



**UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO**

**Facultad de Ingeniería  
Departamento de Ingeniería Mecánica**

## **SOLDADURA POR FRICCIÓN**

**Seminario de Título presentado en  
conformidad a los requisitos para  
obtener el título de Ingeniero de  
Ejecución en Mecánica.**

**Profesor Guía:  
Sr. Federico Grossmann Cormenzana**

**LUIS RICARDO LÓPEZ GONZÁLEZ**

**2013**

## CONTENIDOS

	Pág.
<b>Objetivos</b>	1
<b>Introducción</b>	2
<b>CAPÍTULO I : SOLDADURA EN ESTADO SÓLIDO</b>	3
1.1. Soldadura en estado sólido.	3
1.2. Procedimientos de soldadura en estado sólido.	4
1.2.1. Soldadura en frío.	4
1.2.2. Soldadura por difusión.	6
1.2.3. Soldadura por explosión.	7
1.2.4. Soldadura por forja.	10
1.2.5. Soldadura por presión en caliente.	11
1.2.6. Soldadura por rodillos.	12
1.2.7. Soldadura por ultrasonido.	14
1.2.8. Soldadura por fricción.	15
<b>CAPÍTULO II: SOLDADURA POR FRICCIÓN.</b>	17
2.1. Soldadura por fricción y agitación.	17
2.1.1. Tipos de herramienta.	17
2.1.2. Características del equipo.	19
2.1.3. Procedimiento.	19
2.2. Soldadura por fricción lineal.	19

2.2.1. Fases de la soldadura por fricción lineal.	20
2.3. Soldadura por fricción rotacional.	21
2.3.1. Soldadura por fricción directa.	24
2.3.1.1. Influencia de la velocidad rotacional (rpm).	26
2.3.1.2. Influencia de la presión axial.	27
2.3.1.3. Influencia del tiempo de calentamiento.	27
2.3.1.4. Selección de parámetros para la soldadura.	27
2.3.2. Soldadura por fricción inercia.	29
2.3.2.1. Influencia de la velocidad perimetral.	31
2.3.2.2. Influencia de la presión axial.	32
2.3.2.3. Influencia del tamaño volante.	32
2.3.2.4. Selección de parámetros para la soldadura.	33
2.4. Aplicaciones.	35

### **CAPÍTULO III: DISEÑO DE MECANISMO PARA SOLDADURA POR FICCIÓN**

#### **DIRECTA** 44

3.1. Diseño del mecanismo.	44
3.2. Construcción del mecanismo	44

### **CAPÍTULO IV: EXPERIENCIA** 48

4.1. Diseño piezas a soldar.	48
4.2. Parámetros a controlar.	48
4.3. Análisis de la unión soldada.	51
4.3.1. Ensayo de tracción.	51

4.3.2. Ensayo de dureza.	54
4.3.3. Análisis metalográfico.	56
<b>CONCLUSIONES</b>	<b>59</b>
<b>BIBLIOGRAFIA</b>	<b>62</b>
<b>ANEXO 1</b>	<b>63</b>

## OBJETIVOS

- Estudio teórico de los procesos de soldadura en estado sólido y del proceso de soldadura por fricción.
- Diseño y construcción de un mecanismo que permita en un torno convencional, que permita desarrollar en forma controlada la experiencia de soldadura por fricción rotacional directa de barras de aceros SAE 1045.
- Realizar las experiencias de soldadura por fricción a un conjunto de probetas cilíndricas de acero empleando el mecanismo construido para este fin.
- Evaluar las propiedades mecánicas de las uniones soldadas obtenidas.
- Analizar las juntas soldadas obtenidas.

## INTRODUCCION

La soldadura por fricción es un proceso de unión de materiales similares y disímiles, que ha tenido un gran desarrollo y auge en la industria aeroespacial, automotriz, marina y militar entre otras.

En la actualidad existe una gran variedad de procesos especiales de soldadura, algunos de éstos aún son experimentales, y/o variaciones de procesos existentes y otros son la evolución de anteriores procesos. Sin embargo, se tienen algunos que por su utilidad y versatilidad demostrada han alcanzado una relevancia en la industria y entre estos está la soldadura por fricción rotacional.

Este proceso de unión por fricción es en estado sólido, el cual puede ser implementado en la unión de piezas y/o elementos metálicos o de polímeros sin llegar a su punto de fusión. Este proceso ha permitido el desarrollo de nuevas aplicaciones importantes en ingeniería, en el diseño de elementos mecánicos y en los procesos de fabricación que han causado un impacto importante en la producción de grandes volúmenes.

Este proceso permite la soldadura de metales como el aluminio, magnesio, cobre y acero entre otros, incluyendo aleaciones consideradas de difícil soldabilidad por procesos convencionales por fusión, sin olvidar las aplicaciones en los polímeros.

La soldadura por fricción se presenta en muchas formas, teniendo todas el mismo principio básico, se genera el calor por acción mecánica con el frotamiento de pieza con pieza.

## **CAPÍTULO I :**

### **SOLDADURA EN ESTADO SÓLIDO.**

#### **1.1. Soldadura en estado sólido.**

La soldadura en estado sólido corresponde a los procesos en los cuales se busca lograr la unión entre dos superficies en contacto mediante la utilización de presión como variable predominante, como también la aplicación de calor. En el caso de administrar calor para la realización del proceso de unión, la temperatura no deberá alcanzar la fusión de las superficies de trabajo. En los procesos de soldadura, donde se aplica presión y calor conjuntamente, el tiempo también cumple un rol importante dentro de los parámetros para la realización de la unión soldada y lograr la cohesión deseada entre las superficies en contacto. En este caso, los granos superficiales participantes en el proceso experimentan una fuerza de atracción con los granos de la otra superficie sin la necesidad de fusión ni de material de aporte.

Ahora para llevar a cabo esta cohesión se debe establecer un contacto íntimo entre las superficies a unir para que las fuerzas de atracción atómica de una superficie atraiga a los átomos de la otra y viceversa. Este contacto íntimo se podría ver limitado con la presencia de películas químicas, grasas y aceites entre otros agentes contaminantes. Para que esto no ocurra es recomendable siempre remover estos contaminantes, ya sea, con un mecanizado previo o una buena limpieza.

Por otro lado, en referencia a las ventajas que ofrecen estos procesos de soldadura, se puede apreciar que al no implicar una fusión existe sólo una pequeña zona afectada por la aplicación de calor, de manera que el material no involucrado permanece con sus propiedades mecánicas y tecnológicas intactas.

## 1.2. Procesos de soldadura en estado sólido.

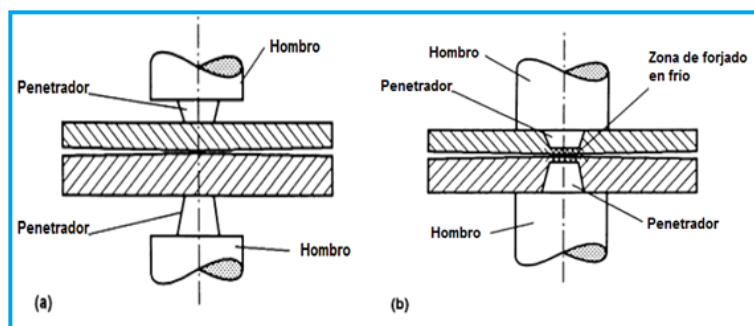
Dentro de los procesos de soldadura en estado sólido, se encuentra el proceso de unión más antiguo como es el por forja, al igual que algunos de los más modernos como es el por ultrasonido. Todos los procesos de soldadura en estado sólido tienen una forma singular de crear la unión en las superficies empalmantes.

### 1.2.1. Soldadura en frío.

La soldadura en frío, SF (cold welding. CW) es un proceso de soldadura en estado sólido a temperatura ambiente, en el cual se aplica presión sobre las superficies de contacto, lo que implica la destrucción de las capas superficiales de las piezas a soldar, desprendiendo el óxido que contienen ambos componentes y dejando expuesto el material limpio para obtener un contacto íntimo de las superficies, y lograr la cohesión.

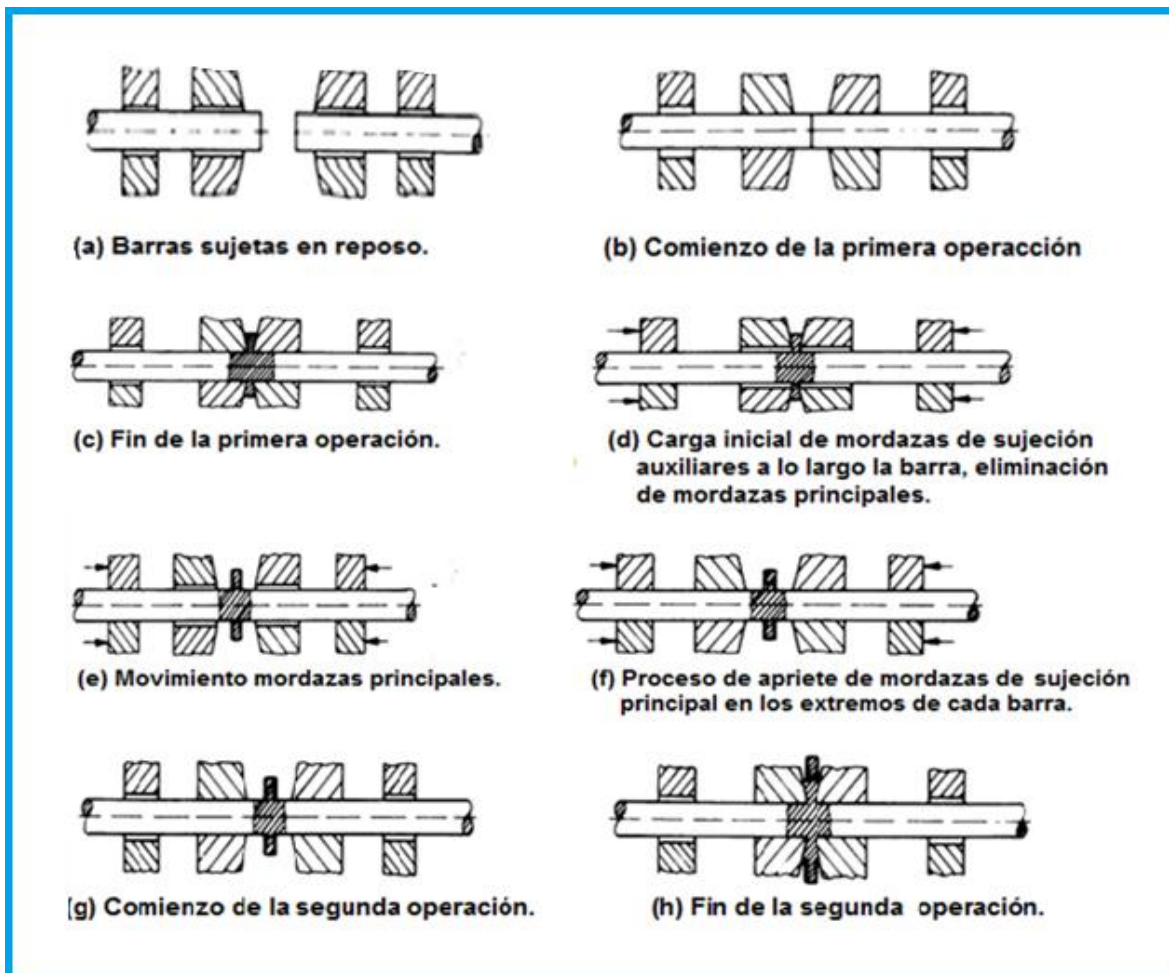
Para la aplicación de este tipo de proceso de unión, existe una gama de técnicas para que ésta se lleve a cabo, entre las más conocidas se encuentran la soldadura en frío de láminas y a tope, las cuales se presentan a continuación:

**Soldadura en frío de láminas:** Este proceso es muy similar a la soldadura por puntos de resistencia, donde dos láminas se unen de tal manera que la dirección del flujo de material es perpendicular a la dirección de la presión. Debido a la presión ejercida se puede observar claramente una disminución del espesor en la zona de unión. (Figura 1.1).



**Figura 1.1.** Proceso de soldadura en frío a) montaje b) soldadura producto de la aplicación de presión.

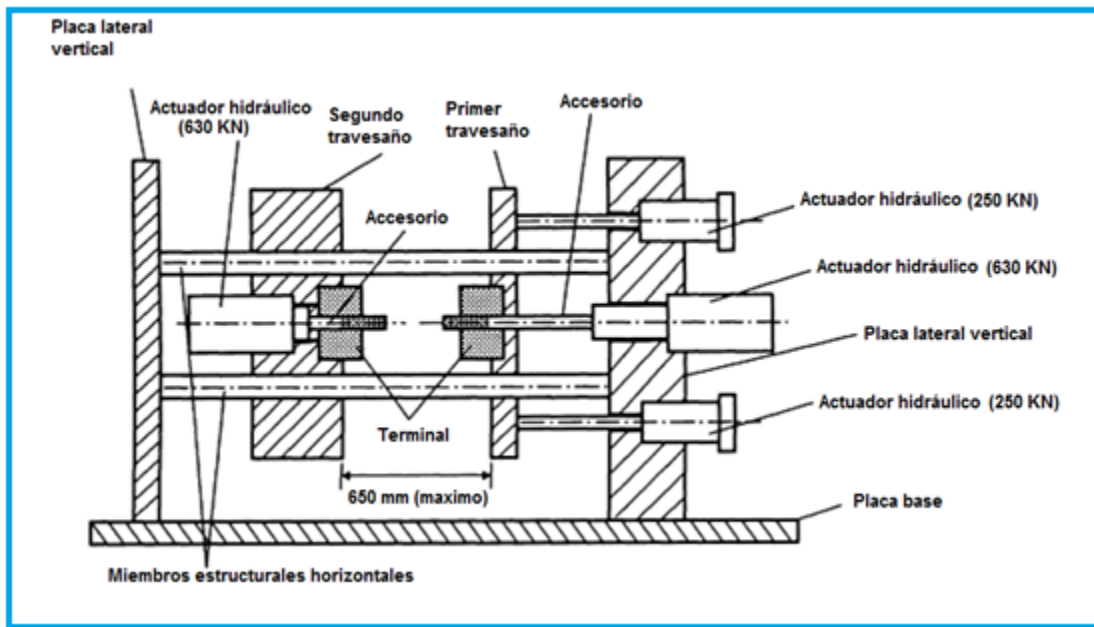




**Figura 1.2.** Proceso de soldadura en frío a tope de dos barras, utilizando el método de recalco de múltiple paso.

**Soldadura en frío a tope:** la soldadura en frío a tope implica la aplicación de presión en los extremos de las dos barras, donde éstas pueden ser de materiales similares o distintos. La fuerza de compresión aplicada a lo largo de los ejes de las barras produce una expansión de las superficies de contacto formando un recalco o bulbo. Ambos extremos se sueldan cuando las superficies de contacto han alcanzado un cierto tamaño, además de aumentar la resistencia del material por la deformación plástica en frío. (Figura 1.2).

Estas variantes de soldadura en frío se utilizan con frecuencia en materiales no ferrosos, muy dúctiles y libres de endurecimiento por trabajo en frío, principalmente cobre y aluminio. Una de las aplicaciones más frecuentes es la fabricación de conexiones eléctricas.



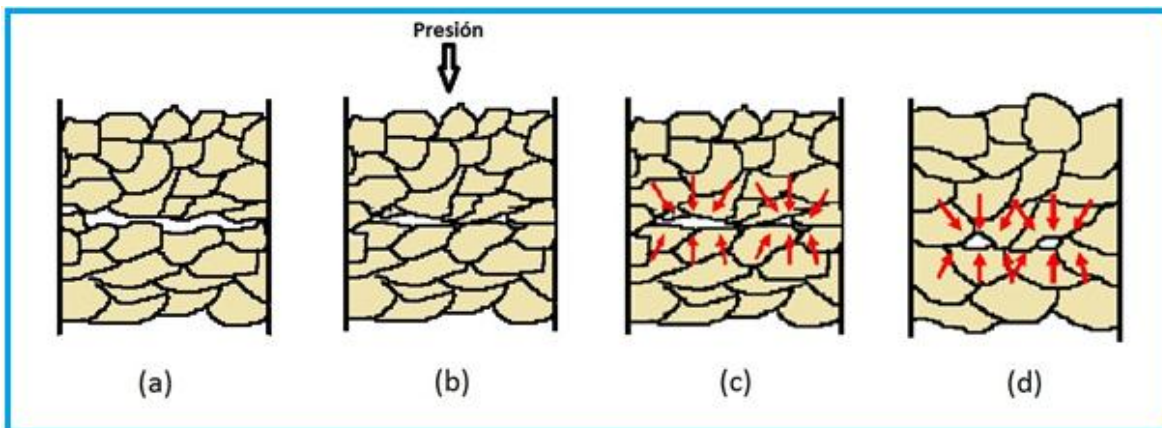
**Figura 1.3.** Máquina de soldadura en frío por medio del método de múltiple paso, que consta de dos actuadores de 250 KN y dos actuadores de 630KN.

Para lograr una unión satisfactoria, las superficies deben estar excepcionalmente limpias, esta limpieza se realiza mediante un desengrasado y un pulido con un cepillo de alambre inmediatamente antes de realizar el proceso de unión.

### 1.2.2. Soldadura por difusión.

La soldadura por difusión (difusión welding, DFW) es un proceso de unión en estado sólido resultado de la aplicación de calor y presión, por lo general en una atmósfera controlada y durante un tiempo suficiente para que ocurra la difusión y la coalescencia. Las temperaturas son bastante menores que los puntos de fusión de los metales a unir y la deformación plástica en la superficie es mínima. El mecanismo principal de coalescencia se lleva a cabo mediante la difusión en estado sólido, que implica la migración de átomos a través de la interfase entre las superficies en contacto. Los dos materiales se deben presionar simultáneamente, a una temperatura por lo general entre el 50 y el 70% del punto de fusión. Las aplicaciones de la DFW incluyen la unión de metales refractarios y de alta resistencia en las industrias de la aeronáutica, la aeroespacial y la nuclear.

El proceso se utiliza para unir metales similares y diferentes y, en este último caso, con frecuencia se introduce entre ellos una capa de material distinto para promover la difusión de los dos metales base. Una limitación del proceso puede ser el tiempo requerido para que ocurra la difusión entre las superficies empalmantes; este tiempo puede variar de segundos a horas.



**Figura 1.4.** Pasos en la microestructura cristalina en la unión o soldadura por difusión. a) Al comenzar el área de contacto es pequeña. b) Al aplicar presión el área de contacto aumenta. c) La difusión en el límite del grano permite contraer los huecos. d) Por último para la eliminación final de los huecos se requiere una difusión en volumen.

Algunos ejemplos de materiales que se pueden unir con este proceso son el titanio, que a temperaturas superiores a 850 °C disuelve los óxidos presentes en la superficie del material dejando el óxido fuera del alcance de la superficie de unión, lo mismo sucede con la plata a temperaturas superiores a 190 °C. Otros materiales empleados para este proceso por su alta solubilidad de contaminantes son el tungsteno, cobre, hierro y circonio. Estos materiales son altamente utilizados en la industria aeronáutica, aeroespacial y nuclear.

### 1.2.3. Soldadura por explosión.

La soldadura por explosión (Explosion welding, EXW) es un proceso de unión en estado sólido que utiliza la fuerza explosiva para crear una unión entre dos componentes de metal. Aunque la detonación explosiva genera calor, el proceso de unión en sí no se logra gracias al calor, ya que, no existe tiempo suficiente para que esto ocurra.

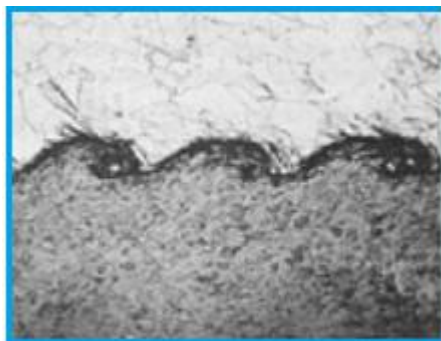
La soldadura por explosión es un proceso muy eficaz y puede unir prácticamente cualquier combinación de materiales, con la única limitación metalúrgica de que el material sea lo suficientemente dúctil y resistente a la fractura al someterse a una rápida deformación a causa de la explosión.

Este proceso es adecuado para la unión de metales del mismo tipo como puede ser la combinación acero - acero, pero también es posible la unión de metales con características distintas entre sí, ya sea densidad y/o punto de fusión, por ejemplo tantalio – titanio y acero – aluminio.

Con frecuencia este proceso es usado para la unión de materiales resistentes a la corrosión con aceros al carbono, esto se realiza para recubrir el acero y así protegerlo del ataque de la corrosión.

La soldadura es aplicable en una amplia gama de tamaños como por ejemplo en componentes electrónicos de un ancho 0,5 mm como también para revestimiento de planchas de 5 x 13 m, el espesor del revestimiento puede variar desde 0,025 hasta 100 mm, y el espesor de la base del metal puede variar desde 0,025 mm hasta 1 m.

Con respecto a la zona de unión, este tipo de soldadura es tradicionalmente reconocida porque en la zona de unión se aprecia una ondulación característica de este proceso. (Figura 1.5).

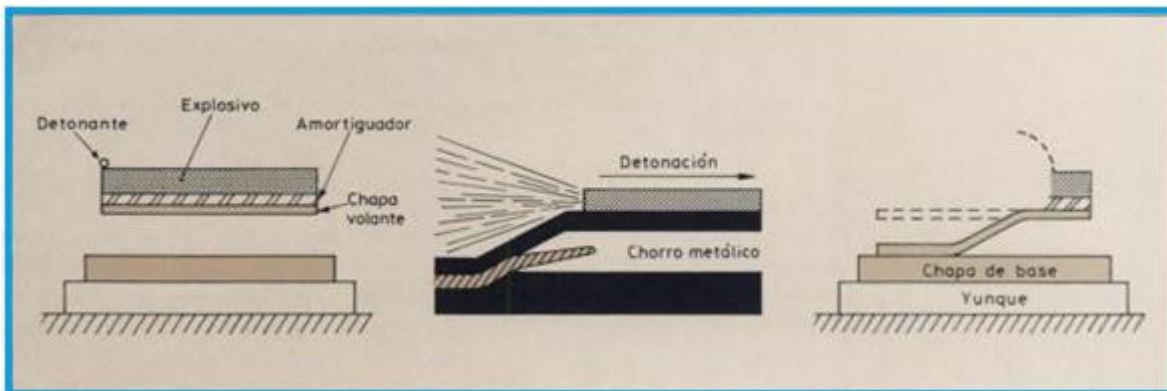


**Figura 1.5** Zona de unión en una soldadura por explosión.

Con algunas combinaciones de materiales es necesario la ubicación de una capa intermedia entre los materiales para un mejor rendimiento, por ejemplo una

capa de titanio se puede utilizar para aumentar la temperatura de funcionamiento de la soldadura de aluminio-cobre y una capa intermedia de plata se puede utilizar para mejorar la hermeticidad en la soldadura aluminio-acero inoxidable.

El proceso de soldadura por explosión por razones de seguridad, ruido y vibraciones es realizado en instalaciones aisladas y por empresas especializadas en el manejo de explosivos. Existen dos configuraciones básicas para la realización de este proceso, la primera es la unión en ángulo y la segunda es la unión de placas paralelas. La unión en ángulo se utiliza normalmente para componentes de tamaños pequeños donde el ancho de la base no exceda en 20 mm el espesor de la placa volante, la unión de placas paralelas es aplicable para la soldadura de áreas más extensas y cilindros concéntricos.



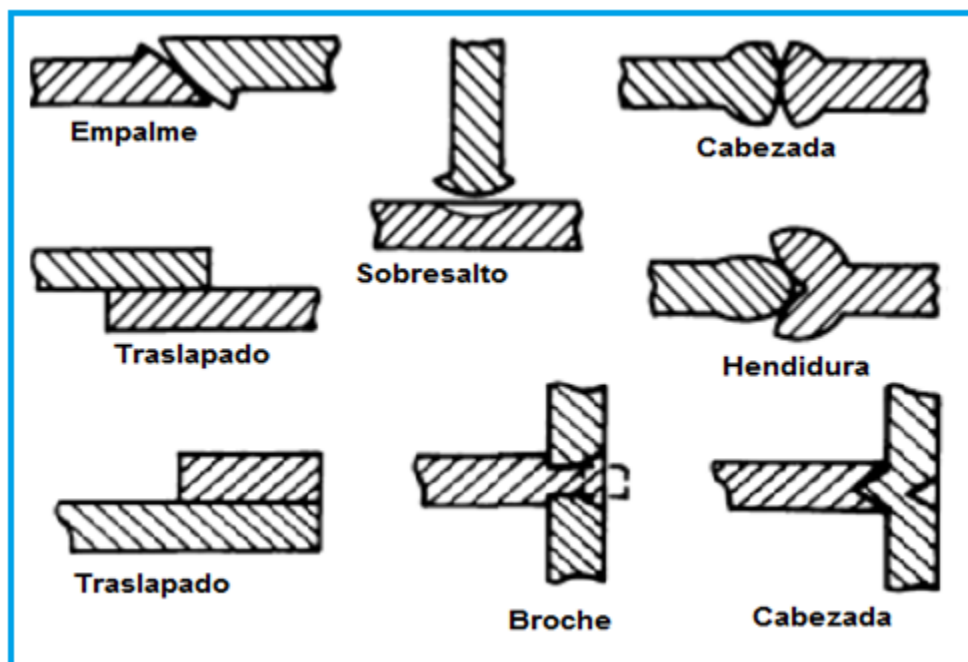
**Figura 1.6.** Proceso de soldadura por explosión de placas paralelas.

Al momento de la explosión la placa de revestimiento alcanza una velocidad de entre 250 a 500 m/s y una velocidad de colisión de 1500 a 3500 m/s, esto es un 120% de la velocidad del sonido, por otro lado el ángulo de choque varía entre 5° y 20°. Con respecto a los explosivos utilizados, estos se ubican en la parte superior de la superficie del material con el cual se revestirá la placa base, los explosivos se utilizan de forma granular o líquidos. Las empresas encargadas de este tipo de soldadura utilizan varias mezclas de explosivos para lograr una gran gama de detonaciones dependiendo del material que deseen soldar, dentro de estos explosivos utilizados también se pueden encontrar algunos comerciales como por ejemplo la Dinamita, Amatol y NCN. Las aplicaciones más frecuentes de

este proceso de soldadura se encuentran en la fabricación de placas bimetálicas de gran área, para la fabricación de estanques de almacenaje de productos químicos, y en calderería para la fabricación de recipientes que soportan una gran presión.

#### 1.2.4. Soldadura por forja.

Este proceso de unión en estado sólido requiere que las piezas de trabajo a soldar se calienten alcanzando temperaturas en un rango de un 80 a 90% de la temperatura de fusión. Con el aumento de la temperatura se disminuye el límite de fluencia del material, lo que se traduce en un aumento del área de contacto metal - metal. La fusión del metal en la intercara no es necesaria para que se produzca la soldadura, cuando esto ocurra, estará limitado a zonas muy pequeñas. La soldadura por forja requiere la aplicación de presión, la cual se suministra normalmente con un martillo, con el cual se aplican golpes logrando una deformación permanente del material a soldar, las configuraciones de las piezas a soldar dependen necesariamente de la aplicación de la soldadura ya sea manual (utilización de martillo) o automática (rodillos o prensas).



*Figura 1.7. Configuraciones empleadas en el proceso de soldadura por forja.*

Adicionalmente, se prepara la superficie de manera de eliminar la mayor cantidad posible de óxido, a través de los siguientes mecanismos:

- El calor aplicado puede fundir al óxido de la capa superficial. En este caso, el punto de fusión del óxido debe ser menor que el punto de fusión del metal, como es el caso de los aceros, cuyo óxido funde a 1.421 °C. Esto no puede hacerse con el aluminio dado el alto punto de fusión de su óxido ( $Al_2O_3$ ).
- Se puede disolver el óxido en una sal de bajo punto de fusión.

En cualquier caso, es importante aplicar la presión en forma radial, comenzando desde la parte interna y hacia afuera, de manera de que las partículas de óxidos fundidos y remanentes puedan ser despedidos, siendo importante que exista una deformación plástica considerable para que la soldadura sea eficiente.

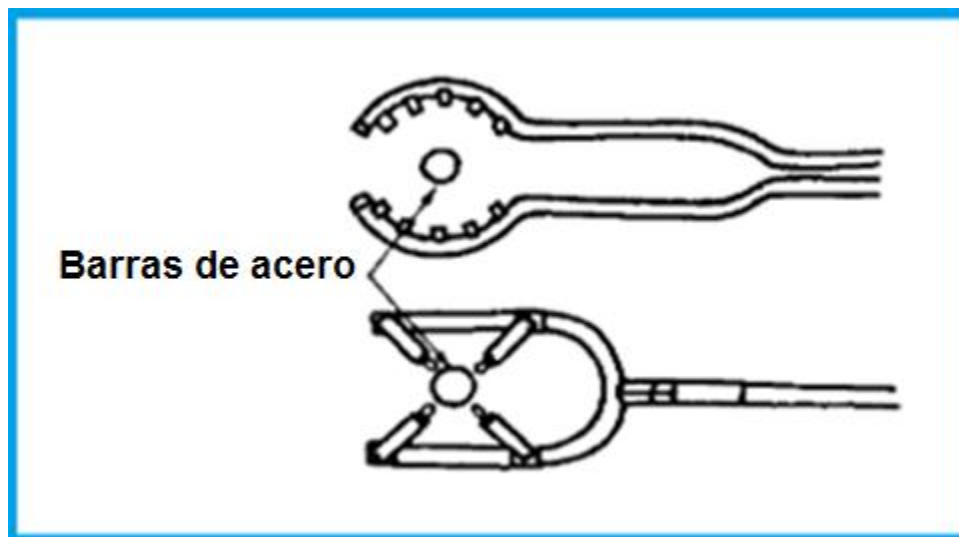
En este proceso se observa una zona afectada por el calor bien extensa, siendo la tasa de enfriamiento de moderada a lenta. Cuando se sueldan materiales trabajados en frío, aparecerá una zona de recristalización en la zona afectada por el calor.

Dentro de los materiales más comunes en la utilización del proceso de unión por forja están los aceros al carbono, aceros aleados, aceros inoxidables, aluminio, titanio, cobre, latón y aleaciones refractarias que contienen cobalto, níquel o molibdeno.

#### **1.2.5. Soldadura por presión en caliente.**

La soldadura por presión en caliente, (hot pressure welding, HPW), es otra variante de la soldadura por forja, en la cual ocurre la coalescencia por la aplicación de calor y presión suficientes para producir una deformación considerable de los metales base. La deformación rompe la película de óxido de la superficie y deja limpio el metal para establecer una unión entre las dos partes. Debe permitirse que pase un tiempo para que ocurra la difusión a través de las superficies empalmantes. Por lo general, la operación se realiza en una cámara de

vacío o en la presencia de un medio protector. Las aplicaciones principales de la HPW están en la industria de la aeronáutica y espacial.



**Figura 1.8.** Quemador de boquillas múltiples para el calentamiento de barras, utilizado en la soldadura por presión en caliente.

**Tabla 1.1.** Tiempo de calentamiento según diámetro de barras de acero, para temperatura de 1200 a 1300 °C.

Diámetros de barras (mm)	16	18	22	25	29	32	35	38	41	51
Tiempo calentamiento (seg)	40 - 50	50 - 60	65 - 80	75 - 105	105 - 135	150 - 175	150 - 210	150 - 240	180 - 270	260 - 390

### 1.2.6. Soldadura con rodillos.

La soldadura con rodillos es una variación de la soldadura por forja o de la soldadura en frío, dependiendo de si se obtiene o no el calentamiento externo de las partes del trabajo antes del proceso. La soldadura con rodillos, (roll welding, ROW), es un proceso en estado sólido en el cual se aplica una presión suficiente para producir la coalescencia mediante rodillos, ya sea con o sin aplicación externa del calor.



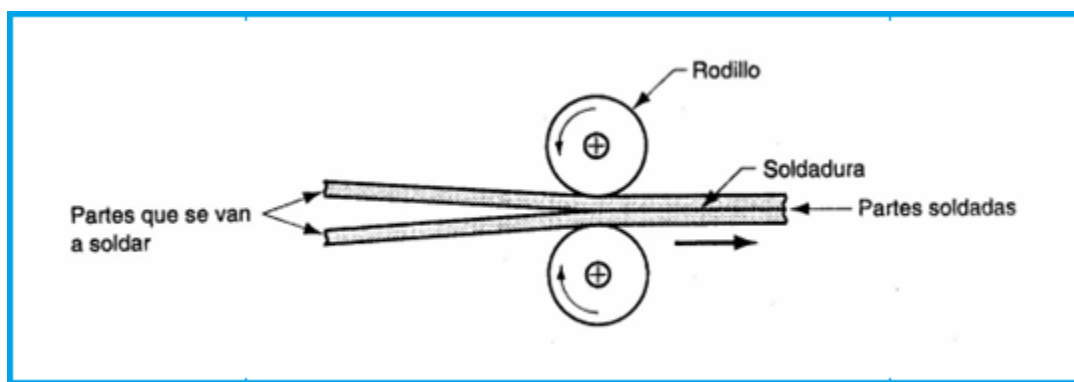


Figura 1.9. Proceso de soldadura por rodillos.

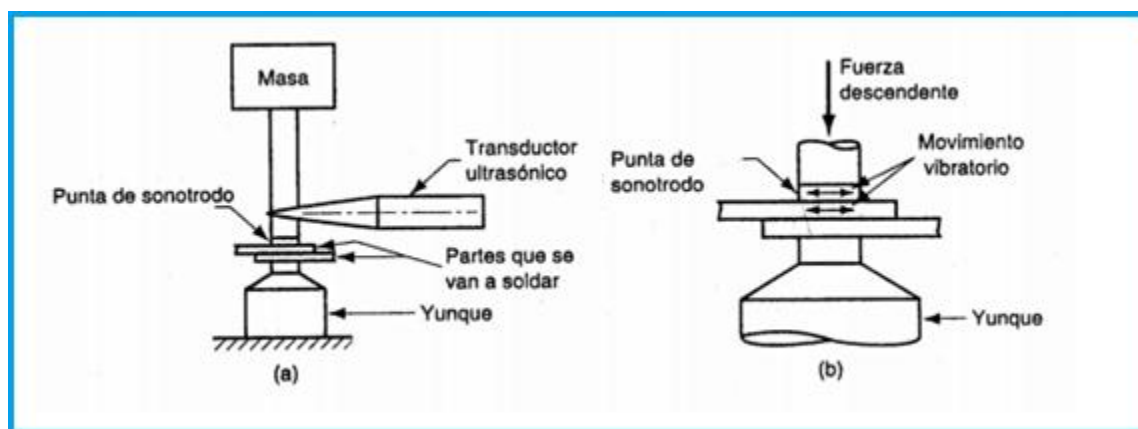
Tabla 1.2. Propiedades y características de algunos revestimientos en láminas.

Materiales	Relación compositiva %	Espesor mm	Ancho mm	Resistencia a la tracción Mpa	Límite Elástico Mpa	Elongación %
Cobre 10300 / Acero bajo en carbono	50 / 50	0,25 - 2,54	12,7 - 50	260	215	40
Cobre desoxidado / Acero al carbono / Cobre desoxidado	5 / 90 / 5 10 / 80 / 10 15 / 75 / 15	0,25 - 2,54	≤ 610	420	250	35
Acero inoxidable 434 / Aluminio 5052	40 / 60	0,56 - 0,76	≤ 610	395	360	12
Cobre 11000 / Aluminio 1100	50 / 50	0,51 - 2,54	50 - 510	180	12	35
Acero SAE 1008 / Acero inoxidable 347 / Acero SAE 1008	43 / 10 / 47	0,36	305	393	195	35
Níquel 201 / Acero inoxidable 304 / Níquel 201	7,5 / 85 / 7,5	0,20 - 2,41	25 - 64	...	310	40
Cobre 10300 / Acero inoxidable 430 / cobre 10300	5 / 90 / 5 10 / 80 / 10 15 / 75 / 15	0,10 - 0,15	12,7 - 150	415	275	20
Bronce fosforoso 51000 / Acero al carbono / Cobre	10 / 85 / 5	0,38 - 1,52	≤ 610	455	435	16

Si no se proporciona calor externo, el proceso se denomina soldadura en frío con rodillos, y si se aporta calor se utiliza el término soldadura en caliente con rodillos. Las aplicaciones de la soldadura con rodillos incluyen el revestimiento con acero inoxidable de aceros al carbono con un bajo porcentaje de carbono con el fin de alcanzar una mayor resistencia a la corrosión, la fabricación de tiras bimetálicas para medir la temperatura y la producción de monedas acuñadas para la Casa de Moneda de Estados Unidos.

### 1.2.7. Soldadura ultrasónica.

La soldadura ultrasónica (ultrasonic welding, USW), es un proceso de unión en estado sólido en el cual se integran dos componentes bajo fuerzas de sujeción modestas y se aplican intensas presiones oscilatorias de frecuencia ultrasónica a la interfase para producir la coalescencia. La operación se muestra en la figura 1.10, para la soldadura sobrepuesta, que es una aplicación típica.



**Figura 1.10.** a) Componentes para la realización de la soldadura ultrasónica, b) Movimientos que utiliza la máquina para realizar la soldadura.

El movimiento oscilatorio entre las dos partes deshace las películas de óxido superficial y permitir un contacto íntimo y la unión metalúrgica entre las superficies. Aunque ocurre un calentamiento de las superficies en contacto debido a la fricción interfacial y la deformación plástica, las temperaturas resultantes están bastante abajo del punto de fusión. En la USW no se requieren metales de aporte, fundentes ni gases protectores.

El movimiento oscilatorio se transmite a la parte de trabajo superior mediante un sonotrodo que está acoplado a un transductor ultrasónico, Este dispositivo convierte la energía eléctrica en un movimiento vibratorio de alta frecuencia. Las frecuencias comunes empleadas en la USW son de 15 a 75 KHz, y las amplitudes varían de 0.18 a 0.13mm. Las presiones de sujeción son mucho menores que las utilizadas en la soldadura en frío y producen una deformación plástica importante entre las superficies. Bajo estas condiciones, los tiempos de soldadura son menores a 1 segundo.

Por lo general, las operaciones de USW se limitan a uniones superpuestas sobre materiales dúctiles, tales como el aluminio y el cobre. La soldadura de materiales más duros provoca un rápido desgaste del sonotrodo que hace contacto con la parte de trabajo superior. Las zonas de trabajo deben ser relativamente pequeñas y la soldadura de espesores menores a 3mm es el caso común.

Las aplicaciones incluyen terminación y empalmado de cables en las industrias eléctrica y electrónica (lo cual elimina la necesidad de soldadura blanda), el ensamble de paneles de lámina metálica de aluminio, la soldadura de tubos para chapas en paneles solares, así como diversas tareas de ensamble de otras pequeñas partes en la industria automotriz.

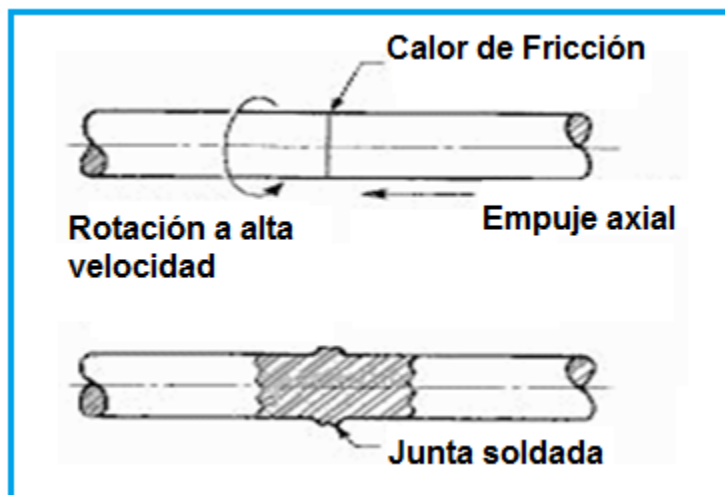
#### **1.2.8. Soldadura por fricción.**

La soldadura por fricción (Friction Welding, FW) es un método de soldadura que aprovecha el calor generado por la fricción mecánica entre dos piezas en movimiento.

Es utilizada para unir dos piezas, aún cuando una de ellas por lo menos sea de igual o distinta naturaleza, por ejemplo: acero de alto carbono y acero de bajo carbono, aluminio y aleaciones aluminio, acero y cobre, etc, lo cual le confiere innumerables ventajas frente a otro tipo de soldaduras con la que no se pueden soldar aluminio o aleaciones de aluminio.

Al menos una de las dos piezas tendrá que ser un volumen de revolución, generalmente cilindros. En el caso de que las dos piezas sean volúmenes de revolución se tendrán que alinear perfectamente ambos ejes longitudinales.

El principio de funcionamiento consiste en que la pieza de revolución gira en un movimiento de rotación fijo o variable alrededor de su eje longitudinal y se asienta sobre la otra pieza. Cuando la cantidad de calor producida por rozamiento es suficiente para llevar las piezas a la temperatura de soldadura, se detiene bruscamente el movimiento, y se ejerce un empuje, el cual produce la soldadura por interpenetración granular. En ese momento se produce un exceso de material que se podrá eliminar fácilmente con una herramienta de corte, ya que todavía se encontrará en estado plástico.



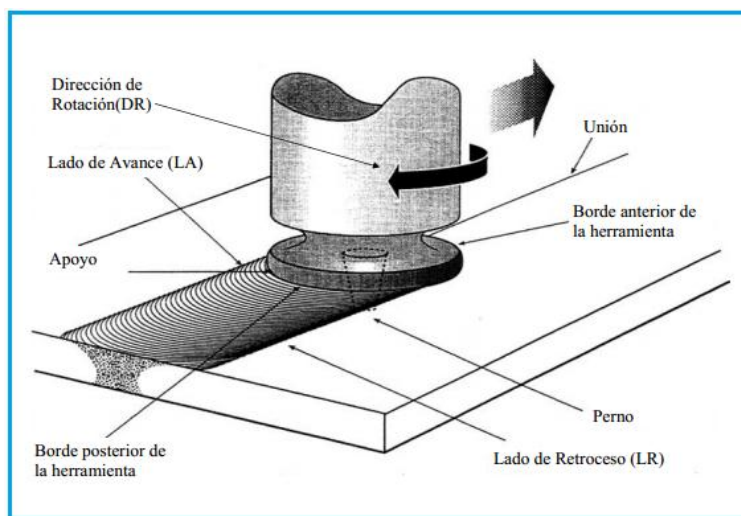
**Figura 1.11.** Proceso de soldadura por fricción.

## CAPÍTULO II :

### SOLDADURA POR FRICCIÓN

#### 2.1. Soldadura por fricción - agitación.

La soldadura por fricción - agitación (Stir-Welding o Friction Stir Welding – FSW) es una técnica para unir dos láminas o placas por medios mecánicos. Este proceso tiene grandes ventajas en la soldadura de aleaciones de aluminio que son difíciles de soldar por los procesos que involucran la fusión del material base. Mediante este proceso se pueden soldar secciones gruesas en una sola pasada, obteniéndose uniones con excelentes propiedades mecánicas.



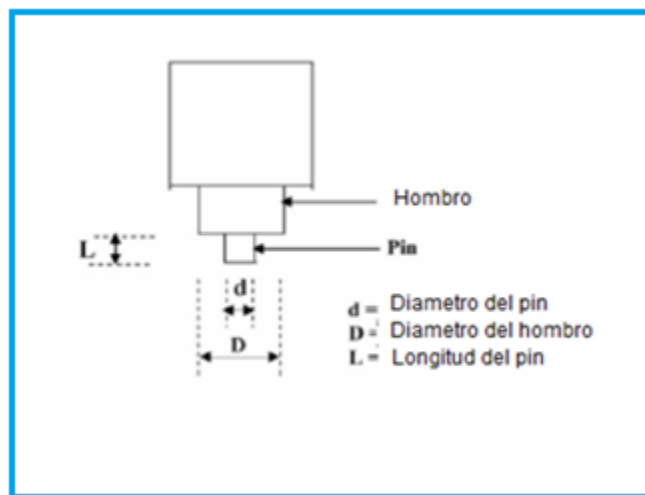
**Figura 2.1.** Proceso de soldadura por fricción - agitación.

#### 2.1.1. Tipos de herramientas.

La herramienta constituye la parte fundamental del proceso, se compone de dos cuerpos cilíndricos concéntricos, el de menor diámetro denominado “pin” es el que actúa en la interfase de la junta y produce la plastificación, agitación y mezcla

del metal, el de mayor diámetro o “hombro” trabaja sobre la superficie de la junta y es el que precalienta y consolida el material plastificado. La combinación de ambos efectos produce la recristalización y coalescencia de las piezas.

La forma y tamaño de la herramienta tiene gran influencia sobre la sanidad de la unión. Durante el proceso, la misma es sometida a altas sollicitaciones mecánicas y a temperaturas próximas al punto de fusión del metal base, por lo cual el material y tratamiento empleado para su fabricación son fundamentales en lo concerniente a su vida útil.



**Figura 2.2.** Partes de la herramienta utilizada para la soldadura por fricción agitación.



**Figura 2.3.** Diseños de hombros para soldadura por fricción agitación.



**Figura 2.4.** Diseños de pin para soldadura por fricción agitación.

### **2.1.2. Características del equipo.**

En principio el equipo debe ser capaz de ejecutar cuatro operaciones básicas: avance longitudinal de la pieza y/o de la herramienta, ajuste vertical del husillo porta herramienta, giro del husillo sobre su eje e inclinación de éste respecto a la pieza. En particular, cuando se emplea para la puesta a punto de procedimientos, debe además permitir operar dentro de rangos suficientemente amplios de velocidades de giro y translación. Debido a los grandes esfuerzos que se producen durante la soldadura la rigidez estructural es otro requerimiento fundamental. En general para muchas aplicaciones dichas características se pueden encontrar en máquinas herramientas convencionales o ligeramente modificadas.

### **2.1.3. Procedimiento.**

Se procede a la inserción de la herramienta hasta que el hombro de la misma hace contacto con las superficies a soldar, aplicando para el caso una fuerza axial controlada por el desplazamiento vertical de la mesa de sujeción del material a unir o del cabezal porta herramienta. El contacto provocado, genera calor debido a la fricción elevando la temperatura del sistema. La rotación y el avance de la herramienta a la temperatura de trabajo, dan como resultado la conformación de un flujo plástico de material que, favorecido por la geometría de dicha herramienta, es agitado y mezclado hasta resultar en una unión metalúrgica en fase sólida.

## **2.2. Soldadura por fricción lineal.**

La soldadura por fricción lineal es un proceso de unión en estado sólido y sin aporte de material, que consiste en rozar un componente sobre la superficie del otro al utilizar un movimiento lineal oscilatorio. Este movimiento se produce normalmente utilizando pequeñas distancias de recorrido del orden de 1-3mm y a alta frecuencia (25-100Hz). Ello genera un calor por fricción en el plano de contacto, y por consiguiente se genera un estado plástico en un cierto volumen de material. Durante el proceso, una parte del material viscoelástico que se formó se

desplaza hasta la periferia de la interfaz de contacto, lo que se suele llamar "flash" de material expulsado.(Figura 2.5).

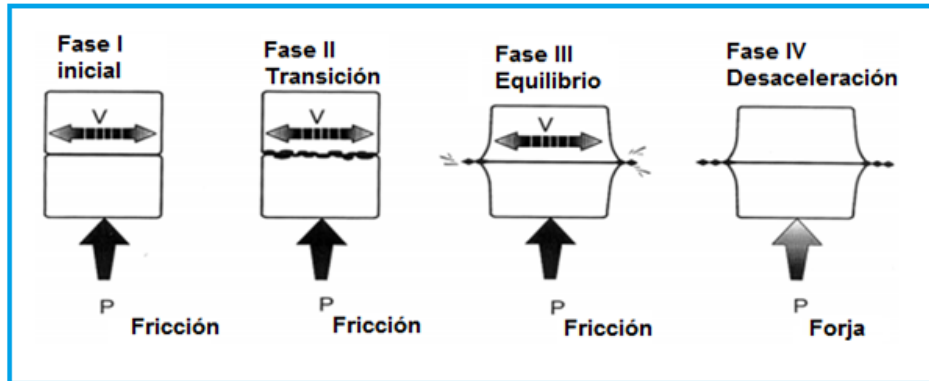
### 2.2.1. Secuencia del proceso

- **Fase inicial:** Los dos materiales se ponen en contacto bajo presión, las dos superficies a unir son ásperas y el calor se genera de la fricción. El área de contacto verdadero aumenta perceptiblemente a través de esta fase debido al desgaste de la parte áspera. Si la velocidad de frotamiento es demasiado baja para una fuerza axial dada, el calor de la fricción no será lo bastante elevado y se perderá a través de la conducción y de la radiación. Esto conducirá a un insuficiente ablandamiento térmico.
- **Fase de transición:** Si se ha producido el calor necesario durante la fase anterior para ablandar la interfaz del material, las partículas grandes del desgaste comienzan a ser expelidas de la interfaz y la zona afectada por el calor se amplía para seguir en la fase III. El área de contacto alcanza el 100% del área seccionada transversalmente. La capa plastificada (blanda) formada entre los dos materiales no puede soportar la carga axial.
- **Fase de equilibrio:** Después de la etapa II, las piezas comienzan a disminuir de tamaño como resultado del material expelido. El calor generado por los enlaces rotos y sus cambios se transfiere lejos de la interfaz y una zona plástica aparece. En la capa plastificada formada en la interfaz, el sistema local de tensiones con la ayuda del movimiento oscilatorio saca el material de la interfaz en el flash o rebaba.

Las inestabilidades pueden aparecer en esta etapa, debido a la distribución desigual de la temperatura. Si la temperatura aumenta excesivamente en una sección de la interfaz lejos de la línea central de la oscilación, la capa plastificada crece en esa sección generando una mayor cantidad material plástico extruido.



- **Fase de desaceleración:** El movimiento de traslación cesa y las dos piezas a unir se someten a un esfuerzo de forja mientras se enfría la unión, en esta fase se consolida la soldadura.



*Figura 2.5 Fases del proceso de soldadura por fricción lineal.*



*Figura 2.6 Piezas soldadas por el proceso de soldadura por fricción lineal.*

### 2.3. Soldadura por fricción rotacional (FRW).

La soldadura por fricción rotacional FRW (Friction Rotary Welding) es un proceso de soldadura en estado sólido donde el calor necesario para la soldadura se produce por el movimiento relativo de las dos caras en contacto a unir. Este método se basa en la conversión directa de la energía mecánica en energía térmica para formar la soldadura, sin la aplicación de calor desde cualquier otra fuente.

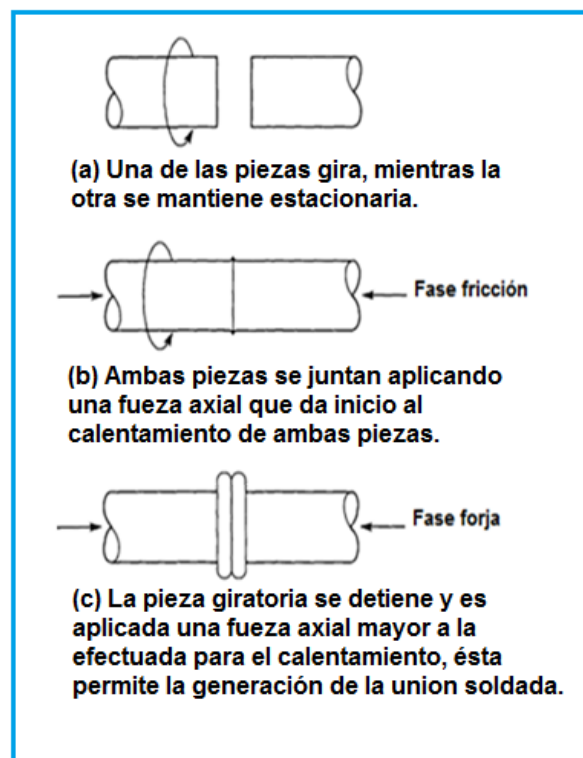
La figura 2.7 muestra una soldadura por fricción típica, en la que una pieza no giratoria en contacto con una pieza de trabajo rotatoria a presión constante o en aumento, lo cual permite que en la interfaz se alcance la temperatura de soldadura para hacer posible la unión.

La velocidad de rotación, la presión axial y el tiempo de soldadura son las principales variables que son controladas con el fin de proporcionar la necesaria combinación de calor y presión para formar la soldadura. Estos parámetros se ajustan de manera que la interfaz se calienta en un intervalo de temperatura, el material alcance un estado plástico y así la soldadura puede tener lugar. Una vez que la interfaz se calienta, la presión axial se utiliza para llevar las interfaces de soldadura a un contacto íntimo. Durante esta última etapa del proceso de soldadura, la difusión atómica se produce mientras las interfaces están en contacto, lo que permite una unión metalúrgica entre los dos materiales.

La soldadura por fricción implica la generación de calor a través de la abrasión de fricción, la disipación de calor, la deformación plástica e interdifusión química. La interrelación entre estos factores durante la FRW genera complicaciones cuando se trata de desarrollar modelos predictivos del proceso de soldadura por fricción.

Cinco factores cualitativos influyen en la calidad de una soldadura de fricción:

- a) Velocidad de rotación (rpm).
- b) Presión aplicada, tanto en el calentamiento como en la forja.
- c) Temperatura de las superficies.
- d) Propiedades del material.
- e) Estado de las superficies de contacto (contaminación).



**Figura 2.7** Pasos fundamentales de la soldadura por fricción.

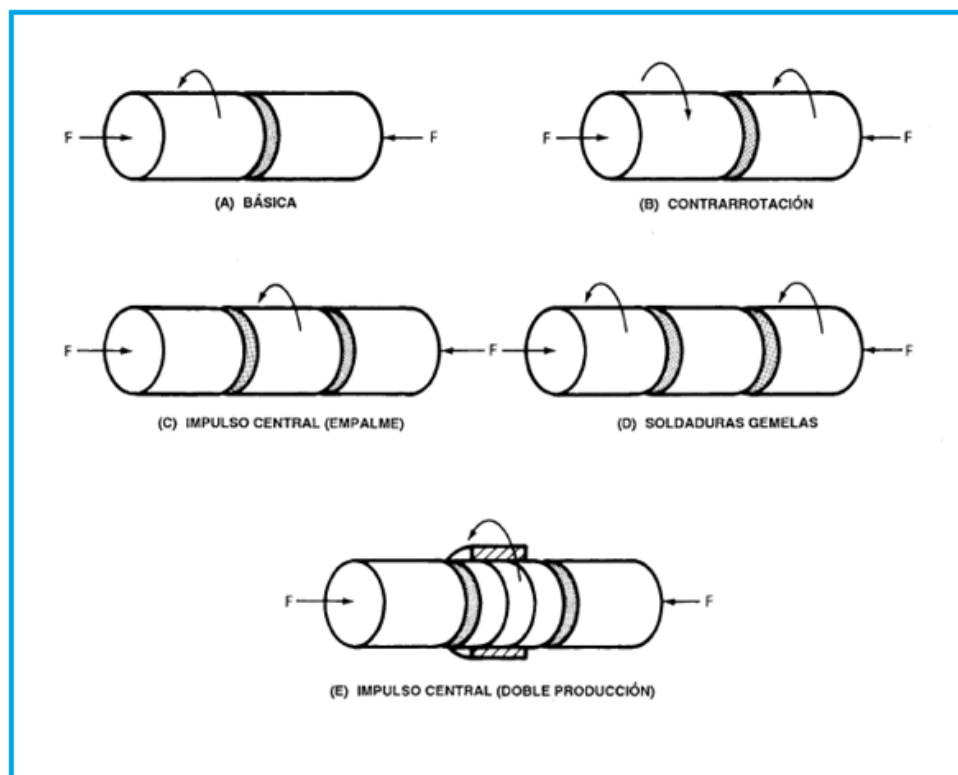
Los primeros tres factores dependen del proceso mientras que los últimos dos están relacionados exclusivamente con el material a unir.

Durante el proceso de soldadura por fricción rotacional (FRW), las variables que se tendrán que controlar serán:

- La velocidad de rotación.
- La presión aplicada en el calentamiento.
- La presión de forja.
- El tiempo de aplicación de la fuerza.

Teniendo claro que la presión de forja es mayor que la de calentamiento, la temperatura de la superficie es el parámetro crítico para asegurar buenas soldaduras y depende de las condiciones de transformación y los materiales que se desea unir. Aunque la temperatura de la superficie no se mide o controla directamente, los efectos de una temperatura insuficiente o excesiva son generalmente evidentes a simple vista al examinar la soldadura terminada.

En la mayor parte de las aplicaciones de la soldadura por fricción, una de las dos piezas de trabajo gira alrededor de un eje de simetría con las superficies de empalme perpendiculares a ese eje. Esto significa que, en el caso normal, una de las dos piezas de trabajo debe tener sección transversal circular o tubular en el punto de la unión. A continuación se ilustrará disposiciones típicas para operaciones de una y varias soldaduras.



**Figura 2.8.** Disposiciones típicas para la soldadura por fricción.

Existen dos procesos básicos de soldadura por fricción rotacional, la soldadura por fricción directa y soldadura por fricción por inercia. La primera emplea un aporte continuo de energía, mientras que la segunda aprovecha la energía almacenada en un volante.

### 2.3.1. Soldadura por fricción directa.

En la soldadura por fricción directa Direct – Drive FRW (Direct – Drive Friction Welding), se utiliza una máquina semejante a un torno, equipada con un sistema que permite la aplicación de una presión axial controlada. El

funcionamiento de estos equipos para la soldadura directa consta de una fase de fricción, donde se genera calor, una fase de frenado donde se termina la rotación y una fase de forja donde se aplica presión para unir las piezas.



**Figura 2.9** Maquina soldadora por fricción directa.

Las principales variables en este proceso son:

- La velocidad rotacional.
- La presión de calentamiento.
- La presión de forja.
- La temperatura.
- La duración del calentamiento.

La selección de estas variables primarias deben ser consideradas con factores secundarios tales como la tasa de acumulación de presión durante el calentamiento y forja, la desaceleración durante el frenado y las propiedades de los materiales a soldar. Las soldaduras confiables de alta integridad se producen una vez que los parámetros de trabajo se han establecido adecuadamente.

En la figura 2.10. se presenta la relación entre las variables del proceso de unión por fricción directa, como son la velocidad de rotación en las fases de fricción (calentamiento) y de forja, la presión axial empleada como una función del tiempo para la soldadura. El tiempo requerido para detener el husillo es también una variable importante porque afecta a la temperatura de soldadura.

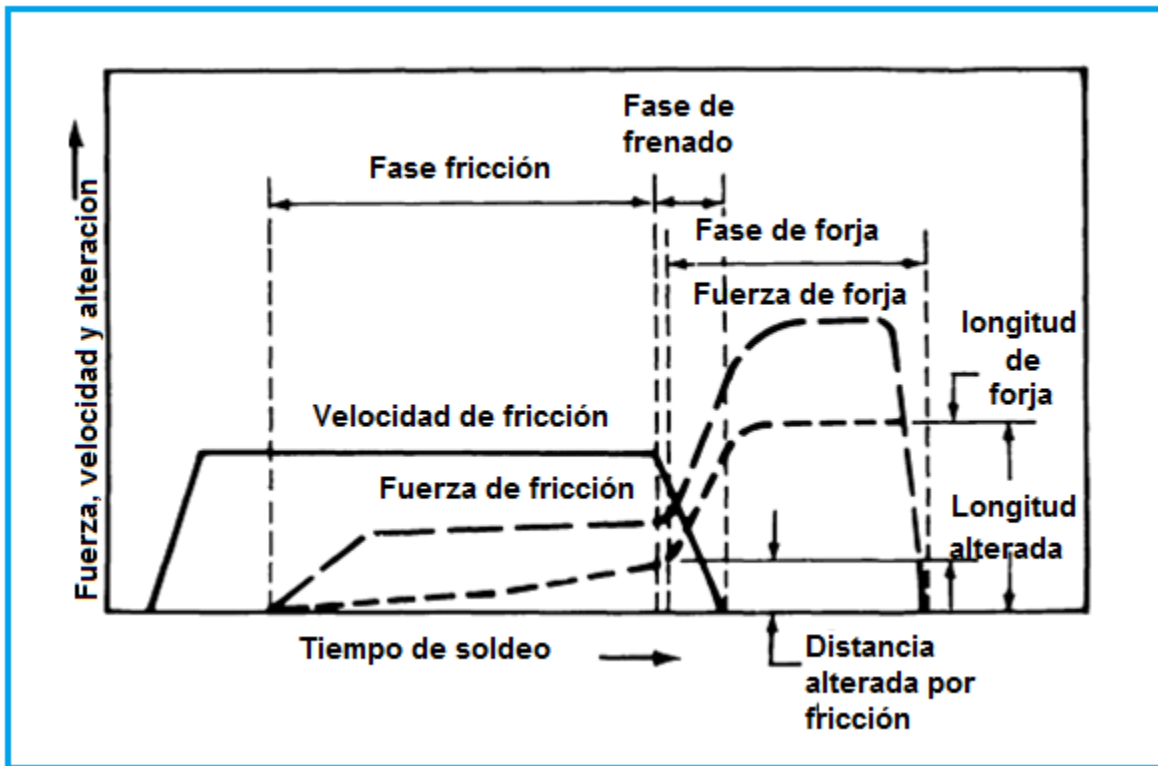


Figura 2.10. Diagrama de las fases de la soldadura por fricción directa.

La fase de forjado implica la aplicación de una mayor presión entre las piezas a soldar, ésta se produce en algún punto de la etapa de parada, ya sea mientras el husillo está desacelerando o bien cuando éste ha dejado de girar al finalizar la etapa de parada. En el primer caso se producirá una fuerza de torsión aplicada a la soldadura, mientras que el segundo caso, no existe fuerza de torsión, y la forja es afectada únicamente por la fuerza axial aplicada en el proceso.

### 2.3.1.1. Influencia de la velocidad rotacional (rpm).

Se ha establecido que una soldadura satisfactoria puede ser realizada para una amplia gama de materiales y tamaños, con velocidades periféricas en el intervalo de 75 a 105 m / min. Las velocidades más bajas no son recomendables debido a los altos pares desarrollados, mientras que una velocidad más alta produce una amplia zona afectada por el calor. La velocidad de rotación tiene una influencia importante en la temperatura del estado estacionario alcanzado en el proceso. La tasa de generación de calor y la disipación de calor se equilibran entre

sí en un valor constante que depende de la configuración del proceso, particularmente la velocidad de rotación. Este factor importante en la soldadura de metales diferentes, donde es posible formarse compuestos inter-metálicos. El mejor procedimiento para bajar la temperatura pico sería adoptar velocidades más bajas de rotación.

#### **2.3.1.2. Influencia de la presión axial.**

La presión es un parámetro importante en la soldadura por fricción, influye en el gradiente de temperatura, así como el par motor y la potencia. La presión de calentamiento elegida debe ser la suficiente para mantener las superficies en contacto íntimo y evitar la contaminación atmosférica, dependiendo también la presión de los materiales que se están soldando y su tamaño. Una baja presión aumenta la zona afectada por el calor debido a la entrada de una insuficiente potencia, mientras que una alta presión haría extruir los materiales plásticos prematuramente, forzando al material frío a entrar en contacto, obteniendo eventualmente defectos en la unión. La presión de forja depende de la resistencia en caliente de las aleaciones a unir. La presión elegida para esta operación debe ser suficiente para consolidar la unión.

#### **2.3.1.3. Influencia del tiempo de calentamiento.**

La duración del calentamiento se considera como el tercer parámetro básico del proceso, aunque depende de la velocidad de rotación y presión. La duración del calentamiento determina la entrada de energía en la unión y se rige por la deformación plástica de los materiales.

#### **2.3.1.4. Selección de parámetros para la soldadura.**

Una serie de materiales y sus combinaciones, tales como aceros al carbono de bajo, medio y alto nivel de carbono, aceros aleados, aceros rápidos, aceros inoxidable, cobre, aluminio y sus aleaciones respectivas están siendo ampliamente soldadas con este método. La tabla 2.1 sirve como una guía para la selección de parámetros para algunas de las combinaciones de materiales unidos comercialmente. Este cuadro indica los parámetros para un diámetro específico de

barra y podría también ser utilizado para elaborar los parámetros para otros diámetros con ligeras modificaciones. Así, la velocidad de rotación puede ser determinada utilizando la condición de una velocidad periférica constante. Sin embargo, el material perdido que se especifica en la tabla 2.1 sería suficiente para la mayoría de las dimensiones que son soldadas por fricción en la práctica.

**Tabla 2.1.** Parámetros de soldadura por fricción directa para metales de igual composición química. Barras de 25 mm de diámetro.

Metales	Velocidad RPM	Fuerza axial KN	Material perdido mm	Tiempo seg.
Acero SAE 1018	4600	53	2,5	2
Acero SAE 1045	4600	62	2,5	2
Acero SAE 4140	4600	67	2,5	2
Inconel 718	1500	220	3,8	3
Acero inoxidable Martencítico	3000	90	2,5	2,5
Acero inoxidable 410	3000	80	2,5	2,5
Acero inoxidable 302	3500	80	2,5	2,5
Cobre comercial	8000	22	3,8	0,5
Aleación de cobre 260	7000	22	3,8	0,7
Aleación de titanio TIGAL-4V	6000	36	2,5	2
Aleación de aluminio 1100	5700	27	3,8	1



**Tabla 2.2.** Parámetros de soldadura por fricción directa para materiales de distinta composición química. Barras de 25 mm de diámetro.

Materiales	Velocidad RPM	Fuerza axial KN	Material perdido mm	Tiempo total seg.
Acero SAE 1018 con Cobre	800	22	3,8	1
Acero Rápido M2 con Acero SAE 1045	3000	180	2,5	3
Aleación Níquel 718 con Acero SAE 1045	1500	180	3,8	2,5
Acero inoxidable 302 con Acero SAE 1020	3000	80	2,5	2,5
Acero alto en Carbono con Acero SAE 1018	4600	53	2,5	2,5
Aluminio SAE 6061 con Acero inoxidable 302	5500	22	5,1	3
Cobre con Aleación de Aluminio 1100	2000	33	5,1	1

### 2.3.2. Soldadura por fricción por inercia.

El método FRW (Inertia – Drive Friction Rotary Welding) por inercia utiliza un tipo de máquina similar a un torno, excepto el husillo que sostiene la pieza giratoria que está unida a un volante. El volante controla la entrada de energía a la soldadura. El momento de inercia del volante es una variable importante que se ajusta mediante la adición o eliminación en el volumen del volante. La cantidad de energía almacenada en el volante está controlada por su velocidad. Una vez que el cabezal gira a la velocidad requerida, el sistema de accionamiento se desacopla, dejando que el volante gire sólo por inercia. La presión axial se aplica entonces y se mantiene constante durante todo el proceso de soldadura, la energía cinética almacenada en el volante se disipa en forma de calor por fricción para producir la coalescencia entre las superficies empalmantes.

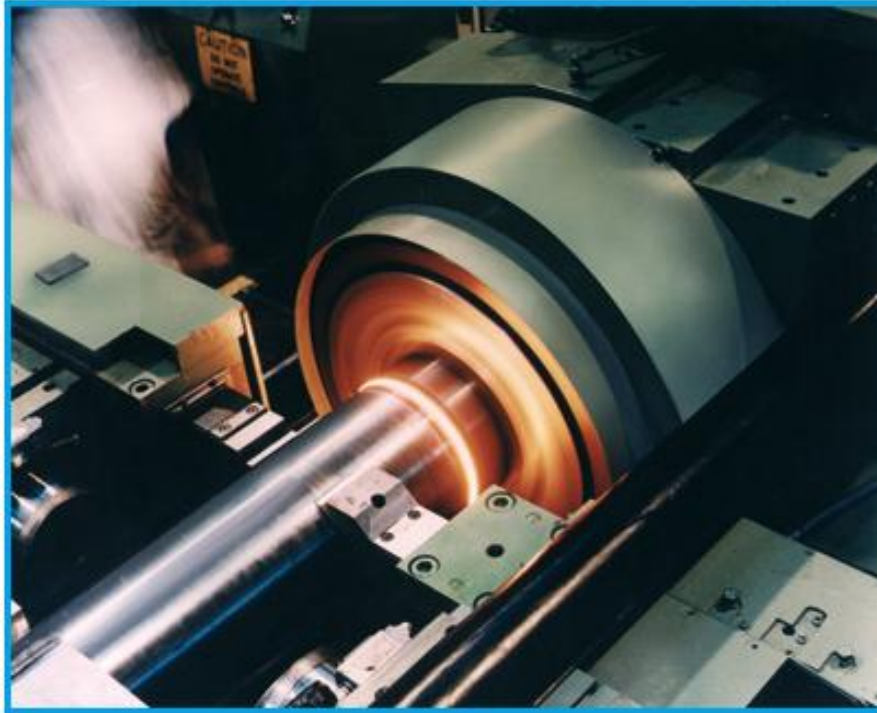


Figura 2.11 Máquina soldadora por fricción por inercia.

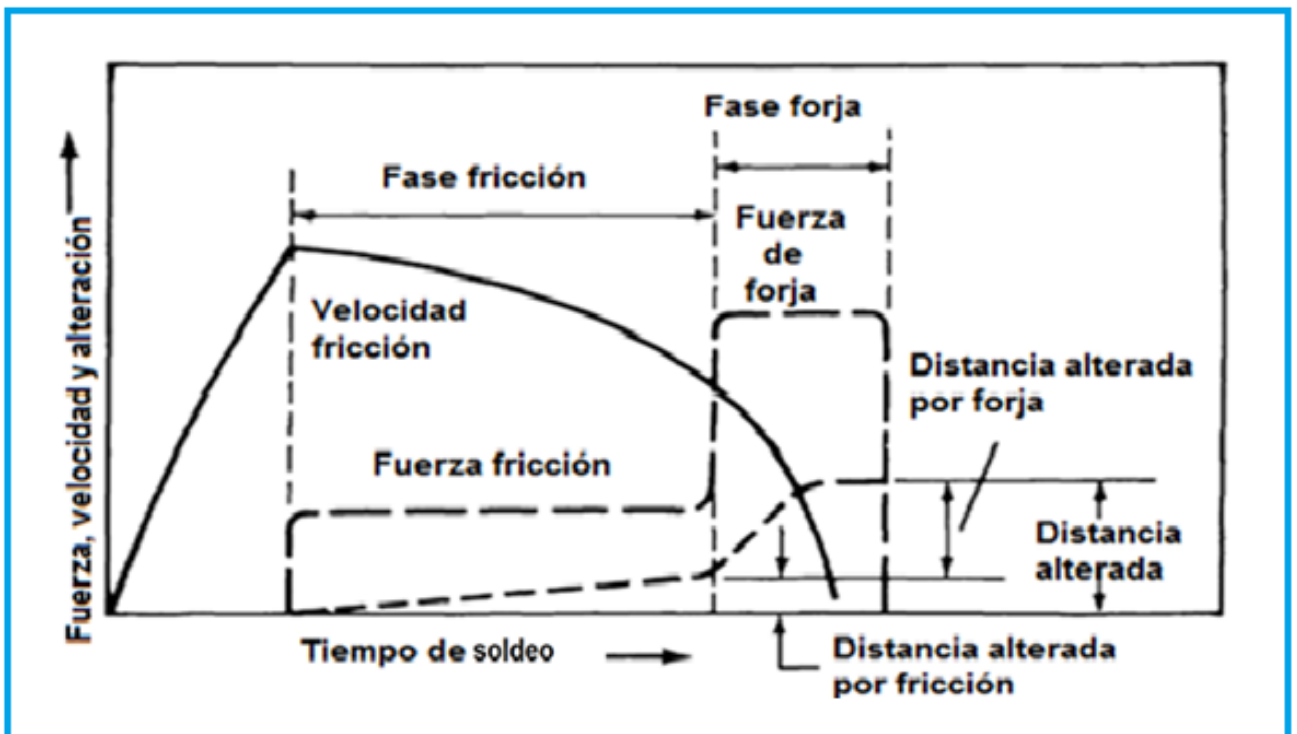


Figura 2.12 Diagrama de fases de la soldadura por fricción por inercia.

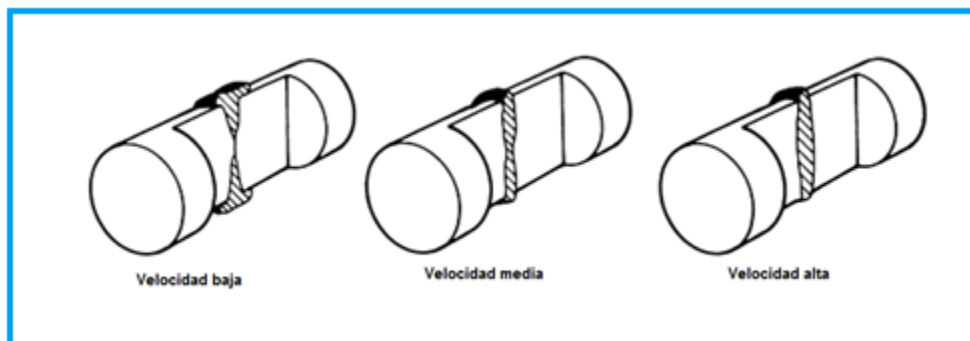
La presión aplicada reduce la velocidad de rotación, normalmente referida como una deceleración. En algunos casos, cuando el cabezal se ha detenido o está cerca de llegar a una parada completa, se puede aplicar una presión mayor llamada presión de forja. La figura 2.12 ilustra el proceso de unión por inercia, donde la soldadura tiene lugar típicamente en dos etapas: la fricción y la forja. Sin embargo, también se puede omitir la fase de forja, trabajando sólo con una presión constante.

La principal diferencia entre los métodos de transmisión directa y de inercia es la velocidad de fricción. En la soldadura por inercia, la velocidad de fricción disminuye continuamente durante la etapa de fricción, mientras que en la soldadura directa la velocidad de fricción permanece constante.

Las variables que controlan las características de la soldadura por inercia son tres: la velocidad periférica a la cual gira la pieza de trabajo, la presión axial y el tamaño del volante. Cada combinación de materiales tiene su propia gama de las variables de proceso óptimos, que se presentan a continuación.

#### **2.3.2.1. Influencia de la velocidad perimetral.**

Para cada combinación de materiales, existe una velocidad mínima de trabajo, por debajo de ésta los resultados de la soldadura no serán satisfactorios. El patrón de calentamiento en la soldadura por inercia, depende de una fuente de energía, una presión axial y principalmente la velocidad superficial. En el caso del acero bajo en carbono, a velocidades inferiores a 1,5 m/s, el patrón de la soldadura es estrecho, con forma de reloj de arena y borrosa en el centro. A velocidades más altas que 1,5 m/s la soldadura se convierte esencialmente en plana y de grosor uniforme en toda la pieza. A velocidades superiores a 5 m/s, la soldadura se redondea y es más gruesa hacia el centro. Mientras que las soldaduras satisfactorias se pueden realizar en aceros bajos en carbono por encima de 1,5 m/s, los aceros para herramientas requieren una velocidad mínima de 1,8 m/s.

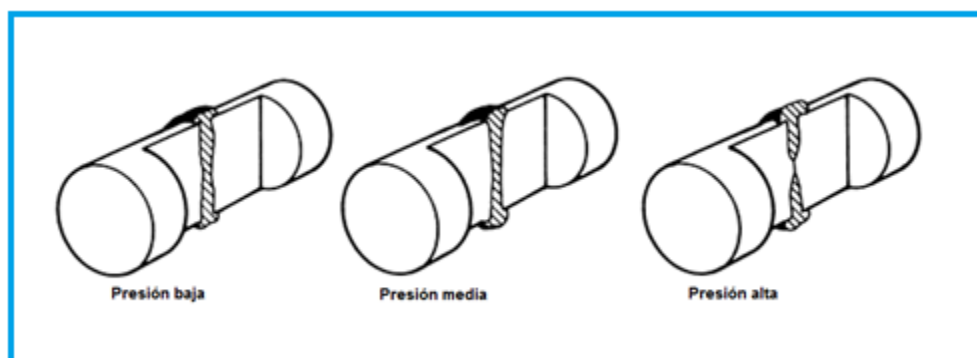


**Figura 2.13** Influencia de la velocidad de rotación en el proceso de soldadura por fricción por inercia.

### 2.3.2.2. Influencia de la presión axial.

La presión empleada para forzar a que las partes se unan tiene una influencia importante en los patrones de calentamiento.

El uso de altas presiones axiales estrecha la zona afectada por el calor y reduce el tiempo de soldadura. La temperatura alcanzada también se rige por la presión axial. Esto es útil en el control de la calidad de la soldadura y en la unión de materiales con diferentes temperaturas de fusión. Las altas presiones son equivalentes a velocidades superficiales bajas y viceversa con respecto a la apariencia de la soldadura.

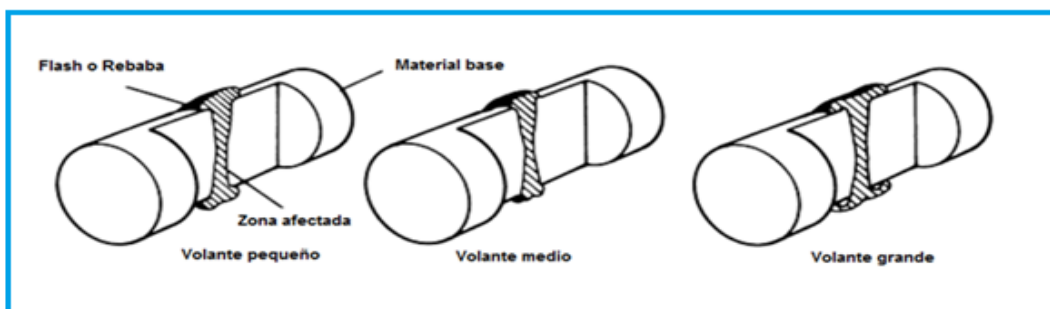


**Figura 2.14** Influencia de la presión axial en el proceso de soldadura por fricción por inercia.

### 2.3.2.3. Influencia del tamaño del volante.

La capacidad de potencia del volante está limitada sólo por la velocidad a la que puede ser retardado. La demanda máxima de energía se satisface con el

volante, parando en unos 0,5 segundos para los Aceros, 0,2 segundos para el Cobre y 0,1 segundos para el Tungsteno. Además, el volante suministra la fuerza de torsión de forja hacia el final del ciclo de soldadura. Por lo tanto, un material difícil de forjar requiere grandes volantes. Aunque el volante debe cumplir los requisitos mínimos de energía para la soldadura, una energía mayor suministrada por el volante (tanto como 200%) no afecta a la calidad de la soldadura. La energía adicional, por supuesto, provoca una mayor cantidad de rebaba o flash de material.



*Figura 2.15* Influencia del tamaño del volante en el proceso de soldadura por fricción por inercia.

#### 2.3.2.4. Selección de parámetros para la soldadura.

La soldadura por inercia es un proceso muy tolerante, en el que una amplia gama de ajustes puede dar una unión satisfactoria. La tabla 2.3. ilustra los parámetros recomendados para una amplia gama de materiales y su combinación, mientras que esta tabla sirve para seleccionar directamente las velocidades de rotación y la presión axial, el momento del volante de inercia se calcula a partir de los requerimientos de energía, utilizando la siguiente relación.

$$E = I\omega^2$$

donde E: Energía requerida

I : Momento polar de inercia

$\omega$ : Velocidad angular

**Tabla 2.3.** Parámetros de soldadura por fricción por inercia para materiales de igual composición química. Barras de 25 mm de diámetro.

Materiales	Velocidad RPM	Fuerza axial KN	Momento de inercia del volante Kg M <sup>2</sup>	Energía requerida KJ	Material perdido mm	Tiempo seg
Acero SAE 1018	4600	53	0,28	33	2,5	2
Acero SAE 1045	4600	62	0,33	38	2,5	2
Acero SAE 4140	4600	67	0,35	41	2,5	2
Inconel 718	1500	220	5,48	68	3,8	3
Acero inoxidable martensítico	3000	90	0,84	41	2,5	2,5
Acero inoxidable 410	3000	80	0,84	41	2,5	2,5
Acero inoxidable 302	3500	80	0,59	41	2,5	2,5
Cobre comercial	8000	22	0,04	14	3,8	0,5
Aleación de cobre 260	7000	22	0,05	14	3,8	0,7
Aleación de titanio TIGAL-4V	6000	36	0,07	22	2,5	2
Aleación de aluminio 1100	5700	27	0,11	20	3,8	1
Aleación de aluminio 6061	5700	31	0,13	23	3,8	1

**Tabla 2.4.** Parámetros de soldadura por fricción por inercia para materiales de distinta composición química. Barras de 25 mm de diámetro.

Materiales	Velocidad RPM	Fuerza axial KN	Momento de inercia del volante Kg M <sup>2</sup>	Energía requerida KJ	Material perdido mm	Tiempo seg
Acero SAE 1018 con Cobre	8000	22	0,06	20	3,8	1
Acero rápido M2 con Acero SAE 1045	3000	180	1,14	54	2,5	3
Níquel 718 con Acero SAE 1045	1500	180	5,48	68	3,8	2,5
Acero inoxidable 302 con Acero SAE 1020	3000	80	0,84	41	2,5	2,5
Acero alto en carbono con Acero SAE 1018	4600	53	0,35	41	2,5	2,5
Aluminio SAE 6061 con Acero inoxidable 302	5500	22	0,16	27	5,1	3
Cobre con Aleación de aluminio	2000	33	0,46	10	5,1	1

La rebaba o flash que se produce en el proceso depende del volante seleccionado y se debe determinar experimentalmente. Una vez que el sistema de volante y el tamaño de éste han sido seleccionados para un material dado, la rebaba es bastante exacta y reproducible.

#### **2.4. Aplicaciones.**

Los componentes soldados por fricción se encuentran en todas las áreas de la ingeniería, entre ellas están la industria aeroespacial, agrícola, automotriz, de defensa, marina y petrolera. Por ejemplo:

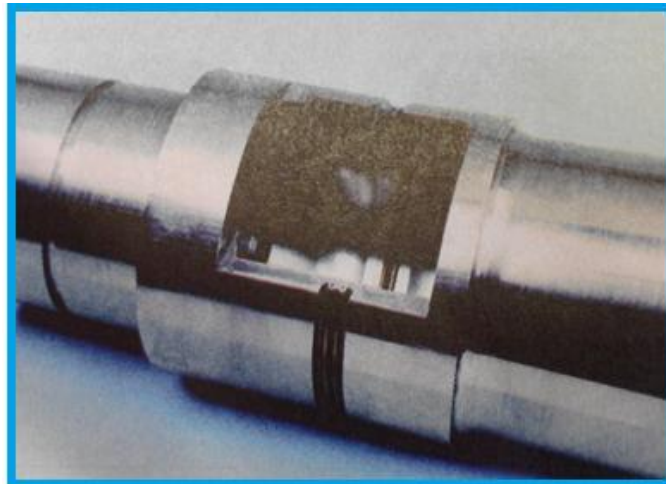
- Entre los componentes que se fabrican por el proceso de soldadura por fricción están engranajes, válvula de motor, tubos de ejes, componentes de la línea de transmisión de un vehículo, varillas de suspensión y amortiguadores.
- Los fabricantes de equipos agrícolas con frecuencia sueldan por fricción vástagos de pistones hidráulicos, rodillos guía, engranes, bujes, ejes y componentes similares.
- En la industria se emplean muchas uniones aluminio/cobre soldadas por fricción. Los aceros inoxidable se sueldan por fricción a aceros al carbono en diversos tamaños para emplearse en sistemas de impulso marinos y en bombas de agua para uso doméstico e industrial. Es común sustituir piezas mecánicas fundidas y forjadas de alto costo monetario por ensambles soldados por fricción.

#### **Aplicaciones en el área aeroespacial**

En la industria aeroespacial se utiliza para estructuras en el fuselaje, Blisks (discos utilizados en turbinas). Ofrece significativos ahorros de costos en comparación con otros métodos, como el mecanizado de bloques sólidos como materia prima



**Figura 2.16** Blisk de turbina de un avión, soldado por fricción agitación.



**Figura 2.17** Componente de ventilador de avión soldado por fricción.

### **Aplicaciones en el área de la construcción**

Es utilizada para unir partes de maquinaria de construcción cuyos componentes típicos incluyen cilindros y varillas hidráulicas, piezas giratorias y rodillos de mando.





**Figura 2.18** Variedad de pistones soldados por fricción.



**Figura 2.19** Pistón soldado por fricción.

### Aplicaciones en el área eléctrica

Entre los componentes eléctricos soldados por fricción se encuentran una gran gama de piezas bimetálicas para la distribución de energía eléctrica y plantas generadoras de baja y media tensión.



*Figura 2.20 Terminales eléctricos de aluminio – cobre.*

### Aplicaciones en el área automotriz

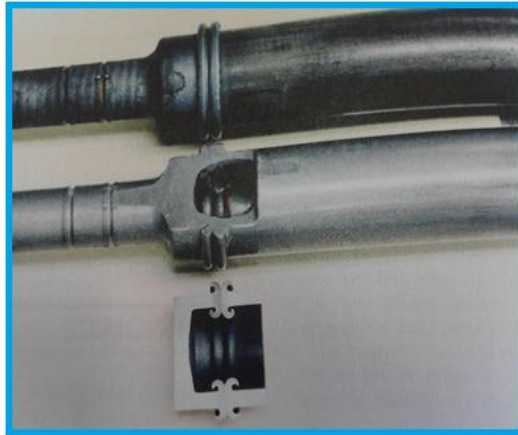
Una gran variedad de componentes para camiones y vehículos pesados se sueldan por fricción. Entre estos se encuentran ejes de dirección, engranajes de transmisión, válvulas de cilindros entre otros



*Figura 2.21 Engranaje de transmisión soldado por fricción.*



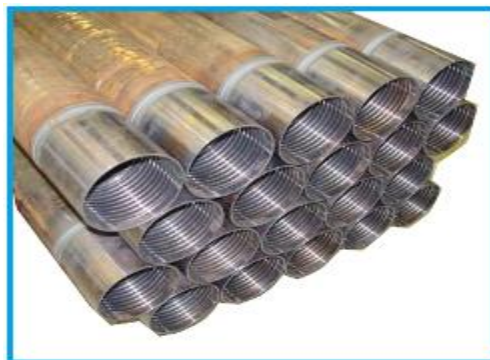
**Figura 2.22** Válvulas de motor soldadas por fricción.



**Figura 2.23** Semieje automotriz soldado por fricción

### Aplicaciones en el área petrolífera.

La soldadura por fricción es utilizada en la fabricación de barras de perforación (drill rods) para pozos de agua y tubos API (drill pipes) utilizados en la exploración de campos de petróleo.



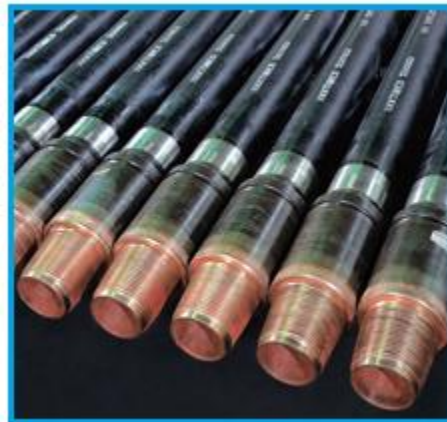
**Figura 2.24** Drill rods usados para la perforación del suelo en busca de agua, soldados en sus extremos por fricción.



**Figura 2.25** Drill rods usados para la perforación del suelo en busca de agua, soldados en sus extremos por fricción.



**Figura 2.26** Drill rods soldados en sus extremos por fricción.



**Figura 2.27** Drill pipes utilizados para la obtención de petróleo, soldados en sus extremos por fricción.



**Figura 2.28** Faena petrolera, utilización de drill pipes soldados por fricción.



**Figura 2.29** Drill pipes utilizados para la obtención de petróleo, soldados en sus extremos por fricción.



**Figura 2.30** Diversas aplicaciones de soldadura por fricción.

## **Ventajas y limitaciones.**

La soldadura por fricción, como cualquier otro proceso de soldadura, tiene ventajas y desventajas específicas, entre las cuales podemos encontrar:

### **Ventajas**

1. No requiere de metal de aporte, fundente ni gas protector.
2. El proceso es limpio desde el punto de vista ambiental, no se producen arcos, chispas, humo ni vapores generados cuando las piezas están limpias.
3. La soldadura por fricción es apropiada para soldar una gran parte de los materiales de ingeniería y además para la unión de muchas combinaciones de materiales disímiles.
4. En la mayor parte de los casos, la resistencia mecánica de la soldadura es equivalente o superior a la del más débil de los dos materiales que se unen.
5. No es necesario que el operador tenga habilidades o capacitación en el área de soldadura manual.
6. El proceso es fácil de automatizar para grandes volúmenes de producción.
7. Las soldaduras se producen con rapidez en comparación con otros procesos de soldadura.
8. Proceso recomendado para altos volúmenes de producción.
9. Reducción de costos en producción en serie.

### **Limitaciones**

1. En general, una de las piezas de trabajo debe tener un eje de simetría y poder girar alrededor de ese eje.
2. La preparación y alineación de las piezas de trabajo puede ser crucial para que el frotamiento y calentamiento sean uniformes.
3. Los costos de capital por equipo y herramental son elevados
4. No es posible soldar materiales auto lubricados, o que no sean forjables

## **CAPÍTULO III :**

### **DISEÑO DE MECANISMO PARA SOLDADURA POR FRICCIÓN DIRECTA.**

#### **3.1. Diseño del mecanismo.**

La finalidad del diseño y construcción del mecanismo es permitir la realización de la parte experimental del estudio de la soldadura por fricción rotacional, en un torno convencional

Para el diseño del mecanismo, que tiene como fin realizar la experiencia de soldadura por fricción, en el laboratorio de máquinas herramienta de la Universidad, se debieron tomar algunas consideraciones. Por ejemplo, el mecanismo debe ser capaz de soportar las vibraciones que tienden a desalinearse el eje imaginario entre la pieza giratoria y la pieza fija. Debe ser capaz de aplicar presión axialmente sobre la pieza en dirección del eje y ésta debe poder ser controlada con un manómetro, además se debe tomar en cuenta que el mecanismo será construido con recursos limitados, ya que los costos de los materiales y de la fabricación del mecanismo serán asumidos por el alumno seminarista.

#### **3.2. Construcción del mecanismo.**

La construcción del mecanismo se realizó en la Universidad, primero la estructura de la caja donde va el sistema que permite la aplicación de la presión necesaria para la realización del soldeo. Para la confección de la caja se han utilizado planchas de acero SAE 1045 de espesor 8mm con el fin de dar la rigidez necesaria al mecanismo.





**Figura 3.1** Mecanizado del pistón guía del mecanismo.



**Figura 3.2** Fabricación del sistema de guía para el pistón.



**Figura 3.3** Perforación del pistón para el sistema de sujeción.



**Figura 3.4** Mecanizado del cojinete de teflón.



**Figura 3.5** Camisa de acero para el sistema de guía del pistón.



**Figura 3.6** Gato hidráulico, capacidad 10 Toneladas.



**Figura 3.7** Manómetro rango de 0 – 160 Bar.

La fijación del mecanismo a la bancada del torno se realizará con la ayuda de un sistema de fijación provisto de un esparrago de  $\frac{1}{2}$ " de diámetro y una barra perforada como ilustra la figura 3.8.



**Figura 3.8** Montaje de mecanismo de soldadura por fricción en un torno convencional.

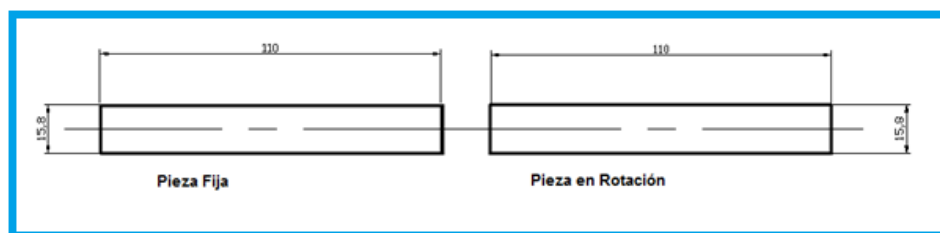
## CAPÍTULO IV :

### PARTE EXPERIMENTAL.

#### 4.1. Diseño de las probetas a soldar.

Para la realización de la etapa experimental se consideró la elaboración de probetas de acero SAE 1045 laminadas en caliente.

Las probetas para la unión por fricción rotacional serán de diámetro 15,8 mm y un largo igual a 110 mm (Figura 4.1).



*Figura 4.1* Diseño de las probetas para la parte experimental de la soldadura por fricción.

#### 4.2. Parámetros a controlar.

El procedimiento para efectuar el soldeo de las dos barras de acero SAE 1045 de 15,8 mm de diámetro comienza con el montaje del mecanismo diseñado y construido sobre la bancada del torno y alinear el eje del pistón del mecanismo con el eje del torno.

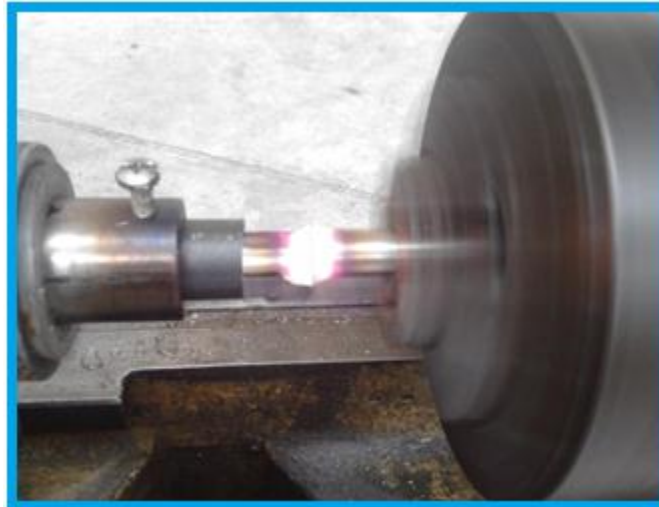


*Figura 4.2* Montaje de las piezas a soldar, una en el cabezal del el torno y la otra en el extremo de nuestro pistón del mecanismo.



**Figura 4.3** Montaje de las piezas a soldar, distancia en voladizo 30 mm cada extremo.

En la experiencia de unión por fricción a desarrollar se tomará como parámetros a controlar las RPM del cabezal del torno y la presión efectuada por el gato hidráulico al empujar la pieza fija contra la que está en movimiento, para producir el roce y por ende el calor necesario para que las piezas alcancen un estado plástico (presión de calentamiento) y también controlar la presión de forja con el torno detenido. El tiempo de duración del ciclo de soldadura, en términos prácticos será constante, teniendo una duración de entre 50 y 60 segundos.



**Figura 4.4** Proceso de soldadura por fricción realizado para barras de acero SAE 1045 de diámetro 15,8 mm.

En las experiencias a realizar se consideran tres velocidades rotacionales 1120, 1430 y 2000 rpm, una presión de calentamiento de 20 (bar) y una presión de forja de 70 (bar).



**Figura 4.5.** Piezas de acero soldadas por fricción directa, grupo a 2000 rpm.

Los tiempos del ciclo de soldadura variaron entre 50 y 60 segundos, obteniendo un acortamiento total de las piezas de acero SAE 1045 soldadas de 6 a 9 mm y una rebaba o flash de 18 a 21 mm de diámetro aproximado. Se aprecia en las experiencias realizadas una relación directa entre la velocidad rotacional (rpm) utilizada y el diámetro de la rebaba (flash) y acortamiento de la probeta, siendo el máximo para 2000 rpm.

A modo de prueba se realizaron ensayos de unión por fricción entre una aleación de aluminio SAE 6061 con aleación de aluminio SAE 6061. Esta experiencia se efectuó a una velocidad de 2000 rpm y a una presión de calentamiento de 10 bar y con una posterior presión de forja de 70 bar, obteniéndose en la pieza soldada un acortamiento de 12 mm y una rebaba o flash de 30 mm. (Figura 4.6)



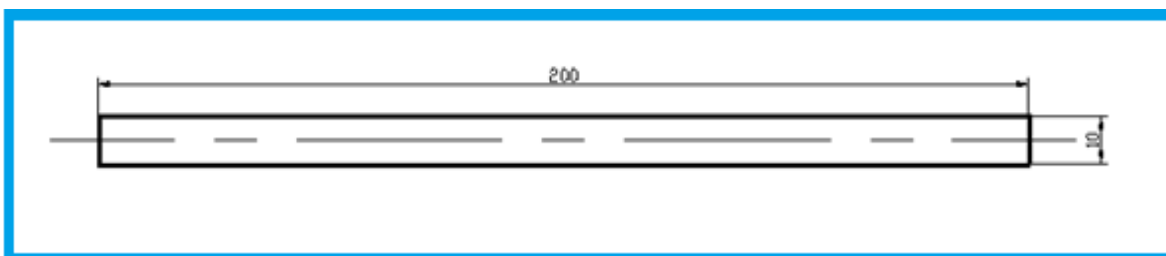
**Figura 4.6** Experiencia de soldadura por fricción directa aleación de aluminio – aleación de aluminio, barra de diámetro 25 mm.

### 4.3. Estudio de las uniones soldadas.

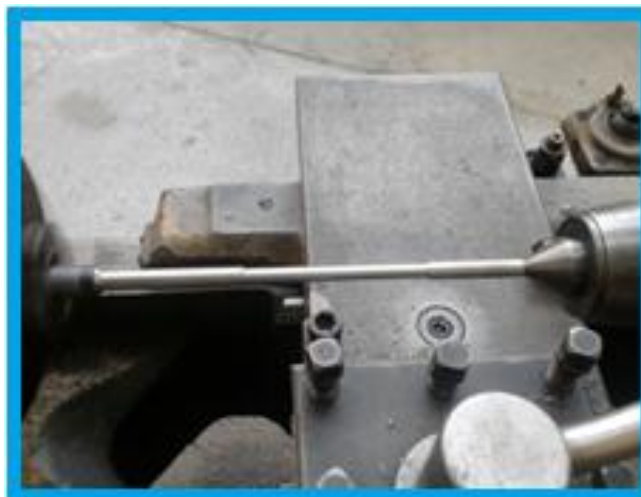
Para la evaluación de las uniones soldadas se realizarán a las probetas soldadas ensayos de tracción, de dureza y un examen metalográfico para observar y analizar la estructura en la zona de unión e interfase.

#### 4.3.1. Ensayo de tracción.

Para determinar las propiedades mecánicas de las uniones soldadas por fricción directa, sus dimensiones se ajustaron a las indicadas en la figura 4.7, con un diámetro de 10 mm y un largo de 200 mm las cuales se sometieron a ensayos de tracción en una máquina universal Zwick / Roell BT1 - FB100TN.



**Figura 4.7** Diseño de probetas para el ensayo de tracción, diámetro 10 mm y longitud 200 mm.



**Figura 4.8** Fabricación de probetas para el ensayo de tracción.



**Figura 4.9.** Máquina de ensayo universal Zwick / Roell BT1-FB100TN utilizada para la experiencia.

**Tabla 4.1** Ensayos de tracción realizados a las barras de acero SAE 1045 soldadas por fricción a 1120 rpm.

N° de ensayo	Esfuerzo fluencia Mpa	Resistencia a la tracción MPa	Alargamiento %
1	497	518	6,7
2	479	704	28,3
3	490	723	36,6

**Tabla 4.2.** Ensayos de tracción realizados a las barras de acero SAE 1045 soldadas por fricción a 1430 rpm.

N° de ensayo	Esfuerzo fluencia ( $\sigma_f$ ) Mpa	Resistencia a la tracción (Rt) MPa	Alargamiento (%A) %
4	483	630	12,3
5	447	486	7,2
6	488	717	28,5



**Tabla 4.3.** Ensayos de tracción realizados a las barras de acero SAE 1045 soldadas por fricción a 2000 rpm.

N° de ensayo	Esfuerzo fluencia Mpa	Resistencia a la tracción MPa	Alargamiento %
7	...	464	4,1
8	...	437	3,6
9	...	192	2,1

**Tabla 4.4.** Ensayo de tracción realizado a la barra de acero SAE 1045 sin soldar.

N° de ensayo	Esfuerzo fluencia Mpa	Resistencia a la tracción MPa	Alargamiento %
10	477	721	35,1

**Tabla 4.5.** Resumen de Ensayos de tracción a probetas.

N° de ensayo	Rpm	Esfuerzo fluencia Mpa	Resistencia a la tracción MPa	Alargamiento %
1	1120	497	518	6,7
<b>2</b>	<b>1120</b>	<b>479</b>	<b>704</b>	<b>28,3</b>
<b>3</b>	<b>1120</b>	<b>490</b>	<b>723</b>	<b>36,6</b>
4	1430	483	630	12,3
5	1430	447	486	7,2
<b>6</b>	<b>1430</b>	<b>488</b>	<b>717</b>	<b>28,5</b>
7	2000	...	464	4,1
8	2000	...	437	3,6
9	2000	...	192	2,1
<b>10</b>	<b>Sin soldar</b>	<b>477</b>	<b>721</b>	<b>35,1</b>

En relación a las uniones soldadas obtenidas por fricción, parte experimental del trabajo, las cuales fueron realizadas a tres velocidades de rotación (rpm)

distintas, es posible hacer los siguientes comentarios a partir de los ensayos de tracción efectuados a cada una de las probetas soldadas:

- Las propiedades mecánicas determinadas a través de ensayos de tracción, para cada una de las uniones soldadas obtenidas, fueron diferentes en cuanto al límite de fluencia, resistencia a la tracción y ductilidad, según las rpm utilizadas en el proceso de unión por fricción.
- Se alcanzan similares valores en el esfuerzo de fluencia para 1120 y 1430 rpm.
- Se tienen grandes diferencias en los valores de resistencia a la tracción para todas las rpm.
- Se alcanza una mayor ductilidad en las probetas soldadas a 1120 rpm. Para las probetas unidas a 1430 rpm se obtiene una ductilidad variable y menor, y para las probetas a 2000 rpm se tiene una unión frágil, con un porcentaje de alargamiento entre 2,1 y 4,1 %.

Ahora, al comparar las propiedades mecánicas obtenidas entre las uniones soldadas por fricción y la probeta patrón sin soldar (probeta de control) y considerar sólo aquellos ensayos satisfactorios (ensayos 2, 3 y 6), se aprecia que los valores de esfuerzo de fluencia, resistencia a la tracción y ductilidad son muy similares

Lo cual indicaría que esta diferencia en las propiedades mecánicas se debería a las limitaciones constructivas y económicas del dispositivo para realizar la experiencia de soldadura por fricción, como a la falta de automatización del proceso, todo lo cual se realizó en forma manual.

#### **4.3.2. Ensayo de dureza.**

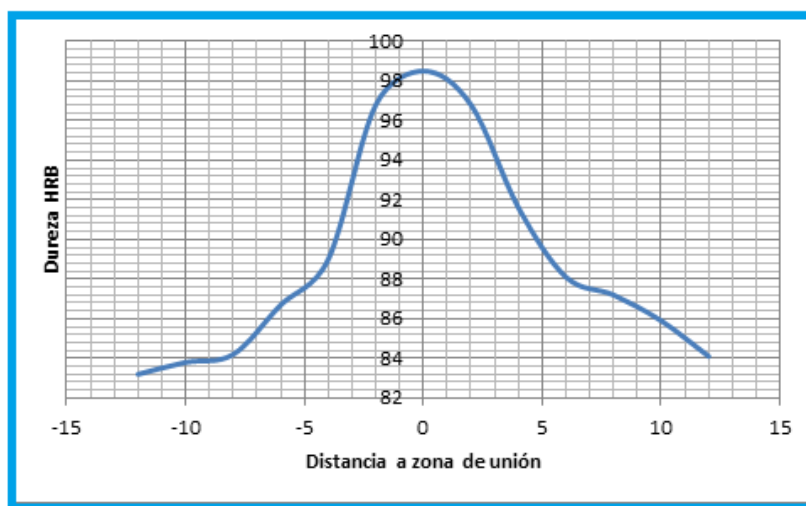
Para una probeta de acero SAE 1045, soldada por fricción a una velocidad de rotación de 2000 rpm y una presión de calentamiento y forja de 20 y 70 bar respectivamente, se le realizó un ensayo de dureza Rockwell B (HRB) para analizar cómo se distribuye ésta en la zona de soldadura.

Los ensayos de dureza fueron realizados consecutivamente a lo largo de la probeta a una distancia de 2 mm de separación de un punto de control a otro. Los resultados se resumen en la tabla 4.7 siguiente:

**Tabla 4.7.** Distribución de dureza HRB para Acero SAE 1045 de 15.8 mm de diámetro, soldado por fricción a 2000 rpm.

Posición	Dureza HRB
-12	83,2
-10	83,8
-8	84,2
-6	86,7
-4	89
-2	96,8
0	98,5
2	96,8
4	91,6
6	88,1
8	87,2
10	85,9
12	84,1

Obs: Las durezas HRB medidas en la probeta soldada, fueron realizadas cada dos milímetros desde el punto de unión.



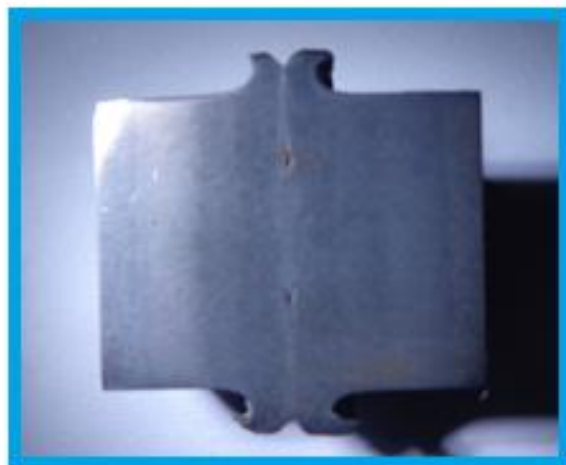
**Figura 4.9** Distribución de dureza HRB en Acero SAE 1045 en barra de 15.8 mm de diámetro, soldado por fricción a 2000 rpm.

Como se aprecia en la figura 4.9, los valores de la dureza se incrementan en la zona afectada térmicamente al aproximarse a la zona de unión, donde alcanza un máximo de 98,5 HRC

#### 4.3.3. Análisis metalográficos.

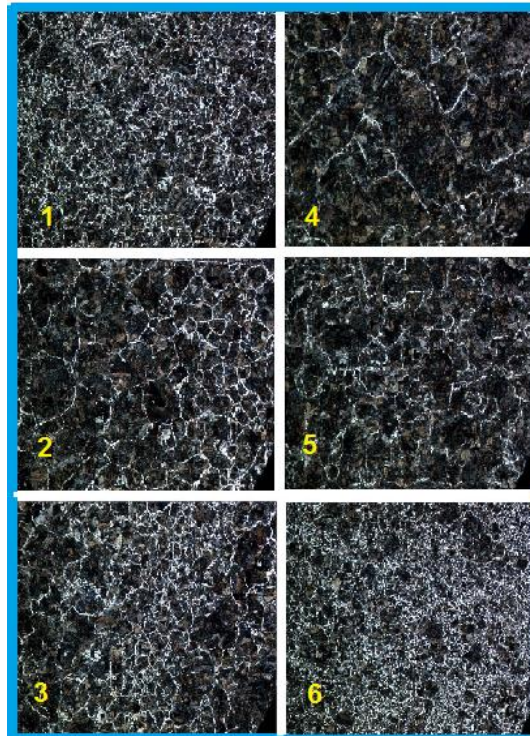
El análisis metalográfico tiene como fin observar los cambios de estructura que se producen en la zona de unión por efecto del calor generado, durante el proceso de soldadura por fricción.

La observación metalográfica realizada a una de las probetas soldadas por fricción a una velocidad rotacional de 2000 rpm, se realizó con un microscopio metalográfico con un aumento de 50X, donde la probeta se cortó y preparó para su observación. (Figura 4.10).



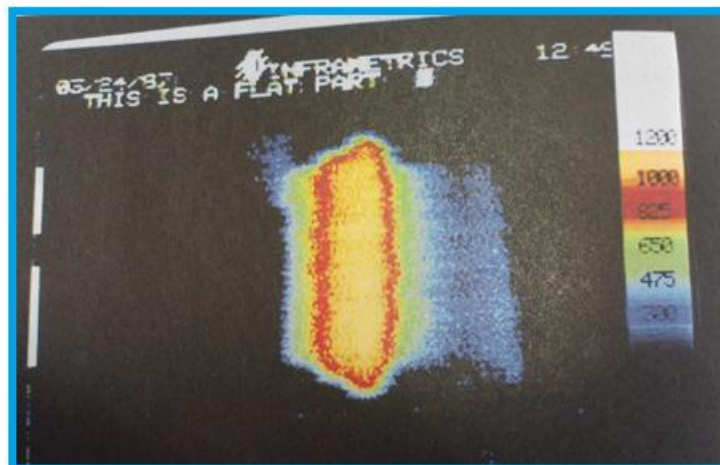
**Figura 4.10** Probeta para observación macrográfica de la soldadura por fricción realizada a acero SAE 1045 a 2000 rpm.

De las observaciones metalográficas realizadas a la zona de unión por fricción (Figura. 4.10), se aprecia que a distintas distancias de la zona de soldadura se obtienen distintas estructuras (Figura 4.11), donde la figura 4.11 (3) corresponde a la zona de unión.



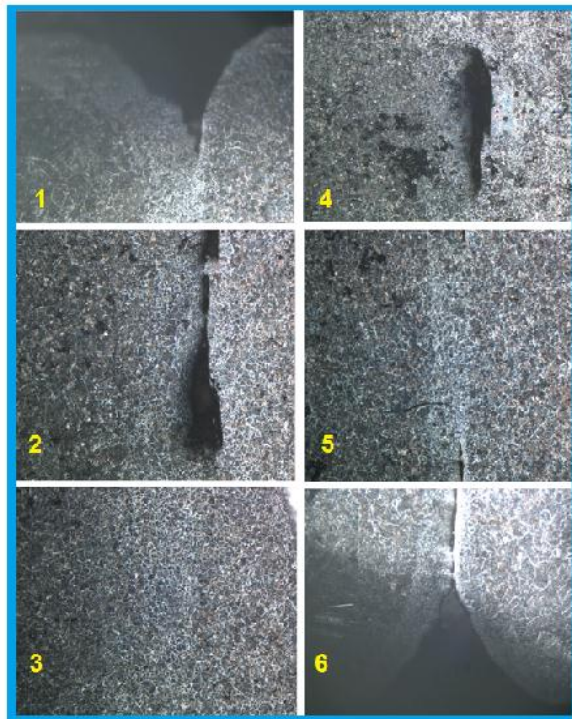
**Figura 4.11** Resultado ensayo metalográfico, en la zona de unión barrido a lo largo de probeta de izquierda a derecha.

El cambio de tamaño de grano a lo largo de la probeta, proviene del calor generado y el tiempo de enfriamiento, alcanzando temperaturas superiores a los 1000 °C y en declive cuanto más se aleje del punto de unión (Figura 4.12).



**Figura 4.12** Imagen inframétrica empleada para medir la temperatura de la soldadura por fricción.

Se puede observar el cambio de estructura, haciéndose el tamaño de grano más pequeño a medida que se aproxima a la zona de unión soldada, esto debido a la acción del calor provocado por el frotamiento pieza con pieza, para la realización del soldeo por fricción. También se observa en la zona de unión puntos con falta de fusión entre las superficies (Figura 4.13) generando entallas que afectan las propiedades mecánicas. Del análisis detallado de las observaciones metalográficas realizadas, figura 4.13, se aprecia el efecto flash en la zona superficial de la probeta soldada (imagen 1 y 6). En la imagen 3 se puede apreciar una estructura uniforme en la zona de soldadura y en las imágenes 2, 4 y 5 se muestra que la unión metalúrgica en la zona de soldadura no fue completa, estas fisuras y discontinuidades afectan las propiedades mecánicas y la calidad de la unión soldada, al comportarse como concentradores de esfuerzos, lo cual limita su resistencia a esfuerzos de tracción o torsión, como también reduce la ductilidad de la unión. Las fotos tomadas a partir de la muestra correspondiente a la figura 4.10 se realizaron de arriba hacia abajo a lo largo de la unión de soldadura.



**Figura 4.13** Resultado de la observación metalográfica (50X), barrido a lo largo de la unión desde arriba hacia abajo, donde se observa falta de unión entre las superficies de contacto.

## CONCLUSIONES.

Del presente Seminario de Titulación desarrollado en el tema de “Soldadura por fricción”, se desprenden varias conclusiones con respecto a este proceso. Una de ellas es, la elevada inversión necesaria en el equipamiento, por lo tanto es recomendable este proceso para producciones en serie o con un volumen alto de producción de un mismo producto. Además se debe tomar en cuenta el acortamiento que sufren las piezas al momento de ser soldadas, lo cual deriva a un sobre dimensionamiento inicial en la longitud de éstas y un eventual rediseño de la zona de unión.

Al evaluar las propiedades mecánicas de las uniones soldadas realizadas, a través ensayos de tracción, se observó que una parte de las probetas soldadas tuvieron una resistencia inferior al límite de fluencia del material. Este comportamiento se observó principalmente en aquellas probetas soldadas a una velocidad de rotación de 2000 rpm, debido a la elevada presión de calentamiento utilizada para esta velocidad. Al aplicar una presión excesiva, el material en estado plástico producto del calor provocado por la fricción, es extruido hacia la superficie transformándose en rebaba o flash excesivo, y dejando el material en el centro de la unión frío y sin un contacto íntimo. Lo anterior puede ser corroborado con las observaciones metalográficas, que muestran la presencia de falta de fusión y acusan fisuras en la zona de unión, las cuales actúan como concentradores de esfuerzos limitando el esfuerzo de fluencia y la ductilidad en estas uniones.

Pues bien, tomando en cuenta los resultados entregados por los ensayos de tracción se puede concluir que es posible la unión soldada de aceros utilizando el dispositivo fabricado, ya que, se obtuvieron resultados favorables en un 30% de las probetas traccionadas, en las cuales la fractura se produjo fuera de la zona de soldadura, lo que indica que el área de soldadura presenta una mayor resistencia a la tracción que el material en sí debido al enfriamiento después del proceso de unión.

Ahora para obtener una buena unión soldada por fricción se debe ajustar las variables operativas adecuadas y utilizar un equipamiento adecuado para ello.

El equipo diseñado y construido con recursos propios para desarrollar la parte experimental de este Seminario de Titulación, fue creado con el fin de demostrar que es posible desarrollar este proceso. Ahora si se desea producir piezas y elementos por este proceso y en altos volúmenes, será necesario realizar mayores inversiones para tener el equipamiento acorde, además de ajustar las variables operativas del proceso a los materiales y diseños de los elementos a unir.

En estas experiencias y con los ensayos realizados se puede apreciar que las probetas soldadas a 2000 rpm generaron uniones con un bajo límite de fluencia y una baja ductilidad, menor a un 4%, ósea uniones frágiles. Probetas soldadas con 1120 y 1430 rpm generaron uniones soldadas con esfuerzos de fluencia similares pero con ductilidades menores, destacando los ensayos 2, 3 y 6 cuyos porcentajes de alargamiento superan el 28%, sobresaliendo la probeta 3 (probeta soldada a una velocidad de 1120 rpm). Ésta última arrojó valores de esfuerzo de fluencia, resistencia a la tracción y alargamientos similares e incluso superiores a la del acero no soldado, lo que no significa que sean los parámetros óptimos para este tipo de acero. Ahora si se toma en cuenta que el sistema creado para soldar estos aceros tiene limitantes, como por ejemplo las revoluciones a las que gira la pieza, que no sobrepasan las 2000 rpm y las vibraciones del mecanismo que no permiten sobrepasar una presión de calentamiento de 50 bar, esto da cuenta que se podría estar en presencia de que 1120 rpm y a una presión de calentamiento de 20 bar serían los parámetros óptimos para una barra de acero SAE 1045 de 15.8 mm de diámetro, utilizando el mecanismo fabricado.

Al observar las probetas ya fracturadas, después del ensayo de tracción, se pudo apreciar que la soldadura no involucró el centro del material en las probetas a 2000 rpm, que al mecanizar las piezas con el fin de prepararlas para los ensayos de tracción, se barrió con una gran cantidad de material soldado reduciendo su área en un 60%, debilitando la probeta. Por ende, la soldadura debería tener mejores propiedades mecánicas, ya que, la muestra fue tomada en una zona donde la soldadura no penetró de manera adecuada.



Queda el desafío a futuro para mejorar el diseño del dispositivo, donde se pueda realizar un mejor control de las variables operativas asociadas a este proceso de soldadura.

## Bibliografía

- R. L. O' Brion. *American Welding Society Manual de Soldadura*. Octava Edición, México: Prentice – Hall Hispano Americana S.A., 1996. ISBN: 0 - 87171 - 354 - 3.
- Henry Horwitz. *Soldadura aplicaciones y práctica*, Mexico: Alfaomega, 1990. ISBN: 968 - 6062 - 73 - 4.
- *ASW HANBOOK Vol.6 Welding, Brazing, and soldering*, United States of America: ASW International, 1993. ISBN: 0 - 87170 - 382 - 3.
- Donald R. Askeland. *Ciencia e Ingeniería de los materiales*. Tercera Edición, México: International Thomson Editores, 1998. ISBN: 968 - 7529 - 36 – 9.
- Serope Kalpakjian, *Manufactura, ingeniería y tecnología*. Cuarta Edición, México: Pearson Educación, 2002. ISBN: 0 - 26 - 0137 - 1.

## Publicaciones web

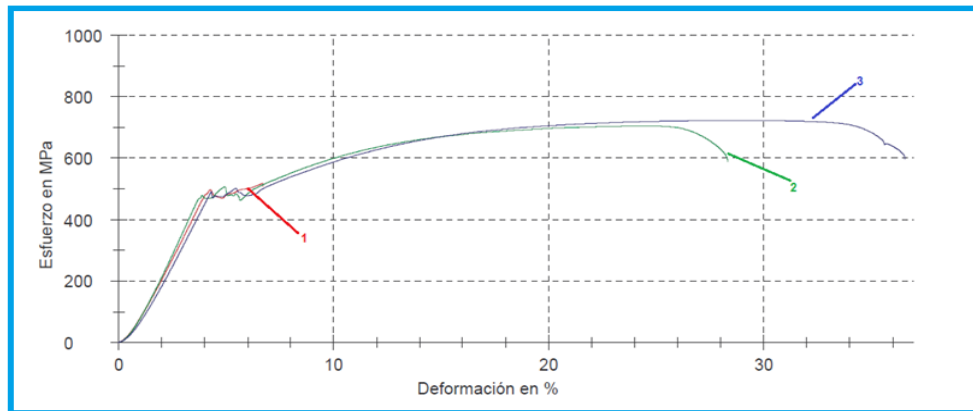
- <http://www.teamafw.com/pdf-library/metallurgical-lab-report.pdf>
- <http://ampcenter.sdsmt.edu/docs/D17-3%20FSW%20Draft%2016%20bolser%201-22-0908032009.pdf>
- [http://nopr.niscair.res.in/bitstream/123456789/7213/1/IJEMS%2013\(1\)%2037-44.pdf](http://nopr.niscair.res.in/bitstream/123456789/7213/1/IJEMS%2013(1)%2037-44.pdf)
- <http://www.aws.org/wj/supplement/mortensen11-01.pdf>
- <http://www.aws.org/wj/supplement/wj0708-178.pdf>
- <http://translate.google.cl/translate?hl=es&langpair=en%7Ces&u=http://www.nctfrictionwelding.com/process.php>
- <http://www.ingenieria.unlz.edu.ar/proyecto/archivos-cms/papers/34.pdf>
- <http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/3234/1/52167-1.pdf>

## Anexo 1

Ensayos de tracción a probetas de acero SAE 1045 soldadas por fricción rotacional directa.

### Anexo 1.1.

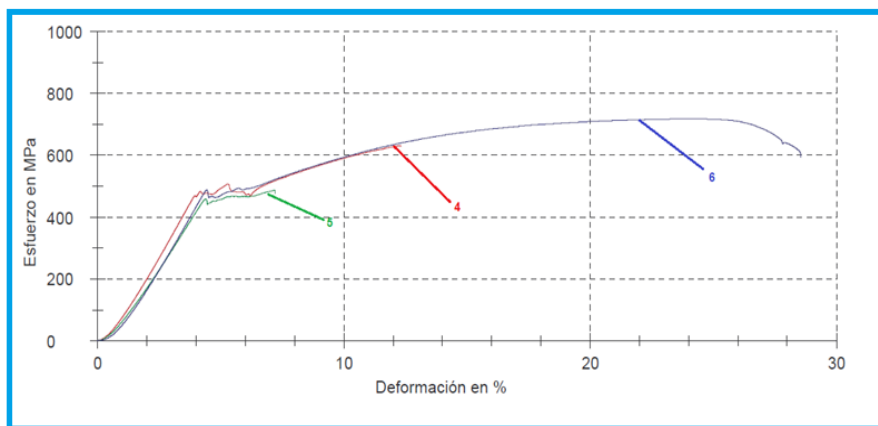
Diagrama Esfuerzo – Deformación de los ensayos realizados a las barras de acero SAE 1045, soldadas por fricción rotacional directa a 1120 rpm.



**Figura A.1** Diagrama  $\sigma - \epsilon$  para las barras de acero SAE 1045 soldadas a 1120 rpm.

### Anexo 1.2.

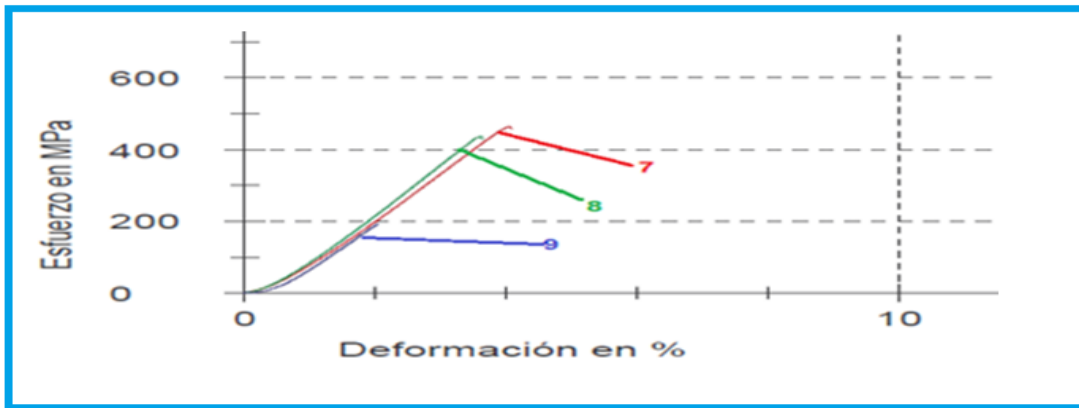
Diagrama Esfuerzo – Deformación de los ensayos realizados a las barras de acero SAE 1045, soldadas por fricción rotacional directa a 1430 rpm.



**Figura A.2** Diagrama  $\sigma - \epsilon$  para las barras de acero SAE 1045 soldadas a 1430 rpm.

**Anexo 1.3.**

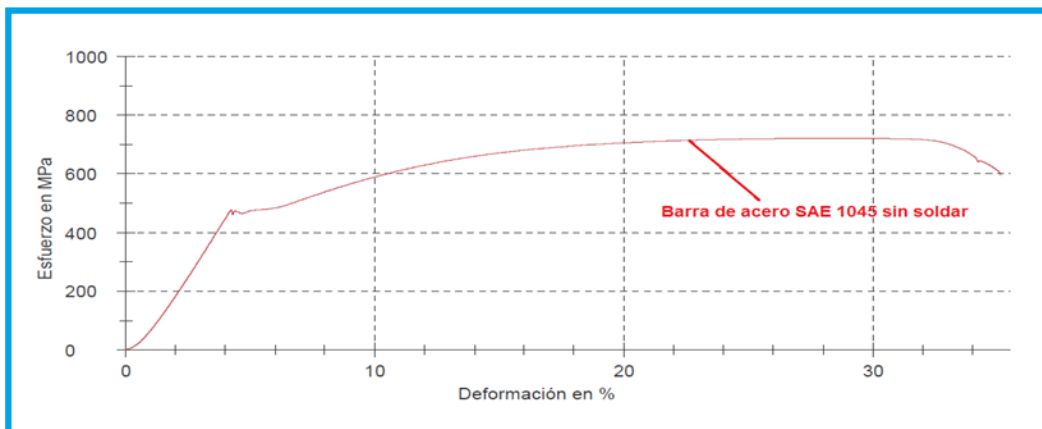
Diagrama Esfuerzo – Deformación de los ensayos realizados a las barras de acero SAE 1045, soldadas por fricción rotacional directa a 2000 rpm.



*Figura A.3* Diagrama  $\sigma - \epsilon$  para las barras de acero SAE 1045 soldadas a 2000 rpm.

**Anexo 1.4.**

Diagrama Esfuerzo – Deformación del ensayo realizado a la barra de acero SAE 1045, sin soldar (probeta de control).



*Figura A.4* Diagrama  $\sigma - \epsilon$  para la barra de acero SAE 1045 sin soldar.