

01127
24



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO.**

FACULTAD DE INGENIERÍA.

***"DISEÑO Y ADAPTACIÓN DE UN SISTEMA
DE SOLDADURA POR FRICCIÓN"***

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO MECÁNICO
P R E S E N T A N:

PEÑA BANDALA | ROBERTO
— ROJAS CRUZ DAVID ANTONIO
SANDOVAL MURCIA MARIO

DIRECTOR DE TESIS

ING. JESÚS ROVIROZA LOPEZ.

MÉXICO, D. F.

NOVIEMBRE 2003

A

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

A la Universidad Nacional Autónoma de México:

Que nos dio la oportunidad de crecer profesional y personalmente. Nos dio todo lo que ahora somos y es donde pasamos los mejores años de nuestras vidas.

A los amigos:

Gracias a todos ustedes que nos apoyaron y compartieron sus experiencias con nosotros. Esperamos que lo sean para toda la vida.

A todos nuestros profesores:

Que siempre estuvieron ahí, dispuestos a prepararnos y ayudarnos en todo momento. Gracias por compartir su experiencia con nosotros.

Al Ingeniero Jesús Roviroza López:

Gracias por guiarnos y ayudarnos en la realización de este trabajo, con sus consejos, comentarios y sobre todo su amistad.

A Mis Padres Martha, Roberto y mi hermana Liliana por su cariño y apoyo durante toda mi vida.

A mi abuelita Margarita, a mis abuelitos Antonio y Manuel por los sabios consejos que solo el tiempo es capaz de dar.

A todos Mis Tíos y tías, Gracias por su apoyo incondicional en todo momento, así como a todos mis primos.

Y a todos mis amigos que forman parte de este logro.

Roberto Peña Bandala

A mi Mamá Virginia:

Quien me ha dado la vida, mucho apoyo, mucha comprensión y que sin su ayuda no hubiera llegado a este momento. Te amo mamá.

A mi Papá Antonio:

Que me enseñe que la vida hay que disfrutarla y a trabajar mucho para lograr lo que queremos. Gracias donde quiera que estés.

A mis hermanas:

Quienes me han dado cariño y mucho animo para seguir adelante. Las quiero Vero, Sonia y Ale.

A Aída:

Quien me enseñe que la vida es hermosa y que con su apoyo, motivación y cariño he logrado conseguir las cosas mas importantes en mi vida, a quien amo y amaré toda la vida. Sabes que esto es por ti.

David Antonio Rojas Cruz

DEDICO ESTE TRABAJO:

A mis padres por su amor y confianza que me han brindado siempre. Por el apoyo que me dieron durante todos mis estudios y gracias al cual he podido salir adelante.

A mis tías Gloria y Noemí y a mi prima Aurora por su cariño y ayuda que me han proporcionado desde que era niño.

A mis hermanos por su inquebrantable amistad y confianza, por todos los momentos que hemos pasado juntos.

A mis familiares por su incondicional amistad y apoyo.

A mis amigos que me han regalado su compañía y me han ayudado en muchas ocasiones.

Mario Sandoval Murcia

ÍNDICE.

Introducción.....	1
CAPÍTULO 1. Importancia e Historia de la Soldadura.....	4
Antecedentes históricos de la soldadura.....	4
Algunas definiciones básicas.....	8
Procesos de soldadura y agrupamiento.....	9
Diagrama maestro de los procesos de soldadura.....	11
La importancia de la soldadura.....	15
CAPÍTULO 2. La fricción y sus leyes.....	20
Desarrollo histórico.....	20
La fuerza de fricción.....	22
Análisis de la generación de la fuerza de fricción.....	23
Leyes de la fricción.....	25
Cojinetes axiales: fricción de disco.....	26
CAPÍTULO 3. El proceso de soldadura por fricción y sus aplicaciones...	29
Definición y variaciones del proceso.....	29
Métodos de aporte de energía.....	31
Relación entre las variables.....	34
Máquinas para soldadura por fricción.....	38
Ventajas y Limitaciones.....	40
Materiales soldados.....	41
Aplicaciones de la soldadura por fricción.....	44
CAPÍTULO 4. Diseño del dispositivo.....	47
Definición del problema.....	48
Diseño conceptual.....	55
Adecuación del diseño para su realización.....	67
Diseño de detalle.....	70

CAPÍTULO 5. Pruebas y resultados	74
Procedimiento para operar la máquina de soldadura por fricción.....	74
Tabla de resultados.....	76
Pruebas de tracción.....	79
Consideraciones importantes.....	81
CONCLUSIONES	82
BIBLIOGRAFÍA	84
APÉNDICES.	
Apéndice A: Friction Stir Welding (FWS).....	87
Apéndice B: Datos y Gráficas de las pruebas de tracción.....	89
Apéndice C: Propiedades de materiales.....	97
Apéndice C: Planos.....	99

INTRODUCCIÓN.



"Vulcano y los forjadores de hierro"

Gracias al desarrollo de nuevas técnicas durante la primera mitad del siglo XX, la soldadura sustituyó a la unión con tornillos y al remachado en la construcción de muchas estructuras, como puentes, edificios y barcos. Esta es una técnica fundamental en la industria del motor, en la aeroespacial, en la fabricación de maquinaria y en la de cualquier producto hecho con metales. El tipo de soldadura más adecuado para unir dos piezas de metal depende de las propiedades físicas de los metales, de la utilización a la que está destinada la pieza y de las instalaciones disponibles.

La soldadura es parte fundamental en cualquier proceso de producción, y de acuerdo a los expertos "cuando se habla de soldadura se habla de vidas humanas, cualquier detalle o falla en algún proceso de soldadura puede causar grandes desastres".

El tema de este trabajo es presentar una de las técnicas existentes para soldar y que apareció alrededor de los años 40's: la soldadura por fricción, sus aplicaciones y todos los factores necesarios para realizar este proceso de la mejor manera. La soldadura por fricción entra dentro de los procesos de soldadura de estado sólido.

La soldadura de estado sólido es un "grupo de procesos de soldadura que produce la unión de las superficies por medio de la aplicación de presión a temperaturas por debajo del punto de fusión del metal base, sin la



adición del metal de aporte de soldadura fuerte o de soldadura blanda". En todos los procesos, el tiempo, la temperatura y la presión, individualmente o en combinación, producen la coalescencia del metal base sin la fusión significativa de los metales base.

En principio, la soldadura por fricción es uno de los procesos más simples. Dos piezas son giradas entre sí con las superficies en contacto para que se produzca calentamiento por fricción en la intercara. Luego es aplicada presión axial hasta que se sueldan las dos partes. El proceso puede ser utilizado para una escala amplia de aleaciones ferrosas y no ferrosas y metales distintos, incluyendo la más difícil combinación, aluminio y acero al carbono. La soldadura por fricción es un proceso que se aplica a elementos en su mayoría, de sección transversal circular, pueden soldarse barras sólidas hasta de 10 cm y tubos hasta de 25 cm de diámetro y es utilizado en países de Europa y Estados Unidos principalmente.

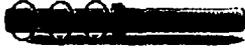
En 1994, dada la preocupación de una mano de obra calificada en soldadura, surge la representación en México de la American Welding Society, (AWS), y en 1999 se conforma lo que sería la Sociedad Mexicana para la Soldadura, (SMS), en convenio bidireccional de apoyo con la AWS, para reforzar el trabajo de actualización, capacitación, certificación y difusión de la misma industria.

La problemática de la industria de la soldadura presenta un rezago tecnológico de más de 20 años, además de no contar con cifras oficiales de cuál es el mercado existente de la industria de la soldadura, incluso aún la normatividad existente se rige bajo los estatutos de la AWS de los Estados Unidos.

La Zona Metropolitana de la Ciudad de México ocupa el primer lugar en producción de soldadura, mientras que Monterrey el segundo y Guadalajara el tercero. México es el segundo socio comercial de Estados Unidos, de aquí la importancia de que en México se cuente con avances y desarrollos tecnológicos en el campo de la soldadura. El trabajo que nosotros presentamos se enfoca más específicamente a un proceso que en nuestro país es muy poco conocido, la soldadura por fricción.

El presente trabajo esta enfocado a la implementación del proceso a nivel laboratorio así como mostrarlo y difundirlo, con la seguridad de poder obtener una unión de muy buena calidad, confiable y rápida. Por ello el objetivo de la tesis es **"implementar un sistema de unión de materiales mediante el proceso de soldadura por fricción adaptándolo a un tomo convencional con fines didácticos, para el trabajo de piezas de sección transversal circular"**.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



En el capítulo 1 hablaremos de la importancia de la soldadura en el mundo industrial, en la ciencia y en el desarrollo de nuevas tecnologías, también daremos un breve recorrido por la historia de la soldadura. Por último se hará una descripción de los procesos y agrupamientos de la soldadura basándonos en la clasificación de la AWS.

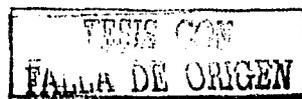
En el capítulo 2 definiremos el fenómeno de fricción, un poco de historia y los diferentes tipos de fricción.

Para el capítulo 3 describiremos el proceso de soldadura por fricción, sus variables y los diferentes tipos de aporte de energía, sus aplicaciones, ventajas y desventajas.

En el capítulo 4 mostraremos el diseño y los análisis del dispositivo para poder implementar el proceso de soldadura por fricción con la ayuda de un torno convencional marca ROMI de los talleres de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ingeniería de la UNAM.

El funcionamiento de la máquina, las pruebas y muestras soldadas mediante el dispositivo fabricado, podremos verlo en el capítulo 5.

Posteriormente se presentan las conclusiones a las que se llegaron con el trabajo realizado y por último se puede consultar la bibliografía utilizada.



1. IMPORTANCIA E HISTORIA DE LA SOLDADURA.

- 1.1 Antecedentes históricos de la soldadura.
- 1.2 Algunas definiciones básicas.
- 1.3 Los procesos de soldadura.
- 1.4 La importancia de la soldadura.

La soldadura ha sido practicada desde que la humanidad aprendió a trabajar los metales (aproximadamente hace tres siglos). Originalmente, los metales eran soldados a fuerza de golpes, y los soldadores eran respetados artesanos. La soldadura eléctrica fue inventada a principio del siglo XIX, en plena revolución industrial. Era considerado un proceso crudo, sucio y primitivo, en el que el único requisito era derretir un poco de metal entre dos piezas de manera que estas se unieran. Este crudo proceso, sin embargo, demostró ser tan económico y eficiente que su uso se fue propagando a aplicaciones con responsabilidad creciente.

1.1 ANTECEDENTES HISTORICOS DE LA SOLDADURA

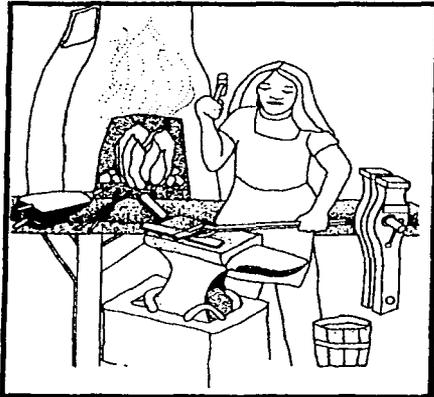


Figura 1.1 - La operación de soldadura debe haberse visto en forma similar a esta ilustración durante el siglo XVII.

La gran mayoría de los procesos de unión de metales han sido inventados en los últimos años, pero algunos especialmente la *soldadura por forja* tiene una larga historia. Dice la tradición que hace aproximadamente 2500 años, un herrero griego de nombre **Glaukos**, que vivía en la ciudad de Khios, invento la *forma de soldar el hierro* (figura 1.1).¹

Con el procedimiento de dicho herrero, se calentaban las piezas de hierro en un horno o forja hasta que se ablandaba el

¹ Henry Horwitz, P. E.- *Soldadura: aplicaciones y práctica*
Editorial AlfaOmega Massachusetts E.U.A

metal, después, valiéndose del martilleo, se les fusionaba hasta formar una unidad. Anteriormente a este tiempo, los metales se unían por remachado. La soldadura evolucionó primeramente como técnica de principal importancia económica cuando se extendió el uso del hierro, siendo necesaria no sólo para poder hacer el acabado de productos, sino también como parte del proceso mismo de fabricación de hierro.

Si bien es muy difícil precisar la fecha exacta de la aparición de la soldadura como proceso de unión de metales, la historia nos dice que durante la Edad Media ya se utilizaba la soldadura.

Durante la Edad de Hierro, los egipcios (figura 1.2) y otros pueblos del Mediterráneo Oriental aprendieron a soldar y a unir piezas de hierro. Se han encontrado muchas armas y herramientas hechas aproximadamente 1000 años antes de Cristo².

Una gran cantidad de los armamentos producidos durante la Edad Media eran también fabricados mediante soldadura. Los dardos lanzados con ballestas tenían una punta de acero, estando unidas sus puntas mediante soldadura. Los cañones eran fundidos en bronce o se construían soldando entre sí bandas de hierro y para la defensa se empleaba la soldadura para fabricar armaduras. Con el perfeccionamiento de las técnicas de fabricación de hierro durante los últimos años de la Edad Media, la importancia de la soldadura en la producción y fabricación del metal, disminuyeron. Posteriormente, ya en el siglo XV, fue inventado el alto horno y fueron adoptados los procesos indirectos de fabricación del acero. Un resultado de este desarrollo fue la disponibilidad de un material de fundición económico. Las fundiciones de hierro fueron utilizadas para un determinado número de productos prefabricados de hierro forjado y soldado, siendo un ejemplo importante el cañón que con tanto éxito fue fabricado por los talleres de fundición de aquella época.

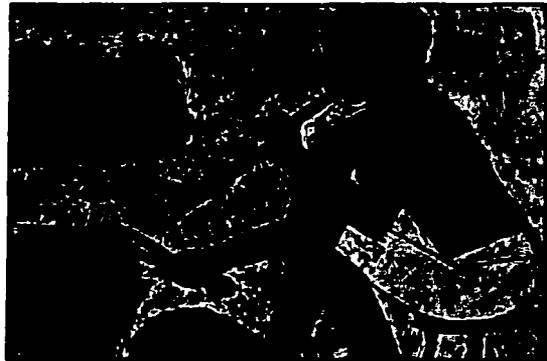


Figura 1.2 – Los Egipcios aprendieron a soldar, según muestran grabados encontrados.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

² Howard B. Cary .- Manual de Soldadura Moderna -Tomo 1 2a Edición Editorial Prentice Hill Hispanoamericana.

El proceso de soldadura, tal como lo conocemos actualmente, fue descubierto en el siglo XIX. Se atribuye a sir Humphry Davy (figura 1.3), de Inglaterra, el haber proporcionado las bases para la soldadura moderna merced a dos descubrimientos. Uno el del acetileno y otro, la producción de un arco entre dos electrodos de carbono sirviéndose de una batería. A mediados del siglo XIX se inventó el generador eléctrico y el alumbrado de arco se volvió muy popular. Durante el período de 1877-1903 se desarrollaron la soldadura y el corte con gas. Se desarrolló la soldadura de arco utilizando el arco de carbono y el arco metálico, y la soldadura de resistencia, en gran parte como la conocemos actualmente, se convirtió en un proceso práctico de unión.



Figura 1.3 – Sir Humphry Davy.

La primera Guerra Mundial trajo consigo una tremenda demanda en la producción del material de metal, y la utilización de la soldadura fue puesta en marcha. Surgieron muchas compañías en Estados Unidos y Europa para manufacturar diversos tipos de máquinas de soldadura y de electrodos para satisfacer la demanda. Se desarrollaron innovaciones, y la mayoría de ellas fueron exitosas. Inmediatamente después de la guerra, en 1919, veinte miembros del Wartime Welding Committee (Comité de Soldadura en Tiempos de Guerra) de la Emergency Fleet Corporation, bajo el liderazgo de Comfort Avery Adams, fundaron la American Welding Society (figura 1.4), como una organización no lucrativa dedicada al desarrollo de la soldadura y de los procesos afines.

La soldadura de corriente alterna fue inventada en 1919 por C. J. Holslag. Y en 1920, se introdujo la soldadura automática que utilizaba un alambre de electrodo desnudo operado con corriente directa y un voltaje de arco como base para regular la alimentación del alambre del electrodo. La soldadura automática fue inventada por P. O. Nobel, de la General Electric Company. Se usó para reconstruir ejes de motores y ruedas de grúas. También se usó en la industria

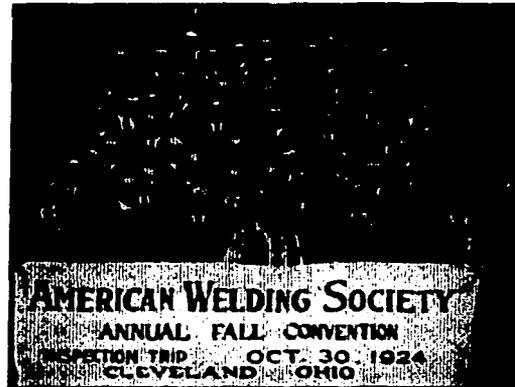


Figura 1.4 – Fundación de la American Welding Society.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

automotriz para producir cajas de puentes o ejes traseros. Durante los años 20's hubo un interés considerable en proteger el arco y el área que se iba a soldar por medio de gases aplicados externamente. Se descubrió que la atmósfera de hidrógeno y nitrógeno en contacto con el metal soldado y fundido, causaba rupturas y soldaduras quebradizas y algunas veces porosas. Se realizaron investigaciones y se cambió el hidrógeno por hidrógeno atómico.

La soldadura por arco de tungsteno con gas tuvo sus inicios a partir de una idea de C. L. Coffin para soldar en una atmósfera de gas no oxidante, la cual patentó en 1890. El concepto fue refinado al final de los años veinte por H. M. Hobart, cuando usó helio como protección, y por P. K. Denvers, quien uso argón. La amenaza de la Segunda Guerra Mundial creó la necesidad de soldar el magnesio para construir aviones de combate. El proceso de Hobart y Denvers, era ideal para soldar magnesio, acero inoxidable y aluminio. Fue perfeccionado y patentado por Meredith, quien le llamó soldadura "Heliarc". El otro concepto ideado por Hobart y Denvers fue el proceso de soldadura por arco de metal con protección con gas, exitosamente desarrollado en el Battelle Memorial Institute, en 1948, bajo el patrocinio de la Air Reduction Company. Este desarrollo utilizaba un arco de protección con gas similar al del tungsteno con un alambre de electrodo alimentado continuamente.

El proceso de soldadura por arco con plasma, el cual es muy similar a la soldadura por arco de tungsteno con gas, fue inventado por Gage en 1957. La soldadura por arco con plasma usa un arco restringido o uno que a través de un orificio crea un arco con plasma a una temperatura más alta que el arco de tungsteno. Como proceso de corte se volvió popular con los metales no ferrosos y se usa también para rociar tanto alambres como polvos.

El proceso de soldadura por haz de electrones, en el que se emplea un haz de electrones enfocado como fuente de calor en una cámara de vacío, fue desarrollado en Francia a mediados de los años cincuenta. J. A. Stohr, de la French Atomic Energy Commission, hizo la primera revelación pública de este proceso de soldadura en un simposio acerca de los elementos combustibles, que se llevó a cabo en París el 23 de noviembre de 1957. La soldadura por haz de electrones (EB- electron beam) ha ganado amplia aceptación. En EE. UU. Las industrias automotriz y de motores de aviación son los principales usuarios de la soldadura EB.

El más novedoso de los procesos de soldadura es el de rayos láser. El láser (figura 1.5), desarrollado originalmente en los Bell Telephone Laboratories, era utilizado como dispositivo de comunicaciones. Debido a la tremenda concentración

de energía en un espacio reducido resultó ser una poderosa fuente de calor. Se ha usado para cortar metales y otros materiales. Los primeros problemas que se presentaron estaban relacionados con los pulsos cortos de energía; sin embargo, hoy en día existe ya un equipo de pulso continuo.

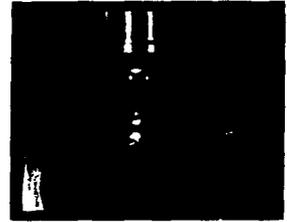


Figura 1.5 – El rayo láser

Hay muchas otras variantes de estos métodos que no constituyen procesos mismos y que a continuación mencionaremos al hablar del proceso básico.

Si al lector le interesase más datos detallados de los antecedentes históricos de la soldadura en la bibliografía encontrara una gran cantidad de referencias*.

1.2 ALGUNAS DEFINICIONES BÁSICAS.



A continuación describiremos algunos de los procesos que existen para soldar y el agrupamiento que al respecto hace la AWS. La American Welding Society (AWS) ha hecho cada definición del proceso de soldadura lo más completa posible, para que resulte suficiente sin hacer referencia a otra definición.

Para comprender que es la soldadura es necesario estar familiarizado con algunos de los términos básicos usados por la industria. Primeramente tendríamos que hacemos una pregunta: ¿Qué es soldar?; la definición que utiliza Henry Horwitz³ es: *Soldar es un proceso para unir dos piezas de metal aplicando calor intenso, presión intensa, o ambas cosas, para fundir los bordes del metal en forma tal que se unan por fusión, de forma permanente.*

La AWS define el proceso así: ***la operación de soldar es un proceso de unión de materiales que produce su coalescencia calentándolos a temperatura de soldado, con o sin la aplicación de presión, o por medio de la aplicación de presión solamente y con o sin el uso de material de aporte, el cual se usa en trabajos de soldadura. Coalescencia significa adherirse uno a otro o adherir a un cuerpo los materiales que se sueldan.*** La

* Recomendamos: <http://www.aws.org/> y <http://www.historywelding.org/>

³ Henry Horwitz. *Principles and Practice*. Houghton Mifflin Company, Boston.

palabra "coalescencia" ya no se usa en todas las definiciones del proceso de soldadura, puesto que estas definiciones usan la palabra "soldadura" como se definió antes.

Howard B. Cary da las siguientes definiciones²:

El **ensamble de soldadura** es un conjunto de partes unidas con soldadura, y puede hacerse a partir de muchas o pocas partes metálicas. Pueden ser metales de diferentes composiciones y las piezas pueden estar laminadas, en hoja, placa, tubo, forjadas o fundidas. Para producir una soldadura utilizable debe haber uniones soldadas entre las diversas piezas que constituyen el ensamble.

La **unión** se define como: "la unión de los miembros o de los fillos de los miembros que se van a unir o que han sido unidos".

El **metal de aporte** es "el metal o aleación que deberá añadirse al hacer una unión con soldadura ordinaria, soldadura fuerte o soldadura blanda".

El **metal base**, se define como "el material que está siendo sometido a una soldadura ordinaria, una soldadura blanda o un corte".

A continuación describiremos los procesos de soldadura.

1.3 PROCESOS DE SOLDADURA Y AGRUPAMIENTO.

La sociedad de soldadura formuló la definición de los procesos desde el punto de vista operativo en vez del metalúrgico. La definición de proceso de soldadura es: "un proceso de unión que produce la coalescencia de los materiales calentándolos a temperatura de soldado con o sin la aplicación de presión, y con o sin el uso de material de aporte". La AWS ha agrupado los procesos de acuerdo con el "modo de transferencia de energía" como consideración primaria. Otros términos o factores, como el tipo de corriente utilizada en los procesos de soldadura de resistencia o por arco, que los electrodos sean consumibles o no consumibles, añadidos o continuos, o el método de aplicación no se muestran en los agrupamientos de los procesos.

Hay una infinidad de agrupamientos y designaciones según el país, por ejemplo, en Alemania, hay una distinción entre la soldadura por fusión y por presión. Otros países se refieren al tipo de energía involucrada, esto es, la energía termoquímica, electrotérmica, mecánica o focalizada. Otras formas de clasificación son indicando el uso de un electrodo no consumible o continuamente alimentado, o bien la fuente de calor, o bien considerando un proceso convencional descubierto

versus un proceso no convencional, lo cual se relaciona más con la habilidad del soldador. El listado oficial de procesos y su agrupamiento se muestra en la figura 1.6.

La American Welding Society define un proceso como "una acción o serie de acciones progresivas y distintivas, implícitas en el curso de producir un tipo básico de resultado". La sociedad de soldadura basa su clasificación desde el punto de vista operativo en vez del metalúrgico. De este modo, las definiciones prescriben los elementos significativos de la operación en vez de las características metalúrgicas significativas. La AWS ha agrupado los procesos de acuerdo con el "modo de transferencia de energía" como consideración primaria. Un segundo factor es la "influencia de atracción capilar al efectuar la distribución del metal de aporte" en la unión. La atracción capilar distingue los procesos de soldadura agrupados bajo "soldadura fuerte" y "soldadura blanda", "soldadura por arco", "soldadura con gas", "soldadura por resistencia", "soldadura de estado sólido" y "otros procesos".

La designación "soldadura por fusión" no se reconoce como agrupamiento aparte puesto que la fusión interviene en muchos de los procesos.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

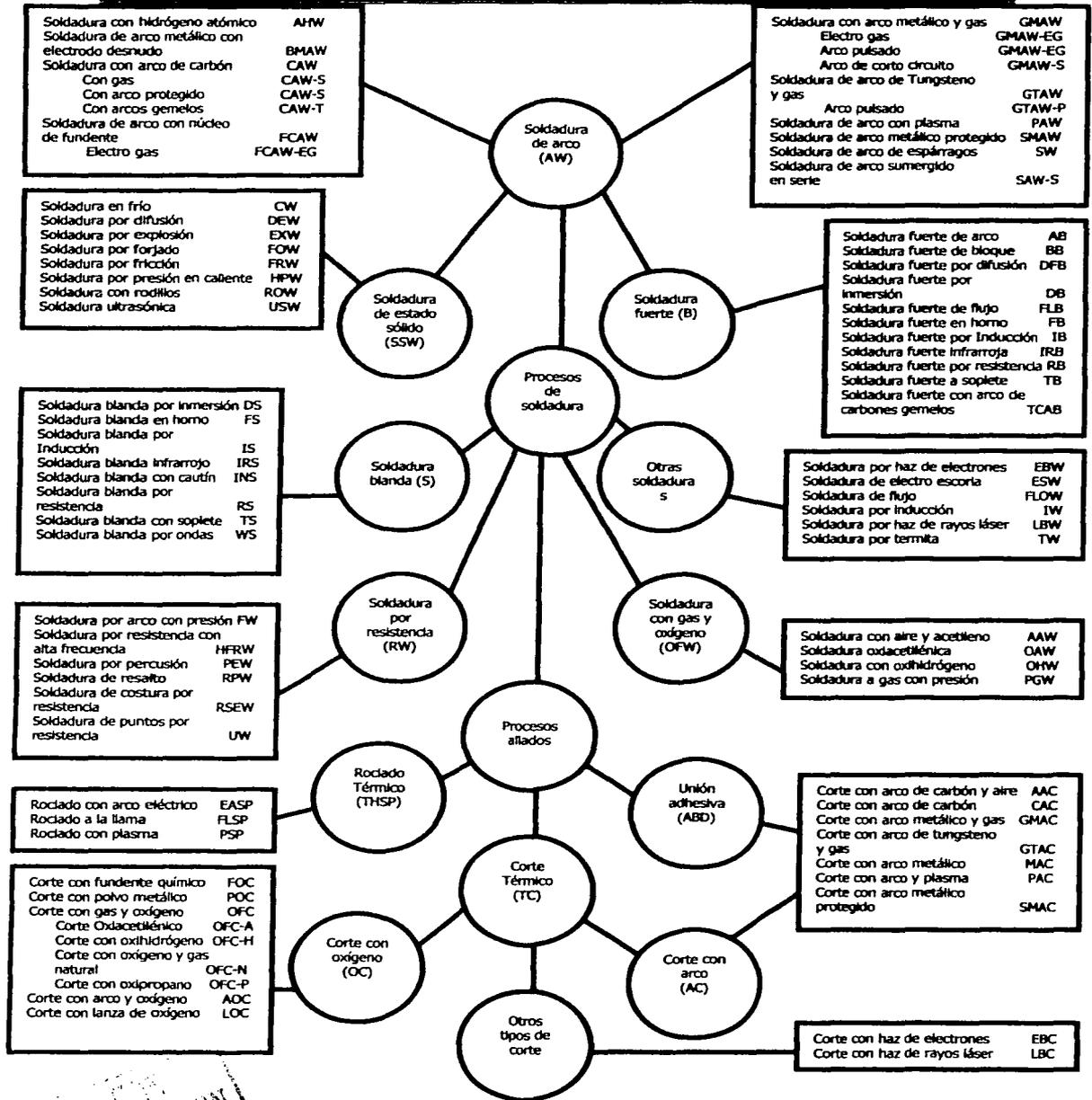


Figura 1.6 - Diagrama maestro de los procesos de soldadura y otros procesos aliados. (Redibujado con autorización de la American Welding Society, *Welding Handbook*, 6ª. Ed. 1969, sección 2.

FALLA DE ORIGEN

La designación AWS será la que utilizaremos a través de todo este trabajo. A continuación mencionaremos algunas características de cada uno de los grupos de soldadura.

A) SOLDADURA POR ARCO.

El grupo de soldadura por arco incluye nueve procesos populares específicos, cada uno separado y distinto de los demás pero en muchos aspectos similares. Mencionaremos algunos.

El proceso de **soldadura por arco de carbono (CAW)** es el más antiguo de todos los procesos de soldadura y se considera que constituye el inicio de la soldadura por arco. Se describe como "un proceso de soldadura que usa un arco entre un electrodo de carbono y un metal base"(figura 1.7).



Figura 1.7 – Soldadura por arco.

El desarrollo del proceso de soldadura por arco de metal, pronto siguió al arco de carbono. Este llevó al actualmente popular proceso de **soldadura por arco metálico protegido (SMW)**, definido como "proceso de soldadura por arco entre un electrodo cubierto y el metal base. El proceso se usa con protección a partir de la descomposición de la cubierta del electrodo, sin la aplicación de presión y con metal de aporte a partir del electrodo".

La necesidad de soldar metales no ferrosos, particularmente el magnesio y el aluminio, constituyó un desafío para la industria. Se encontró una solución la cuál se denominó **soldadura por arco de tungsteno con gas (GTAW)**, que se define como "proceso de soldadura que usa un arco entre electrodo de



Figura 1.8 – Soldadura TIG.

tungsteno (no consumible) y la concurrencia del aporte. El proceso se usa con gas de protección y sin la aplicación de presión. Se puede añadir metal de aporte". Este proceso también se conoce como soldadura Heliarc o TIG. La soldadura TIG se puede ver en la figura 1.8.

Otro proceso de soldadura relacionado con la soldadura por arco de tungsteno con gas se conoce como **soldadura por arco metálico con gas (GMAW)**. Se define como "proceso de soldadura que usa un arco eléctrico entre un electrodo metálico de aporte continuo y la concurrencia de soldado. El proceso se usa con la protección de un gas externamente suministrado y sin la aplicación de presión". Este proceso que algunas veces se denomina soldadura MIG, se muestra en la figura 1.9.

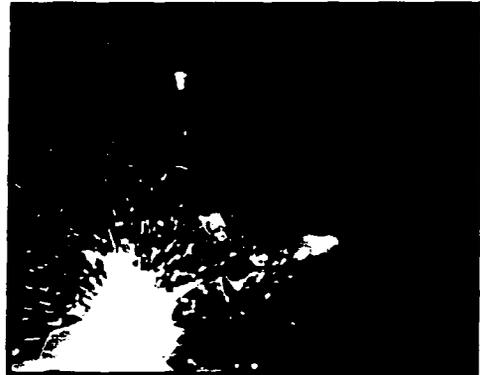


Figura 1.9 – Soldadura MIG.

B) SOLDADURA CON GAS OXICOMBUSTIBLE.

La soldadura con gas oxicomcombustible (OFW) es "un grupo de procesos de soldadura que produce la coalescencia de las piezas de trabajo calentándolas con una flama de gas oxicomcombustible. Los procesos se usan con o sin la aplicación de presión y con o sin el uso de metal de aporte". Hay cuatro procesos distintos dentro de este grupo y en el caso de dos de ellos, **la soldadura con oxiacetileno** y **la soldadura con oxihidrógeno**, la clasificación se basa en gas combustible utilizado.



Figura 1.10 – Soldadura con gas.

El calor de la flama se crea por reacción química o por quemado de los gases. En el tercer proceso, **soldadura con acetileno y aire**, se usa aire en lugar de oxígeno, y en la cuarta categoría, **soldadura con gas y presión**, se aplica presión además del calor proveniente del quemado de gases. Este proceso usa acetileno como gas combustible.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

C) SOLDADURA POR RESISTENCIA.

La soldadura por resistencia (RW) es "un grupo de procesos de soldadura que produce la coalescencia de las superficies a empalmar con el calor obtenido de la resistencia de las piezas de trabajo al flujo de la corriente de soldadura en un circuito del cual forman parte las piezas de trabajo y por la aplicación de presión". En general, la diferencia de los procesos de soldadura de resistencia tiene que ver con el diseño de la unión y con el tipo de máquina necesario para producirla. En casi todos los casos los procesos se aplican automáticamente, puesto que las máquinas de soldadura incorporan tanto el control eléctrico como las funciones mecánicas.

D) OTROS PROCESOS DE SOLDADURA.

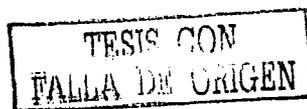
Este grupo de procesos incluye a aquellos que los otros agrupamientos no circunscriben de la mejor manera. Lo constituyen los siguientes procesos: *soldadura por haz de electrones, de rayos láser, de termita, de inducción, de percusión* y otros procesos variados, además de la *soldadura de electroescoria*.

E) SOLDADURA BLANDA.

La soldadura blanda (S) es "un grupo de procesos de soldadura que produce la coalescencia de los materiales calentándolos a temperatura de fusión y usando un metal de aporte cuyo punto de licuefacción excede los 450 °C y por debajo del punto de solidificación de los metales base. El metal de aporte se distribuye entre las superficies a empalmar de la unión, estrechamente ajustadas por atracción capilar". Hay un número de métodos diferentes que se identifican por la forma en que aplica el calor.

F) SOLDADURA FUERTE (LATONADO).

La soldadura fuerte (B) es "un grupo de procesos de soldadura que produce coalescencia de materiales calentándolos a la temperatura de licuefacción en presencia de un metal de aporte con un punto líquido por arriba de 450 °C y por debajo del punto de solidificación del metal base". Una soldadura fuerte es una forma muy especial de soldar; teóricamente el metal base no se funde. Hay siete distintos procesos dentro del grupo de soldadura fuerte. La fuente de calor difiere entre los procesos. La soldadura de latón se refiere a los procesos de soldadura que usan latón o bronce como metal de aporte, donde dicho metal no se distribuye por acción capilar.



G) SOLDADURA DE ESTADO SÓLIDO.

La soldadura de estado sólido (SSW) es "un grupo de procesos de soldadura que produce la coalescencia de las superficies a empalmar por medio de la aplicación de presión a temperaturas por debajo del punto de fusión del metal base, sin la adición de metal de aporte de soldadura fuerte o de soldadura blanda".

El más antiguo de todos los procesos de soldadura, *la soldadura por forja*, pertenece a este grupo. Otros incluyen la *soldadura en frío, de difusión, de explosión, por fricción, por presión en caliente, la soldadura a resina y la soldadura ultrasónica*. Estos procesos son todos diferentes y utilizan distintas formas de energía para producir piezas soldadas.

Una vez definidos cada uno de los grupos caracterizados por la American Welding Society, podemos enfocarnos a la soldadura de estado sólido, más específicamente a la *soldadura por fricción*. Antes definamos algunos elementos presentes en el proceso. Esto lo veremos en el siguiente capítulo.

1.4 LA IMPORTANCIA DE LA SOLDADURA.

Hoy en día, a comienzos del siglo XXI, la soldadura es considerada una ciencia. Es uno de los más complejos procesos industriales, pues involucra física de plasmas, flujo de fluidos, teoría de electromagnetismo, robótica, metalurgia, ingeniería eléctrica, electrónica y mecánica. Muchos de estos aspectos actúan simultáneamente cada vez que un soldador comienza su cordón de soldadura. Esta es la razón por la que la educación de ingenieros en soldadura capaces de combinar todas estas ciencias, es una prioridad en los países de economía avanzada.

La soldadura es la forma más eficaz y la única posible de unir dos o más piezas de metal para hacerlas actuar como una sola. Miremos alrededor: casi todo lo hecho de metal está soldado: el edificio más alto del mundo, los motores de los cohetes lunares, los reactores nucleares, los aparatos electrodomésticos, los juguetes, las bicicletas y los automóviles.

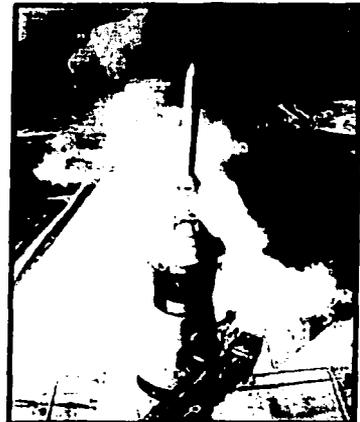


Figura 1.11 – Los cohetes lunares se hacen con soldadura.



En el mar, son las uniones soldadas las que mantienen un buque en una sola pieza. El primer submarino atómico, el Nautilus (figura 1.12), también fue completamente soldado. También son soldadas las plataformas "Offshore" (figura 1.13) para la extracción de petróleo del lecho marino. Hay soldaduras en el aire, en todo avión que vuela; y aun más alto, en el espacio, el Space Shuttle (figura 1.14) usa soldadura en la unión de sus componentes críticos.

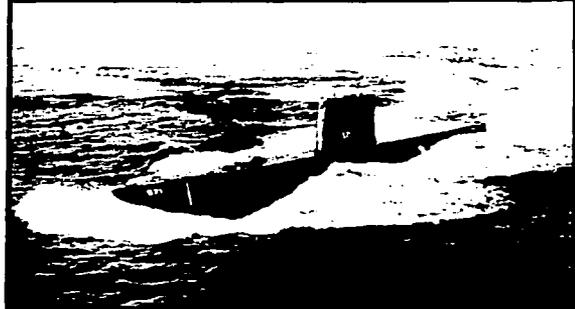


Figura 1.12 – El Nautilus, primer submarino atómico, fue completamente soldado.

Claramente, la soldadura no es ya más un proceso crudo y sucio. Es parte integral de cualquier avance tecnológico.

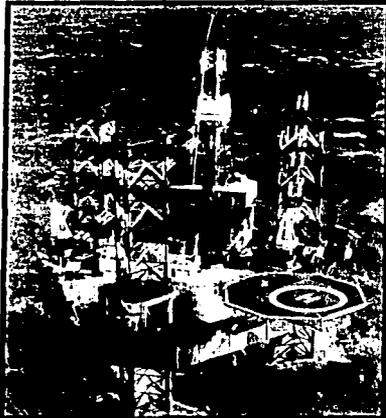


Figura 1.13 – Las plataformas Offshore son en un 90% soldadas.

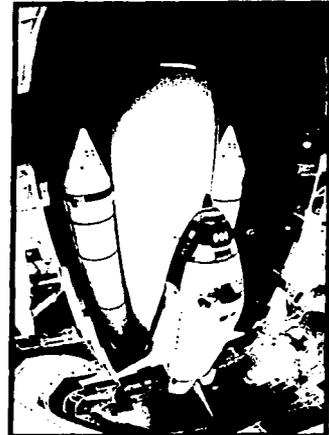


Figura 1.14 – El Space Shuttle

La soldadura es un concepto de diseño que permite flexibilidad y libertad, que no son posibles en la construcción de piezas de fundición. Además se pueden usar materiales de alta resistencia en áreas específicas mientras que los materiales de resistencia normal se usan cuando se requieren.

La soldadura es la mejor forma de proteger y conservar los materiales protegiendo su superficie con recubrimientos especiales metálicos. La corrosión y el desgaste de los metales ocasionan pérdidas de millones de dólares anuales (figura 1.15). Conjuntamente son responsables de pérdidas de incontables vidas. Las pérdidas ocasionadas por estas dos fuerzas destructivas pueden ser reducidas considerablemente por medio de la soldadura.



Figura 1.15 – La corrosión y el desgaste ocasionan pérdidas de dinero y de vidas.

En un trabajo de soldadura se depositan aleaciones especiales sobre los metales básicos para proporcionar superficies resistentes a la corrosión; soldando se pueden hacer recubrimientos que endurecen la superficie para proporcionar a ciertas aleaciones especiales, resistencia al desgaste.

En las industrias con alto volumen de producción es común ver operaciones de soldadura combinadas con el doblado, fresado, conformado, etc. Claramente, todo este progreso en la aplicación de la soldadura se basa en los avances de las ciencias sobre las cuales se apoya. De esta manera, progresos en metalurgia, computación o en robótica (por nombrar unos pocos) tienen un impacto directo en los nuevos métodos de soldadura.

Mencionaremos tres ejemplos que son especialmente interesantes: la soldadura por haz de electrones del fuselaje del nuevo avión de combate norteamericano F-22, la soldadura por láser del nuevo Airbus A3XX, y la soldadura por plasma y *fricción* del tanque de combustible del Space Shuttle. Estos tres ejemplos representan lo mas alto de los logros actuales en ingeniería.

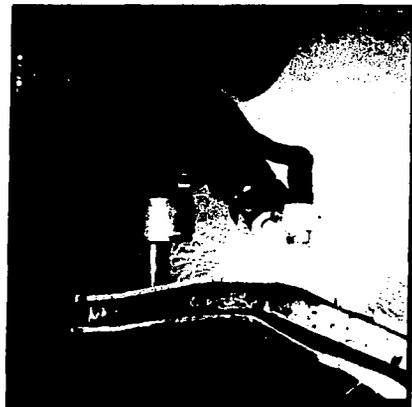


Figura 1.16 – Diferentes procesos de soldadura se han complementado con la robótica.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

El F-22 es un avión caza de nueva generación. Su fuselaje es de titanio, un metal fuerte como el acero, pero que pesa la mitad, y resiste las altas temperaturas del vuelo supersónico. Este es el primer avión de combate en 60 años que presenta un fuselaje soldado, lo cual permitió reducir costos y peso a niveles considerados imposibles hasta hace poco tiempo. La aplicación de soldadura fue posible debido al progreso en computadoras y robótica, que permiten controlar con alta precisión la soldadura por haz de electrones, aún sobre superficies curvas y de espesor variable. No existe actualmente avión de combate con tecnología de fabricación mas sofisticada que el F-22.



Figura 1.17 – Avión de combate F-22.

El Airbus A3XX, capaz de transportar 1000 personas, es otro ejemplo de combinación, soldadura con otras tecnologías de vanguardia. En los aviones comerciales, el fuselaje y alas son de lámina de aluminio, reforzada con larguerillos, también de aluminio. Tradicionalmente estos larguerillos son unidos a las laminas de aluminio con remaches.



Figura 1.18 – Airbus A300.

Este proceso es muy lento, laborioso y caro. Además, la zona remachada debe ser reforzada, con el indeseable aumento de peso que eso significa. En el A3XX, sin embargo, los larguerillos son unidos a las láminas de aluminio con soldadura láser, de tal manera que en unos minutos es posible realizar el trabajo de varias horas y producir un mejor producto.



En la cumbre del progreso tecnológico se ubican las tecnologías espaciales. Una vez más, la soldadura juega un papel importantísimo, siendo el método de unión del tanque de oxígeno del Space Shuttle (figura 1.19). Este tanque es de características formidables: se eleva a una altura de 60 m, y contiene 800 m de cordones de soldadura.

El sistema utilizado es soldadura de plasma de polaridad variable, que permite soldar las placas de 8mm de espesor en una sola pasada y con un mínimo de distorsión. Aún así, los ingenieros de NASA siguen buscando una mejor alternativa. En este mismo momento, se está considerando muy seriamente la de soldadura por fricción. En este tipo de soldadura el metal nunca llega a un estado líquido, evitándose así varios problemas metalúrgicos. Esta última tecnología es empleada corrientemente para soldar los cohetes Delta.

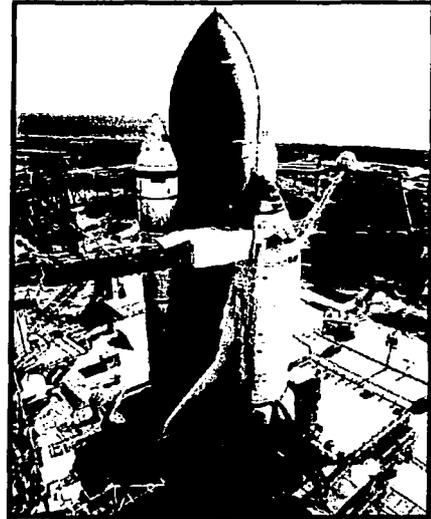


Figura 1.19 – El Space Shuttle donde podemos ver el impresionante tanque de oxígeno.

En conclusión, la soldadura se ha convertido en un elemento esencial para la construcción de las más sofisticadas máquinas que el hombre haya hecho en su historia. Este progreso ha sido posible sólo a través del entendimiento y aplicación creativa de los procesos físicos que existen durante la soldadura. Por eso, es que hoy en día, a diferencia de unos cincuenta años atrás, un mínimo de educación es necesario para poder aplicar soldadura eficientemente.

Los operadores deben saber entender los porqués de lo que observan diariamente, y los ingenieros deben entender los fundamentos físicos cada vez que diseñan una soldadura o aplican los estándares. De esta manera, el trabajo de todos los participantes se hace menos rutinario y más interesante, la calidad del producto mejora mientras que los descartes son reducidos, y quizás más importante que todo lo anterior: el trabajo de la gente es más esencial y valioso.



2. LA FRICCIÓN Y SUS LEYES.

- 2.1 Desarrollo histórico.
- 2.2 La fuerza de fricción.
- 2.3 Análisis de la generación de la fuerza de fricción.
- 2.4 Leyes de la fricción.
- 2.5 Fricción de disco.

La energía térmica es una forma básica de energía en la cual pueden ser transformadas completamente todas las otras formas de energía.

La conversión de energía mecánica en energía térmica puede ser resumida en una palabra: fricción.

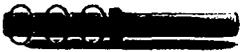
En el presente capítulo se analiza en forma detallada la fuerza de fricción, la cual es indispensable para que se lleve a cabo el proceso de soldadura presentado en este trabajo.

2.1 DESARROLLO HISTORICO.

El fenómeno de fricción ha sido parte de la vida diaria del hombre desde hace mucho tiempo. No es una sorpresa que algunas de las actividades humanas estuvieran relacionadas con la reducción de la fricción cuando esta era perjudicial, o el uso de la fricción cuando esta pudiera ser benéfica. La primer categoría incluye el uso de aceites vegetales y grasa animal como lubricantes, así como el uso de movimiento por rodamientos para tomar ventaja del resultado de la baja resistencia al movimiento. La segunda categoría puede ser ejemplificada por el rozamiento de ramitas para iniciar un fuego y el control del movimiento por medio de una acción de frenado.

No fue sino hasta la edad media que Leonardo da Vinci (1452-1519) formuló sus leyes básicas de la fricción, las cuales proveen una predicción racional para evaluar la resistencia de rozamiento. Él estableció que las fuerzas de fricción son proporcionales al peso y son independientes del área de contacto.

Guillaume Amontons (1663-1705) en un artículo publicado en las actas de la Real Academia de Ciencias de Francia, redescubrió las leyes de fricción originalmente propuestas por Leonardo da Vinci. El hecho que la fuerza de fricción



fuera proporcional a la carga normal fue realmente aceptado por la academia, pero la independencia de la fricción y el área de contacto fue recibida con escepticismo. El decano académico De La Hire (1640-1718) fue a comprobar la segunda ley de Amontons y confirmó su validez.

En 1734 el científico inglés Jhon Desaguliers (1683-1734) lanzó la teoría de que la fricción podía ser explicada por medio de las fuerzas de atracción molecular entre los sólidos. A estas fuerzas les dio el nombre de cohesión.

Charles Augustin Coulomb (1736-1806) es generalmente considerado como el fundador de las leyes de la fricción. Su entendimiento de las causas de la fricción, sin embargo, no es completamente claro. Él reconoció la importancia de la rugosidad y sugirió que la fricción era ocasionada por el trabajo hecho por el arrastre de una superficie sobre la otra. Una de las contribuciones importantes de Coulomb es su postulado en el cual dice que el contacto solo ocurre en puntos discretos de las asperezas en contacto. Sin embargo, él rechazó la teoría de la adhesión y razonó que si la adhesión existía, la resistencia al frotamiento tendría que ser doble si el área de contacto era doble. Consecuentemente él creyó que la resistencia al frotamiento era ocasionada por el trabajo hecho durante el movimiento de una superficie sobre la rugosidad de otra.

La fricción es generalmente dividida en cuatro regímenes: seca, límite, elastohidrodinámica e hidrodinámica. En la fricción seca*, superficies limpias es uno de los más importantes factores que influyen en la resistencia al rozamiento. De igual forma una sola capa de molécula de grasa proveniente de la atmósfera o de los dedos puede cambiar significativamente el coeficiente de fricción. La influencia de superficies limpias es mucho más importante que su rugosidad. En el otro extremo cuando las superficies son separadas por una película gruesa de lubricante, la resistencia al rozamiento es determinada por el comportamiento dinámico de la película.

Osborne Reynolds (1842-1912) desarrolló en 1886 las bases fundamentales para la teoría hidrodinámica de lubricación y la resistencia al rozamiento. En este caso se encuentran un no metal y un metal en contacto y la fricción es el resultado de la resistencia al esfuerzo cortante como una influencia de la viscosidad del lubricante y el espesor de la película. Los análisis de Reynolds fueron inspirados por los descubrimientos experimentales de Petrov (1836-1920) y Tower (1845-1904). Petrov reportó en 1883 que la viscosidad es la propiedad más importante de un fluido en una película de lubricación, y no la viscosidad como previamente pensó. Así mismo concluyó que las pérdidas por fricción en toda una película de lubricación son el resultado de los esfuerzos viscosos de la película.

* Fricción seca. Es la que se presenta cuando las superficies de los cuerpos en contacto no se encuentran lubricadas.

En contactos lubricados concentrados, la presión en el fluido es usualmente lo suficientemente alta para deformar las superficies sólidas. Esta condición existe en muchos elementos de maquinaria tales como engranes, levas y neumáticos automovilísticos en caminos cubiertos con agua. El análisis de este fenómeno elastohidrodinámico fue investigado primeramente por Grubin y Dowson y constituye un importante campo de la tribología. Tanto la fricción hidrodinámica como la elastohidrodinámica son altamente dependientes de la velocidad y la viscosidad del fluido. Para flujos con bajas velocidades o bajas viscosidades cuando la película lubricante no es suficientemente gruesa para separar las asperezas de los sólidos en contacto, la resistencia al rozamiento será mucho más alta que con una película totalmente lubricada pero apreciablemente menor que para superficies secas. Las primeras investigaciones de fricción en este régimen, el cual es llamado lubricación de frontera, fueron emprendidas por Sir William Hardy a principios de 1920. Su estudio mostró que la resistencia al rozamiento en el régimen de frontera es proporcional a la carga normal. La principal ventaja de la lubricación de frontera es la generación de una fina película de fluido en la superficie la cual reduce el contacto entre sólidos y consecuentemente reduce la fricción, el desgaste y el ruido.

Estudios científicos de la fricción, lubricación, y el fenómeno del desgaste en todos estos regímenes están recibiendo una atención considerable en la ingeniería moderna. La fricción como una causa primaria de disipación de energía, y un ahorro económico considerable puede ser mejor comprendida en su mecanismo y su control. La operación de modernos sistemas de ingeniería tales como máquinas, instrumentos, vehículos y hardware de computación, etcétera está influenciada por el suceso de la fricción de una u otra forma.

2.2 LA FUERZA DE FRICCIÓN.

Charles Coulomb, en su obra *Teoría de la mecánica simple*, expresa la siguiente explicación del fenómeno de la fricción:

"La causa física de la resistencia opuesta por la fricción al movimiento de las superficies que se deslizan una sobre otra puede ser explicada suponiendo un entrelazamiento de las rugosidades de las superficies, que no pueden ser separadas a menos que cedan, se rompan o sean levantadas sobre los extremos superiores de unas y otras; o suponiendo que las moléculas de las superficies de los dos planos en contacto están tan cercanas que se desarrollan una cohesión que debe ser vencida para producir el movimiento. Solamente la experimentación puede capacitarnos para determinar la realidad de estas diferentes causas."

Del párrafo anterior se concluye que la fuerza de fricción aparece en todas las superficies que, encontrándose en contacto íntimo, tienden a desplazarse una



con respecto a la otra. Dada la gran importancia de este fenómeno, no puede dejar de considerarse en el análisis de los problemas en que se presenta, aunque en ocasiones no se haga por tener valores pequeños en relación a las demás fuerzas del problema.

Definición:

“Cuando dos cuerpos se deslizan o tienden a deslizarse uno sobre el otro, la fuerza tangente a la superficie de contacto, que se opone al movimiento relativo o lo impide, se denomina fuerza de fricción”.

Es necesario distinguir en esta definición dos fenómenos marcadamente diferentes.

1er fenómeno:

La fuerza de fricción que impide que se produzca el movimiento relativo entre las dos superficies en contacto, o sea cuando no hay movimiento entre ellas (fuerza de fricción estática).

2do fenómeno:

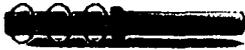
La fuerza de fricción que se opone al movimiento relativo, ya existente, entre las dos superficies en contacto (fuerza de fricción cinética).

2.3 ANÁLISIS DE LA GENERACIÓN DE LA FUERZA DE FRICCIÓN.

La fuerza de fricción, según se ha visto al definirla, depende, tanto de la fuerza que tiende a provocar el deslizamiento entre las dos superficies unidas, como de la que tiende a mantenerlas en contacto.

Para comprender mejor esta dependencia, haremos las siguientes consideraciones expresadas en las figuras mostradas.

Un bloque de peso W se coloca sobre una superficie plana horizontal (figura 2.1a). Las fuerzas que actúan sobre el bloque son su peso W y la reacción de la superficie. Como el peso no tiene componentes horizontales, la reacción tampoco las tiene y es, por lo tanto, normal a la superficie y se representa por N en la figura a. Supongamos ahora que se aplica sobre el bloque una fuerza horizontal P (figura 2.1b). Si P es pequeña, el bloque no se moverá; entonces, debe existir otra fuerza horizontal que contrarreste a P . Esta es la *fuerza de fricción estática* F que en realidad es la resultante de un gran número de fuerzas que actúan sobre



toda la superficie de contacto entre el bloque y la superficie plana. No se conoce exactamente la naturaleza de estas fuerzas pero se supone que se deben a las irregularidades de las superficies en contacto y en parte a la atracción molecular.

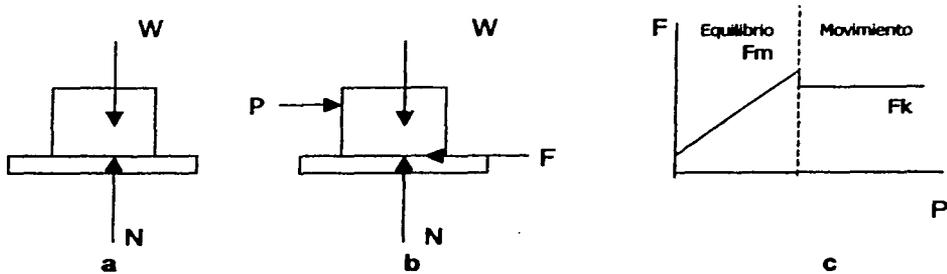


Figura 2.1 – Consideraciones para el análisis de la generación de la fuerza de fricción.

Si incrementamos la fuerza P , la fuerza de fricción F también crece oponiéndose a P hasta que su magnitud alcanza cierto valor máximo F_m (figura 2.1c). Si P sigue incrementándose, la fuerza de fricción ya no es capaz de

contrarrestarla y el bloque empieza a desplazarse. En cuanto el bloque empieza a moverse, la magnitud de F cambia de F_m a un valor menor F_k . Esto se debe a que cuando las superficies en contacto se mueven una respecto a otra, la interpenetración de las irregularidades de las superficies es menor debido al movimiento. A partir de ese momento el bloque continúa deslizándose e incrementa su velocidad, mientras la fuerza de fricción F_k , llamada *fuerza de fricción cinética*, permanece aproximadamente constante. La evidencia experimental muestra que el valor máximo F_m de la fuerza de fricción estática es proporcional a la componente normal N de la reacción de la superficie. Tenemos

$$F_m = \mu_s N$$

Donde μ_s es una constante llamada *coeficiente de fricción estática*. De igual manera, la magnitud F_k de la fuerza de fricción cinética puede expresarse de la forma

$$F_k = \mu_k N$$

Donde μ_k es una constante llamada *coeficiente de fricción cinética*. Los coeficientes μ_s y μ_k no dependen del área de las superficies en contacto. Sin embargo, ambos dependen bastante de la naturaleza de estas superficies. Debido

a que sus valores dependen de las condiciones exactas de las superficies, rara vez pueden conocerse con una precisión mayor que 5%. En la tabla 2.1 se dan algunos valores aproximados de coeficientes de fricción estática de varias superficies secas. Los correspondientes coeficientes de fricción cinética serían aproximadamente un 25% menores.

Metal sobre metal	0.15 - 0.60
Metal sobre madera	0.20 - 0.60
Metal sobre piedra	0.30 - 0.70
Metal sobre cuero	0.30 - 0.60
Madera sobre madera	0.25 - 0.50
Madera sobre cuero	0.25 - 0.50
Piedra sobre piedra	0.40 - 0.70
Tierra sobre tierra	0.20 - 1.00
Caucho sobre concreto	0.60 - 0.90
Hierro fundido con hierro fundido	0.30 - 0.40
Hule y hielo	0.10
<i>Superficies</i>	
Semi lubricadas	0.01 - 0.10
Bien lubricadas	0.002 - 0.01
Articulaciones o apoyos de rodillas	0.001 - 0.007

Tabla 2.1 – Coeficientes de fricción estática de diversos materiales.

2.4 LEYES DE LA FRICIÓN.

Después de un gran número de experimentos suficientes para poder inferir algunos principios aplicables al fenómeno de la fricción en seco, Charles A. Coulomb enunció, en 1781, las leyes de la fricción, las cuales fueron comprobadas por A.J. Morin´s en sus experimentos realizados en 1831. Sus enunciados son:

1ª Ley – La fuerza de fricción máxima que puede generarse es proporcional a la fuerza normal.

$$F_r \approx N$$

2ª Ley – La fuerza de fricción máxima que puede generarse es independiente del tamaño del área de contacto entre las superficies consideradas.

3ª Ley – La fuerza de fricción límite es mayor que la fuerza de fricción cinética.



4ª Ley – La fuerza de fricción cinética es independiente de la velocidad relativa de los cuerpos que se encuentran en contacto.

Estas cuatro leyes se han modificado y corregido, como resultado de los experimentos más recientes, pudiendo enunciarse con más apego a la realidad como sigue:

1ª Ley – Para presiones muy bajas o muy altas que produzcan una deformación excesiva, el coeficiente de fricción estática se incrementa sensiblemente.

2ª Ley – Para velocidades relativas muy bajas, el coeficiente de fricción cinética aumenta sensiblemente y tiende a igualarse con el valor del coeficiente de fricción estática, sin que se presente ninguna discontinuidad matemática en la figura 2.1 c presentada anteriormente.

3ª Ley – Para altas velocidades, el coeficiente de fricción cinética disminuye apreciablemente.

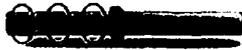
4ª Ley – Los cambios ordinarios de temperatura no producen efectos materiales en el coeficiente de fricción.

Se puede concluir de los conceptos presentados que la importancia de las leyes de la fricción radica principalmente en la consideración adecuada que se realice de ellas para cada problema particular que involucre fuerzas friccionadas.

2.5 COJINETES AXIALES: FRICCIÓN DE DISCO.

Los cojinetes de empuje se usan para proporcionar soporte axial a ejes y árboles que rotan. Son de dos tipos: 1) cojinetes de tope y 2) cojinetes en collarín (figura 2.2). En el caso de los cojinetes de collarín la fricción se produce entre dos superficies anulares en contacto. En el caso de cojinetes de tope, la fricción se produce en áreas circulares o en áreas anulares cuando los extremos del eje son huecos. La fricción en áreas circulares, llamada fricción de disco, también se presenta en otros mecanismos, como embragues de disco.

Para obtener una fórmula que sea válida en el caso más general de fricción de disco, consideraremos un árbol hueco rotando. Un par M mantiene al árbol rotando con velocidad constante mientras una fuerza P lo mantiene en contacto con un cojinete fijo (figura 2.3). El contacto entre el árbol y el cojinete se lleva a cabo en un área en forma de anillos con radio interior R_1 y radio exterior R_2 . Suponiendo que la presión entre las dos superficies sea uniforme, encontramos que la magnitud de la fuerza normal ΔN ejercida sobre cada elemento de área ΔA



es $\Delta N = P \Delta A / A$ donde $A = \pi (R_2^2 - R_1^2)$, y que la magnitud de la fuerza de fricción ΔF que actúa sobre ΔA es $\Delta F = \mu_k \Delta N$. Si llamamos r a la distancia del eje del árbol al elemento de área ΔA , expresaremos el momento ΔM de ΔF respecto al eje del árbol como sigue:

$$\Delta M = r \Delta F = \frac{r \mu_k P \Delta A}{\pi (R_2^2 - R_1^2)}$$

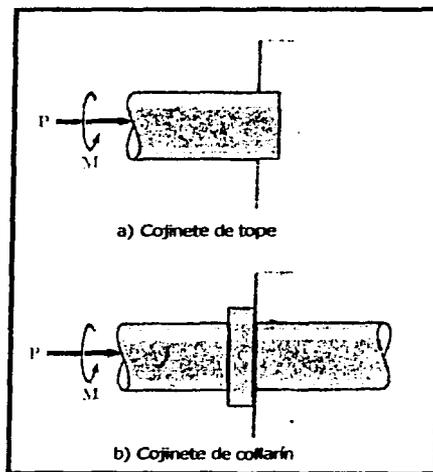


Figura 2.2 – Cojinetes de tope y collarín.

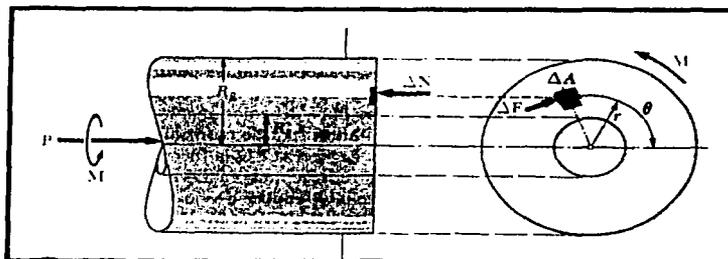
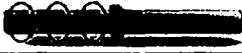


Figura 2.3 – Obtención de una fórmula general en la fricción de disco.



El equilibrio del árbol requiere que el momento M del par aplicado al mismo sea igual en magnitud a la suma de los momentos de las fuerzas de fricción ΔF . Sustituyendo ΔA por el momento infinitesimal $dA = r d\theta dr$ en coordenadas polares, e integrando sobre el área de contacto, obtenemos la siguiente expresión para la magnitud del par M necesario para contrarrestar la resistencia por fricción del cojinete:

$$M = \frac{\mu_k P}{\pi(R_2^2 - R_1^2)} \int_0^{2\pi} \int_{R_1}^{R_2} r^2 dr d\theta$$

$$M = \frac{\mu_k P}{\pi(R_2^2 - R_1^2)} \int_0^{2\pi} \frac{1}{3} (R_2^3 - R_1^3) d\theta$$

$$M = \frac{2}{3} \mu_k P \frac{R_2^3 - R_1^3}{R_2^2 - R_1^2}$$

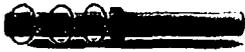
Cuando el contacto se lleva a cabo en un círculo completo de radio R , la fórmula anterior se reduce a:

$$M = \frac{2}{3} \mu_k PR$$

Entonces, el valor M es el mismo que si el contacto se llevara a cabo entre el árbol y el cojinete, en un solo punto localizado a una distancia $2R/3$ del eje del árbol.

El mayor par de torsión que puede transmitirse mediante un embrague de disco sin causar resbalamiento está dado por una fórmula similar a la última fórmula mostrada, sustituyendo μ_k por el coeficiente de fricción estática μ_s .

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



3. EL PROCESO DE SOLDADURA POR FRICCIÓN Y SUS APLICACIONES.

- 3.1 Definición y variaciones del proceso.
- 3.2 Relaciones entre las variables.
- 3.3 Máquinas para soldadura por fricción.
- 3.4 Ventajas y limitaciones.
- 3.5 Materiales soldados.
- 3.6 Aplicaciones.

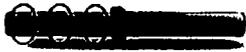
En este capítulo describiremos el proceso del cual es objetivo este trabajo, la soldadura por fricción. En este proceso intervienen una gran cantidad de parámetros, velocidades angulares, temperaturas, tiempos de calentamiento y aplicación de cargas. La bibliografía existente sobre el tema nos habla de que el proceso puede ser caracterizado para la repetición, pero hay que considerar que todos los parámetros son variables para cada prueba, por lo que los valores no son fijos.

3.1 DEFINICIÓN Y VARIACIONES DEL PROCESO.

La soldadura por fricción es un proceso de soldadura de estado sólido que produce una unión soldada bajo la fuerza compresiva de contacto de dos piezas de trabajo que giran o se mueven una respecto a la otra produciendo calor y desplazando plásticamente material de las superficies de empalme. El calor es producido por conversión directa de la energía mecánica en energía térmica en la interfase de las piezas de trabajo sin la aplicación de energía eléctrica, o calor de otras fuentes a dichas piezas.

El proceso fue inventado y desarrollado en 1936 por Trevor Irving Rolt pero fue hasta los años 50's cuando se hicieron pruebas conjuntas entre la Unión Soviética, Estados Unidos y Gran Bretaña. Este proceso se ha utilizado por más de 50 años.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



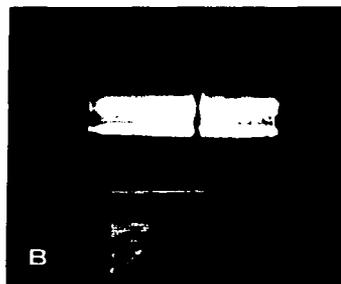
Aunque se considera un procedimiento de soldadura de estado sólido, en algunas circunstancias puede producirse una película fundida en la cara interna.

Pese a ello, la soldadura final nunca presenta indicios de un estado fundido a causa del extenso trabajo en caliente que tiene lugar durante la etapa final del proceso. Con este método no se requiere material de aporte, fundente, ni gas protector. Los pasos básicos de la soldadura por fricción se muestran en la figura 3.1.

Primero, una pieza de trabajo se gira y la otra se mantiene fija, como se indica en la figura 3.1 A.



Cuando se alcanza la velocidad angular apropiada, las dos piezas de trabajo se juntan y se aplica una fuerza axial, como en la figura 3.1 B.



La frotación de la cara interna calienta la pieza de trabajo localmente y comienza el acortamiento axial, como en la figura 3.1 C.



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Por ultimo, se detiene la rotación de una de las piezas y se aplica una fuerza de forjado, la suficiente para completar el vuelco*, como se ve en la figura 3.1 D.

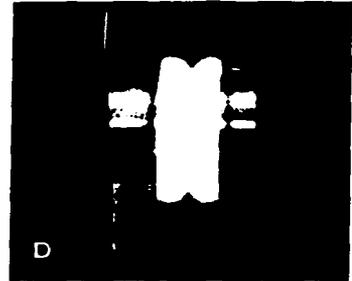


Figura 3.1 – Pasos básicos de la soldadura por fricción.

3.1.1 MÉTODOS DE APORTE DE ENERGÍA.

Hay dos formas de suministrar la energía para la soldadura por fricción. La soldadura de impulso directo, a veces llamada soldadura por fricción convencional, emplea un aporte continuo. La soldadura por fricción inercial, a veces llamada soldadura por fricción de volante, aprovecha la energía almacenada en un volante.

- **Soldadura de Impulso directo.**

En la soldadura por fricción de impulso directo, una de las piezas de trabajo está conectada a un motor, en tanto que la otra está restringida de tal forma que no pueda girar. La pieza que es impulsada por el motor gira a una velocidad constante, inicialmente determinada. Las piezas que se van a soldar se juntan y se aplica una fuerza de soldadura. Al frotarse una sección de empalme contra la otra cara (cara interna de soldadura), se produce calor. Esto continúa durante un tiempo determinado o hasta que tiene lugar una cantidad de vuelco fijada de antemano. Se deja de aplicar la fuerza impulsora rotacional y la pieza de trabajo giratoria se detiene ya sea por la aplicación de una fuerza de frenado o por su propia resistencia a la rotación. La fuerza de soldado por fricción se mantiene o incrementa (fuerza de forjado) durante un cierto tiempo después de que cesa la rotación. En la literatura existente se pueden encontrar las relaciones entre las características de los parámetros de la soldadura por fricción de impulso directo y podemos verlas en la figura 3.2.

- **Soldadura de impulso inercial.**

En la soldadura por fricción inercial, una de las piezas de trabajo está conectada a un volante y la otra está restringida de modo que no puede girar. El

* Durante la lectura utilizaremos la palabra "vuelco" para referirnos al acortamiento axial.

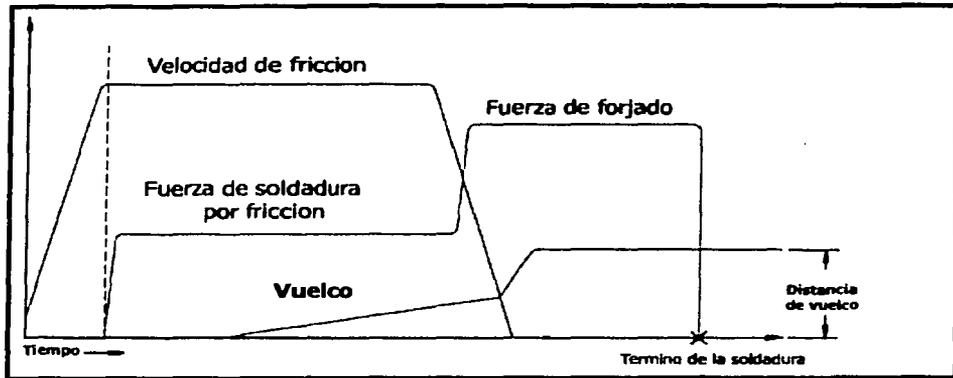


Figura 3.2 – Características de los parámetros de la soldadura por fricción de impulso directo.

volante se acelera hasta una velocidad rotacional predeterminada, almacenando la energía requerida. El motor impulsor se desconecta y las piezas de trabajo se juntan por la aplicación de una fuerza de soldadura. Esto hace que las superficies de empalme se froten bajo presión. La energía cinética almacenada en el volante giratorio se disipa como calor, por la fricción en la cara interna de soldadura, al tiempo que la velocidad del volante decrece. Se puede aplicar una fuerza de forjado mayor antes que se detenga la rotación. La fuerza de forjado se mantiene durante un tiempo previamente determinado después de que las piezas dejen de girar. Las relaciones entre las características de los parámetros de la soldadura por fricción inercial aparecen en la figura 3.3.

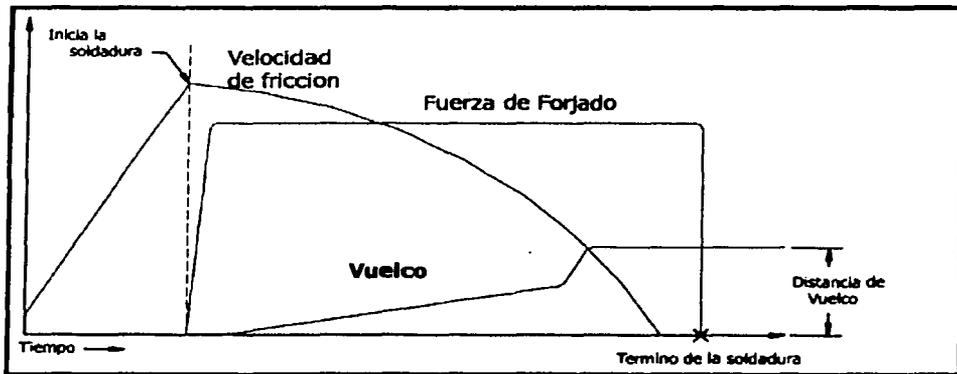


Figura 3.3 – Características de los parámetros de la soldadura por fricción inercial.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Aunque los detalles específicos del proceso de unión no están perfectamente claros, el ciclo de soldadura puede dividirse en dos etapas: la etapa de fricción y frotamiento y la etapa de forjado. El calor de soldadura se genera en la primera etapa y la soldadura se consolida y enfría durante la segunda.

- **Etapas de fricción.**

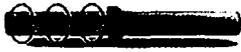
Si las piezas de trabajo son idénticas, el mecanismo de unión se efectúa en pasos. Cuando las piezas hacen contacto, hay frotamiento entre las superficies de empalme, y hay una fuerte adhesión en diversos puntos de contacto. La presión unitaria es alta. En algunos puntos, la adhesión es más fuerte que el metal circundante: hay cizallamiento y se transfiere material de una superficie a la otra. Al continuar la frotación, aumentan tanto el par de torsión como la temperatura de la interfaz. El tamaño de los fragmentos transferidos crece hasta que estos se convierten en una capa continua de metal plastificado. Si se forma una película líquida, sucede en este punto. Durante este periodo, el par de torsión llega a un máximo y empieza a declinar hasta un valor mínimo, que permanece más o menos constante mientras el metal se calienta y es expulsado de la cara interna al tiempo que continúa el acortamiento axial.

- **Etapas de forjado.**

Hacia el final del proceso de calentamiento, se aplica una presión de forjado a la pieza de trabajo para que se produzca un acortamiento axial. Esta presión produce el exceso de material a los costados de la pieza de trabajo, como se ve en la figura 3.1(D). Si comparamos las figuras 3.2 y 3.3 podremos observar que en la parte final de los procesos de soldadura por fricción de impulso directo e inercial es muy similar respecto al acortamiento axial (vuelco), la velocidad y la presión. Al disminuir la velocidad, aparece un segundo máximo del par de torsión cuando la cara interna se une y se enfría desde su temperatura máxima. A continuación, el par de torsión disminuye y la velocidad rotacional baja hasta cero.

El mecanismo de unión de metales disímiles es más complejo, ya que en él pueden intervenir varios factores, como las propiedades físicas y mecánicas, la energía de superficie, la estructura cristalina, la solubilidad mutua y los compuestos inter-metálicos. Es probable que exista una zona con cierto grado de aleación como resultado de la mezcla y difusión mecánicas. Las propiedades de esta capa pueden tener un efecto significativo sobre las propiedades globales de la unión.

Lo complejo del mecanismo hace muy difícil predecir la soldabilidad de metales disímiles, por lo que es preciso establecer la idoneidad de una



combinación determinada para cada aplicación mediante series de pruebas diseñadas con ese fin.

3.2 RELACIONES ENTRE LAS VARIABLES.

SOLDADURA DE IMPULSO DIRECTO.

- **Velocidad.**

La función de la rotación es producir una velocidad relativa en las superficies de empalme. Desde el punto de vista de la calidad de la soldadura, la velocidad casi nunca es una variable crítica; esto es, puede variar dentro de una banda de tolerancia bastante ancha y aún así producir soldaduras firmes. Para el acero la velocidad tangencial deberá ser del orden de 1.3 m/s, tanto para piezas de trabajo sólidas y tubulares. Las velocidades tangenciales por debajo de 1.3 m/s produce pares de torsión muy altos que causan problemas de sujeción de las piezas de trabajo, vuelco no uniforme y desgarramiento metálico. Las máquinas de producción normalmente se diseñan para trabajar a velocidades de 300 a 650 rpm. Por ejemplo, se puede usar una velocidad de eje de 600 rpm para soldar productos de acero de 50 a 100 mm (2 a 4 pulgadas) de diámetro. Las velocidades angulares elevadas y los aportes de calor más bajos que implican, pueden servir para soldar aceros endurecibles. El tiempo de calentamiento más largo precalienta el metal y así controla la rapidez de enfriamiento y evita el agrietamiento por templeado. Por otro lado, en el caso de ciertas combinaciones de metales disímiles las velocidades bajas (con sus tiempos de calentamiento más cortos) puede minimizar la formación de compuestos inter-metálicos quebradizos. No obstante, en la práctica el tiempo de calentamiento (para un determinado vuelco) se controla variando la presión de la soldadura por fricción.

- **Presión.**

Los intervalos de presión para el calentamiento y el forjado también son amplios, aunque las presiones seleccionadas deberán ser reproducibles para cualquier operación específica. La presión controla el gradiente de temperatura en la zona de soldadura, la potencia de impulso requerida y el acortamiento axial. Se puede usar la presión para compensar la pérdida de calor a una masa grande, como cuando se suelda un tubo a una placa.

La presión de calentamiento debe ser suficiente para mantener las superficies de empalme en contacto íntimo y evitar la oxidación. Para una velocidad de eje determinada, una baja presión limita el calentamiento con poco o ningún acortamiento axial. Una presión elevada causa calentamiento local hasta



una temperatura muy alta y un acortamiento axial rápido. En muchos metales, incluidos los aceros, la calidad de la unión mejora cuando se aplica una mayor fuerza de forjado al final del periodo del calentamiento.

Para los aceros, el intervalo de presiones que puede aplicarse obteniendo buenas soldaduras, es bastante amplio. En el caso del acero dulce, son aceptables presiones de calentamiento de 31 a 60 MPa y presiones de forjado de 76 a 152 MPa. Los valores de uso más común son 55 y 138 MPa, respectivamente. Las aleaciones altas, de resistencia mecánica en caliente, como los aceros inoxidable y las aleaciones a base níquel, requieren presiones de forjado más altas. Si se desea un efecto de "precalentamiento" para hacer menos rápido el enfriamiento, puede aplicarse una presión de cerca de 21 MPa durante un tiempo breve al principio del ciclo de soldadura; luego se aumentará la presión hasta la requerida para soldar.

- **Tiempo de calentamiento**

Para una aplicación en particular, el tiempo de calentamiento se determina durante la preparación o con base en la experiencia previa. Un tiempo de calentamiento excesivo limita la productividad y desperdicia material; un tiempo insuficiente puede producir calentamiento disparejo así como el atrapamiento de óxidos y áreas no adheridas a la interfaz. El calentamiento no uniforme es típico de las soldaduras por fricción en barras. Cerca del centro de la barra en rotación, la velocidad superficial puede ser demasiado baja para producir un calentamiento friccional adecuado, de modo que debe haber difusión térmica desde la porción exterior de la superficie de empalme para que la unión global sea firme.

El tiempo de calentamiento puede controlarse de dos maneras. La primera es con un dispositivo de cronometría apropiado que detenga la rotación al final de un lapso previamente determinado. Se pueden incorporar funciones de precalentamiento y forjado al tiempo de calentamiento empleando un cronómetro de secuencias.

El segundo método consiste en detener la rotación después de un acortamiento axial previamente determinado. Este método se ajusta de modo que se consuma la longitud suficiente para garantizar un calentamiento adecuado antes del vuelco. Esto puede compensar las variaciones en la condición de las superficies sin sacrificar la calidad de la soldadura. En síntesis, para un acortamiento axial dado al soldar acero dulce, el tiempo de calentamiento dependerá en forma significativa de la presión de calentamiento y de la velocidad. El tiempo de calentamiento disminuye con rapidez decreciente al aumentar la



presión de calentamiento; también disminuye con la velocidad si se mantiene constante la presión de calentamiento.

SOLDADURA POR FRICCIÓN INERCIAL.

En el caso de la soldadura por fricción inercial, la velocidad disminuye continuamente con el tiempo tanto durante la etapa de fricción como durante la de forjado. Esto contrasta con la soldadura por fricción de impulso directo donde la etapa de fricción tiene lugar a velocidad constante. La velocidad disminuye durante la fase de forjado en ambos procesos. A lo largo de toda la fase de fricción, el espesor de la capa plastificada depende de la velocidad de frotamiento. Al disminuir la velocidad hacia el final de la etapa de fricción, la generación de calor decae, el espesor de la capa plastificada caliente disminuye y el par de torsión llega a un máximo cuando la soldadura pasa a la etapa de forjado. La presión axial expulsa el metal caliente de la unión. Durante este tiempo, la tasa de acortamiento axial aumenta y luego se reduce a cero al enfriarse la unión.

En este método intervienen tres variables de soldadura: el momento de inercia del volante, la velocidad inicial del volante y la presión axial. Las primeras dos variables determinan la energía cinética total disponible para efectuar la soldadura, la magnitud de la presión generalmente se basa en el material que se va a soldar y en el área de empalme. La energía que tiene el volante en cualquier instante durante el ciclo de soldadura esta dada por la ecuación:

$$E = \frac{Iw^2}{2}$$

donde:

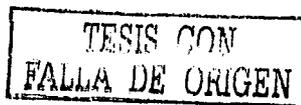
E = energía [J]

I = momento de inercia [kg m²]

w= velocidad angular [rad/s]

Para la creación de modelos matemáticos y el cálculo de parámetros, el valor derivado de "energía unitaria" está dado por la siguiente ecuación:

$$E_u = \frac{E}{A}$$





donde

E_u = energía unitaria [J/mm^2]

E = energía [J]

A = área de la superficie de empalme [mm^2]

En un sistema de volante dado, la energía del volante depende de su velocidad rotacional. Si cambia la masa del volante, cambiará la energía disponible a una velocidad determinada. Por lo tanto, la capacidad de una máquina soldadora inercial puede modificarse haciendo cambios al volante dentro de los límites que permita la máquina. Durante la soldadura se extrae energía del volante, y su velocidad disminuye, la forma de la zona térmicamente afectada puede ajustarse variando el momento de inercia del volante, la presión de calentamiento y la velocidad.

Efecto de volante.

El momento de inercia del volante depende de su corte seccional, de su diámetro y de su masa. Para una aplicación y velocidad inicial específicas, la energía disponible para soldar puede aumentarse usando un volante con mayor momento de inercia. La magnitud del vuelco hacia el final del ciclo de soldadura depende de la energía remanente en el volante y también de la presión de calentamiento o de forjado. Los volantes grandes pueden prolongar la fase de forjado o vuelco, si el volante es demasiado pequeño, el vuelco podría ser insuficiente para consolidar la soldadura y expulsar las impurezas de la interfaz.

Velocidad.

La velocidad tangencial instantánea varía directamente con el radio y la velocidad angular, de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$V_t = rw$$

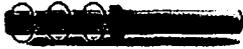
donde

V_t = velocidad tangencial [m/s]

r = radio [m]

w = velocidad angular [rad/s]

En el caso de una barra sólida en rotación, la velocidad varía linealmente desde cero en el centro hasta un máximo en la periferia. Esto contrasta con el comportamiento de un tubo de pared delgada en el que el cambio de velocidad a



lo ancho de la superficie de empalme es insignificante. Así pues, la energía requerida para soldar una varilla y un tubo de la misma aleación y con la misma área de empalme será diferente.

Presión de calentamiento.

El efecto de variar la presión de calentamiento generalmente es el opuesto al de la velocidad. Un exceso de presión produce una soldadura con unión deficiente en el centro y una gran cantidad de vuelco, como sucede cuando la velocidad es baja. El intervalo de presión de calentamiento efectivo para una barra sólida de acero de mediano carbono es de 152 a 207 MPa.

3.3 MÁQUINAS PARA SOLDADURA POR FRICCIÓN.

Una máquina para soldar por fricción tiene los siguientes componentes:

1. Cabezal.
2. Base.
3. Mecanismos de sujeción.
4. Mecanismos de giro y vuelco.
5. Fuente de potencia.
6. Controles.
7. Dispositivos de vigilancia opcionales.

Esto se aplica a las dos variaciones del proceso; sin embargo, el diseño y método de operación de las máquinas difieren un poco.

Máquinas soldadoras de impulso directo.

En las máquinas de soldadura por impulso directo una de las piezas de trabajo se sujeta con una prensa y la otra se sostiene con algún otro elemento de sujeción que permita centrar las piezas, montado sobre un eje giratorio. El eje es impulsado por un motor a través de una transmisión de velocidad fija o variable. Para hacer una soldadura, la pieza de trabajo giratoria se empuja contra la pieza de trabajo estacionaria a fin de producir calor por fricción en las superficies de contacto, esto se ilustra en la figura 3.4. La combinación de velocidad y presión eleva las superficies en contacto a una temperatura apropiada y ocurre una deformación. Entonces se detiene la rotación y la presión se mantiene o aumenta para volcar aún más la zona de unión y completar la soldadura.



El eje de la máquina se puede impulsar directamente con un motor y dejar que se detenga por sus características de desaceleración naturales y el par de torsión retardante que ejerce la soldadura, pero en la práctica normalmente se utiliza un embrague entre el motor y el eje para que el primero pueda operar

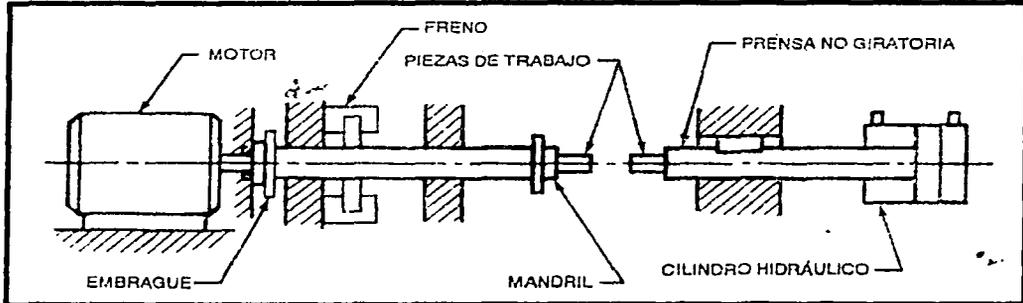


Figura 3.4 – Disposición básica de una máquina de soldadura por fricción de impulso directo. continuamente.

Máquinas de soldadura por fricción inercial.

En las máquinas soldadoras inerciales, un volante se monta en el eje entre la transmisión y el mandril giratorio, como se muestra en la figura 3.5. El volante, eje, mandril y pieza de trabajo se aceleran hasta una velocidad específica que corresponde a un cierto nivel de energía. Cuando se alcanza esa velocidad, se suspende el impulso y se deja que el volante y la pieza de trabajo giren libremente. En seguida se juntan las dos piezas de trabajo y se aplica un empuje axial específico. La energía cinética del volante se transfiere a la interfaz de la soldadura y se convierte en calor.

En consecuencia, la velocidad del volante se reduce hasta llegar a cero. Al mismo tiempo, la velocidad tangencial disminuye hacia cero con el tiempo siguiendo una curva prácticamente parabólica. El tiempo de calentamiento es apenas cuestión de unos segundos. En la mayor parte de las aplicaciones de la soldadura por fricción inercial se usa un solo empuje axial para producir el calentamiento y la fuerza de forjado, pero las máquinas normalmente pueden aplicar más de un nivel de empuje. Esta técnica de fuerza variable también puede servir para crear un efecto de precalentamiento antes de la soldadura, como en el método de impulso directo.

Casi todas las soldaduras se obtienen variando la presión y la velocidad de soldadura.

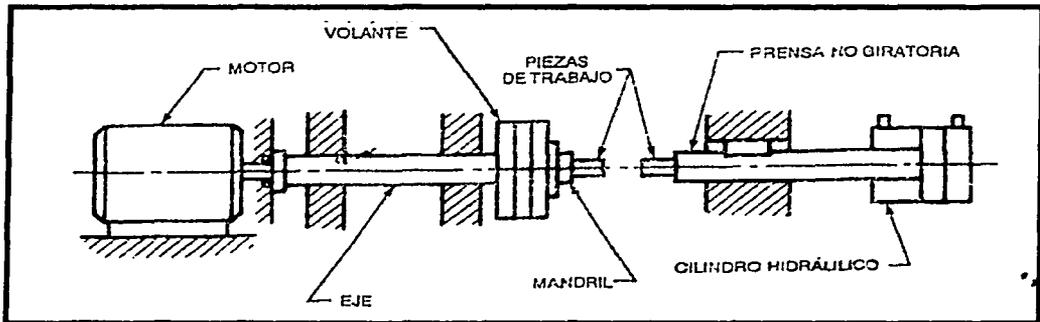


Figura 3.5 – Disposición básica de una máquina soldadora inercial.

3.4 VENTAJAS Y LIMITACIONES.

La soldadura por fricción, como cualquier proceso de soldadura, tiene ventajas y desventajas específicas.

VENTAJAS:

Estas son algunas ventajas de la soldadura por fricción:

1. No se requiere material de aporte.
2. No hace falta fundente, ni gas protector.
3. El proceso es limpio desde el punto de vista ambiental; no hay arcos, chispas, humos, ni vapores generados cuando las piezas están limpias.
4. La limpieza superficial no es tan crítica, en comparación con otros procesos de soldadura, ya que la soldadura por fricción tiende a romper y desplazar las películas superficiales.
5. Las zonas térmicamente afectadas son angostas.
6. El proceso es consistente y repetitivo.
7. Al ser un proceso de estado sólido, las probabilidades de porosidad e inclusiones son eliminadas.



Figura 3.6 – La unión de metales disímiles es una de las ventajas de la soldadura por fricción.



8. La soldadura por fricción es apropiada para soldar la mayor parte de los materiales de ingeniería y se presta para la unión de muchos metales disímiles como acero y aluminio, acero y cobre, acero y titanio por mencionar unos ejemplos.

9. 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.

10. No es necesario que los operadores tengan habilidades de soldadura manual.

11. El proceso es fácil de automatizar para la producción en masa.

12. Las soldaduras se efectúan con rapidez en comparación con otros procesos de soldadura.

13. Los requerimientos de planta (espacio, potencia, cimientos especiales, etc) son mínimos.

14. La necesidad de energía es menor en un 20% aproximadamente de la requerida en los procesos de soldadura convencional⁸.



Figura 3.7 – La gran cantidad de piezas que se pueden obtener es otra de las ventajas..

LIMITACIONES.

Estás son algunas de las limitaciones del proceso:

- 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 el calentamiento sean uniformes, sobre todo cuando los diámetros exceden los 50 mm.
- 3.** Los costos de capital por equipo y herramental son elevados.
- 4.** No es posible soldar materiales de lubricación seca, ni no forjables.
- 5.** Si las dos piezas tienen más de 1 m de longitud, se requieren máquinas especiales.
- 6.** Las aleaciones de maquinado libre son difíciles de soldar.

3.5 MATERIALES SOLDADOS.

La soldadura por fricción puede servir para unir una amplia gama de materiales similares y disímiles, incluidos metales, algunos materiales compuestos de matriz metálica, cerámicas y plásticos. En la figura 3.9 se indican algunas combinaciones de materiales que se han unido, según la literatura y los datos de los fabricantes de los equipos. Esta gráfica debe tomarse solo como guía. La

soldabilidad específica puede depender de varios factores, entre ellos la composición de las aleaciones específicas, la variación del proceso que se aplique, el diseño de los componentes y los requisitos de servicio.

En principio, casi cualquier material que se pueda forjar en caliente y no sea apropiado para aplicaciones de lubricación seca se puede soldar por fricción. Algunos metales pueden requerir un tratamiento térmico después de la soldadura para eliminar los efectos de la deformación severa o el endurecimiento por templeado de la zona de soldadura.

Hay muchas combinaciones de metales disímiles que tienen soldabilidad marginal. Entre ellas puede haber combinaciones con conductividades térmicas alta y baja, con una diferencia considerable en las temperaturas de forjado o con tendencia a formar compuestos intermetálicos quebradizos. Como ejemplos están las aleaciones de aluminio soldadas con cobre o acero (figura 3.8) y las aleaciones de titanio soldadas con acero inoxidable.

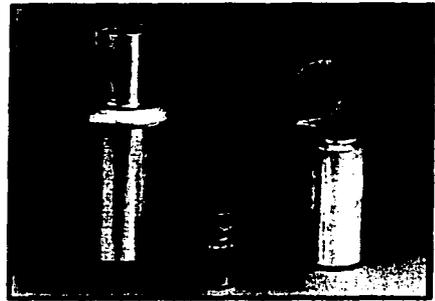


Figura 3.8 – Ejemplo de materiales disímiles soldados por fricción.

Las estructuras metalúrgicas producidas en la soldadura por fricción generalmente son las que resultan de la deformación a altas temperaturas. El tiempo a estas temperaturas es corto, y los niveles que se alcanzan generalmente están por debajo del punto de fusión. En el caso de los metales no endurecibles, como el acero dulce, los cambios en las propiedades dentro de la zona de soldadura son insignificantes.

Por otro lado, en el caso de los aceros endurecibles, puede haber cambios estructurales significativos en la zona afectada por el calor. Se recomienda soldarlos con un tiempo de calentamiento relativamente largo para que la tasa de enfriamiento sea más lenta y se conserve la tenacidad.

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

Esta lista se compila a partir de la literatura disponible sobre soldadura por fricción. Cada fabricante tiene diferentes experiencias y conocimientos sobre la soldadura de algunos de estos materiales.

	Alusiones de Zirconio Material para vlv. Autom.	Vanadio	Uranio	Carburo de Tungsteno cement.	Tungsteno	Alusiones de titanio	Titanio	Torio	Tantalio	Aceros para herramientas	Aceros inoxidables	Aceros aluminados	Aceros maraging	Aceros de maquinado libre	Aceros al carbono	Aceros de baja aleación	Alusiones de plata
Aluminio																	
Alusiones de aluminio																	
Latón																	
Bronce																	
Carburos cementados																	
Hierro coledo																	
Cerámica																	
Cobalto																	
Colombio																	
Cobre																	
Cobre-Niquel																	
Hierro aluminado																	
Plomo																	
Magnesio																	
Alusiones de magnesio																	
Moibideno																	
Niobio																	
Alusiones de niobio																	
Plata																	
Alusiones de Plata																	
Aceros de baja aleación																	
Aceros al carbono																	
Aceros de maquinado libre																	
Aceros maraging																	
Aceros aluminados																	
Aceros inoxidables																	
Aceros para herramientas																	
Tantalio																	
Torio																	
Titanio																	
Alusiones de Titanio																	
Tungsteno																	
Carburo de tungsteno cement.																	
Uranio																	
Vanadio																	
Material para vlv. Autom.																	
Alusiones de Zirconio																	

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Unión metalúrgica con resistencia local (en algunos casos puede ser necesario aplicar un tratamiento térmico apropiado después de la soldadura para que esta adquiera su resistencia mecánica máxima)

Se pueden soldar por fricción, pero no obtendrán soldaduras con resistencia mecánica completa.

Figura 3.9 – Combinaciones de materiales soldables por fricción.

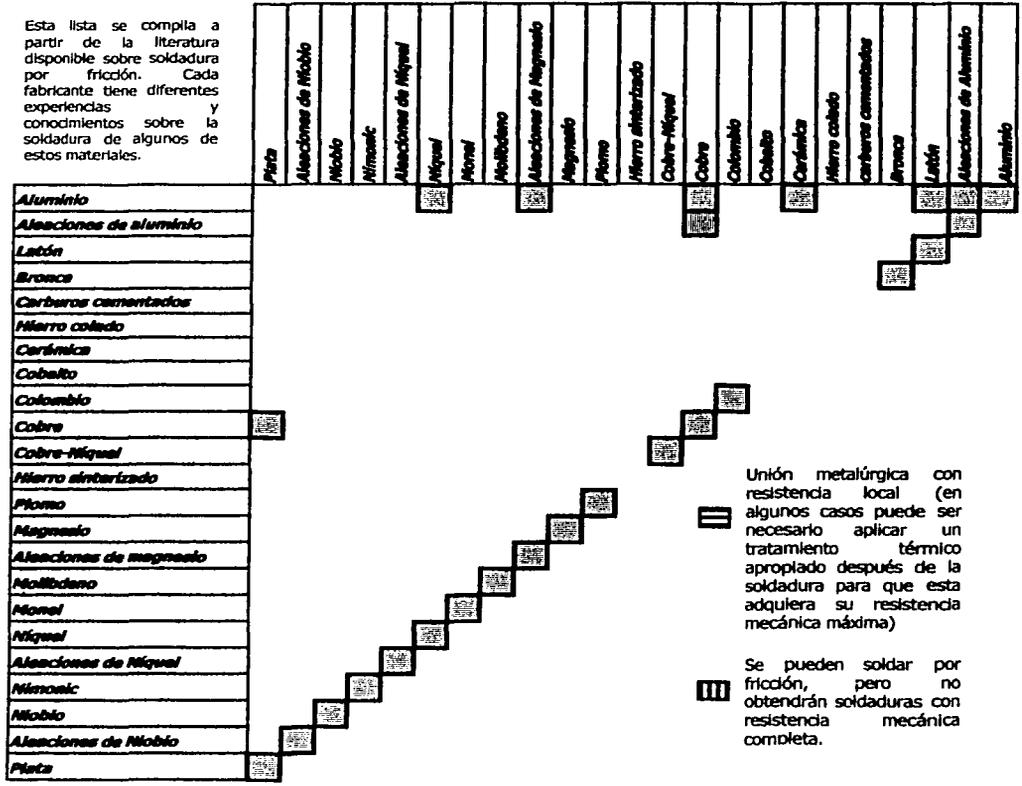


Figura 3.9(continuación) – Combinaciones de materiales soldables por fricción.

3.5 APLICACIONES DE LA SOLDADURA POR FRICCIÓN.

Las aplicaciones de la soldadura por fricción son ilimitadas. Los componentes soldados por fricción en aplicaciones de producción se encuentran en las industrias aeroespacial, agrícola, automotriz, de defensa, marina y petrolera. Entre los componentes de vehículos que se fabrican por soldadura por fricción están:

- Engranés
- válvulas de motor
- tubos de ejes
- componentes de la línea de transmisión

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

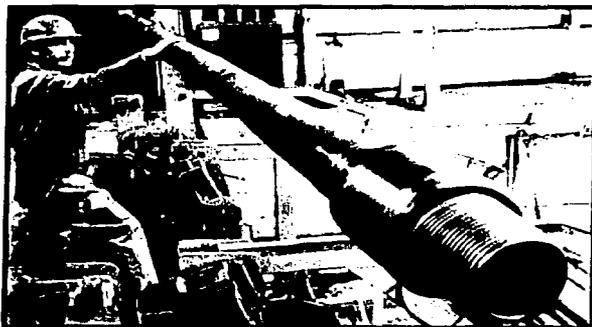


- varillas de suspensión
- amortiguadores

Los fabricantes de equipo agrícola con frecuencia sueldan por fricción:

- Vástagos de pistones hidráulicos
- rodillos guía
- engranes
- bujes
- ejes y componentes similares.

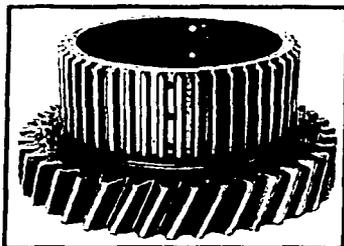
En la industria eléctrica se emplean mucho uniones aluminio-cobre soldadas por fricción. Los aceros inoxidable se sueldan por fricción a acero al carbono en diversos tamaños para usarse en sistemas de impulso marinos y bombas de agua de uso doméstico e industrial. Es común sustituir colados y forjados costosos por ensambles soldados por fricción. Para el consumidor podemos encontrar una gran variedad de herramientas manuales así como piezas de equipo deportivo soldadas por fricción. Es importante mencionar que se pueden realizar soldaduras de barras sólidas, tubos, placas y discos, incluyendo sus combinaciones. En la figura 3.10 se presentan varios ejemplos de aplicaciones.



Unión de distintos materiales como sección de una tubería



Conectores eléctricos bimetalicos



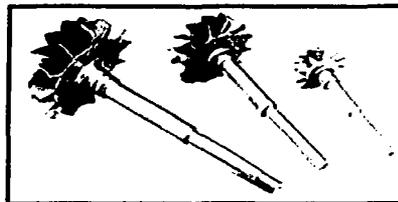
Engranes de transmisión

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

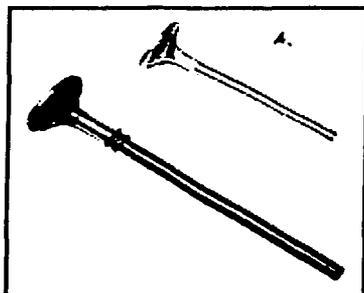
Figura 3.10 – Ejemplos prácticos del proceso de soldadura por fricción



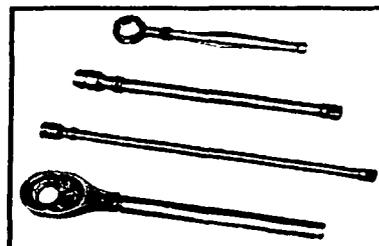
Infladores de bolsas de aire tanto del conductor como del copiloto



Flechas de turbo cargador



Válvulas de motor bimetalicas



Herramientas manuales



Pistón de motor diesel.

Figura 3.10(continuación) – Ejemplos prácticos del proceso de soldadura por fricción



4. DISEÑO DEL DISPOSITIVO.

- 4.1 Definición del problema.**
- 4.2 Diseño conceptual.**
- 4.3 Adecuación del diseño para su realización.**
- 4.4 Diseño de detalle.**

En el presente capítulo se desarrolla el proceso de diseño por medio del cual se obtuvo la mejor opción para el dispositivo deseado.

Cuando se requiere diseñar algún elemento de alguna máquina o el dispositivo en sí, se requiere tomar en cuenta muchos factores que a lo largo del proceso de diseño irán formando parte de la solución de la necesidad. Para la manipulación de estos factores algunos autores toman estos como especificaciones a cumplir.

Una vez establecidas las necesidades y a su vez las especificaciones, se procede a proponer los requerimientos que deberá cumplir nuestro diseño.

En el punto 4.2 se desarrolla el diseño conceptual, en el cual se concentran las opciones para la solución del problema, a través de un proceso iterativo, ayudado por medio de la herramienta de la matriz morfológica.

Una vez seleccionada la opción adecuada para nuestros objetivos, se procede a darle forma para comenzar con el diseño de detalle donde se da forma final y se establecen los parámetros para su fabricación y otras acciones, contenidas en los planos de fabricación.

Al final de este tema lo que se obtiene es un conjunto de información que representa a todo este proceso de diseño y que aunque a pasado por diversos filtros aún existe la posibilidad de haber de retroalimentación de información debido los procesos de manufactura utilizados.



4.1 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.

4.1.1 Planteamiento del Problema.

Se requiere diseñar un dispositivo que sea capaz de unir piezas con simetría axial por medio del proceso de soldadura por fricción, basados en que este dispositivo debe estar montado en un torno convencional de los talleres de manufactura de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México. El porque de diseñar este dispositivo está en que la soldadura por fricción es un proceso poco conocido en la industria mexicana a pesar de ser un proceso ya con más de 50 años de vida⁴. Por lo que diseñar un dispositivo que sea capaz de realizar estas soldaduras tendrá como actividad principal la de difundir el uso de este proceso de unión de materiales.

En general el proceso de soldadura por fricción, es un proceso de soldadura en estado sólido que produce una unión bajo la presión de contacto entre dos piezas de trabajo que giran o se mueven una respecto a la otra produciendo calor y desplazando plásticamente el material de las superficies a unir⁵. La soldadura por fricción sirve para unir una amplia gama de materiales similares y disímiles, incluidos metales, materiales compuestos de matriz metálica, cerámicos y plásticos⁶.

La soldabilidad depende de varios factores, entre ellos la composición de las aleaciones, la variación del proceso que se aplique, el diseño de los componentes y los requisitos de servicio. En la mayoría de los casos, la resistencia mecánica de la unión es equivalente o superior a la del más débil de los materiales que se unen. Sin embargo para optimizar las propiedades es necesario seleccionar adecuadamente los parámetros de soldadura.

Se ha encontrado que los parámetros importantes son la presión de fricción y el tiempo de fricción. De hecho Murti y Sundaresan⁷ consideran conveniente usar presiones de fricción elevadas y tiempos de fricción largos para obtener el mejor conjunto de propiedades. Este criterio de selección de los parámetros de fricción no coincide con los resultados encontrados por otros investigadores que sugieren que uniones disímiles es necesario usar presiones de fricción altas y tiempos de fricción cortos.

⁴ Hazlett T.H., Fundamentals of Friction Welding, ASM Technical Report No. C6-30.1 1966

⁵ Cuaauh témec Maldonado Zepeda, Unión de Aleaciones de Aluminio / Acero mediante el Proceso de Soldadura por Fricción - Encuentro Internacional de Soldadura Industrial, Instituto de Investigaciones Metalúrgicas. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

⁶ Jessop, T.J., Nicholas, e.d., and dinsdale, W.O. Friction Welding of Dissimilar Materials. in Advances in Welding Processes. 1978. Harrogtá, UK: The Welding Institute.

⁷ Murti, K.G.K., and Sundaresan, s., Parameter Optimization in Friction Welding Dissimilar Materials. Metal Construction, 1983: p. 331-334.



Actualmente en la industria existen gran variedad de dispositivos para la unión de partes por este proceso. Las principales aplicaciones se ubican en el área automotriz, aeroespacial, construcción, petrolera entre otras. Tal vez el área más desarrollada en México sea en la industria automotriz y en la industria del plástico, con aplicaciones sencillas como en la industria Rotoplast® en la unión de conexiones hidráulicas a sus tinacos por medio de este proceso, eliminando de esta manera el uso de otras formas de energía, así como la aplicación de adhesivos u otros materiales de aporte.

Normalmente existe una relación de que por cada tonelada de forja se requiere de un HP, por lo tanto para 100 Ton (890kN) (2000Lb) se requieren 15kW (100 HP) de motor eléctrico.⁸ De esta misma referencia se encontró la siguiente información con respecto a la unión de dos tipos de elementos, una barra y un tubo:

Material Acero 1018	
Barra.	
▪ Geometría:	25.4 mm (1 in) Ø
▪ Área de soldadura:	0.506 mm ² (0.785 in ²)
▪ Velocidad:	1100 r.p.m.
▪ Fuerza de Calentamiento:	35.59 kN (4 Ton)
▪ Fuerza de Forja:	71.17 kN (8 Ton)
Tubo.	
▪ Geometría:	50.8 mm (2 in) D.E.
	38.1 mm (1.5 in) D.I.
▪ Área de soldadura:	0.886 mm ² (1.37 in ²)
▪ Velocidad:	900 r.p.m.
▪ Fuerza de calentamiento:	48.93 kN (5.5 Ton)
▪ Fuerza de Forja:	97.86 kN (11 Ton)
▪ Distancia consumida:	3.17 mm (0.125 in)

Tabla 4.1 - Datos experimentales del proceso

A partir de esta información podemos establecer que se requerirá de al menos 10 HP para poder unir materiales que requieran 10 Ton de presión de forja. Estos datos nos permitirán establecer los límites a los cuales trabajará el dispositivo, teniéndolos en cuenta cuando se requiera establecer las restricciones de nuestro problema.

⁸ American Welding Society, Recommended Practices for Friction Welding, ANSI / AWS An American National Standard



<p>Torno Romi Potencia: 15 HP Par Máx.: 1814 Nm Distancia entre puntos: 2 m</p>

Tabla 4.2 - Datos del Torno.

En resumen el proceso teórico consta de los siguientes pasos:

Proceso.⁹

1. Alinear las dos piezas a unir en un alineamiento axial.
2. Se pone a rotar una de las piezas mientras la otra avanza hasta hacer contacto con esta aplicando una fuerza de forma uni-axial.
3. La rotación continua por un periodo suficiente para generar la temperatura en la cual el material alcanza su estado plástico.
4. Alcanzada la anterior condición se detiene la barra mientras que la fuerza se mantiene o se aumenta para consolidar la unión.
5. Se libera la pieza ya unida.

4.1.2 Objetivo del Proyecto.

Basados en la información anterior podemos establecer el siguiente objetivo a seguir para la realización de este diseño:

“ Diseñar un dispositivo adaptado a un torno para la unión de dos elementos cilíndricos por el proceso de soldadura por fricción ”

4.1.3 Alcances del Proyecto.

Este proyecto tiene como alcance fabricar un dispositivo que sea capaz de realizar uniones satisfactorias por el proceso de soldadura por fricción, con información de respaldo como lo son planos y especificaciones de operación, así como de un manual de operación.

4.1.4 Requerimientos.

En esta etapa Ulrich¹⁰ sugiere 6 pasos, los cuales no pueden ser tomados al 100% ya que el enfoque de este autor es el de diseño de productos comerciales

⁹ Melvin M. Schwartz, Source book on Innovative Welding Processes, American Society for Metals, Metals Park Ohio 44073, U.S.A.



masivos, los cuales requieren de estudios de mercado entre otras cosas. Para nuestro caso toda la información que podemos obtener es a través de libros, artículos, revistas especializadas, Internet, Patentes, etc.

Ya que inicialmente no se tiene contemplado que esta máquina tenga un fin comercial sino experimental, algunas consideraciones hechas por Ulrich, no se tomaran en cuenta.

Los 6 pasos son los siguientes:

1. Definir el enfoque del proyecto.
2. Recopilar información del mercado.
3. Interpretar esta información.
4. Organizar las necesidades en forma jerárquica, de acuerdo a su importancia en primaria, secundaria, terciaria, etc. como sea necesario.
5. Establecer la importancia relativa de las necesidades.
6. Reflexionar en los resultados obtenidos y en el proceso para obtenerlos.

4.1.5 Definición del enfoque del proyecto.

Misión: Soldadura por fricción en un torno convencional de la Facultad de Ingeniería, UNAM.

Descripción: Diseño de Adaptación para un torno para realizar soldadura por fricción.

Objetivos: Obtener planos de fabricación.
Obtener un equipo funcional.
Obtener piezas satisfactoriamente unidas.

Principal Aplicación: Equipo didáctico.

Aplicación Secundaria: Equipo experimental (obtención de probetas para realizar pruebas de calidad de soldadura y soldabilidad de materiales disímiles)

Restricciones: Montado en el carro de un Torno convencional.
Operado Manualmente.
Facilidad de mantenimiento.
Vida del Equipo no menor a 3 años.

¹⁰ Ulrich, Karl T. and Eppinger, Steeven D., Product Design and Development, McGraw-Hill, Inc. 1995



Usuarios: Estudiantes.
 Tesistas.
 Gente externa al departamento.

4.1.6 Recopilación de la información relacionada.

La información referente a este dispositivo se obtuvo por medio de diferentes medios como se comento anteriormente, Ulrich menciona que se requieren hacer entrevistas, pero en nuestro caso esto no fue posible ya que en México no hay mucha gente que este en contacto con esta tecnología, por lo que a través de este medio solo se obtuvieron algunos datos básicos, como el saber si era posible hacer uso de un torno para hacer este tipo de aplicaciones. Esta información se obtuvo de parte del Ing. Cuauhtémoc Maldonado Zepeda*, el cual realizó un artículo para el Encuentro Internacional de Soldadura Industrial realizado en el año 1999. También se obtuvo información por medio de la Organización Mexicana de la Soldadura (OMS), donde se nos proporcionaron algunos datos obtenidos experimentalmente. Por lo anterior esta información no se puede tomar como obtenida por entrevistas, sino como sugerencias proporcionadas por gente informada del tema.

Otro medio que sugiere Ulrich, es el de observar a equipos ya en uso y tomar notas acerca del funcionamiento que puedan ser útiles para nuestros objetivos. Los equipos que se pudieron observar fueron solo por imágenes y videos proporcionados por empresas como Thompson Friction Welding Ltd, donde muestran sus diferentes modelos y algunas especificaciones útiles para nuestro proyecto, así como configuraciones de sus máquinas.

Otra de las formas por la cual se obtuvo cierta información acerca de las necesidades fue a través de sesiones con nuestro asesor donde establecimos algunas necesidades, como el que esta máquina pudiera soldar barras circulares con un máximo de 25.4mm (1 in) de diámetro en aluminio y 12.7mm (0.5 in) en acero 1018 (cold-rolled), poder montase en un torno de los existentes en el laboratorio de manufactura, unir metales disímiles. Se quiere sea de fácil mantenimiento y hacer el mayor uso posible de los equipos existentes en los talleres.

4.1.7 Interpretación de la información.

Siguiendo los consejos proporcionados por Ulrich se obtiene la siguiente tabla donde se concentran las necesidades que se identificaron:

* Cuauhtémoc Maldonado Zepeda, Instituto de Investigaciones Metalúrgicas, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Edif. U. Ciudad Universitaria, Morelia, Mich. (MÉXICO) e-mail: cmzepeda@zeus.umich.mx

No.	Información de necesidades recopiladas	Enunciado de necesidad
1	Debe poder montarse en un torno ya existente en el laboratorio de manufactura	El dispositivo esta adaptado al carro torno.
2	Debe unir metales disímiles	El dispositivo une materiales disímiles. (depende del proceso no de el dispositivo)
3	Buscar la manera de que se use para su operación material y equipo existente dentro del taller.	El dispositivo esta fabricado con material existente en el laboratorio. El dispositivo opera con equipo existente en el laboratorio.
4	Las piezas cilíndricas que generalmente se usan en el taller tienen en promedio 25.4mm (1 in) de diámetro(depense del Material).	El dispositivo puede unir piezas de 25.4 mm (1 in)
5	Se pueda operar fácilmente	El dispositivo se puede operar sin maniobras complicadas
6	Se quiere que sea de fácil mantenimiento	El dispositivo tiene pocas partes móviles.
7	Se debe conocer cual es la presión aplicada	El dispositivo cuenta con un indicador de presión.
8	Se puede manipular manualmente de preferencia.	El dispositivo se opera manualmente.
9	Se desmonta fácilmente	El dispositivo se instala / desmonta fácilmente

Tabla 4.3 - Necesidades y su interpretación.

4.1.8 Organización de las necesidades en forma jerárquica

A continuación estas necesidades se evalúan en cuanto a su importancia con una calificación de acuerdo a la siguiente tabla:

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Valor	Calificación
1	No deseable
2	No importante
3	Seria bueno que la tuviera
4	Muy deseable
5	Característica crítica

Tabla 4.4 - Criterios de evaluación

No.		Necesidad	Importancia
1	El dispositivo	está adaptado al carro del torno.	5
2	El dispositivo	une materiales disímiles.	4
3	El dispositivo	está fabricado con material existente en el laboratorio.	3
4	El dispositivo	opera con equipo existente en el laboratorio.	3
5	El dispositivo	puede unir piezas de 25.4 mm (1 in) de diámetro	4
6	El dispositivo	se puede operar sin maniobras complicadas	3
7	El dispositivo	tiene pocas partes móviles.	3
8	El dispositivo	cuenta con un indicador de presión.	5
9	El dispositivo	se opera manualmente.	4
10	El dispositivo	se instala fácilmente	4
11	El dispositivo	tiene un desplazamiento mínimo de 25.4 mm(1 in)	5

Tabla 4.5 - Evaluación de importancia de las necesidades

4.1.9 Reflexión de los resultados obtenidos y del proceso para obtenerlos

Una vez hecho lo anterior ahora se tiene una base para poder evaluar los resultados que se obtengan conforme se avance en el desarrollo de este tema. Como estos datos se obtuvieron a través del consenso de las diferentes personas involucradas en el desarrollo de este proyecto, resulta ser muy útil en la evaluación

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

de las características, así como una herramienta para la generación de ideas que ayuden a cumplir con estas necesidades.

4.1.10 Especificaciones

En esta etapa se asignan valores a los criterios para evaluar las necesidades establecidas. Para cada una de las necesidades es necesario proporcionarle una forma de como evaluarla.

No. Medida	No. Necesidad	Medida	Importancia	Unidades	Valor
1	1,4,5	Esta dentro del área permisible	5	Si / no Binario	Cumple
2	2,4,8	Máxima carga permisible	5	Ton	<10
3	1,3,5	Máximas dimensiones de piezas a sujetar	5	mm	<25.4
4	6,7,9,10	Numero de Piezas o ensambles móviles	3	Pz	--
5	10,6	Tiempo de ensamble al carro del torno	4	min	<10
6	2,5,4	Máximo par soportado	5	Nm	<1814
7	11	Distancia que se puede desplazar	5	mm	>25.4

Tabla 4.6 – Especificaciones con unidades y valores marginales.

4.2 DISEÑO CONCEPTUAL.

En esta etapa se intenta desarrollar la mayor cantidad de ideas que puedan solucionar nuestras necesidades y nuestras especificaciones.

El objetivo planteado se aborda mediante 5 pasos generales propuestos por Ulrich. El primero de estos pasos consiste en clarificar el problema, esto es entenderlo, así como descomponerlo en partes más sencillas de estudiar y de esta manera enfocarse hacia los problemas más complejos.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Una vez hecho esto y teniendo ya fragmentado nuestro problema, se inicia la tarea de conseguir información referente a cada uno de los problemas, la cual puede provenir de literatura, de expertos, de usuarios, patentes, etc. En paralelo a

esta actividad estas fuentes de información se deben ir analizando de forma individual para aumentar los conocimientos en estas áreas para poder evaluar cada uno de estos problemas de forma individual en un inicio y después en forma grupal para la generación de posibles soluciones.

Una vez concluida la búsqueda de información, inicia la etapa que tiene como objetivo el de clasificar la información apoyados en diagramas de árbol y matriz morfológica para la organización de las posibles soluciones.

Las soluciones se combinan para formar varias soluciones integrales y así poder evaluarlas ya con las funciones en conjunto.

4.2.1 Refinación del problema.

Como ya se había hablado con anterioridad se requiere diseñar un dispositivo que sea capaz de realizar la soldadura por fricción de dos elementos cilíndricos, cumpliendo las necesidades y especificaciones contenidas en las tablas 4.4 y 4.5 respectivamente.

Partiendo que en este momento ya se tiene claro cual es el problema, lo siguiente es descomponerlo en subfunciones que permitan resolver el problema de manera más sencilla y estructurada.

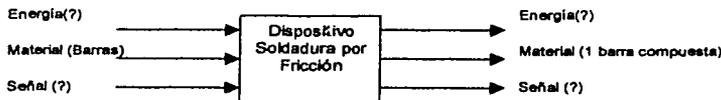


Figura 4.1 - Diagrama Funcional

A partir del siguiente diagrama funcional es posible analizar las funciones con las que debe cumplir nuestro dispositivo. Por lo general se establecen 3 flujos básicos que son flujo de energía, material y señales de control del proceso.

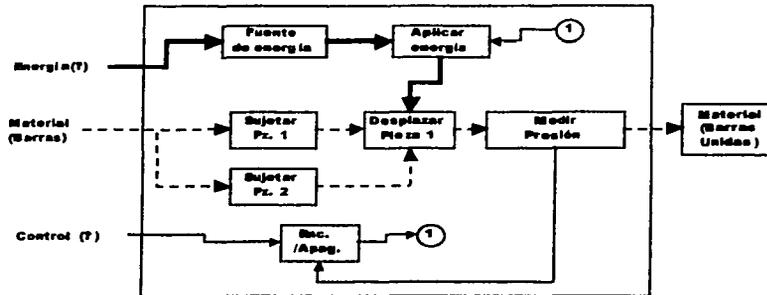


Figura 4.2 - Diagrama Con flujos de Material, Energía y control

De este diagrama se puede resumir que las funciones reconocidas en el problema son las siguientes:

1. Fuente de energía
2. Aplicar energía
3. Sujetar pieza
4. Desplazar pieza
5. Medir presión
6. Encender y apagar equipo

Tabla 4.7 - Funciones

Fuente de Energía: Provee el suministro de energía para que funcione el proceso.

Aplicación de energía: Transforma la energía suministrada en energía útil para el movimiento o desplazamiento del dispositivo.

Sujetar pieza: Permite mantener fijas las piezas durante el proceso de soldadura.

Desplazar pieza: Tiene la función de mantener el movimiento uni-axial de las piezas durante el proceso de unión.

Medir presión: Tiene la función de proporcionar información acerca de la carga que se esta suministrando a la unión para tener un parámetro de control sobre el proceso.

Encendido y apagado: Tiene la función de activar o desactivar el funcionamiento del torno.



Estas seis funciones requieren ser estudiadas de tal manera que se consiga la mayor cantidad de información acerca de cada una de ellas. A partir de la separación de los problemas, ahora inicia la etapa en la que es necesario recopilar la información existente relacionada con cada uno de los problemas por resolver. Esta información proviene de patentes, expertos en el área, literatura relacionada, etc..

En cuestión de patentes la búsqueda fue realizada en la base de datos de www.uspto.gov, la cual es la base de datos de patentes registradas en Estados Unidos de América. Las patentes relacionadas son las siguientes:

Patente	Descripción
US697202 26 Oct 2000 Friction Stir Welding Thomson	Patente referente al proceso de soldadura Stir Welding
US5460317 Oct 24 1995 Method and machine Thomson et al.	Patente referente a el proceso Friction Stir Welding, desarrollado por el Instituto de Soldadura, Cambridge, UK.
US3538592 17 Jul 1967 Friction welding J.A.Padilla	Patente sobre un mecanismo hidráulico de control del sistema de desplazamiento de la pieza.
US03954515 May 4 1976 Apparatus for rotator and bi axle type friction welding Takagi et al.	Equipo de soldadura por fricción de dos ejes rotatorios independientes.

Tabla 4.8 - Patentes relacionadas.

Paginas relacionadas con el proceso.

<http://www.ifweld.com/weld/Default.htm> Industrial suppliers. La información en esta página esta mas relacionada con la soldadura por fricción. En este sitio hay buenas imágenes acerca del proceso. Aquí se explican los procesos de soldadura directo, inercial e híbrido.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



<http://www.thompson-friction-welding.co.uk/frictionwelding.htm>
industriales. Una buena explicación del proceso

Proveedores

<http://www.twi.co.uk/sitemap.html> Mucha información disponible de las diferentes aplicaciones del proceso, ventajas del proceso, materiales y dimensiones, geometrías de las uniones entre otras cosas.

<http://www.ewi.org/matjoin/resistance/frictionstir.html> Edison Welding Institute. Descripción corta del proceso Friction Stir Welding y algunas aplicaciones.

American Welding Society: Aquí se puede encontrar gran cantidad de información acerca del proceso de soldadura por fricción.

4.2.2 Alternativas de solución.

En esta etapa se plantean para cada una de las funciones a cumplir las posibles alternativas. Para este proceso se recurre al uso de diagramas de árbol para clasificar en cada una de estas funciones las posibles alternativas.

Para el caso de la primera función tenemos que nuestro diagrama de árbol queda de la siguiente manera:

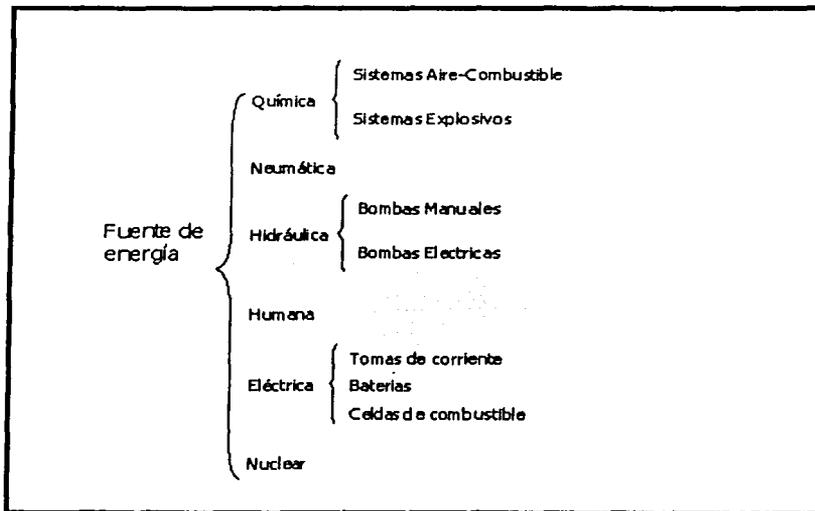


Figura 4.3 - Diagrama de árbol para la función fuente de energía o almacenamiento

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Para el caso de la siguiente función, aplicación de la energía; se refiere a cuales son las posibles maneras en las que la energía de la cual disponemos se aplicará para hacer funcionar nuestro sistema. En el siguiente diagrama se condensan las posibles alternativas.

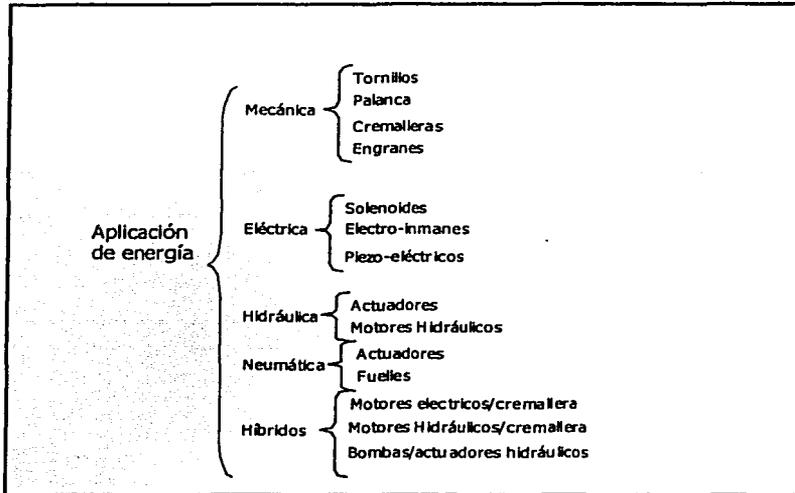


Figura 4.4 - Diagrama de árbol para la función aplicación de energía o almacenamiento.

Y de la misma manera para las otras 3 funciones que requiere sean satisfechas.

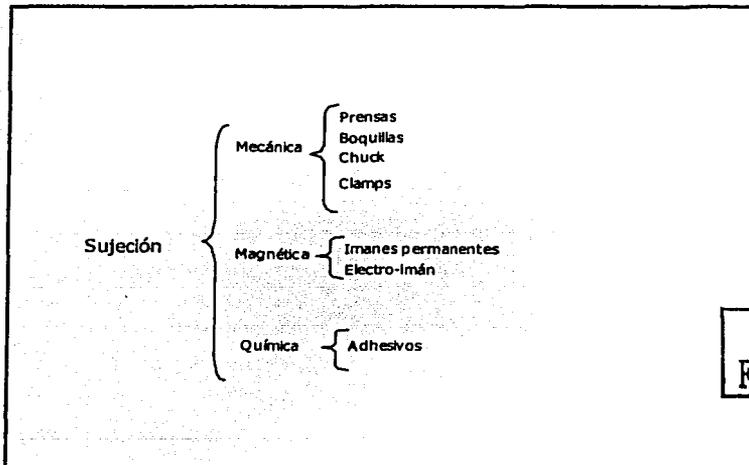


Figura 4.5 - Diagrama de árbol para la función sujeción.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

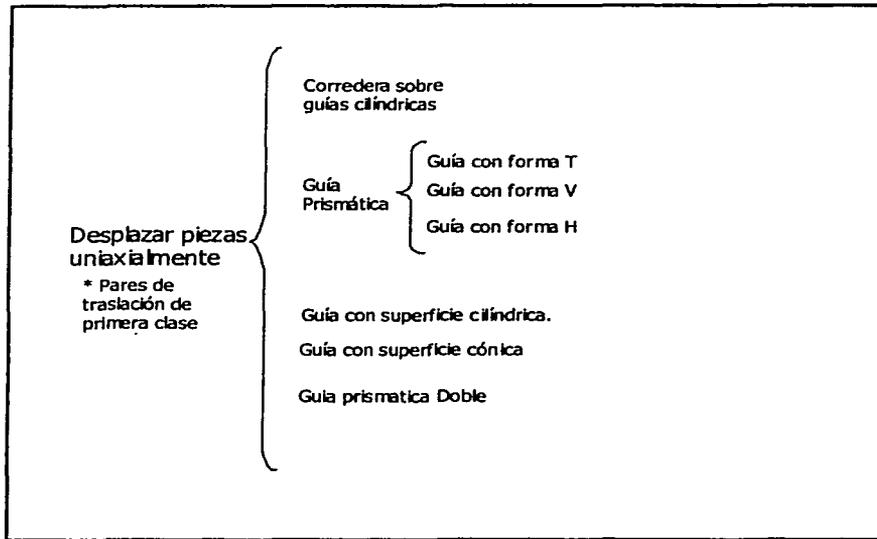


Figura 4.6 - Diagrama de árbol para la función desplazar piezas

Para el caso de las guías para mantener un movimiento uni-axial encontramos la información siguiente: ¹¹Las máquinas modernas pueden realizar múltiples, distintas y complejas funciones relacionadas con la transformación de la energía. Toda máquina está compuesta por mecanismos motores, transmisiones y actuadores. Como sistemas de accionamiento se usan motores eléctricos, hidráulicos y a veces neumáticos. Para la elección del tipo de fuente de movimiento esta determinada por las condiciones de uso y el carácter de movimiento que realizará.

Un concepto que resulta importante definir es el del par cinemático, que se define como la unión móvil de dos cuerpos o elementos cuyo movimiento relativo queda mutuamente limitado. Un conjunto de piezas rígidamente unidas entre sí constituye un eslabón de un mecanismo.

A cada uno de los movimientos independientes que puede efectuar un cuerpo se le llama grado de libertad. Los pares cinemáticos se dividen en clases, según el número de grados de libertad que poseen. El par se considera de primera clase si se dispone de un grado de libertad, de segunda clase si se dispone de dos grados de libertad, etc...

¹¹ Kozhevnikov, S.N. Mecanismos, Ed. Gustavo Gill, Barcelona 1975. Paginas 1125.

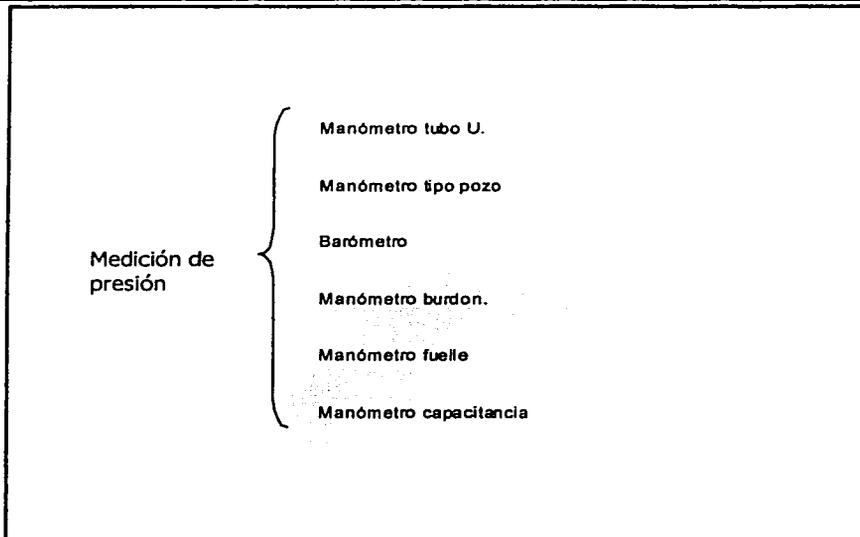


Figura 4.7 - Diagrama de árbol para la función medir presión.

Una vez que se concentraron las posibles alternativas para la solución dentro de estos diagramas de árbol, se construye la siguiente tabla o matriz morfológica donde se tiene el objetivo de proponer ideas de cómo se puede hacer que la función especificada sea satisfecha

4.2.3 Evaluación y selección

Las ideas generadas para cada una de las funciones se concentran en la siguiente matriz por medio de la cual se generaran los conceptos de solución.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Matriz Morfológica

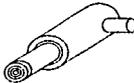
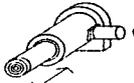
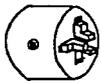
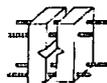
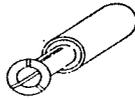
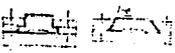
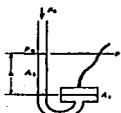
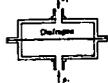
Opciones	A	B	C	D	E	F
Funciones						
1 Fuente de energía o almacenamiento de energía	Eléctrica	Manual	Neumática	Química: (Expansión de gases)		
2 Aplicación de energía	 Pistón	 Actuador Mecánico				
3 Sujeción	 Chuck	 Prensa	 Boquilla			
4 Desplazamiento Uni-axial	 Guías Prismáticas	 Guía cilíndrica	 Guía Cónica	 Guía Prismática doble		
5 Medición de Presión	 Manómetro de pozo	 Burdon	 Manómetro Capacitancia	 Diafragma	 Fuelle	 Tubo U
6 Inicio y terminación del proceso	Manual -Operador	Automático -Relevadores -PLC				

Tabla 4.8 - Matriz morfológica

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

A partir de la Tabla 4.8 podemos iniciar la etapa de generación de conceptos. Las posibles combinaciones serían $4 \times 3 \times 3 \times 6 \times 6 \times 2$, tendríamos 2592 opciones, esto resulta en un campo de soluciones muy grande, pero después de hacer un análisis sencillo de cada una de estas opciones se puede reducir el número de combinaciones posibles. Para el primer renglón se puede eliminar las dos últimas opciones ya que para la neumática sería extremadamente difícil lograr las presiones requeridas mientras que la química resulta ser muy complicado su manejo. Para el cuarto renglón se pueden eliminar las opciones que tienen cierta semejanza cambiando solo la geometría con lo que las opciones 4A, 4B, 4C, y 4F, pueden quedar incluidas bajo la definición de guías prismáticas y así disminuir el número de opciones posibles. Para el renglón 5 las opciones se pueden simplemente reducir teniendo en cuenta los antecedentes del renglón 1. Así las opciones quedan reducidas a su mínima cantidad por lo que ahora es posible generar los conceptos.

Conceptos.
Opción 1

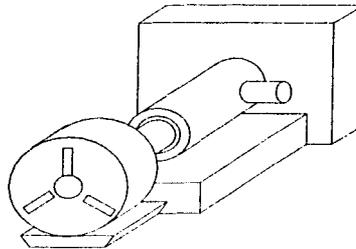


Figura 4.8 - Opción 1

En este concepto se utilizan la combinación 1B-2A-3A-4A-5B-6A, por lo que contamos con un sistema manual con un cilindro hidráulico como medio de aplicación de fuerza, chock y guías prismáticas para la sujeción y el desplazamiento axial respectivamente.

Opción 2

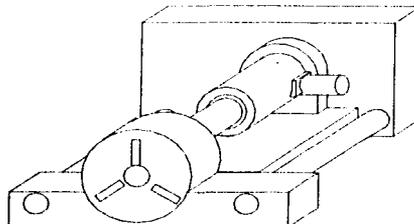


Figura 4.9 - Opción 2

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



En este concepto se utilizan la combinación 1A-2B-3A-4B-5B-6A, por lo que contamos con un sistema Eléctrico con un actuador mecánico como medio de aplicación de fuerza, chock y guías cilíndricas para la sujeción y el desplazamiento axial respectivamente.

Opción 3

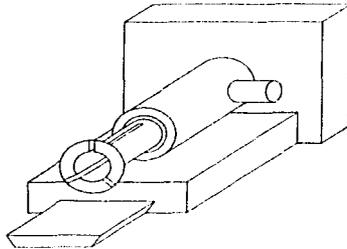


Figura 4.10 - Opción 3

En este concepto se utilizan la combinación 1B-2A-3C-4A-5B-6A, por lo que contamos con un sistema manual con un cilindro hidráulico como medio de aplicación de fuerza, una boquilla y guía prismática para la sujeción y el desplazamiento axial respectivamente.

Opción 4

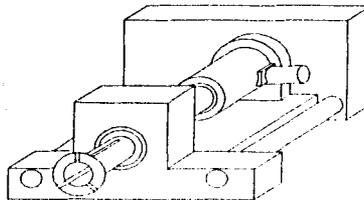


Figura 4.11 - Opción 4

En este concepto se utilizan la combinación 1A-2B-3C-4B-5B-6A, por lo que contamos con un sistema eléctrico con un cilindro hidráulico como medio de aplicación de fuerza, una boquilla y guía cilíndrica para la sujeción y el desplazamiento axial respectivamente.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

**Matriz de Evaluación**

	Opción 1	Opción 2 (REF)	Opción 3	Opción 4
Esta dentro del área permisible	0	0	0	0
Máxima carga permisible	+	0	+	0
Máximas dimensiones de piezas a sujetar	0	0	-	-
Numero de Piezas o ensambles móviles	+	0	0	0
Tiempo de ensamble al carro del torno	0	0	0	0
Máximo par soportado	+	0	+	0
Distancia que se puede desplazar	0	0	0	0
Suma "+"	3	0	2	0
Suma "0"	4	7	4	6
Suma "-"	0	0	1	1
Total	3	0	1	-1
Posición	1	2	3	4

Tabla 4.9 - Matriz decisión

4.2.4 Alternativa seleccionada

La alternativa seleccionada cumple con cada una de las especificaciones así como satisface la necesidad y objetivos establecidos al inicio de este capítulo. Esta metodología de selección fue tomada del trabajo de Ulrich. Como se observa en esta matriz (tabla 4.9) los conceptos generados de la matriz morfológica (Tabla 4.8), son evaluados con respecto a una referencia que se establece como parámetro, siendo evaluadas las necesidades mencionadas al comienzo de este capítulo. Como resultado de este análisis se llegó a la conclusión que la mejor opción de las de las 4 observadas era la primera, por lo que se procedió a la siguiente etapa.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



4.3 ADECUACIÓN DEL DISEÑO PARA SU REALIZACIÓN.

4.3.1 Selección del material, así como análisis estructural.

Para la selección del material se debe tener en cuenta algunos factores como el diseño en si mismo, según Ashby¹² la selección del material se logra de la interacción de la función que realizará el diseño, la forma que tendrá, el proceso que se llevara para obtener el material, así como la geometría que cada una de las partes que formen parte del diseño tendrá. Esto se puede ver de mejor manera en la figura 4.7. Ya que se tiene seleccionado el diseño o la forma que tendrá nuestro Diseño, ahora comienza la parte en la que se aplican las restricciones en cuanto a dimensiones existentes en el carro del torno. Una vez que se tiene esta propuesta es necesario especificar el tipo del material del cual serán fabricadas cada una de las partes. Aquí se pueden usar diversos métodos de selección de materiales, así como hacer uso de bases de datos y gráficas para identificar el material a usar, pero en nuestro caso recurrimos a los criterios más de experiencia que debidos a un método dado. Para el caso de la estructura se recurrió a la tabla de Aceros Fortuna para elegir; por medio de su tabla de especificaciones y requiriendo los precios para cada uno de los materiales, el material que soportara la carga a la cual se sometería el dispositivo, además de ser un material con una maquinabilidad aceptable. Aceros Fortuna establece una clasificación de acuerdo a aplicaciones. En la parte referente a estructura de máquinas la lista comienza con el Acero 1018 (Cold Rolled) por lo que se decidió optar por esta alternativa para tomarla como referencia para hacer análisis de resistencia, la información de las características del material se encontró en tablas del Metals Handbook¹³.

Para las guías se estableció el uso de un material con mayor dureza y tenacidad por lo que recurriendo nuevamente a las tablas de aceros fortuna usamos el TX10R el cual cumple con estas características, con una dureza de entre 220 a 330 Brinell su equivalencia en sistema ANSI es el 9840.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

¹² Michel F. Ashby, *Material Selection in Mechanical Design*, Segunda Edición, Butterworth Heinemann.

¹³ Metals Handbook. 9a Edición Volumen 3. ASM (American Society for Metals).

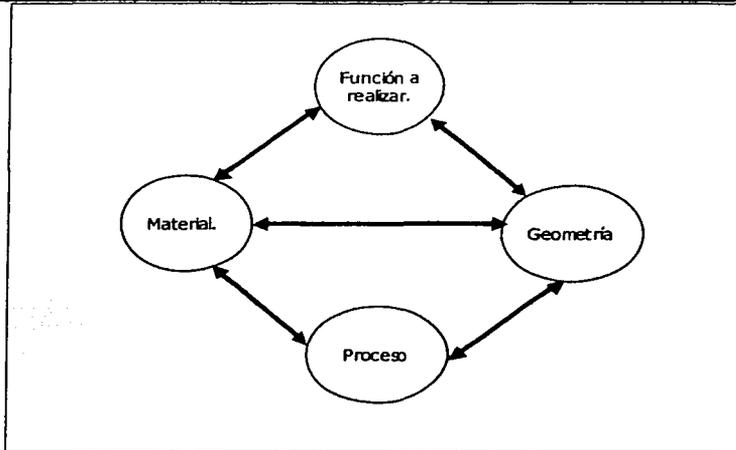


Figura 4.12 - Interacción de los factores para determinar el material a usar.

Recurriendo al uso del programa DesignStar, para realizar un análisis por medio de elementos finitos para determinar los esfuerzos máximos, así como haciendo uso del criterio de Von Misses . El criterio de Von Misses establece que el metal falla cuando la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de los esfuerzos cortantes principales alcanza cierto límite.

Bajo este principio el programa DesignStar provee una herramienta de evaluación de los diseños, donde muestra cual es el factor de seguridad mínimo tomando como referencia el límite a la fluencia del material.

A partir de las restricciones de movimiento y las cargas aplicadas así como el par proveniente del torno se realizaron los análisis correspondientes a los dos sub-ensambles.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

EO-ensa :: Static Model Stress
 Units : N/m² Deformation Scale 1 : 176.521

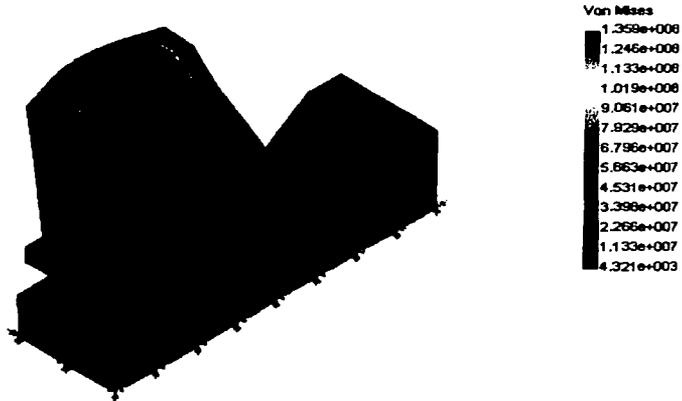


Figura 4.13 - Análisis estructural de la base del dispositivo.

En cuanto al análisis de la base se obtuvieron valores por debajo del esfuerzo máximo a la fluencia del orden $1.369e8 \text{ N/m}^2$ por lo que no representa problema alguno el que este dispositivo soporte las cargas aplicadas. Ya que el máximo esfuerzo a la Fluencia del 1018 es de $3.6e8 \text{ N/m}^2$

EP01E0001-ANEP01E0001 :: Static Model Stress
 Units : N/m² Deformation Scale 1 : 1

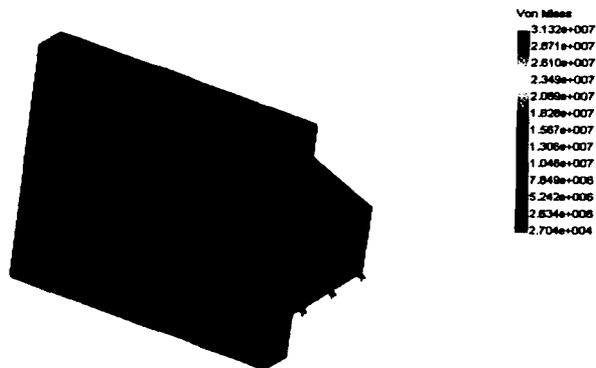


Figura 4.14 - Análisis estructural del carro.

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN



EP01EQ001-ANEP01EQ001 :: Static Displacement
Units : m Deformation Scale 1 : 1

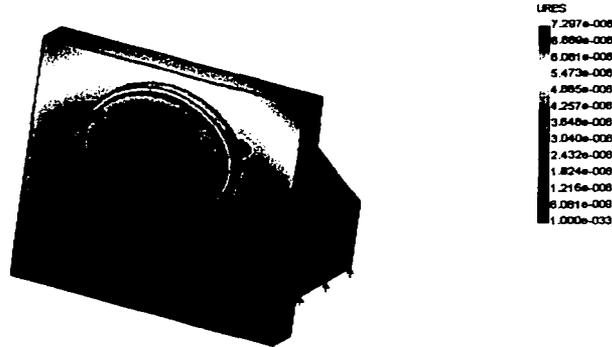


Figura 4.15 - Análisis estructural del carro (desplazamientos).

En la figura 4.15 se puede observar que el máximo desplazamiento obtenido dada la carga aplicada es de $7.29e-8$ mm lo cual no representa ningún problema para la operación del equipo, además de que el esfuerzo de Von Mises máximo presente en este sub ensamble es de tan solo $3.7e7$ N/m² siendo que el esfuerzo máximo de fluencia del 1018 es de $3.6e8$ N/m²

Solo cabe mencionar que para el caso de las partes que se deslizan se eligió un material más duro previendo el desgaste por medio de una cuña de ajuste que permite compensar estas diferencias. En el caso de las partes que están en constante fricción se eligió el material TX10 debido tanto a que este presenta una mayor dureza como también a la disponibilidad de este material en forma de desperdicio.

4.4 DISEÑO DE DETALLE.

En esta etapa se establecen las medidas exactas para cada una de las piezas haciendo uso del programa SolidWorks, para la elaboración de estos. Gracias a esta plataforma de diseño es posible obtener planos de cada una de las piezas de manera que cada uno de los planos están actualizados en tiempo real lo cual nos provee la ventaja de que cuando se realiza alguna modificación, esta quedará registrada en los planos que queden afectados por el cambio.

La bomba utilizada para la operación del cilindro hidráulico pertenecía a una prensa del laboratorio de manufactura, esta solo requirió el cambio de la

manguera de alta presión así como de un adaptador para poder conectarse con el cilindro hidráulico.

Inicialmente se había pensado en la utilización de un cilindro hidráulico perteneciente a la prensa, pero este no alcanzaba la cifra de 10 Ton establecida como requisito, posteriormente se recurrió a hacer una búsqueda y se encontraron algunos modelos parecidos pero que resultaban tener dimensiones excesivamente grandes por lo que requerirían de mayores adaptaciones para su uso. Finalmente se encontró un cilindro de la marca Enerpack el cual cumplía por completo con los requerimientos tanto en capacidad como el tamaño y forma. Este cilindro tenía la ventaja de tener una carrera corta de 2.5 pulgadas (63.5mm), por lo que no se requería mucho espacio para ser colocado.

El manómetro fue seleccionado de acuerdo con la carga prevista, no se encontró de 10 Ton pero se encontró uno de 20 que funcionó adecuadamente para el propósito. En este caso se podía optar por dos tipos, uno sumergido en glicerina y otro sin nada, optamos por el segundo ya que este tenía un costo bastante inferior al primero siendo la única diferencia que el primero tenía aplicaciones donde se requerían altos regímenes de trabajo.

4.4.1 Elaboración de planos para fabricación.

Para la elaboración de los planos solo cabe mencionar que se uso el sistema Americano para la acotación de las partes, así como se designó un código para poder identificar cada uno de los planos así como las piezas que representan.

El código consiste en 5 campos que muestran la siguiente información:

Ejemplo: SE00EP011 Sub ensamble 00 que pertenece al Ensamble Parcial 01 y es el dibujo 1 de esa pieza o ensamble.

Campo	XX		XX	XX	XX	X
Significado	EG	Ensamble general	Numero que diferencia a cada uno de los códigos anteriores con dos dígitos.	Los mismos códigos pero en este caso indican la procedencia del mismo	Numero que diferencia a cada uno de los códigos anteriores con dos digitos.	Indica si hay algun otro dibujo de la misma pieza pero con alguna vista diferente o indicando un detalle en especial.
	SE	Sub ensamble				
	PZ	Pieza de fabricación				
	EX	Pieza solo para ensamble				

Tabla 4.10 - Descripción del código de los planos.



En el apéndice D se muestran cada uno de los planos.

4.4.2 Fabricación.

En esta etapa solo cabe mencionar que todas las piezas de fabricación fueron realizadas dentro de los talleres de manufactura en máquinas convencionales. En su totalidad el tiempo de fabricación duro un periodo de 3 meses aproximadamente.

La materia prima utilizada como ya se menciona fue el Acero 1018 para la estructura principal, el cual tuvo un costo de 20 pesos el kg, mientras que el TX10T con un costo a la mitad por ser de desperdicio, esto es 2 Dlls por kg. Este se uso solo en las partes que requerían mayor dureza debido al trabajo que realizan de deslizamiento. Se incorporó una cuña de ajuste por prisioneros para evitar el desgaste de las guías y poder sustituir solo esta pieza en caso de ser necesario.

Costos:

Aquí se muestran los costos de material utilizado en la realización de este prototipo.

Costos Materia Prima y equipo.

Material	Precio
Placa de 1" acero 1018 (cold rolled)	1400
Placa de 3/4 " acero TX10R	200
Tornillos grado 8	37.51
Pistón hidráulico.	800
Manguera A.P.	300
Varios	250
Total	2737.51

Tabla 4.11 – Costos Materia Prima.





Costos Ingeniería y Manufactura(Estimados).

Concepto	Horas	Costo
Diseño Conceptual	240	12000
Diseño Detalle	240	12000
Manufactura	560	22400
Total		46400

Tabla 4.12 – Costos de Ingeniería y Manufactura(estimados).



5. PRUEBAS Y RESULTADOS.

- 5.1 Procedimiento para operar la máquina de soldadura por fricción.
- 5.2 Tabla de resultados.
- 5.3 Pruebas de tracción.
- 5.4 Consideraciones importantes.

En este capítulo presentaremos y analizaremos los resultados obtenidos de todas las pruebas que realizamos, también indicaremos que consideraciones, parámetros y materiales se pueden soldar con este equipo y lo más importante, el procedimiento que se debe seguir para operar la máquina. Primeramente describiremos este último punto.

5.1 PROCEDIMIENTO PARA OPERAR LA MÁQUINA DE SOLDADURA POR FRICCIÓN.

1. Lo primero será sujetar las piezas a soldar, por lo que seguiremos esta secuencia. Poner una de las piezas en el chuck móvil, cerrar las mordazas teniendo en cuenta que no hay que apretar la pieza, poner la otra pieza en el chuck fijo y apretarla; ahora ya se puede apretar la pieza del chuck móvil. Hay que considerar una distancia de aproximadamente 3.5 cm de saliente a partir de las mordazas del chuck(figura 5.1). **Una nota muy importante, las piezas a soldar deben tener una longitud máxima de 6 cm, cada una.**

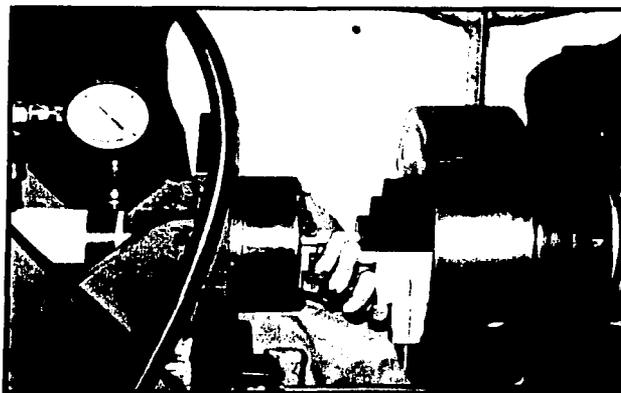


Figura 5.1 – Sujeción de las piezas.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



2. Acercar las dos piezas a soldar con ayuda de la bomba manual hasta tener un contacto mínimo (figura 5.2). Podemos apoyarnos en el manómetro instalado en la bomba.



Figura 5.2 – Iniciamos el contacto de las piezas.

3. Se enciende el torno y se aplica la presión ayudándonos del manómetro, es importante mantener la presión requerida para que el calentamiento sea lo más uniforme posible. Para esto hay que aplicar la presión de forma constante, ya que se registrara un acortamiento axial de las piezas (figura 5.3).

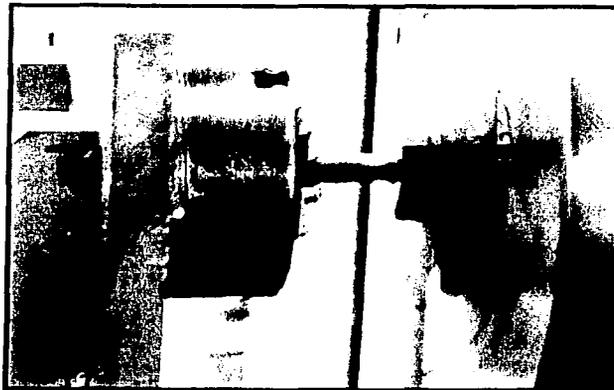


Figura 5.3 – Etapa de calentamiento.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



- El indicador que nos interesa para detener el torno es la temperatura de los materiales. Cuando alcancemos la temperatura de cambio de fase, detendremos el torno, la inercia del chuck por acción de la propia resistencia al giro y aplicaremos la fuerza de forjado; deberá hacerse de una manera rápida y continua ya que es aquí, al aplicar esta fuerza donde obtendremos la calidad de la soldadura.



Figura 5.4 - En esta imagen puede verse la soldadura finalizada.

- Por ultimo retiraremos las piezas soldadas teniendo cuidado de no quemarnos las manos ya que estará la pieza muy caliente.

5.2 TABLA DE RESULTADOS.

Al llegar a la parte de realizar pruebas con la máquina terminada hemos obtenido datos que a continuación pueden verse en la siguiente tabla.

Prueba	Descripción material		RPM	Tiempos			Presiones		
	A	B		careado	Calentamiento	forja	careado	Calentamiento	forja
1	Acero 1018 Diámetro =1/4 in	Acero 1018 Diámetro =1/4 in	600	12	9	4	1	3	3
2	Acero 1018 Diámetro =1/2 in	Acero 1018 Diámetro =1/2 in	600	17	12	7	1	3	3

Prueba	Descripción del material		RPM	Tiempos(s)			Presiones(Ton)		
	A	B		careado	Calentamiento	forja	careado	Calentamiento	forja
4	Latón	Acero 1018	1200	3	8	4	1	3	6
5	Aluminio	Latón	1200	5	11	8	2	2	5
6	Aluminio	Aluminio	1200	9	9	4	2	2	4

Tabla 5.1 – Parámetros utilizados en las pruebas.

La manera en la que se fueron realizando las pruebas fue haciendo una combinación de los parámetros que podíamos controlar como la velocidad de la máquina (rpm), el tiempo de calentamiento, y la presión de forjado. Abajo podemos ver algunas de las pruebas realizadas, antes y después del soldado.

Aluminio-Aluminio

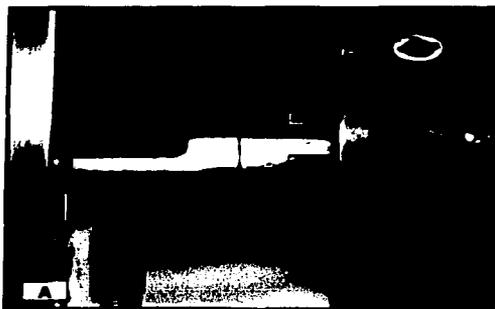


Figura 5.5 – A. Inicio del proceso
B. Etapa de calentamiento

Acero-Acero

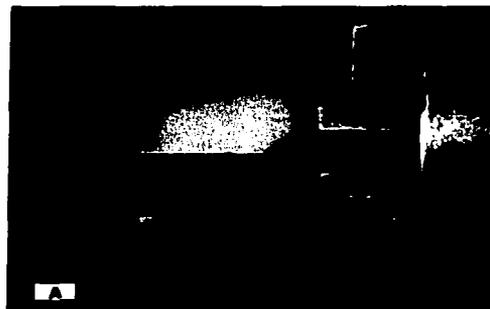
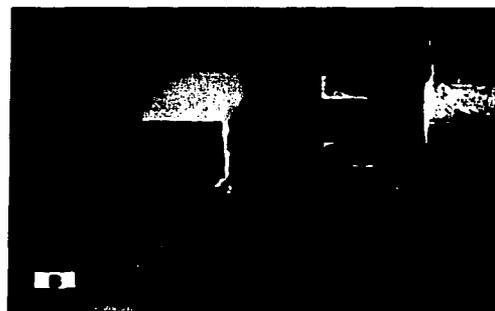
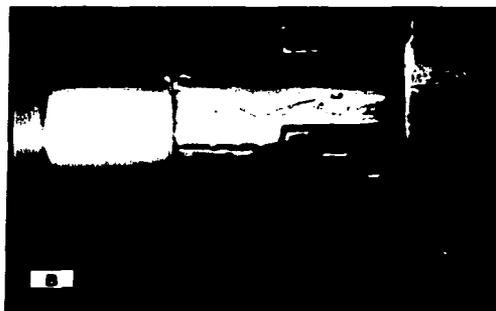


Figura 5.6 – A. Inicio del proceso
B. Etapa de calentamiento



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Aluminio-Aluminio



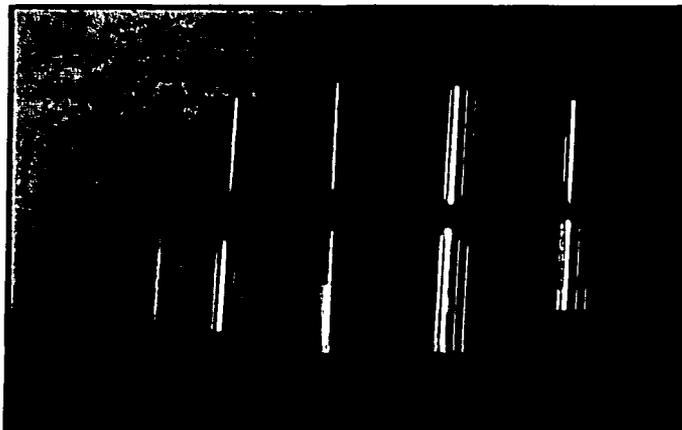
Figura 5.5 – C. Inicia acortamiento axial
D. Etapa de forjado



Acero-Acero



Figura 5.6 – C. Inicia acortamiento axial
D. Etapa de forjado



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Figura 5.7 - Algunas de las pruebas realizadas: acrílico con acrílico, acero con latón, aluminio con acero, aluminio con aluminio, aluminio con latón.

5.3 PRUEBAS DE TRACCIÓN.

Una prueba adicional que realizamos fue el de tomar 4 probetas soldadas por fricción y someterlas a ensayo de tracción. Esto para poder tener un valor real que nos permitiera verificar la calidad de la soldadura. Las probetas se maquinaron después del soldado hasta obtener una probeta estandarizada, los datos de resistencia y algunas imágenes tomadas se presentan a continuación.

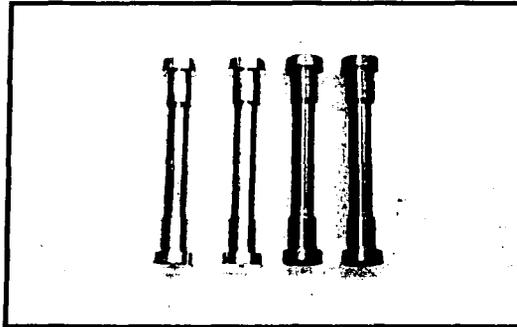


Figura 5.8 - Probetas usadas para pruebas de tracción: 2 de aluminio-aluminio y 2 de acero-acero

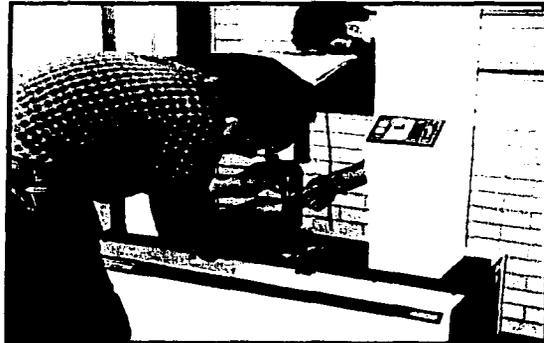


Figura 5.9 - Montaje de las probetas en la máquina de pruebas de tracción.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA

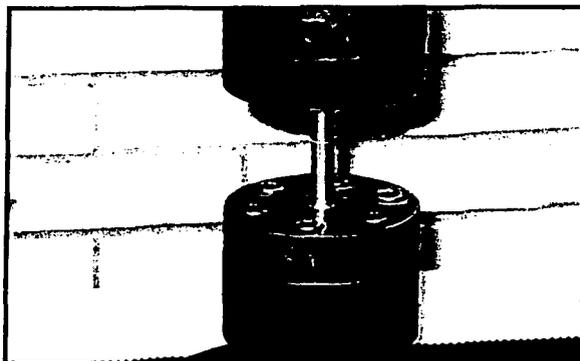


Figura 5.10 - En esta imagen puede verse la zona donde falla el material

Adicionalmente se hicieron probetas de material homogéneo y se obtuvieron los valores de resistencia a la tracción para poder compararlos con las de las piezas soldadas.

Los resultados de las pruebas de tracción realizadas a las probetas están en la tabla 5.2.

Probeta	Esfuerzo de fluencia (MPa)	Esfuerzo de ruptura (MPa)
Al-Al	310.9	203.6
Al-Al (soldada)	153.4	105.000
1018-1018	674.8	478.9
1018-1018 (soldada)	575.4	281.0

Tabla 5.2 – Resultados de las pruebas de tracción.

En el apéndice B, están los resultados completos obtenidos de la máquina para pruebas de tracción.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



5.4 CONSIDERACIONES IMPORTANTES.

Después de realizar estas pruebas podemos mencionar algunas consideraciones importantes, en base a los resultados obtenidos.

- ✓ El prototipo diseñado puede manejar piezas de máximo hasta 6 cm de longitud.
- ✓ Los diámetros de las probetas varían dependiendo de los materiales a soldar. Ejemplos:

Materiales	Diámetros máximos
Aluminio	1 pulgada
Acero 1018	¾ pulgada
Latón	¾ pulgada

Mencionamos estos materiales ya que son los que utilizamos para nuestras pruebas. Para una soldadura de materiales disímiles tomar como base el diámetro del material más denso.

- ✓ Se requiere de mínimo dos operarios para realizar el proceso.
- ✓ Los parámetros para obtener una buena soldadura pueden variar, recordemos que estos dependen entre si, como mencionamos en el capítulo anterior, se puede "jugar" con estos. Si utilizamos una velocidad baja, se puede compensar con una mayor presión o con un mayor tiempo de calentamiento; a una mayor velocidad, la presión y el tiempo de calentamiento disminuyen. Para una soldadura rápida y confiable recomendamos una velocidad de 1200 rpm, que son las máximas del torno. Las presiones y los tiempos pueden tomarse de la tabla de resultados presentada anteriormente.

En el siguiente capítulo presentamos las conclusiones finales del trabajo.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



CONCLUSIONES.

Con el desarrollo de la presente tesis podemos llegar a las siguientes conclusiones:

El objetivo de nuestro trabajo era implementar una máquina con la cual lográramos soldar por fricción; en base a las pruebas presentadas en el capítulo 5 concluimos que nuestro objetivo se cumplió satisfactoriamente.

Se pudo observar la gran importancia de la etapa de diseño y como repercute en el buen funcionamiento del equipo. Gracias a la metodología que se siguió se eliminaron al mínimo los gastos en material debido a re-trabajo de piezas, así como el cumplimiento adecuado de cada una de las funciones establecidas. Los métodos para el diseño mostraron su utilidad en la búsqueda de las mejores soluciones para el problema, por lo que esto reduce la posibilidad de fallas además de proveer una herramienta muy útil, en el caso de que se tengan problemas con el diseño, rastreándolos a través de la información estructurada obtenida por la metodología y mejorar la solución obtenida en un futuro.

Comprobamos que el proceso de soldadura por fricción se puede realizar de manera rápida y confiable.

La variable más crítica en el proceso es la alineación axial de las dos piezas de trabajo. Entre mayor sea el desalineamiento mayor será la vibración, la cual reducirá la calidad de la soldadura. Las áreas de contacto pueden ser maquinadas y preparadas superficialmente, sin embargo, el proceso se puede llevar a cabo sin realizar tal acción ya que la fricción entre las mismas desbastará el material hasta lograr un mayor contacto entre las caras; sin embargo, si las superficies son demasiado irregulares se recomienda realizar un careado de las piezas.

Basándonos en los resultados de las pruebas de tracción; realizadas a las probetas, podemos decir que la soldadura obtenida es de buena calidad. También se determinó mediante el maquinado de las piezas soldadas que la dureza se incrementa en la zona de la unión.

OBSERVACIONES.

La soldadura por fricción puede ser realizada en un torno convencional o automatizado con ciertas adaptaciones que permitan controlar el proceso. Tales adaptaciones se pueden llevar a cabo mediante un costo relativamente bajo en comparación con el precio de una máquina comercial destinada específicamente para este proceso. Las modificaciones que se le hicieron al torno utilizado son

fáciles de realizar y se llevaron a cabo mediante procesos de manufactura, como fresado y cepillado entre otros, hechos en los talleres de ingeniería mecánica de la facultad.

Algunas mejoras que se pueden realizar a la implementación del proceso son las siguientes:

- ✓ Corregir en lo mayor posible el juego del carro del torno para evitar el deterioro del mismo causado por la vibración.
- ✓ Recomendamos la implementación de un freno para detener el giro del chuck, al terminar la etapa de calentamiento. Con ello se lograrán mejores soldaduras.
- ✓ Contar con un control automatizado para regular la velocidad angular, la presión y el tiempo, con lo cual se obtendrían procesos repetibles que darían como resultado soldaduras rápidas y confiables.
- ✓ Se recomienda llevar a cabo múltiples ensayos, variando los parámetros del proceso, y verificar las propiedades mecánicas de la soldadura por medio de análisis metalográfico y pruebas mecánicas de tracción y fatiga. De esta forma se podrán determinar los parámetros óptimos para cada tipo de material y lograr así la unión perfecta.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



BIBLIOGRAFÍA.

Bibliografía consultada en este trabajo:

1. Henry Horwitz, P. E.- "Soldadura: aplicaciones y práctica".
Editorial AlfaOmega Massachussets E.U.A.
2. Howard B. Cary .- "Manual de Soldadura Moderna". Tomo 1,2 y 3 2a Edición
Editorial Prentice Hill Hispanoamericana. México 1987. p 2-37.
3. Henry Horwitz. Principles and Practice. Houghton Mifflin Company, Boston.
4. Hazlett T.H., Fundamentals of Friction Welding, ASM Technical Report No.
C6-30.1 1966.
5. Cuauhtémoc Maldonado Zepeda, Unión de Aleaciones de Aluminio / Acero
mediante el Proceso de Soldadura por Fricción - Encuentro Internacional de
Soldadura Industrial, Instituto de Investigaciones Metalúrgicas. Universidad
Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
6. Jessop, T.J., Nicholas, e.d., and dinsdale, W.O. Friction Welding of Dissimilar
Materials. in Advances in Welding Processes. 1978. Harrogtá, UK: The
Welding Institute.
7. Murti, K.G.K., and Sundaresan, s., Para meter Optimization in Friction Welding
Dissimilar Materials. Metal Construction, 1983: p. 331-334.
8. American Welding Society, Recomendado Practices for Friction Welding, ANSI /
AWS An American National Standard.
9. Melvin M. Schwartz, Source book on Innovative Welding Processes, American
Society for Metals, Metals Park Ohio 44073, USA.
10. Ulrich, Karl T. and Eppinger, Steeven D., Product Design and Development,
McGraw-Hill, Inc. 1995.
11. Kozhevnikov, S.N. Mecanismos, Editorial Gustavo Gili, Barcelona 1975.
Paginas 1125.
12. Michel F. Ashby, Material Selection in Mechanical Design, Segunda Edición,
Butterwort Heinemann.

13. Metals Handbook. 9a Edición Volumen 3. ASM (American Society for Metals).
14. ASM (American Society for Metals).- Metals Handbook 9ª Edición volumen 6. "Welding, Brazing and soldering". USA. p 719-728
15. R. L. O'Brien .- "Manual de soldadura". Tomo 3, 8ª edición Editorial Prentice Hall Hispanoamericana. México 1989.
16. J. F. Lancaster .- "Tratado de soldadura". Editorial TECNOS Madrid.
17. Pere Molera Solá .- "Soldadura Industrial: clases y aplicaciones". Editorial Marcombo. Barcelona España, 1983.
18. Leonard Koellhoffer.- "Manual de soldadura". Editorial Limusa.
19. J. W. Giachino, W. Weeks.-"Welding technology". 2ª edición Editorial American Technical Society, USA. p 147-149.
20. Leo Alting.-"Procesos para ingeniería de manufactura". Editorial AlfaOmega. p 233-258.
21. Seireg A.A.- "Friction and lubrication in Mechanical Design". 1ª edición. Editorial Marcel Dekker, Inc. Estados Unidos, 1998.
22. Murrieta N. Antonio. "Aplicaciones de la Estática". 2ª edición. Editorial Limusa. México, 1978.
23. Beer Ferdinand. "Mecánica Vectorial para Ingenieros, Estática. 5ª edición. Editorial Mc Graw Hill. México, 1990.

Referencias electrónicas:

<http://www.mtiwelding.com/intro.htm>
<http://www.teamafw.com/process.htm>
<http://www.aws.org/>
<http://www.etatechnology.com/index.html>
<http://www.teamafw.com/process.htm>
<http://www.asm-intl.org/content/NavigationMenu/Membership/FellowsForum.htm>
<http://www.adelaide.edu.au/>
<http://www.etatechnology.com/index.html>
<http://www.twi.co.uk/j32k/getFile/fswintro.html>
<http://www.msfc.nasa.gov/news/index.html>

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

<http://www.azom.com/Applications.asp>
<http://www.me.uwaterloo.ca/personnel/faculty/dweckman.html>
<http://www.welding.org/>
<http://www.interfacewelding.com/#mi>
<http://www.nctfrictionwelding.com/index.php>
<http://www.thompson-friction-welding.co.uk/proc.html>
<http://www.historywelding.org/>
<http://www.twi.co.uk/j32k/index.xtp>
http://www.mts.com/aesd/friction_stir1.htm

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

APÉNDICE A.

ACTUALIDAD DE LA SOLDADURA POR FRICCIÓN.

"FRICTION STIR WELDING" (FWS).

La soldadura por fricción se ha utilizado por décadas en una gran variedad de industrias. El proceso es atractivo por varias razones:

- El calentamiento por fricción es generado localmente, lo que provoca que el reblandecimiento no se extienda.
- Esta técnica es capaz de soldar materiales disímiles.
- El proceso se completa en unos cuantos segundos por lo que puede ser utilizado en una gran masa de producción.

Ahora, una nueva variante del proceso por fricción, llamado "soldadura por fricción stir (turbulento, agitado)", está siendo descubierto.

Esta técnica utiliza una herramienta no consumible para generar calentamiento friccional en la zona a soldar, con la finalidad de producir una deformación plástica en las piezas a soldar, resultando en una compleja mezcla a lo largo de la unión. La FWS puede soldar aleaciones de aluminio de hasta 50 mm de espesor, aleaciones de titanio y aceros de hasta 25 mm de espesor. La operación puede hacerse en cualquier posición alcanzando velocidades de unas cuantas pulgadas por minuto.

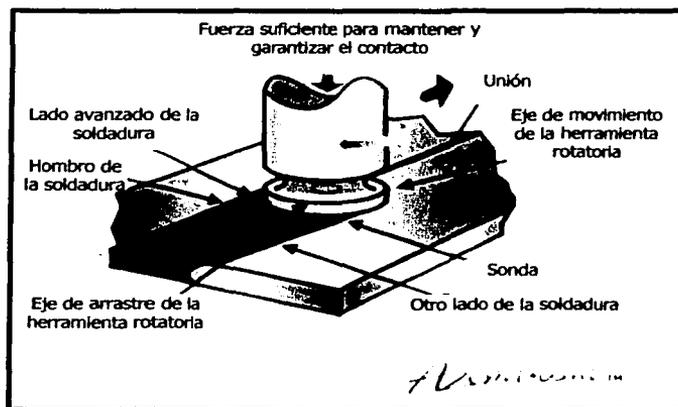


Figura A1 – Proceso de soldadura por fricción stir.

La "soldadura por fricción stir"(FSW) es una técnica de soldadura en estado sólido que permite unir materiales que anteriormente era muy difícil unir sin la presencia de huecos, grietas o distorsión. La FWS es un derivativo de la soldadura por fricción convencional, fue inventada en el Welding Institute (U.K) en 1991. Una de las más recientes aplicaciones de este proceso es la soldadura realizada a los tanques de combustible del cohete Delta II.

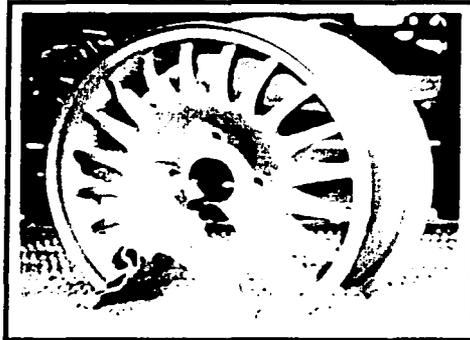


Figura A2 – Rueda de aluminio soldada con este proceso.

La soldadura por fricción Stir es un proceso innovador que ha sido utilizado exitosamente en la unión de aleaciones que normalmente son muy difíciles de soldar. El proceso aún no es bien comprendido por lo que es necesario su investigación y desarrollo.

"Tecnología del proceso de soldadura por fricción Stir del Centro Marshall de la NASA es exitosamente comercializado por dos compañías"

Dos compañías comercializan exitosamente una especializada herramienta para soldar desarrollada en el Centro de Vuelo Espacial Marshall para el proceso de soldadura por fricción stir. Esto marca otro éxito para el programa de Transferencia de Tecnología Marshall's que busca estimular el uso de las tecnologías desarrolladas por la NASA en conjunto con la industria privada.*

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

* Para leer la nota completa: <http://www1.msfc.nasa.gov/NEWSROOM/news/releases/2002/02-009.html>

APÉNDICE B.

GRÁFICOS Y RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE TRACCIÓN.

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
 FACULTAD DE INGENIERÍA
 DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

Prueba de tracción para probetas de acero recocido

Test type: Tensile
 Operator name: Adolfo Altamirano M.

Instron Corporation
 Series IX Automated Materials Testing System 1.04
 Test Date: 09 Jun 2003

Sample Identification: ACEROPUR
 Interface Type: 4200 Series
 Machine Parameters of test:
 Sample Rate (ots/sec): 10.00
 Crosshead Speed (mm/min): 5.000

Sample Type: ASTM
 Humidity (%): 50
 Temperature (deg. C): 23

Dimensions:
 Spec. 1
 Diameter (mm) 8.9500
 Spec gauge len (mm) 55.000
 Grip distance (mm) 45.000

Out of 1 specimens, 0 excluded.

Specimen Number	Displacement at Peak (mm)	% Strain at Peak (%)	Load at Peak (KN)	Stress at Peak (MPa)	Displacement at Break (mm)	% Strain at Break (%)	Load at Break (KN)	Stress at Break (MPa)	Displacement at 0.2% Yield (mm)
1	3.870	7.036	42.44	674.8	7.700	14.00	30.12	478.9	2.243
Mean:	3.870	7.036	42.44	674.8	7.700	14.00	30.12	478.9	2.243

Standard Deviations:

Specimen Number	% Strain at 0.2% Yield (%)	Load at 0.2% Yield (KN)	Stress at 0.2% Yield (MPa)	Young's Modulus (MPa)	Energy at Yield (N/mm)	Energy at Break (N/mm)
1	4.079	37.15	590.6	40500.	18.82	231.7
Mean:	4.079	37.15	590.6	40500.	18.82	231.7

Standard Deviations:

Figura B1 – Datos para la probeta de acero de una sola pieza

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

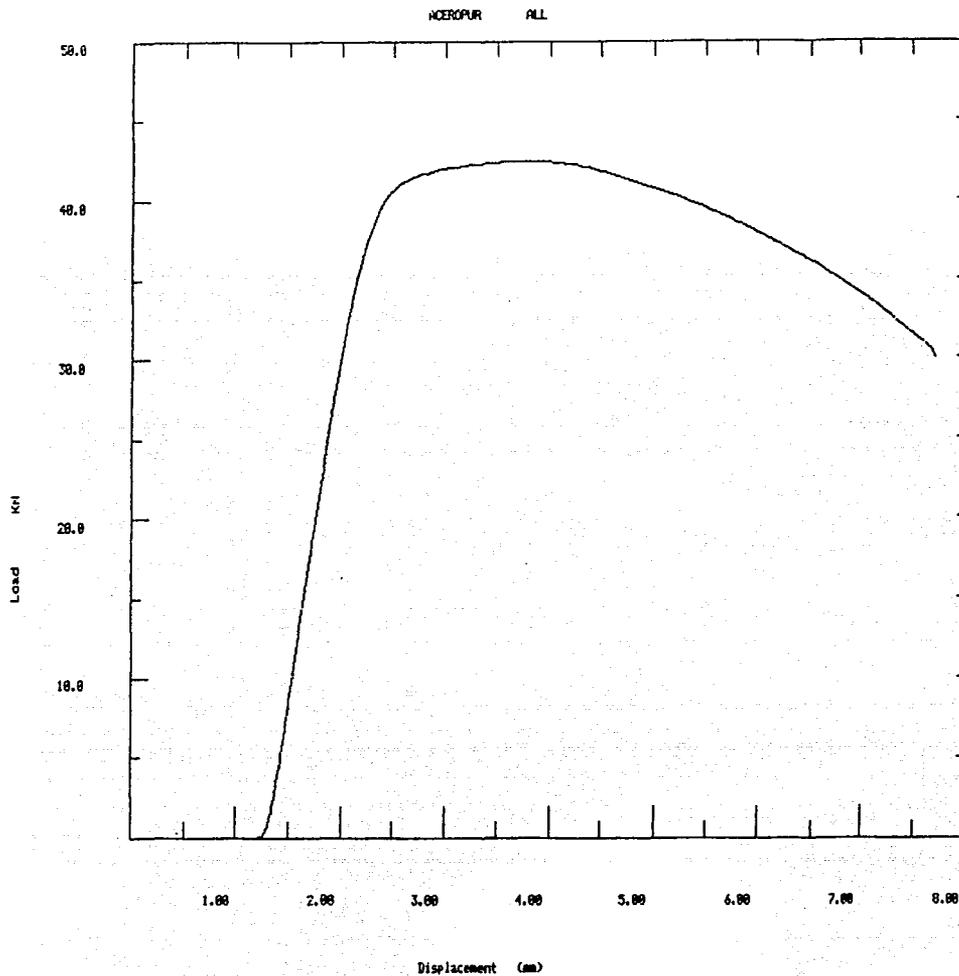


Figura B2 – Gráfica para la probeta de acero de una sola pieza

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
 FACULTAD DE INGENIERÍA
 DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

Prueba de tracción para probetas de acero recocido

Test type: Tensile
 Operator name: Adolfo Altamirano M.
 Sample Identification: ACERO
 Interface Type: 4200 Series
 Machine Parameters of test:
 Sample Rate (pts/sec): 10.00
 Crosshead Speed (mm/min): 5.000

Instron Corporation
 Series IX Automated Materials Testing System 1.04
 Test Date: 09 Jun 2003
 Sample Type: ASTM
 Humidity (%): 50
 Temperature (deg. C): 23

Dimensions:
 Spec. 1 Spec. 2
 Diameter (mm) 9.0000 9.1000
 Spec gauge len (mm) 50.800 55.000
 Grip distance (mm) 45.000 45.000

Out of 2 specimens. 0 excluded.

Specimen Number	Displacement at Peak (mm)	% Strain at Peak (%)	Load at Peak (KN)	Stress at Peak (MPa)	Displacement at Break (mm)	% Strain at Break (%)	Load at Break (KN)	Stress at Break (MPa)	Displacement at 0.2% Yield (mm)
1	2.720	5.354	36.14	568.2	5.110	10.060	15.93	250.5	.7326
2	2.620	4.764	37.41	575.4	4.050	7.364	18.27	281.0	.8393
Mean:	2.670	5.059	36.77	571.8	4.580	8.711	17.10	265.7	.7959
Standard Deviation:	.071	.418	.90	5.0	.749	1.906	1.66	21.6	.0696

Specimen Number	% Strain at 0.2% Yield (%)	Load at 0.2% Yield (KN)	Stress at 0.2% Yield (MPa)	Young's Modulus (MPa)	Energy at Yield (N/mm)	Energy at Break (N/mm)
1	1.442	26.03	409.3	41550.	9.822	156.9
2	1.562	28.49	438.2	43510.	12.400	123.4
Mean:	1.502	27.26	423.7	42530.	11.110	140.2
Standard Deviation:	.085	1.74	20.4	1387.	1.821	23.7

Figura B3 – Datos para las probetas de acero soldadas.

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

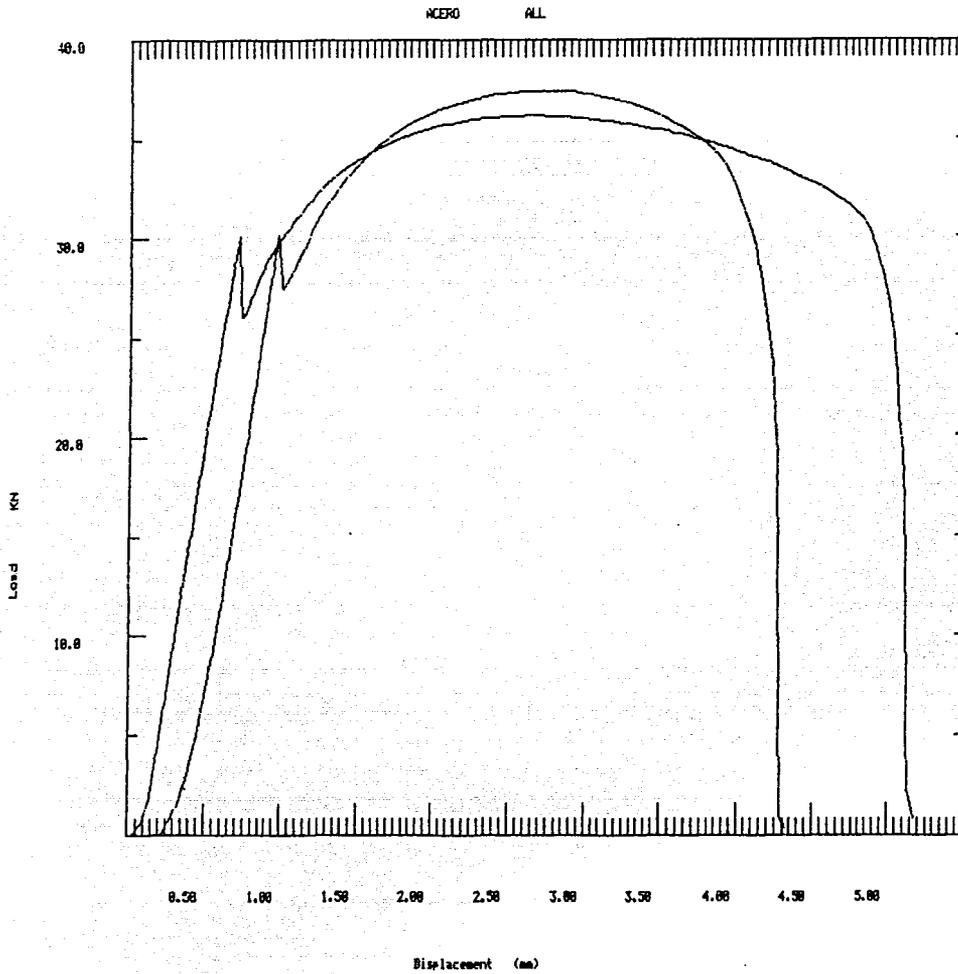


Figura B4 – Gráficas para las probetas de acero soldadas.

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
 FACULTAD DE INGENIERÍA
 DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

Prueba de tracción para probetas de acero recocido

Test type: Tensile
 Operator name: Adolfo Altaairano M.

Instron Corporation
 Series IX Automated Materials Testing System 1.04
 Test Date: 09 Jun 2003

Sample Identification: ALPURD
 Interface Type: 4200 Series
 Machine Parameters of test:
 Sample Rate (pts/sec): 10.00
 Crosshead Speed (mm/min): 5.000

Sample Type: ASTM
 Humidity (%): 50
 Temperature (deg. C): 23

Dimensions:
 Spec. 1
 Diameter (mm) 9.2000
 Spec gauge len (mm) 55.000
 Grip distance (mm) 45.000

Out of 1 specimens. 0 excluded.

Specimen Number	Displacement at Peak (mm)	% Strain at Peak (%)	Load at Peak (kN)	Stress at Peak (MPa)	Displacement at Break (mm)	% Strain at Break (%)	Load at Break (kN)	Stress at Break (MPa)	Displacement at 0.2% Yield (mm)
1	4.440	8.073	20.66	310.9	7.870	14.31	13.53	203.6	1.942
Mean:	4.440	8.073	20.66	310.9	7.870	14.31	13.53	203.6	1.942

Standard Deviation:

Specimen Number	% Strain at 0.2% Yield (%)	Load at 0.2% Yield (kN)	Stress at 0.2% Yield (MPa)	Young's Modulus (MPa)	Energy at Yield (N/mm)	Energy at Break (N/mm)
1	3.531	19.10	287.4	20730.	9.597	121.6
Mean:	3.531	19.10	287.4	20730.	9.597	121.6

Standard Deviation:

Figura B5 - Datos para las probetas de aluminio de una sola pieza.

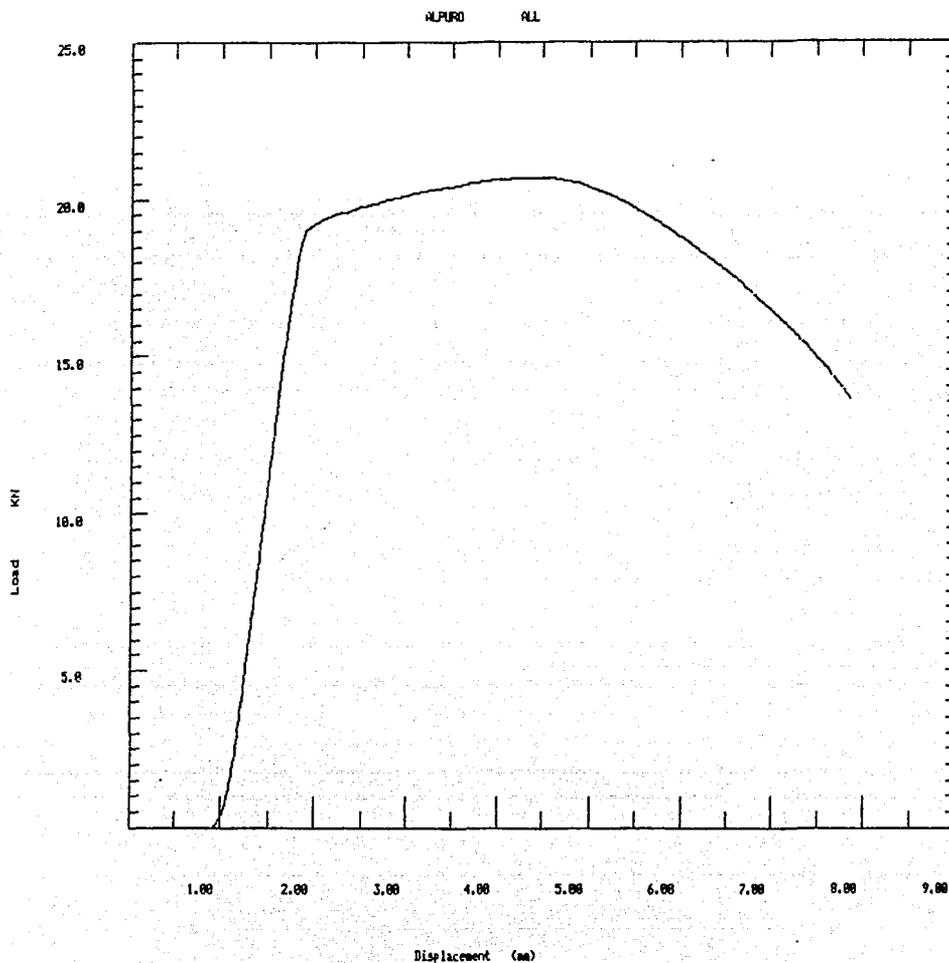


Figura B6 – Gráficas para las probetas de aluminio de una sola pieza.

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
 FACULTAD DE INGENIERÍA
 DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

Prueba de tracción para probetas de acero recocido

Test type: Tensile

Instron Corporation
 Series IX Automated Materials Testing System 1.04
 Test Date: 30 May 2003

Operator name: Adolfo Altaíraño M.

Sample Type: ASTM

Sample Identification: ALUMINIO
 Interface Type: 4200 Series
 Machine Parameters of test:

Sample Rate (pts/sec): 10.00
 Crosshead Speed (mm/min): 5.000

Humidity (%): 50
 Temperature (deg. C): 23

Dimensions:

Spec. 1 Spec. 2

Diameter (mm) 9.5000 9.0000
 Spec gauge len (mm) 50.800 50.800
 Grip distance (mm) 45.000 45.000

Out of 2 specimens, 0 excluded.

Specimen Number	Displacement at Peak (mm)	% Strain at Peak (%)	Load at Peak (KN)	Stress at Peak (MPa)	Displacement at Break (mm)	% Strain at Break (%)	Load at Break (KN)	Stress at Break (MPa)	Displacement at 0.2% Yield (mm)
1	2.560	5.039	15.010	211.8	3.480	6.850	3.664	5.171	.5828
2	2.410	4.744	9.757	153.4	3.585	7.057	6.6800	105.000	.3849
Mean:	2.485	4.892	12.380	182.6	3.532	6.954	3.5230	55.100	.4838
Standard Deviation:	.106	.209	3.714	41.3	.074	.146	4.4650	70.620	.1399

Specimen Number	% Strain at 0.2% Yield (%)	Load at 0.2% Yield (KN)	Stress at 0.2% Yield (MPa)	Young's Modulus (MPa)	Energy at Yield (N/mm)	Energy at Break (N/mm)
1	1.1470	9.753	137.60	19280.	2.850	36.60
2	.7577	5.827	91.61	19060.	1.299	27.71
Mean:	.9525	7.790	114.60	19170.	2.074	32.16
Standard Deviation:	.2755	2.776	32.54	153.	1.097	6.29

Figura B7 – Datos para las probetas de aluminio soldadas.

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

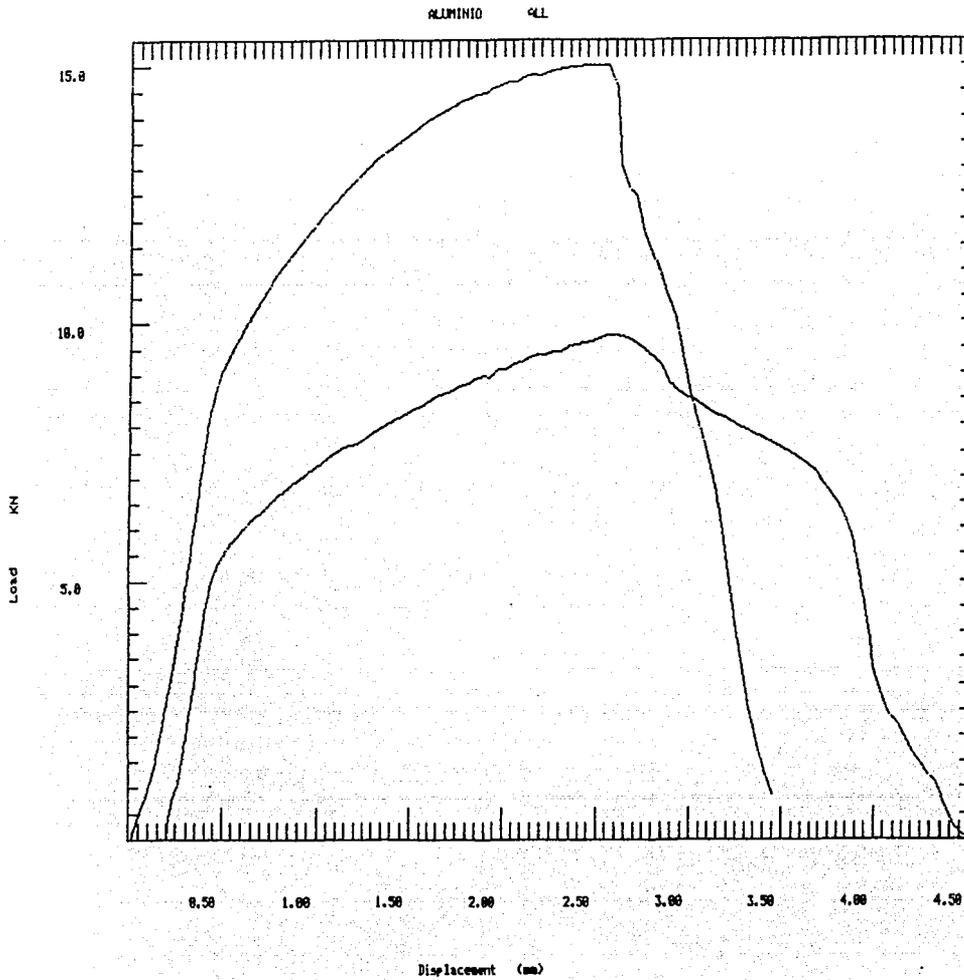


Figura B8 – Gráficas para las probetas de aluminio soldadas.

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN



APÉNDICE C.

Propiedades de AISI 9840 (TX10R)

TX10R

AISI 9840 Steel, 650°C (1200°F) temper, 25 mm (1 in.) round

KeyWords:

UNS G98400, AMS 6342 C, ASTM A274, ASTM A322, ASTM A519, SAE J778, DIN 1.6511, UNI 38 NiCrMo 4, B. S. 816 M 40

SubCat: Low Alloy Steel, AISI 9000 Series Steel, Medium Carbon Steel, Metal

Material Notes:

Quenched, 540°C temper, 525°C nitride for 40 hours with 20-30% ammonia dissociation, hardness of 88 HR15N case hardness at 0.635-0.762 mm nitrided case depth

Component	Value	Min	Max
Carbon, C		0.38	0.43
Chromium, Cr	0.8		
Iron, Fe	96		
Manganese, Mn	0.8		
Molybdenum, Mo	0.25		
Nickel, Ni	1		
Phosphorous, P			0.035
Sulfur, S			0.04
Silicon, Si	0.23		
Properties			
Physical			
Density, g/cc	7.87	--	--
Mechanical			
Hardness, Brinell	280	--	--
Hardness, Knoop	306	--	--
Hardness, Rockwell B	99	--	--
Hardness, Rockwell C	35	--	--
Hardness, Vickers	295	--	--
Tensile Strength, Ultimate, MPa	965	--	--
Tensile Strength, Yield, MPa	825	--	--
Elongation at Break, %	19	--	--
Modulus of Elasticity, GPa	200	--	--
Bulk Modulus, GPa	140	--	--
Machinability, %	70	--	--
Shear Modulus, GPa	80	--	--
Electrical			
Electrical Resistivity, ohm-cm	1.74E-05	--	--
Thermal			
CTE, linear 20°C, $\mu\text{m}/\text{m}\cdot^\circ\text{C}$	11.5	--	--
CTE, linear 250°C, $\mu\text{m}/\text{m}\cdot^\circ\text{C}$	12.2	--	--
CTE, linear 500°C, $\mu\text{m}/\text{m}\cdot^\circ\text{C}$	13.9	--	--
CTE, linear 1000°C, $\mu\text{m}/\text{m}\cdot^\circ\text{C}$	14.7	--	--
Heat Capacity, J/g $\cdot^\circ\text{C}$	0.472	--	--
Thermal Conductivity, W/m-K	51.9	--	--

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Propiedades de AISI 1018 (Cold Rolled)

AISI 1018 Steel, cold Rolled

KeyWords:

carbon steels, AMS 5069, ASTM A108, UNS G10180, AS 1442 K1018 (Australia), AS 1443 K1018, CSN 12020 (Czech), CSN 12022, AFNOR NF A33-101 AF42C20, DIN 1.0453, DIN C16.8, DGN B-301 1018 (Mexico), COPANT 331 1018 (Pan America), COPANT 333 1018, MST.T (Russia), ST.20A, ST.3, ST.3T, GOST M18S, GOST 23570 18ps, GOST 23570 18sp, GOST 5520 18K, GOST 5521 S, NBN 629 D37-2 (Belgium), NBN 630 E37-1, NBN 630 E37-2, NBN A21-221 C17KD, BDS 9801 S (Bulgaria), GB 715 ML3 (China), TS 302 Fe35.2 (Turkey), TS 346 Fe35, BS 970 080A17, DEF STAN95-1-1 C1018

SubCat: Carbon Steel, AISI 1000 Series Steel, Low Carbon Steel, Metal

Material Notes:

Medium low-carbon steel, has good weldability and slightly better machinability than the lower carbon steels.

Component

	Value	Min	Max
Carbon, C		0.14	0.2
Iron, Fe		98.81	99.26
Manganese, Mn		0.6	0.9
Phosphorous, P			0.04
Sulfur, S			0.05

Properties

Physical

	Value	Min	Max
Density, g/cc	7.87	--	--

Mechanical

Hardness, Brinell	126	--	--
Hardness, Knoop	145	--	--
Hardness, Rockwell B	71	--	--
Hardness, Vickers	131	--	--
Tensile Strength, Ultimate, MPa	440	--	--
Tensile Strength, Yield, MPa	370	--	--
Elongation at Break, %	15	--	--
Reduction of Area, %	40	--	--
Modulus of Elasticity, GPa	205	--	--
Bulk Modulus, GPa	140	--	--
Machinability, %	70	--	--
Shear Modulus, GPa	80	--	--

Electrical

Electrical Resistivity, ohm-cm	1.59E-05	--	--
--------------------------------	----------	----	----

Thermal

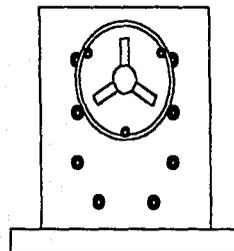
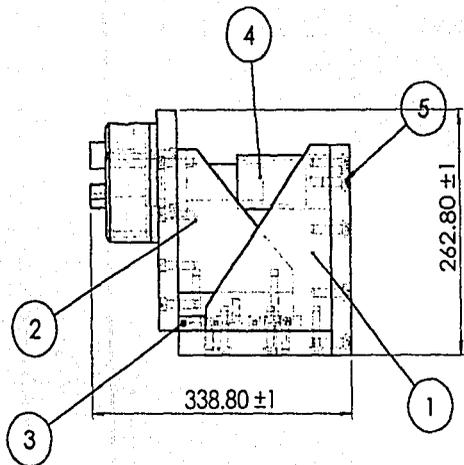
Heat Capacity, J/g-°C	0.486	--	--
Thermal Conductivity, W/m-K	51.9	--	--

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

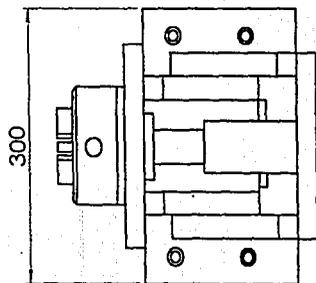


APÉNDICE D.

PLANOS DE DISEÑO.



**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



ITEM NO.	QTY.	PART NO.	DESCRIPCION
1	1	EP02EG001	
2	1	EP01EG001	
3	1	PZ10EG001	
4	1	EX04EG001	
5	2	EX02SN001	

NOTA:
 Todas las tolerancias son en Milímetros
 Tolerancias No Indicadas:
 Lineales ± 0.5 mm
 Angulares $\pm 1^\circ$

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
 FACULTAD DE INGENIERIA.

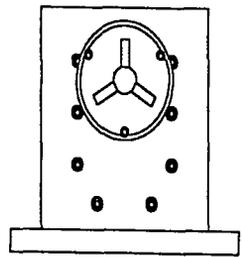
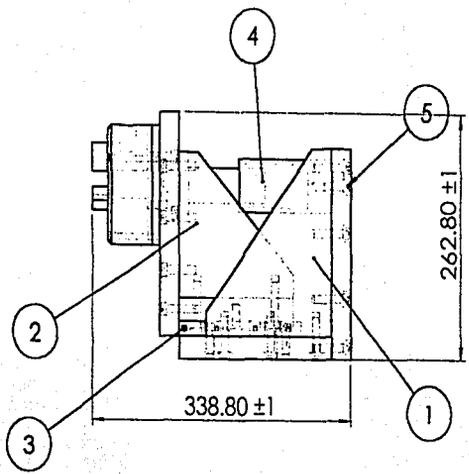
DESCRIPCION:
 ENSAMBLE GENERAL (VISTAS)

PROYECTO:
 "ACCESORIO PARA TORNO
 PARA SOLDADURA POR FRICCIÓN"

Acol.
 mm
 Fecha
 06/06/2003
 Esc: NA
 Dibujo: RPB

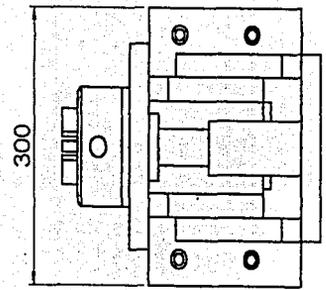
Revisó: JR
 cod.
 EG003N001

No. 1



**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

ITEM NO.	QTY.	PART NO.	DESCRIPTION
1	1	EP02EG001	
2	1	EP01EG001	
3	1	PZ10EG001	
4	1	EX04EG001	
5	2	EX02SN001	

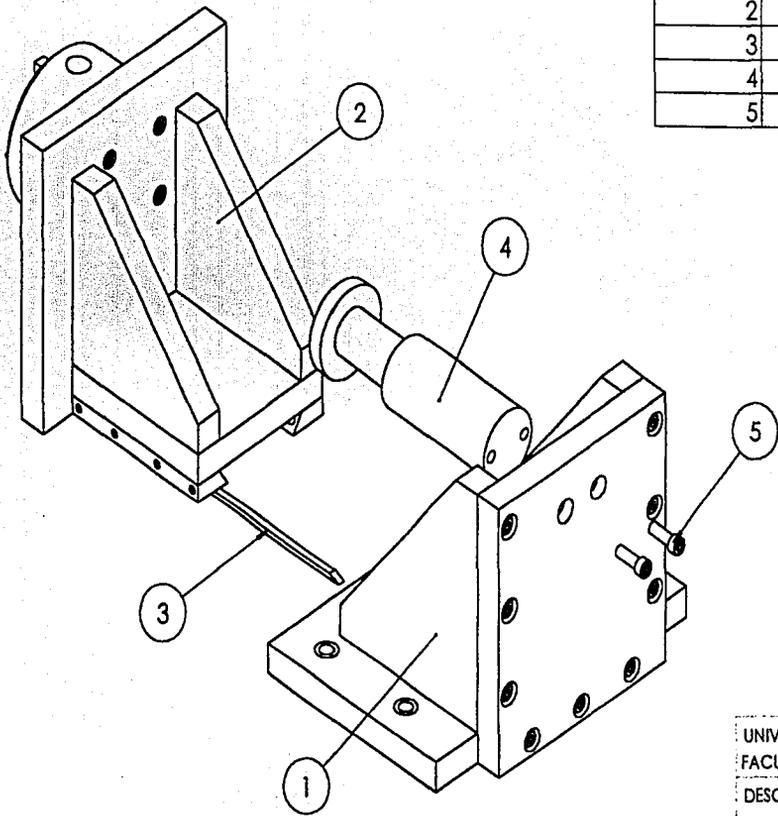


NOTA:
 Todas las tolerancias son en Milímetros
 Tolerancias No Indicadas:
 Lineales ± 0.5 mm
 Angulares $\pm 1^\circ$

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO	
FACULTAD DE INGENIERIA.	
DESCRIPCION:	Acot. mm
ENSAMBLE GENERAL (VISTAS)	Fecha
	06/06/2003
	Esc: NA
	Dibujó: RPB
	Revisó: JR
	cod.
	EG003N001
	No. 1

PROYECTO:
 "ACCESORIO PARA TORNO
 PARA SOLDADURA POR FRICCIÓN"

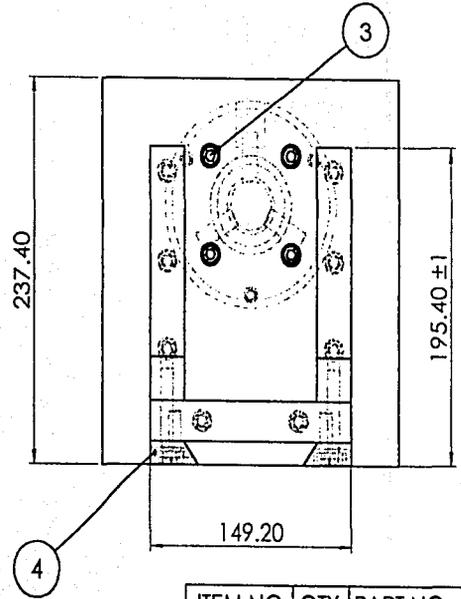
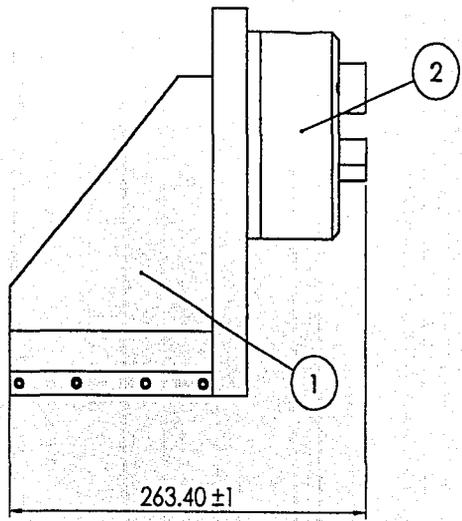
ITEM NO.	QTY.	PART NO.	DESCRIPTION
1	1	EP02EG001	
2	1	EP01EG001	
3	1	PZ10EG001	
4	1	EX04EG001	
5	2	EX02SN001	



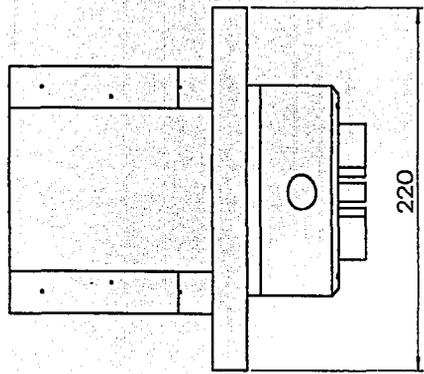
TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

NOTA:
 Todas las tolerancias son en Milímetros
 Tolerancias No Indicadas:
 Lineales ± 0.5 mm
 Angulares $\pm 1^\circ$

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO	
FACULTAD DE INGENIERIA.	
DESCRIPCION:	Acol. mm
ENSAMBLE GENERAL (ISOMETRICO)	Fecha
	06/06/2003
	Esc: NA
	Dibujó: RPB
	Revisó: JR
PROYECTO:	cod.
"ACCESORIO PARA TORNO	EG00SH002
PARA SOLDADURA POR FRICCIÓN"	No. 2



**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



ITEM NO.	QTY.	PART NO.	DESCRIPTION
1	1	SE01EP011	
2	1	EP03EG001	
3	4	EX02SN001	
4	4	EX07SN001	

NOTA:
 Todas las tolerancias son en Milímetros
 Tolerancias No Indicadas:
 Lineales ± 0.5 mm
 Angulares $\pm 1^\circ$

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
 FACULTAD DE INGENIERIA.

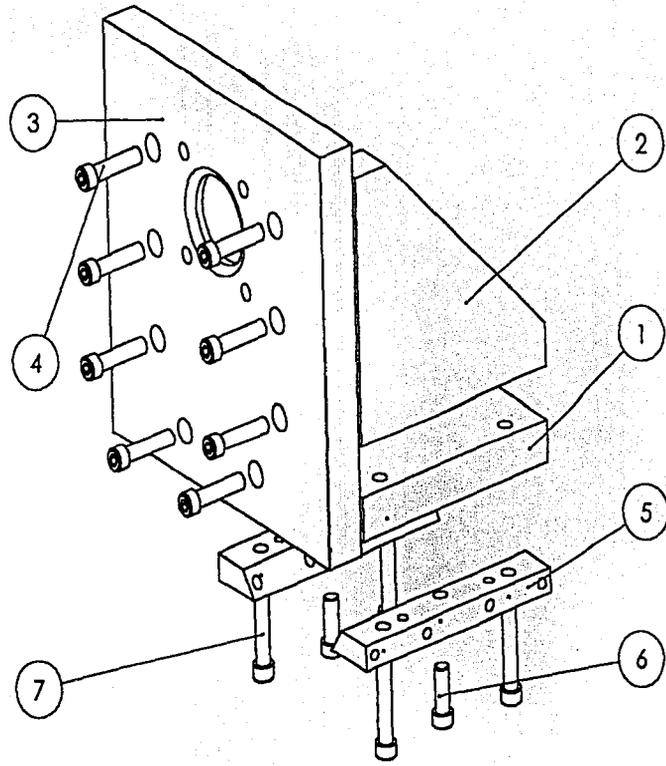
DESCRIPCION:
 ENSAMBLE CHOCK CORREDERA (VISTAS)

PROYECTO:
 "ACCESORIO PARA TORNO
 PARA SOLDADURA POR FRICCION"

Acol. mm
 Fecha 06/06/2003
 Esc: 1:3.5
 Dibujo: RPB

Revisó: JR.
 COD. EP01EG001
 No. 3

TESIS CON FALLA DE ORIGEN



ITEM NO.	QTY.	PART NO.	DESCRIPTION
1	1	PZ01SE011	
2	2	PZ02SE011	
3	1	PZ03SE011	
4	8	EX01SN001	
5	2	PZ04SE011	
6	2	EX02SN001	
7	4	EX03SN001	

NOTA:
 Todas las tolerancias son en Milímetros
 Tolerancias No Indicadas:
 Lineales ± 0.5 mm
 Angulares $\pm 1^\circ$

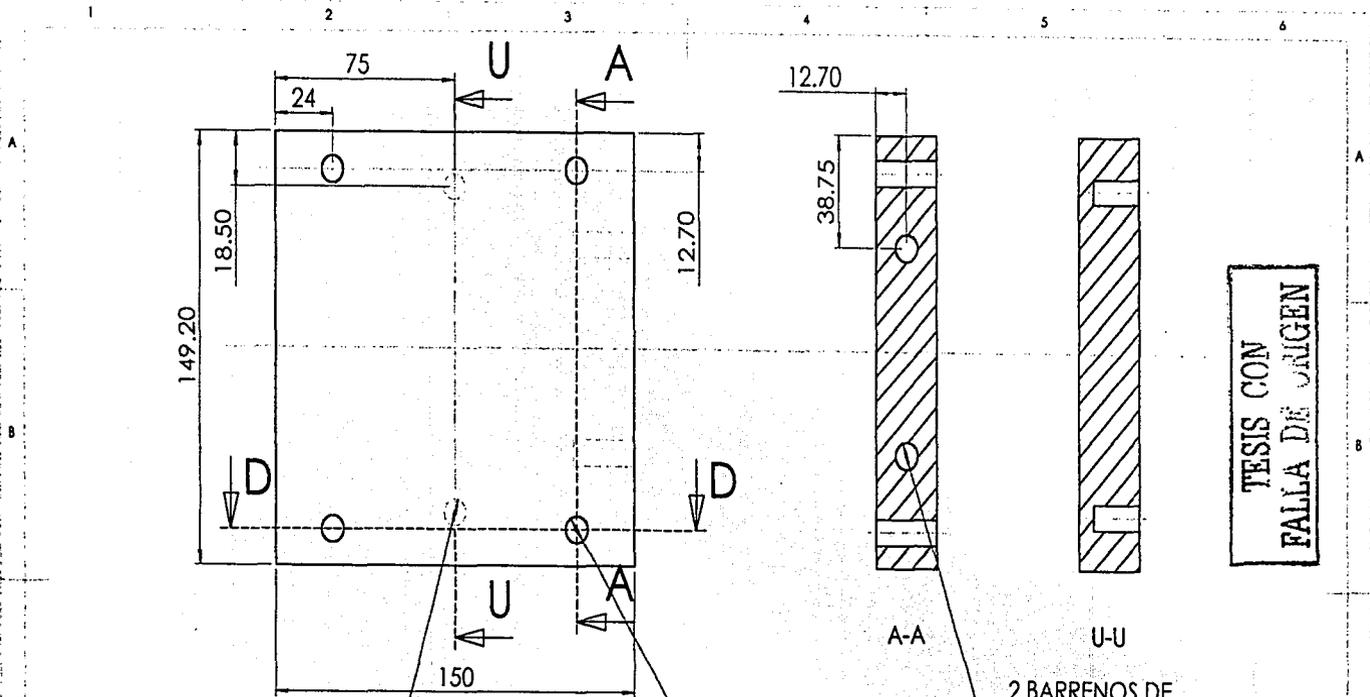
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MEXICO
 FACULTAD DE INGENIERIA.

DESCRIPCION:
 ENSAMBLE CORREDERA (ISOMETRICO)

PROYECTO:
 "ACCESORIO PARA TORNO
 PARA SOLDADURA POR FRICCIÓN"

Acol. _____
 mm _____
 Fecha 06/06/2003.
 Esc: NA
 Dibujó: RPB

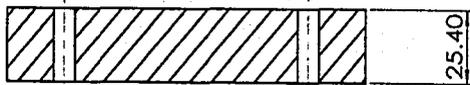
Revisó: JR
 COD. SE01EP011
 No. 4



2 BARRENOS DE $\varnothing 9.52$ (3/8" UNC 16) $\nabla 19.05$

4 BARRENOS DE $\varnothing 9.52$ (3/8")

2 BARRENOS DE $\varnothing 9.52$ (3/8" UNC 16) $\nabla 25.4$

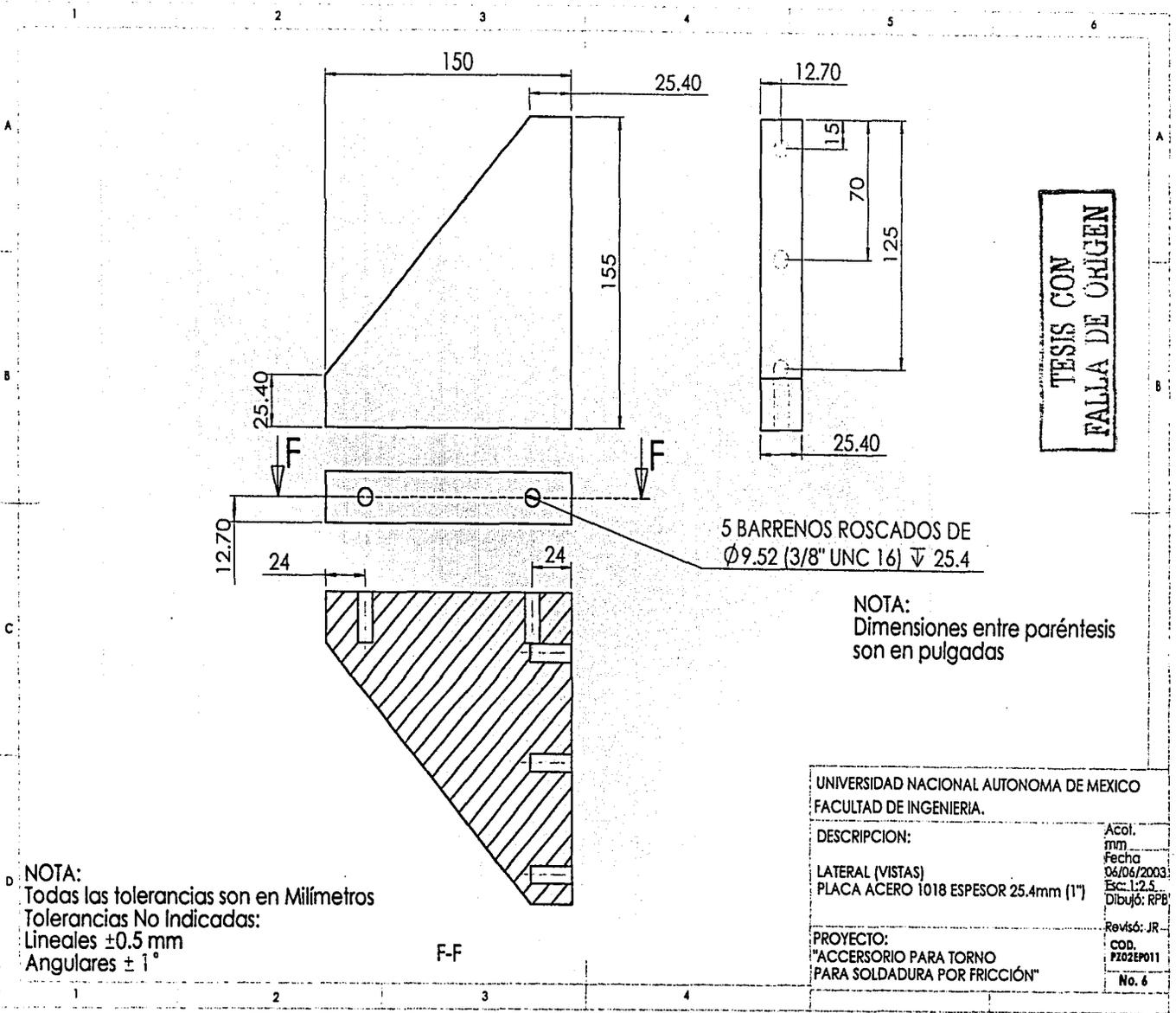


NOTA:
 Todas las tolerancias son en Milímetros
 Tolerancias No Indicadas:
 Lineales ± 0.5 mm
 Angulares $\pm 1^\circ$

NOTA:
 Dimensiones entre paréntesis
 son en pulgadas

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO FACULTAD DE INGENIERIA.	
DESCRIPCION: BASE CORREDERA PLACA ACERO 1018 ESPESOR 25.4mm (1").	Acol. mm Fecha 06/06/2003 Esc: 1:2 Dibujó: RPB Revisó: RPB
PROYECTO: "ACCESORIO PARA TORNO PARA SOLDADURA POR FRICCIÓN"	COD. PZ01EP011 No. 5

RF



TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

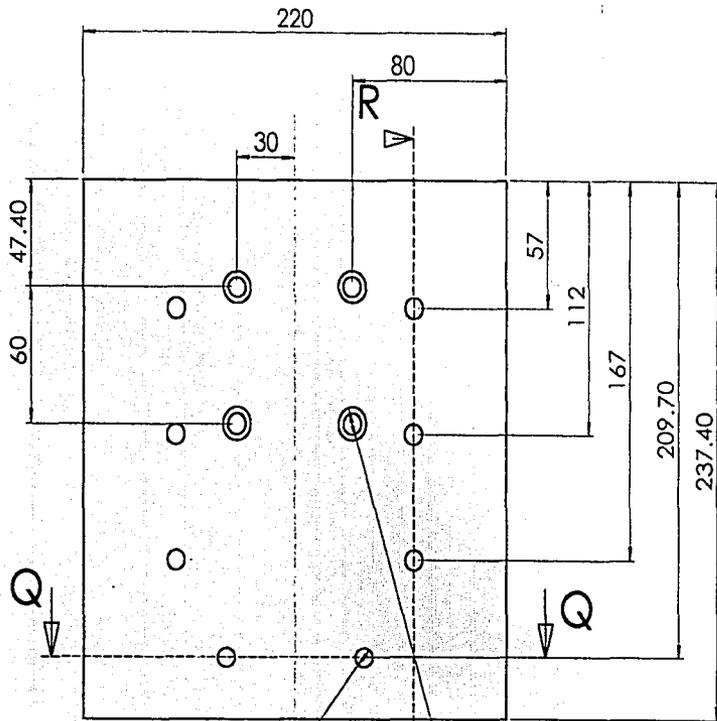
5 BARRENOS ROSCADOS DE
 $\varnothing 9.52$ (3/8" UNC 16) $\nabla 25.4$

NOTA:
 Dimensiones entre paréntesis
 son en pulgadas

NOTA:
 Todas las tolerancias son en Milímetros
 Tolerancias No Indicadas:
 Lineales ± 0.5 mm
 Angulares $\pm 1^\circ$

F-F

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO FACULTAD DE INGENIERIA.	
DESCRIPCION:	Acot. mm
LATERAL (VISTAS)	Fecha
PLACA ACERO 1018 ESPESOR 25.4mm (1")	04/06/2003
	Esc: 1:2.5
	Dibujó: RPB
PROYECTO:	Revisó: JR
"ACCESORIO PARA TORNO PARA SOLDADURA POR FRICCIÓN"	COD. PZ02EP011
	No. 6



8 BARRENOS DE
 $\varnothing 9.52 (3/8)$

$\varnothing 1.0 \text{ (M)}$

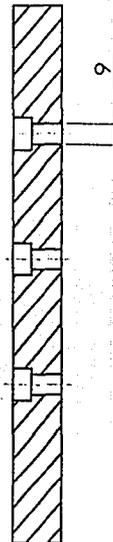
4 BARRENOS DE
 $\varnothing 9.52 (3/8)$ $\perp \varnothing 16 \pm 0.1 \nabla 10$

$\varnothing 1.0 \text{ (M)}$



Q-Q

NOTA:
 Todas las tolerancias son en Milímetros
 Tolerancias No Indicadas:
 Lineales $\pm 0.5 \text{ mm}$
 Angulares $\pm 1^\circ$



R-R

NOTA:
 Dimensiones entre paréntesis
 son en pulgadas

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
 FACULTAD DE INGENIERIA.

DESCRIPCION:
 PLACA SOPORTE
 PLACA ACERO 1018 ESPESOR 25.4mm (1")

Acol.
 mm
 Fecha
 06/06/2003
 Esc: 1:2.5
 Dibujó: RPB

PROYECTO:
 "ACCESORIO PARA TORNO
 PARA SOLDADURA POR FRICCIÓN"

Revisó: JR
 COD.
 P203EP011
 No. 7

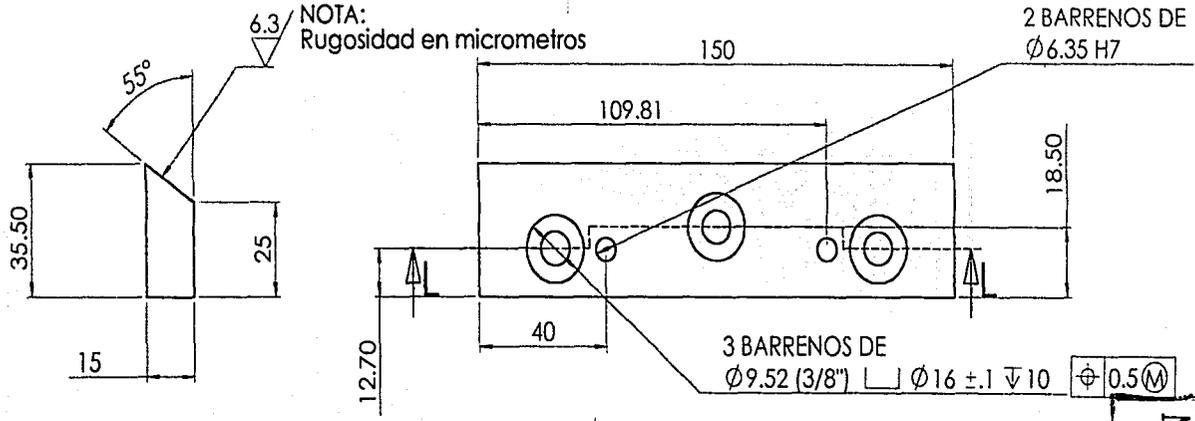
107

EX	QTY.	PART NO.	DESCRIPTION
1	1	EX01SN001	3/8"X16 UNC 1.5"
2	12	EX02SN001	3/8"X16 UNC 1"
3	4	EX03SN001	3/8"X16 UNC 2"
4	4	EX04SN001	1/4"X20 UNC 1"

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO	
FACULTAD DE INGENIERIA.	
DESCRIPCION:	Acol. mm
TORNILLO TIPO ALLEN GRADO 8 (VARIOS TAMAÑOS)	Fecha 06/06/2003
	Esc: NA
	Dibujó: RPB
PROYECTO:	Revisó: RPB
"ACCESORIO PARA TORNO PARA SOLDADURA POR FRICCIÓN"	COD. EX00SN001
	No. 8

107

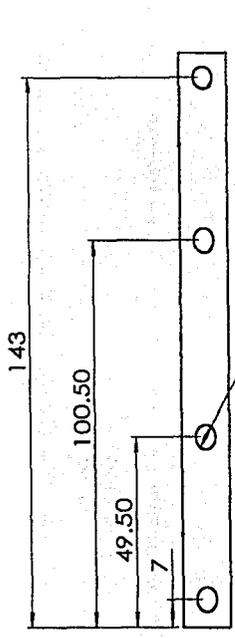


NOTA:
Rugosidad en micrometros

2 BARRENOS DE
 $\phi 6.35$ H7

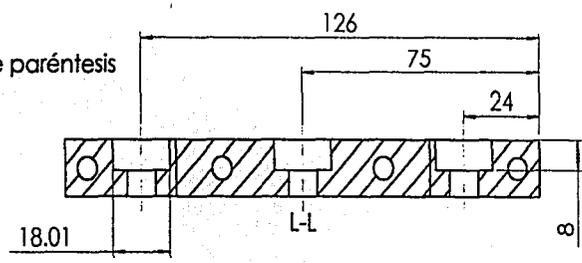
3 BARRENOS DE
 $\phi 9.52$ (3/8") $\square \phi 16 \pm 0.1 \sqrt{0.5}$ M

NOTA:
Dimensiones entre paréntesis
son en pulgadas



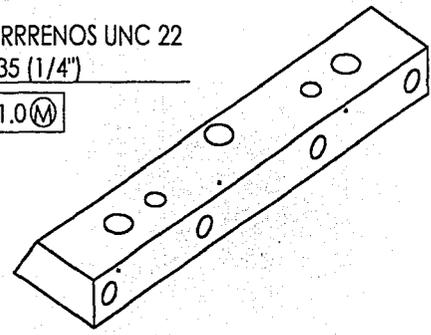
4 BARRENOS UNC 22
 $\phi 6.35$ (1/4")

$\phi 1.0$ M

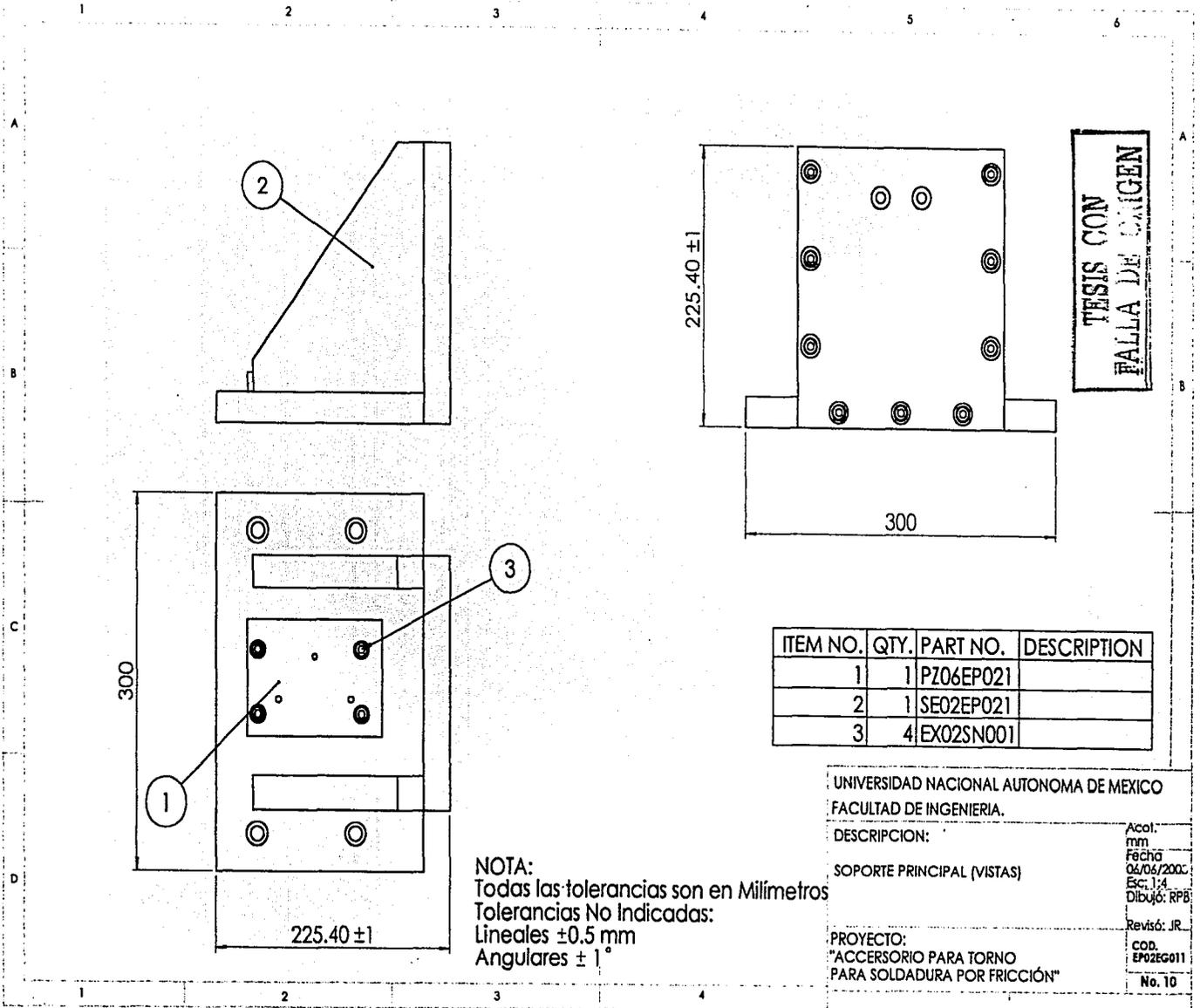


TESIS CON
FALLA DE CENGEN

NOTA:
Todas las tolerancias son en Milímetros
Tolerancias No Indicadas:
Lineales ± 0.5 mm
Angulares $\pm 1^\circ$



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO	
FACULTAD DE INGENIERIA.	
DESCRIPCION:	Acol. mm Fecha 06/06/2003 Esc: 1:1.5 Dibujó: RPU
PATIN PLACA ACERO TX10R ESPESOR 12.7mm (1/2")	Revisó: RPB Cod. P204EP011
PROYECTO: "ACCESORIO PARA TORNO PARA SOLDADURA POR FRICCIÓN"	No. 9



ITEM NO.	QTY.	PART NO.	DESCRIPTION
1	1	PZ06EP021	
2	1	SE02EP021	
3	4	EX02SN001	

NOTA:
 Todas las tolerancias son en Milímetros
 Tolerancias No Indicadas:
 Lineales ± 0.5 mm
 Angulares $\pm 1^\circ$

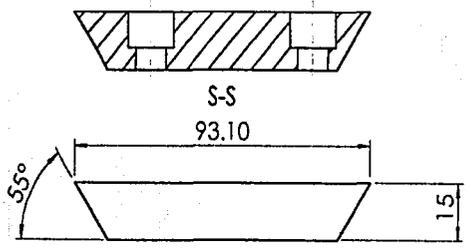
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
 FACULTAD DE INGENIERIA.

DESCRIPCION:
 SOPORTE PRINCIPAL (VISTAS)

PROYECTO:
 "ACCESORIO PARA TORNO
 PARA SOLDADURA POR FRICCIÓN"

Acot.
 mm
 Fecha
 06/06/2006
 Esc. 1:1
 Dibujo: RPB
 Revisó: JR
 cod.
 EP02EG011
 No. 10

NOTA:
Dimensiones entre paréntesis son en pulgadas



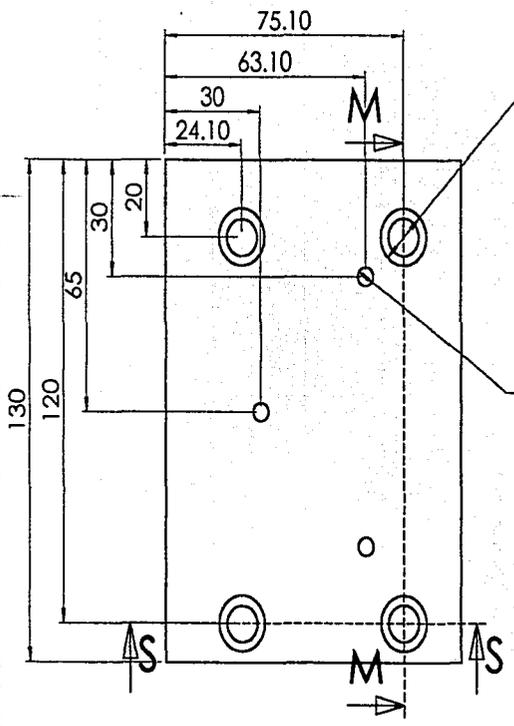
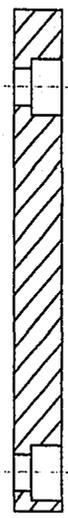
TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

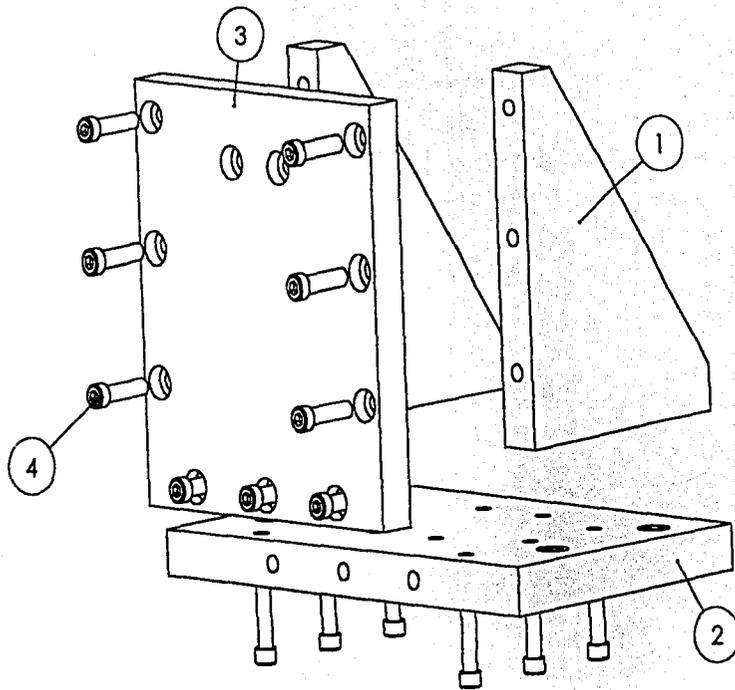
4 BARRENOS DE
 $\phi 9.52$ (3/8") $\perp \phi 16 \pm 1 \nabla 10$

3 BARRENOS DE
 $\phi 4.83$ H7

NOTA:
Todas las tolerancias son en Milímetros
Tolerancias No Indicadas:
Lineales ± 0.5 mm
Angulares $\pm 1^\circ$

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO FACULTAD DE INGENIERIA.	
DESCRIPCION:	Acol. mm
GUIA	Fecha 06/06/2003
PLACA ACERO TX10R ESPESOR 12.7mm (1/2")	Esc: 1:1.5 Dibujó: RPB
PROYECTO: "ACCESORIO PARA TORNO PARA SOLDADURA POR FRICCIÓN"	Revisó: JR. COD. P204EP021 No. 11





TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

ITEM NO.	QTY.	PART NO.	DESCRIPTION
1	2	PZ07SE021	
2	1	PZ08SE021	
3	1	PZ09SE021	
4	15	EX01SN001	

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
 FACULTAD DE INGENIERIA.

DESCRIPCION:
 SOPORTE PRINCIPAL (EXPLOSIVO)

PROYECTO:
 "ACCESORIO PARA TORNO
 PARA SOLDADURA POR FRICCION"

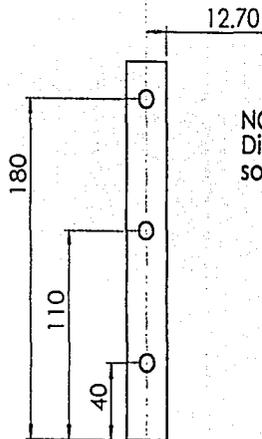
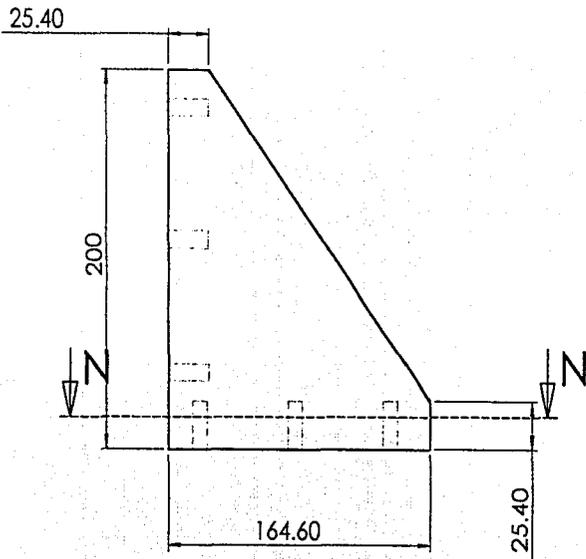
Acol.
 mm
 Fecha
 06/06/2003
 Esc: NA
 Dibujo: RPB

Revisó: JR.

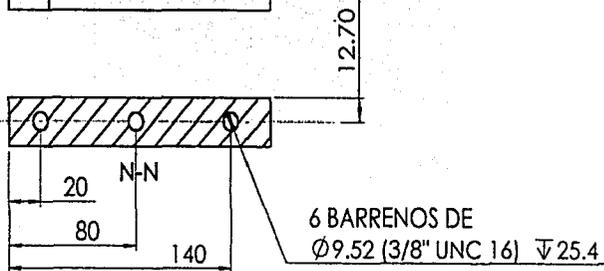
cod.
 SE02EP021

No. 12

NOTA:
 Todas las tolerancias son en Milímetros
 Tolerancias No Indicadas:
 Lineales ± 0.5 mm
 Angulares $\pm 1^\circ$



NOTA:
Dimensiones entre paréntesis
son en pulgadas



NOTA:
Todas las tolerancias son en Milímetros
Tolerancias No Indicadas:
Lineales ± 0.5 mm
Angulares $\pm 1^\circ$

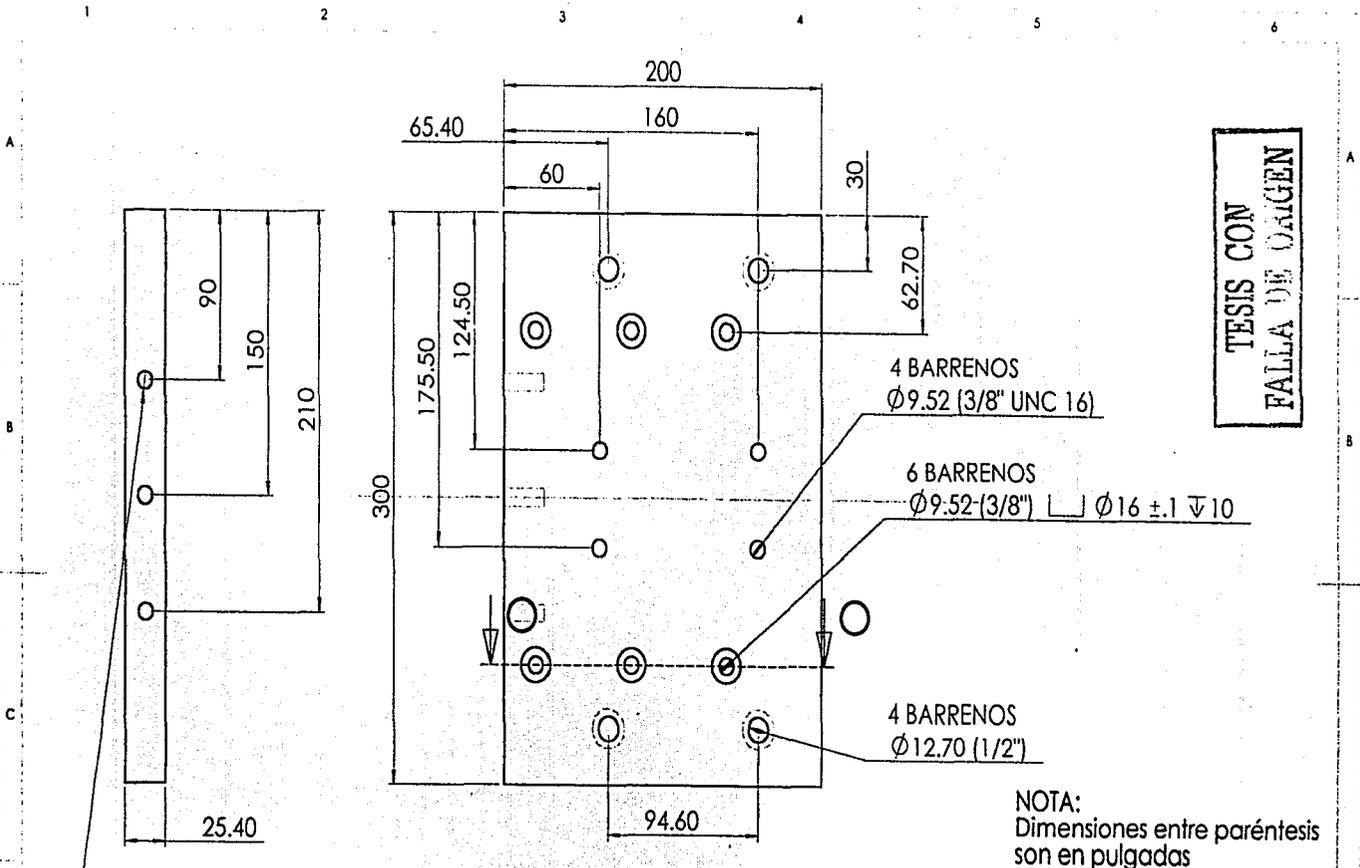
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
FACULTAD DE INGENIERIA.

DESCRIPCION:

LATERAL
PLACA ACERO 1018 ESPESOR 25.4mm (1").

PROYECTO:
"ACCESORIO PARA TORNO
PARA SOLDADURA POR FRICCIÓN"

Acol.	mm
Fecha	06/06/2003
Esc.	1:3
Dibujó:	RPB
Revisó:	JR
COD.	PZ075E021
No.	13

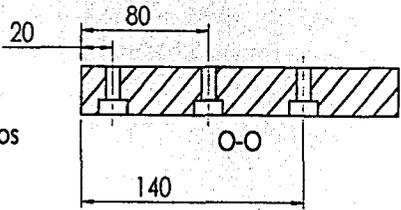


TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

NOTA:
 Dimensiones entre paréntesis
 son en pulgadas

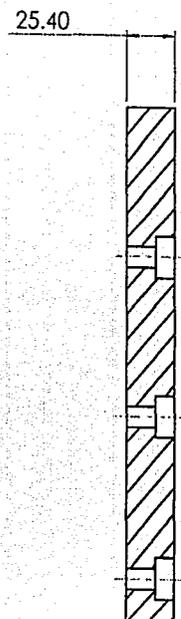
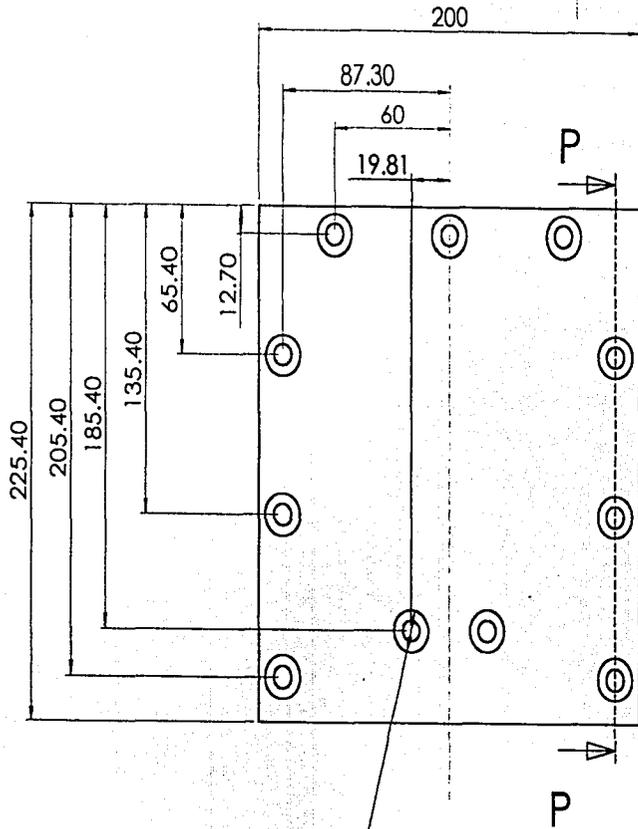
3 BARRENOS
 $\phi 9.52 (3/8" \text{ UNC } 16) \nabla 25.4$

NOTA:
 Todas las tolerancias son en Milímetros
 Tolerancias No Indicadas:
 Lineales $\pm 0.5 \text{ mm}$
 Angulares $\pm 1^\circ$



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO	
FACULTAD DE INGENIERIA.	
DESCRIPCION:	Acot. mm
BASE GUIA	Fecha
PLACA ACERO 1018 ESPESOR 25.4mm (1").	06/06/2003
	Esc: 1:3
	Dibujó: RPB
PROYECTO:	Revisó: JR
"ACCERSORIO PARA TORNO	COD.
PARA SOLDADURA POR FRICCION"	P2085E021
	No. 14

114



TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

11 BARRENOS DE
 $\varnothing 9.52$ (3/8") \square $\varnothing 16 \pm 0.25 \nabla 10$

NOTA:
 Todas las tolerancias son en Milímetros
 Tolerancias No Indicadas:
 Lineales ± 0.5 mm
 Angulares $\pm 1^\circ$

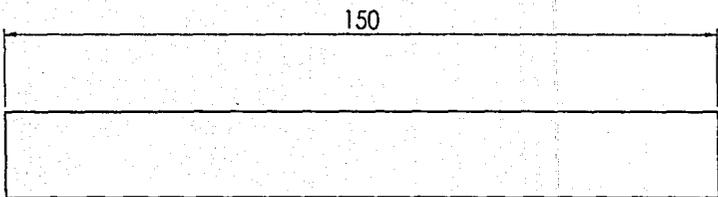
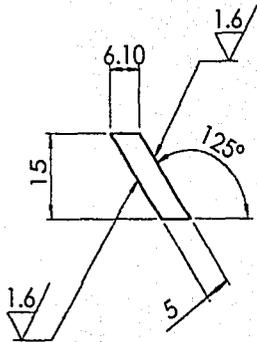
NOTA:
 Dimensiones entre paréntesis
 son en pulgadas

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
 FACULTAD DE INGENIERIA.

DESCRIPCION:	Acot: mm
FRENTE GUIA	Fecha 06/06/2003
PLACA ACERO 1018 ESPESOR 25.4mm (1").	Esc: 1:2.5
	Dibujó: RPB
PROYECTO:	Revisó: JR.
"ACCERSORIO PARA TORNO PARA SOLDADURA POR FRICCIÓN"	COD. P207SE021
	No. 15

114

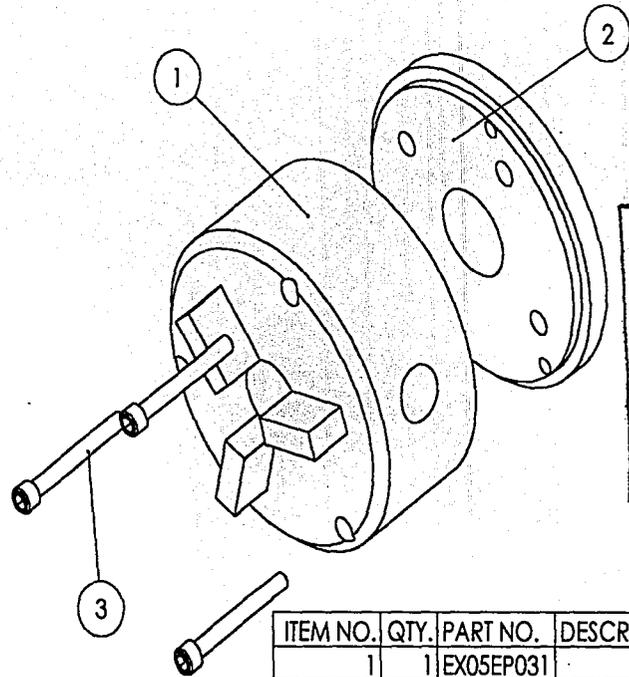
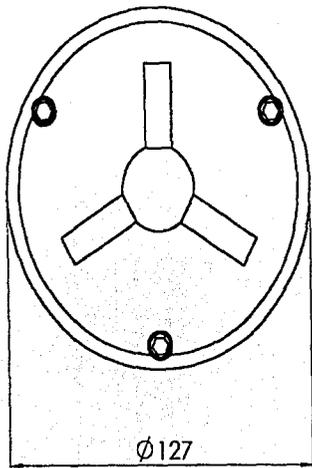
115



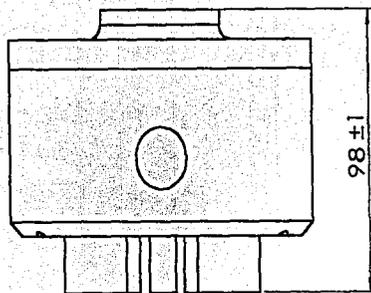
NOTA:
 Todas las tolerancias son en Milímetros;
 Tolerancias No Indicadas:
 Lineales ± 0.5 mm
 Angulares $\pm 1^\circ$

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO	
FACULTAD DE INGENIERIA.	
DESCRIPCION:	Acot. mm
GUIA DE AJUSTE	Fecha
ACERO 1018 ESPESOR 6.35mm (1/4")	06/06/2003
	Esc. 1:1
	Dibujó: RPB
PROYECTO:	Revisó: JR
"ACCERSORIO PARA TORNO	cod.
PARA SOLDADURA POR FRICCION"	P210EG001
	No. 16

115



TESIS CON
 ACUERDO
 FALLA DE INGENIERIA



ITEM NO.	QTY.	PART NO.	DESCRIPTION
1	1	EX05EP031	
2	1	PZ05EP031	
3	3	EX06SN001	

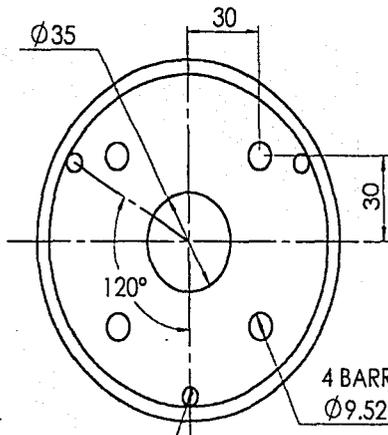
NOTA:
 Todas las tolerancias son en Milímetros
 Tolerancias No Indicadas:
 Lineales ±0.5 mm
 Angulares ± 1°

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
 FACULTAD DE INGENIERIA.

DESCRIPCION:
 ENSAMBLE CHOCK (VISTAS Y EXPLOSIVO)

PROYECTO:
 "ACCESORIO PARA TORNO
 PARA SOLDADURA POR FRICCION"

Acol: mm
 Fecha: 06/06/2003
 Esc: NA
 Dibujo: RPB
 Revisó: JR.
 cod. EP03EG001
 No. 17

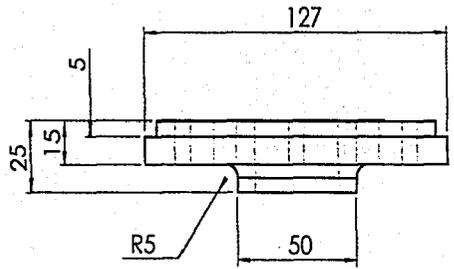


TESIS CON
 FALLA DE CARGEN

3 BARRENOS
 $\varnothing 6.35$ (1/4" UNC 20)

4 BARRENOS DE
 $\varnothing 9.52 \varnothing 9.52$ (3/8" UNC 16)

$\varnothing 1.0 M$



NOTA:
 Todas las tolerancias son en Milímetros
 Tolerancias No Indicadas:
 Lineales ± 0.5 mm
 Angulares $\pm 1^\circ$

NOTA:
 Dimensiones entre paréntesis
 son en pulgadas

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
 FACULTAD DE INGENIERIA.

DESCRIPCION:

PLATO
 ACERO 1018
 BARRA DE 127mm (5")

PROYECTO:
 "ACCESORIO PARA TORNO
 PARA SOLDADURA POR FRICCION"

Acol:
 mm
 Fecha
 06/06/2003
 Esc. 1:2
 Dibujó: RPB
 Revisó: JR.
 COD.
 PZ05EP031
 No. 18