



**Facultad de Ingeniería Mecánica
Colectivo de Mecánica Aplicada**

Trabajo de Diploma

**Puesta a punto de marcha y
evaluación de una máquina
experimental de soldadura por
fricción inercial.**

Autor: Duniesky Mateo Mérida.

Tutores: **Dr.C Víctor G. Gómez Rodríguez.
Dr.C. Rafael Goytisoló Espinosa.
Ms.C Jesús Peña Acción.**

Junio de 2009

“Año del 50 aniversario del triunfo de la Revolución”

Declaración de autoridad.



Facultad de Ingeniería Mecánica.

Hago constar que el presente trabajo fue realizado en la Universidad de Cienfuegos, como parte de la culminación de los estudios en la especialidad de Ingeniería Mecánica; autorizando a que el mismo sea utilizado para los fines que estime conveniente, tanto de forma parcial como total, y además no podrá ser presentado en eventos ni publicado sin la aprobación de la Universidad de Cienfuegos.

Firma del Autor

Los abajo firmantes certificamos que el presente trabajo ha sido revisado según acuerdo de la dirección de nuestro centro y el mismo cumple los requisitos que debe tener un trabajo de esa envergadura, referido a la temática señalada.

Información Científico – Técnica

Firma

Firma de Vicedecano

Firma de Tutor

Sistema de Documentación de Proyectos

Pensamiento.

“Ciencia es el arte de crear ilusiones convenientes, que el necio acepta o disputa, pero de cuyo ingenio goza el estudioso, sin cegarse ante el hecho de que tales ilusiones son otros tantos velos para ocultar las profundas tinieblas de lo insondable.”

Karl Gustav Jung

Dedicatoria.

Dedico esta tesis en primer lugar a la revolución que me ha permitido lograr ser lo que soy, a todas aquellas personas que han esperado tanto de mí y que no han sido defraudados, así como aquellas personas que no se encuentran físicamente para ver este momento.

Agradecimiento.

- *A mi madre que me ha ayudado para que esta tesis se posible y ha estado en todo momento a mi lado apoyándome y guiándome como toda madre sabe hacer.*
- *A todas las amistades que me han ayudado en los momentos mas críticos de mi tesis, principalmente a Juan Carlos Pareja y otros muchos más que han permitido esto posible.*
- *A mi tutor que tanto ha Hecho para que esta tesis este en tiempo para que me gradúe.*
- *A mis familiares más queridos que se han preocupados tanto por mi y la realización de esta tesis.*

Resumen.

Resumen

En el trabajo se verificaron los principales parámetros constructivos y se determinaron las exigencias tecnológicas de operación de la máquina experimental de soldadura por fricción inercial construida en la Universidad de Cienfuegos para su puesta a punto. Se evaluaron además el comportamiento de las propiedades físico – mecánicas, así como las características macro y microestructurales de las uniones soldadas obtenidas en dicha máquina experimental. Se logró determinar las limitantes principales de la máquina experimental como son el diámetro máximo a soldar sobre la bancada, el diapason de valores de presión de calentamiento y presión de forja, el diapason de velocidades de rotación de la probeta rotatoria, tipo de material base y longitud de las mismas. Se pudo comprobar que la unión en probetas de materiales homogéneos fue mucho más efectiva que en la unión de materiales heterogéneos y que en la comprobación de las propiedades mecánicas la soldadura por fricción inercial no afecta la resistencia ni la ductilidad del metal en su conjunto y ejerce poca influencia sobre la dureza independientemente del tipo de material de las probetas.

Índice.

Índice.

INTRODUCCION	1
CAPITULO I. Generalidades sobre las soldaduras de estado sólido. Particularidades de la soldadura por fricción inercial.	6
1.1. Consideraciones generales de la soldadura de estado sólido	6
1.2. Particularidades de la soldadura de estado sólido por fricción.....	13
1.2.1. Clasificación de la soldadura por fricción	15
1.2.2 Soldadura por fricción de conducción continúa	19
1.2.3 Soldadura por fricción inercial	22
1.3. Características fundamentales de las máquinas para la soldadura por fricción continúa.....	25
1.3.1- Clasificación de las máquinas para la soldadura por fricción continúa.....	25
1.3.2- Principales partes y sistemas de las máquinas para la soldadura por fricción continúa.....	27
1.3.3- Particularidades de los apoyos del cabezal delantero en las máquinas convencionales para la soldadura por fricción.....	28
1.4- Particularidades de la bancada de las máquinas convencionales para la soldadura por fricción	30
1.5 – Particularidades de las Maquinas para la soldadura de inercia por fricción	32
1.6 – Determinación de la masa racional de las máquinas para la soldadura por fricción	34
1.7 Generalidades de la aplicación de la soldadura por fricción en la manufactura y recuperación de piezas.	35
CAPITULO II Verificación de los parámetros constructivos y tecnológicos para la puesta a punto de la máquina experimental de soldadura por fricción inercial.....	37
2.1. Parámetros de trabajo de la máquina	37
2.1.1 Determinación de la velocidad de rotación de la probeta rotatoria	37
2.1.2 Determinación de las fuerzas axiales máximas.	38
2.1.3. Comprobación del motor eléctrico seleccionado en cuanto a la potencia consumida en el proceso.	39
2.1.4. Construcción del accionamiento hidráulico.....	41
2.1.5. Selección de la bomba y el motor eléctrico del sistema hidráulico	42
2.1.6. Descripción del circuito hidráulico de la máquina.	44
2.1.7. Descripción de la bancada de la máquina construida	45
2.1.8– Descripción de la estructura del carro móvil	46
2.2 Descripción del Plato de sujeción de la pieza rotatoria y el husillo y sus apoyos	47
Capítulo III. Evaluación de la resistencia mecánica y análisis metalográfico de las uniones en estado sólido obtenida con la máquina experimental de soldadura por fricción.	53
3.1. Evaluación de la resistencia mecánica en las probetas experimentales.	53

3.2 Análisis metalográfico de las uniones en estado sólido obtenidas con la máquina experimental de soldadura por fricción.	56
3.3 Evaluación de la resistencia mecánica de las uniones en estado sólido obtenida con la máquina experimental de soldadura por fricción.....	60
3.4. Medición de la dureza superficial en diferentes zonas de las probetas soldadas.....	65
3.5 La evaluación de la efectividad de la soldadura realizada en la máquina construida.	65
Conclusiones.....	68
Recomendaciones	70
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	71

Introducción.

INTRODUCCION

En la Industria metalmeccánica en general se presentan frecuentemente dificultades en el uso de los diferentes métodos de soldadura que le son accesibles y aplicables a sus producciones, ya sea por la falta de recursos materiales o por la disponibilidad en el territorio de uno u otro método. La necesidad de introducir nuevos conceptos en la industria nacional relacionados con la optimización de los recursos financieros, energéticos, etc. y el aumento de la productividad sin detrimento de la calidad de las producciones realizadas pone ante los especialistas de manufactura un reto en la búsqueda de alternativas para viabilizar estas exigencias.

En el presente trabajo se trabaja en la puesta a punto de una máquina experimental diseñada y construida en la Universidad de Cienfuegos para la realización de experimentos sobre la soldadura por fricción inercial de manera que pueda ser utilizada, a escala de laboratorio, en la profundización de la aplicabilidad de este método a la recuperación y fabricación de piezas.

La **Situación Problémica** está dada en la necesidad de la puesta en funcionamiento de la máquina experimental para el desarrollo de ensayos que permitan la comprobación experimental de las características obtenidas del proceso de soldadura por fricción inercial de muestras de materiales homogéneos y no homogéneos para emitir las recomendaciones tecnológicas correspondientes para la industria del territorio.

La necesidad de poner a punto la máquina experimental de soldadura por fricción inercial diseñada y construida en la Universidad de Cienfuegos así como evaluar la resistencia mecánica y las particularidades metalográficas de las uniones obtenidas con ella constituyen un **problema** a resolver una vez que existen recomendaciones tecnológicas para el desarrollo de los métodos de soldadura de estado sólido y en particular el método de soldadura por fricción en la universidad y el territorio.

El **Análisis Bibliográfico** realizado reconoce que el método de soldadura de estado sólido por fricción inercial encuentra una amplia utilidad en la manufactura mundial de partes y piezas de la maquinaria industrial y que es cada vez más

utilizado en la recuperación y el reacondicionamiento de piezas por las ventajas que presenta.

Los argumentos expuestos conducen a formular la **Hipótesis** de este trabajo como sigue:

La puesta a punto de una máquina experimental para la evaluación del comportamiento de las uniones soldadas mediante la aplicación de la soldadura de estado sólido por fricción inercial posibilitará estudiar la factibilidad de su introducción como alternativa en la manufactura y reacondicionamiento de piezas y elementos de la maquinaria industrial frente a otros métodos de soldadura utilizados convencionalmente.

De la hipótesis formulada se deriva el **Objeto de Estudio Teórico** del trabajo que consiste en la puesta a punto de la máquina experimental de soldadura por fricción inercial para la evaluación de la resistencia mecánica y las particularidades metalográficas de las uniones obtenidas con ella.

El **Objeto de Estudio Práctico** es la industria metalmecánica cubana y la validez de la hipótesis se singulariza en continuidad de las investigaciones sobre la aplicabilidad de este método de soldadura en el Centro de Estudios de la Oleohidráulica y la Neumática de la Universidad de Cienfuegos “Carlos Rafael Rodríguez”.

El **Objetivo General** que se persigue con el desarrollo de esta investigación está encaminado a la puesta a punto y evaluación de la máquina experimental de soldadura por fricción inercial construida en la Universidad de Cienfuegos y la determinación de las propiedades físico – mecánicas de las uniones logradas mediante este método.

El cumplimiento del objetivo general se realiza mediante el desarrollo de los **Objetivos Específicos** identificados a continuación:

1. Verificar los principales parámetros constructivos y determinar las exigencias tecnológicas de operación de la máquina experimental construida con anterioridad.

2. Evaluar el comportamiento de las propiedades físico – mecánicas de las uniones soldadas por el método de soldadura por fricción inercial desarrollada en la máquina experimental existente en la Universidad.
3. Estudiar los defectos que se producen en las uniones logradas en esta máquina de soldadura por fricción inercial y determinar cuales son las limitantes de esta que los están provocando.

Para lograr estos objetivos se hace necesario desarrollar, como principales Tareas de **Investigación**, las que se relacionan a continuación:

1. Determinación del estado del arte de la problemática a resolver.
2. Estudiar el comportamiento y las interrelaciones existentes entre los diferentes parámetros que caracterizan el proceso de soldadura de estado sólido por fricción inercial en materiales homogéneos y heterogéneos.
3. Evaluar las ventajas y desventajas que presenta dicho método de soldadura sobre los métodos convencionalmente aplicados en la manufactura y recuperación de piezas.
4. Poner a punto, constructiva y tecnológicamente la máquina de soldadura por fricción inercial.
5. Determinar experimentalmente el comportamiento de las propiedades físico – mecánicas de las uniones soldadas por el método de soldadura por fricción inercial desarrollada en la máquina experimental existente en la Universidad para las diferentes combinaciones de probetas soldadas.

En el transcurso de la investigación fueron utilizados diversos **Métodos Científicos**, como son: el enfoque sistémico, el método comparativo, analógico, el análisis y la síntesis, el tratamiento automatizado de la información.

Las **Novedades** del trabajo radican esencialmente en:

1. La puesta a punto de la máquina de uso experimental para la soldadura por fricción inercial de probetas y la evaluación de la influencia de los parámetros tecnológicos del régimen de soldadura sobre la calidad y efectividad de las uniones logradas.

2. La determinación de las principales limitantes de diseño y construcción de la máquina experimental.
3. La recopilación del estado del arte sobre los métodos de soldadura de estado sólido con énfasis en la soldadura por fricción inercial.

El trabajo está estructurado en tres capítulos como se describe a continuación:

1. **Capítulo I** Generalidades sobre las soldaduras de estado sólido. Particularidades de la soldadura por fricción inercial.
2. **Capítulo II** Verificación de los parámetros constructivos y tecnológicos para la puesta a punto de la máquina experimental de soldadura por fricción inercial.
3. **Capítulo III** Evaluación de la resistencia mecánica y análisis metalográfico de las uniones en estado sólido obtenida con la máquina experimental de soldadura por fricción

CAPÍTULO I

**CAPITULO I. Generalidades sobre las soldaduras de estado sólido.
Particularidades de la soldadura por fricción inercial.**

1.1. Consideraciones generales de la soldadura de estado sólido

En la mayoría de los procesos de soldadura de estado sólido se crea una unión metalúrgica con muy poca o ninguna fusión de los metales base. Para unir metalúrgicamente dos metales similares o diferentes, debe establecerse un contacto íntimo entre ellos para que sus fuerzas atómicas cohesivas se atraigan una a la otra.

En la soldadura de estado sólido, la coalescencia de las superficies de la parte se obtiene:

- 1) mediante presión solamente
- 2) por calor y presión.

Para algunos procesos de estado sólido, el tiempo también es un factor determinante. En la mayor parte de casos, la combinación de calor y presión o el modo particular en el que se aplica la presión solamente, generan suficiente energía para producir un área de fusión localizada de las superficies empalmantes.

Los procesos de soldadura que no implican una fusión tienen varias ventajas sobre los procesos de soldadura por fusión, ya que al no ocurrir la fusión, no hay una zona afectada por el calor, por lo que el metal que rodea la unión conserva sus propiedades originales. Muchos de estos procesos producen uniones soldadas que incluyen toda la interfase de contacto entre las dos partes como en la mayoría de las operaciones de soldadura por fusión. Asimismo, estos procesos son aplicables para unir metales distintos, sin tomar en consideración las expansiones térmicas relativas, las conductividades y los problemas que surgen normalmente durante la fundición y solidificación de metales distintos.

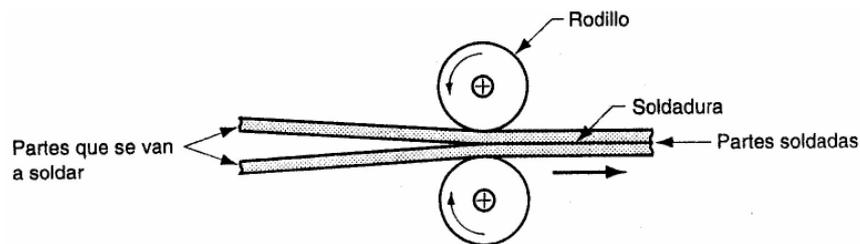
A continuación se describen las generalidades de los principales procesos pertenecientes al grupo de soldadura de estado sólido

Soldadura por forja: proceso en el cual los componentes que se van a unir se calientan a altas temperaturas de trabajo y después se forjan juntos por medio de un martillo u otro medio. Se requiere bastante habilidad del

operario que lo realiza para obtener una buena soldadura bajo las normas actuales.

Soldadura en frío: SF (en inglés *cold welding*. CW), es un proceso en estado sólido que se realiza aplicando alta presión entre superficies en contacto limpias a temperatura ambiente. Las superficies empalmantes deben estar excepcionalmente limpias para que funcione la (CW), y generalmente esta limpieza se hace mediante un desengrasado y pulido con cepillo de alambre inmediatamente antes de la unión. Asimismo, al menos uno de los metales que se van a soldar, y de preferencia ambos, deben de ser muy dúctiles y libres de endurecimiento por trabajo. Los metales como el aluminio suave y el cobre pueden soldarse en frío con facilidad. Las fuerzas de *compresión* aplicadas en el proceso producen el trabajo en frío de las partes *metálicas* y reducen el grosor hasta en un 50%, pero también provocan deformación plástica localizada en las superficies que hacen contacto, produciendo coalescencia. Para partes pequeñas, las fuerzas se aplican mediante herramientas sencillas operadas en forma manual. En trabajos más pesados se requieren prensas poderosas para ejercer la fuerza necesaria. En la CW no se aplica calor de fuentes externas, pero el proceso de deformación eleva de alguna forma la temperatura del trabajo.

Soldadura con rodillos: En una variación de la soldadura por forja o de la soldadura en frío, dependiendo de si se aplica o no el calentamiento externo de las partes de trabajo antes del proceso. La *soldadura con rodillos*, SR (en inglés *roll welding*, ROW), es un proceso en estado sólido en el cual se aplica una presión suficiente para producir coalescencia mediante rodillos, ya sea con o sin aplicación externa del calor. Las aplicaciones de la soldadura con rodillos incluyen el revestimiento con acero inoxidable para aleaciones medias o bajas con el objetivo de lograr mayor resistencia a la corrosión y la fabricación de tiras bimetálicas para medir la temperatura.



Soldadura explosiva: La soldadura *explosiva*, SE (en inglés *Explosion Welding, EW*), es un proceso de estado sólido en el cual se produce una rápida coalescencia de dos superficies metálicas mediante la energía de un explosivo detonado. Por lo general se utiliza para unir dos metales distintos, en particular para revestir un metal sobre una base metálica en áreas grandes. Las aplicaciones incluyen la producción de materias primas de láminas y placas resistentes a la corrosión destinadas a la fabricación de equipos de procesamiento en las industrias química y del petróleo. En este contexto se emplea el término revestimiento *por explosión*. En la EW no se usa un metal de relleno ni se aplica calor externo. Asimismo, durante el proceso no ocurre difusión (el tiempo es *muy* corto). La naturaleza de la unión es metalúrgica, en muchos casos combinada con un entrelazado mecánico producido por otra interfase ondulada o rizada entre los metales. Este tipo de interfase fortalece la unión, debido a que aumenta el área de contacto y tiende a entrelazar mecánicamente las dos superficies por cuya razón es muy utilizada.

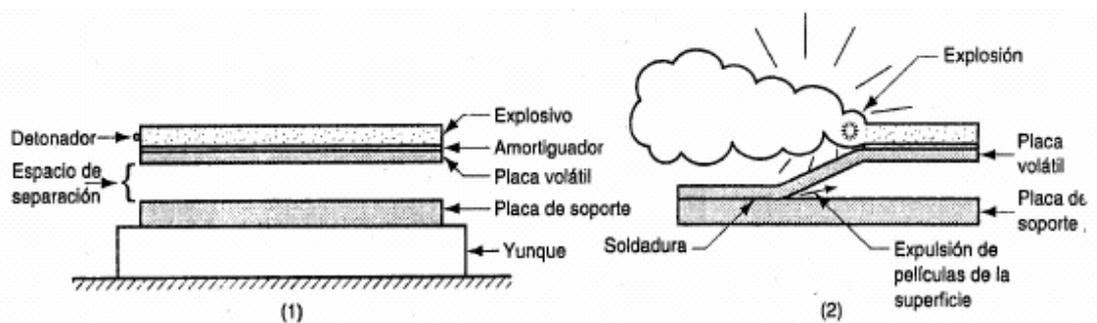


Figura 1.1 Soldadura explosiva (EXW)
 (1) disposición en la configuración paralela
 2) durante la detonación de la carga explosiva.

Soldadura por fricción: La soldadura por fricción es un proceso comercial muy difundido y es conveniente para los métodos de producción automatizados. El proceso fue desarrollado en la ex Unión Soviética, e introducido en Estados Unidos alrededor de 1960. La *soldadura por fricción*, SFR (en inglés *Friction Welding*, FRW), es un proceso en estado sólido en el cual se obtiene la coalescencia mediante una combinación de calor por fricción y presión. La fricción se induce mediante el frotamiento mecánico entre las dos superficies, generalmente *por* la rotación de una parte con respecto a la otra, la rotación de ambas partes a unir, la oscilación de una parte con respecto a la otra o el moviendo combinado de rotación de un elemento sobre dos partes a unir que se desplazan perpendicularmente a este con el objetivo de elevar la temperatura en la interfase de unión de los metales involucrados. Una vez lograda la temperatura de calentamiento, las partes se comprimen una hacia la otra con suficiente fuerza para formar una unión metalúrgica.

Casi todas las operaciones de FRW utilizan la rotación y la acción de una fuerza de compresión para lograr la fricción y con ella desarrollar el calor necesario para el proceso (Figura 1.2).

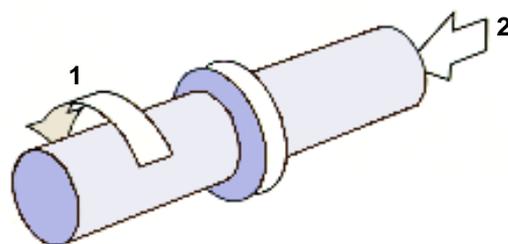


Figura 1.2 Soldadura por fricción (FRW)
(1) rotación de un elemento
2) aplicación de la fuerza de compresión para lograr la fricción.

Generalmente las máquinas utilizadas para la soldadura por fricción tienen el aspecto de un torno donde un mandril hace girar una parte a alta velocidad y un dispositivo aplica una fuerza axial entre la parte rotatoria y la fija.

Con sus ciclos breves, el proceso se presta para la producción masiva. Se aplica en la soldadura de diversos ejes y partes tubulares en las industrias

- El equipamiento tecnológico es muy sencillo y el proceso puede programarse de forma automática o semiautomática lo que permite lograr tasas de producción elevadas.
- Es un método ambientalmente limpio. No produce humos, gases, vapores residuales o calor excesivo hacia el medio circundante.
- El proceso de soldadura es factible en casi todos los tipos de acero, así como en distintos metales y aleaciones no ferrosas. Pueden ser soldados materiales de composición química diferente, incluso aquellos considerados como incompatibles, de baja soldabilidad o insoldables.
- El proceso de soldadura por fricción es entre 2 y 100 veces más rápido que otras técnicas de soldado.
- La resistencia de la unión soldada es igual o mayor que el material de base
- Introduce mejoras en el producto (permite una amplia combinación de materiales disímiles)
- Al ser un proceso de estado sólido, preserva la microestructura y las propiedades del material forjado.
- No se alcanza el punto de fusión del material, y se evitan así los defectos y problemas debidos a los tratamientos implicando fusión y solidificación.
- La soldadura tiene lugar sin la presencia de aire en la superficie a soldar por lo que es una soldadura completa libre de porosidad, con una Zona de Altas Temperaturas muy pequeña.
- No se necesita material de aporte ni tipo alguno de fundente para realizar la unión.
- Durante el proceso de fricción son destruidas y expulsadas de las zonas de soldadura las películas de óxidos y otras impurezas lo que garantiza una buena calidad de la unión soldada.
- Se realiza en piezas semiacabadas y genera productos prácticamente acabados (el mecanizado final es elemental)

- No requiere ninguna preparación previa que no sea la perpendicularidad de las superficies a soldar con el eje de las piezas y/o de la herramienta de soldar en el caso de la (SFW).
- La soldadura es posible en condiciones de campaña, sin necesidad de utilizar energía eléctrica, se puede utilizar un motor de combustión interna.
- La soldadura por fricción es lo suficientemente versátiles como para unir un amplio rango de formas, materiales y tamaños.
- Sus parámetros son precalculables para la mayoría de materiales y geometrías. El proceso puede, por lo tanto, calcularse matemáticamente a escala (por ejemplo, componentes pequeños pueden utilizarse para la obtención de partes grandes).
- Se distingue por una alta productividad, sobre todo durante la soldadura de las piezas de grandes diámetros o espesores por la pequeña cantidad de tiempo utilizado.
- La temperatura de la soldadura, como regla general, no sobre pasa la temperatura del comienzo del reblandecimiento de los metales y la de temperatura pico para el cambio de estado.
- con respecto a la industria aeroespacial, la soldadura por fricción permite evitar las uniones con remaches o pernos, que pueden ser fuentes de grietas, y también proporciona un ahorro de peso y por consiguiente de consumo de kerosén.

Entre las limitaciones principales se encuentran:

- La utilización de la soldadura por fricción rotacional está limitada por la forma de la sección transversal de los elementos a soldar. Como mínimo una de los dos debe ser un cuerpo en revolución cuyo eje debe coincidir con el eje de rotación y el otro tener una superficie plana paralela a la cara del elemento en rotación.
- Por lo general deben eliminarse las rebabas que se producen por la aplicación de la presión de forja

- El recalado reduce la longitud de las partes lo cual debe tomarse en consideración para el diseño y la fabricación de los productos excepto en la soldadura por fricción agitación de piezas planas.
- Es un proceso limitado para realizar uniones angulares o cónicas.
- Bajo las condiciones elegidas para la soldadura, al menos uno de los materiales debe deformarse plásticamente.

1.2. Particularidades de la soldadura de estado sólido por fricción

La soldadura por fricción, como se describe anteriormente, es un proceso de fase total de penetración sólida que tiene como principio de trabajo la conversión de la energía mecánica en térmica mediante la fricción de elementos externos sobre las piezas a unir o la fricción entre dichas piezas bajo la acción de una fuerza exterior de compresión. Este proceso es clasificado como una unión en estado sólido ya que la temperatura no alcanza a fundir el metal y además al analizar microscópicamente dicha zona no se observa dilución entre los materiales lo que se puede apreciar en la Figura 1.4.

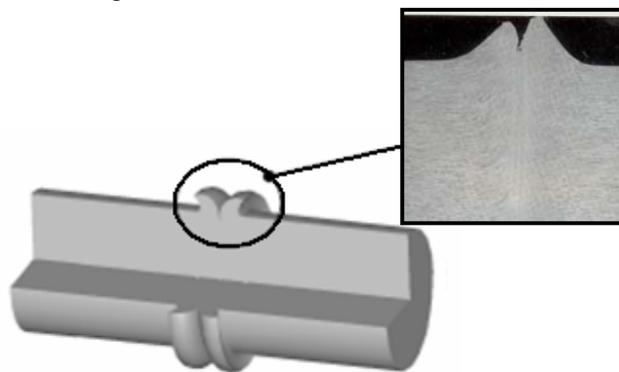


Figura 1.4 Estructura metalográfica de uniones soldadas a tope por fricción.

De forma general el proceso se desarrolla en tantas etapas como se muestra en la figura 1.5 y finaliza con el maquinado de la pieza para limpiar el reborde del material al ser expelido de la zona de forja.

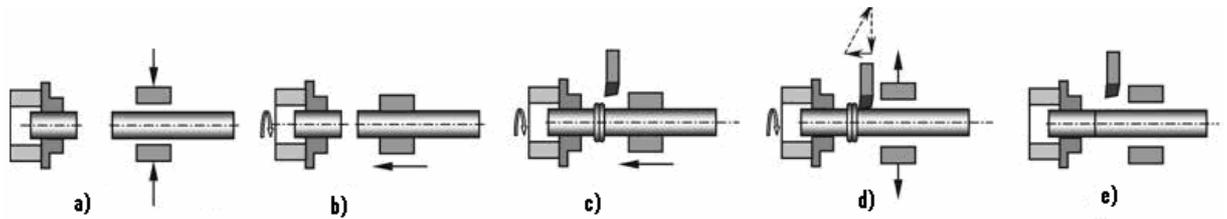


Figura 1.5 Etapas del proceso de soldadura de piezas a tope por fricción.

Simplificando, puede decirse que el proceso se desarrolla en dos etapas fundamentales:

1. Etapa de calentamiento (Figura 1.6) en la que se eleva la temperatura en la zona de interfase entre las piezas a unir, como resultado de la intensa fricción a que son sometidas por el movimiento relativo entre las superficies en contacto bajo la acción de una fuerza exterior que las oprime.

Esta etapa se mantiene hasta que el material alcanza un estado plastizado a una temperatura algo menor que la temperatura de fusión. La fuerza aplicada sobre las superficies a unir en esta etapa se le denomina Fuerza de Calentamiento.

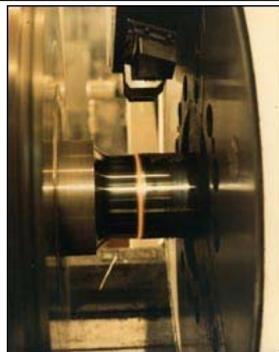
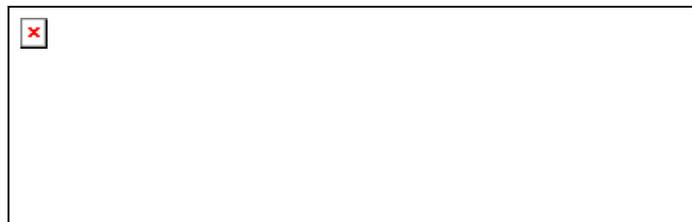


Figura 1.6 Etapa de Calentamiento

El final de la etapa de calentamiento en máquinas experimentales se determina por la coloración de la interfase mientras que en máquinas de producción ya está establecido el tiempo de duración de dicha etapa, en correspondencia con las características particulares de la unión que se desea lograr. Una vez terminada esta etapa se suspende el suministro de energía a la pieza en rotación.

2. En la Etapa de Forjado (Figura 1.7) se incrementa la fuerza axial de compresión hasta un valor denominado Fuerza de Forja que puede alcanzar magnitudes que superen incluso dos veces la Fuerza de Calentamiento.

Durante esta etapa todo el material en estado plástico es expulsado de la zona de interfase provocando una rebaba y se consolida la unión entre las piezas.

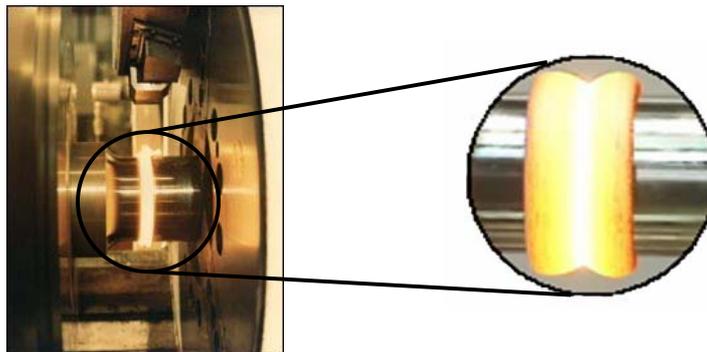


Figura 1.7 Etapa de Forjado

Estos movimientos se producen normalmente utilizando pequeñas distancias de recorrido del orden de 1 – 3 mm y a altas frecuencias (25 – 100 Hz) [22].

1.2.1. Clasificación de la soldadura por fricción

Los procesos de soldadura por fricción hasta hoy desarrollados se clasifican de acuerdo a:

- movimiento relativo de las piezas a unir,
- forma de suministro de la energía a la pieza en rotación
- objetivo principal del proceso

A partir del movimiento relativo de las piezas a unir se clasifican en:

- **Rotacional**, donde una pieza rota con respecto a la otra (Figura 1.8).

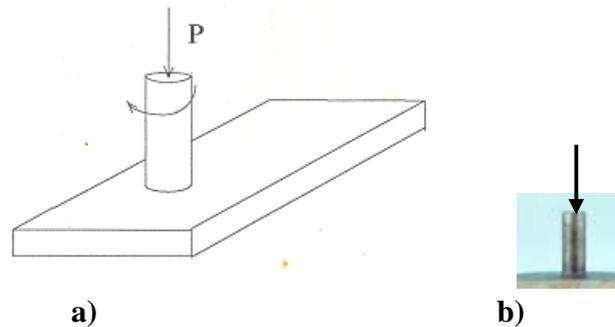


Figura. 1.8 Ejemplos de soldadura por fricción rotacional

a) Barras

b) Plancha y barra

- **Oscilación lineal**, donde una pieza oscila linealmente respecto a la otra. Este procedimiento es utilizado para unir piezas que no tienen sección circular.
- **Oscilación angular**, donde una pieza oscila angularmente con respecto a la otra (Figura 1.9). Su utilización fundamental es cuando la pieza que rota no admite una alta velocidad de rotación.

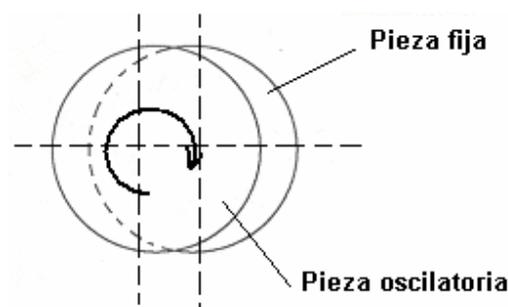


Figura 1.9 Soldadura por fricción de oscilación angular

- **Combinado**, donde las dos piezas se encuentran en movimiento, mientras una rota la otra se desplaza linealmente. Se utiliza fundamentalmente en la obtención de recubrimientos superficiales.

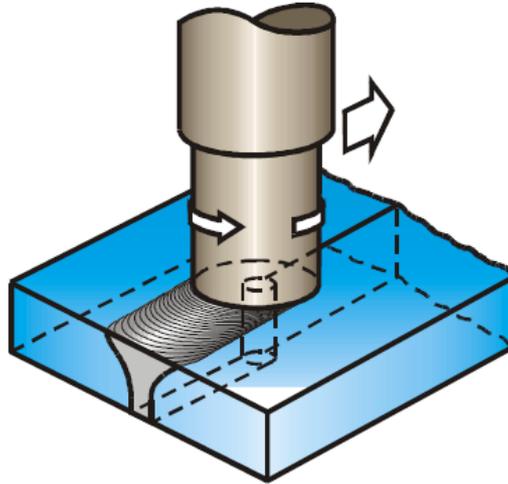


Figura 1.10 Soldadura por fricción – agitación o friction – stir welding (FSW)

En las figuras 1.10 y 1.11 se muestran ejemplos de soldadura por fricción. Este tipo de soldadura fue inventada, patentada y desarrollada para su propósito industrial por TWI (The Welding Institute), en Cambridge, Reino Unido^[26] y se conoce como fricción – agitación o friction – stir welding (FSW). En este caso un cilindro de sección plana y un pin perfilado, son suavemente aproximados a las áreas a unir que son enfrentadas de tope.

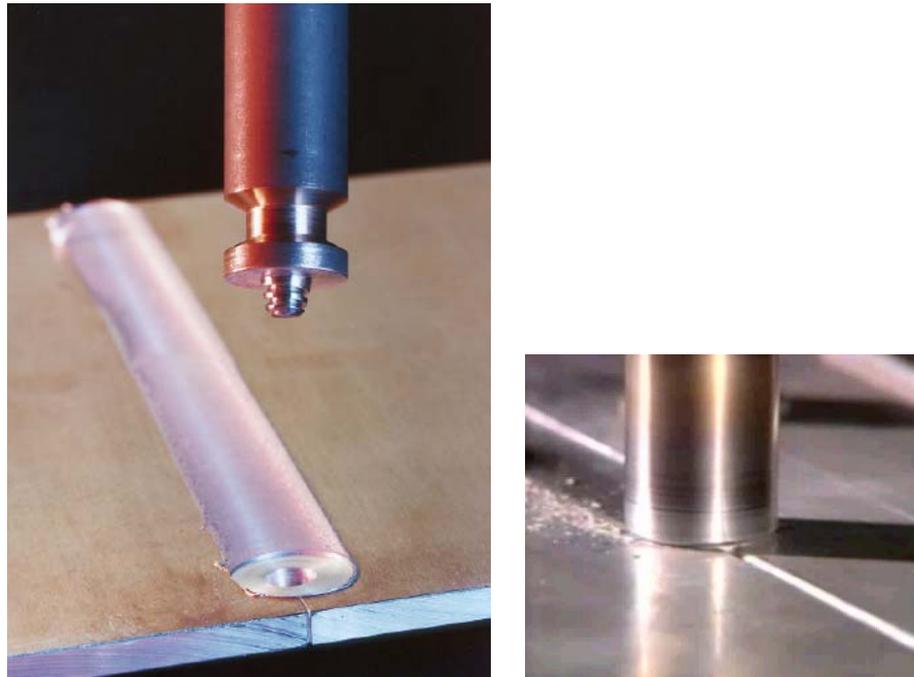


Figura. 1.11 Ejemplos de Soldadura por fricción – agitación o friction – stir welding (FSW)

El calor producido por la fricción entre el cilindro rotatorio de alta resistencia al desgaste y las piezas a soldar causan que los materiales se suavicen sin llegar al punto de fusión permitiendo al cilindro rotatorio seguir la línea de soldadura a lo largo de las piezas a unir. El proceso deja a su paso un cordón de fase sólida entre las dos piezas. Como ventajas el método presenta: baja distorsión, excelentes propiedades de tracción, plegado y fatiga, herramienta no consumible, y además no requiere de material de aporte.

De acuerdo a la forma de suministro de energía a la pieza en rotación se clasifican en:

Soldadura por fricción de conducción continua, cuando la energía para el calentamiento de la interfase es tomada directamente de un motor eléctrico que mueve la pieza en rotación durante toda la etapa de calentamiento. En la *soldadura por fricción de conducción continua* se dirige una parte a una velocidad de rotación constante y se impone un contacto con la parte estacionaria a cierto nivel de fuerza, para que se genere calor por fricción en la interfase. Cuando se

alcanza la temperatura de trabajo correcta, se frena la rotación en forma abrupta y al mismo tiempo se juntan las partes hasta el valor de las presiones de forja.

Soldadura por fricción inercial, La energía para la soldadura es suministrada mediante un volante que ha sido previamente energizado por un motor eléctrico y acelerado a una velocidad predeterminada. Una vez que el volante ha alcanzado la velocidad necesaria es desconectado el motor mediante un embrague y entonces se oprime la pieza fija contra la que rota con una fuerza que generalmente es constante. Toda la energía acumulada en el volante se disipa en forma de calor en la zona de la unión producto de la fricción entre las superficies que actúan como freno para producir la coalescencia en las superficies a soldar. El ciclo total para estas operaciones dura alrededor de 20 segundos.

Por otra parte, teniendo en cuenta el propósito principal del proceso la soldadura por fricción se clasifica en:

Soldadura por fricción para unión permanente.

Soldadura por fricción para la obtención de depósitos superficiales.

1.2.2 Soldadura por fricción de conducción continúa

Como ya se conoce en este proceso la energía para el calentamiento de la interfase se toma de un motor eléctrico, que acciona la pieza en rotación durante toda la etapa de calentamiento.

La forma en que ocurre el proceso se explica en la Figura 1.12.

El proceso se inicia en el punto **A** del eje del tiempo. Hasta el punto **B** la velocidad de la pieza móvil se incrementa hasta la velocidad de soldadura, en el punto **B** comienza la etapa de calentamiento, se comienza a incrementar la fuerza axial hasta que alcance el valor de la fuerza de calentamiento, la velocidad permanece constante a cuenta del incremento de la potencia que el motor entrega a medida que se incrementa la fuerza axial. En el punto **C** de la etapa de calentamiento ya la interfase se encuentra en estado plástico y las piezas comienzan a acortarse.

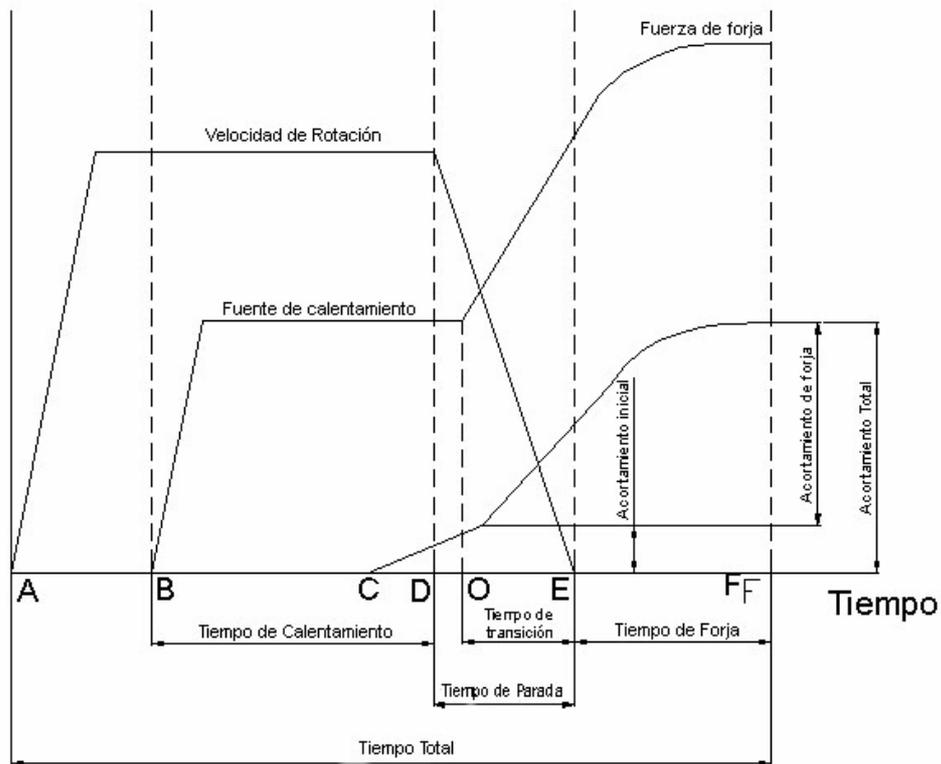


Figura 1.12 Variación de los diferentes parámetros de la soldadura por fricción continua con respecto al tiempo de duración total del proceso

En el punto **D** comienza la etapa de transición, se desconecta el motor y se aplica el mecanismo de freno, la velocidad desciende bruscamente a la vez que la fuerza axial se incrementa hasta el valor de forja, el acortamiento de las piezas se incrementa igualmente.

La etapa de forja comienza en el punto **E** cuando la pieza móvil se detiene y la fuerza axial alcanza el valor de forja, el acortamiento de las piezas se incrementa expulsando el material en estado plástico de la zona de interfase. Una vez que termina el acortamiento se produce la unión soldada.

De la Figura 1.12 puede concluirse que los parámetros principales del proceso de soldadura por fricción continua son:

- Velocidad de rotación o periférica.
- Precisión de calentamiento.
- Tiempo de calentamiento.

- Tiempo de transición.
- Fuerza de forja
- Tiempo de forja.
- Acortamiento total.

La carta tecnológica para el desarrollo del proceso de soldadura por fricción establece los valores de cada uno de estos parámetros para garantizar un resultado satisfactorio teniendo en cuenta la naturaleza de los materiales a unir y el diámetro de las piezas. En la Tabla 1.1 se pueden apreciar los valores recomendados de los parámetros de soldadura de diferentes aceros.

Tabla 1.1 Parámetros de soldadura por fricción continua para diferentes materiales

Material	D (mm)	N (rpm)	P _{calentamiento} (MPa)	P _{forja} (MPa)	T (seg)
Acero al carbono, (a)	12.7	3000	35	32	5
	25.4	1500	52	52	15
Acero inoxidable	12.7	3000	110	110	7
	25.4	8000	140	140	35
Acero inoxidable - Acero aleado	19	3000	52	104	10
Acero para herramientas,(c)	19	4000	104	208	10
Cobre	25.4	6000	34	65	18
Aluminio	19	2800	28	45	6
Acero aleado,(d)	>9	2800	172	276	10
Acero aleado-Acero al carbono	44.5	3000	38	110	26

D – Diámetros

N – Velocidad

P_{calentamiento} – Presión de calentamiento

P_{for} – Presión de forja

a – AISI 1010, 1020, 1030, 1045, etc.

b – series 300 a 400

c – T1 o equivalentes

d – AISI 3140,21%Cr, 4%Ni, 9%Mn

1.2.3 Soldadura por fricción inercial

En la Figura 1.13 se muestra el principio de funcionamiento de una máquina para uniones soldadas por fricción inercial, en las que la energía para el calentamiento de la interfase se toma de un volante que ha sido previamente energizado por un motor eléctrico

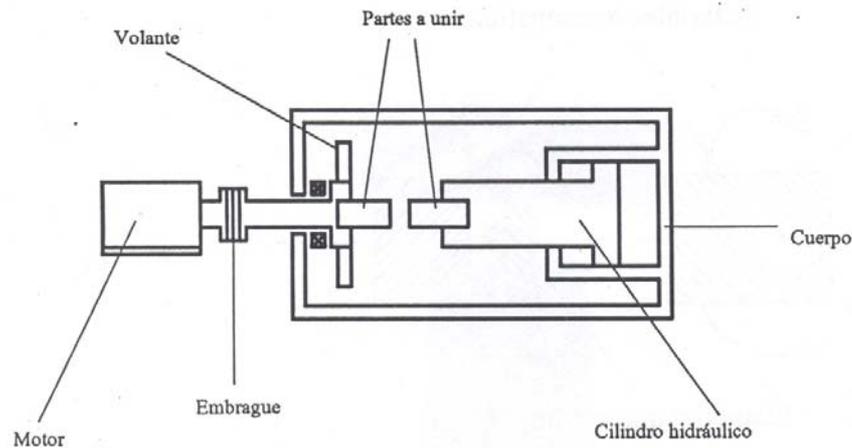


Figura 1.13 Esquema de una máquina para uniones soldadas por fricción inercial

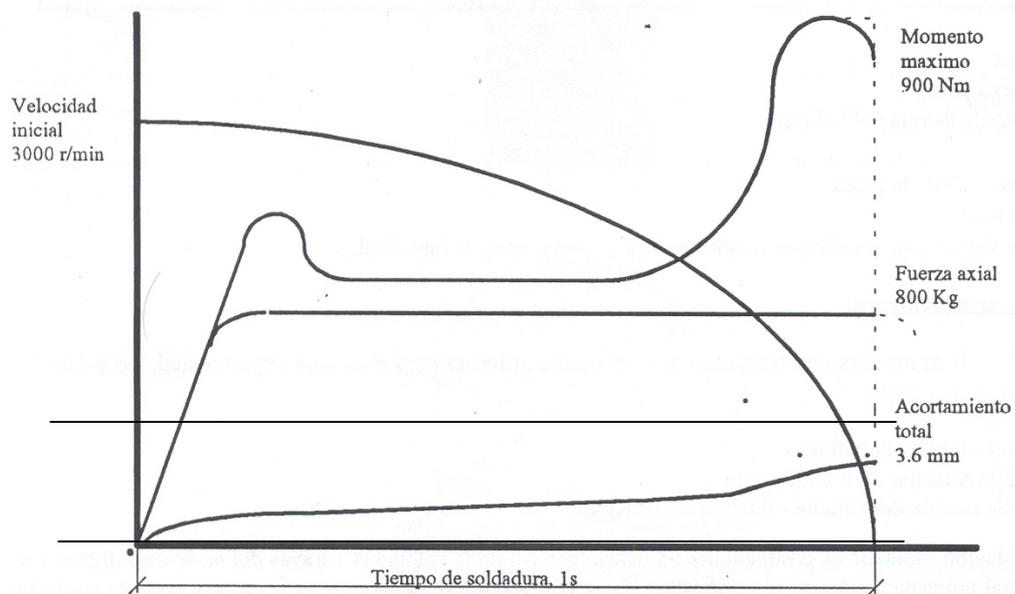


Figura. 1.14 Comportamiento de los parámetros de soldadura para barras de acero de mediano carbono de 25.4 mm de diámetro.

El proceso comienza cuando el volante alcanza la velocidad necesaria para acumular el nivel de energía requerida para el calentamiento de la interfase, en

ese momento se desconecta el motor quedando el volante y la pieza móvil en rotación libre, entonces se aplica la fuerza de calentamiento y posteriormente la de forja entre las superficies a unir que actúan como freno en el que se disipa en un corto tiempo la energía acumulada en el volante alcanzando la temperatura necesaria para lograr la unión que queda completamente consolidada una vez se detenga el volante con la pieza móvil.

Los parámetros fundamentales de la unión son:

- Velocidad inicial de rotación o periférica.
- Momento de inercia del volante.
- Presión axial o Fuerza de Forja bajo la que se desarrolla el proceso.

En la Tabla 1.2 se muestran los valores recomendados de estos parámetros para diferentes combinaciones de materiales.

Tabla 1.2 Valores recomendados para unir barras de 25.4 mm de diámetro y diferentes combinaciones de materiales

Material	Parámetros de Soldadura			Condiciones resultantes		
	n, rpm	F _{axial} kN	Iv, Kg-cm ²	E, J	Ds, mm	Tt, s
Aceros de bajo carbono	4600	55	6224	35544	2.54	2
Aceros de medio carbono	4600	63	7246	37968	2.54	2
Aceras de bajo carbono aleado	4600	68	7710	40680	2.55	2
Aceros súper aleados	1500	230	120770	67800	3.81	3
Aceros inoxidable ferríticos	3000	80	18580	67800	2.54	2.5
Aceros inoxidable austeníticos	3500	80	13006	13560	2.54	2.5
Cobre	8000	22	926	13560	3.81	0.5
Latón	7000	22	1115	21696	3.81	0.7
Titanio	6000	36	1580	20340	2.54	2
Aluminio(AA1100)	5700	27	2508	23052	3.81	1
Aluminio(AA6061)	5700	31	2787	20340	3.81	1
Cobre-Acero aleado	8000	22	1300	54240	3.81	1
Ac .rápido-Ac.al carbono	3000	180	25083	67800	2.54	3
Ac.superaleado-Ac al carbono	1500	180	120770	40680	3.81	2.5
Ac.inoxidable-Ac al carbono	3000	80	18580	40680	2.54	2.5
Aluminio(6081)-Ac.inoxidable	5500	22-68*	3623	27120	5.08	3
Cobre - Aluminio	5500	22-68*	3623	27120	5.8	3

La soldadura por fricción inercial tiene como ventajas sobre la continua que tiene menores exigencias en cuanto al tamaño del motor. Con la aplicación de modelos matemáticos elaborados al efecto^[15] se ha demostrado que para soldar un tubo de

acero medio de 68.5 cm de diámetro exterior y 65 cm de diámetro interior se requiere una energía de 12231 kJ. Si la unión se realiza por el método de soldadura inercial sería necesario un motor de 11,25 kW y el tiempo de soldadura no sobrepasaría los 4 seg. Sin embargo para realizar la unión por el método de soldadura por fricción continua se requeriría un motor de 67.5 kW que estaría trabajando todo el tiempo de calentamiento.

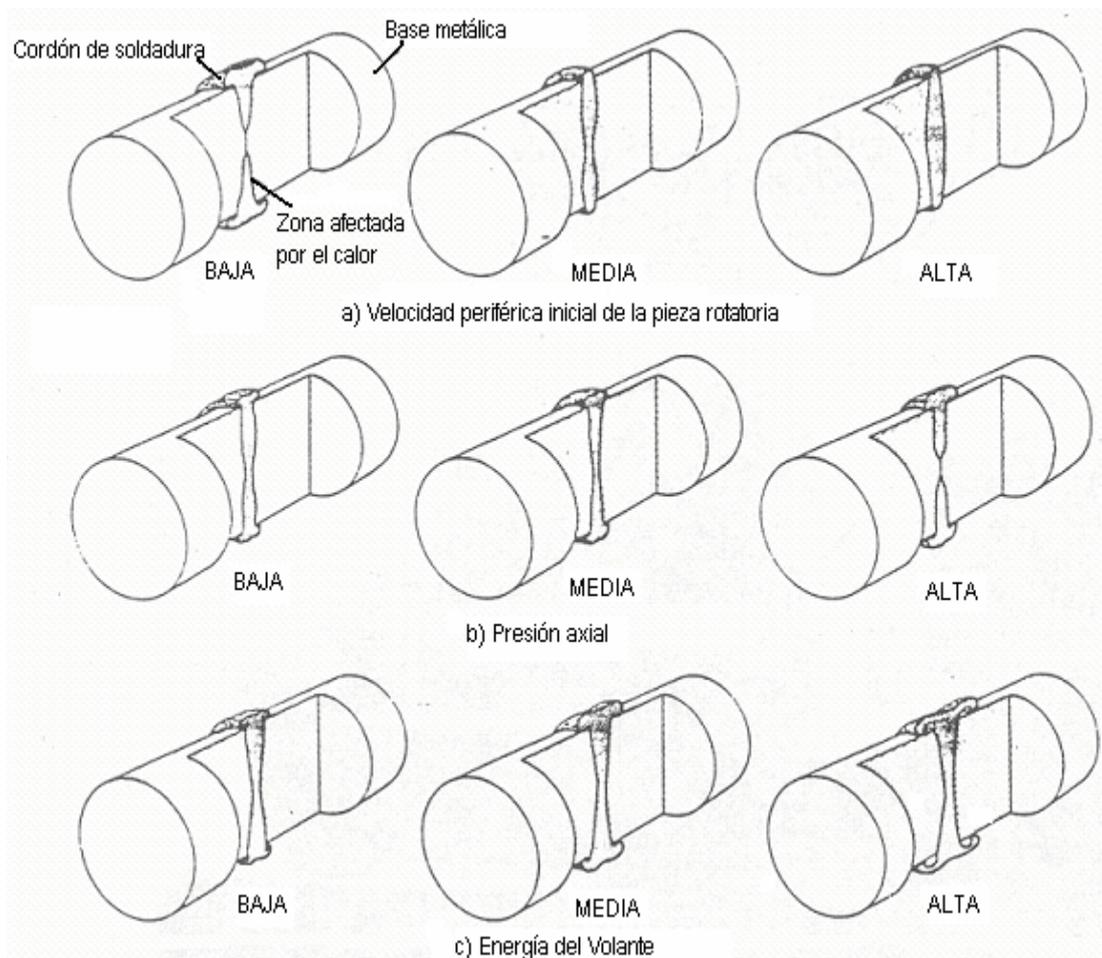


Figura. 1.15 Relación entre los parámetros de soldadura y la apariencia de la zona de interfase en la unión de muestras de acero SAE1045 de diámetro 25 mm.

La fricción entre las caras de las piezas a soldar genera un calor por fricción en el plano de contacto, y por consiguiente se reblandece un cierto volumen de material. Durante el proceso, una parte del material viscoelástico que se formó se desplaza

hasta la periferia de la interfaz de contacto, lo que suele llamarse “flash” de material expulsado como se muestra en la figura 1.16.

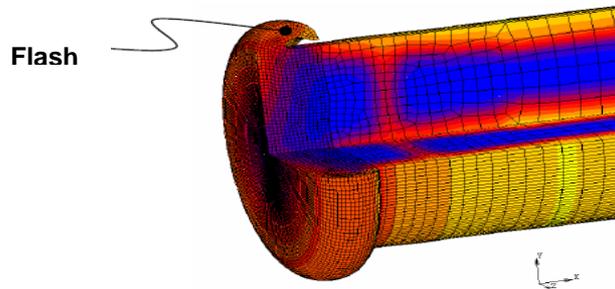


Figura 1.16 Esquema térmico de la soldadura por fricción.

1.3. Características fundamentales de las máquinas para la soldadura por fricción continua.

1.3.1- Clasificación de las máquinas para la soldadura por fricción continua.

Estas máquinas, se clasifican según distintos aspectos:

- Nivel de automatización
- Designación
- Posición del husillo
- Movilidad del husillo

Según el nivel de automatización pueden ser:

- **Automáticas:** Tanto el proceso de soldadura como la carga y descarga de la máquina se realiza de forma automática.
- **Semiautomática:** Solo se realiza de forma automática el proceso de soldadura.

Las máquinas modernas están dotadas de computadoras que controlan todo el proceso y archivan el comportamiento de los parámetros de soldadura en cada unión realizada, lo cual tiene gran importancia para el control de calidad.

Según su designación estas máquinas pueden ser:

- **Designación general (Universales):** tienen una gran universalidad en el sistema de sujeción de las piezas, pueden variar la fuerza axial en un

amplio rango, lo que le permite soldar piezas de distintas formas y diámetros. Generalmente son semiautomáticas.

- **Especializadas:** Están destinadas a soldar piezas de una sola denominación o grupos de piezas parecidas en su forma y dimensiones. Pueden encontrarse tanto automáticas como semiautomáticas.

Según la posición del husillo pueden ser:

- Husillo horizontal
- Husillo vertical

Según la movilidad del husillo con respecto a la bancada:

- **Husillo inmóvil:** Es la configuración más común, ya que lo más razonable es que el movimiento a lo largo de la bancada los haga la pieza que no rota.
- **Husillo móvil:** Esta configuración encuentra aplicación en las máquinas de doble vástago utilizadas para la soldadura de tres piezas al mismo tiempo. Durante el proceso la pieza que no rota se coloca en el agarre central que es fijo y las que rotan en los husillos siendo oprimidas contra la que no rota.

En la figura 1.17 muestran esquemas frecuentes de máquinas de soldadura por fricción producidas por la industria manufacturera y la clasificación sugerida por los proveedores de este tipo de maquinaria industrial.

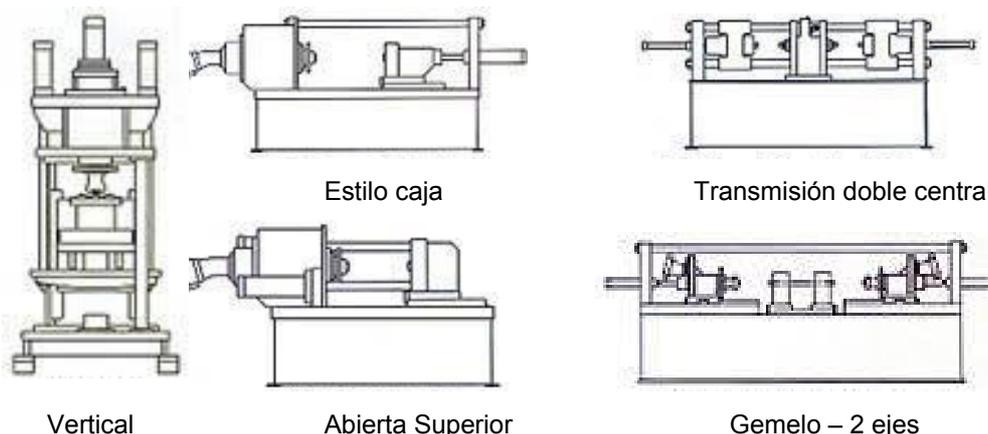


Figura 1.17 esquemas frecuentes de máquinas de soldadura por fricción producidas por la industria manufacturera

1.3.2- Principales partes y sistemas de las máquinas para la soldadura por fricción continua.

Las partes principales más comunes de las máquinas convencionales para la soldadura por fricción se muestran en la Figura 1.18.

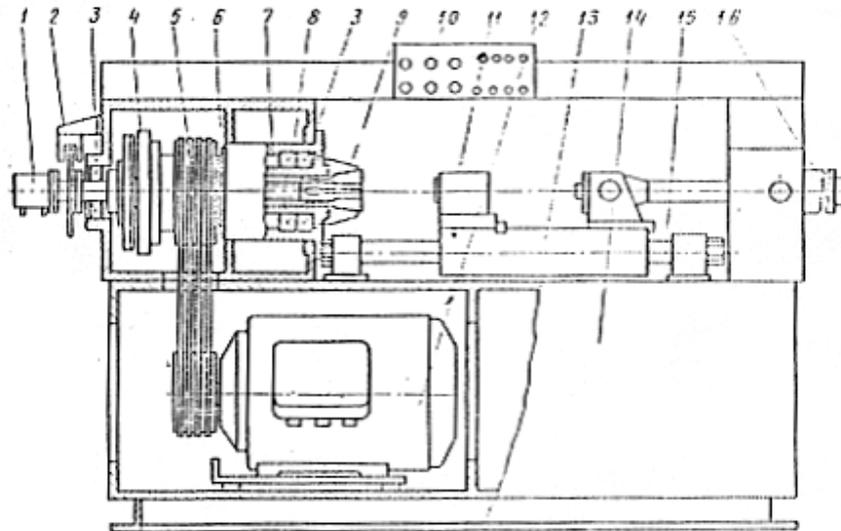


Figura. 1.18 Máquina convencional para la soldadura por fricción. (Partes y sistemas).

1. Cilindro de mando de la mordaza de sujeción: Es el encargado de dar el apriete inicial y aflojar las mordazas que sujetan la piezas rotatoria. Pueden ser neumático o hidráulico.
2. Sistema de freno: Es el encargado de detener la pieza rotatoria al finalizar la etapa de calentamiento y comenzar la etapa de forja.
3. Cojinetes del husillo: Deben ser capaces de soportar grandes cargas axiales ya que asimilan toda la carga que oprime las piezas a soldar.
4. Embrague: Es el encargado de desacoplar el motor del husillo, ante de aplicar el freno.
5. Transmisión por correas: Es la encargada de llevar el movimiento del motor principal al husillo es muy frecuente su utilización en estas máquinas por su sencillez y buena capacidad de trabajo.
6. Cabeza fijo: Contiene el husillo generalmente no tiene movimiento axial con respecto a la bancada.
7. Órgano de tracción de la mordaza del husillo: Es el encargado de conectar el cilindro de accionamiento con las muelas del plato.
8. Husillo
9. Mordazas de sujeción de la pieza rotatoria
10. Panel de mando
11. Mordazas de sujeción de la pieza fija
12. Motor eléctrico: Generalmente son motores asíncronos trifásico dado su costo relativamente bajo y su velocidad de giro constante, así como su capacidad de admitir las cargas variables que se derivan del proceso de soldadura.
13. Cabeza móvil: Contiene las mordazas de sujeción de la pieza fija tiene movimiento axial con respecto a la bancada
14. Bancada: Por lo general es de acero soldado, las bancadas de hierro fundido encuentran escasa aplicación ya que estas tienen que soportar grandes momentos flectores.
15. Guías del cabezal móvil
16. Cilindro principal: Puede ser hidráulico o neumático y tiene por misión aplicar la fuerza de forja y de calentamiento durante el proceso

1.3.3- Particularidades de los apoyos del cabezal delantero en las máquinas convencionales para la soldadura por fricción.

El cabezal delantero o cabezal fijo de las máquinas de soldadura por fricción tiene por misión permitir el giro de la pieza rotatoria a la vez que asimila las fuerzas axiales correspondientes a las etapas de calentamiento (de forma dinámica) y de forja (de forma estática).

En la figura 1.19 se puede apreciar la configuración típica del cabezal fijo de una máquina convencional.

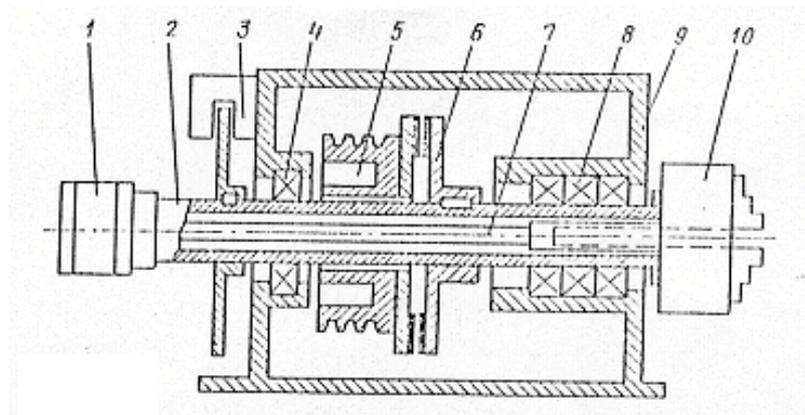


Figura. 1.19 Configuración típica del cabezal fijo de una máquina convencional.

1. Cilindro de mando del agarre
2. Husillo
3. Freno
4. Cojinete trasero
5. Polea
6. Embrague
7. Vástago del sistema de agarre
8. Cojinetes delanteros
9. Cuerpo
10. Plato de agarre

Los cojinetes del cabezal delantero trabajan en condiciones muy difíciles, durante la etapa de calentamiento rotan a velocidades relativamente altas estando sometidos a cargas radiales producto de la transmisión y axiales producto de la fuerza de calentamiento que actúan como carga dinámica. Durante la etapa de forja están sometidos a la carga axial producida por la fuerza de forja, que puede ser hasta el doble de la de calentamiento y actúa como carga estática.

1.3.3.1 Esquemas típicos utilizados en los apoyos del husillo principal

Dadas las condiciones de carga a la que trabajan los cojinetes del husillo generalmente su disposición responde a alguna de las configuraciones típicas que se muestran en las Figuras 1.20, 1.21 y 1.22.

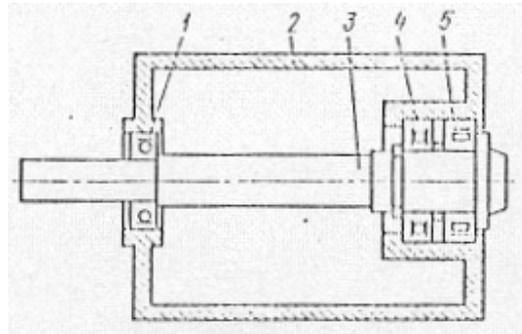


Figura. 1.20 Cabezal delantero con dos cojinetes radiales y uno axial

1. Cojinete radial trasero: Generalmente se utiliza un cojinete de bolas radiales aunque puede ser también un cojinete de deslizamiento.
2. Cuerpo
3. Husillo
4. Cojinete axial: Generalmente es de bolas, pero puede ser también de fabricación especial con dos hileras de rodillos o de bolas esférico
5. Cojinete radial delantero: Generalmente es de rodillos cilíndricos cortos o de dos filas de bolas

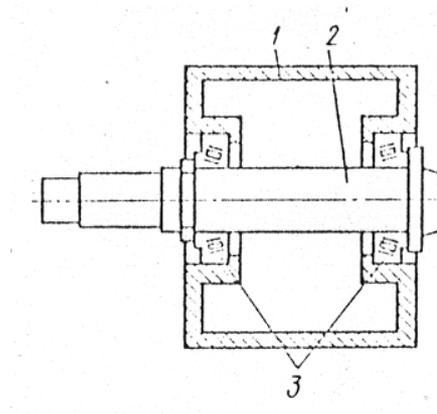


Figura.1.21- Cabezal delantero con dos cojinetes de radiales- axiales de rodillos cónicos.

1. Cuerpo
2. Husillo
3. Cojinetes de rodillos cónicos

Esta configuración se recomienda fundamentalmente para máquinas de husillos cortos.

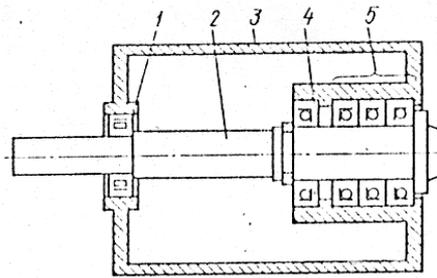


Figura. 1.22 Cabezal delantero con un conjunto de cojinetes axiales radiales y uno radial

1. Cojinete radial: Generalmente radiales de bolas, pero puede ser de rodillos cilíndricos cortos
2. Husillo
3. Cuerpo
4. Cojinete axial radial
5. Juego de cojinetes axiales- radiales

1.4- Particularidades de la bancada de las máquinas convencionales para la soldadura por fricción

Una de las principales exigencias que se plantea para el buen desarrollo del proceso de soldadura por fricción es la coaxialidad entre los ejes de las piezas a unir, por lo que la bancada de estas máquinas debe tener una elevada rigidez que garantiza que la coaxialidad se mantenga dentro de los límites aceptables. Además la bancada debe tener una elevada resistencia mecánica pues las fuerzas que intervienen en el proceso y los momentos originados por estas alcanzan valores elevados.

De acuerdo a sus características constructivas y a la forma en que soportan la carga las bancadas de estas máquinas se dividen en dos grupos.

- Máquinas de bancada cargada
- Máquinas de bancada descargada

En el primer tipo la bancada asimila completamente la acción de las fuerzas que intervienen en el proceso y de los momentos que estas originan.

Este tipo de bancada solo se utiliza en las máquinas de hasta 100 kN de fuerzas axial en las cuales resulta posible diseñar la bancada para que no sufra deformaciones inadmisibles.

Las bancadas descargadas se utilizan en máquinas de más de 100 kN de fuerza axial, en estas se realizan determinados arreglos que permiten liberar completa o parcialmente a la bancada de la acción de las fuerzas axiales.

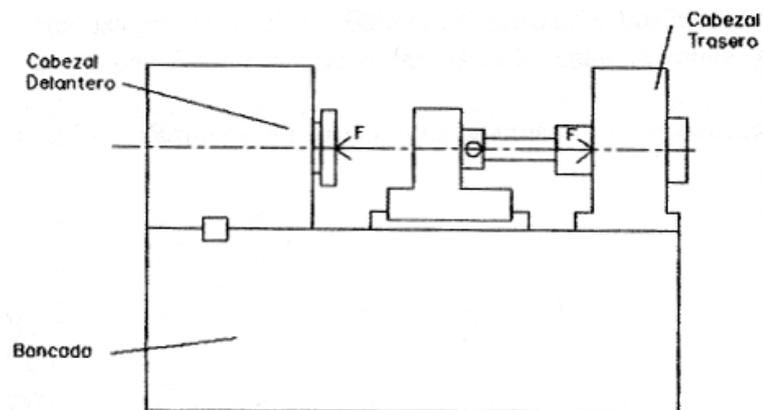


Figura 1.23 Esquema constructivo de una máquina de bancada cargada

En la Figura 1.24 se muestra una bancada en forma de cuadro similar a la mostrada en la 1.23, pero que se le ha agregado una barra rigidizadora en la parte superior, la cual descarga parcialmente la bancada de la acción de la fuerza axial y prácticamente elimina los momentos flectores que son los que provocan las mayores deformaciones.

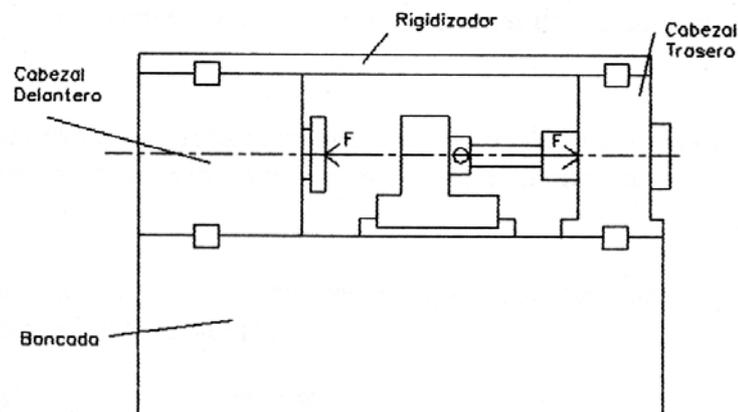


Figura. 1.24- Esquema constructivo de una máquina con bancada rigidizada

En la Figura 1.25 se muestra el esquema constructivo de una bancada que ha sido liberada completamente de la acción de la fuerza axial mediante la colocación de dos rigidizadores laterales que asimilan la acción de esa carga. La eliminación de los momentos flectores se logra colocando el eje de los rigidizadores en el mismo

eje que las piezas a soldar. Este plano puede ser horizontal como en la figura, o inclinado para liberar el espacio lateral de la máquina donde se coloca el operario.

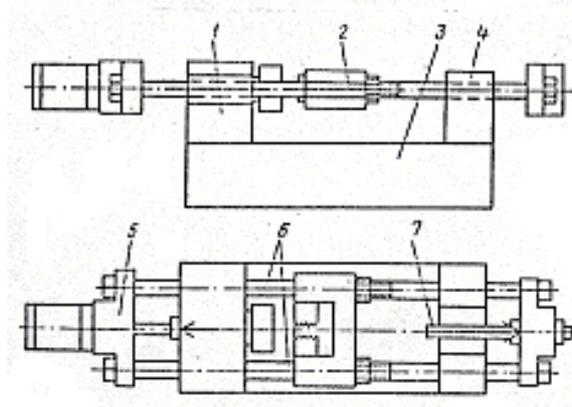


Figura. 1.25 Esquema constructivo de una máquina con bancada descargada

1. Cabezal delantero
2. Cabezal trasero
3. Bancada
4. Guías
5. Travesaño
6. Refuerzos laterales
7. Soporte trasero de la carga

En las tablas del Anexo I se muestra las características fundamentales de las máquinas construidas en Japón, Inglaterra y Alemania.

1.5 – Particularidades de las Maquinas para la soldadura de inercia por fricción

Las maquinas para la soldadura de inercia por fricción, según la composición de sus principales mandos en poco se van a diferenciar de las maquinas para la soldadura común por fricción. Sin embargo la existencia de un acumulador mecánico de energía, el volante, introdujo en el esquema cinético de las maquinas algunas particularidades específicas.

Estas máquinas poseen cualidades indudables: son simples, según su construcción y seguras en el trabajo. Además de todo esto, la sujeción de los volantes en el plato de agarre da la posibilidad de su rápida sustitución, con el objetivo de la obtención del momento exigido de inercia, lo que facilita grandemente su servicio y el ajuste de la maquina, así como amplia el diapasón de los diámetros y la nomenclatura de las piezas a soldar.

La tarea del mandril autocentrante en las máquinas de inercia, como regla general se aseguran con platos autocentrantes.

En la actualidad, en las máquinas de inercia de alta presión para la percepción del esfuerzo axial se utilizan los cojinetes hidrostáticos de apoyo. Tal tipo de cojinetes permite trabajar en velocidades angulares elevadas y asimilar esfuerzos axiales considerables. Sin embargo estos son muy complejos en su fabricación ya que exigen una alta exactitud de elaboración. Esto conlleva al aumento del costo tanto para los cojinetes, como para la construcción de misma máquina de soldar en general.

Además de todo esto el trabajo a altas velocidades angulares conlleva a un rápido desgaste de las superficies de las empaquetaduras, al aumento del gasto de aceite y en resumen a la disminución del plazo de servicio del cojinete.

Para la transmisión de giro del volante y del excéntrico de las máquinas de inercia, se utilizan tanto los motores eléctricos como los hidráulicos, los cuales son colocados o directamente sobre el eje de la máquina, o los unen con esta indirectamente por medio de una transmisión. Para las máquinas especializadas, calculadas para la soldadura de una pieza, por lo regular se elige comúnmente, un motor de una sola velocidad y para las universales un motor con transmisión de velocidades o entre el motor y el husillo de la máquina, se coloca una caja de varias escalones de transmisión.

La potencia del motor, depende del tiempo permisible de la puesta en marcha del volante y de la continuidad relativa del arranque. Si se utiliza un motor de corriente constante que trabaja durante la puesta en marcha, en el régimen del movimiento constante, entonces $Mp = 2W_{\max} / w_{\max}^2$ y la potencia del motor

$$N = Mp \cdot w_{\max} \sqrt{t_p / T}, \text{ donde:}$$

Mp – Es el momento del motor durante la puesta en marcha.

W_{\max} – Es la energía acumulada en el volante (contando la pérdida).

w_{\max} – la velocidad máxima angular

t_p – es el tiempo de la puesta en marcha.

T – Periodo de la puesta en marcha.

Aunque durante la soldadura el motor se desconecta y se tiene la posibilidad de disminución su potencia, sin embargo la práctica nos muestra, que en las máquinas de inercia, la potencia real del motor seleccionado debe ser no menos del doble de la demandada atendiendo a las presiones y fuerzas que se desarrollan en el sistema.

Como es sabido, en la actualidad las maquinas de mediana y gran potencia utilizan sistemas de fuerza hidráulicos o neumáticos. Los sistemas neumáticos en máquinas de soldadura por fricción no han tenido gran auge debido fundamentalmente a la limitación de las regulaciones del esfuerzo axial.

En la antigua Unión Soviética fueron elaborados sistemas de potencia que utilizaban un electroimán de corriente continua. La superioridad de este esquema está centrada en la en la simplificación de la construcción por cuenta de que se excluye el mando hidráulico que ocupa un gran volumen y peso y se logra un prototipo de máquina mucho más compacto.

1.6 – Determinación de la masa racional de las máquinas para la soldadura por fricción

Para evaluar la racionalidad del proyecto de una máquina de este tipo uno de los parámetros más importantes es el peso de la misma

En el trabajo [4] se propone la siguiente dependencia para determinar la masa racional de las máquinas.

$$M = (D - 8)K + 2000 , \text{ Kg}$$

Donde

D- Diámetro máximo que se puede soldar, mm.

K- Coeficiente de proporcionalidad (13.3 a 25)

El valor de K= 13.3 debe interpretarse como el valor límite inferior por debajo del cual la máquina estaría injustificadamente aligerada. Los valores mínimos de K deben tomarse cuando se utilicen soluciones que incrementen la rigidez de las máquinas.

1.7 Generalidades de la aplicación de la soldadura por fricción en la manufactura y recuperación de piezas.

Como se ha descrito anteriormente las ventajas de la soldadura por fricción ha posibilitado una gran difusión de la misma en la práctica industrial. El caso más simple y generalizado es su utilización para unir a tope partes cilíndricas de sección maciza o tubular. También es aplicable a la recuperación de piezas que han sufrido roturas, deterioros, etc.

La soldadura por fricción puede ser utilizada con gran éxito en la restauración de las herramientas de corte especialmente cuando se requiere soldar la parte cortante de la herramienta con un vástago cilíndrico o cónico como es el caso de una broca.

De gran interés resulta el empleo de la soldadura por fricción en la fabricación de los árboles escalonados de las máquinas hidráulicas, normalmente sometidas a esfuerzos no uniformes en todos sus escalones. Mediante la utilización de este método de soldadura resulta posible fabricar los escalones de estas piezas con aceros de diferente composición química. Ello garantiza la resistencia requerida en cada escalón lo que permite disminuir el costo de fabricación de tales piezas.

En la actualidad se han demostrado la posibilidad de soldar piezas no solamente mediante la rotación de las partes a unir, sino produciendo la fabricación por medio de un movimiento de vaivén o agitación, cuestión que amplía considerablemente la nomenclatura de piezas que pueden ser unidas por este método.

En la Tabla 1.3 se presentan ejemplos de aplicación de la soldadura por fricción y el efecto técnico – económico que produce su aplicación en comparación con los métodos de soldadura tradicionales empleados en la manufactura de éstos elementos de la maquinaria industrial.

Tabla 1.3 Ejemplos de aplicación de la soldadura por fricción y efecto en la sustitución de los métodos convencionales de manufactura por soldadura.

PIEZAS	Método convencional de fabricación	Efecto técnico – económico con la introducción de la SF
Eje de la dirección de un automóvil ligero (cardán)	Soldadura por arco con electrodo no fundible	Disminución de materiales gastados, disminución de la fuerza de trabajo y evaluación de la calidad
Eje cardán de un automóvil pesado	Soldadura por arco eléctrico manual.	Disminución del valor de las operaciones de soldadura
Semieje del puente trasero de un camión de carga	Soldadura a tope por fusión	Disminución del gasto en la reparación de un 28%
Soporte de la columna de un automóvil	Soldadura manual por arco	Disminución del costo de la unión
Rodillo de la estera de un tractor	Soldadura manual por arco	Disminución del precio del costo de la pieza
Barra de dirección de un tractor (Eje)	Soldadura a tope por fusión	Disminución del costo de fabricación
Palanca del mando hidráulico de un tractor	Soldadura manual por arco	Disminución del costo de fabricación de la unión
Cilindro del sistema hidráulico de una máquina agrícola	Soldadura manual por arco	Disminución del costo de fabricación de la unión
Válvula del motor de combustión interna	Soldadura a tope por fusión	Ahorro de los materiales en un 3.6%. Disminución del volumen de defectos en diez veces. Disminución del gasto de electricidad
Rotor de la turbina extracta de aire del motor de petróleo	Soldadura manual por arco	Disminución de 8 a 10 de la productividad del trabajo. Reducción del gasto de materiales de soldadura. Aumento de la calidad de la unión. Disminución del costo de la fabricación de la pieza
Tirante de un contenedor	Soldadura a tope por fusión	Disminución del costo de fabricación de la unión
Barra de perforación con un diámetro de 23/8 de pulgada	Soldadura manual por arco	Disminución del costo de fabricación en un 25%. Aumento de la seguridad de explotación de las barras
Barras tabulares de perforación con diámetro de 23/8 y 3 1/2 de pulgada	Soldadura manual por arco	Disminución del costo de reparación en un 23.7%
Barra de perforación con un diámetro 54/53 mm	Soldadura a tope	Disminución del número de rupturas en el proceso de perforación. Aumento de la productividad del proceso de la soldadura

CAPÍTULO II

CAPITULO II Verificación de los parámetros constructivos y tecnológicos para la puesta a punto de la máquina experimental de soldadura por fricción inercial

Para la investigación a escala de laboratorio de la factibilidad de utilización de la soldadura por fricción en sustitución de otros métodos de soldadura aplicados a la fabricación y recuperación de piezas en las industrias del territorio se proyectó el diseño de una máquina convencional experimental para la soldadura por fricción de diámetros de hasta 25 mm para ser utilizada en la unión de probetas. Esta propuesta de diseño fue el resultado de una tesis de maestría desarrollada con este objetivo [28]. En el presente capítulo se detallan los principales parámetros constructivos y se verifican los parámetros tecnológicos y de funcionamiento para la puesta a punto mediante el desarrollo de soldaduras en probetas preparadas a tal efecto.

2.1. Parámetros de trabajo de la máquina

Una vez comprobado el diámetro máximo sobre la bancada de la máquina, se verifican los restantes parámetros de trabajo:

- Velocidad de rotación de la pieza
- Fuerza axial máxima
- Potencia necesaria para la soldadura

2.1.1 Determinación de la velocidad de rotación de la probeta rotatoria

A partir de numerosos estudios realizados en distintos países [15] se verifica la frecuencia de giro de la pieza rotatoria según las siguientes correlaciones:

Para metales negros:

$$n^* \cdot d_s = (300_710)mm \cdot s^{-1}$$

Para metales no ferrosos:

$$n^* \cdot d_s = (600_750)mm \cdot s^{-1}$$

d_s - Diámetro de la sección de la pieza a soldar, *mm*

n- Frecuencia de rotación, s^{-1}

La máquina se diseña para la soldadura de diferentes tipos de materiales con probetas de diámetro máximo de 25 mm para lo que se establece la frecuencia máxima de giro

$$n^* \cdot d_{\max.} = 710mm \cdot s^{-1}$$

$$n = \frac{710mm \cdot s^{-1}}{25mm} = 28.4s^{-1} = 1926rev / \min$$

Teniendo en cuenta los resultados anteriores se selecciona un motor con las siguientes características:

- Potencia : 2.5 kW
- Velocidad: 2200 rev/min.
- Longitud máxima: 320 mm.
- Altura máxima: 280 mm.

Una vez fijada la velocidad de rotación en $28.4s^{-1}$ se determina el diámetro recomendado mínimo a soldar sobre la bancada de la máquina construida:

$$d_{\min} = \frac{300mm \cdot s^{-1}}{28.4s^{-1}} = 10.6mm$$

2.1.2 Determinación de las fuerzas axiales máximas.

En la literatura consultada ^[5,11,15,21,22,27] y en la tesis precedente se ofrecen variadas recomendaciones acerca de los valores más razonables de la presión a aplicar entre las piezas a unir durante el período de calentamiento y el de forja.

$$p_c = (30_40)MPa$$

$$p_f = (2_3)p_c, MPa$$

Teniendo en cuenta las recomendaciones anteriores y que la máquina de soldadura construida se explotará solo con fines experimentales y no para la soldadura seriada de piezas, se seleccionan los siguientes valores de la fuerza de calentamiento y la fuerza de forja:

$$p_c = 35 \text{ MPa}$$

$$p_f = 70 \text{ MPa}$$

La fuerza axial máxima requerida se determina entonces a partir de la presión de forja y diámetro máximo a soldar:

$$P_{\max} = p_f \cdot A_{\max}$$

Donde:

P_{\max} – Fuerza axial máxima, N

A_{\max} – Área máxima de la sección a soldar

Entonces, la presión máxima en el sistema dependerá del área máxima permisible a soldar en la máquina por lo que:

$$A_{\max} = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \frac{\pi \cdot (0.025)^2}{4} = 0.000491m^2$$

$$P_{\max} = 70 \cdot 10^6 \cdot 0.000491 = 34370 \text{ N} = 34.4 \text{ kN}$$

Por lo tanto, la máquina debe ser capaz de ejercer una fuerza axial en el orden de 34.4 kN.

2.1.3. Comprobación del motor eléctrico seleccionado en cuanto a la potencia consumida en el proceso.

En el ^[14] se propone la siguiente expresión para la determinación de la potencia consumida en el proceso de soldadura por fricción.

$$N = \frac{2.04 \cdot \pi \cdot 10^3}{(3 - K)} \cdot P_c \cdot R^2 \left(\frac{A}{V_r^{k-1}} \right), Kw$$

Donde:

N- Potencia consumida, Kw.

p_c - Presión de calentamiento, MPa

R- Radio de pieza a soldar, m

V_r - Velocidad periférica de la pieza rota

A y K- Coeficientes que dependen del material a soldar

Para los aceros de contenido medio de carbono: A= 0.18 y K=1.7

La potencia máxima demandada se determina para el mayor diámetro a soldar.

$$p_c = 35 \text{ MPa}$$

$$R = 25 \text{ mm}$$

$$V_r = \frac{\pi \cdot d \cdot \max \cdot n}{60000} = \frac{3.1416 \cdot 25 \cdot 1926}{60000} = 3.86 \text{ m/s}$$

Entonces,

$$N = \frac{2.04 \cdot 3.1416 \cdot 10^3}{(3 - 1.7)} \cdot 35 \cdot (0.0125)^2 \left(\frac{0.18}{3.86^{1.7-1}} \right) \cong 2 \text{ kW}$$

En ^[14] se recomienda que la potencia del motor eléctrico debe ser superior a dos veces la calculada para poder vencer los picos de potencia que se presentan durante el proceso.

A partir de los resultados anteriores puede concluirse que el motor seleccionado en el epígrafe anterior cumple con las exigencias de potencias que recomienda la literatura técnica consultada.

La transmisión del movimiento del motor principal al husillo se realizará a través de una transmisión por correas trapezoidales de tipo V cuyas características fueron determinadas en [18] y se describen a continuación:

- Velocidad de entrada $n_2 = 2200 \text{ rev/min}$.
- $N = 4.5 \text{ kW}$
- $n_1 = 1750 \text{ rpm}$
- D_{\min} normalizado: 125 mm
- Ancho de la Correa: 17 mm
- Altura de la Correa: $h = 11 \text{ mm}$
- Área de la Correa: $F = 1.4 \text{ cm}^2$
- Relación de transmisión: $i = 0.625$
- Diámetro de la polea mayor: $D_1 = 200 \text{ mm}$
- Ancho de las poleas – 80 mm
- Velocidad de la correa para una altura $h = 11 \text{ mm}$: $V = 19.3 \text{ m/s}$
- Longitud de la correa: $L_0 = 1500. \text{ mm}$
- $L_0 = 1415.19 \text{ mm}$
- Distancia entre centros: $A = 494 \text{ mm}$

- Número de vueltas por segundo de las correas: $u = 12.86.. \text{V/seg}$
- Ángulo de contacto de la correa en la polea de diámetro mínimo: $\alpha_1 = 193^\circ$
- Número necesario de correas: 1
- Longevidad de la correa: $H = 777.5$ horas que trabajando 1 hora diaria por tres días a la semana se garantiza el funcionamiento durante 259 semanas (aproximadamente 5 años).

En la Figura 3.1 se muestra una vista de la transmisión en la máquina construida.



Figura 3.1. Vistas de la transmisión en la máquina construida

2.1.4. Construcción del accionamiento hidráulico

La función del sistema hidráulico en la máquina se limita a garantizar la fuerza de calentamiento y de forja durante el proceso pues la colocación, el centrado y la fijación se garantizan manualmente con el accionamiento de los platos autocentrantes de tres muelas ubicados en el cabezal del husillo y en el dispositivo colocado en la contrapunta. En la máquina se instala un cilindro normalizado producido en la Empresa Oleohidráulica de Cienfuegos de nomenclatura **12.140/80.1 000** al cual se le hacen las modificaciones requeridas para disminuirle el recorrido y adaptar sus apoyos a los requerimientos establecidos.

Como se demuestra en [18], el cilindro seleccionado puede desarrollar una fuerza de:

$$P_{\max} = 44250N = 44.25KN$$

De donde puede concluirse que según lo definido anteriormente este cilindro es capaz de garantizar la fuerza de forja máxima necesaria para la soldadura del diámetro máximo al que responde el diseño de la máquina.

La presión mínima requerida en el sistema determinada a partir de la mayor fuerza demandada y teniendo en cuenta la presión de forja necesaria para garantizar la soldadura es de 5.8 MPa según el diseño propuesto por [18].

En el diseño de la máquina se recomienda fijar la presión del sistema en 9 MPa para garantizar una reserva de fuerza en el cilindro. La presión de alimentación al cilindro en cada uno de los momentos del proceso se realiza a través de un distribuidor que garantiza los valores necesarios.

2.1.5. Selección de la bomba y el motor eléctrico del sistema hidráulico

Para el funcionamiento del sistema hidráulico se selecciona una bomba capaz de garantizar el caudal necesario para poder alcanzar los valores previstos de la fuerza de forja.

Los datos se describen a continuación:

$$N = \frac{q \cdot n \cdot p}{60000 \cdot \eta}$$

N – Potencia demandada por la bomba, kW

n – Velocidad de trabajo de la bomba, rev/min

n = 1750 rev/min

p – Presión de trabajo, Mpa.

Q – Capacidad volumétrica de la bomba.

q = 32 cm³/rev

η – Eficiencia mecánica de la bomba.

η = 0.90

Entonces:

$$N = \frac{32 \cdot 1750 \cdot 9}{60000 \cdot 0.9} = 9.32 \text{ Kw}$$

El volumen de aceite necesario para el trabajo del sistema hidráulico debe ser de 2 a 3 veces el flujo de la bomba.

$$V_{dep.} = (2 \text{ - } 3)Q \dots l$$

Q – Flujo de la bomba ,l/min

$$Q = \frac{g \cdot n \cdot \eta_v}{1000}$$

$$Q = \frac{32 \cdot 1750 \cdot 0.85}{1000}$$

$$Q = 47.6 l / \text{min}$$

η_v – Eficiencia volumétrica de la bomba.

$$\eta_v = 0.85.$$

El volumen del depósito de aceite de la máquina será de

$$V_{dep} = 100 \dots l$$

A partir de los resultados anteriores se decide instalar una bomba acoplada a un motor eléctrico que garantiza un caudal de 50 l/min y que posee las siguientes características generales:

Potencia — 11 Kw.

Velocidad — 1750 rpm.

Longitud máxima – 610 mm.

Altura máxima — 350 mm.

En la Figura 3.2 se muestran algunos de los elementos del circuito hidráulico ubicados en la máquina construida entre los que se puede observar el distribuidor y la bomba instalada.

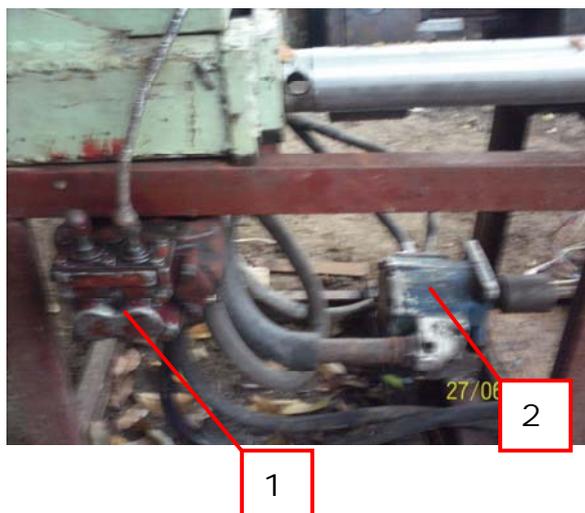


Figura 3.2 Vista de algunos de los elementos componentes del circuito hidráulico de la máquina.

1 – Distribuidor

2- Bomba

2.1.6. Descripción del circuito hidráulico de la máquina.

El circuito hidráulico de la máquina puede apreciarse en la Figura 3.3. El suministro de aceite al cilindro principal se realiza por dos vías distintas mediante dos válvulas reguladoras de presión independientes lo que garantiza obtener dos presiones de alimentación y por tanto dos fuerzas, una de forja y otra de calentamiento. Esta es una de las principales desventajas que presenta el diseño propuesto en la tesis [28] pues para la soldadura de diferentes materiales cambian los valores de las presiones de calentamiento y de forja. La máquina construida está diseñada para garantizar los valores de la fuerza de forja y de calentamiento para la soldadura de piezas de acero

En la línea de alimentación para el empuje se instala un acumulador hidráulico con la misión de mantener la constancia de la fuerza de forja y calentamiento durante el proceso.

Las válvulas distribuidoras de líquido son de accionamiento eléctrico para permitir la automatización de la máquina

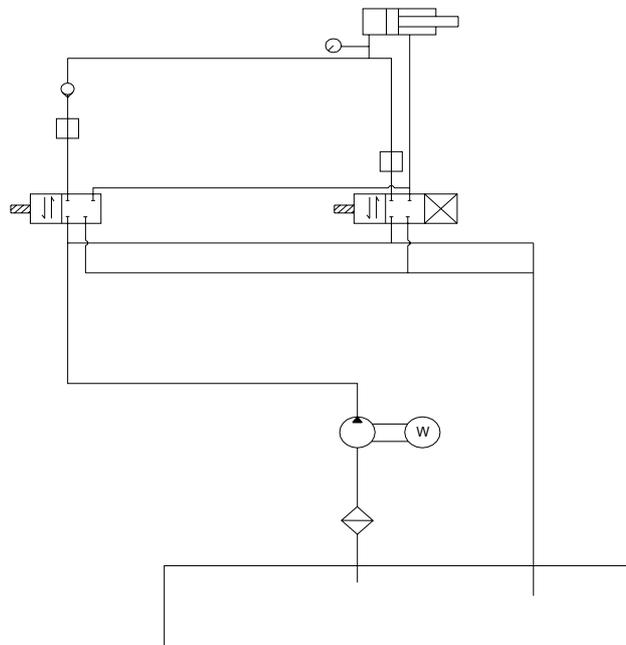


Figura 3.3 Esquema hidráulico de los accionamientos de la máquina

2.1.7. Descripción de la bancada de la máquina construida

En la Figura 3.4 se muestra un esquema de la bancada de la máquina construida.

Dicha bancada tiene la particularidad de que ha sido liberada completamente de la acción de la fuerza axial mediante la colocación de dos barras rigidizadoras laterales de sección circular que asimilan la acción de esa carga ubicadas en el mismo eje que las piezas a soldar en el plano horizontal lo que elimina los momentos flectores. Este tipo de bancada se conoce con el nombre de bancada descargada.

Como se aprecia en la Figura 3.4 dicha bancada se construye con una base de vigas canales soldadas, planchas de acero de diferentes espesores en determinados elementos del cuerpo y los dos rigidizadores cuyos ejes coinciden en el plano horizontal con los ejes de las probetas a soldar fabricado de barras de acero de sección circular.

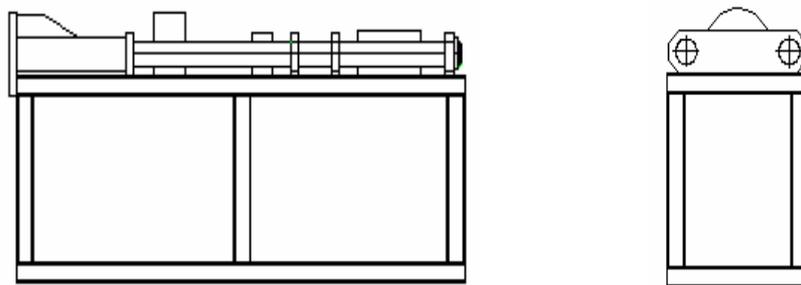


Figura. 3.4 Características constructivas de la bancada.

La bancada fue concebida con un largo de 1.30 m, un ancho de 0.41 m y una altura del husillo de 0.5 m. Atendiendo a la existencia de materiales la base se construye de vigas canales de 50 mm, las torres y la parte central de planchas de acero de 25 mm con dos barras de acero de sección circular de 60 mm de diámetro las cuales realizan función de guías (Figura 3.5).



Figura. 3.5 Vista parcial de la bancada

El cilindro principal se montó soldado a tope en una de las planchas transversales soldada a la bancada como se muestra en la Figura 3.6.

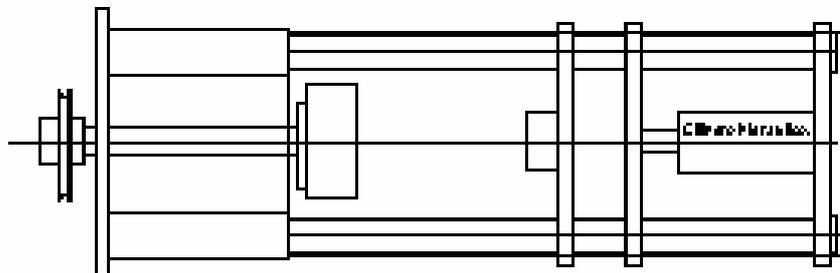


Figura. 3.6 – Montaje del cilindro principal

2.1.8– Descripción de la estructura del carro móvil

El carro móvil tiene la misión de permitir el desplazamiento de la pieza que no rota a lo largo del eje de la máquina, por lo que aloja el plato de tres muelas autocentrante que sujeta dicha pieza. En la Figura 3.7 se muestra el carro en la máquina construida.



Figura. 3.7 – Carro móvil sobre la bancada

2.2 Descripción del Plato de sujeción de la pieza rotatoria y el husillo y sus apoyos

Para la sujeción de la pieza rotatoria se utiliza un plato universal autocentrante de 200 mm de diámetro exterior que garantiza la colocación, el centrado y la fijación de la probeta giratoria (figura 3.8).

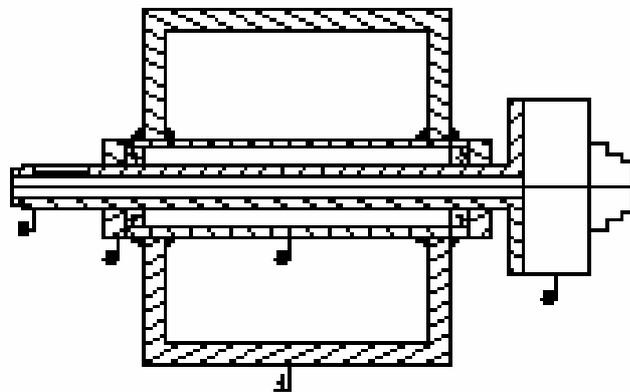


Figura. 3.8 Características constructivas del cabezal del husillo

El husillo tiene en un extremo la polea de salida de la transmisión principal y en el otro embridado el plato. Se diseña a partir de un tubo de diámetro interior de 25 mm por dentro del cual se desliza la probeta rotatoria. Los apoyos del árbol estarán constituidos por una combinación de cojinetes de rodillo cónicos 30210 que soporta tanto cargas

radiales como axiales como se pueden apreciar en la Figura 3.8, la selección de los cojinetes se realizó a partir de catálogos industriales.

Los cojinetes se alojan en un tubo de un diámetro interior de 90 mm que se coloca en los agujeros mandrilados de las planchas transversales soldándose a estas. Este tubo además hace función de cárter y tiene una copilla para el suministro de lubricantes y un tapón para su evacuación. Los extremos del árbol están adecuadamente sellados para evitar las pérdidas de lubricantes y la entrada de polvo y otros elementos nocivos para los rodamientos.

Tecnología de la soldadura por inercia.

A continuación se proponen una serie de recomendaciones tecnológicas a tener en cuenta para efectuar el proceso de soldadura por fricción

- En general, en relación con una dosificación exacta de la energía que se aplica al cordón, la preparación de las piezas a soldar para realizar la soldadura por inercia debe ser más escrupulosa que cuando se hace la soldadura común por fricción. Es aconsejable que las superficies laterales de las piezas pasen por el tratamiento mecánico. Para la realización de la soldadura por inercia de metales heterogéneos y aleaciones pueden ser utilizadas superficies forjadas, cortadas con autógeno o con medios abrasivos, pero el método de corte puede influir en la calidad y estabilidad de la unión soldada.
- De la misma forma que para la soldadura común, es recomendable eliminar de los extremos de las piezas costras de óxido, recubrimientos gruesos de cromo o superficies nitradas, pues durante la soldadura van a jugar el papel de recubrimiento anticorrosivo y no siempre puede ser expulsadas durante la forja de la zona de la soldadura.
- Es necesario también evitar durante la soldadura por fricción los orificios tecnológicos centrados, ya que el aire que quedan en ellos, puede provocar defectos en la costura soldada al tratar de escapar por entre el metal reblandecido.
- Al igual que durante la soldadura común, la desviación de la coaxialidad de las piezas a soldar, durante la soldadura por inercia no debe sobrepasar el 0.122 rad ya que surgen por lo regular esfuerzos radiales que pueden conllevar a la

excentricidad de la unión soldada, así como también al desgaste antes de tiempo de la maquina de soldar.

- En el caso de la soldadura de materiales que se van a diferenciar bruscamente según sus cualidades termo físicas, por ejemplo el acero con los aluminios, el cobre con los aluminios etc, los requisitos para la preparación de los topes de las superficies crecen rápidamente. De esta forma durante la soldadura del acero con el aluminio para la obtención de una unión soldada de calidad de acabado de la superficie de tope por la parte de la muestra de acero no debe sobrepasar $R=3.2$ La limpieza de la superficie lateral de las piezas a soldar no ejerce una influencia decisiva sobre la calidad de las uniones soldadas. Sin embargo las superficies excesivamente rusticas y fuertemente contaminadas disminuyen la exactitud y la estabilidad de la soldadura de estas piezas.
- Durante el flujo del proceso y en su resultado una influencia significativazo van a ejercer los parámetros fundamentales del proceso como son: la presión aplicada a la pieza soldar, la velocidad inicial circundante sobre la superficie de la pieza a soldar y el momento de inercia del volante. Sus variaciones influyen en la forma de la curva del momento, la potencia de la emisión térmica y la temperatura en el cordón así como en la continuidad del proceso de formación de la unión soldada.
- La presión de calentamiento más recomendada para la soldadura por inercia, es la que se encuentra en los límites entre los valores medios y pequeños. Las presiones altas calientan fundamentalmente la periferia de las piezas y tienen una tendencia a la formación de fallas de soldaduras en las zonas centrales. Con la aplicación de presiones más bajas la zona de influencia térmica se dilata en las piezas que se unen. Esta atenuante sin embargo puede ser utilizada como una solución tecnológica en los casos, cuando una alta velocidades de enfriamiento de la unión soldada no es deseada.
- La presión de calentamiento, depende de las cualidades termo físicas del material a soldar, se determinan experimentalmente y suelen fuertemente diferenciarse una de la otra. De esta forma para los aceros altamente aleados y las aleaciones el valor óptimo se encuentra en los límites de 280-350 MPa y para el acero al carbono y los metales no ferrosos esta formado por 70 MPa. Tomando en cuenta los datos brindados por la firma "KARTERPILLAR

TRACTOR Co”, “Manufacturing Technology Inc” y otros para la soldadura de los aceros al carbono lo más aconsejables son la presión de $60 \leq P \text{ (MPa)} \leq 130$. Para la elección orientada de la presión axial para diferentes metales, pueden ser recomendados los siguientes valores (MPa).

•

Aceros con bajo contenido de carbono	110
Acero con contenido medio de carbono	170
Acero pobre en carbono	140
Aleaciones extraduras	460
Acero martencítico envejecido	185
Acero resistente a la corrosión	170
Acero instrumental	370
Cobre o latón	47
Titanio o sus aleaciones	76
Aluminio (CAA 1100)	55
Aluminio AA 6061	78

- Tecnológicamente pueden disminuirse los valores anteriores en un 20-40 %.
- Como de la velocidad inicial circundante depende en gran medida de la distribución del calor en el cordón, la elección del valor óptimo de la velocidad inicial circundante, depende no solamente de las cualidades del material a soldar, si no de la configuración de la pieza a soldar. Para velocidades pequeñas, el desprendimiento térmico se concentra en la periferia del cordón. Para altas velocidades por el contrario, la mayor emisión térmica se observa en la parte central de la unión. Sin embargo existen evidencias que en el caso de soldadura de tubos se observa una influencia inversa es decir, con el aumento de la velocidad inicial circundante, a máxima emisión de calor en el cordón que se desplaza desde el centro (centro de la pared del tubo) hacia la periferia (diámetros interiores y exteriores del tubo).
- La elevación del tiempo de soldadura, en la mayor parte de los casos, no es deseable y puede considerablemente influir sobre la calidad de las uniones soldadas sobre todo para la soldadura de diferentes materiales que poseen una

abrupta diferencia entre las cualidades termo físicas. El crecimiento excesivo del volumen del metal, que ha sido comprimido en la rebaba, también no es deseable, ya que más adelante este metal por lo regular se elimina y se convierte en desperdicio. Es por eso que la elección radial del momento de inercia del volante, es muy importante, tanto desde el punto de vista económico como para la obtención de una unión soldada de calidad.

- Para la elevación de un momento constante de inercia del volante, de la velocidad inicial circundante y de la presión, se recomienda en cada caso en particular realizar, los correspondientes ensayos experimentales.
- El valor orientado de los parámetros fundamentales pueden ser hallados por medio del cálculo a partir de la energía cinética, que se tiene de reserva en las partes móviles de la maquina mediante la expresión:

$$Wk = J_{\Sigma} \cdot w^2$$

Donde:

J_{Σ} - Es el momento promedio de la inercia compuesto de los momentos de inercia del volante y el de los elementos de la máquina que giran con esta (las piezas a soldar, el dispositivo de agarre, el volante, etc.) en kg m^2 .

w - Velocidad angular inicial de giro rad/seg.

Desde otro punto de vista, conociendo el diámetro de las piezas a soldar, el valor que se exige de la energía cinética se puede determinar según la formula siguiente:

$$Wk = W_{\text{YII}} \cdot S$$

Donde:

W_{YII} - La energía específica, que se exige para la soldadura.

S - Es el área de la sección de la pieza a soldar en m^2 .

En las instrucciones para la explotación de la maquina para la soldadura por inercia, de las firmas "KARTERPILLAR TRACTOR Co", "Manufacturing Technology Inc", se ofrecen datos y recomendaciones para la elección de la energía específica, necesaria para la soldadura de diferentes metales.

Para la elección orientada de la energía específica (MJ/m^2), pueden ser utilizados los valores de este parámetro, determinados en el instituto de la soldadura Eléctrica E.O Paton durante los ensayos experimentales:

Aceros con bajo contenido de carbono	50
Acero con contenido medio de carbono	70
Acero con pequeño contenido de carbono	60-70
Aleaciones extraduras	130-140
Acero martencítico envejecido	100
Acero resistente a la corrosión	90
Titanio o sus aleaciones	50-60
Aluminio y sus aleaciones	20-40

Al ser elegido el valor necesario de W_{YTI} se determina la energía cinética (W_k).

La velocidad inicial angular puede ser calculada partiendo de la expresión siguiente:

$$w = 2v/d$$

Donde:

V – es la velocidad lineal (circundante sobre la periferia de las piezas a soldar), m/seg.

d – diámetro de las piezas a soldar, m^2 .

Sustituyendo los valores hallados W_k y w en la formula (4.2) hallamos que:

$$J_{\Sigma} = 2Wk / w^2$$

Si el valor obtenido J_{Σ} resulta mayor que el valor máximo del momento promedio de inercia de la maquina, es necesario elevar la velocidad angular lineal (w) e inversamente. De esta forma variando el valor J_{Σ} y w se puede obtener el valor necesario de W_k .

- Durante la elección del valor óptimo de la presión axial es necesario tener en cuenta que para la obtención de una estabilidad térmica en la unión, con la elevación de la velocidad inicial de rotación $V_{\text{rotación}}$ crecerá también la presión.

•

Capítulo III

Capítulo III. Evaluación de la resistencia mecánica y análisis metalográfico de las uniones en estado sólido obtenida con la máquina experimental de soldadura por fricción.

3.1. Evaluación de la resistencia mecánica en las probetas experimentales.

La evaluación de la efectividad de la soldadura a realizarse en la máquina construida se realizó a partir de probetas fabricadas para los ensayos a tracción y para el análisis metalográfico.

Las dimensiones de las muestras soldadas fueron elegidas previamente. Se maquinaron probetas de sección circular con cabezas lisas de diámetro 16 mm (figura 3.1) con las siguientes combinaciones de materiales:

- Acero (AISI 1020) con acero (AISI 1020).
- Acero (AISI 316L) con acero (AISI 316L).
- Acero (AISI 1020) con acero (AISI 316L).
- Acero (AISI 1020) con aluminio.
- Aluminio con aluminio.
- Bronce con bronce.
- Hierro Gris (CЧ 12 – 18) con hierro gris (CЧ 12 – 18).
- Latón ЛС64 -2 con ЛС64 -2

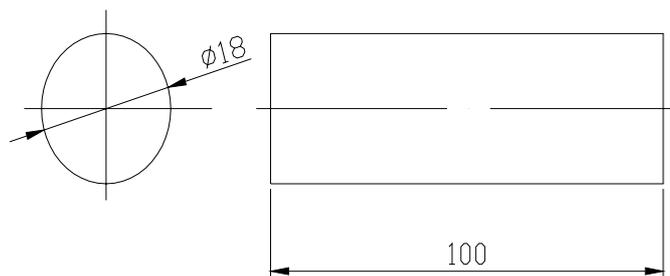


Figura 3.1 Dimensiones de las probetas a utilizar para el examen metalográfico.

Se realizaron pruebas correspondientes al ensayo de tracción en Planta Mecánica de Santa Clara y se determinaron las composiciones químicas de los materiales que se muestra en la tabla 3.1 siguiente:

Material	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al
AISI 316L	0.050	0.74	1.07	<0.002	0.005	17.23	0.25	3.61	0.0740

Material	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ni	Cr	Pb
Aluminio	0.14	0.35	3.34	0.08	0.04	0.104	0.01	0.007	0.8622

Material	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al
Ac -45G	0.451	0.25	0.75	0.024	0.005	0.12	0.04	0.13	0.0052

En la figura 3.2 se muestran ejemplos de las probetas soldadas obtenidas en la máquina experimental luego de su puesta a punto.



Figura 3.2 Unión mediante soldadura por fricción de probetas de tal material

La soldadura, en la máquina experimental, de materiales similares tuvo un comportamiento mucho más efectivo que la soldadura de probetas de materiales

disímiles. De forma general, se hicieron visibles varios defectos en la soldadura como por ejemplo:

- En estas uniones soldadas se pueden apreciar una serie de defectos producto de la falta de presión de forja la cual es la encargada de realizar la fusión entre las estructuras de los materiales a soldar, permitiendo que en ellas no se presenten grietas en la zona transversal de la unión de las piezas, zonas de vacío o defectos estructurales en la ZAT (Zona de Afectación Térmica)

Lo anterior estuvo causado por la limitante de la máquina con respecto al diapasón de variación de las presiones de calentamiento y de forja y el calentamiento desigual por las características propias de cada uno de los materiales, principalmente por la diferencia entre sus temperaturas de forjado.

Además, los valores de la velocidad de rotación de la probeta tienen también una incidencia directa en la calidad de la unión. La soldadura fue realizada en todos los casos con la misma velocidad de rotación de la probeta giratoria lo que demuestra la necesidad de introducir en la máquina experimental un rango mayor en el diapasón de variación de las velocidades de rotación de la probeta giratoria pues a mayor velocidad angular inicial, más súbita será la elevación de la temperatura en la etapa inicial de la fricción.

Una alta velocidad inicial angular, en combinación con un alto esfuerzo axial, provocan un suministro mayor de energía a la zona de la unión.

En resumen, se hace necesario evitar la elección de un nivel bajo de energía, en la zona de la unión ya que durante este estado, la deformación plástica no comienza, y la unión soldada puede tener una serie de defectos (grietas, fallas de soldadura), que están dentro de los presentados en los experimentos para la puesta a punto de la máquina en cuestión. La literatura recomienda que la energía mínima para las piezas de acero con un diámetro de hasta 20 mm, debe estar compuesto por no menos de 10 -12 kJ.

3.2 Análisis metalográfico de las uniones en estado sólido obtenidas con la máquina experimental de soldadura por fricción.

Debido al esfuerzo mecánico aplicado y a las altas temperaturas alcanzadas durante la operación, la microestructura en la zona afectada por el calor (ZAT) es modificada, y estos cambios dependen de la temperatura a la cual llega una cierta parte del material y de la velocidad de enfriamiento de esta zona, puesto que no siempre la ZAT se enfría de manera homogénea en todos los materiales.

En la figura 3.3 se muestra la soldadura de dos probetas de Aluminio unidas por el método de soldadura por fricción



Figura 3.3 Unión mediante soldadura por fricción de probetas de tal material

A dichas probetas se le aplicó un corte longitudinal con segueta manual para observar macroscópicamente el comportamiento de dicha unión.

En la figura 3.4 se muestra las características de la soldadura de aluminio



Figura 3.4 Características del corte transversal de la unión soldada.

En el caso de la unión del aluminio se aprecia macrográficamente un defecto de pegado (una grieta alargada perpendicular al eje axial de la unión) típico de la falta de fusión ó de baja temperatura (ver figura 3.16) debido a que no se le suministró la presión de forja necesaria en el proceso de soldadura de este metal. El análisis microestructural no se pudo realizar producto de la no existencia en el laboratorio de metalografía de la Universidad de Cienfuegos de reactivos para atacar dicho material.

En la figura 3.5 y figura 3.6 muestran las características de la soldadura del acero AISI 316L



Figura 3.5 Unión mediante soldadura por fricción de probetas de tal material.



Figura 3.6 Características del corte transversal de la unión soldada.

En el caso de la unión de acero inoxidable 316L se aprecia en la macrografía un defecto de pegado (una grieta alargada perpendicular al eje axial de la unión) típico de la falta de fusión ó de baja temperatura en el acero inoxidable, debido a que este tiene mayor punto de fusión.

No pudo realizarse la observación microestructural pues se requieren reactivos no disponibles. Se observa en el acero inoxidable 316L, que la zona afectada térmicamente (ZAT) es aproximadamente de 2.5 mm hacia cada lado de la unión.

En la figura 3.7 y figura 3.8 se muestra las características de la soldadura del acero AISI 1020.



Figura 3.7 Unión mediante soldadura por fricción de probetas de tal material.



Figura 3.8 Características del corte transversal de la unión soldada.

En el caso de la unión de acero AISI 1020 se aprecia en la macrografía una unión efectiva típica de la buena fusión. En el análisis microestructural se ataco con Nitral 2 % el acero al carbono se observa que la zona afectada térmicamente (ZAT) es aproximadamente de 2.5 mm hacia cada lado de la unión. En la ZAT (Zona de Afectación Térmica) podemos apreciar un aumento de la relación de perlita con respecto a la ferrita presente en el Material Base (MB), esto podemos explicarlo debido a que la velocidad de enfriamiento en la ZAT es mayor que la velocidad de enfriamiento del MB en su manufactura inicial.

No aparecen estructura de temple ni bainíticas, porque este acero es de muy baja templabilidad y alta soldabilidad, ya que es de 0.2% C.

Estos resultados se corresponden con los bajos valores de dureza obtenidos en los distintas zonas de la unión (acero 1020). Se puede apreciar una dureza ligeramente mayor en la ZAT debido a que el porcentaje de perlita es superior respecto al MB. Obteniéndose una dureza promedio en la ZAT de 202 HB y en el metal base es de 190 HB.

En la figura 3.9 y figura 3.10 se muestra las características de la soldadura del acero AISI 1020 con el acero AISI316L



Figura 3.9 Unión mediante soldadura por fricción de probetas de tal material.



Figura 3.10 Características del corte transversal de la unión soldada.

En el caso de la unión de acero 20 con el inoxidable 316L se aprecia en la macrografía un defecto de pegado (una grieta alargada perpendicular al eje axial de la unión) típico de la falta de fusión ó de baja temperatura (ver figura 3.17) en el acero inoxidable, debido a que este tiene mayor punto de fusión.

En el análisis microestructural (solo se ataco con Nitral 2 % el acero al carbono, para el ataque del acero inoxidable se requieren otros reactivos, no disponibles). Tampoco es necesario valorar la estructura de este acero ya que no llega a la temperatura de fusión y por ser auténticos en todo el rango de temperaturas no sufre cambio de fase en el calentamiento o enfriamiento (no es sensible al temple). Se observa en el acero 20, que la zona afectada térmicamente (ZAT) es aproximadamente de 2.5 mm hacia un lado de la unión. En la ZAT (Zona de Afectación Térmica) podemos apreciar un aumento de la relación de perlita con respecto a la ferrita presente en el Material Base (MB), esto podemos explicarlo

debido a que la velocidad de enfriamiento en la ZAT es mayor que la velocidad de enfriamiento en el MB cuando se fabrica.

No aparecen estructura de temple ni bainíticas, porque este acero es de muy baja templabilidad y alta soldabilidad, ya que es de 0.2% C.

Estos resultados se corresponden con los bajos valores de dureza obtenidos en las distintas zonas de la unión (acero 1020). Se puede apreciar una dureza ligeramente mayor en la ZAT debido a que el porcentaje de perlita es superior respecto al MB. Obteniéndose una dureza promedio en la ZAT de 202 HB y en el metal base de 190 HB.

3.3 Evaluación de la resistencia mecánica de las uniones en estado sólido obtenida con la máquina experimental de soldadura por fricción.

El ensayo a la tracción se realiza, no con el objetivo de evaluar el límite de resistencia a la tracción de la soldadura, sino con la intención de comprobar en qué caso la resistencia de la unión soldada se comporta por encima de la de metal base.

Este ensayo se realiza en una máquina universal, con celda de carga, diagramador (no poseía papel), y sistema de medición para la adquisición visual de datos. En el ensayo de tracción se mide la resistencia del material a una fuerza estática o gradualmente aplicada. La máquina donde se realiza el ensayo tiene una estructura similar a la mostrada en la figura 3.11

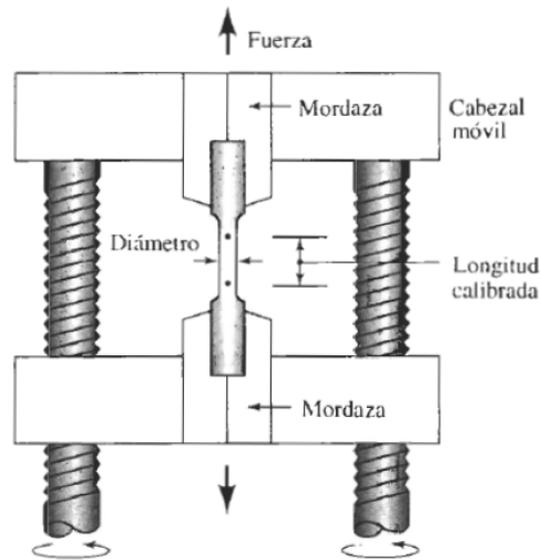


Figura3.11 Esquema de la máquina de tracción utilizada en el ensayo (si es que se parece a esta)

En la figura 3.12 se muestran las características de las probetas cilíndricas preparadas para el ensayo.

Estas probetas se obtienen mediante elaboración mecánica en torno universal de la unión de dos probetas soldadas en la máquina experimental de soldadura por fricción. El material de las probetas experimentadas a tracción es AISI 1020 y acero 45 G.

La unión obtenida entre ambas probetas, como se aprecia en la figura, después de ser maquinada como un elemento continuo, no es visible a simple vista.



a)



b)

Figura 3.12 Muestra de las probetas maquinadas para los ensayos a tracción
Hay que señalar las dimensiones y el lugar de la soldadura.

- a) Probeta AISI 1020.
- b) Probeta acero 45 G.

En la figura 3.13 se muestra la curva típica de tracción descrita durante el ensayo hasta la fractura (punto **F**). La resistencia a la tracción está indicada en el punto **M** y los insertos circulares representan la geometría de la probeta deformada en varios puntos de la curva.

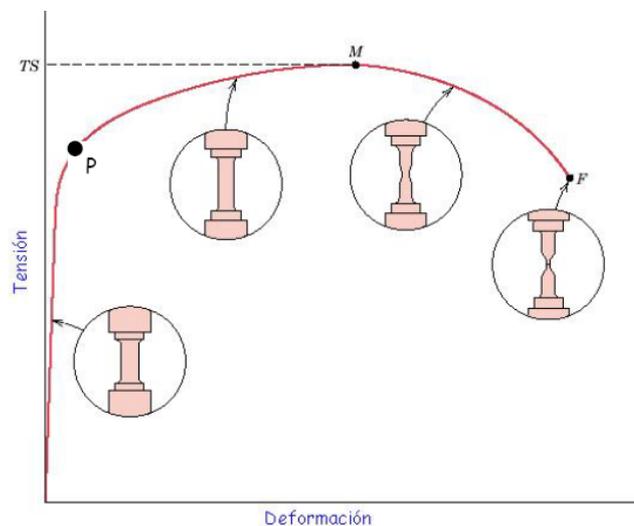


Figura 3.13: Curva típica de tracción hasta la fractura (punto F).

Para cada ensayo se elaboraron 2 muestras soldadas y 2 muestras testigos sin soldar. Los resultados de estos ensayos demuestran que ninguna de las probetas sometidas a tracción presentó la destrucción en la zona de soldadura.

En la tabla 3.2 se muestran los resultados obtenidos.

Probetas	d_0 (mm)	d_f (mm)	l_0 (mm)	l_f (mm)	Fluencia (ton)	Resistencia Máx (ton)	Dureza (HB)
1	20.1	15	100	103.2	11.5	19.6	188.7
2	19.5	13.5	100	123.4	10.4	16	145

Donde: la probeta 1 es acero 45, la probeta 2 es AISI 1020.

En la figura 3.14 se muestran las probetas de acero AISI 1020 antes y después del ensayo de tracción.

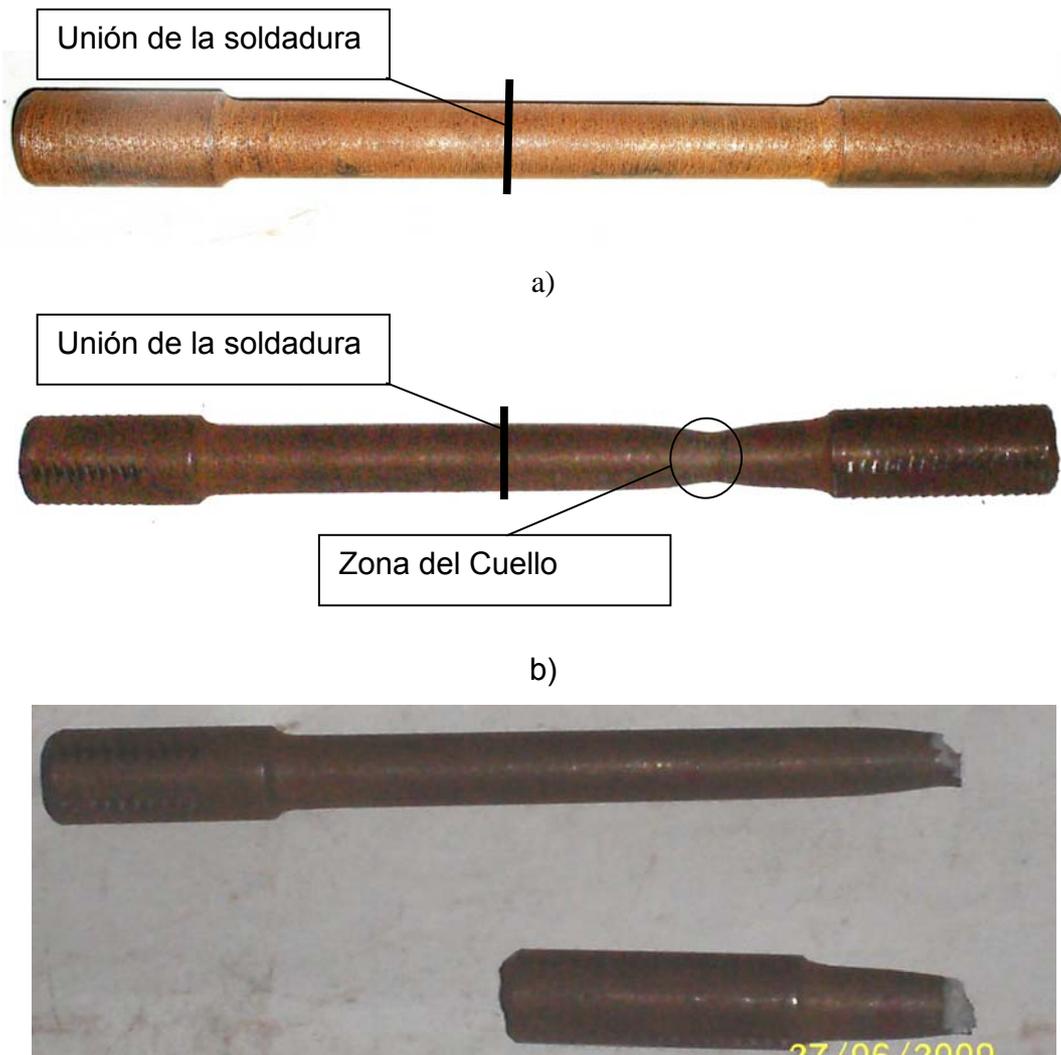


Figura 3.14 Probetas de acero AISI 1020.

a) Probeta originar.

b) Probeta traccionada.

En la figura 3.15 se muestran las probetas de acero AISI 1020 antes y después del ensayo de tracción.

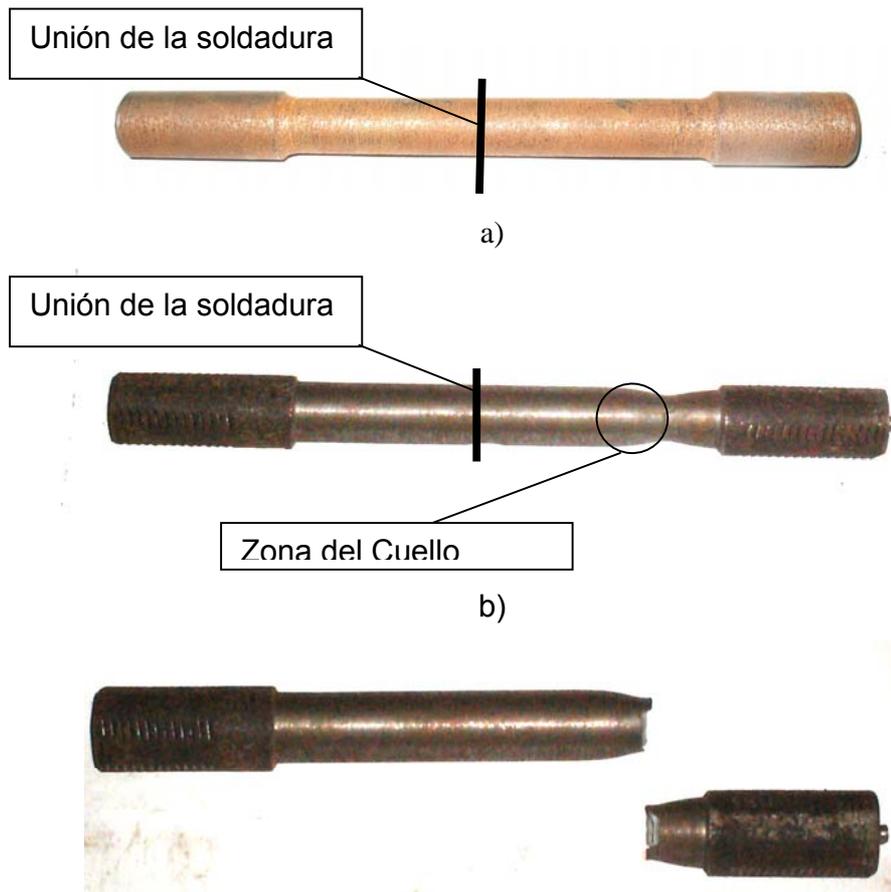


Figura 3.15 Probetas de acero AISI 1020.

a) Probeta original.

b) Probeta sometida a tracción.

Todo lo anterior permite afirmar que la resistencia a la atracción de las probetas soldadas fue mayor a la del material base. Estos resultados permiten asegurar que la soldadura no afecta la resistencia ni la ductilidad del metal en su conjunto.

La fractura de todas las probetas se produjo en el acero forjado del material base, lo que da un valor de tensión promedio de 17.8 t. Dicha diferencia demuestra una evidente heterogeneidad del acero forjado, debido a que en el proceso de forja por estampa a partir de una barra, todas las zonas no se someten al mismo esfuerzo, por lo tanto las propiedades que adquieren en los diferentes puntos de la barra forjada, difieren considerablemente.

Como resultado de los ensayos experimentales realizados en las probetas soldadas por el método de soldadura por fricción se comprueba que:

- en ninguna de las probetas soldadas la ruptura se produce por la unión.
- en las probetas partidas, la zona soldada no sufre reducción de diámetro, lo que indica que el límite de resistencia a la tracción de la soldadura es superior al límite elástico del metal base.
- en las probetas sometidas a tracción la rotura se produce fuera de la zona de unión y se puede observar además que en la zona de la unión no se produjo la deformación plástica transversal lo que confirma la afirmación anterior.

3.4. Medición de la dureza superficial en diferentes zonas de las probetas soldadas.

Otra de las propiedades mecánicas evaluada en las probetas soldadas fue la dureza. Se midió la dureza superficial en las siguientes zonas de las muestras:

- metal base,
- la ZIT de cada lado del centro de la unión

Los valores obtenidos fueron 190 HB en el MB y 202 HB en la ZIT para las probetas escogidas para el examen metalográfico, mientras que la dureza en las probetas preparadas para el ensayo de tracción fueron de 149, 143, 143 HB (AISI 1020) mientras que en la otra fueron de 192, 187, 187 HB (Ac 45G).

3.5 La evaluación de la efectividad de la soldadura realizada en la máquina construida.

Como se ha dicho con anterioridad, se han logrado soldaduras homogéneas y efectivas solamente en las probetas de:

- Aluminio con aluminio,
- acero AISI 1020 con acero AISI 1020
- acero AISI 1020 con acero AISI 316L
- acero AISI 316L con acero AISI 316L.

Por otra parte, se observa la aparición de defectos de la unión soldada en el caso de las probetas de:

- Aluminio con Aluminio

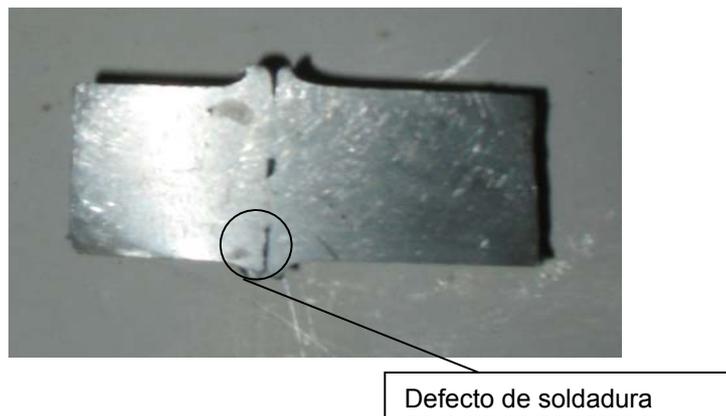
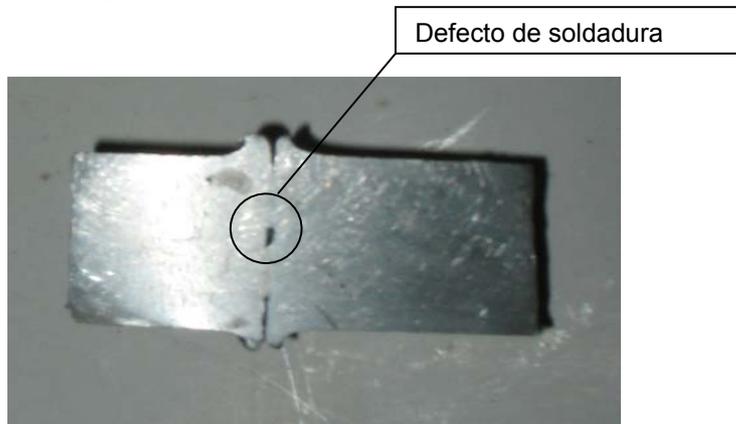


Figura 3.16 Muestra de los defectos en la soldadura.

- Acero (AISI 1020) con Acero (AISI 316L)

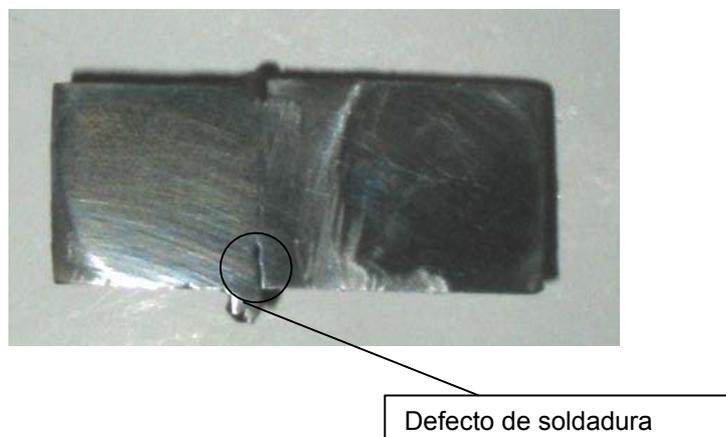


Figura 3.17 Muestra de los defectos en la soldadura.

Las principales limitantes de la máquina puesta a punto para la experimentación con el método de soldadura por fricción consisten en que:

- Es reducido el diapasón de velocidades a lograr en dicha máquina.
- Existen limitaciones en la variación de las presiones de calentamiento y de forja en dependencia de las características y exigencias tecnológicas de los metales a unir.

La utilización de esta máquina para la experimentación en unión de materiales homogéneos puede efectuarse sin que aparezcan defectos indeseables en la unión de las partes, no siendo así en el caso de materiales de características físico – mecánicas diferentes por lo explicado con anterioridad.

En los epígrafes anteriores se presentan los resultados de las probetas que lograron unirse con o sin defectos en la zona de la unión pero como se describe en el epígrafe 3.1 se prepararon otra serie de probetas de otros materiales como el hierro gris y el latón con alto contenido de plomo y no se logró la unión de las mismas lo que coincide con la literatura consultada al declarar que la característica principal que limita la posibilidad de utilización de la soldadura por fricción, para algunos materiales, es la presencia en ellos de una estructura que se expresa por medio de la fase frágil, como por ejemplo el grafito, el sulfuro de magnesio, el plomo libre, etc.

En tal sentido puede concluirse que el grupo fundamental de materiales que no pueden ser unidos mediante la soldadura por fricción inercial son:

- el hierro en cualquiera de sus formas, el gris, el perlítico o el forjado, ya que el grafito juega el papel de material de engrose, que disminuye las cualidades de la fricción.
- el bronce y el latón, que tienen un gran contenido de plomo (más del 0.3%).

La literatura refiere además que los aceros automáticos y sobre todo los aceros con un alto contenido de azufre, pueden ser sometidos excepcionalmente a la soldadura por inercia. Sin embargo la utilización de tales aceros debe ser de forma

limitada, sobre todo aquellos en los cuales el contenido de azufre, plomo o tuleno
no sobre pase el 0.13%.

Conclusiones

Conclusiones

1. Los resultados de la revisión bibliográfica evidencian que la soldadura por fricción en general y la inercial en particular posee una serie de ventajas sobre otros métodos tradicionales de soldadura pues, entre otros aspectos, garantiza altas propiedades mecánicas en la unión soldada además de ventajas económicas y energéticas con respecto a otros métodos utilizados en la actualidad.
2. Del estudio realizado se puede concluir que el método de soldadura por fricción inercial es el que más perspectiva ofrece por el reducido consumo de energía y las simplificaciones que implica en la máquina de soldar.
3. Los parámetros más importantes a tenerse en cuenta desde el punto de vista tecnológico para lograr la mayor efectividad de la unión son la coaxialidad de las piezas a soldar, la velocidad de rotación del husillo de la máquina, la presión de calentamiento, la presión de forja de forja y la rigidez de la bancada de la máquina.
4. La tendencia mundial en la construcción de máquina para la soldadura por fricción es el empleo de bancadas rigidizadas en forma de caja que garantizan los parámetros necesarios en lo referente a la rigidez de ésta lo que coincide con el diseño del prototipo experimental construido en la Universidad de Cienfuegos.
5. Una vez puesta a punto, la máquina construida puede ser utilizada para soldar piezas con las siguientes limitaciones: longitud de las mismas, tipo de material base y diámetro de la sección transversal cilíndrica.
6. Las limitantes principales de la máquina experimental de soldadura por fricción para garantizar una unión efectiva son:
 - el diámetro máximo a soldar sobre la bancada
 - el diapasón de valores de presión de calentamiento y presión de forja
 - el diapasón de velocidades de rotación de la probeta rotatoria.
7. La soldadura, en la máquina experimental, de materiales similares tuvo un comportamiento mucho más efectivo que la soldadura de probetas de materiales disímiles por lo que se hace necesario evitar la elección de un nivel bajo de energía en la zona de la unión ya que durante este estado, la deformación plástica no comienza, y la unión soldada puede tener una serie de defectos

(grietas, fallas de soldadura), que están dentro de los presentados en los experimentos para la puesta a punto de la máquina en cuestión.

8. Los resultados del ensayo de evaluación de la resistencia a la atracción de las probetas soldadas mediante soldadura por fricción inercial permiten asegurar que la soldadura no afecta la resistencia ni la ductilidad del metal en su conjunto.
9. En las probetas sometidas a tracción la rotura se produce fuera de la zona de unión y se puede observar además que en la zona de la unión no se observa deformación plástica transversal.

Recomendaciones.

Recomendaciones

10. Rediseñar los mecanismos de suministro de presión de manera que pueda regularse y ampliarse el diapasón de valores de presión de calentamiento y de presión de forja
11. Desarrollar e implementar en la máquina experimental de soldadura por fricción inercial un mecanismo de regulación y suministro de un diapasón más extenso de velocidades de giro de la probeta rotatoria.
12. Estudiar el efecto de las diferentes combinaciones de parámetros tecnológicos sobre la soldadura de muestras de materiales homogéneos y heterogéneos en la máquina experimental.

Referencia Bibliográfica.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. Aleksandrov, A.V. Fundamentos de la Teoría de la Elasticidad y Plasticidad / A.V Aleksandrov . - - Moscú : Editorial Vischaya Schkola, 1990 . - - 399p .
2. Cogollo, Jorge Luis. Estudio de la aplicación de la soldadura por fricción a elementos de oleohidráulica. / Jorge Luis Cogollo, Julian Martínez. Tutor.— Trabajo de Diploma. Ucf (Cf), 1989.-- 58h. .
3. Chernenko, I.A Dispositivo de control operativo en las máquinas de soldadura por fricción. Automaticeskaya Svarka (URSS) (6): 74, 1982.
4. Dobrovolski, V. Elementos de máquinas / V. Dobrovolski . - - Moscú : Editorial MIR, 1970 . - - 692p.
5. Dubina,R. N. Método de control de los parámetros del régimen de soldadura por fricción. Svarochnoe Proizvodstvo (URSS) (12) : 23-24, 1987
6. Elementos de máquina. Manual complementario. / J Alvarez Sánchez/ et al./ . – La Habana s.n, 1985. – 471p.
7. Estudio para la aplicación del proceso de soldadura por Friccion-Agitacion(FSW) a la fabricación de elementos combustibles monolíticos/ P. Cabot...[et.el].-- La Serena, Chile. CONMAT/SAM, Noviembre 2004, - [s.p.]
8. Faires, V. M. Diseño de elementos de máquina / V. M. Faires . - - México : Editorial UTEHA , 1985 . - - 802p.
9. Feodosiev, V. I. Resistencia de materiales / V. I. Feodosiev . - - Moscú : Editorial MIR , 1985 . - - 583p.
10. Formación de la estructura de la capa transitoria durante la soldadura por fricción del acero resistente a la corrosión con aleación de niobio o con cobre. Svarochnoe Proizvodstvo (URSS) (8) : 26-27, 1987
11. Gusev V. V. Soldadura por fricción de la corredera de la bomba YH 41.000/ TSNIMTEITractgoroselkhozmach (URSS) 3 (1): 21-23, 1984.
12. Goytisolo Espinosa R. La soldadura por fricción en la fabricación y recuperación de piezas de repuesto. Resumen de investigación./ R.

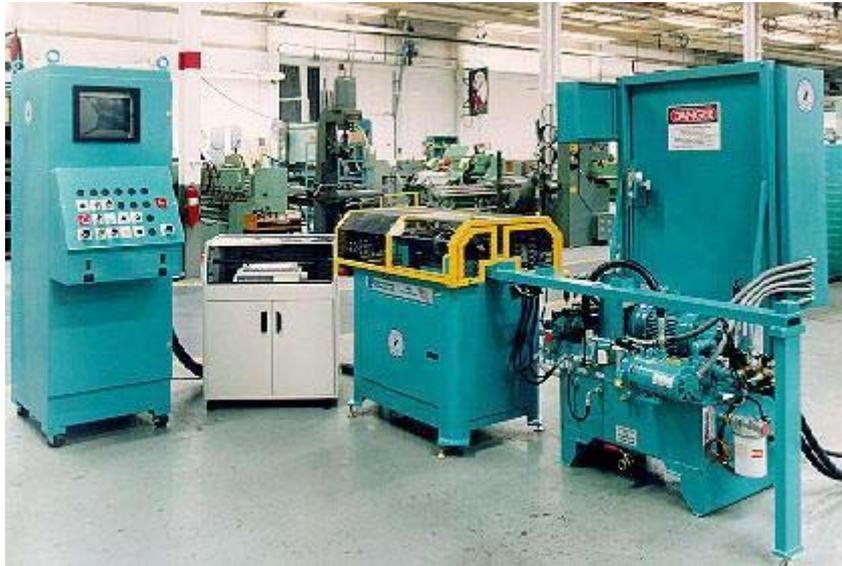
- Goytisol Espinosa - - Cienfuegos: Universidad de Cienfuegos, 1990 - - 54 p.
13. La soldadura y sus aplicaciones. - - Ciudad de la Habana: Editorial ENPES, 1992. - - 407p.
14. Lebel, V.K. Soldadura por fricción. Manual /V.K.Lebel, I.A. Cheorenko – Leningrado: Editorial Machinostroenia, 1987 .—314 p.
15. Moya Martín, Reinaldo. Soldadura por fricción novedoso método para la fabricación y recuperación de piezas./ Reinaldo Moya Martín, Orestes Rodríguez Rubio. –La Habana: [s.n.], [199?].—[s.p.]
16. NC 02-03-83. Representación de las costuras de las uniones soldadas en los documentos de proyecto. Vigente desde 85-2. – 23p
17. Orlov, P. Ingeniería del Diseño./ P. Orlov. -- 2 ed. -- Moscú: Editorial MIR, 1985. –3t.
18. Peña Acción, Jesus. Investigación del empleo de la soldadura por fricción inercial en la manufactura y recuperación de piezas/ Jesús Peña Acción; Juan J. Cabello Eras, Víctor G. Gómez Rodríguez, Rafael Goytizolo Espinosa, Tutores.—Tesis de Maestría. Ucf (Cf), 2008.—84 h
19. Pérez, C.;:“Iniciación de fisuras por fatiga en soldadura de aleación de aluminio obtenida por el método de fricción –agitación (FSW)”./ C. Pérez, Moglioni, A.; de Vedia L .-- Santiago, Chile: CONAMET/SAM, 2002, , 587 p.
20. Rodríguez Hernández, Orlando. Dibujo aplicado para ingenieros. / Orlando Rodríguez Hernández, Angel Corugedo Mendez – Guantánamo: [s.n.] 1986.-- 2t.
21. Rodríguez Rodríguez, Guillermo. Análisis de las máquinas utilizadas en la Soldadura por fricción y construcción de la instalación experimental para su evaluación../ Guillermo Rodríguez Rodríguez., -- Trabajo de Diploma. Ucf (Cf), 1990. -- 64h..
22. Santiago, D., Lombera G., Urquiza S., Cassanelli, A., de Vedia, Luis A. “Numerical modeling of joints welded by “friction stir welding” process”, Materials Research (São Carlos).7 (4):18-20, Oct./Dec. 2004
23. Shigley, J.E. Diseño en ingeniería mecánica / J.E. Shigley. - - 5ed. - - España : Editorial Mc Graw – Hill, 1997. - - 883p.

24. Shigley, J.E. Diseño en ingeniería mecánica / J.E. Shigley. - - 4ed. - - México : Editorial Mc Graw – Hill, 1985. - - 915p.
25. Stiovin, P. A. Resistencia de materiales / P. A Stiovin. - - Moscú : Editorial MIR, 1985. - - 371p.
26. Thomas, M.W., Estados Unidos Tem-plesmith, C.J. Dawes, Friction Stir Butt welding, GB Patent Application
27. Ulysse, P. Three-dimensional modeling of the friction stir-welding process, Internacional Journal of Machine Tools and Manufacture (Estados Unidos): 42, 2002

Anexo.

Anexo I

Figuras de Máquinas de Soldadura por Fricción.



Modelo 40



Modelo 60



Modelo 90



Modelo 120