 2010).

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2013-09-16

El material que se seleccione para la fabricación de las herramientas no deberá presentar variaciones en su microestructura y en su densidad, ya que dichas variaciones producen un debilitamiento al material el cual puede llevar como consecuencia la fractura de la herramienta. Las aleaciones que se realizan entre los metales se componen de diferentes densidades, pero el material que se utilice para la fabricación de las herramientas debe de ser una misma densidad (Steuwer *et al*, 2012)

La disipación de calor que pueda producir la herramienta está ligada, primeramente al material con el cual fue construida y segundo lugar, a la geometría de la herramienta. La disipación de calor en la región que está siendo soldada puede ser problemático, pues obligaría al aumento de la velocidad de rotación o disminución de la velocidad de avance, para garantizar que la temperatura alcanzada en el metal plastificado sea la adecuada. Sin embargo, si el calor es transferido desde la región soldada hasta el usillo de la máquina en donde se está llevando a cabo la soldadura, esto puede conducir al daño de la máquina por la adherencia de la herramienta al usillo, debido a la dilatación sufrida por la herramienta. En este caso, una manera de obtener la disipación de calor entre la herramienta y el usillo de la máquina, es realizando una barrera térmica entre ellos, lo cual se realiza utilizando un material poco conductor; sin embargo los materiales que mejor responden a esta situación son los cerámicos, pero desafortunadamente su elevada fragilidad evita su utilización en este caso. Otra forma es localizando un elemento geométrico que aumente la transferencia de calor entre la herramienta y el ambiente, lo cual conduce a la utilización de vástagos de gran longitud o aletas.

Y por último, otro elemento a tener en cuenta en el diseño de las herramientas es la presencia en el mercado local del material seleccionado para la construcción de la herramienta, así como de los recursos estructurales para su manufactura, lo cual para Colombia representa una enorme restricción debido al bajísimo flujo de materias primas y

	<p style="text-align: center;">INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</p>	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2013-09-16

a las limitaciones existentes en cuanto al procesamiento de material con tecnologías modernas.


### 2.2.2 Tipos de materiales para la fabricación de las herramientas

Inicialmente las herramientas utilizadas para el proceso de FSW fueron concebidas para la unión de aleaciones de aluminio, magnesio y cobre, lo que permitió que estos intentos fueran realizados con herramientas fabricadas en aceros de herramientas como el AISI H13. Las herramientas además de presentar excelente desempeño no evidenciaron desgaste o contaminación de la soldadura; además su disponibilidad y fácil maquinabilidad del material empleado fue una de sus grandes ventajas en el momento de su implementación dentro del proceso de FSW (Carrasco *et al*, 2014).

Cuando el proceso FSW fue aplicado en otros metales con una dureza mucho mayor, como lo es el acero, aleaciones de titanio y súperaleaciones de níquel, esto llevó al empleo de otro tipo de materiales para la fabricación de las herramientas, como las aleaciones de níquel y cobalto, ya que estos materiales permiten un buen desempeño a altas temperaturas entre los 600 y 800 °C aproximadamente. Una de las desventajas de estos materiales es su maquinabilidad, pues requiere de equipos sofisticados (Sutton *et al*, 2006).

Otros materiales utilizados para la fabricación de las herramientas son el tungsteno, molibdeno, niobio y el tántalo, los cuales son conocidos como metales refractarios; entre las principales características de estos materiales está la capacidad de soportar temperaturas las cuales rondan entre 1000 y 1500 °C; sus principales desventajas se relacionan con su baja disponibilidad, las enormes dificultades para su conformación, la elevada fragilidad y el alto costo económico (Liu *et al*, 2005).




	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2013-09-16

Los materiales que mejor cumplen las características de alta tenacidad y elevada temperatura son los compuestos de matriz metálica con carburos, los cuales son comúnmente utilizados en la fabricación de herramientas de mecanizado, pero que presentan desgaste significativo y contaminación de la junta soldada, principalmente a altas temperaturas. Para contrarrestar estas dificultades al soldar metales de alta resistencia, recientemente se han desarrollado herramienta para FSW fabricadas con un material denominado Nitruro de Boro Cúbico Policristalino (*Polycrystalline Cubic Boron Nitride*, PCBN), el cual es material compuesto de altísima resistencia y ductibilidad aceptable a temperaturas de hasta 1200 °C, este tipo de herramientas son fabricadas en plantas con tecnología muy especializada lo cual hace imposible su fabricación en países en desarrollo y donde su comercialización es nula debido al elevado costo y poca vida útil (Liu *et al*, 2005; Collier *et al*, 2003).

### **2.2.3 Geometrías de herramientas**

La herramienta para el desarrollo del proceso de soldadura FSW, está constituida por dos elementos, el hombro y el pin; el hombro es el encargado de generar el calor, que plastifica el metal, por medio de la fricción con las placas de la junta, mientras que el pin agita el material plastificado cerrando la separación entre los elementos a soldar. Los diseños iniciales de herramienta se enfocaron en el efecto de la geometría en la generación de calor y la producción de juntas sin defectos.

Por ejemplo, un hombro cóncavo, fue el primer hombro que se diseñó para el proceso de FSW y actualmente es el más utilizado. Sin embargo, esta geometría obliga a que la herramienta sea inclinada de 2 a 4° del eje vertical para que al momento de que el hombro entre en contacto con las placas, haciendo que el material sea empujado hacia delante a medida que la herramienta avanza a través de la trayectoria de las placas a soldar (Figura 5). Esta condición restringe enormemente el control sobre la penetración de

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2013-09-16

la herramienta, pues a medida que esta aumenta se forma un canal en la junta el cual puede afectar significativamente su comportamiento mecánico (Thomas *et al*, 1991).

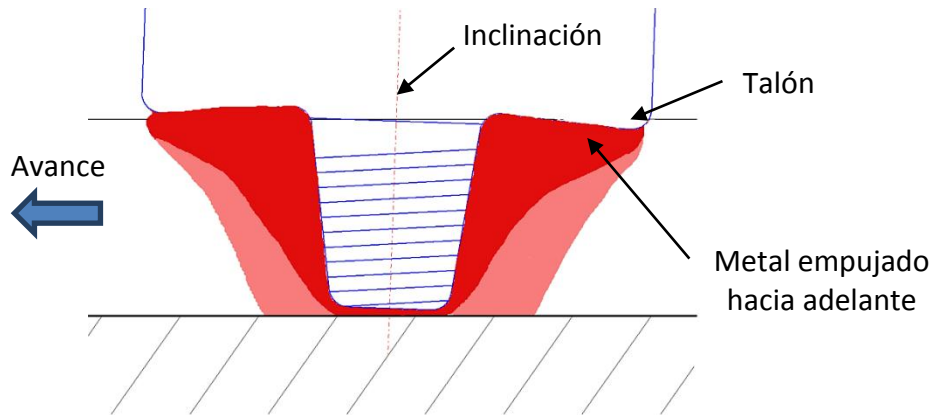



Figura 5. Diseño de herramienta con hombro cóncavo (2014).

Un nuevo tipo de geometría se presenta en las herramientas de cerámica de matriz metálica y PCBN, en las cuales el hombro es convexo (Figura 6), eliminando la necesidad de inclinar la herramienta y permitiendo un mejor control de la penetración de la misma, obteniendo una mayor superficie de contacto entre el hombro y la placa a soldar.



Figura 6. Herramienta cerámica con matriz cerámica (CMM) con hombro convexo (2014).

Otra geometría es el que se conoce como hombro plano el cual puede tener variaciones en los diseños en la superficie inferior de dicho hombro, estas variaciones también se pueden dar en los hombros tanto el cóncavo como el convexo, para así facilitar que el material sea calentado y no se adhiera a la superficie del hombro, y estas formas las

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2013-09-16

podemos observar en la Figura 7 donde las características que tiene es que en la parte donde la superficie entra en contacto con el material se realizan pergaminos, crestas o estrías, surcos y círculos concéntricos (Mishra & Mahoney, 2007).

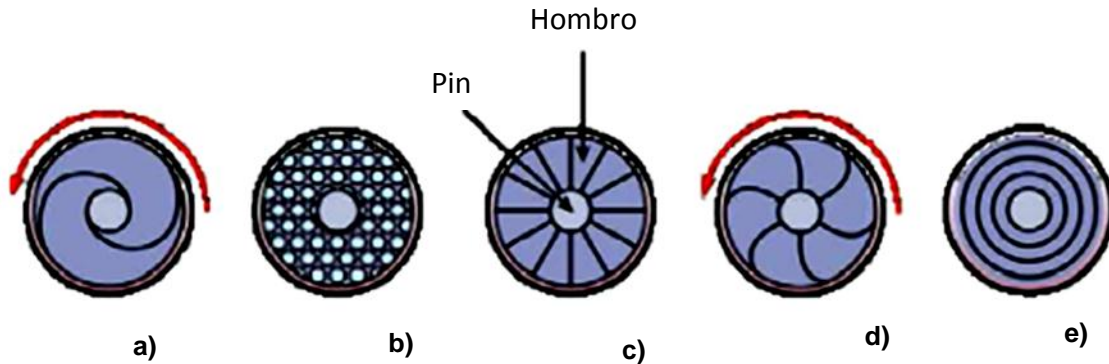



Figura 7. Configuraciones de los hombros, a) espiral, b) círculos concéntricos, c) estrías, d) pergaminos y e) surcos. Adaptado de Fioravanti (2008).

El pin es diseñado para la penetración en el material y para que promueva el mezclado del mismo a medida que este avanza de manera longitudinal; Actualmente, existen una variedad de geometrías de pines entre las cuales comenzaremos a definir a continuación.

El pin que inicialmente se utilizó para la implementación del proceso fue el de la geometría más común que es el pin cilíndrico recto, el cual puede tener variaciones las cuales pueden ser diseñadas con o sin estrías y que el extremo inferior del pin sea plano o con pequeño radio de curvatura.

Pin cilíndrico roscado, la geometría roscada es implementada en este pin para transportar el material que entra en contacto con el hombro hasta llevarlo a la parte inferior del pin, para así promover el avance del material (Figura 8), el sentido del roscado dependerá del sentido de giro de la herramienta, por ejemplo si el giro de la herramienta es sentido horario el roscado deberá ser de rosca izquierda o contraria al sentido horario.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2013-09-16

Otra de las geometrías más comunes que se pueden encontrar para la realización de este proceso es el pin cónico (Figura 8), utilizado para aplicaciones donde las placas de aluminio pueden alcanzar un espesor de hasta 12 mm, esta geometría también puede ser modificada agregándole estrías y un radio de curvatura en el extremo inferior del pin, esto ayuda al desplazamiento del material a través de él, mejorando así la unión que se consolida en la separación de existe entre las placas a soldar.

El pin triangular (Figura 8), fue desarrollado a partir de simulaciones de dinámica de fluidos en las cuales se tuvo en cuenta el flujo de material alrededor del pin, y se pudo llegar a una conclusión de que este tipo de geometrías tienen un buen comportamiento en placas que no superen los 6,35 mm de espesor, por lo cual se encontró una reducción significativa en los esfuerzos que se concentran en el pin en comparación con otras geometrías (Elangovan & Balasubramanian, 2008).

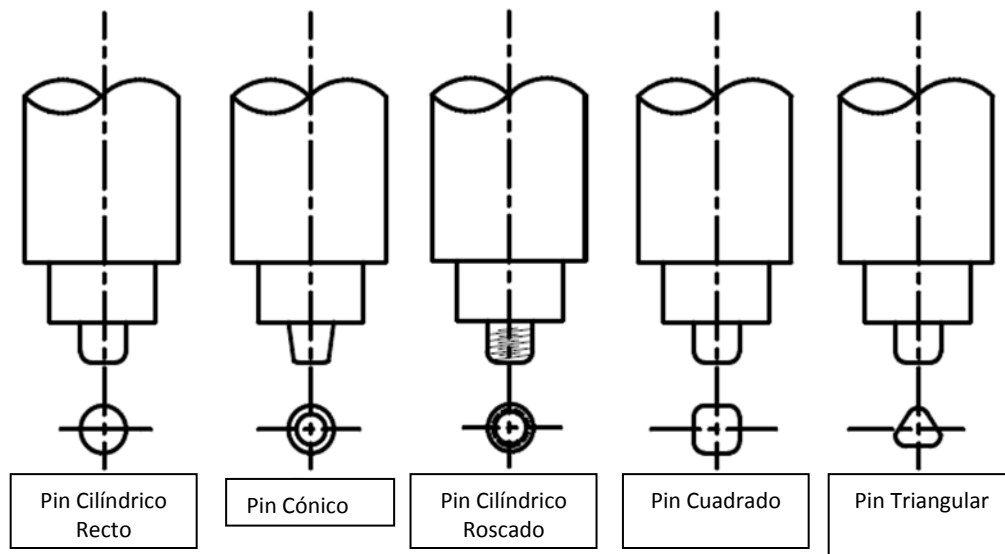



Figura 8. Geometría de los pines más comunes. Adaptado de Padmanaban & Balasubramanian (2009).

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2013-09-16

### 2.3 USO DE CFD PARA EL DISEÑO DE HERRAMIENTAS PARA SOLDADURA POR FSW

La dinámica de fluidos computacional (*Computational fluid Dynamics, CFD*), es una de las ramas de la mecánica de fluidos que utiliza métodos numéricos y algoritmos para dar soluciones a problemas que involucran el movimiento de líquidos o sustancias. Esta herramienta permite predecir y analizar el comportamiento y posibles fallas dentro del sistema que se esté analizando.

Actualmente son muchas las aplicaciones donde se utiliza CFD, entre ellas se tiene a la industria automotriz, donde se estudia el comportamiento aerodinámico de los autos en condiciones comunes y en condiciones extremas, lo que permite llegar a conclusiones más precisas al momento de diseñar el auto; también se utiliza en el diseño de sistemas aeroespaciales, en el estudio del comportamiento de las alas de los aviones en condiciones severas (Figura 9). Finalmente, la industria química también usa esta metodología para el análisis de los productos de combustión en reactores, así como para analizar el comportamiento del petróleo, el gas, la generación de energía eléctrica, las turbinas, los reactores nucleares, etc (Correa, 2011).

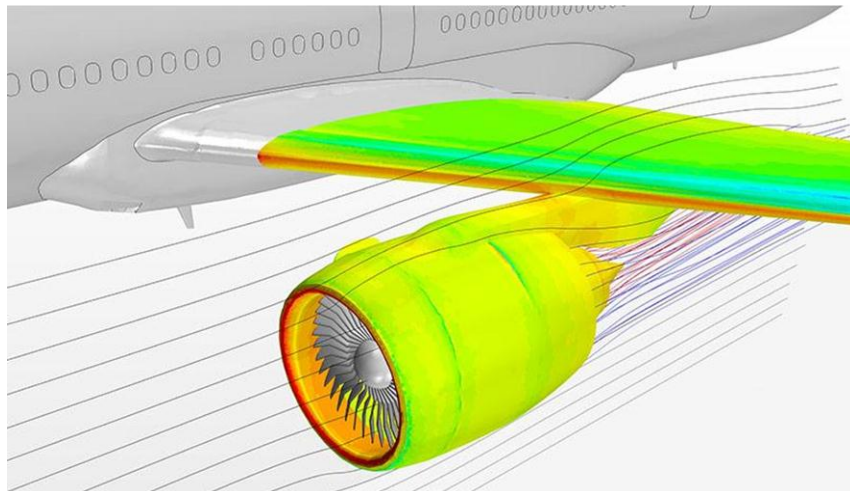



Figura 9. Simulación de una turbina de avión (Creaforma3D, 2014).

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2013-09-16

En el modelado computacional de procesos FSW las investigaciones se han enfocado en predecir el calentamiento, los esfuerzos y el flujo de material plastificado, utilizando como punto de partida los parámetros de soldadura y las características del material base (Ulysse, 2002).

Un ejemplo de este tipo de trabajos es el realizado por Ulysse (North et al, 2000), quien aplico un modelo viscoplástico tridimensional de flujo de material para el flujo de temperatura y el movimiento del material durante el proceso FSW. Un ejemplo potencial de CFD en FSW son los resultados del flujo de material alrededor de las herramienta(Figura 10a), y disipación de calor o flujo térmico (Figura 10b), donde para el segundo caso, es posible determinar el flujo de calor en la herramienta como en las placas, además de verificar el efecto de la inclinación de la herramienta en el comportamiento térmico durante el proceso (de Saracibar *et al*, 2012).

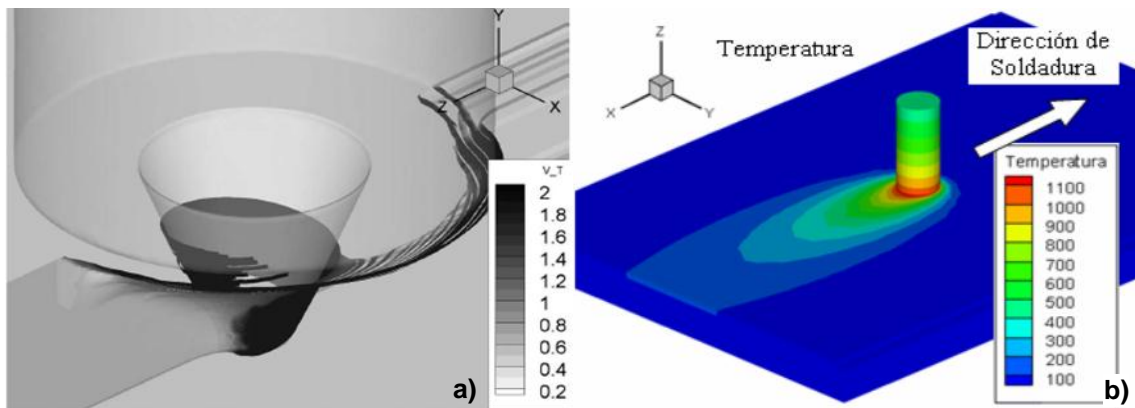



Figura 10. Simulación de la herramienta FSW, a) flujo de material alrededor del pin. Adaptado de Santiago *et al* (2009) y b) transferencia de calor durante el proceso de FSW. Adaptado de Pereyra *et al* (2007).

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2013-09-16


## 2.4 FSW EN COLOMBIA

Este proceso de soldadura está siendo introducido en Colombia lentamente, por medio de diferentes proyectos en universidades, pero aun no existe ninguna aplicación industrial en el momento.

Una de las primeras publicaciones o demostraciones del proceso fue la presentada en el año 2008 en el X congreso iberoamericano de metalurgia y materiales (IBEROMET), desarrollado en la ciudad de Cartagena. El trabajo titulado “Soldadura por fricción-agitación de aleaciones ligeras – Una alternativa a nuestro alcance”, fue desarrollado por estudiantes de la Universidad del Valle y se centró en la evaluación del comportamiento mecánico de juntas soldadas mediante FSW en aleaciones de aluminio 6261-T6 y magnesio AZ31B. Entre los resultados sobresale el buen aspecto de las juntas soldadas y el mejoramiento de las propiedades mecánicas en la región soldada (Franco *et al*, 2009).

Cárdenas *et al* (2011) llevaron a cabo otro trabajo sobre el este asunto, donde se realizó la evaluación de la resistencia a la tensión de uniones soldadas por fricción-agitación de la aleación de aluminio 5052-H38; este trabajo, desarrollado de forma conjunta entre la Universidad Autónoma de Occidente y la Universidad del Valle, busco relacionar de forma más estrecha el efecto de los parámetros de soldadura en las propiedades mecánicas de las juntas soldadas.

Aperador *et al* (2012) publica resultados de un estudio realizado por la Universidad Militar Nueva Granada y la Universidad del Valle, buscando establecer el comportamiento a la corrosión de juntas soldadas mediante FSW de aleación de magnesio AZ31B en ambiente marino, con el cual se pudo establecer como el aumento en las velocidades de rotación y de avance aumenta la resistencia a la corrosión que se presenta en la junta soldada es menor a la que se obtiene con velocidades más bajas. A pesar de esto el mecanismo por el

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2013-09-16

cual aumenta la resistencia a la corrosión, solo fue establecido mediante la evaluación de la corrosión intergranular en la citada aleación (Chaparro *et al*, 2014).


Con relación a trabajos de aluminio, otro ejemplo es el estudio realizado por las Universidades del Valle y Autónoma de Occidente, donde fue evaluado el comportamiento mecánico de soldaduras de punto por fricción-agitación en la aleación de aluminio 6063-T5, donde se pudo establecer como la relación entre tensión vs la cortante en estas uniones superan en 100% las uniones que se realizan por remache (Quintana *et al*, 2012; Falla *et al*, 2012).

El uso de herramientas virtuales para simular el proceso FSW no ha sido explotado con suficiencia. Uno de los pocos ejemplos en esta área es el trabajo dirigido de grado desarrollado en la Universidad Autónoma de Occidente cuyo objetivo es simular numéricamente el proceso FSW mediante elementos finitos, la soldadura de aleación AA6061-T6; en este proyecto se pudo establecer la relación entre la carga axial y la velocidad de rotación en la generación de calor durante el proceso, además de establecer como se distribuye el calor entre la herramienta y la placa a soldar (Baastidas, 2013).

A pesar de las herramientas ser un elemento clave para la realización del proceso, en Colombia solo es posible encontrar un trabajo relacionado con su diseño, el cual fue desarrollado en la Universidad Autónoma del Caribe. En el trabajo fueron definidas pautas y criterios de diseño para la fabricación del pin, donde concluyen que el principal parámetro más significativo para su fabricación es el espesor de las placas a soldar (Carrasco *et al*, 2014).


Finalmente, uno de los últimos trabajos desarrollados en el área corresponde al de Zapata(2013) quien realizó la evaluación de los esfuerzos residuales en juntas de aluminio unidades mediante FSW., donde se pudo demostrar como los esfuerzos residuales varían



	<p style="text-align: center;">INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</p>	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2013-09-16

dependiendo de los cambios en las velocidades de rotación y avance de la herramienta, donde si la velocidad de rotación aumenta, los esfuerzos residuales en la junta disminuyen.

Con esta revisión queda en evidencia el poco desarrollo de este proceso en nuestro país, el cual viene siendo abordado en investigaciones y no en aplicaciones en la industria metalmeccánica. Igualmente se observa que los trabajos se centran en las aleaciones de aluminio y de magnesio, sin explorar el diseño de herramientas, el efecto de los parámetros en la formación de defectos, los cambios microestructurales y la generación de calor.

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2013-09-16

## 3 METODOLOGÍA

---


### 3.1 DISEÑO DE LAS HERRAMIENTAS

Inicialmente fueron evaluadas diferentes geometrías de herramienta para el proceso de soldadura por fricción-agitación, considerando el diseño de una herramienta modular, la cual está constituida por tres elementos: el cono morse, para el acople en el husillo de la fresadora; el vástago, encargado de la disipación de calor; y un inserto que contiene el hombro y el pin para la generación de calor, agitación del metal plastificado y formación de la junta soldada.

Entre los criterios tenidos en cuenta para el diseño de la herramienta está la disipación de calor a través del vástago en el menor tiempo posible, el cual está estrechamente relacionado con el su longitud y diámetro. Para el diseño de este elemento se considerando que la temperatura máxima alcanzada en el hombro, durante el proceso de soldadura, es de 500 °C. Por medio de simulación mediante herramientas computacionales de un módulo CFX de Ansys®14.5m, fueron evaluadas diferentes geometría (Villa *et al*, 2013), teniendo en cuenta las velocidades de rotación y de avance Tabla 2.

Tabla 2. Parámetros de soldadura considerados para la simulación.

<b>Velocidad</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>
Rotación (rpm)	700	800	900	1000
Avance (mm/min)	100	150	200	250

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2013-09-16


La simulación computacional fue realizada en el semillero CADD-ProM del ITM, donde el procedimiento específico para la construcción del modelo y el simulador virtual son descritos por Villa *et al* (2013).

Para el diseño del inserto (hombro y pin) se tuvieron en cuenta tres criterios: 1) La longitud del pin depende del espesor de las placas de aluminio que se pretende soldar por FSW; 2) el hombro, sobre el cual recae el trabajo de generación de calor por la fricción con el material, será diseñado considerando el uso de la herramienta perpendicular y no inclinada 2-4°, con respecto a las placas a soldar; 3) la parte inferior del pin será esférica para evitar formación de falta de penetración.

La mayoría de las herramientas que se fabrican para la soldadura por FSW de aleaciones de aluminio u otros metales, consideran hombros planos o cóncavos, lo que obliga a inclinarla herramienta de 2 a 4° con respecto al plano horizontal de las placas a soldar, para que la herramienta pueda empujar el material plastificado a través de la brecha entre las dos placas; como mencionado en el párrafo anterior, en este caso se implementó el diseño de la herramienta a semejanza de las herramientas para FSW en metales duros, donde el hombro convexo evita la inclinación de la herramienta, permitiendo la realización de la soldadura con la herramienta perpendicular a las placas, facilitando en control de la penetración de la herramienta y evitando la formación de un canal entre las chapas soldadas por cuenta de sobre penetración del talón la herramienta (ver Figura 5).

### 3.2 DISEÑO DE LA PLACA DE APOYO


Para el diseño de la placa de apoyo se tuvo en cuenta que está debe permitir ser fijada a la mesa de la fresadora, sujetar las placas a soldar y poder reparar fácilmente los defectos generados en la mesa por acción de la soldadura. La mesa de apoyo es de gran importancia dentro del desarrollo de este trabajo ya que está permite la sujeción del

	<p style="text-align: center;">INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</p>	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2013-09-16

material de forma adecuada, ya que si la placas no están bien fijadas en la mesa, se podrá producir la separación de las placas durante la soldadura. Generalmente el apoyo sobre el cual se realizan las soldaduras sufre daños a pesar de no existir contacto directo entre el pin y el apoyo, ya que la herramienta empuja el material siendo soldado tanto hacia adelante como hacia el fondo, generando deformación y desgaste del apoyo.

Para evitar la continua reparación de la mesa completa se consideró el diseño de una placa de apoyo que permita la fijación en la mesa de la fresadora, la fijación de las placas a soldar, además de una placa removible, que pueda ser intercambiable y conserve en buen estado la placa de apoyo. Esta placa removible puede ser fabricada de forma tal que evite la adherencia del material plastificado a la placa de apoyo; puede tener la dureza correcta de forma tal que sirva como barrera al material que fluye por la parte inferior del pin, permitiendo la obtención de una junta sin defectos de raíz y con penetración total; finalmente el acabado superficial de esta chapa puede ser tal que la parte posterior de la junta quede con la misma rugosidad, pues debido al empuje de la herramienta, esta región calca las características de la superficie donde la junta fue realizada.

Esta placa removible permite mayor aprovechamiento del área de trabajo, ya que puede ser volteada en caso de desgaste por una de las superficies; igualmente evita la fabricación de una placa de apoyo cada vez que esta se desgastase después de realizar múltiples soldaduras por el proceso de FSW (Cardona *et al*, 2013).


	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2013-09-16

### 3.3 MATERIALES

Los materiales empleados en la fabricación tanto de la herramienta como de la placa de apoyo, fueron seleccionados a partir de un análisis de la literatura, permitiendo seleccionar el material indicado para la aplicación deseada.

El material seleccionado para la fabricación del inserto (hombro y pin) fue el acero de herramientas AISI-SAE H13, el cual presenta alto contenido de elementos de aleación. Este material es utilizado en la fabricación de herramientas para trabajo a alta temperaturas, alcanzando una dureza de 45 HRC cuando se le realiza el tratamiento de temple y revenido, conservando sus propiedades durante su desempeño a temperatura de hasta 550 °C. Entre sus aplicaciones se destacan su uso en la fabricación de mandriles, insertos para dados, moldes para plástico, cuchillas para corte en caliente, punzones y matrices para prensas. El costo de este material se especifica en la Tabla 1.

Para la fabricación del cono se seleccionó el AISI-SAE 4340, que es un acero aleado con Cr y Mo, con 0,5% de carbono. Es un material frecuentemente empleado en piezas sometidas a grandes exigencias de trabajo; este acero es diseñado para aumentar significativamente sus propiedades mecánicas después de aplicar los tratamientos térmicos de temple y revenido; sus principales usos se presentan en la fabricación de cigüeñales, engranajes, ejes, bielas, moldes y piezas de maquinaria en general que estén sometidas a grandes exigencias mecánicas. Para la fabricación del vástago y de la placa removible de la mesa de apoyo para la fresadora, se seleccionó el acero AISI-SAE 1045, el cual es un acero simple al carbono, con 0,45% de carbono. Este acero por sus características soporta esfuerzos mecánicos hasta de 600 MPa, puede ser tratado térmicamente a través del temple y del revenido, por medio del cual forma una capa externa dura, mientras mantiene su interior dúctil. Este material no permite trabajo a alta

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2013-09-16

temperatura, motivo por el cual sus aplicaciones se centran en la fabricación de tornillería, acoples, ejes para motores, pernos, herramientas agrícolas, etc.


Para la fabricación de la placa de apoyo se utilizó el acero AISI-SAE 1020, acero de baja dureza y fácil mecanizado, para uso y aplicaciones de poca exigencia mecánica; su costo es relativamente favorable en comparación con otros aceros, siendo empleado en la fabricación de piezas mecánicas que no requieran tratamientos térmicos. Este material es utilizado en mecanismos expuestos a bajos esfuerzos mecánicos como lo son los piñones para transmisión de cadena de bajo esfuerzo, grapas, tornillería convencional, bridas, etc.

Para verificar el funcionamiento de la herramienta, fueron realizadas pruebas piloto por medio de soldaduras de puntos por fricción-agitación, empleando dos aleaciones de aluminio, la AA6063 y la AA7075. La primera es una aleación Al-Mg utilizada ampliamente en la industria automovilística, pues cuenta con excelente relación peso/resistencia mecánica (190 MPa). Por otro lado, la aleación AA7075 es una aleación de aluminio denominada aeronáutica, pues su resistencia mecánica elevada (572 MPa) es comparable con la de un acero simple al carbono AISI-SAE 1045; además, debido a su bajo peso, su aplicación en la construcción de vehículos aerotransportados es de amplia difusión.

### **3.4 ENSAMBLES DE LAS HERRAMIENTAS Y ENSAYOS DE LA SOLDADURA POR PUNTO**

Para verificar el correcto funcionamiento de las herramientas, estas fueron ensambladas y testadas mediante ensayos previos de puntos de soldadura mediante fricción-agitación. Los puntos de soldadura fueron realizadas en chapas de aluminio AA6063 y AA7075 de 10 mm de espesor.

Fueron empleadas tres velocidades de rotación de 900 y 1200 rpm, con velocidad de penetración de la herramienta de 26 mm/min.

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2013-09-16

## 4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

---

### 4.1 DISEÑO Y FABRICACION DE LAS HERRAMIENTAS

A partir de los resultados de la simulación computacional se obtuvo la distribución de temperatura a través del vástago, lo que permitió selección tres geometrías diferentes: vástago liso, vástago con ranuras y vástago con aletas desplazadas, todas estas se presentan en la Figura 11. A partir de este trabajo se determinó que el mejor comportamiento se logra con un vástago con aletas desplazadas hacia el hombro, con longitud de 170 mm, pues garantizaba una mayor disipación de calor con una longitud del vástago menor; esto último es importante, pues reduce el efecto de torque sobre la herramienta y el husillo de la máquina.

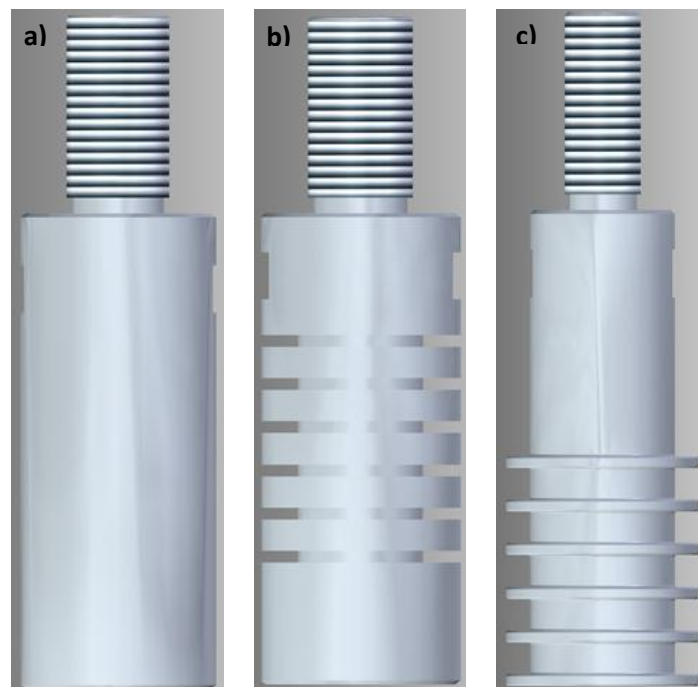



Figura 11. Modelos de vástagos diseñados mediante Solid Edge® ST5: a) liso, b) con ranuras y c) con aletas desplazadas. Fuente propia.

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2013-09-16


Sin embargo, para la fabricación del elemento solamente fueron considerados dos diseños: el vástago liso y el con aletas; el primero como referencia comparativa con el segundo. Las imágenes de ambos vástagos se presentan en la Figura 12, donde, posterior al tratamiento térmico de temple y revenido, las piezas fueron limpiadas por medio de chorro de arena. Los planos finales de esta pieza se presentan en los anexos.



Figura 12. Fotografías de los vástagos fabricados: a) liso y b) con aletas desplazadas. Fuente propia.

Con relación al inserto, fueron realizados varios cálculos con diferentes radios de convexidad del hombro, para así determinar el aumento de la superficie de contacto entre el hombro y la junta a soldar, con pequeñas variaciones en la profundidad de la herramienta, como se presenta en la Figura 13, donde la región en rojo corresponde al ancho de la superficie de contacto.



 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2013-09-16

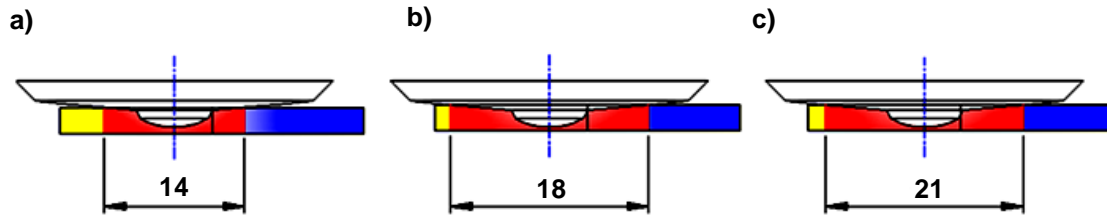



Figura 13. Esquema del efecto del radio del hombro en la penetración, para un radio de convexidad del hombro de 280 mm y penetración de: a) 0,2 mm, b) 0,3 mm y c) 0,4 mm, los valores que se muestran en la parte inferior son el equivalente a la superficie de contacto. Fuente Propia.

La Tabla 3 presenta los resultados del cálculo del cambio en la superficie de contacto con la variación de la convexidad y la penetración de la herramienta.

Tabla 3. Determinación del radio de convexidad adecuado para la herramienta de FSW.

Radio de convexidad(mm)	Penetración del hombro(mm)	Superficies de contacto(mm)
220	0,4	17,2
	0,3	16,2
	0,2	13,2
280	0,4	21,11
	0,3	18,3
	0,2	14,9
340	0,4	23,2
	0,3	20,2
	0,2	16,4
400	0,4	25,3
	0,3	22,8
	0,2	19,8

En este cálculo lo importante es determinar el radio de convexidad de la herramienta, para una superficie de contacto entre 20 y 25 mm, la cual es recomendada para soldadura de juntas de aluminio de chapas entre 2 y 10 mm de espesor. La penetración del hombro en el material debe permanecer alrededor de 0,3 mm, pues si se supera este valor se

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2013-09-16

obtiene una pérdida significativa del espesor en la región soldada. Por lo tanto, los cálculos más favorables, tanto de superficie de contacto como de penetración del hombro sobre la junta, se obtienen para un radio de 400 mm, ya que para profundidad de penetración de 0,2 a 0,4 mm la variación en superficie de contacto se mantiene en los rangos sugeridos.

Ahora, para diseñar el radio del pin, se tomó como punto de partida un redondeo del 75%, recomendado por Mishra & Mahoney (2007); pero este porcentaje sobre pasa el radio de curvatura del diámetro del pin, previamente simulado, se realizó una reducción del 75 al 60%, con el cual se obtuvo un radio de curvatura de 3,6 mm, el que no sobrepasa el diámetro inferior del pino diseñado. La geometría final del pin se presenta en la Figura 14.

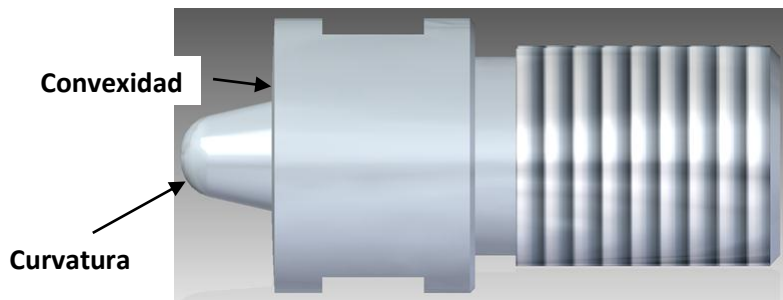


Figura 14. Modelo del inserto, diseñado mediante Solid Edge® ST5. Fuente propia.

El inserto diseñado fue fabricado de acuerdo con las especificaciones empleando el acero para herramientas H13. La Figura 15 muestra el inserto después del tratamiento térmico de temple y revenido, seguido de su limpieza mediante chorro de arena.

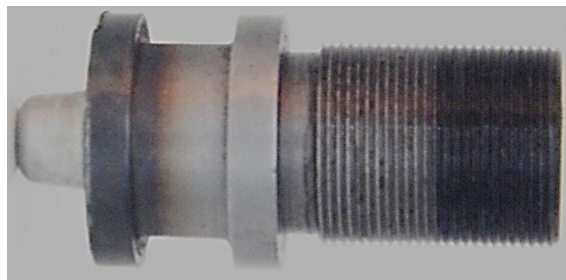



Figura 15. Fotografía del Inserto después de los tratamientos térmicos y limpieza. Fuente propia.

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2013-09-16

El cono morse fue diseñado a partir de las características del husillo de fresadora Jafo modelo FWD-32J, pues debe encajar sin ninguna dificultad. Debe tenerse en cuenta que este elemento debe mantenerse a temperatura ambiente, para evitar una traba permanente en el husillo. La Figura 16 corresponde a la representación virtual y la pieza fabricada.




Figura 16. Cono morse: a) Modelo diseñado mediante Solid Edge® ST5 y b) fotografía del cono fabricado. Fuente propia.

Este elemento fue probado tanto en la fresadora como con el inserto y los vástagos fabricados; los detalles del ensamble serán descritos a continuación.

#### **4.2 ENSAMBLE DE LOS ELEMENTOS Y PRUEBA EN LA FRESADORA**

El ensamble y montaje de la herramienta se realizó en una fresadora marca Jafo, con la cual cuenta la institución y en la que se llevaron a cabo los primeros ensayos de soldadura, para observar el comportamiento de la herramienta durante dicho proceso. El montaje se puede observar en la Figura 17 y la Figura 18.

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2013-09-16

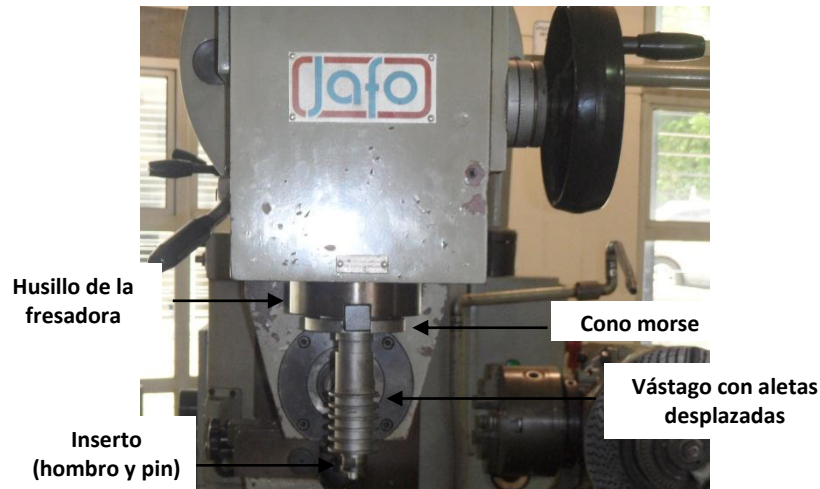


Figura 17. Montaje de la herramienta con vástago de aletas desplazadas en la fresadora Jafo. Fuente propia.

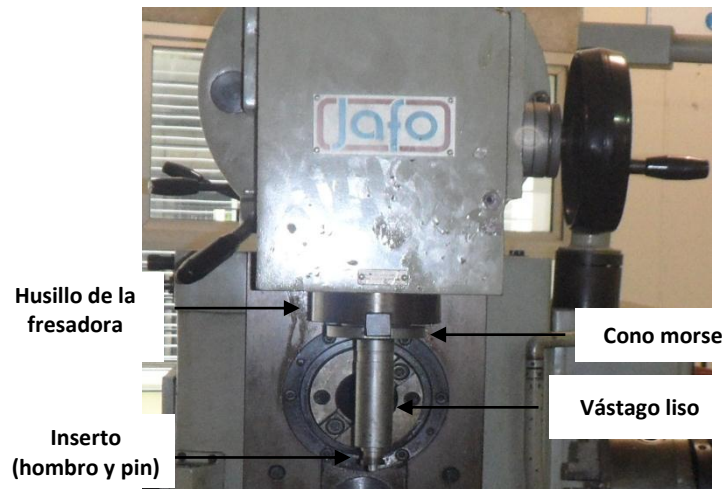



Figura 18. Montaje de la herramienta con vástago de liso en la fresadora Jafo. Fuente propia.

Posterior a su montaje se procedió hacer los primeros ensayos de comportamiento de la herramienta, realizando soldadura por punto con diferentes velocidades de rotación, en las aleaciones de aluminio AA6063 y AA7075 (Figura 19). Durante el procedimiento las herramientas respondieron sin dificultades, inclusive en el caso del AA7075, el cual por ser más resistente es más difícil de deformar.

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2013-09-16

Las diferencias más significativas se presentaron en el grado de fluidez del metal plastificado, que aumenta con el aumento en la velocidad de rotación. El cambio en la fluidez del metal se verifica por medio de la rebaba formada durante la soldadura.

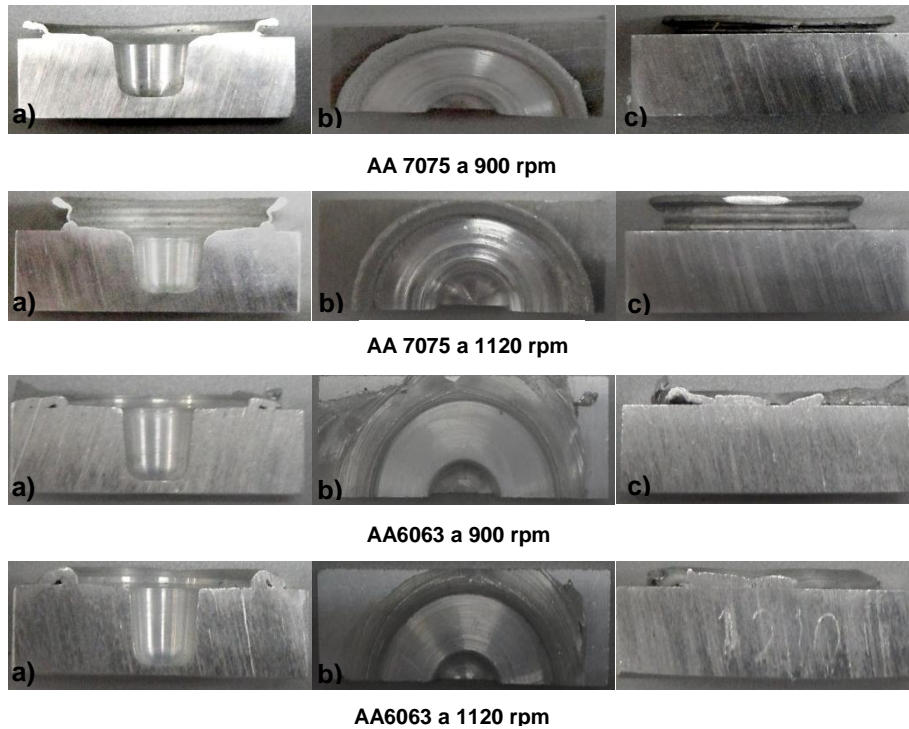



Figura 19. Puntos de soldadura de AA7075a 900 y 1120 rpm y AA6063 a 900 y 1120 rpm, a) vista transversal, b) vista superior y c) vista lateral. Fuente propia.

Más importante que la evaluación de la calidad de los puntos de soldaduras es verificar el comportamiento adecuado de la herramienta, la cual después de la soldadura permanece fría en el cono y vástago, a pesar de alcanzar una temperatura alta (aún no definida) en el inserto. La herramienta continúa siendo modular, pues fue posible desarmarla después de la soldadura, a pesar que el ensamble vástago-pin presentó mayor resistencia. Ahora es posible realizar ensayos de soldadura más controlados, así como fabricar otros insertos para evaluar parámetros como la fluidez del metal plastificado, la penetración de la herramienta en la zona soldada, la temperatura máxima alcanzada, etc.

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2013-09-16

#### 4.3 DISEÑO DE LA PLACA DE APOYO Y PLACA REMOVIBLE

La placa de apoyo y la placa removible para el desarrollo del proceso, fue diseñado con las dimensiones de la máquina fresadora sobre la cual va ir puesta, y con las dimensiones de longitud de las placas que se procederán a soldar en ella. El modelo virtual de la placa de apoyo se presenta en la Figura 20.

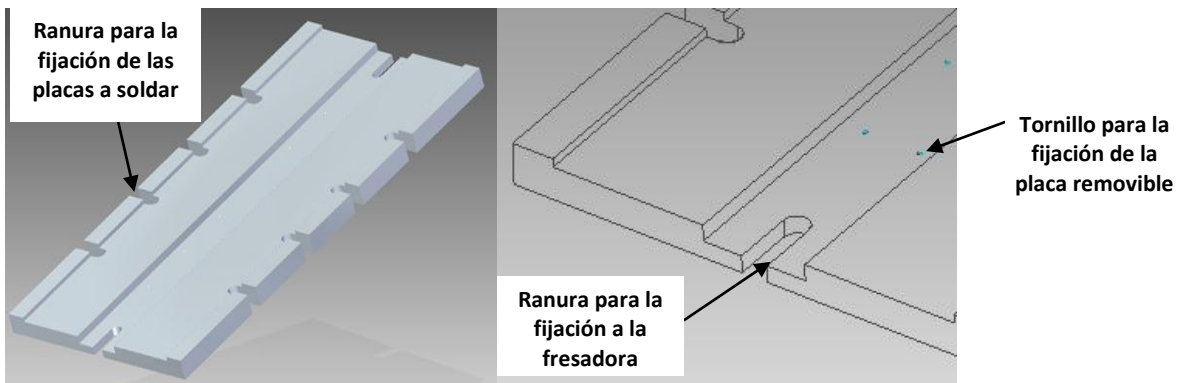


Figura 20. Placa de apoyo para la soldadura y protección de la fresadora diseñados mediante Solid Edge® ST5. Fuente propia.

En la Figura 21 se observa como la sujeción de la placa removible a la placa de apoyo se lleva a cabo por medio de tornillos con cabeza plana cónica, para evitar que sobresalgan de la placa, garantizando el apoyo completo de las placas a soldar en la placa de apoyo.

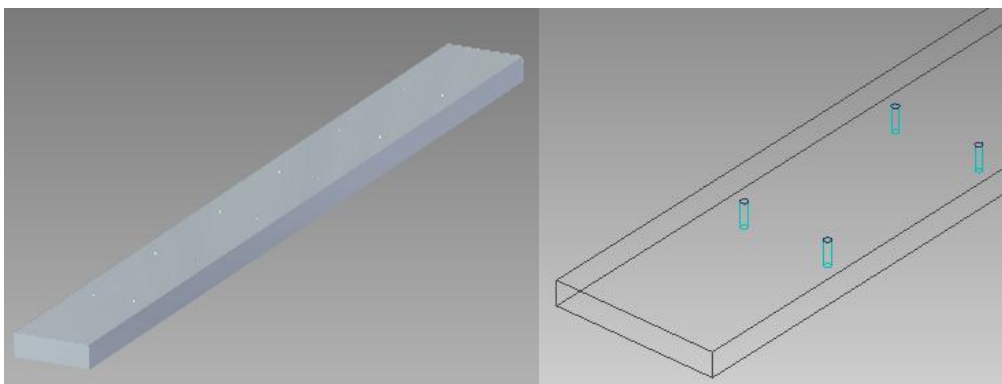



Figura 21. Placa removible diseñado mediante Solid Edge® ST5. Fuente propia.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2013-09-16

La Figura 22 presenta el ensamble de todos los elementos de la placa de apoyo, montaje realizado empleando el software Solid Edge® ST5. Todos los planos tanto de la placa de apoyo como de las herramientas son presentados en los anexos.

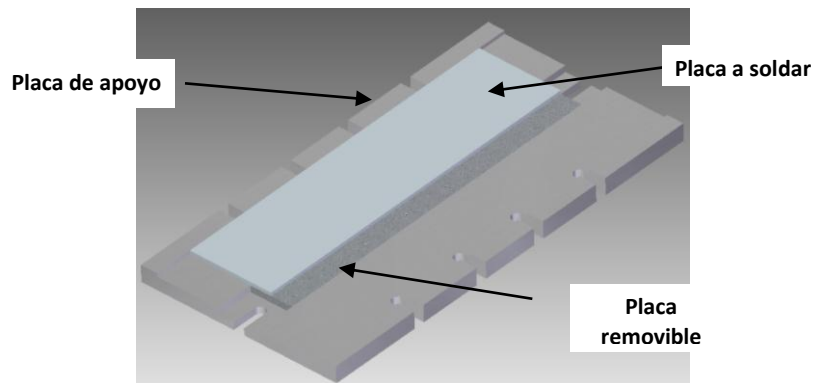



Figura 22. Ensamble de la placa removible sobre la placa de apoyo; placas a soldar. Fuente propia.

En el caso de la placa removible, esta tiene dos ventajas: 1) la placa puede ser usada por ambos lados y 2) el ancho de la placa permite que la línea de la junta, que es la zona que el pin recorre, puede ser desplazada de un lado a otro, evitando aquellas regiones que sufran desgaste. Estas dos medidas permiten un mayor uso de este elemento, el cual posteriormente puede ser remplazado.

Este sistema permite el posicionamiento de placas para soldar juntas a tope y sobrepuestas; además permitiría fijar piezas para la realización de procesamiento de superficies por fricción-agitación (*Friction Stir Processing, FSP*).

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2013-09-16


## 5 CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO

---

### 5.1 CONCLUSIONES

- Fue diseñada y construida una herramienta modular para la realización de juntas soldadas en aleaciones de aluminio, por medio del proceso de soldadura por fricción-agitación.
- Para la fabricación de una herramienta modular, fueron diseñados tres elementos independientes: un cono morse, dos vástagos y un inserto. Estos elementos fueron fabricados empleando tres aceros diferentes: un AISI-SAE 4340, un AISI-SAE 1045 y un acero para herramientas H13.
- Fueron presentados diferentes parámetros para el diseño del hombro y el pin de la herramienta, con los cuales se pretende la realización de juntas soldadas sin la necesidad de inclinar las herramientas, con respecto a la superficie de las placas a soldar.
- Se fabricaron dos tipos de vástagos, como elementos disipadores de calor, un vástago liso y otro con aletas desplazadas hacia el inserto. Los elementos fueron ensamblados y ensayados en la fresadora marca Jafo, donde serán realizadas las soldaduras.
- Fueron realizadas soldaduras de punto por fricción-agitación, para verificar el comportamiento adecuado de las herramientas, las cuales no presentaron dificultades al realizar puntos de soldadura en las aleaciones AA6063 y AA7075.
- Fue diseñada una placa de apoyo con platina removible, para el posicionamiento y fijación de las chapas a soldar, así como para la protección de la mesa de la fresadora.



	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2013-09-16

## 5.2 RECOMENDACIONES


El semillero SeCADD-ProM perteneciente al grupo de investigación en Materiales Avanzados y Energía (MATyER), viene trabajando en la construcción de modelos virtuales de herramientas, con la posterior simulación virtual de su comportamiento térmico. A partir de este trabajo es posible la realización de medidas de temperatura utilizando las herramientas reales para verificar los resultados alcanzados por medio de los modelos virtuales. El hecho de contar con dos tipos de vástago diferentes, permite cotejar el comportamiento del vástago liso con respecto al vástago con aletas, además de refinar el modelo virtual usando como referencia el sistema con vástago liso.

Construir la placa de apoyo permitiría iniciar de forma inmediata la realización de uniones soldadas por punto, seguido de juntas soldadas a tope y sobrepuestas. Finalmente es posible la realización de procesamiento de superficies por medio de ficción-agitación, todo esto en aleaciones de aluminio.

## 5.3 TRABAJOS FUTUROS

Es posible la construcción de un nuevo cono morse que permita fijar la herramienta del centro de mecanizado Leadwell V-40i de 5 ejes, adquirido en el marco del proyecto Parque i. Con el uso del sistema V40i, será posible la realización de juntas no lineales, un procesamiento de superficies más refinado y la unión de juntas no planas.

La fabricación de insertos diferentes, posibilita la realización de junta soldadas en chapas de espesores diferentes a los empleados en el proyecto actual.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2013-09-16

## REFERENCIAS

---

AbbasiGharacheh, M., Kokabi, A. H., Daneshi, G. H., Shalchi, B.&Sarraf, R. (2006). The influence of the ratio of rotational speed/traverse speed( $\omega/v$ ) on mechanical properties of AZ31 friction stir welds. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 46(15), 1983-1987.

Akinlabi, E. T., Levy, A. C.&Akinlabi, S. A. (2013). Design of a Support System for a Re-configured Milling Machine to Achieve Friction Stir Welds. In *Proceedings of the World Congress on Engineering (Vol. 1)*.


Aperador Chaparro, W., Rodríguez Zamora, G.& Franco, F. (2012). Comportamiento de la corrosión de aleaciones de magnesio AZ31-B en ambiente marino, modificadas por el proceso de fricción-agitación. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, 20(1), 119-125.

Baastidas Cordoba, G. (2013). Modelado numérico del proceso de soldadura por fricción agitación mediante el uso de un programa de elementos finitos.

Burgos, A., Svoboda, H. & Surian E., (2010), Soldadura por fricción agitación (FSW) de aluminio, segundo congreso Argentino de ingeniería mecánica, san Juan, Argentina.

Campanelli, L. C., de Alcântara, N. G.& dos Santos, J. F. (2011). Soldagem por Ponto no Estado Sólido de Ligas Leves.

Capelari, T. V.& Mazzaferro, J. A. E. (2006). Avaliação da Geometria de Ferramenta e Parâmetros do Processo FSW na Soldagem da Liga de Alumínio AA 5052 (Doctoral dissertation, Dissertação de Mestrado-PPGEM, UFRGS, Porto Alegre).

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2013-09-16

Cardenas, H., Franco, F., Ávila, J. & Jaramillo, H. (2011). Evaluación de la resistencia a la tensión de uniones soldadas por fricción agitación de la aleación de aluminio 5052-H38. *El Hombre y la Máquina*, (36), 77-83.


Cardona, J. D., Villa, D. S., Torres, E. A., Arbeláez, J. J. & Hincapié, D. A. (2013). Diseño y fabricación de herramientas y placa de apoyo para soldadura por fricción-agitación de aleaciones de aluminio. I Encuentro Tecnología e ingeniería & IX Simposio Internacional en Energías, octubre 31 a noviembre 1, Medellín, Colombia.

Carrasco, J. C., Berdugo, I., Ospina, R. & Unfried, J. (2014). Optimización del diseño y fabricación de herramienta con pin cónico roscado para soldadura por fricción-agitación. *Visión Electrónica: algo más que un estado sólido*, 7(2), 135-144.

Carrasco, J. C., Berdugo, I., Ospina, R. & Unfried, J. (2014). Optimización del diseño y fabricación de herramienta con pin cónico roscado para soldadura por fricción-agitación. *Visión Electrónica: algo más que un estado sólido*, 7(2), 135-144.

Chaparro, W. A., Zamora, G. R. & Arenas, F. F. (2014). Estimación de la corrosión intergranular en la aleación de magnesio AZ31B soldada por fricción-agitación. *Revista de Ingeniería Universidad de los Andes*, (39), 39-44.

Collier, M., Steel, R., Nelson, T. W., Sorensen, C. & Packer, S. (2003, July). Grade development of polycrystalline cubic boron nitride for friction stir processing of ferrous alloys. In *Materials Science Forum* (Vol. 426, pp. 3011-3016).

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2013-09-16

Correa, S. J. (2011). Modelado y simulación dinámica de vehículos de competición.

Creaforma3D. (29 de junio de 2014). FrictionStirwelding. Recuperado de <http://www.creaform3d.com/sites/default/files/styles/gallery-block-view-featured/public/assets/services/galleries/3d-engineering/numerical-simulation/800x600/numerical-simulation-01.jpg>.

De Saracibar, C. A., Chiumenti, M., Cervera, M., Dialami, N., Santiago, D. & Lombera, G. (2012). On the Computational Modeling and Numerical Simulation of FSW Processes. International Center for Numerical Methods in Engineering.


Elangovan, K. & Balasubramanian, V. (2008). Influences of tool pin profile and tool shoulder diameter on the formation of friction stir processing zone in AA6061 aluminium alloy. *Materials & Design*, 29(2), 362-373.

Elangovan, K. & Balasubramanian, V. (2008). Influences of tool pin profile and welding speed on the formation of friction stir processing zone in AA2219 aluminium alloy. *Journal of materials processing technology*, 200(1), 163-175.

Falla, R., Quintana, K. J., Franco, F. & de Sánchez, N. A. Propiedades mecánicas de soldadura por fricción agitación de punto en aleación de aluminio AA6063-T5.

Fioravanti, A. S. (2008). Soldagem por FSW de ligas de alumínio Alcalad AA2024-T3 e AA7075-T6.

Franco, F., Sánchez, H., Betancourt, D. & Murillo, O. (2009). Soldadura por Fricción-Agitación de aleaciones ligeras—Una alternativa a nuestro alcance. *Suplemento de la Revista latinoamericana de Metalurgia y Materiales*. S, 1, 1369-1375.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2013-09-16

Gibson, B. T., Lammlein, D. H., Prater, T. J., Longhurst, W. R., Cox, C. D., Ballun, M. C. & Strauss, A. M. (2013). Friction stir welding: Process, automation, and control. Journal of Manufacturing Processes.

Hirata, T., Oguri, T., Hagino, H., Tanaka, T., Chung, S. W., Takigawa, Y. & Higashi, K. (2007). Influence of friction stir welding parameters on grain size and formability in 5083 aluminum alloy. Materials Science and Engineering: A, 456(1), 344-349.


Kim, Y. G., Fujii, H., Tsumura, T., Komazaki, T. & Nakata, K. (2006). Three defect types in friction stir welding of aluminum die casting alloy. Materials Science and Engineering: A, 415(1), 250-254.

Liu, H. J., Feng, J. C., Fujii, H. & Nogi, K. (2005). Wear characteristics of a WC-Co tool in friction stir welding of AC4A+ 30vol% SiCp composite. International journal of machine tools and manufacture, 45(14), 1635-1639.

Megastir. (junio 28 de 2014). Frictionstirwelding. Recuperado de <http://www.megastir.com/products/tools/cmm.aspx>.

Mishra, R. S. & Mahoney, M. W. (Eds.). (2007). Friction stir welding and processing. ASM International.

Nakai, M. & Eto, T. (2000). New aspect of development of high strength aluminum alloys for aerospace applications. Materials Science and Engineering: A, 285(1), 62-68.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2013-09-16

North, T. H., Bendzsak, G. J., & Smith, C. (2000, June). Material properties relevant to 3-D FSW modeling. In Friction Stir Welding, Proceedings of the 2nd International Conference.

Padmanaban, G. & Balasubramanian, V. (2009). Selection of FSW tool pin profile, shoulder diameter and material for joining AZ31B magnesium alloy – An experimental approach. *Materials & Design*, 30(7), 2647-2656.


Pereyra, S., Santiago, D., Lombera, G., Urquiza, S. & De Vedia, L. (2007). Modelado computacional del proceso “Friction Stir Welding” en aceros inoxidable austeníticos. *Mecánica Computacional*, 25, 1324-1334.

Quintana, K., Falla, R., Franco, F. & de Sánchez, N. A. (2012). Evaluación de la soldadura por fricción-agitación de punto de la aleación de aluminio AA 6063-T5. *El Hombre y la Máquina*, (39), 6-11.

Renck, T. S. (2005). Estudo das propriedades mecânicas de juntas soldadas em alta velocidade pelo processo de fricção e mistura mecânica, *Dissertação de Mestrado, PPGEM, UFRGS, Porto Alegre*.

Santiago, D., Urquiza, S., Lombera, G. & Vedia, L. D. (2009). 3D modeling of material flow and temperature in Friction Stir Welding. *Soldagem & Inspeção*, 14(3), 248-256.

Santos, T. F. A., Torres, E. A., Hermengildo, T. F.C., Ramirez, A. J. (2014), Development of ceramic backing for friction stir welding and processing, *Soldagem & Inspecao*, vol. 19, no 2, pag.104-113.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2013-09-16

Scialpi, A., De Filippis, L. A. C. & Cavaliere, P. (2007). Influence of shoulder geometry on microstructure and mechanical properties of friction stir welded 6082 aluminium alloy. *Materials & design*, 28(4), 1124-1129.

Smith, C. B., Zinn, M. R., Shultz, E. F., Cole, E. G., Ferrier, N. J. & Pfefferkorn, F. E. (2010). Effect of compliance and travel angle on friction stir welding with gaps. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 132(4), 041010.


Steuwer, A., Barnes, S. J., Altenkirch, J., Johnson, R. & Withers, P. J. (2012). Friction Stir Welding of HSLA-65 Steel: Part II. The Influence of Weld Speed and Tool Material on the Residual Stress Distribution and Tool Wear. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 43(7), 2356-2365.

Sutton, M. A., Reynolds, A. P., Yan, J., Yang, B., & Yuan, N. (2006). Microstructure and mixed mode I/II fracture of AA2524-T351 base material and friction stir welds. *Engineering fracture mechanics*, 73(4), 391-407.

Thomas, W. M., Nicholas, E. D., Needhan, J. C., Murch, M. G., Temple-Smith, P., & Dawes, C. J. (1991). International patent application PCT/GB92/02203 and GB patent application 9125978.8. UK Patent Office, London, 6.

Thompson, B. T. & Babu, S. S. (2010). Tool degradation characterization in the friction stir welding of hard metals (Doctoral dissertation, Ohio State University).

Threadgill, P.L. Friction Stir Welding – the state of the art. The Welding Institute report 678/1999. My 1999.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2013-09-16

Tozaki, Y., Uematsu, Y. & Tokaji, K. (2007). Effect of tool geometry on microstructure and static strength in friction stir spot welded aluminium alloys. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 47(15), 2230-2236.

Ulyse, P. (2002). Three-dimensional modeling of the friction stir-welding process. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 42(14), 1549-1557.

Upadhyay, P. & Reynolds, A. P. (2012). Effects of forge axis force and backing plate thermal diffusivity on FSW of AA6056. *Materials Science and Engineering: A*, 558, 394-402.

Valdivé, R., Osorio, J. C. & Valdivé, R. (2012). Simulación de la temperatura en el proceso "Friction Stir welding" (FSW) de aluminio AA 1100-0. *Publicaciones en Ciencias y Tecnología*, 6(2), 61-70.


Villa, D. S., Cardona, J. D., Torres, E. A., Arbeláez, J. J., Hincapié, D. A. (2013). Diseño de herramientas para soldadura por fricción usando el módulo CFX de Ansys® 14.5. IX Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica, Noviembre 11-14, La Plata, Argentina.

Villa, D. S., Torres, E. A., Arbeláez, J. J., Hincapié, D. A. (2013). Diseño de herramientas para soldadura por fricción usando el módulo CFX De Ansys® 14.5. *Proceeding IX Congreso Colombiano de Métodos Numéricos: Simulación en Ciencias y Aplicaciones Industriales IX CCMN 2013*, Agosto. 21-23, 2013, UAO Cali, Colombia.

Wikipedia. (junio 28 de 2014). Frictionstirwelding. Recuperado de [http://en.wikipedia.org/wiki/File:Fsw\\_periaate\\_poikkileikkaus\\_pit\\_paine.png](http://en.wikipedia.org/wiki/File:Fsw_periaate_poikkileikkaus_pit_paine.png).

Zapata Sánchez, J. C. (2013). Evaluación de los esfuerzos residuales en juntas de aluminio unidas mediante el proceso de soldadura por fricción agitación (Doctoral dissertation, Universidad Nacional de Colombia, Medellín).




 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2013-09-16

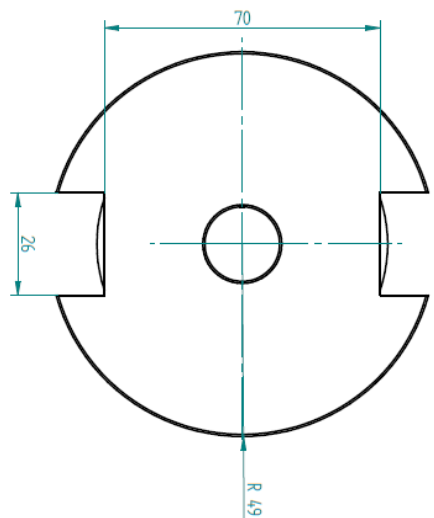
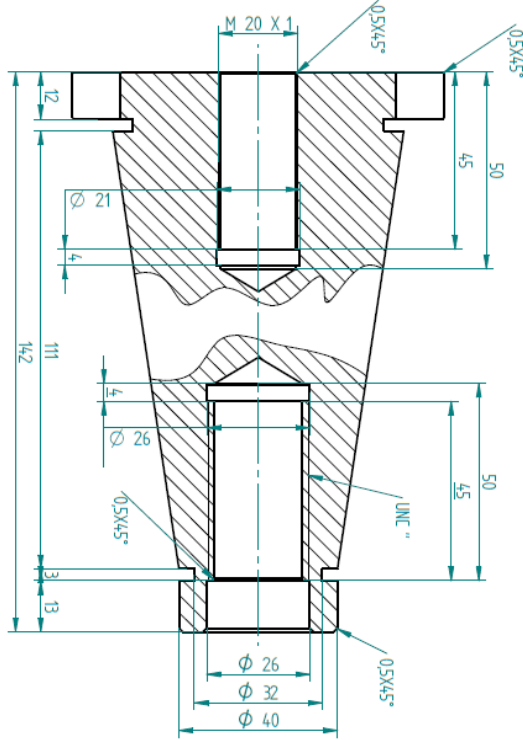
## ANEXOS


---


1. Plano del cono morse.
2. Plano del inserto.
3. Plano del vástago liso.
4. Plano del vástago con ranuras.
5. Plano del vástago con aletas.
6. Plano de la placa de apoyo.
7. Plano de la placa removible.

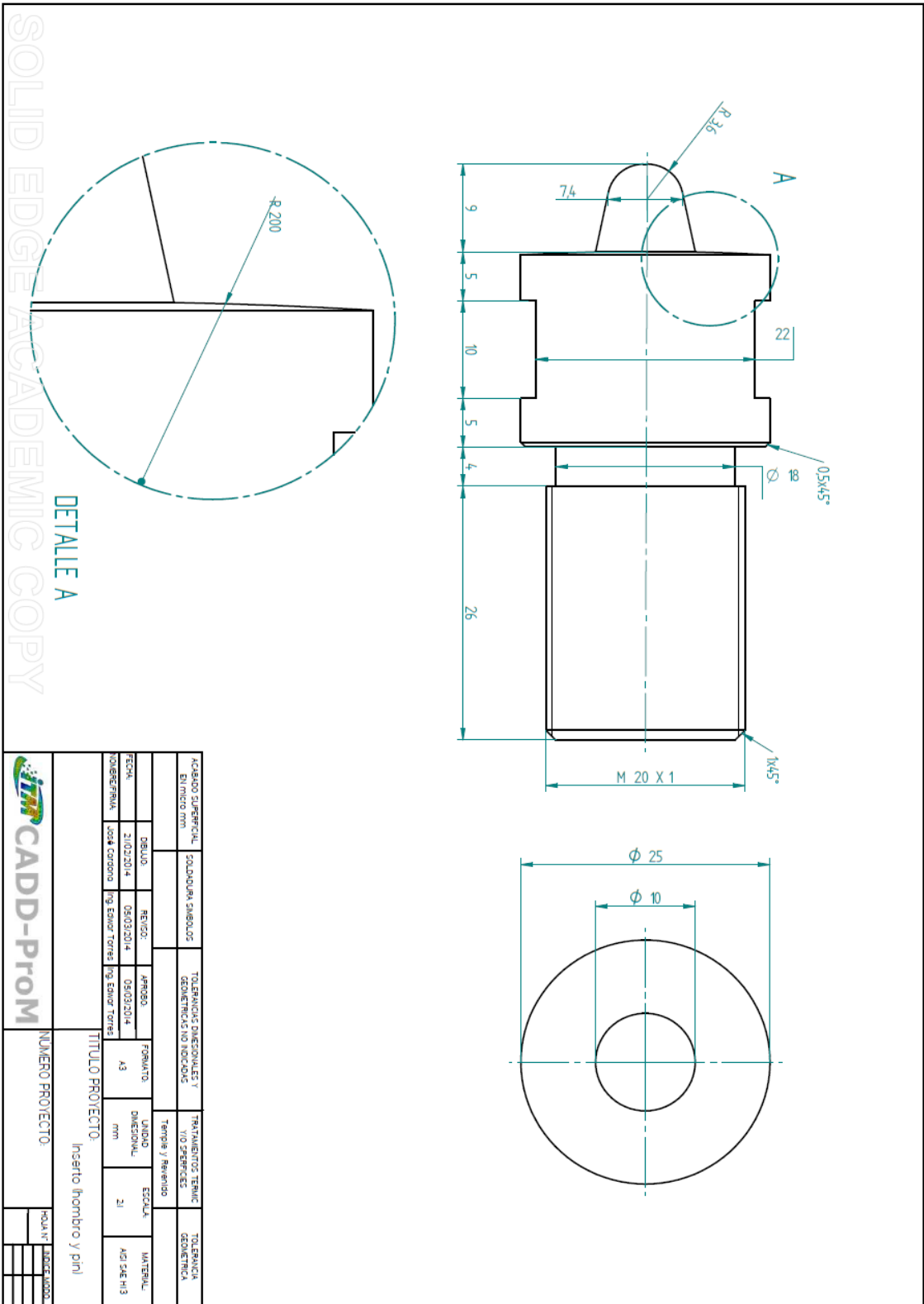
 Institución Universitaria	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2013-09-16

SOLID EDGE ACADEMIC COPY



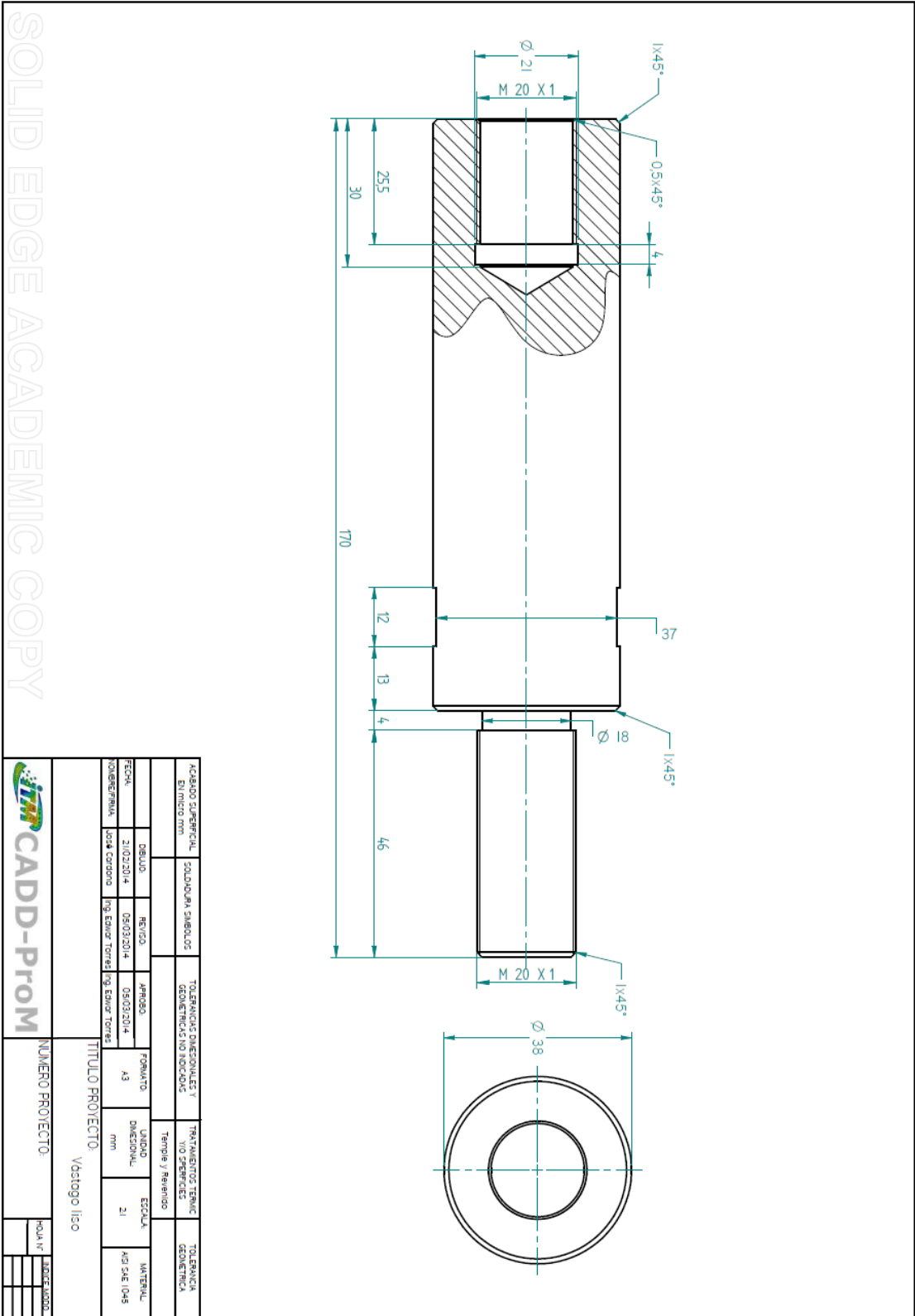
ACABADO SUPERFICIAL	SOLDADURA	SINGULOS	TOLERANCIAS DIMENSIONALES Y GEOMETRICAS NO INDICADAS	TRATAMIENTOS TERMICOS Y/O SERVICIOS	TOLERANCIA GEOMETRICA
DIAMETRO mm					
DEBILLO	REVICOS	APROBADO	Tamaño y Revisión		
FECHA: 21/02/2014	05/03/2014	05/03/2014	FORMATO: A3	UNIDAD DIMENSIONAL: mm	ESCALA: 2:1
CONSEJERIA: José Coronado	Ing. Esmar Torres	Ing. Esmar Torres			MATERIAL: AISI 304 - 316
TITULO PROYECTO: Como Morse			NUMERO PROYECTO:		
 <b>CADD-PROM</b>			HOJA N°: _____ TOTAL: _____		

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2013-09-16




ACABADO SUPERFICIAL	SOLIDIFIED SYMBOLS	TOLERANCIAS DIMENSIONALES	TOLERANCIAS DIMENSIONALES Y GEOMETRICAS NO INDICADAS		TEMPEROS Y REVISIONES	TOLERANCIAS DE ACABADO SUPERFICIAL
ESTILO	REVISOR	APROBADO	FORMATO	UNIDAD DIMENSIONAL	ESCALA	MATERIAL
FECHA	21/02/2014	09/03/2014	A3	mm	2:1	ALU-SI 6061 T6
NUMEROFOLIA	José Córdoba	Ing. Edmar Torres	Ing. Edmar Torres	Ing. Edmar Torres		
TITULO PROYECTO:			Inserto (hombro y pin)			
NUMERO PROYECTO:						
HOLA N°			AUTORIZACION			

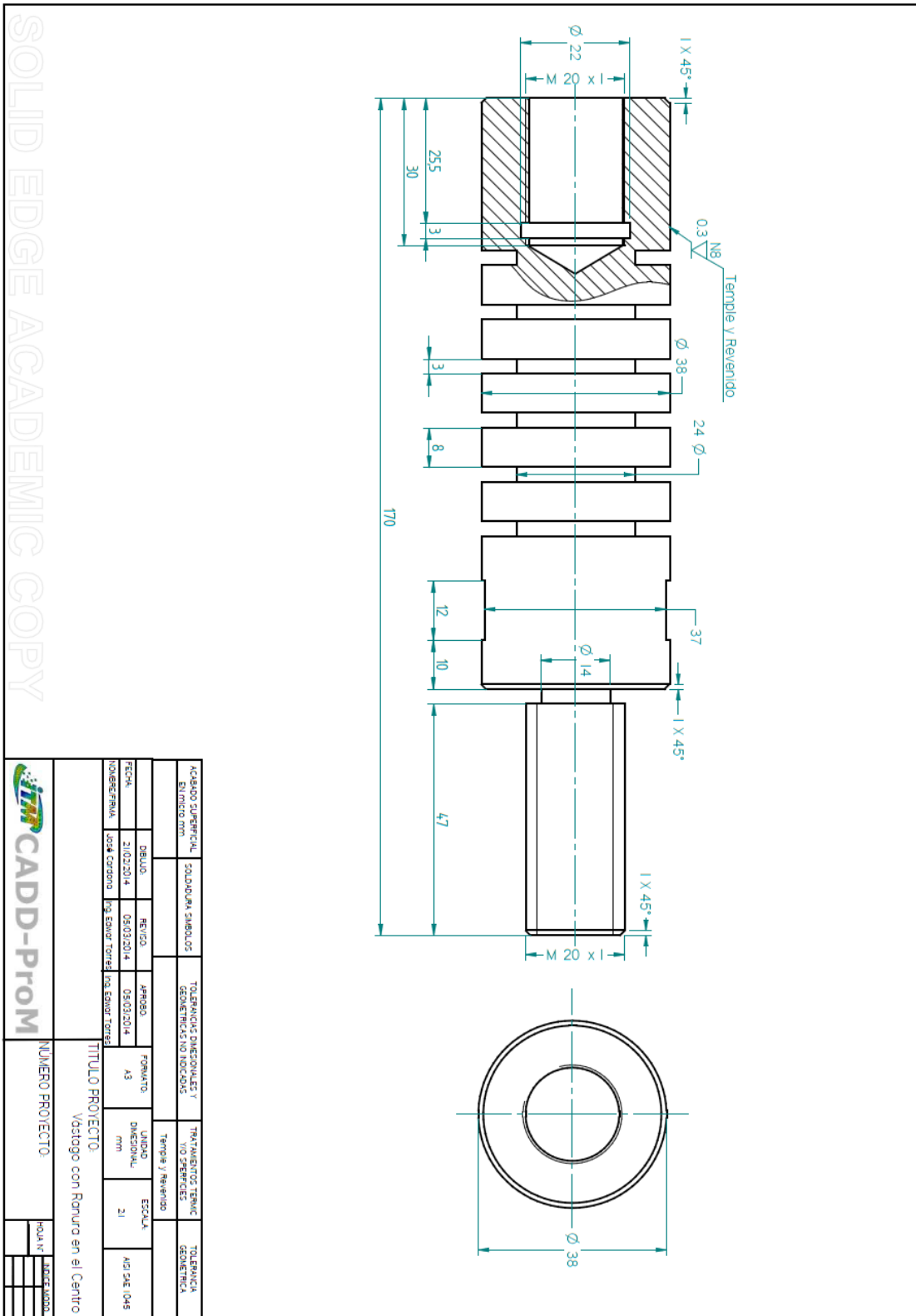
ITM CADD-PROM



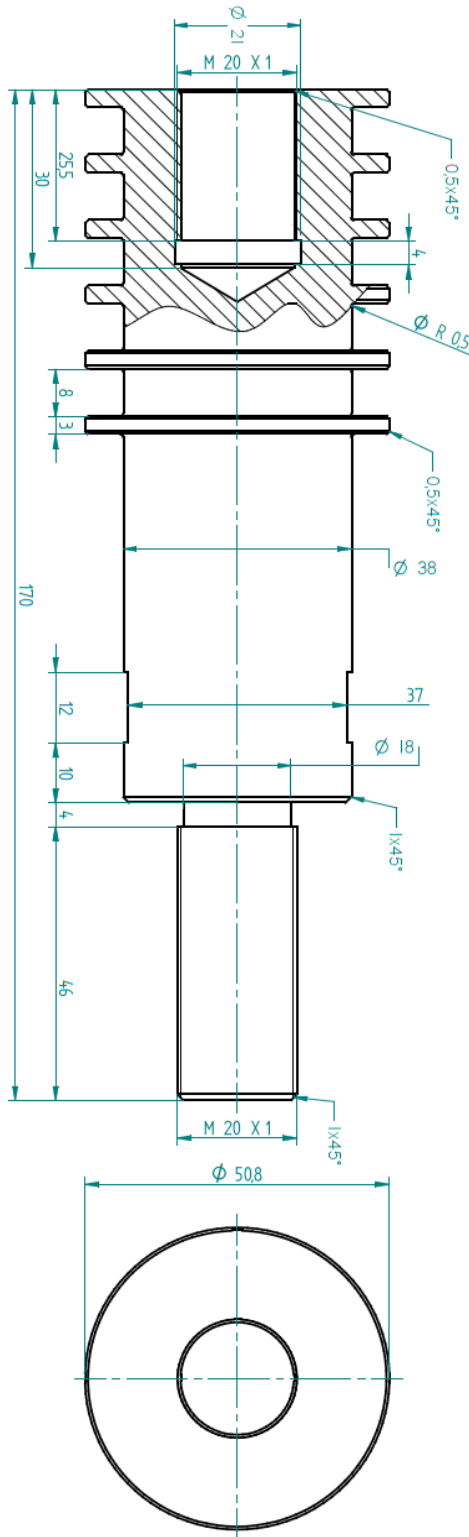
SOLID EDGE ACADEMIC COPY

ACABADO SUPERFICIAL En micro mm	SOLIDWORK, SIMULOC	TOLERANCIAS DIMENSIONALES Y GEOMETRICAS NO INDICADAS	TRATAMIENTOS TERMIC TIP D PERFILES	TOLERANCIAS GEOMETRICAS
DETALDO	REVISOR	APROBADO	TEMPER Y RELEVANTO	
FECHA	21/02/2014	08/03/2014	08/03/2014	
MODELADOR	José Coronado	Ing. Edmar Torres	Ing. Edmar Torres	
TITULO PROYECTO Vástago liso				
NUMERO PROYECTO				
HOLLA V				
LADO DORSO				

 Institución Universitaria	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	<b>Código</b>	FDE 089
		<b>Versión</b>	01
		<b>Fecha</b>	2013-09-16




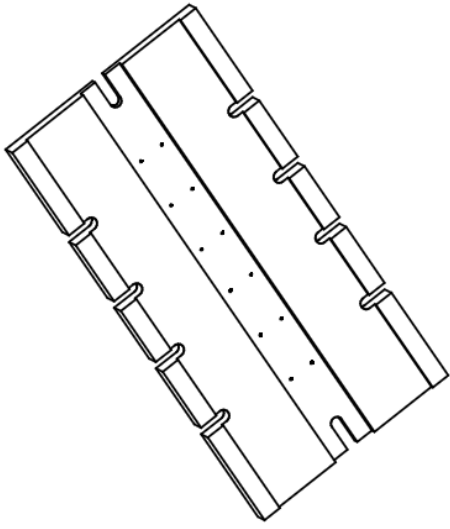
SOLID EDGE ACADEMIC COPY

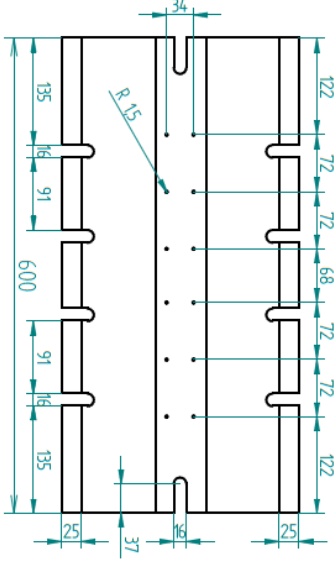
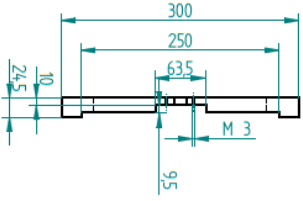


KIASIAO CASPERFILI	SOLDADURA SINBOLOS	TOLERANCIAS DIMENSIONALES Y GEOMETRICAS INDICADAS	TRATAMIENTOS TERMICOS Y PRECEDENTES	TOLERANCIAS GEOMETRICAS
ESCALA	2:10:2014	05:03:2014	05:03:2014	A3
UNIVERSITARIA	José Córdoba	Ing. Edwin Torres	Ing. Edwin Torres	21
TITULO PROYECTO: Vástago con Aletas desplazadas				
NUMERO PROYECTO:				
HOLA N°				
AUTORIZADO				


ITM CADD-PROM

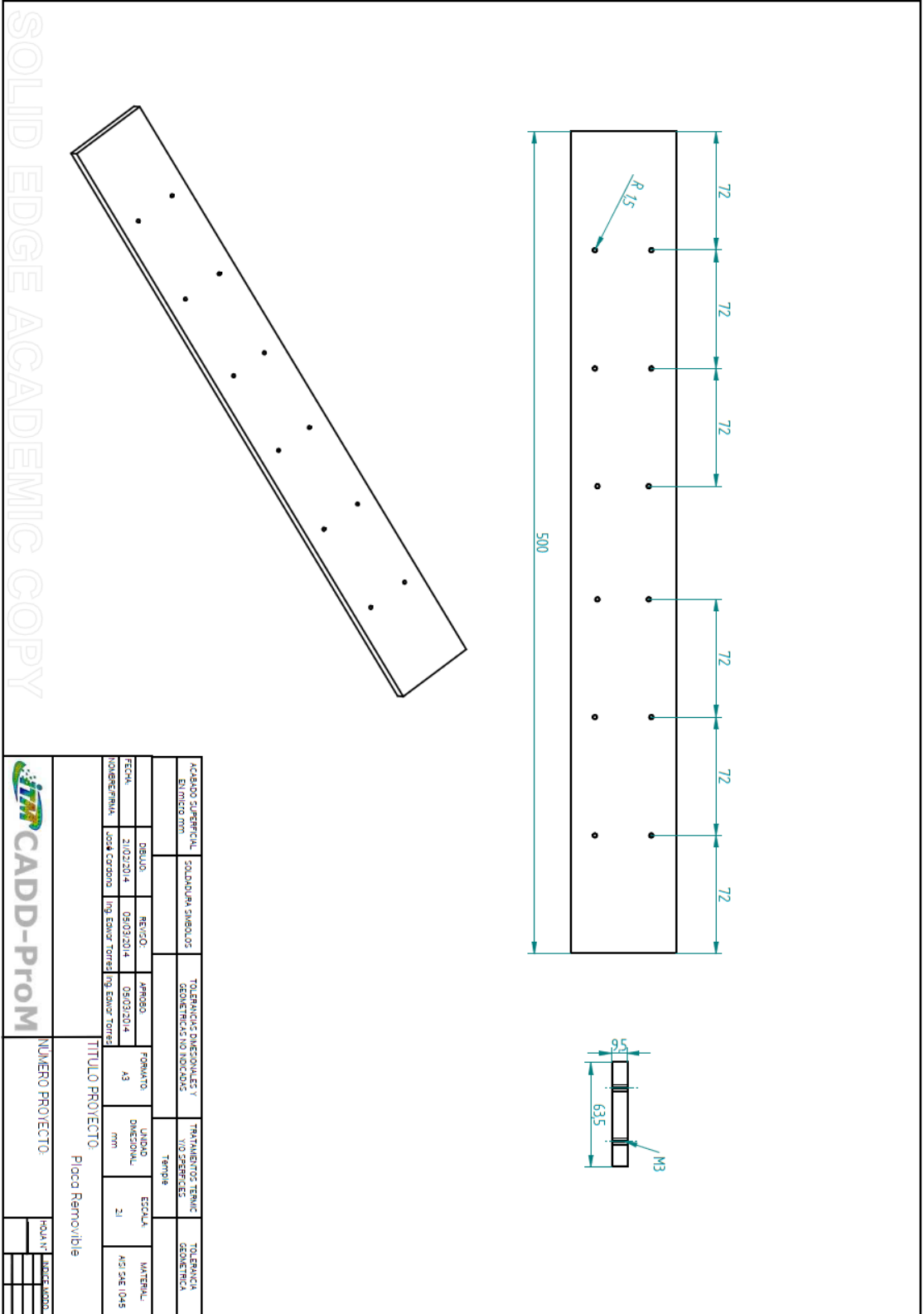
 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2013-09-16







SOLID EDGE ACADEMIC COPY

ACABADO SUPERFICIAL	SOLUCIONA SABLADOS	TOLERANCIAS DIMENSIONALES Y GEOMETRICAS	TRATAMIENTOS TERMICOS Y SUPERFICIALES	TOLERANCIAS DIMENSIONALES Y GEOMETRICAS
NUMERO	MM			
DEBIDO	REVISO	APROBADO	FORMADO	UNIDAD DIMENSIONAL
21/02/2014	05/03/2014	05/03/2014	A3	mm
NOMBRE/FIRMAS: José Coronado / Ing. Edmar Torres / Ing. Edmar Torres				
TITULO PROYECTO: Placa de Apoyo				
NUMERO PROYECTO:				
				
HOJA N°:				





	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2013-09-16

FIRMA ESTUDIANTES \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

FIRMA ASESOR \_\_\_\_\_

FECHA ENTREGA: \_\_\_\_\_

FIRMA COMITÉ TRABAJO DE GRADO DE LA FACULTAD \_\_\_\_\_

RECHAZADO \_\_ACEPTADO \_\_\_\_ ACEPTADO CON MODIFICACIONES \_\_\_\_\_

ACTA NO. \_\_\_\_\_

FECHA ENTREGA: \_\_\_\_\_

FIRMA CONSEJO DE FACULTAD \_\_\_\_\_

ACTA NO. \_\_\_\_\_

FECHA ENTREGA: \_\_\_\_\_