



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ARAGÓN

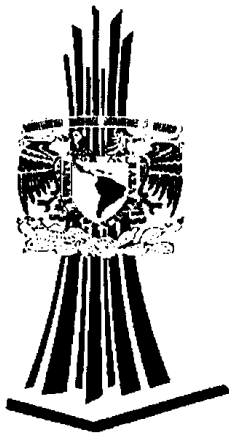
**“CARACTERIZACIÓN MORFOLÓGICA DE LA
SOLDADURA POR IMPACTO DE LOS SISTEMAS
COBRE - ACERO Y ACERO – COBRE”**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO MÉCANICO ELÉCTRICO

PRESENTA

GERARDO MEZA SALAZAR



ASESOR: FIS. CLAUDE THIONS CHAUDY

BOSQUES DE ARAGÓN ESTADO DE MÉXICO, 2010



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Dedico este trabajo con todo cariño a:

Mis queridos padres:

Josefina Salazar Rodríguez y Luis Meza Salazar

Por su apoyo incondicional, amor, confianza y consejos a lo largo de mi vida, así como en las decisiones que he tomado por escucharme y enseñarme a luchar para alcanzar mis metas.

Mis queridos hermanos:

Ana Meza Salazar y Carlos Meza Salazar

Gracias por su apoyo y su comprensión y oportuna ayuda en momentos difíciles.

Mis abuelos, tíos, primos y amigos:

Familias: Meza Salazar, Salazar Rodríguez y mis amigos incondicionales de la vida.

Mtr. Claude Thions Claudy:

Gracias por su apoyo incondicional tanto académico como personal, más allá de un simple profesor. Quien sus valiosos consejos y amistad supo encaminarme hasta este logro.

AGRADECIMIENTOS:

A la Dra. Claude Thions Chaudy, quien dirigió ésta tesis por su enseñanza, consejos y confianza; además de darme siempre apoyo y aliento en todos los momentos difíciles que se presentaron a lo largo de este tiempo.

Al Dr. Eligio Orozco, quien me brindo la oportunidad de colaborar dentro del Instituto de Física, por su gran apoyo y consejos para la elaboración de este trabajo.

Al Sínodo, por el tiempo dedicado a la revisión de este trabajo así como por sus valiosos comentarios vertidos a esta investigación. Les estoy enormemente agradecido por toda su ayuda y apoyo que desinteresadamente me brindaron.

Al Ing. Marco A. Veytia y al Sr. Ángel Osornio Basurto por la ayuda en la fabricación de las placas utilizadas en esta investigación, así como a cada uno de los técnicos que me brindo su apoyo en el Taller de Manufactura del Instituto de Física.

A la Universidad Nacional Autónoma de México, a la Facultad de Estudios Superiores Aragón y al Instituto de Física por los conocimientos que me brindaron mis profesores durante mi formación académica.

A Jeny Cortes S., quien me ha brindado todo el cariño, la confianza y el amor, “con todo” por luchar juntos en momentos difíciles y disfrutar los instantes más felices de mi vida junto a ella.

A mis inseparables e incomparables primos, gracias por su ayuda y consejos, por su apoyo tanto en los buenos momentos como en los malos tiempos, por los gratos momentos de amistad al disfrutar de la convivencia.

Por último y no por eso menos importantes, a mis amigos y compañeros de mi trabajo en la Universidad quienes a lo largo de los años voy perdiendo el contacto visual, pero que

su amistad y apoyo sincero siempre están presentes en todo momento. Les agradezco de todo corazón sus imprescindibles consejos y su más profunda amistad.

Gracias.

***"La ingeniería es una esfera infinita:
su centro está en cada uno de sus proyectos
y su periferia es inalcanzable".***

Paráfrasis de Blaise Pascal (Pensées, 72)

CONTENIDO

Introducción.....	4
Capítulo I. Aspectos básicos de la soldadura.....	7
1.1 Definición e importancia.....	8
1.2. Clasificación.....	9
1.2.1. Soldadura por fusión	9
1.2.2. Soldadura por presión.....	11
Capítulo II. Los métodos de soldadura en la industria mexicana.....	13
2.1. Soldadura metálica con arco protegido (S.M.A.W.) Shielded Metal Arc Welding.	16
2.2. Soldadura metálica con arco eléctrico y gas (G.M.A.W.) Gas Metal Arc Welding.	17
2.3. Soldadura con núcleo de fundente (F.C.A.W.) Flux-Cored Arc Welding.....	17
2.4. Soldadura por arco sumergido (S.A.W.) Submerged Arc Welding.....	18
2.5. Soldadura de tungsteno con arco eléctrico y gas (G.T.A.W.) Gas Tungsten Arc Welding.	19
Capítulo III. La soldadura por explosivo y su relación con la soldadura por impacto	20
3.1. Soldadura por explosivo.....	20
3.1.1. Onda de choque.....	25
3.1.2. Ventajas y desventajas	26
3.2. Soldadura por impacto	27
3.3 Cañón de Gas	31
3.3.1. Cámara de compresión.....	34
3.3.2. Tubo de aceleración.....	35
3.3.3. Cámara de ensayo	35
3.3.4. Odómetro.....	36
3.3.5. Colector	38
3.4. Relación entre la soldadura por explosión y la soldadura por impacto	39

Capítulo IV. Caracterización de la soldadura por impacto	41
4.1. Materiales utilizados.....	41
4.2. Diseño del blanco y proyectil	42
4.3. Velocidades y ángulo de colisión.....	46
4.4. Preparación de las muestras	54
4.5. Análisis de resultados de cada experimento	55
4.5.1. Deformación de muestras.....	56
4.5.2. Longitud y amplitud de onda.....	60
4.5.3. Microdureza.....	68
Conclusiones y futuras líneas de investigación.....	73
Bibliografía.....	75
Lista de Figuras.....	77
Lista de Tablas	80
Lista de Graficas	81
Apéndice	82

Introducción

La importancia de la soldadura se basa en el hecho de que en la vida diaria nos encontramos rodeados de artículos que, en mayor o menor porcentaje han sido soldados, los cuales utilizamos cotidianamente. De manera que la soldadura es un campo fascinante, desde los procedimientos más sencillos como entretenimiento en casa, auto-mecánica, granjas, fabricas de cualquier tipo y tamaño, industria automovilística, comercio, transporte y hasta la industria espacial son sólo algunos ejemplos de que la soldadura está envuelta de manera significativa en nuestras vidas. Si bien era conocida y practicada bajo algunas formas, la soldadura alcanzó su enorme importancia en la industria a partir de la Primera Guerra Mundial. Se transformo en el medio de unir partes de la mayoría de los productos fabricados en la actualidad.

Siendo así la soldadura un proceso básico y estratégico de la manufactura, construcción, mantenimiento, seguridad, calidad y vida útil de los bienes inmuebles y de capital construidos o fabricados en todas las ramas de la Ingeniería, a través de uniones soldadas en forma eficiente y segura. Podemos entender que soldar es un medio por el cual se unen los metales concentrando calor, presión o ambos en un punto de unión, para fusionar las áreas adyacentes. Dentro de la clasificación de los procesos de soldadura encontramos la Soldadura por Explosión que se ha desarrollado exitosamente en países como Alemania, Japón, Estados Unidos, etc., cuyo avance tecnológico y científico ha tenido un mayor auge a diferencia de otros, lo que les ha permitido tener mayor experiencia en pruebas realizadas en cañones de gas y neumáticos para la simulación del proceso de soldadura por Explosión, y así, contribuir al entendimiento de los parámetros tecnológicos involucrados en dicho proceso.

El objetivo de esta investigación consiste en comprobar por medio de experimentos en un cañón de gas comprimido la diferencia que existe entre las soldaduras por impacto en el sistema Cobre - Acero bajo carbono y en el sistema Acero bajo carbono - Cobre de tal forma que los resultados obtenidos se encuentran explicados y desarrollados en el Capítulo IV, los cuales puedan ser usados como base de los parámetros que se involucran en el proceso de soldadura por explosivo. Por lo cual, se plantean como objetivos:

- Elaborar una ventana de soldadura por impacto en el plano velocidad de proyectil (V_p) contra ángulo de colisión (β) para cada sistema que deduciremos en la sección 4.3.

- Caracterizar la morfología de la intercara de unión de la soldadura para ambos sistemas de unión que deduciremos en la sección 4.4.

- Encontrar las condiciones que favorezcan la mínima deformación de los materiales en cada sistema de unión que deduciremos en la sección 4.5.

Para el cumplimiento y realización de esta investigación se me permitió llevar a cabo dentro del Instituto de Física de la Universidad Nacional Autónoma de México (IFUNAM) la simulación del proceso Soldadura por Explosión por medio de un Cañón de Gas comprimido que permite obtener “Soldaduras por Impacto” para ser estudiadas y así determinar las condiciones favorables para la unión de los materiales y su estudio morfológico.

Una vez establecido lo anterior, cabe mencionar que esta investigación está enfocada a determinar las condiciones y los parámetros con los que se puede obtener Soldadura por Impacto para el “Sistema Cobre – Acero bajo en carbono” y “Sistema Acero bajo en carbono - Cobre” para establecer las regiones en donde se logra la soldadura.

La tesis consta de cuatro capítulos los cuales muestran la información concerniente a la soldadura en general y al desarrollo experimental de la investigación, así como los resultados obtenidos.

El capítulo uno, señala los antecedentes referentes a la soldadura, una breve historia, clasificación de los procesos y definiciones que conforman este capítulo.

El capítulo dos, hace referencia al proceso de la soldadura en la industria y la importancia en México.

El capítulo tres, define el proceso de la soldadura por explosivo; describe los arreglos que se utilizan para generar la soldadura bajo este método, además de sus aplicaciones comerciales. También describe a la soldadura por impacto a través del Cañón de Gas explicando su funcionamiento y la relación que existe en ambos procesos.

El capítulo cuatro, abarca todo el desarrollo experimental elaborado para lograr los objetivos y generar este trabajo de investigación. Dando descripción de los materiales utilizados y diseño de elementos básicos en el proceso, así como las velocidades y ángulos de colisión en los que se realizaron los experimentos. Además, de los resultados obtenidos de la deformación de las muestras, las mediciones de longitud y amplitud de onda presentadas en las intercaras de unión y la caracterización de la microdureza en cada una de ellas.

Finalmente se presentan las conclusiones de la investigación y se realizan algunas recomendaciones sobre posibles futuras investigaciones.

Capítulo I. Aspectos básicos de la soldadura

La mayor parte de la vida diaria nos encontramos rodeados de artículos que en mayor o en menor porcentaje han sido soldados; barcos, trenes, automóviles, grúas, aviones, tanques de almacenamiento, tuberías, edificios, puentes, estructuras, muebles, etc., son ejemplos de la gran variedad de productos tanto industriales como domésticos que utilizamos.

El primer paso hacia la comprensión de los procesos de soldadura lo constituye el análisis del fenómeno que interviene cuando se produce el contacto de dos superficies sólidas. Los metales están constituidos por granos. Cada uno de estos es a su vez un arreglo periódico especial de átomos, que da origen a lo que conocemos como retícula cristalina.

El tamaño de estos granos es variable y cada grano está separado por una zona de transición, que se conoce como límite de grano. Los límites de grano desempeñan un papel importante en la determinación de las propiedades mecánicas de un metal.

Si consideramos ahora un átomo cualquiera en el interior de un grano el mismo se halla ligado a los demás por fuerzas de enlace, que caracterizan a estos sólidos. Sin embargo, resulta evidente que los átomos metálicos que se encuentran en la superficie libre, no podrían completar sus enlaces. Si en estas condiciones ponemos en contacto dos superficies de este tipo, se establecerán dichos enlaces constituyendo la superficie así formada algo equivalente a un límite de grano. Esto da la posibilidad de reproducir este fenómeno en forma controlada, lo que da origen a los procesos de soldadura^[1].

Prácticamente en todos los campos de la ingeniería se aplica la tecnología de la soldadura, pudiendo citar las áreas; Mecánica, Eléctrica, Industrial, Electrónica, Química, Aeroespacial, Naval, Civil, Transporte, Militar, Petrolera, etc. Por lo tanto, la soldadura es un método económico de unir en forma permanente partes de los materiales. Existen muchas formas de hacer una soldadura y muchos diferentes tipos de soldadura.

Por lo tanto, la soldadura es un proceso de unión de materiales en el cual se funden las superficies de contacto de dos partes mediante la aplicación conveniente de calor o presión.

Sin embargo, soldar se ha vuelto complejo y técnico al grado que requiere de un conocimiento considerable para seleccionar el proceso adecuado para un trabajo específico. El oficio de soldar consiste, entonces, en aprender lo suficiente acerca de la soldadura para aprovechar sus múltiples ventajas. De esta manera todos los metales son soldables siempre que se aplique el procedimiento adecuado y la técnica adecuada. En ocasiones fracasa el intento de soldar metales por que se ha pasado por alto uno de estos dos factores, ya sea el procedimiento correcto o la técnica adecuada. Empero, si el ingeniero y el soldador comprenden la composición, la estructura y las propiedades de un metal, estarán en posibilidad de diseñar y hacer mejores soldaduras.

1.1. Definición e importancia

La American Welding Society (A.W.S)^[2] presenta una definición de soldadura;

“Es el proceso de unión de piezas metálicas o no metálicas con material o sin material de aporte, utilizando los procedimientos de aplicación de presión o bien calentando los materiales a una temperatura determinada con o sin aplicación de presión.”

Indicando que el material de aporte es aquel material con que se suelda, mientras que el nombre de material base es la pieza de trabajo por unir. Si se agrega material de aporte se tiene dos tipos de situaciones:

- 1) Si el material de aporte es igual o semejante a la pieza del material base, se considera una soldadura homogénea.
- 2) Si el material de aporte es una aleación metálica compatible a la pieza del material base, pero de composición diferente, entonces se considera una soldadura heterogénea.

La soldadura es en la actualidad un método universalmente aceptado para unir metales de modo permanente. Se considera una industria madura, pero todavía en crecimiento a nivel mundial. El verdadero impacto de la soldadura sobre la industria debe medirse de acuerdo con el valor de las partes producidas por este método, en la cantidad de dinero ahorrado por su uso, en comparación con otros procesos de fabricación de metal y en el valor de los productos que es posible hacer gracias a la soldadura.

1.2. Clasificación

En los procesos de soldadura más comunes, hay varias fuentes de calor y diversos métodos para controlarlo y enfocarlo, de manera que se han desarrollado muchos procesos de soldadura que difieren ampliamente por la forma como se aplica el calor y por el tipo del equipo utilizado. Básicamente se pueden clasificar éstos procesos en dos categorías ^[3]:

- La soldadura por fusión
- La soldadura por presión

1.2.1. Soldadura por fusión

La soldadura por fusión agrupa una serie de procedimientos, en los cuales la unión de los metales se efectúa a una temperatura superior a la del metal base y del metal de aporte. Se caracteriza por la presencia de una fase líquida, consecuencia de la fusión de los metales. Dicha unión puede ser homogénea, o bien, puede presentarse una unión heterogénea. Dentro de esta categoría de soldadura se encuentran los siguientes procedimientos:

A. Soldadura por arco (Arc Welding)

- Soldadura con hidrógeno atómico
- Soldadura de arco metálico con electrodo desnudo
- Soldadura de arco de carbón
- Soldadura de arco protegido
- Soldadura de arco con núcleo de fundente
- Soldadura con electrogas

- Soldadura de arco metálico y gas
- Soldadura de arco pulsado
- Soldadura de arco de corto circuito
- Soldadura de arco de tungsteno
- Soldadura de arco con plasma
- Soldadura de arco metálico protegido
- Soldadura de arco de espárragos

B. Soldadura por Oxigás (Oxyfuel Gas Welding)

- Soldadura con aire y acetileno
- Soldadura oxiacetilénica
- Soldadura con oxihidrógeno
- Soldadura a gas con presión

C. Soldadura por resistencia (Resistance Welding)

- Soldadura por arco con presión
- Soldadura por resistencia con alta frecuencia
- Soldadura por percusión
- Soldadura de resalto
- Soldadura de costura por resistencia
- Soldadura de puntos por resistencia
- Soldadura recalcada

D. Soldadura Blanda (Soldering)

- Soldadura blanda por inmersión
- Soldadura blanda en horno
- Soldadura blanda por inducción
- Soldadura blanda infrarroja
- Soldadura blanda por resistencia
- Soldadura blanda con soplete

E. Soldadura Fuerte (Brazing)

- Soldadura fuerte de arco
- Soldadura fuerte de bloque
- Soldadura fuerte por difusión
- Soldadura fuerte por inmersión
- Soldadura fuerte de flujo
- Soldadura fuerte en horno
- Soldadura fuerte por inducción
- Soldadura fuerte infrarroja
- Soldadura fuerte por resistencia
- Soldadura fuerte a soplete

1.2.2. Soldadura por presión

La soldadura sin fusión es el procedimiento de soldeo en el cual la característica principal es la ausencia de la fase líquida; ésta tiene por misión elevar la temperatura de metal hasta que éste alcance un estado plástico, pero sin fundirse. En este proceso se obtiene la unión metalúrgica entre dos piezas de metal como consecuencia de la acción de las fuerzas de atracción interatómicas que existen entre ellas, lo que clasifica ésta unión como una soldadura.

Industrialmente el proceso consiste en producir en las superficies a soldar una deformación plástica, a escala macro o microscópica, suficiente para la obtención de las soldaduras y según la forma de aplicación de la energía necesaria se distinguen los siguientes procesos:

A. Soldaduras de estado sólido

- Soldadura por difusión
- Soldadura por explosión
- Soldadura por forjado
- Soldadura por fricción
- Soldadura por presión en caliente
- Soldadura ultrasónica

B. Soldaduras especiales

- Soldadura por haz de electrones
- Soldadura de electroescoria
- Soldadura de flujo
- Soldadura por inducción
- Soldadura por haz de rayos láser
- Soldadura por impacto

Todos ellos se están empleando y algunos procedimientos que hace algunos años tenían poca aplicación, una vez perfeccionados y ligeramente modificados, adquieren gran importancia y utilización en la industria.

Capítulo II. Los métodos de soldadura en la industria mexicana

Cuando en México se comenta en alguna reunión social que alguien “Trabaja en la soldadura”, la primer imagen que viene a las personas de otras especialidades no metal mecánica es la del herrero, el plomero, el moflero y por último el soldador de estructuras. También podemos observar en los comerciales televisivos que siempre que se habla de trabajadores obreros, empleados generales o de subempleos entre otros aparece la imagen de un soldador.

Este tipo de difusión a ocasionado que la imagen de la especialidad de soldadura esté mal enfocada y gravemente distorsionada, que la soldadura no sea considerada como especialidad y se encuentre a un más lejos de ser considerada una opción profesional.

Veamos la importancia de esta actividad, hablemos de la cantidad de empresas que poseen entre sus trabajadores a los soldadores; si hablamos que cada empresa de manufactura sea cual sea el ramo mínimo deberá de tener entre sus trabajadores a uno que conozca de soldadura y realice como mínimo las operaciones de mantenimiento, esto quiere decir, que tenemos como mínimo igual número de soldadores que empresas, pero ahora podemos considerar aquellas otras empresas como la rama automotriz, metalmecánica, construcción, energética, toda aquella que sea manufacturera, que poseen decenas, cientos y las mayores hasta miles de soldadores ^[4].

Dentro de la soldadura como en otras especialidades se puede decir que se tienen todos los grados académicos como son:

- Postgrados
- Ingenieros
- Técnico profesional

En cuanto a la práctica se pueden indicar los grados siguientes:

- Especialista
- Inspector
- Soldador
- Aprendiz

Sin embargo, para una parte del sector industrial mexicano esta actividad les ha presentado varios problemas principalmente los siguientes:

- La falta de soldadores se debe a que los trabajos de campo requieren de personal que se encuentre viajando de obra en obra lo cual trae consigo el problema de la falta de asentamiento regular para el soldador y la ausencia de la familia.
- La falta de preparación de los soldadores es el otro aspecto importante, en México tenemos una gran cantidad de soldadores que operan con el proceso de soldadura metálica con arco protegido, sin embargo, la industria mexicana aún con el retraso tecnológico que tiene contra sus vecinos comerciales requiere de soldadores en procesos más productivos. La opción ha sido la capacitación, sin embargo, para esta especialidad el entrenamiento es costoso debido al costo de los materiales empleados, así como el valor de la instrucción.
- Existe una gran cantidad de “seudo profesionales” en los procesos de capacitación. El mayor problema en la soldadura es que nos encontramos en una especialidad muy viciada, debido a que de estos seudo-profesionales, los cuales imparten capacitación, algunos de ellos no poseen la tecnología adecuada o la que poseen es muy anticuada, otros no poseen preparación académica, otros poseen el grado de licenciatura, considerando que esto es suficiente para compensar la falta de experiencia y los conocimientos de la tecnología en soldadura; la gran mayoría son empíricos. Estos han ocasionado que la capacitación no sea real, pertinente y efectiva para la industria.

Hay muchas formas de hacer una soldadura y muchos y diferentes tipos de soldadura, de manera que soldar se ha vuelto algo complejo y requiere de una gran técnica, es decir, de un conocimiento considerable para seleccionar el proceso adecuado para un trabajo específico. De manera que algunas de las ventajas que proporciona la soldadura son las siguientes:

- La soldadura es un método de unión de bajo costo en la industria.
- Proporciona flexibilidad en el diseño sobre el cual se desea trabajar.
- La soldadura es aplicable en la mayoría de los metales comerciales.
- Además permite usarse en cualquier parte donde se requiera.

Es importante conocer también las limitaciones de la soldadura, las cuales son las siguientes:

- La mayoría de las operaciones de soldadura se hacen manualmente, lo cual implica alto costo de mano de obra. Hay soldaduras especiales y la realizan personas muy calificadas.
- Por ser una unión permanente, no permite un desensamble adecuado. En los casos donde es necesario mantenimiento en un producto no debe utilizarse la soldadura como método de ensamble.
- La unión soldada puede tener defectos de calidad que son difíciles de detectar. Estos defectos reducen la resistencia de la unión y requieren frecuentemente de una inspección interna.

La Sociedad Mexicana para la Soldadura (S.M.S) encargada de certificar personal e instancias relacionadas con la soldadura en México, menciona los siguientes procedimientos más utilizados en nuestro país ^[5]:

2.1. Soldadura metálica con arco protegido (S.M.A.W.) (Shielded Metal Arc Welding)

Es un proceso de soldadura con arco eléctrico que usa un electrodo consumible y consiste en una varilla de metal de aporte recubierta con materiales químicos que proporcionan un fundente y protección. En ocasiones, el proceso se denomina soldadura por varilla. La varilla de soldadura normalmente tiene una longitud entre 9 y 18 pulgadas y un diámetro de 3/32 a 3/8 de pulgada.

El metal de aporte usado en la varilla debe ser compatible con el metal que se va a soldar y, por tanto, la composición debe ser muy parecida a la del metal base. El recubrimiento consiste en celulosa pulverizada mezclada con óxidos, carbonatos y otros ingredientes integrados mediante un aglutinante de silicato. En ocasiones se incluyen en el recubrimiento polvos metálicos para aumentar la cantidad de metal de aporte y agregar elementos de aleación. El calor del proceso de soldadura funde el recubrimiento y proporciona una atmósfera protectora y escoria para la operación de soldadura. También ayuda a estabilizar el arco eléctrico y regula la velocidad a la que se funde el electrodo.

Durante la operación, el extremo de metal descubierto de la varilla de soldadura se sujeta en un soporte de electrodos conectado a la fuente de energía. El soporte tiene manija aislada para que lo tome y manipule el soldador. Las corrientes que se usan regularmente varían entre 30 y 300 A y 15 a 45 V. La selección de los parámetros de energía adecuados depende de los metales que se van a soldar, del tipo y longitud del electrodo, así como la profundidad de penetración de la soldadura requerida.

Por lo general, la soldadura metálica con arco protegido se ejecuta en forma manual y sus aplicaciones comunes incluyen la construcción, instalación de tuberías, estructuras de maquinaria construcción de embarcaciones, tiendas de manufactura y trabajos de reparación. La desventaja de la soldadura metálica con arco protegido como operación de producción proviene del uso de varillas de electrodos consumibles, porque estos deben cambiarse en forma periódica a causa del desgaste. Esto reduce el tiempo de arco eléctrico en este proceso de soldadura. Otra limitación es el nivel de corriente que puede usarse, porque la longitud del electrodo varía durante la operación y esta afectan el calentamiento de la resistencia del electrodo, los niveles de corriente deben mantenerse dentro de un rango seguro o el recubrimiento se sobrecalentará y fundirá prematuramente cuando se empiece a usar una nueva varilla de soldadura.

2.2. Soldadura metálica con arco eléctrico y gas (G.M.A.W.) (Gas Metal Arc Welding)

Es un proceso en el cual el electrodo es un alambre metálico desnudo consumible y la protección se proporciona inundando el arco eléctrico con un gas. El alambre desnudo se alimenta en forma continua y automática desde una bobina a través de la pistola de soldadura.

En la G.M.A.W. se usan diámetros de alambre que van desde 1/32 hasta 1/4 de pulgada, el tamaño depende del grosor de las partes que se van a unir y la velocidad de deposición deseada. Para la protección se usan gases inertes como el argón y el helio y también gases activos como el bióxido de carbono. Se usan gases inertes para soldar aleaciones de aluminio y aceros inoxidable, en tanto que normalmente se usa CO₂ para soldar aceros al bajo y mediano carbono.

El proceso se usa ampliamente en operaciones de fabricación para soldar diversos metales ferrosos y no ferrosos. Debido a que usa alambre de soldadura continuo en lugar de varillas de soldadura, tiene una ventaja importante sobre la S.M.A.W. en términos de tiempo de arco eléctrico, cuando se realiza en forma manual.

2.3. Soldadura con núcleo de fundente (F.C.A.W.) (Flux-Cored Arc Welding)

Es un proceso en el cual es un tubo consumible continuo que contiene fundente y otros ingredientes en su núcleo. Entre tales ingredientes se incluyen los desoxidantes y los elementos de aleaciones. El alambre tubular con núcleo de fundente es flexible y, por lo tanto, se proporciona en forma de rollos que se alimenta continuamente a través de la pistola para soldar con arco eléctrico.

Hay dos versiones de la F.C.A.W.: 1) auto protegida y 2) protegida con gas. En la primera versión de la F.C.A.W., la protección se proporciona por medio de un núcleo de fundente, de allí deriva el nombre de soldadura con núcleo de fundente auto protegida. El núcleo en esta forma del proceso no sólo incluye fundentes, sino también ingredientes que generan gases protectores para el arco eléctrico.

La segunda versión desarrollada principalmente para soldar aceros, se obtiene la protección del arco eléctrico mediante gases que se incorporan en forma externa, igual que en la soldadura metálica con arco eléctrico y gas. Esta versión se denomina soldadura con núcleo de fundente protegida por gas. Los gases protectores que se emplean comúnmente son el dióxido de carbono para aceros suaves, o mezclas de argón y dióxido de carbono para aceros inoxidable.

La soldadura con núcleo de fundente tiene ventajas similares a la G.M.A.W. debido a la alimentación es continua del electrodo. Se usa principalmente para soldar aceros y aceros inoxidable en un amplio rango de espesores de materias primas. Es notable su capacidad para producir uniones soldadas de muy alta calidad que son lisas y uniformes

2.4. Soldadura por arco sumergido (S.A.W.) (Submerged Arc Welding)

Es un proceso que se usa un electrodo de alambre desnudo consumible continua, el arco eléctrico se protege mediante una cobertura de fundente granular. El alambre del electrodo se alimenta automáticamente desde un rollo hacia dentro del arco eléctrico. El fundente se introduce a la unión ligeramente adelante del arco de soldadura, mediante gravedad, desde un tanque alimentador.

El manto del fundente granular cubre por completo la operación de soldadura con arco eléctrico, evitando chispas, salpicaduras y radiaciones que son muy peligrosas en otros procesos de soldadura con arco eléctrico. Por tanto, el operador de la soldadura no necesita usar la molesta máscara protectora que se requiere en otras operaciones.

La parte del fundente más cercano al arco se derrite y se mezcla con el metal de soldadura fundido para remover impurezas, que después se solidifican en la parte superior de la unión soldada y forman una escoria con aspecto de vidrio. La escoria y los granos de fundente no derretidos en la parte superior proporcionan una buena protección de la atmósfera y un buen aislamiento relativamente bajo y una unión de soldadura de alta calidad.

El fundente no derretido que queda después de la soldadura puede recuperarse y reutilizarse. La escoria sólida que cubre la soldadura debe arrancarse, por lo general mediante medios manuales. La soldadura con arco sumergido se usa ampliamente en la fabricación de formas estructurales de acero para (por ejemplo, vigas en forma de I soldadas); engargolados longitudinales y en forma de circunferencia para tubos de diámetro grande, tanques y recipientes de presión; y componentes soldados para maquinaria pesada. En estos tipos de aplicaciones, se sueldan placas de acero de herramientas y aceros inoxidables.

2.5. Soldadura de tungsteno con arco eléctrico y gas (G.T.A.W.) (Gas Tungsten Arc Welding)

Es un proceso que usa un electrodo de tungsteno no consumible y un gas inerte para proteger el arco eléctrico. Con frecuencia este proceso se denomina soldadura de tungsteno con gas inerte (T.I.G.). El proceso puede utilizarse con o sin un metal de relleno, cuando se usa un metal de aporte, este se agrega al pozo de soldadura desde una varilla separada, la cual se funde mediante el calor del arco eléctrico, en lugar de transferirse a través del arco eléctrico como un electrodo consumible en los procesos de soldadura con arco eléctrico. El tungsteno es un buen material para electrodo debido a su alto punto de fusión de 3410° C. Los gases protectores que se usan normalmente incluyen el argón, el helio o una mezcla de ellos.

La G.T.A.W. es aplicable a casi todos los metales en un amplio rango de espesores de la pieza de trabajo. También se usa para unir diferentes combinaciones de metales distintos. Sus aplicaciones más comunes incluyen el aluminio y el acero inoxidable. El hierro colado, el hierro fundido, el plomo y el tungsteno son difíciles de soldar mediante este proceso. En las aplicaciones de soldadura de acero, la soldadura G.T.A.W. generalmente es más lenta y más costosa que los procesos de soldadura con arco de electrodo consumible, excepto cuando se incluyen secciones delgadas y cuando se requieren soldaduras de muy alta calidad.

El proceso se ejecuta en forma manual o mediante métodos de máquina y automatizados para todos los tipos de uniones. Las ventajas de la G.T.A.W. es su alta calidad, no hay salpicaduras de soldadura debido a que no transfiere un metal de aporte a través del arco eléctrico y no se requiere limpieza o ésta es muy reducida porque no se usa fundente

Capítulo III. La soldadura por explosivo y su relación con la soldadura por impacto

3.1. Soldadura por explosión

La soldadura por explosión fue descubierta accidentalmente por especialistas quienes no lo imaginaron como un proceso de soldadura. El hecho de haber encontrado fragmentos de proyectiles adheridos a objetos metálicos cercanos a la explosión generada por los cañones usados durante la Primera Guerra Mundial, impulsó a estos especialistas a estudiar el fenómeno ^[6].

El primer reporte de soldadura por explosión fue publicado por Carl Garl en 1944, mientras desarrollaba pruebas de explosivos observó la soldadura de dos discos de soporte que utilizaba para posicionar las cargas de explosivos después de hacer la detonación.

Pero no fue sino hasta 1962, en Estados Unidos, cuando Philipchuck y Bois, patentaron un método en el que utilizaban la detonación para hacer posible la unión de dos metales.

Este tipo de soldadura se define como la unión entre materiales en estado sólido; en él se utiliza la energía y gases liberados por la detonación de un explosivo para generar una colisión a alta presión entre dos placas a ser unidas. La unión entre los metales tiene lugar cuando la velocidad de impacto es inferior a la de propagación del sonido en los mismos. Bajo estas condiciones, se favorece la formación de un chorro metálico (jet) que deja las superficies completamente limpias para un íntimo contacto a presión elevada.

Los arreglos básicos en los que se logra la soldadura por explosión se muestran en la (fig. 1), donde la placa voladora es orientada contra la placa base a cierta distancia de separación.

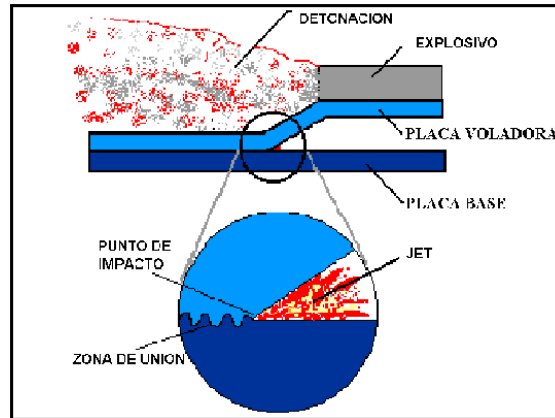


Fig. 1. Arreglo para la Soldadura por Explosión

La soldadura se realiza generalmente al aire libre, aunque también se puede verificar en atmósferas protectoras o dentro de un vacío. La mayoría de las soldaduras por explosión se hacen en piezas con grandes superficies, sin embargo tiene aplicaciones para superficies pequeñas. Durante la explosión la placa voladora es desplazada hacia la placa base la cual tendrá un ángulo de inclinación, lo que producirá una colisión oblicua que conduce a la soldadura de ambas piezas.

Un amortiguador, generalmente de material de caucho, es necesario entre el explosivo y la placa voladora para proteger la superficie de ésta contra la erosión que podría producirse por la detonación del explosivo.

La forma de producir la detonación del explosivo es extremadamente importante, la detonación tiene que desarrollarse de una manera progresiva a través de la superficie de la placa voladora. La rapidez del frente de la detonación establece la velocidad a la cual colisionan los dos componentes.

El tiempo que dura el evento de la soldadura por explosión es muy corto, ya que la zona de reacción entre los componentes metálicos es microscópica. Durante el proceso, algunas de las primeras capas atómicas de cada metal se hacen plasma por la velocidad tan alta del impacto.

El ángulo de colisión origina que se forme el jet, delante del punto de choque teniendo como consecuencia una remoción de materia de ambos materiales que provoca la limpieza de ambas superficies. El calor generado por el impacto permanece cercano a la temperatura ambiente, esto hace que se propague el calor y enfríe más rápidamente.]

En algunas soldaduras por este método, la aparición de ondas en la intercara es provocada por el arrastre de materia y por las condiciones que se establecen inicialmente para llevar a cabo la soldadura. Estas ondas pueden variar de tamaño, forma e influyen en las propiedades tanto físicas como mecánicas de los materiales.

En el Physics Department University of Denver en Colorado, se han llevado a cabo estudios relacionados con la Soldadura por Explosión y se han obtenido varias imágenes ^[7], como las mostradas en la figuras 2, 3 y 4.



Fig. 2. Forma típica de la onda
(Unión acero inoxidable y cobre)



Fig. 3. Forma típica de recta con cierta capa de aleación entre las placas
(Unión Incotel y Acero Inoxidable)

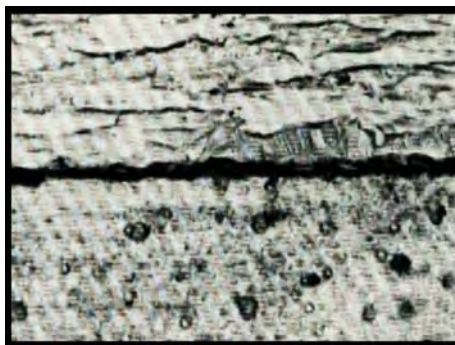


Fig. 4. Forma típica recta
(Unión cobre y aluminio)

La unión metalúrgica entre metales tiene esencialmente tres configuraciones: ondulada (fig. 2), recta con cierta capa de aleación entre las placas (fig. 3) y, la recta (fig. 4). Estas son resultado de la variación de la velocidad y el ángulo de colisión con que se realiza la soldadura por explosión.

El revestimiento de placas constituye la mayor aplicación comercial de este tipo de soldadura. La razón de utilizar placas revestidas, es simplemente por la necesidad de tener un material capaz de presentar resistencia a la corrosión a un bajo costo, mejorar las características de transferencia de calor, propiedades mecánicas como la rigidez, propiedades eléctricas y aumentar la resistencia a la abrasión.

Schetky ^[8] discutió el potencial económico en el avance para la construcción de grandes y pequeños barcos con placas de acero revestidas de cobre-níquel, con ello se tenían ventajas como: reducción en el consumo de combustible, el casco del barco no necesitaba pintarse y había ausencia de corrosión en el mismo.

Otros ejemplos de aplicaciones se muestran a continuación; el Cobre con Tantalio (fig. 5). La pipa exterior es cobre y el interior revestido de tantalio. Esta combinación se utiliza en cambiadores de calor donde son importantes en la transferencia térmica y la protección contra la corrosión.



Fig. 5. Pipa Cobre con Tantalio

Otro ejemplo es el Acero inoxidable con Cobre (fig. 6.). La pipa exterior es acero y el interior es cobre revestido. Esta combinación se puede utilizar en la industria de cambiadores de calor.



Fig. 6. Pipa Acero inoxidable con Cobre

3.1.1. Onda de choque

Una onda de choque se puede definir como una onda de presión, que puede ser producida por una explosión u otros fenómenos, la cual provoca un cambio repentino de presión en el medio en el que se propaga. Las perturbaciones generadas por una onda de choque crean variaciones de presión a través del medio en el que se mueven, con velocidades superiores a la velocidad del sonido en dicho medio. La onda le permite que se distribuya nuevamente al medio para que pueda compensar la perturbación, pero si ésta se mueve más rápido que la causada por las ondas de presión sonoras, la materia del medio se pone en movimiento adquiriendo una velocidad llamada velocidad de partícula.

Las ondas de choque pueden ser producidas por:

- Detonación por cargas explosivas
- Láser de potencia
- Diferentes tipos de “Cañones de gas”, aparatos que se basan en la liberación repentina de un gas inicialmente comprimido para acelerar un proyectil que se estrella sobre un blanco fijo donde inducirá una onda de choque por el impacto.

3.1.2. Ventajas y desventajas

La soldadura por explosión permite procesar componentes de grandes dimensiones, siendo ampliamente utilizada para el recubrimiento de recipientes a presión y ambientes corrosivos, en la fabricación de uniones de transición, insertos para maquinaria industrial y herramientas de campo, en la reparación de cambiadores de calor y en la fabricación de gasoductos.

Además, este proceso permite la obtención de soldadura con materiales disímiles, de modo que se obtienen aleaciones capaces de presentar resistencia a la corrosión, mejora sus propiedades mecánicas, y la resistencia a la abrasión en los materiales.

Las condiciones que limitan el uso de dicho proceso son principalmente las siguientes [9].

- La seguridad dentro de la planta donde se efectúa, ya que el uso de explosivos requiere de las condiciones necesarias para su aplicación y almacenamiento.
- El ruido y la ráfaga de la explosión requieren la protección de los operadores.
- La obtención de los parámetros experimentales dentro del proceso son difíciles de controlar, aunado a que se requiere de personal calificado.

Debido a estos factores han surgido diferentes técnicas de simulación de este tipo de soldadura por explosión como es el cañón de gas comprimido, que permite tener un mayor control de los parámetros del proceso, para reproducir experimentos con menor riesgo.

3.2. Soldadura por impacto

La soldadura por impacto es un proceso de unión entre metales en estado sólido. En él, se utiliza la energía liberada de forma repentina por un cañón de gas, para generar una colisión oblicua, de alta presión entre los elementos a ser unidos ^[10].

En dicho cañón se tiene un proyectil que tiene la función de transportar una placa a alta velocidad, la cual es impactada contra otra, para así conseguir dicha soldadura, (fig. 7)

La condición principal para que la unión entre los componentes ocurra, es que la velocidad de impacto sea menor a la propagación del sonido en cada uno de los componentes de la unión. Si esta condición y otras de tipo geométrico y metalúrgico se cumplen, se favorecerá la formación de un chorro metálico, constituido por las superficies de las partes en colisión produciendo superficies perfectamente limpias para un íntimo contacto a alta presión.

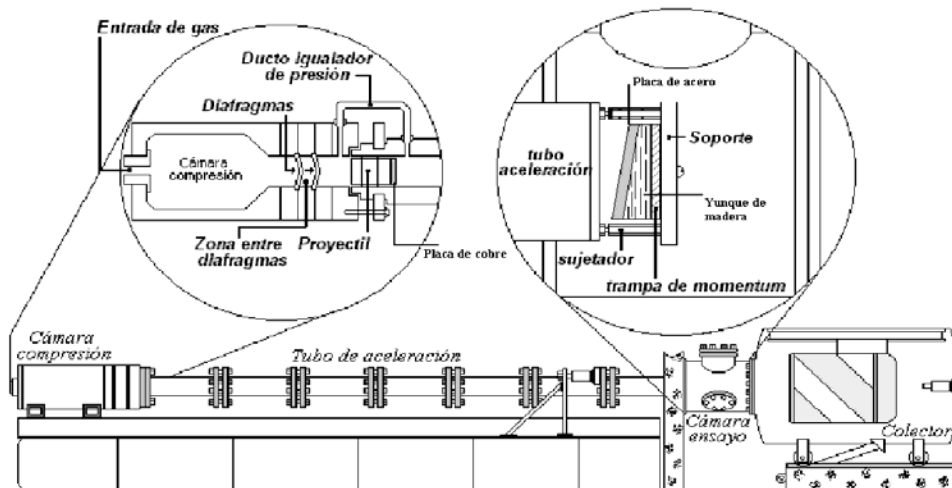


Fig. 7. Cañón de Gas del I.F.U.N.A.M.

Una de las principales características de la soldadura por impacto, es la naturaleza de su intercara, la cual, ha sido motivo de discusiones y ha dado origen a un gran número de estudios para tratar de explicar el mecanismo de su generación, y la predicción de su morfología.

Por otro lado, la soldadura por impacto se realiza a nivel laboratorio y es empleada, principalmente, para el entendimiento de los parámetros tecnológicos involucrados en dicho proceso, determinando las regiones en donde se logra la soldadura, estas regiones permiten pronosticar el tipo de intercara que estará presente para un par de materiales a ser unidos.

El uso de cañones ha permitido determinar regiones, en un plano de velocidad de impacto (V_p) contra ángulo de impacto (β). Investigaciones realizadas han dado como resultado el entendimiento de los parámetros de la soldadura por impacto para el sistema cobre / cobre, que fueron conducidos por Szecket y Crossland en 1979 [8].

Dichas investigaciones definieron la ventana de soldadura por impacto, que es el plano de velocidad de impacto (V_p) contra ángulo de impacto (β) (figura 8.), en la cual se muestran las zonas que fueron caracterizadas por las intercaras de sus experimentos. Señalaron que el límite inferior no es constante del valor de (V_p) y el límite del lado izquierdo de la grafica no es una constante para el ángulo de colisión (β°).

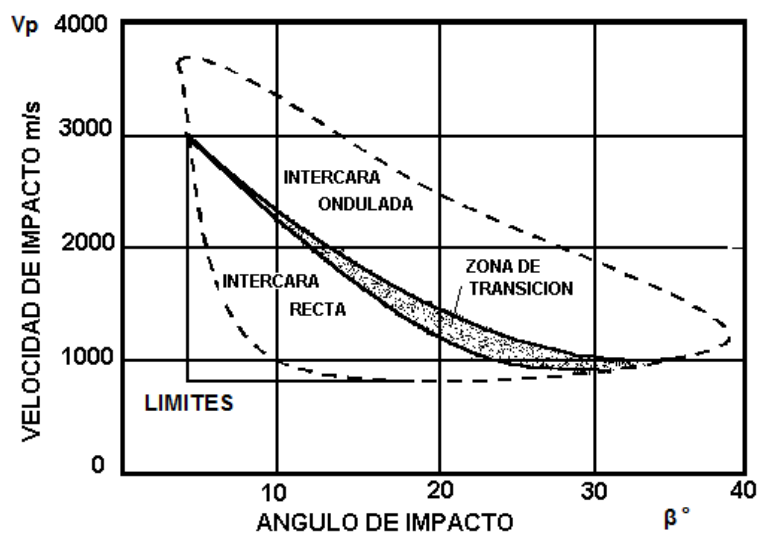


Fig.8 Ventana de soldadura Cu / Cu [8]

Otra investigación llevada a cabo fue la de Witman y Deribas ^[11] quienes relacionaron la velocidad del punto de colisión (V_w) con el ángulo de colisión (β), lo que los llevo a la creación de una ventana de dominio teórico de soldadura por explosión, (fig. 9), en la que representan los hallazgos de su investigación.

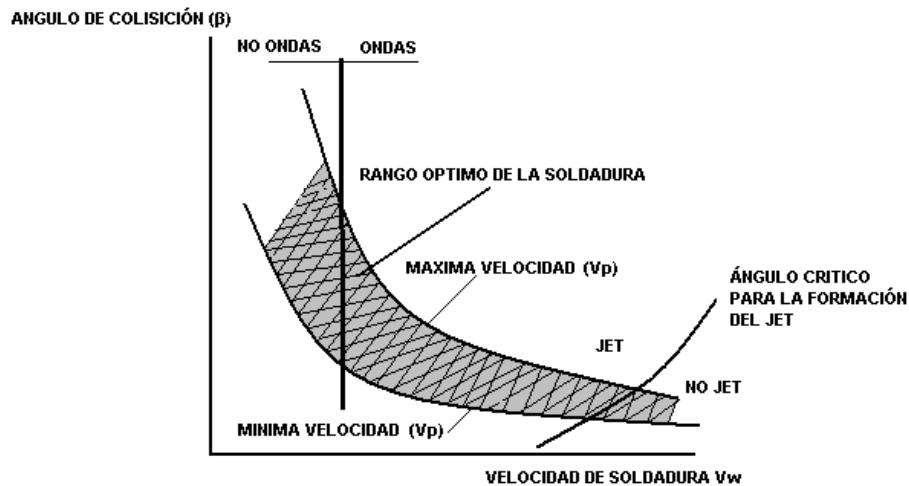


Fig. 9. Ventana de dominio teórico de soldadura por explosión por Witman y Deribas

En esta ventana, el límite inferior se determina mediante la siguiente ecuación:

$$\beta = K_1 \sqrt{\frac{H_v}{\rho V_w^2}}$$

Donde (β) está en radianes y el valor de (K_1) es de 0.6 para superficies superlimpias y 1.2 para superficies menos limpias. (H_v) es la dureza Vickers (kg/mm) y (ρ) es la densidad del material en kg/m³.

Determinaron que el límite superior estaría dado por la siguiente ecuación:

$$V_p = \frac{K_1}{t^{1/4} V_w} \Rightarrow V_w = \frac{K_1}{V_p t^{1/4}}$$

Donde (K_1) es una constante y (t) el espesor de la placa voladora.

Así mismo, se ha demostrado que el espesor de las placas a ser unidas es un factor importante en la morfología de la intercara.

Los resultados de la (fig. 10), muestran la dependencia de la longitud de onda (λ) obtenida en la intercara como función de la razón entre los espesores de la placa voladora y base ^[12].

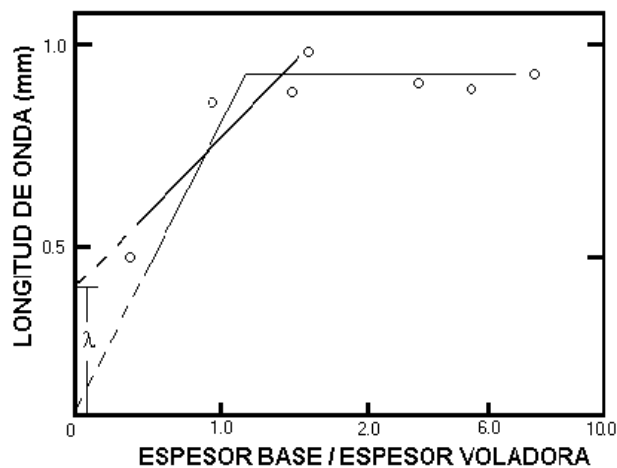


Fig. 10. Variación de la longitud de onda con respecto a los espesores de las placas

3.3 Cañón de Gas

Un cañón es un instrumento que permite acelerar un objeto por medio de una diferencia de potencial eléctrico o magnético, o la liberación repentina de un gas. Se pueden encontrar de formas, tamaños y diámetros variados.

La mayor parte de sus aplicaciones se ha presentado con frecuencia en armas, antitanques, piezas de artillería, entre otros. Por otro lado, los cañones de gas han encontrado su aplicación en el desarrollo científico y tecnológico, en muchas de las investigaciones relacionadas con las altas presiones.

Un cañón de gas comprimido es un equipo mediante el cual, al comprimir un gas bajo ciertas condiciones de presión y liberación repentina, se puede impulsar un proyectil a gran velocidad. Los factores básicos que determinan la velocidad del proyectil (V_p) impulsado son obtenidos de la ecuación de Newton, (fig.11)

$$M \frac{dv_p}{dt} = Mv_p \frac{dv_p}{dx_p} = P_p A$$

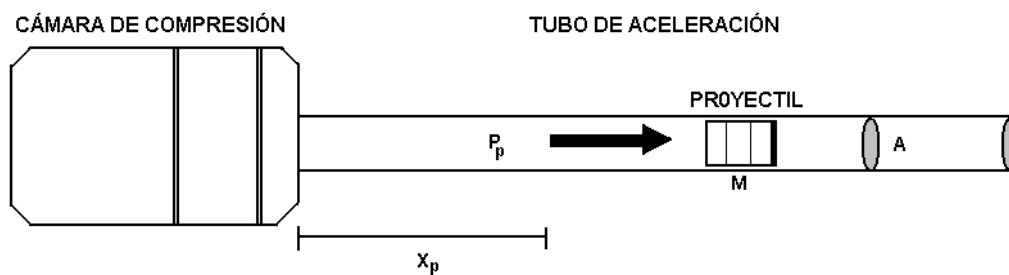


Fig. 11. Representación esquemática de los factores a considerar en un cañón

Donde: (M) es la masa del proyectil, (A) es el área de la sección transversal del cañón, (P_p) es la presión de propulsión detrás del proyectil, y (V_p) es la velocidad del proyectil en un punto del desplazamiento (X_p).

Cuando el proyectil dentro del cañón empieza a moverse deja, momentáneamente, un espacio de menor presión detrás de él; si se idealiza al gas como un conjunto de capas, cada capa detrás del proyectil se mueve hacia el espacio evacuado provocando así una caída de presión, conforme ésta se mueve, hacia atrás genera la llamada onda de “rarefacción” que se mueve a la velocidad de propagación del sonido en el gas. Conforme más rápido se mueva ésta capa y menor sea la caída de presión, mayor es el empuje del gas.

Actualmente, los cañones de gas comprimido están siendo ampliamente utilizados para establecer los parámetros involucrados en la compactación dinámica de materiales, la elucidación de dominios de soldadura por impacto, y en la definición del comportamiento de materiales bajo altas presiones.

Las investigaciones conjuntas realizadas en los rubros de compactación dinámica, soldadura por impacto y propiedades de materiales, entre el I.F.U.N.A.M. y la E.S.I.Q.I.E.-I.P.N., a lo largo de los últimos años, han mostrado la gran versatilidad y utilidad de una herramienta de procesamiento de materiales única en nuestro país, como lo es el cañón de gas comprimido del I.F.U.N.A.M.

En México, el desarrollo de esta tecnología ha sido ligado, principalmente, a las restricciones impuestas en el uso de los explosivos y en la dificultad de estudiar sistemáticamente los parámetros involucrados en dichos procesos, de una manera menos riesgosa, en las universidades y centros de investigación.

El desarrollo de procesos para la obtención de nuevos materiales, ha permitido ampliar la gama de propiedades esperadas para su uso en la ingeniería.

El cañón de gas fue instalado en el Instituto de Física en 1985, cuya finalidad es proporcionar a los investigadores un instrumento que les permita el estudio del comportamiento de materiales sometidos a Altas Presiones. (fig.12)

Dicho cañón consta básicamente de 4 elementos principales^[13]:

- La Cámara de Compresión
- El Tubo de Aceleración
- La Cámara de Ensayo
- El Colector



Fig. 12. Foto del cañón de gas

3.3.1. Cámara de compresión

La Cámara de Compresión es un cilindro de acero al carbono 1043, con un diámetro interior y exterior de 225 mm y 320 mm respectivamente, y una longitud de 700 mm. Tiene un volumen interior de 20.1 dm³ y se encuentra diseñado para soportar 122 Mpa,** habiendo sido probada con agua hasta 55 Mpa. La cámara se encuentra montada sobre una viga tipo "I" de ocho pulgadas mediante dos soportes.

Dicha Cámara se encuentra dividida en dos partes, ambas internas, que son la Zona entre Diafragmas y la Cámara de Compresión donde son colocados dos diafragmas que forman parte del sistema de disparo que permiten el llenado de ambas zonas por medio del gas suministrado de manera simultánea hasta alcanzar la presión deseada para el disparo.

La finalidad de la Cámara de compresión es mantener el gas encerrado que le es suministrado entre sus dos zonas, para posteriormente ser expulsado repentinamente y así acelerar el proyectil. (fig.13.)

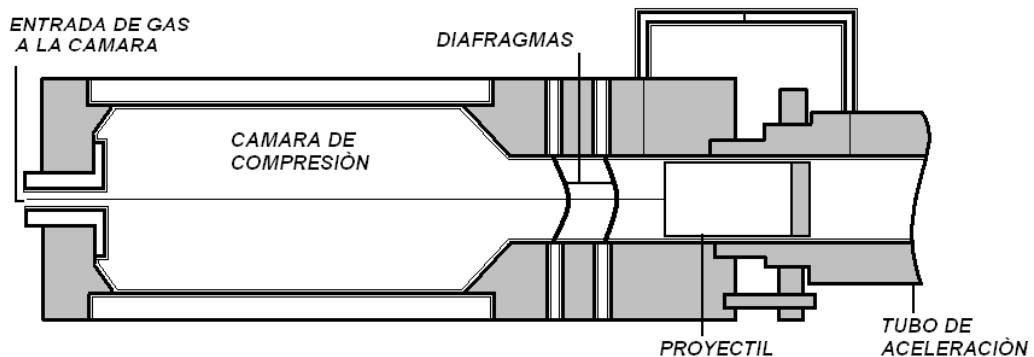


Fig. 13. Cámara de Compresión

** Mpa. = 10⁸ pascal, unidad básica de presión.

3.3.2. Tubo de aceleración

El tubo de aceleración está formado por quince tramos de longitud inferior a 1 m, con 75.50 mm de diámetro interior y 130 mm de diámetro exterior. Los primeros 14 tramos son de acero inoxidable tipo 316. La unión entre tramos se realiza gracias a las bridas que se fijan en los extremos, utilizando la rosca exterior maquinada en los extremos de cada tramo.

La longitud total del tubo de aceleración es de 12.76 m. Al igual que la cámara de compresión, está soportado por la viga tipo "I". Los soportes en forma de "Y" cumplen dos funciones: permitir la alineación y dejarlo en libertad de recular (echarse para atrás) cuando la velocidad del disparo sea muy elevada.

3.3.3. Cámara de ensayo

La cámara de ensayo es un cilindro de acero al carbono de 3/8" tipo A-285C. Mide 489 mm de longitud y tiene 619 mm de diámetro exterior, en sus extremos están colocadas bridas de 3/4" de espesor, mismas que sirven para sujetarla al muro. Sobre la cámara de ensayo se encuentran distribuidas 3 chimeneas radiales con una separación angular de 120 ° entre sus ejes.

Dichas chimeneas se encuentran a una distancia de 269 mm, que va desde el muro a su ubicación, y están selladas con tapas de 280 mm de diámetro del mismo material. Estas chimeneas permiten entre otras funciones, extraer información eléctrica. (fig. 14)

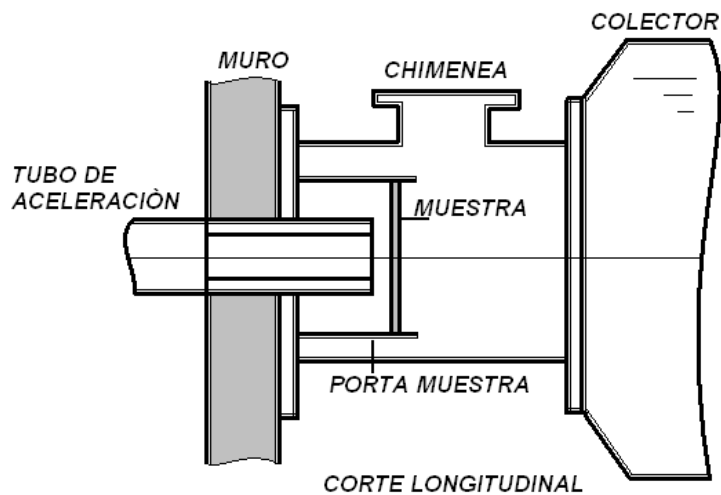


Fig. 14. Cámara de Ensayo

3.3.4. Odómetro

Como se mencionó en el apartado anterior una de las chimeneas radiales permite extraer la información eléctrica a través del Odómetro, el cual es colocado a la salida del tubo de aceleración y antes del blanco.

El Odómetro es un dispositivo experimental para cuatro pares de agujas con interruptores eléctricos, que son cerrados al momento en que la placa del proyectil las cortocircuita y manda una señal a un osciloscopio.

La colocación del Odómetro es antes de montar el blanco y para ello se ha tomado un registro de la separación de cada una de las agujas que lo conforman. (fig.15)

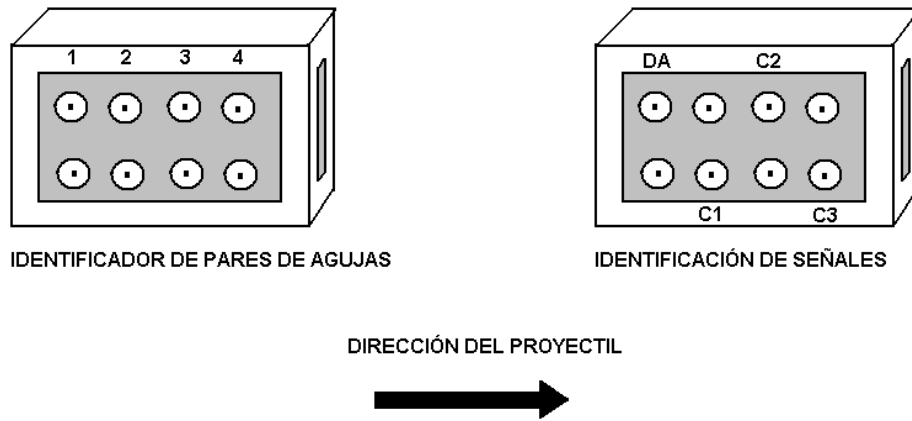


Fig. 15. Odómetro

Los experimentos realizados en el Cañón de Gas son muy rápidos por lo que se requiere que el Odómetro sea preparado junto con el osciloscopio antes de registrar los tiempos en que se lleva a cabo cada experimento.

Para ello el primer par de agujas que toca el proyectil en curso es usado como un “arrancador” de la traza del osciloscopio en tanto que los otros tres pares de agujas generan tres picos, los cuales permiten medir el tiempo de separación que hay entre pico y pico. (fig. 16)

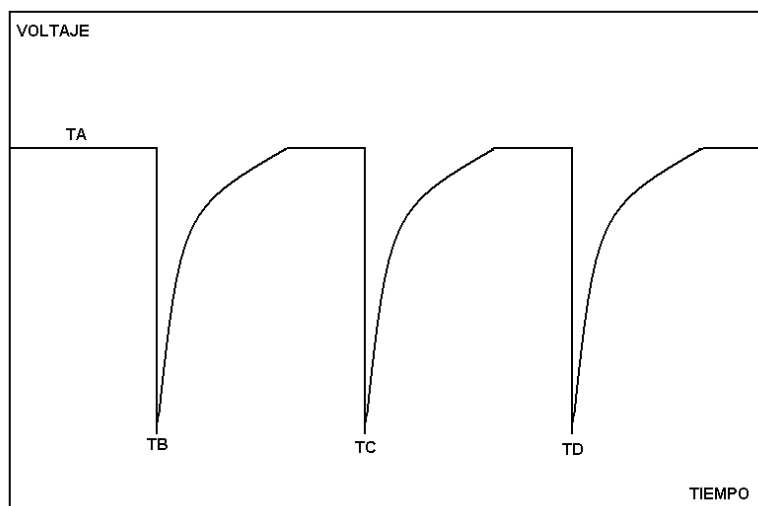


Fig. 16. Señales del Odómetro

Los cuatro pares de agujas corresponden a las cuatro señales que registra el osciloscopio (t_A , t_B , t_C , t_D) mientras que la t_A , corresponde al arrancador (D_A) que es la traza de los otros tres pares de agujas, se tiene ahora la (t_B) que corresponde a (C_1) y es el primer pico, (t_C) que corresponde a (C_2) y es el segundo pico y por último se tiene (t_D) que corresponde a (C_3) y es el tercer pico.

Consecuentemente las distancias de separación medidas para cada par de agujas es dividida por los tiempos registrados en C_1 , C_2 y C_3 , de donde se tienen tres velocidades de proyectil y finalmente se toma una velocidad promedio de ellas que tienen una variación mínima.

3.3.5. Colector

El colector es un tanque cilíndrico de 3.5 m de longitud y 1.2 m de diámetro interior, fabricado de placa de acero A-285-C de 3/8" de espesor, cuyo diseño está hecho para soportar 600 KPa. Cuenta con un riel de 3 m de longitud, que se encuentra soldado en la parte superior del mismo, por donde corren unos rodamientos, unidos al parabolas. Al fondo del tanque se ubican dos amortiguadores hidráulicos que terminan de frenar al parabalas.

Además de integrar el sistema de frenado, el colector tiene la finalidad de contener el gas utilizado para evitar que el flujo del mismo, a alta velocidad, provoque daños.

Finalmente, posee un sistema de ruedas adaptado a las patas, que permite ajustar la altura de modo que pueda alinearse con el eje del tubo de aceleración, sujetándolo a la cámara de ensayo. (fig. 17)

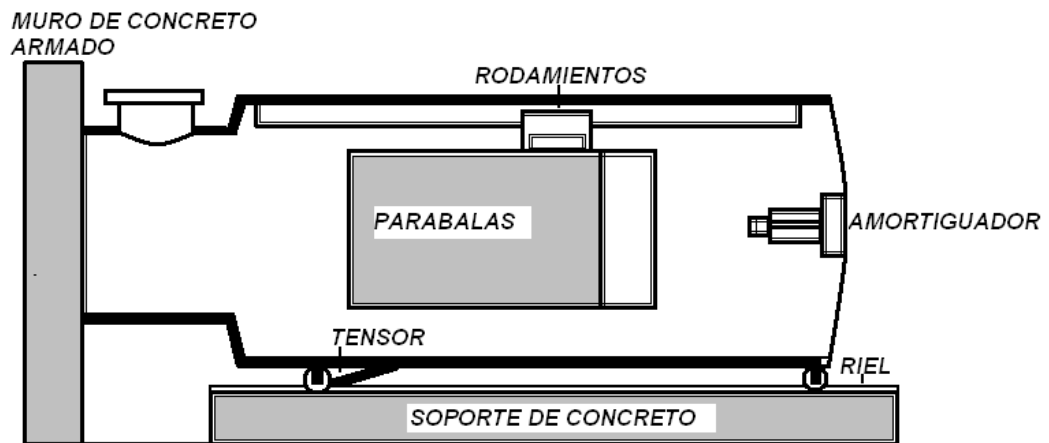


Fig. 17. Colector

3.4. Relación entre la soldadura por explosión y la soldadura por impacto

Existen dos arreglos para lograr la soldadura por explosión en cuerpos planos, el primero es el arreglo inclinado y, el segundo, el paralelo. (fig. 18)

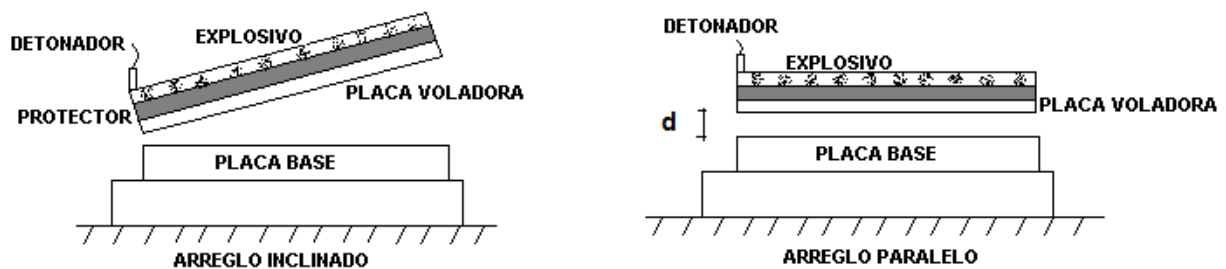


Fig. 18. Arreglos para lograr Soldadura por Explosión

En estos arreglos, las variables independientes están representadas por la distancia de separación (d), el ángulo de inclinación, la velocidad de detonación (V_D) y la velocidad de placa voladora (V_P). Las variables dependientes son el ángulo de colisión, la velocidad del punto de colisión (V_w) y, la velocidad de la placa voladora relativo al punto de colisión (V_i), (fig. 19).

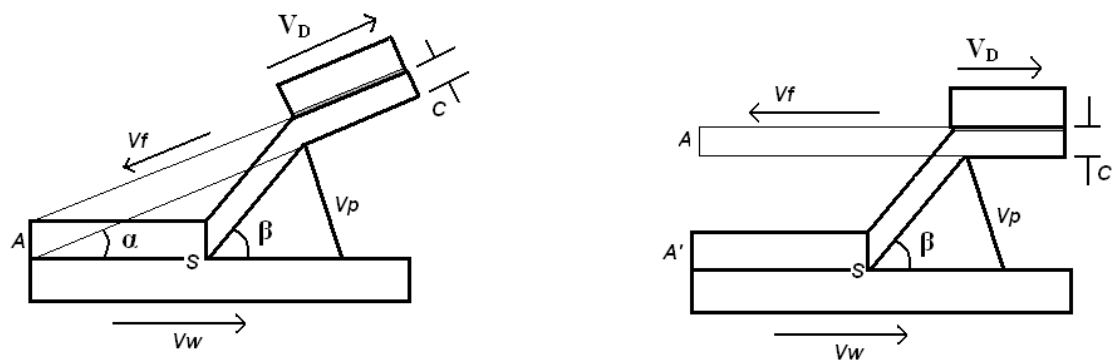


Fig.19. Variables presentes en los arreglos de la Soldadura por Explosión

Por lo tanto, la soldadura por impacto es un medio auxiliar en la determinación de los parámetros que involucra el proceso de la soldadura por explosión. Es por ello que los equipos como los cañones de gas han logrado reproducir las condiciones de impacto en donde la soldadura tiene lugar y tiene una ventaja en el mejor control de los parámetros de unión. De tal manera, que se tiene una herramienta útil para estudiar sistemáticamente el mecanismo y los parámetros de unión por impacto.

Una vez que se han determinado estas condiciones, pueden ser repetidas sin ningún problema en la soldadura por explosión. El siguiente arreglo (fig. 20) muestra la relación que existe entre la soldadura por impacto y la soldadura por explosión.

La diferencia que radica en estos dos métodos es principalmente que la soldadura por explosión es una tecnología reconocida y aplicada en países desarrollados, mientras que la soldadura por impacto es una técnica de simulación del proceso de la soldadura por explosión, a través de cañones de gas que permiten tener un mayor control de los parámetros del proceso de una manera menos riesgosa, en las universidades y en los centros de investigación.

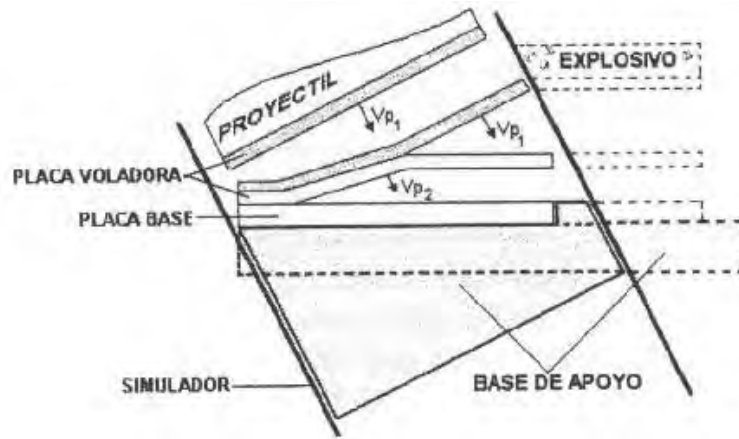


Fig. 20. Relación entre la soldadura por explosión e impacto.

Capítulo IV. Caracterización de la soldadura por impacto

La realización de los experimentos se llevó a cabo en el laboratorio de altas presiones del I.F.U.N.A.M., empleando materiales disímiles. Las muestras estudiadas corresponden a los sistemas Acero-Cobre y Cobre-Acero, donde se analizó la unión generada en ambos sistemas, su deformación y también se buscó un mejor entendimiento de la generación de la intercara en cada sistema.

4.1. Materiales utilizados

Los materiales que se utilizaron fueron las placas de Acero de bajo carbono AISI-SAE 1020. La composición del acero utilizado fue: 0.3% máximo de carbono, manganeso hasta 0.6%, silicio, fósforo y azufre, estos últimos en porcentajes mínimos. Y presenta las siguientes características: Punto de fusión de 1538 ° C, una dureza de 200 HV y una densidad de 7.87 g/cm³.

Este tipo de Acero de bajo carbono es relativamente suave y dúctil y no puede endurecerse en forma apreciable por temple. Representa el tonelaje más grande de todo el acero producido. Se usa para hoja de lata, láminas para carrocería de automóviles, alambres de cerca, elementos estructurales ligeros y pesados (bastidores de automóviles, vigas I, etc.), y para barras que se utilizan para maquinar partes.

Por otra parte se tiene la barra de Cobre con 99.9% de pureza (cobre comercial), tiene un punto de fusión de 1083 ° C, una dureza de 80 HV y densidad de 8.9 g/cm³. El Cobre puro sin aleación se usa para conductores eléctricos en alambres, barras y colectores y por sus propiedades sobresalientes de conductividad eléctrica y de calor, resistencia a la corrosión y facilidad de soldar tuberías.

4.2. Diseño del blanco y proyectil

El diseño del blanco fue realizado sobre la base de referencias tomadas de los proyectos de investigación dentro del laboratorio tomando en cuenta las dimensiones del tubo de aceleración del cañón y de la cámara de ensayo, de manera que está compuesto de una placa de acero (placa soporte) que sostiene un yunque de madera, el cual soporta a su vez la placa base de acero o cobre que es expuesta al impacto. (fig. 21)

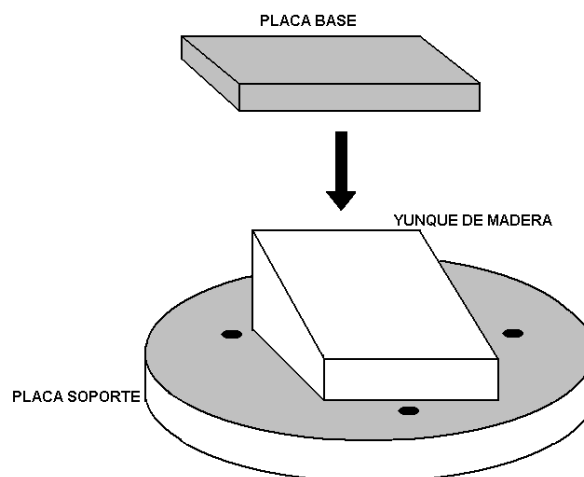


Fig. 21. Componentes del blanco

La placa soporte, se fabricó con un diámetro de 130 mm y con un espesor de 12 mm en dicho disco se perforaron tres puntos de 1/8" (3.1 mm) a un radio de 51 mm y con una separación angular de 120° entre sus ejes. (fig. 22)

Las placas base de cobre y acero de bajo carbono de espesor entre 4-6 mm se cortaron a 8 cm², como lo muestra (fig. 23), la superficie de dicha placa fue preparada hasta dejarla libre de oxido para su colocación en el blanco.

El ángulo de impacto se controló por medio del yunque de madera de 8 cm² con cortes en ángulos de 10, 20 y 25 grados.

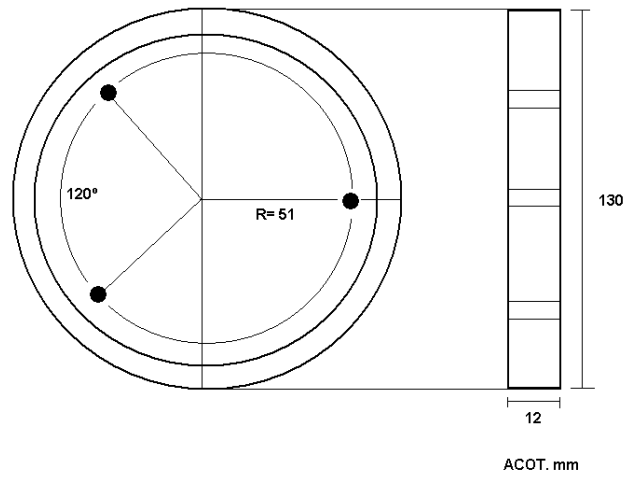


Fig. 22. Placa soporte del blanco

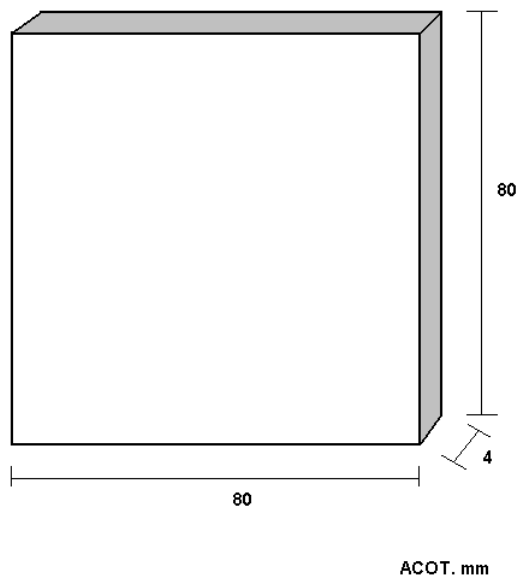


Fig. 23. Placa base del blanco

Finalmente, el último elemento que integra el blanco son los sujetadores que son hechos de una barra hexagonal de latón, (fig. 24). Estos tienen la finalidad de fijar el blanco a la salida del tubo de aceleración dentro de la cámara de ensayo.

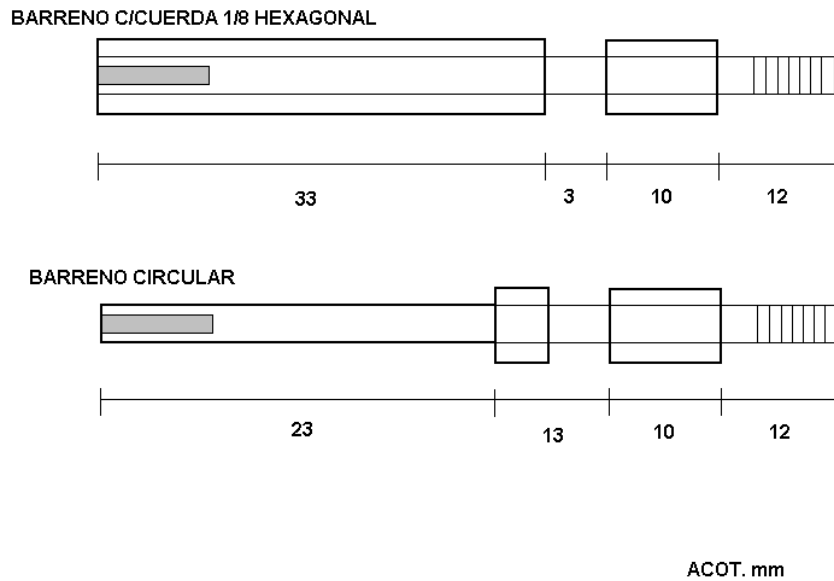


Fig. 24. Sujetadores de latón

Algunos sujetadores hexagonales se modificaron ya que al ser colocados en la placa soporte cubrían una dimensión que no permitía la colocación del yunque de madera y de la placa base que forman parte del blanco, por lo que se maquinaron en forma circular hasta un diámetro de 7 mm.

De la placa de Cobre y una de Acero de bajo carbono se cortaron discos (placa voladora) con un diámetro de 72 mm y un espesor de 3.0 a 3.4 mm. Este disco se acopla al proyectil únicamente con cinta adhesiva de doble pegamento como se muestra en la (fig. 25).

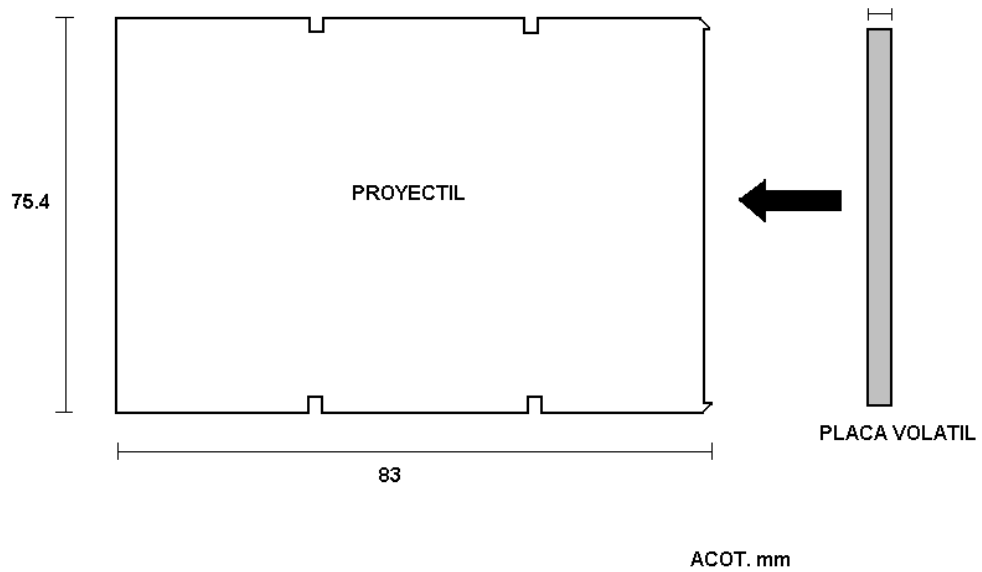


Fig. 25. Dimensiones del proyectil

Desde el inicio de las investigaciones en el laboratorio de altas presiones en el I.F.U.N.A.M., se han fabricados diversos proyectiles variando su diseño con la finalidad de:

- No dejar escapar el aire entre sus paredes y las del tubo de aceleración.
- Mantener la perpendicularidad posible entre la placa impactante y el eje del cañón de gas.
- Soportar la aceleración correspondiente a las presiones manejadas, de tal forma que el proyectil no sufra ninguna deformación en el momento de ser impulsado.

Actualmente están diseñados conforme a las dimensiones mostradas en la figura 25 y son fabricados de material impact 2000 con una masa aproximada de 350 g.

4.3. Velocidades y ángulo de colisión

Una vez concluidos los experimentos de esta investigación se registraron los datos necesarios, que se presentan en la tabla 1.

EXP. No.	ÁNGULO	TIPO DE SOLDADURA	VELOCIDAD m/s
1	10°	COBRE-ACERO	650
2	10°	ACERO-COBRE	610
3	20°	COBRE-ACERO	471
4	20°	ACERO-COBRE	452
5	20°	COBRE-ACERO	489
6	20°	ACERO-COBRE	502
7	25°	COBRE-ACERO	620
8	25°	ACERO-COBRE	580

Tabla 1. Datos experimentales

En la tabla 1, se muestra el número del experimento, el ángulo de inclinación, el sistema al que pertenece la soldadura y la velocidad (m/s) en que se realizó cada uno de ellos.

Con estos datos se establecieron dos Ventanas de Soldadura “Velocidad - Ángulo de colisión” donde se muestra cada sistema de unión, (fig. 26) y (fig. 27).

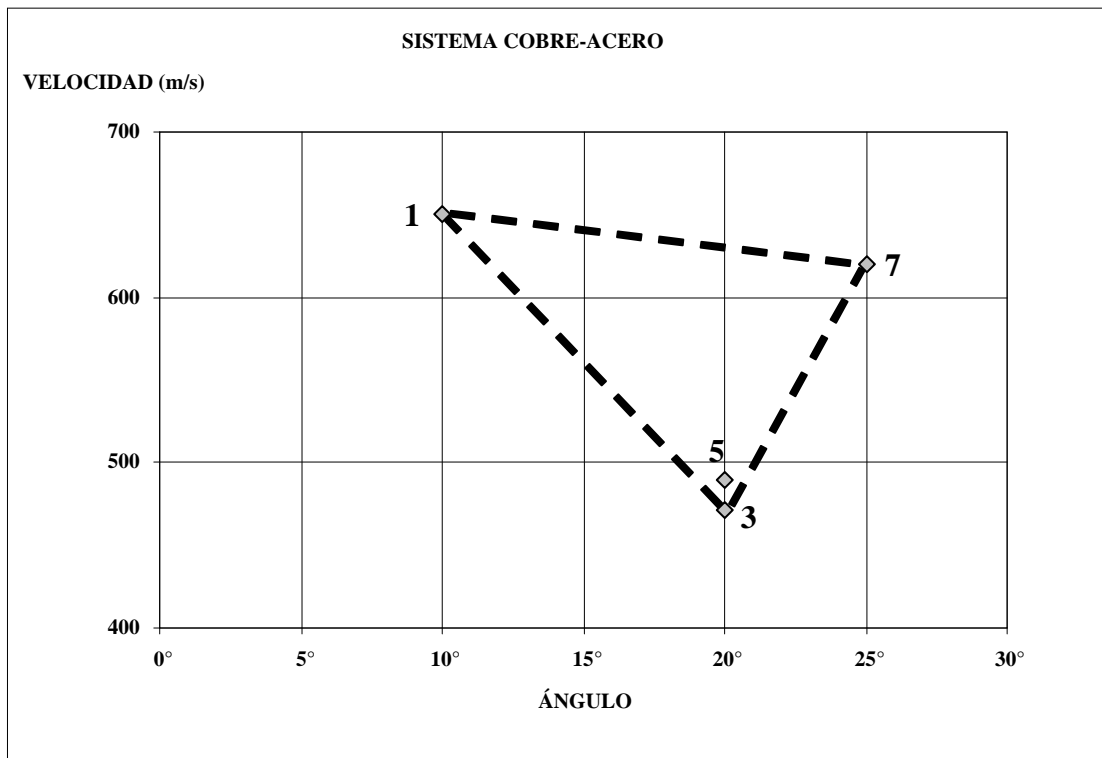


Fig. 26. Ventana de Soldadura para el Sistema Cobre-Acero

En la ventana anterior tenemos representados esquemáticamente cada experimento para el sistema Cobre-Acero en un plano de Velocidad (m/s) contra Angulo de colisión y se representa la zona de unión donde encontramos soldadura por este sistema de unión.

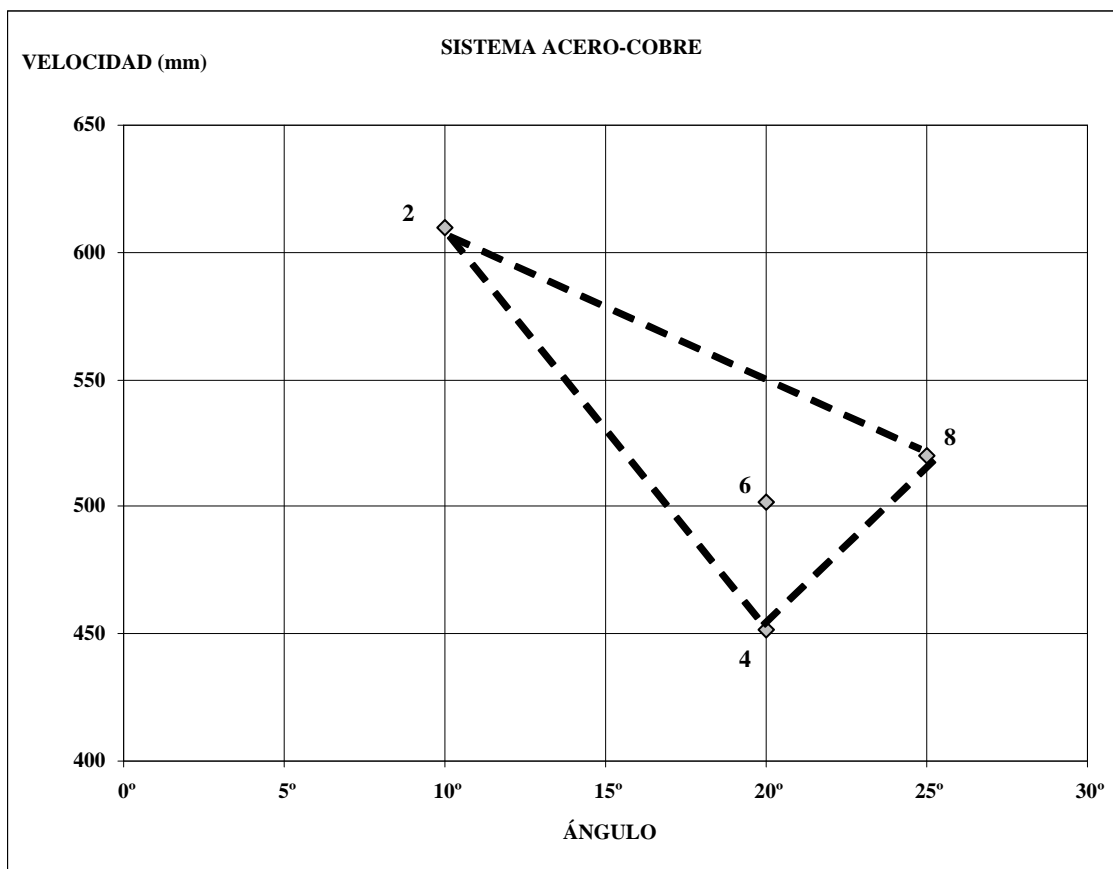


Fig. 27. Ventana de Soldadura para el Sistema Acero-Cobre

En la ventana anterior tenemos representados esquemáticamente cada experimento para el sistema Acero-Cobre en un plano de Velocidad (m/s) contra Ángulo de colisión y se representa la zona de unión donde encontramos soldadura para este sistema de unión.

Como se observa en ambas Ventanas el objetivo principal de esta investigación fue realizar la simetría en cada experimento, esto quiere decir, el mismo ángulo a una velocidad lo más semejante posible, pero en diferente sistema de unión, esto se observa en los experimentos mostrados en las (fig. 26 y 27) que corresponden a; 1-2, 3-4, 5-6 y 7-8, respectivamente. La finalidad de realizar la simetría en ambos experimentos es llevar acabo el estudio del comportamiento de los materiales en ambos sistemas.

Como ya se había mencionado anteriormente dentro del laboratorio de Altas Presiones se han llevado a cabo, investigaciones, una de ellas consistió en crear la Ventana de Soldadura para el Sistema Cobre-Acero ^[14], a cargo del Ing. Isaac S. Medina Rabadán de la Escuela Superior de Ingeniería Química e industrias extractivas del Instituto Politécnico Nacional. (fig. 28)

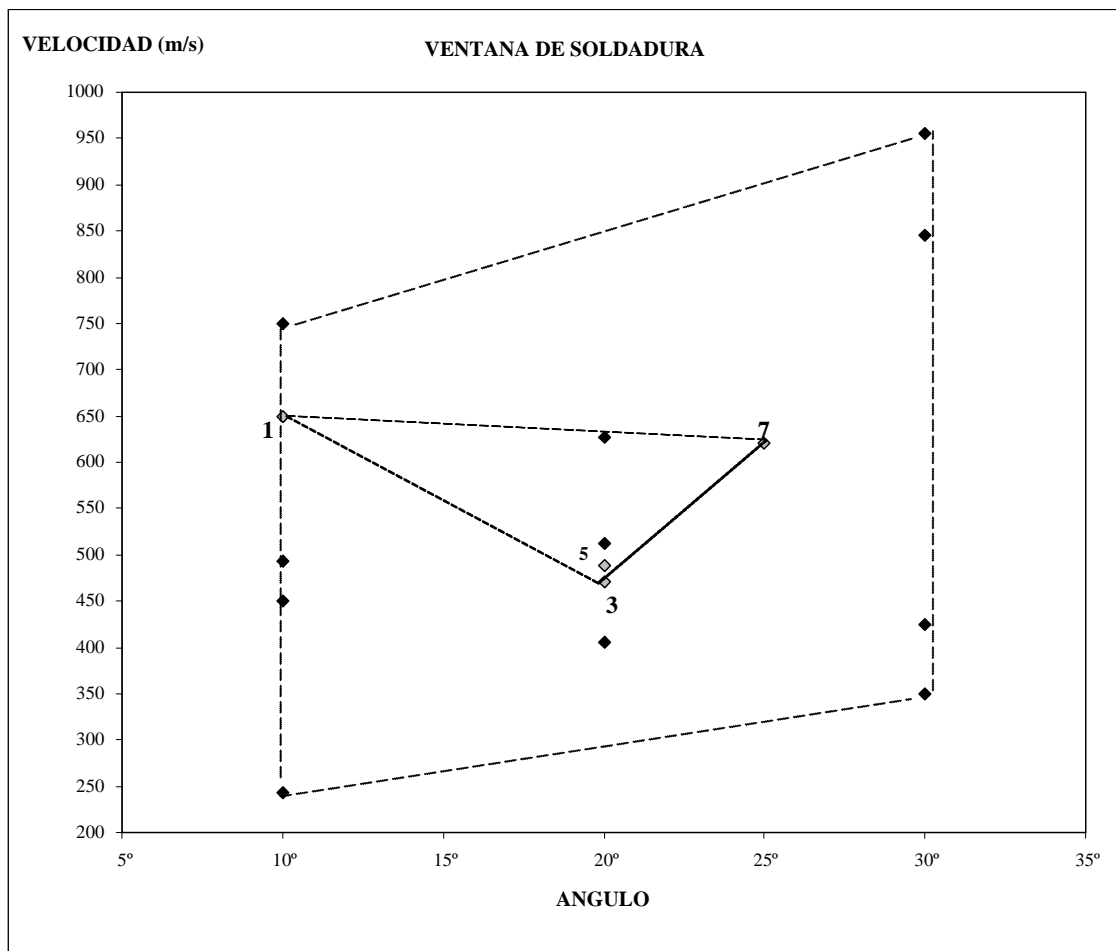


Fig. 28. Ventana de Soldadura para el Sistema Cobre-Acero

En esta ventana se incorporaron los datos obtenidos de esta investigación y se comprobó que caen dentro de dicha ventana lo cual hace indicar y reafirmar que se encuentran dentro del dominio de la Soldadura por impacto en el Sistema Cobre-Acero

A continuación se mostrarán cada uno de los experimentos de ambos sistemas, cabe mencionar que la flecha indica la dirección en que se llevo a cabo la soldadura.

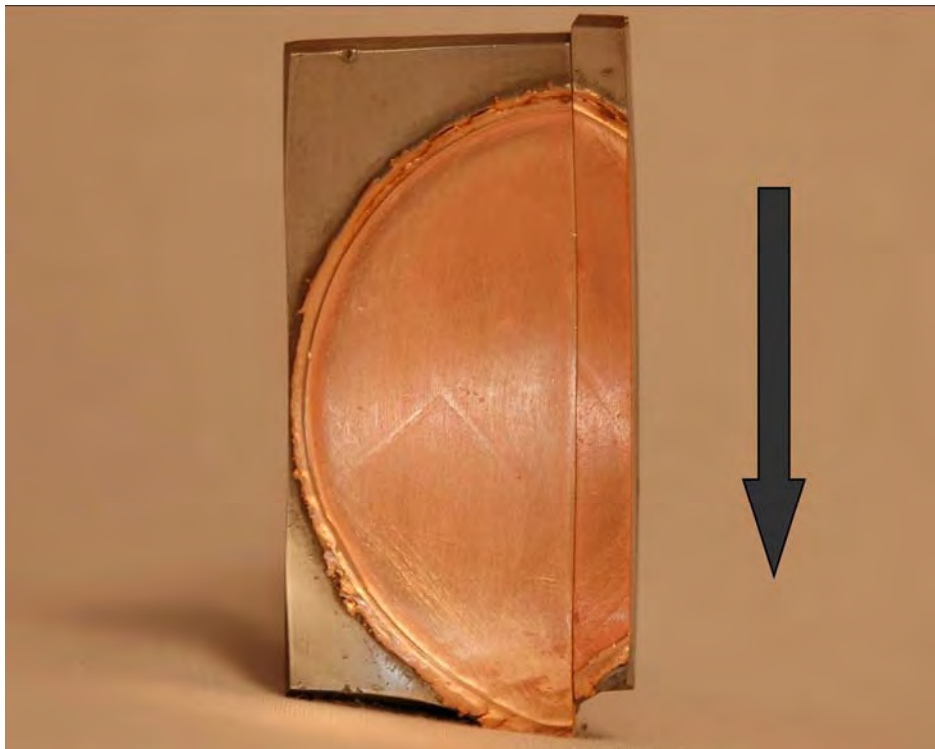


Fig. 29. Experimento 1/ Sistema Cobre-Acero, velocidad de impacto 650 m/s con un ángulo de 10°

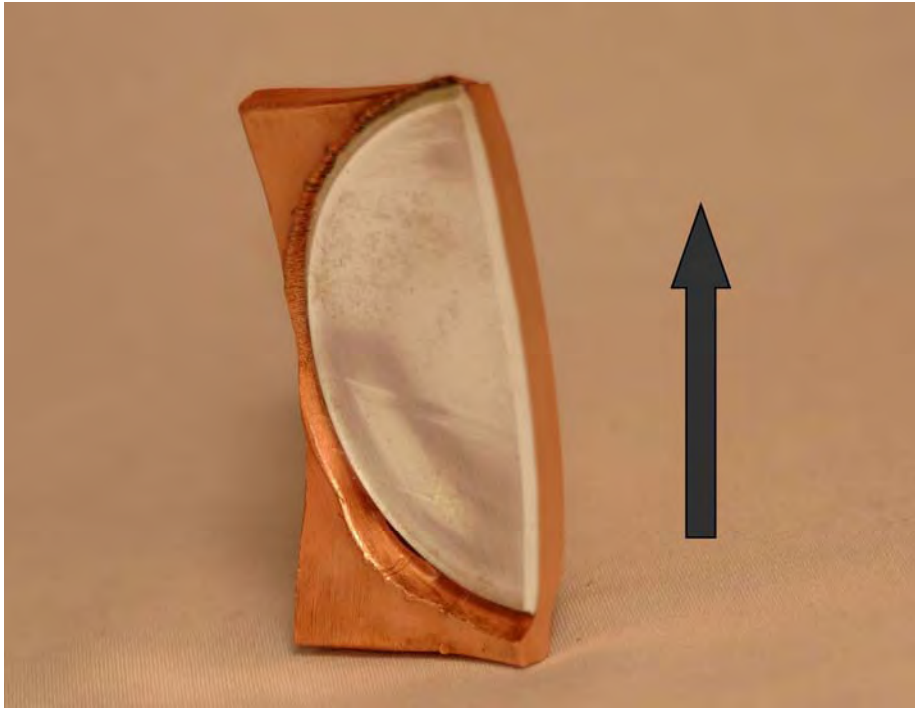


Fig. 30. Experimento 2/ Sistema Acero-Cobre, velocidad de impacto 610 m/s con un ángulo de 10°

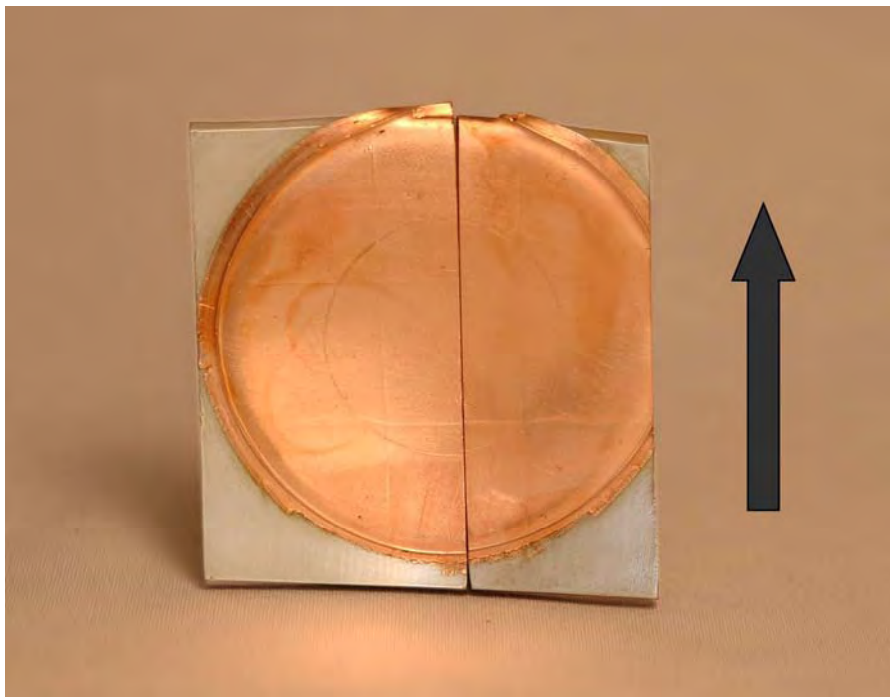


Fig. 31. Experimento 3/ Sistema Cobre-Acero, velocidad de impacto 471 m/s con un ángulo de 20°

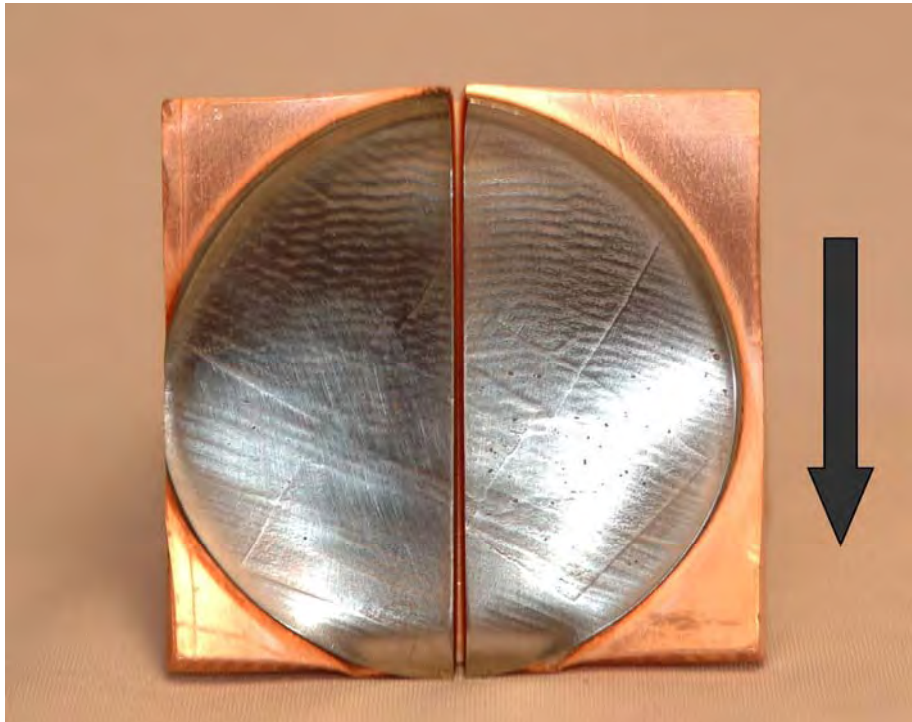


Fig. 32. Experimento 4/ Sistema Acero-Cobre, velocidad de impacto 452 m/s con un ángulo de 20°

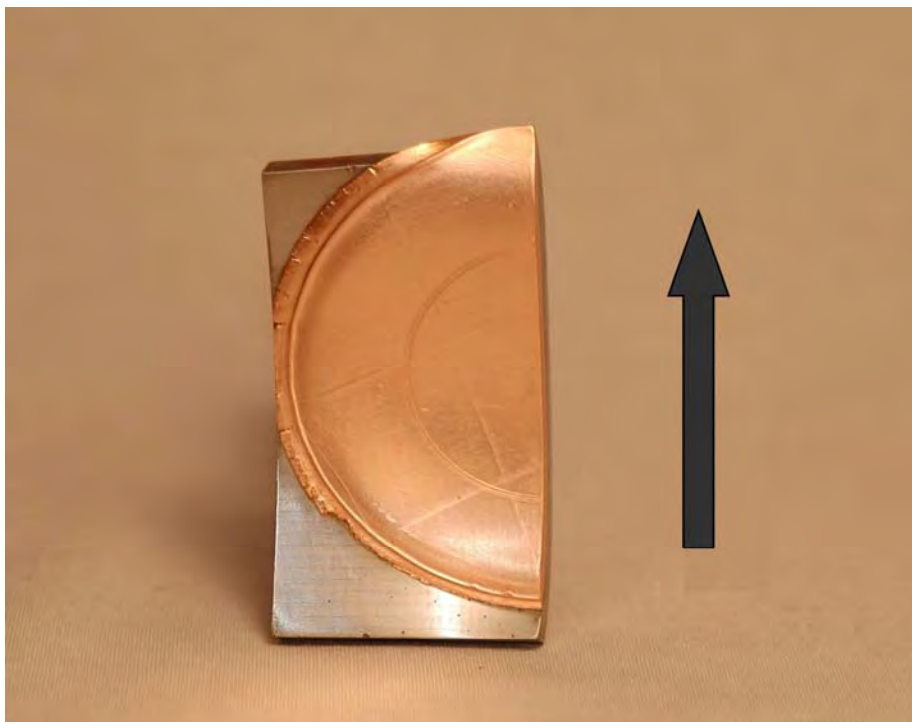


Fig. 33. Experimento 5/ Sistema Cobre-Acero, velocidad de impacto 459 m/s con un ángulo de 20°

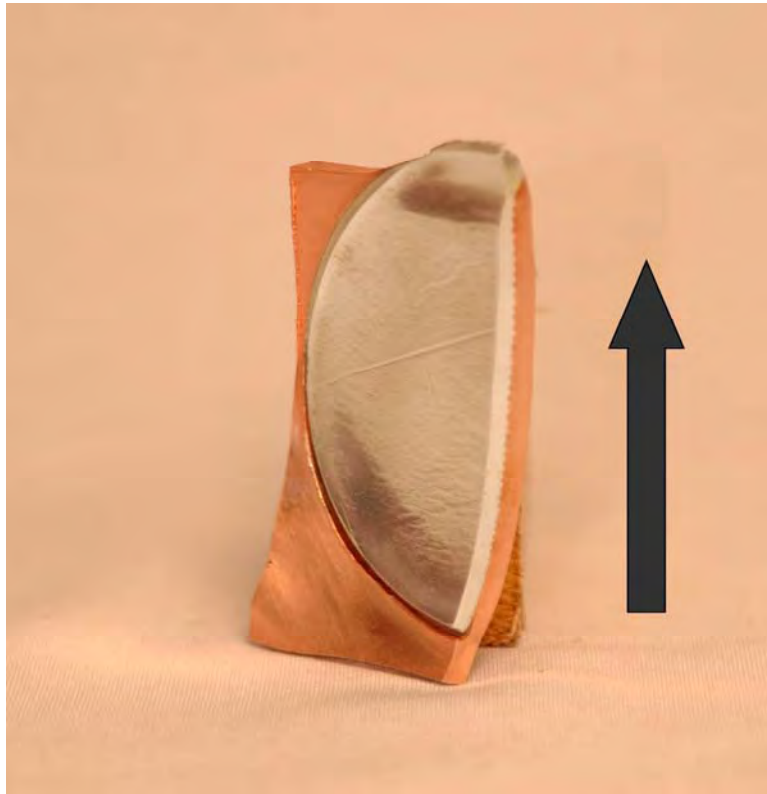


Fig. 34. Experimento 6/ Sistema Acero-Cobre, velocidad de impacto 502 m/s con un ángulo de 20°

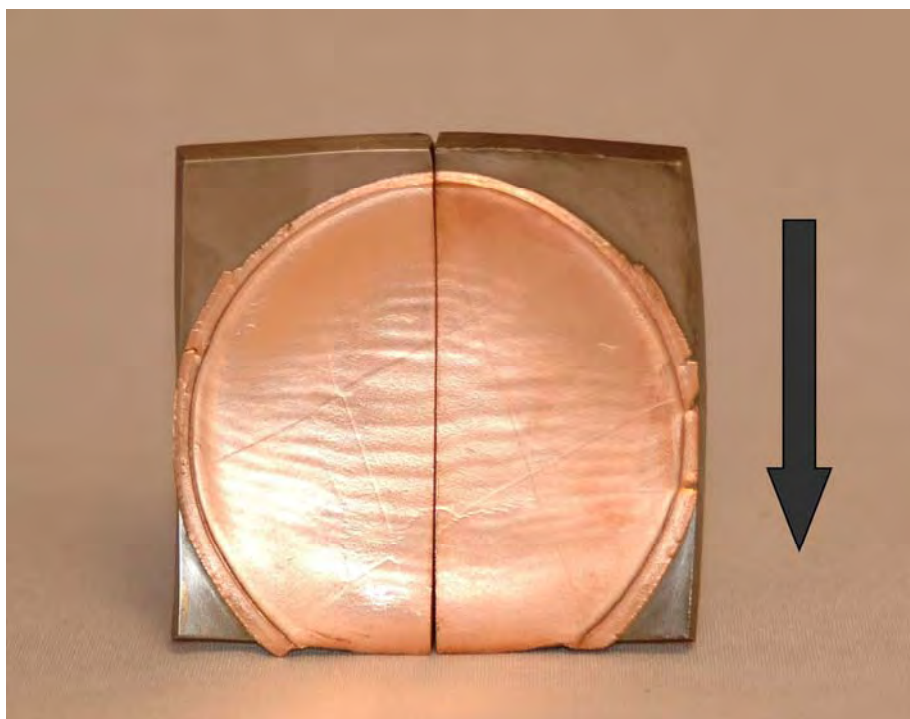


Fig. 35. Experimento 7/ Sistema Cobre-Acero, velocidad de impacto 620 m/s con un ángulo de 25°

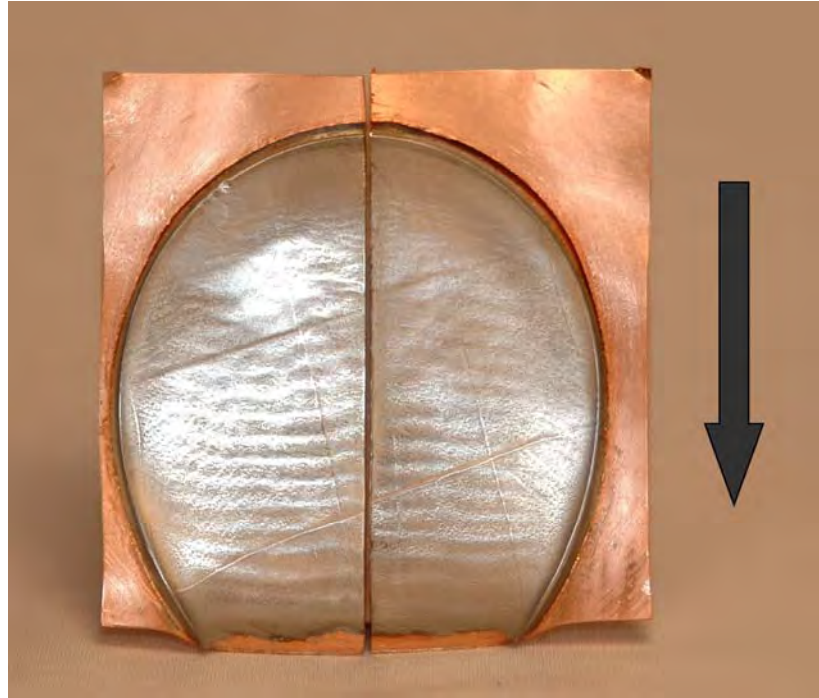


Fig. 36. Experimento 8/ Sistema Acero-Cobre, velocidad de impacto 580 m/s con un ángulo de 25°

Una parte fundamental de esta investigación consistió en la caracterización de la microestructura en la zona de la interfase, ya que las propiedades mecánicas que presentan los materiales están estrechamente relacionadas con su forma y su composición, como se verá en el siguiente apartado.

4.4. Preparación de las muestras

De las soldaduras obtenidas se ocupó la mitad de cada una para formar las probetas metalográficas, (fig. 37). Cada pieza fue desbastada manualmente con abrasivos de carburo de silicio (lijas) del orden de 220, 320, 400, 600, 1000, 1200 y 1500 procurando que en cada cambio las líneas producidas por el desbaste en la probeta fueran homogéneas, es decir, que no hubieran más gruesas o estuvieran atravesadas.

Una vez que se concluyo con la lija 1500, las piezas fueron pulidas con alumina (óxido de aluminio) de $0.3\ \mu\text{m}$ mediante el uso de un disco cubierto por un paño con un movimiento rotatorio a diferentes velocidades, girando la muestra cada 90° y moviéndola continuamente del centro del disco a la periferia.

Eliminando de esta forma las líneas producidas en el desbaste. Posteriormente, se dio un pulido final con alumina de $0.05\ \mu\text{m}$ hasta alcanzar un acabado a espejo siguiendo los pasos mencionados anteriormente. Cabe señalar, que en este caso la velocidad utilizada debe ser menor y que el procedimiento se efectúa bajo previa limpieza del paño para evitar que residuos de la alumina $0.3\ \mu\text{m}$ rayen el material.

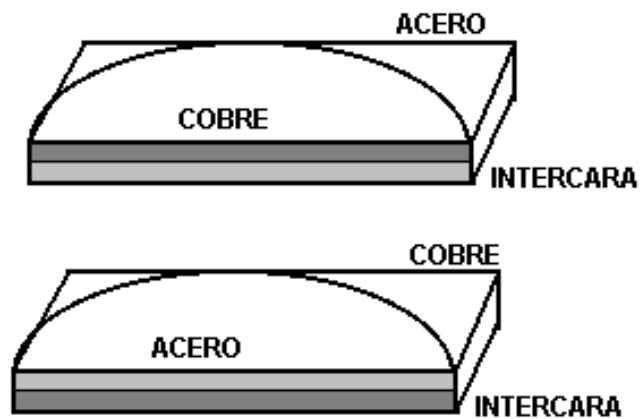


Fig. 37. Probetas Metalograficas

4.5. Análisis de resultados de cada experimento

A continuación se muestra el análisis que se desarrollo en cada experimento a partir del estudio de la deformación, la microdureza y el estudio de la intercara en el caso de la existencia de ondas en dicha muestra del experimento.

4.5.1. Deformación de muestras

Para determinar la deformación de las muestra tomadas de ambos sistemas de soldadura se llevaron a cabo las mediciones correspondientes, (fig. 38). Se tomaron siete medidas distribuidas uniformemente a lo largo de la intercara en el orden que se inicio la soldadura de ambos materiales. Las mediciones se hicieron con ayuda de un Perfilómetro con el que cuenta el Instituto de Física, dentro de su taller de manufactura.

Se realizó una gráfica Intercara-Deformación para cada experimento, en ella se presenta una recta de espesor inicial y una curva de espesor final que corresponden a los valores medidos de las placas de los materiales antes de ser soldados y los valores tomados después de la soldadura respectivamente en los mismos puntos.

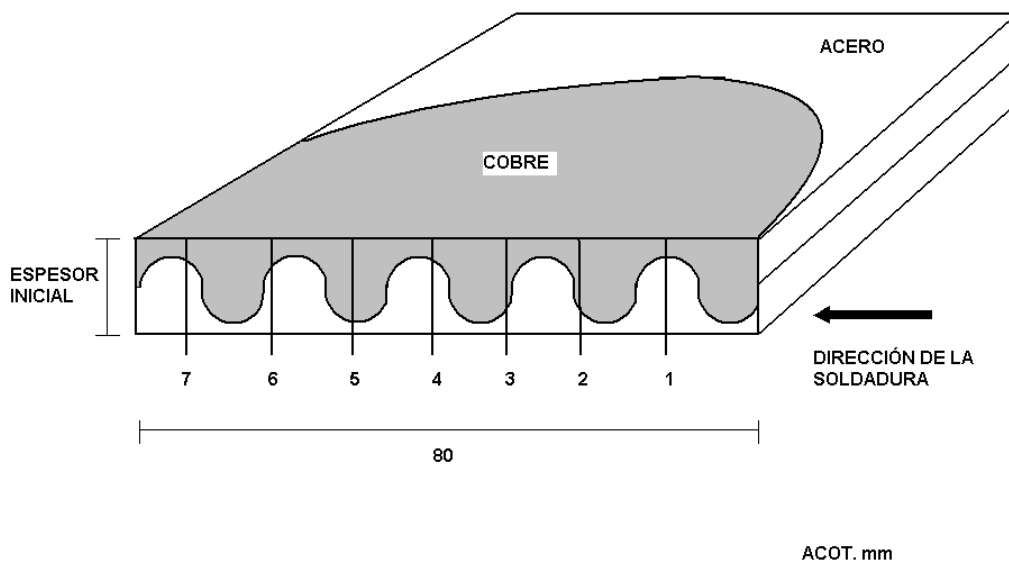
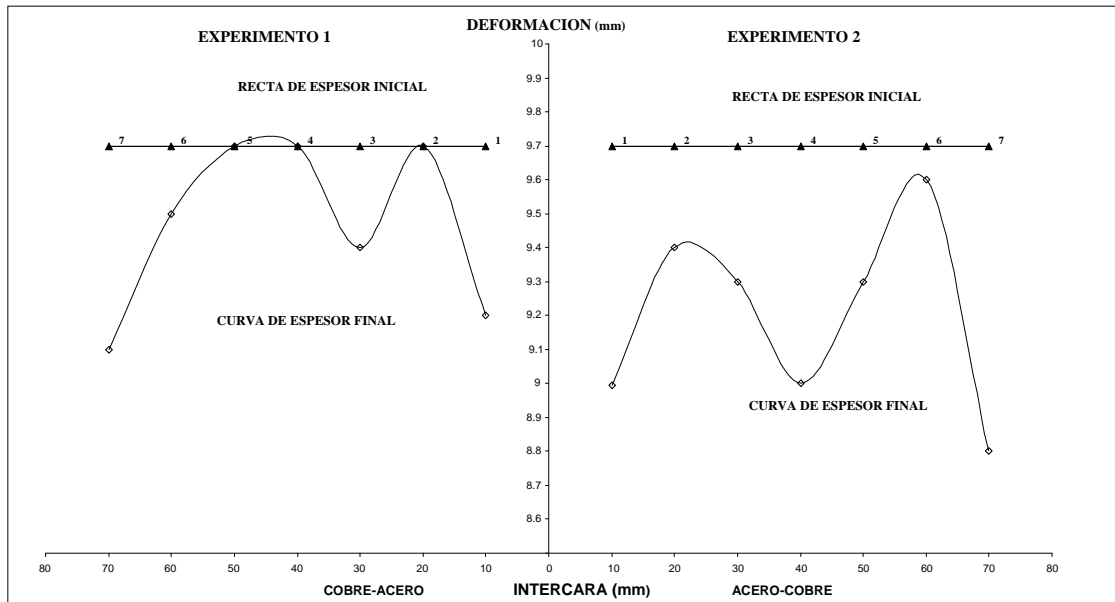


Fig. 38. Mediciones de la deformación de las muestras

En el experimento 1 del sistema Cobre-Acero, se tiene la recta de espesor inicial en 9.7 mm mientras la curva de espesor final inicia en 9.2 mm en el punto 1 y se comporta de manera ondular al punto 5 donde finalmente desciende al punto 7.

En el experimento 2 del sistema Acero-Cobre, se tiene la recta de espesor inicial en 9.7 mm, mientras la curva de espesor final comienza en 9 mm en el punto 1, y tiene una ondulación hasta el punto 6 donde desciende finalmente al punto 7, (gráfica 1).

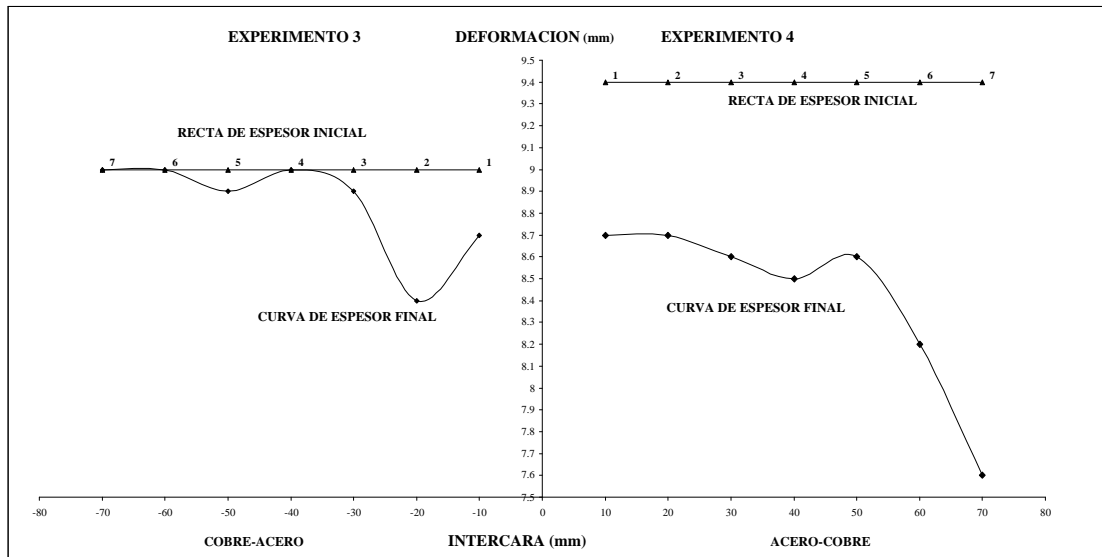


Gráfica 1. Curvas de deformación de los experimentos 1-2

Por lo tanto, para este sistema de soldadura simétrico con el mismo espesor inicial en las placas a unir, se encuentra una deformación ondulatoria para ambos sistemas pero con una mayor deformación para el sistema “Acero-Cobre”, como se puede observar en la gráfica. Debido a que su curva de espesor final se encuentra más alejada a la recta de espesor inicial.

En el experimento 3 del sistema Cobre-Acero se tiene la recta de espesor inicial en 9 mm mientras la curva de espesor final en el punto 1 se encuentra en 7 mm y se observa una ondulación ascendente hacia el punto 7.

En el experimento 4 del sistema Acero-Cobre, se tiene la recta de espesor inicial en 9.4 mm, y la curva de espesor final se encuentra en 8.7 mm en el punto 1 la cual tiende a descender hasta el punto 5 y finalmente termina con un pendiente hacia el punto 7, (gráfica 2).

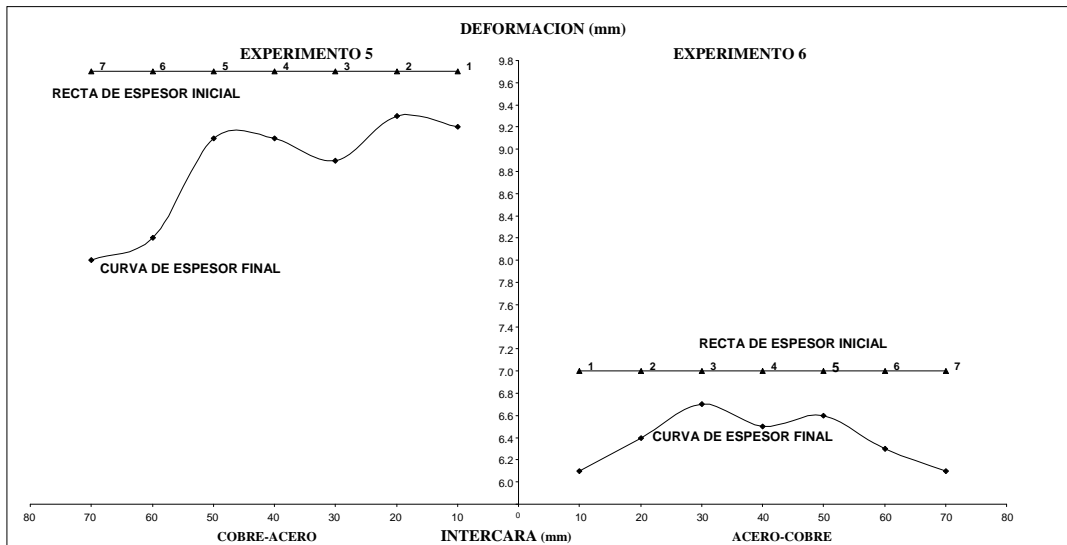


Gráfica 2. Curvas de deformación de los experimentos 3-4

Por lo tanto, para este sistema de soldadura simétrico donde el espesor inicial no es igual para ambos sistemas, podemos ver que para el sistema Acero-Cobre existe una mayor deformación que para el sistema Cobre-Acero, debido a que su curva se aleja en cada punto de su recta de espesor inicial.

En el experimento 5 del sistema Cobre-Acero, se tiene la recta de espesor inicial en 9.7 mm, mientras la curva de espesor final comienza en 9.2 mm para el punto 1, donde hay una ondulación que va de menos a más hacia el punto 7.

En el experimento 6 del sistema de soldadura Acero-Cobre se tiene la recta de espesor inicial en 7 mm, mientras la curva de espesor final ubicada en 6.1 mm en el punto 1 asciende al punto 3, donde finalmente desciende en forma ondulatoria al punto 7, (gráfica 3).

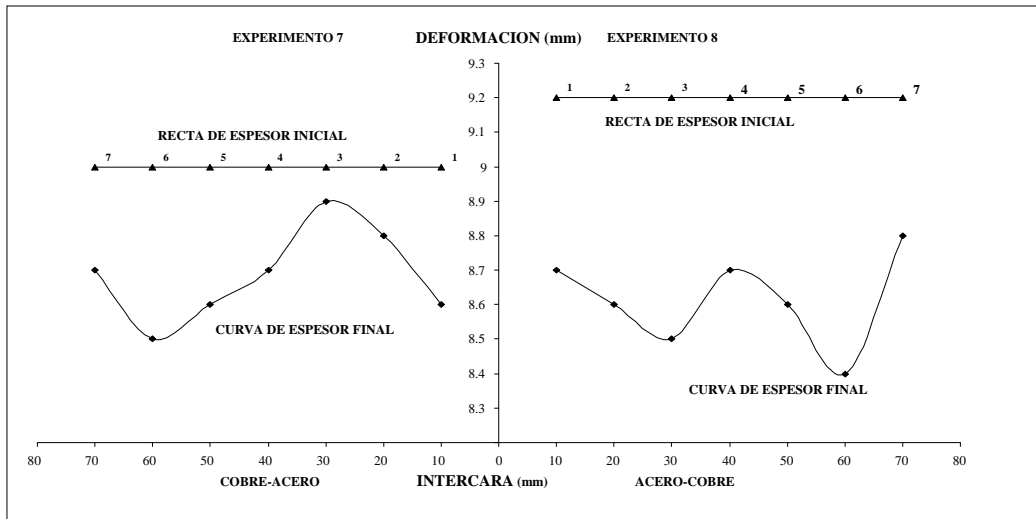


Gráfica 3. Curvas de deformación de los experimentos 5-6

Por consiguiente se tiene que la deformación en este sistema de soldadura simétrico donde el espesor inicial no es igual para ambos sistemas, se observa que existe una deformación que va de menor a mayor para el sistema Cobre-Acero mientras que para el sistema Acero-Cobre se tiene una deformación que va de mayor a menor y además se encuentra más cerca de la recta de espesor inicial.

En el experimento 7 del sistema de soldadura Cobre-Acero se tiene la recta de espesor inicial en 9 mm y la curva de espesor final ubicada en 8.6 mm en el punto 1 en la que se puede observar un comportamiento ondulatorio hasta el punto 7.

En el experimento 8 el sistema de soldadura Acero-Cobre se tiene a la recta de espesor inicial en 9.2 mm, mientras la curva de espesor final ubicada en 8.7 mm en el punto 1 observamos una ondulación en la curva hasta su punto 7, (gráfica 4).



Gráfica 4. Curvas de deformación de los experimentos 7-8

En estos dos sistemas de soldadura simétricos el espesor inicial es diferente y se puede observar, a través de las gráficas, en que la curva de espesor final para el sistema Acero-Cobre se encuentra más alejada de la recta de espesor final, esto indica que existe una mayor deformación en el sistema mencionado.

4.5.2. Longitud y amplitud de onda

Otra parte fundamental del estudio de las muestras de soldadura por impacto es el estudio de la intercara donde se puede apreciar la unión de los materiales, ya sea de manera lineal o bien de manera ondulada. En las muestras onduladas se tomó el número de ondas generadas, así como la amplitud y longitud de onda de cada una de ellas, (fig. 39).

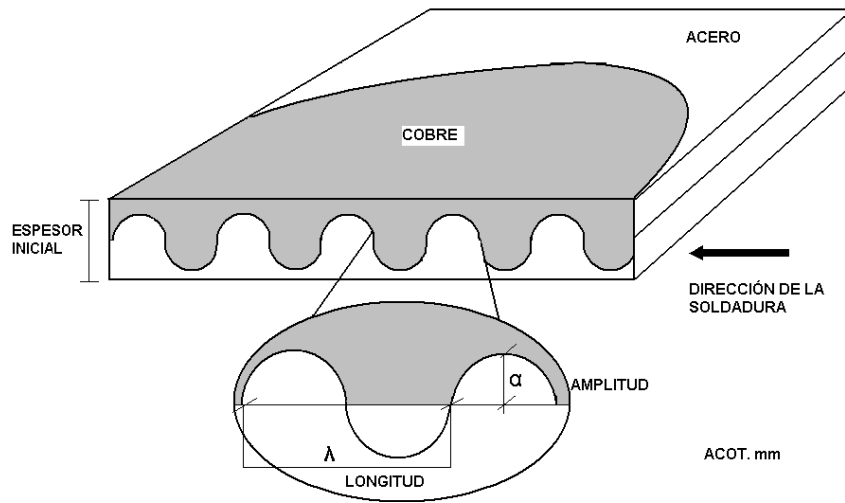


Fig. 39. Longitud y amplitud de onda en las intercaras

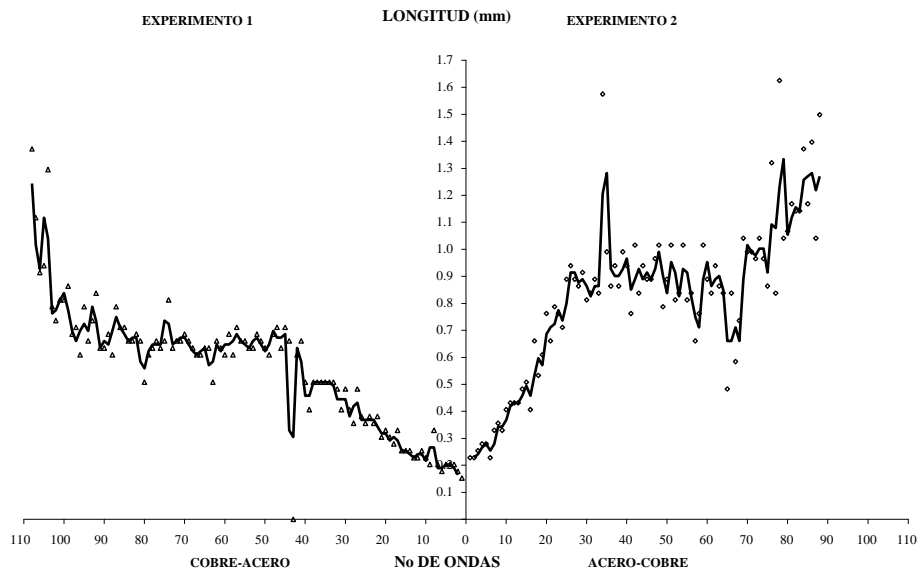
Las mediciones se tomaron de ondas que se encuentran en el rango más estable de la intercara ondulada, llamado estado estacionario, para determinar una amplitud y una longitud de onda promedio. En las gráficas de ambos sistemas se puede ver la diferencia que existe en ambos sistemas

Tabla 2. Datos del Experimento 1

EXP. 1 COBRE-ACERO	
VÉLOCIDAD	650 m/s
ÁNGULO	10°
NÚMERO DE ONDAS	108
AMPLITUD DE ONDA	0.25 mm
LONGITUD DE ONDA	0.67 mm

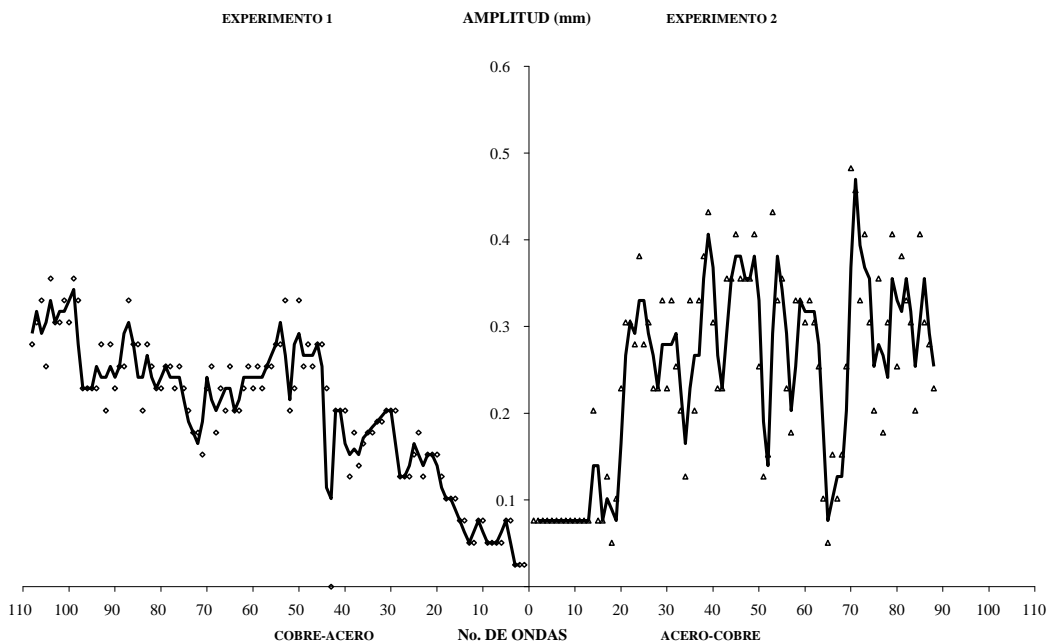
Tabla 3. Datos del Experimento 2

EXP.2 ACERO-COBRE	
VÉLOCIDAD	610 m/s
ÁNGULO	10°
NÚMERO DE ONDAS	88
AMPLITUD DE ONDA	0.29 mm
LONGITUD DE ONDA	0.92 mm



Gráfica 5. Curvas de longitud de onda de los experimentos 1-2

De la gráfica de longitud de onda para los experimentos 1-2, se observa que el Sistema Cobre-Acero tiene generadas 108 ondas en su intercara con una longitud de onda promedio de 0.67 mm, mientras que en el Sistema Acero-Cobre tiene 88 ondas en la intercara con una longitud promedio de 0.92 mm, (gráfica 5).



Gráfica 6. Curvas de amplitud de onda de los experimentos 1-2

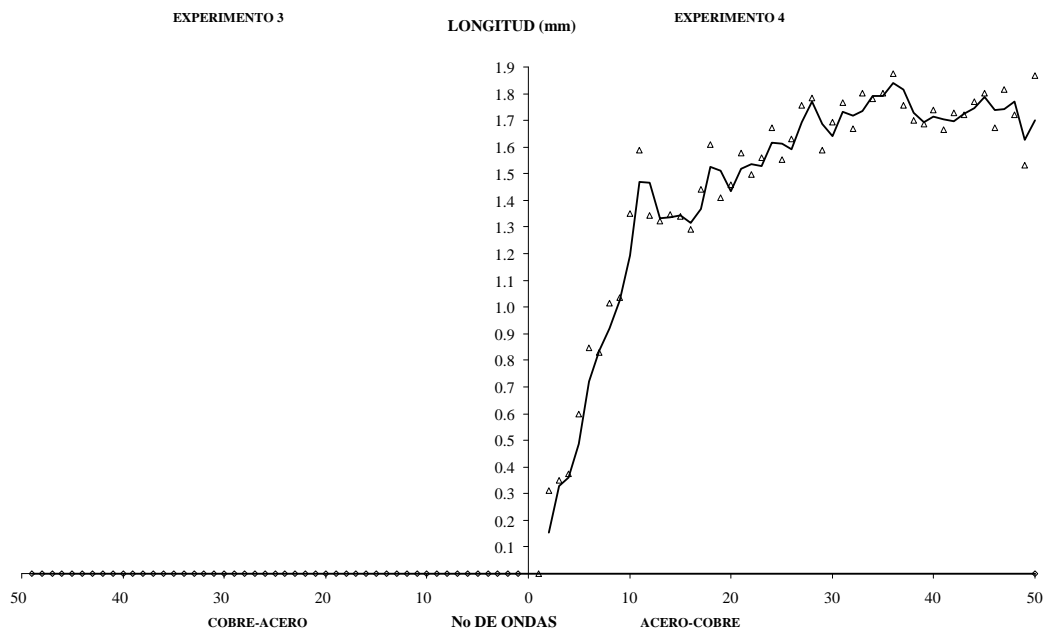
La gráfica de amplitud de onda para los experimentos 1-2, muestra que el Sistema Cobre-Acero tiene una amplitud de onda promedio de 0.25 mm, mientras que en el Sistema Acero-Cobre se tiene una amplitud promedio de 0.29 mm, (gráfica 6).

Tabla 4. Datos del Experimento 3

EXP. 3 COBRE-ACERO	
VELOCIDAD	471 m/s
ÁNGULO	20°
NÚMERO DE ONDAS	LINEAL
AMPLITUD DE ONDA	0.0 mm
LONGITUD DE ONDA	0.0 mm

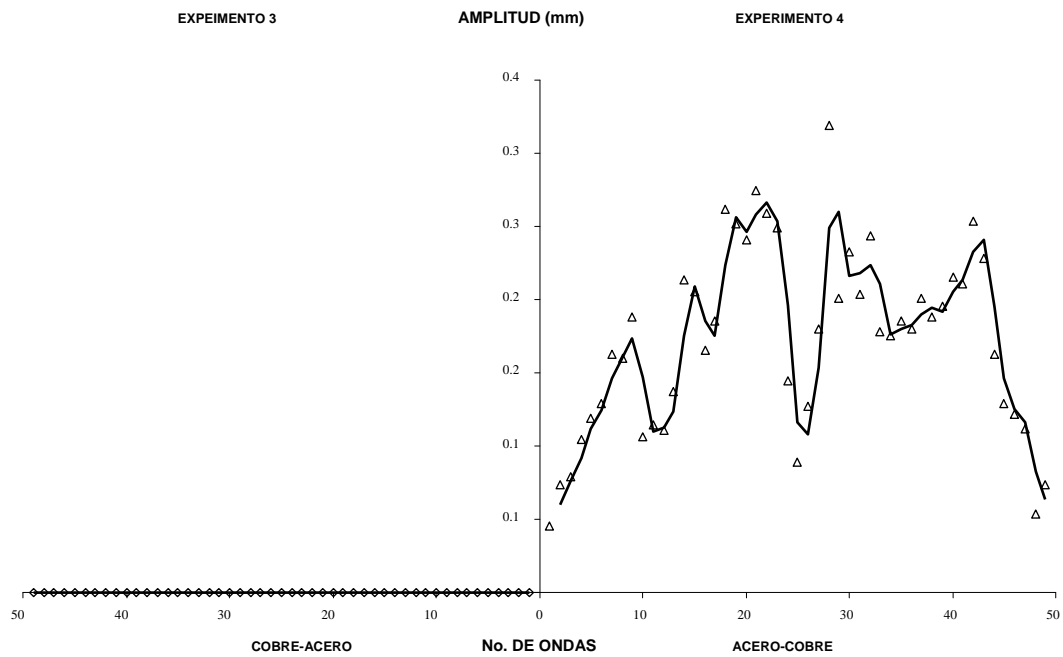
Tabla 5. Datos del Experimento 4

EXP.4 ACERO-COBRE	
VELOCIDAD	452 m/s
ÁNGULO	20°
NÚMERO DE ONDAS	49
AMPLITUD DE ONDA	0.20 mm
LONGITUD DE ONDA	1.68 mm



Gráfica 7. Curvas de longitud de onda de los experimentos 3-4

De la gráfica de longitud de onda para los experimentos 3-4, se observa que el Sistema Cobre-Acero posee una intercara lineal, sin número de ondas, mientras que en el Sistema Acero-Cobre se tienen 49 ondas en su intercara con una longitud promedio de 1.68 mm, (gráfica 7).



Gráfica 8. Curvas de amplitud de onda de los experimentos 3-4

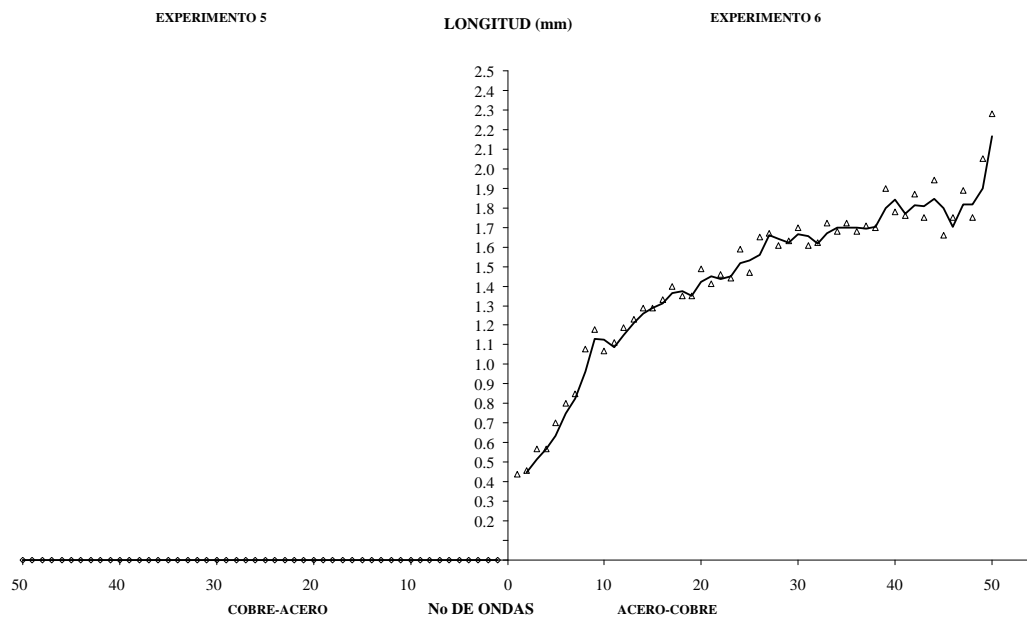
De la gráfica de amplitud de onda para los experimentos 3-4, se observa que el Sistema Cobre-Acero posee una intercara lineal, mientras que en el Sistema Acero-Cobre se tiene una amplitud promedio de 0.20 mm, (gráfica 8).

Tabla 6. Datos del Experimento 5

EXP. 5 COBRE-ACERO	
VELOCIDAD	489 m/s
ÁNGULO	20°
NÚMERO DE ONDAS	LINEAL
AMPLITUD DE ONDA	0.0 mm
LONGITUD DE ONDA	0.0 mm

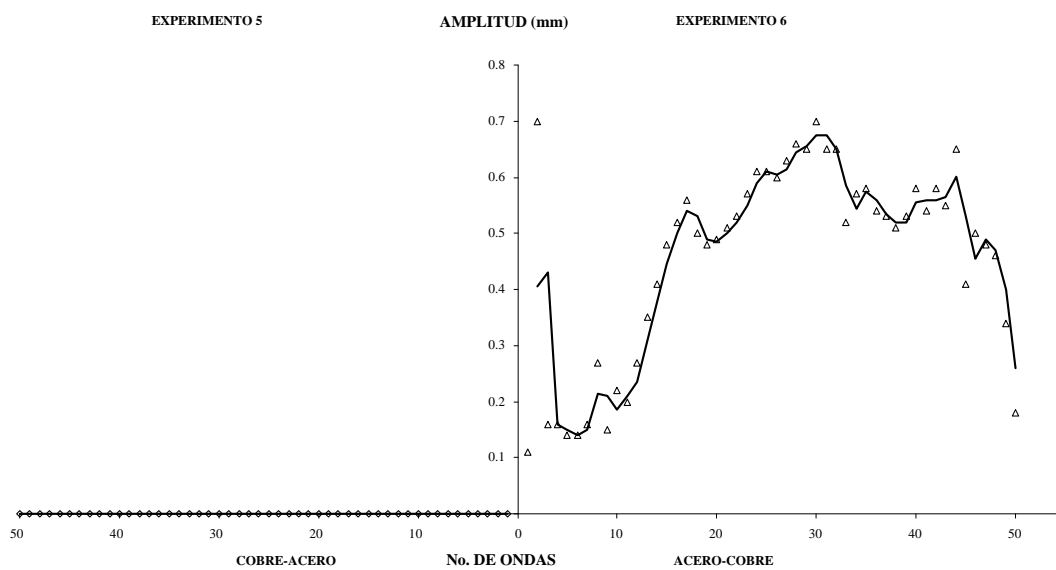
Tabla 7. Datos del Experimento 6

EXP.6 ACERO-COBRE	
VELOCIDAD	502 m/s
ÁNGULO	20°
NÚMERO DE ONDAS	50
AMPLITUD DE ONDA	0.57 mm
LONGITUD DE ONDA	1.74 mm



Gráfica 9. Curvas de longitud de onda de los experimentos 5-6

De la gráfica de longitud de onda para los experimentos 5-6, se observa que el Sistema Cobre-Acero posee una intercara lineal, mientras que en el Sistema Acero-Cobre se tienen 50 ondas con una longitud promedio de 1.74 mm, (gráfica 9).



Gráfica 10. Curvas de amplitud de onda de los experimentos 5-6

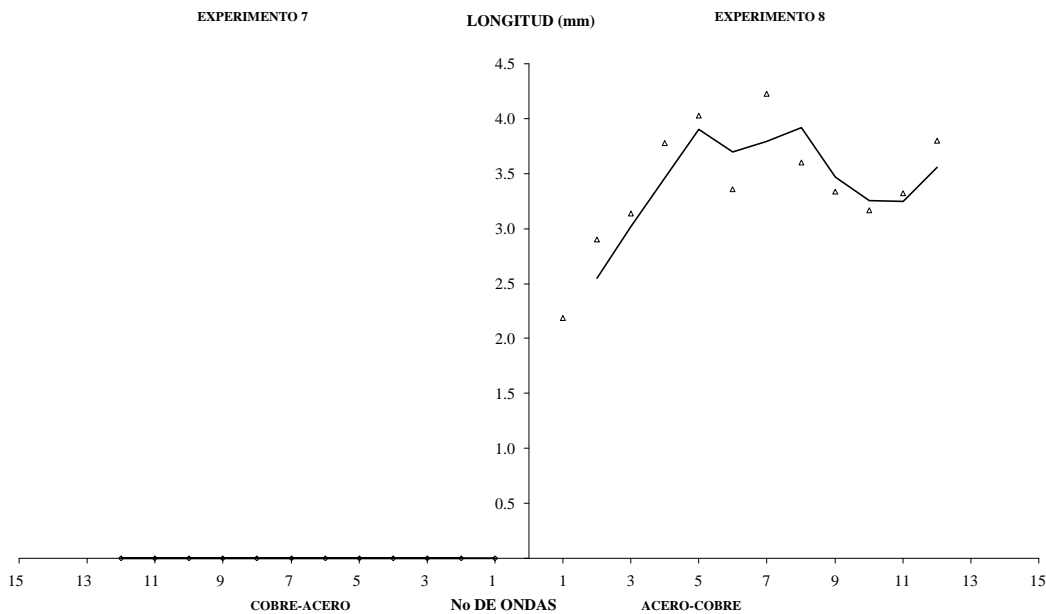
De la gráfica de amplitud de onda para los experimentos 5-6, se observa que el Sistema Cobre-Acero posee una intercara lineal, mientras que el Sistema Acero-Cobre tiene una amplitud promedio de 0.57 mm, (gráfica 10).

Tabla 8. Datos del Experimento 7

EXP. 7 COBRE-ACERO	
VELOCIDAD	620 m/s
ÁNGULO	25°
NÚMERO DE ONDAS	LINEAL
AMPLITUD DE ONDA	0.0 mm
LONGITUD DE ONDA	0.0 mm

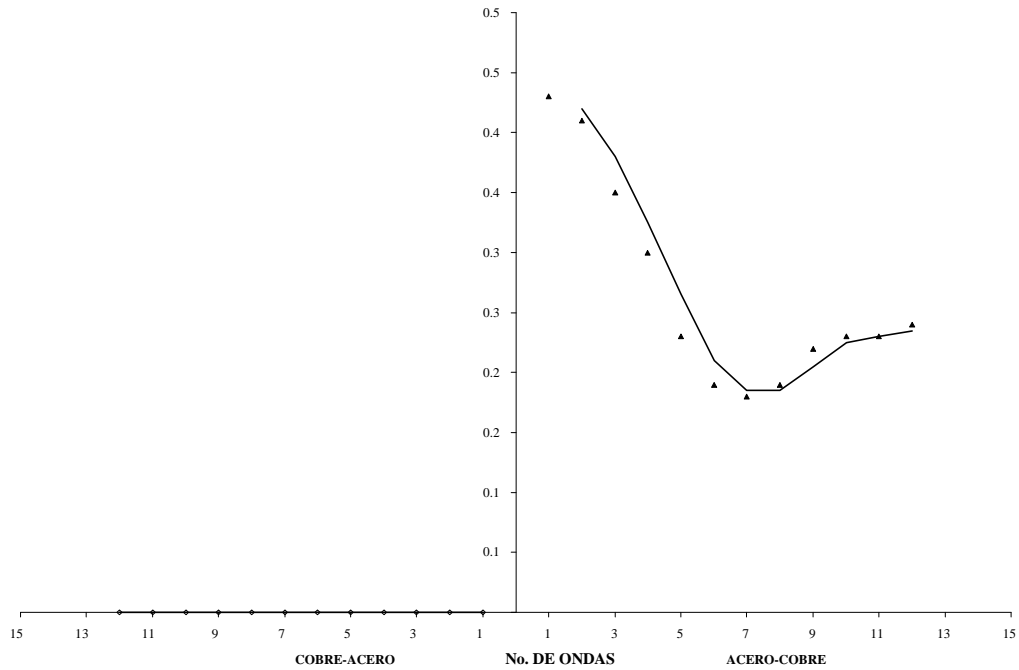
Tabla 9. Datos del Experimento 8

EXP.8 ACERO-COBRE	
VELOCIDAD	580 m/s
ÁNGULO	25°
NÚMERO DE ONDAS	12
AMPLITUD DE ONDA	0.21 mm
LONGITUD DE ONDA	3.58 mm



Gráfica 11. Curvas de longitud de onda de los experimentos 7-8

De la gráfica de longitud de onda para los Experimentos 7-8, se observa que el Sistema Cobre-Acero posee una intercara lineal, mientras que el Sistema Acero-Cobre tiene 12 ondas en su intercara con una longitud promedio de 3.58 mm, (gráfica 11).



Gráfica 12. Curvas de amplitud de onda de los experimentos 7-8

De la gráfica de amplitud de onda para los experimentos 7-8, se observa que el Sistema Cobre-Acero posee una intercara lineal, mientras que en el Sistema Acero-Cobre se tiene una amplitud promedio de 0.21 mm, (gráfica 12).

4.5.3. Microdureza

El estudio del endurecimiento mediante medidas de microdureza es una de las pruebas que más comúnmente se realizan en los metales. Dentro de esta investigación se realizaron pruebas por el método de Dureza Vickers (Hard Vickers), el cual basa su principio en la medición de las diagonales de la huella producida al aplicar una carga (P) sobre un indentador de diamante con geometría piramidal de base cuadrada y un ángulo de 136° entre sus caras. Las pruebas correspondieron a una carga establecida de 25 kg con un tiempo de 20 segundos y se realizaron a lo largo de la intercara de ambos materiales, (fig. 40).

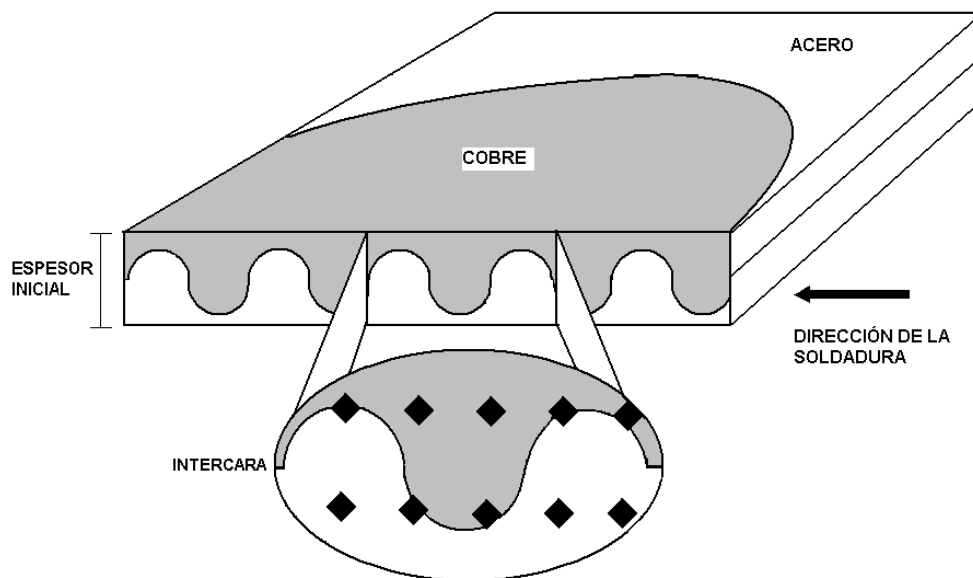
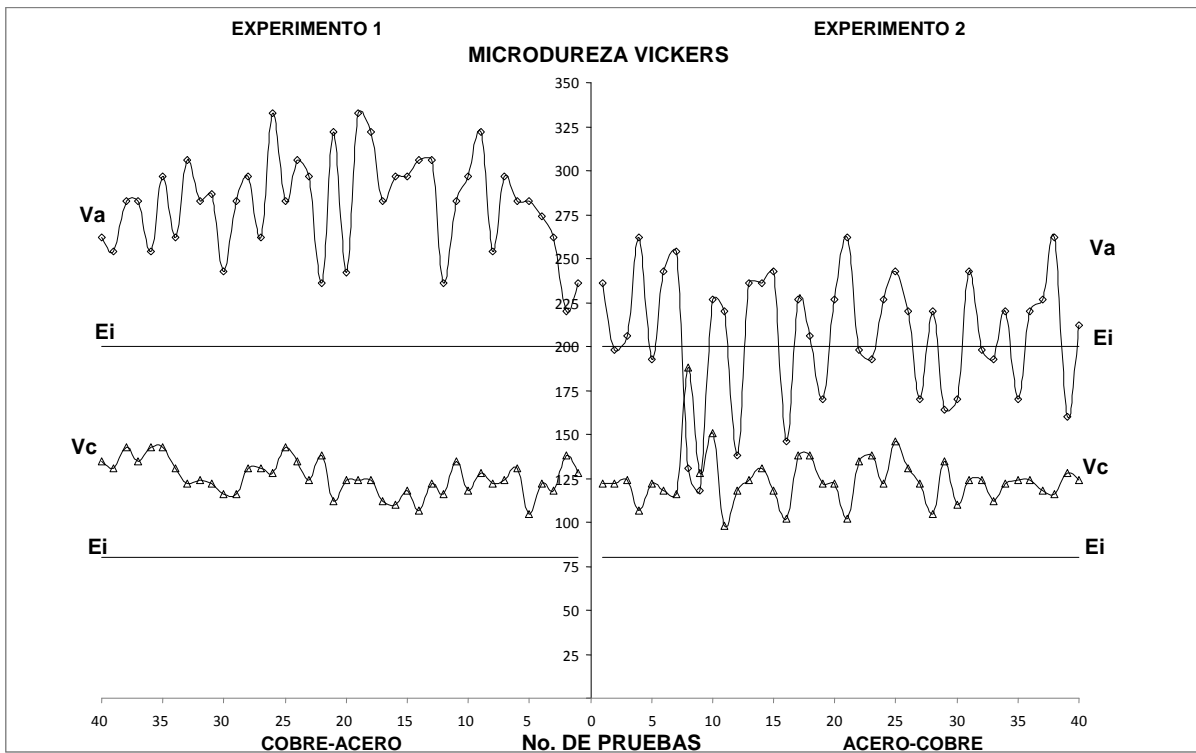


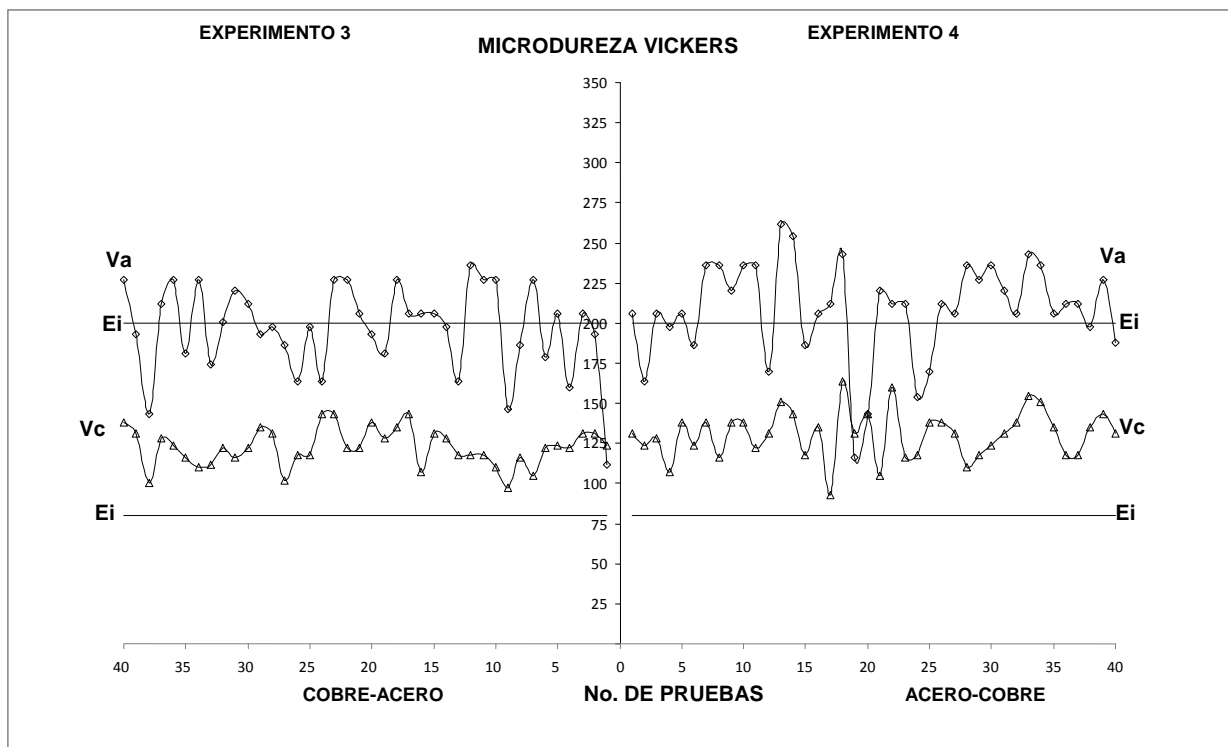
Fig. 40. Prueba de Microdureza

Las siguientes gráficas muestran los resultados que fueron encontrados en la zona de la intercara donde ambos materiales se unen. Antes de realizar las soldaduras se tomaron muestra de la dureza de los materiales obteniéndose los siguientes datos; 80 HV y 200HV para el Cobre y el Acero bajo carbono, respectivamente.



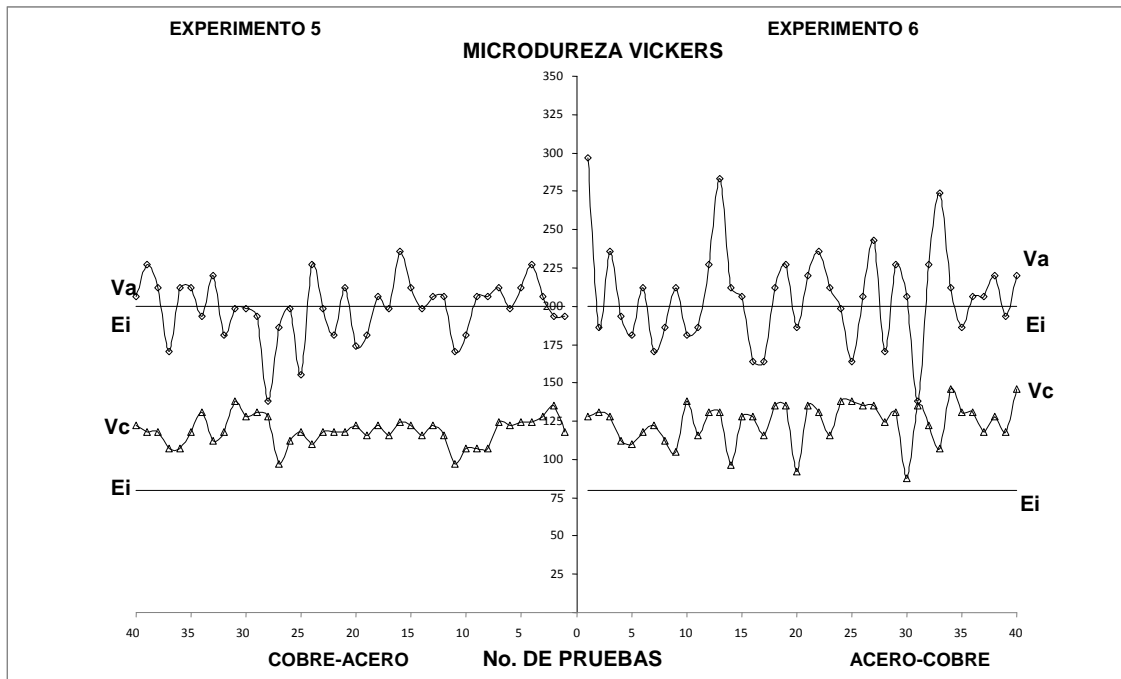
Gráfica 13. Curvas de Microdureza Vickers de los experimentos 1-2

En la gráfica 13 se muestra la variación de microdureza en el Acero (V_a) y Cobre (V_c) a partir de su Estado inicial (E_i) para ambos sistemas. Para el Experimento 1, se tiene que el Acero llega a tener una dureza promedio de 282 HV y el Cobre una dureza promedio de 126 HV. Mientras que el Experimento 2, el Acero llega a tener una dureza promedio de 207 HV y el Cobre una dureza promedio de 124 HV.



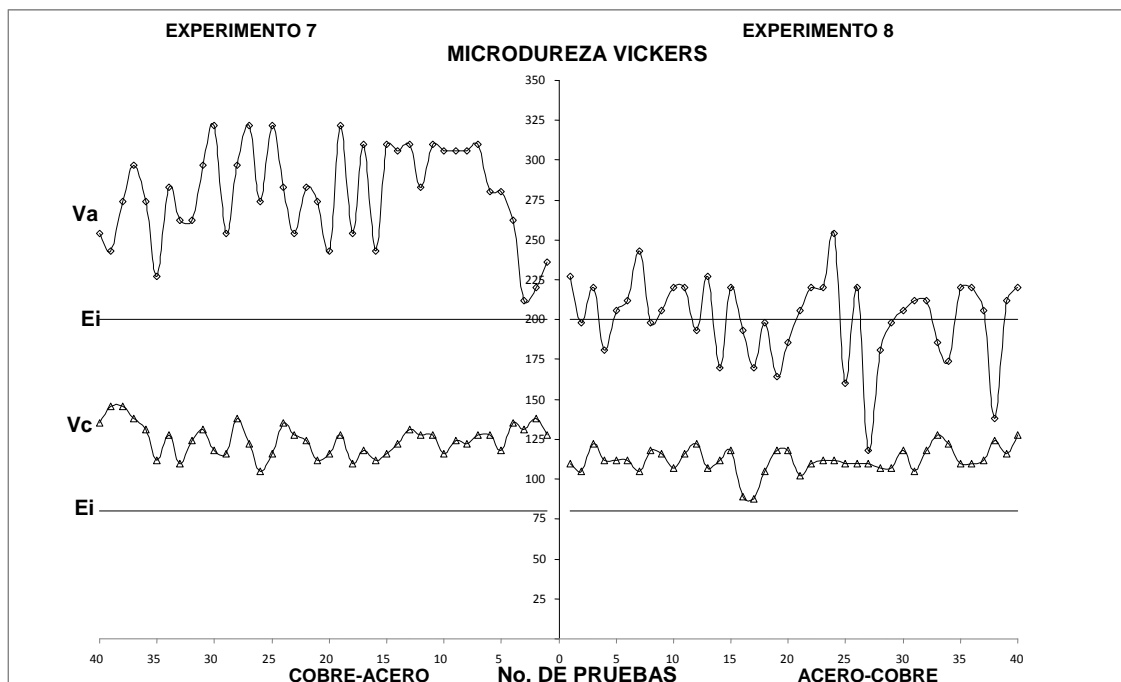
Gráfica 14. Curvas de Microdureza Vickers de los experimentos 3-4

En la gráfica 14 se muestra la variación de microdureza en el Acero (V_a) y Cobre (V_c) a partir de su Estado inicial (E_i) para ambos sistemas. Para el Experimento 3, se tiene que el Acero llega a tener una dureza promedio de 202 HV y el Cobre una dureza promedio de 122 HV. Mientras que el Experimento 4, el Acero llega a tener una dureza promedio de 208 HV y el Cobre una dureza promedio de 130 HV.



Gráfica 15. Curvas de Microdureza Vickers de los experimentos 5-6

En la gráfica 15 se muestra la variación de microdureza en el Acero (V_a) y Cobre (V_c) a partir de su Estado inicial (E_i) para ambos sistemas. Para el Experimento 5, se tiene que el Acero llega a tener una dureza promedio de 204 HV y el Cobre una dureza promedio de 118 HV. Mientras que el Experimento 6, el Acero llega a tener una dureza promedio de 207 HV y el Cobre una dureza promedio de 124 HV.



Gráfica 16. Curvas de Microdureza Vickers de los experimentos 7-8

En la gráfica 16 se muestra la variación de microdureza en el Acero (V_a) y Cobre (V_c) a partir de su Estado inicial (E_i) para ambos sistemas. Para el Experimento 7, se tiene que el Acero llega a tener una dureza promedio de 279 HV y el Cobre una dureza promedio de 124 HV. Mientras que el Experimento 8, el Acero llega a tener una dureza promedio de 202 HV y el Cobre una dureza promedio de 112 HV.

La información presentada en las gráficas anteriores indica la tendencia, al incremento de la dureza en ambos materiales de cada soldadura. Por lo tanto, las mediciones tomadas a cada sistema de unión reflejan las condiciones mecánicas de la deformación inducida por el impacto al material, teniendo como efecto la variación de los espesores de las placas. Comparando ambos sistemas de soldadura con respecto a las mediciones tomadas encontramos que el sistema Acero bajo carbono – Cobre tiene un mayor incremento en la dureza de sus materiales.

Conclusiones y futuras líneas de investigación

Las investigaciones recogidas en la presente tesis constituyen una aportación original al conocimiento de la soldadura por impacto en los sistemas Acero bajo carbono - Cobre y Cobre – Acero bajo carbono y al estudio morfológico de la unión generada en ambos materiales, así como las propiedades mecánicas de ambos sistemas de unión.

Una vez comparados los experimentos simétricos de ambos sistemas de soldadura de impacto se pueden resumir las siguientes conclusiones:

- Una vez realizados los experimentos se estableció de forma sistemática la comparación de los resultados obtenidos en esta investigación con investigaciones realizadas anteriormente ^[14] en donde los resultados obtenidos coinciden de manera que los resultados se encuentran dentro de los parámetros de la generación de soldadura por impacto para el sistema Cobre-Acero bajo carbono.
- Mientras que para el Sistema Acero bajo carbono-Cobre no se encuentra establecida todavía una investigación que arroje la creación de una Ventana de Soldadura que nos permita establecer con una mayor exactitud los parámetros de generación de soldadura para este sistema de unión, por lo tanto se establecen los resultados como los necesarios para generar soldadura por impacto para este sistema.
- A partir del estudio de la deformación, la microdureza y en el caso de la existencia de ondas generadas en la intercara de la soldadura podemos decir lo siguiente:
 - ✓ Dentro de la deformación de las muestras estudiadas para ambos sistemas de unión encontramos que en el Sistema Acero bajo carbono-Cobre tenemos un mayor porcentaje de la deformación en las muestras de cada experimento.

Mientras que en el Sistema Cobre-Acero bajo carbono tenemos que las muestras se encuentran con una menor deformación. Por lo tanto podemos afirmar que los experimentos se realizaron simétricamente encontramos que un sistema de soldadura sufre una mayor deformación que el otro, y en este caso corresponde para el Sistema Acero bajo carbono-Cobre.

- ✓ Lo referente al estudio de las intercaras con ondas podemos afirmar que al compararel Sistema Acero bajo carbono-Cobre con el sistema Cobre-Acero bajo carbono se encontró que el comportamiento no es simétrico, desde el punto de vista del número de ondas encontradas, de la amplitud y de la longitud de ondas formadas. En particular para el sistema Cobre-Acero bajo carbono en el intervalo de (471>620 m/s) la unión no presenta formación de ondas, es lineal.

Mientras cubriéndose aproximadamente el mismo intervalo de velocidades del proyectil en el sistema Acero bajo carbono-Cobre (471>620 m/s) aparecen ondas de amplitud y longitud de onda muy diferentes.

En el intervalo (>650 m/s) el sistema Cobre-Acero bajo carbono deja de presentar unión lineal. La no formación de ondas se debe esencialmente a la baja velocidad del impacto, que solo permite remover en la parte más externa, o la parte tangencial de las piezas que se unen.

- ✓ Con respecto al estudio de la microdureza Vickers realizada para las muestras de ambos sistemas encontramos que ambos sistemas tienden a mejorar su dureza, debido al efecto de la deformación inducida por el impacto el cual tiene una mayor presencia al reducir el espesor de las placas, lo cual provoca un cambio microestructural de ambos metales.

En conjunto, la presente tesis establece una base y las condiciones para el avance y la continuidad del estudio de la "Soldadura por Impacto" para generar los parámetros requeridos para la simulación de la Soldadura por Explosivo y así seguir determinando las condiciones favorables para la unión de materiales.

Bibliografía

1. EXSA-OERLIKON, **Manual de Soldadura**, Pág. 22, 1995.
2. American Welding Society, **Welding Encyclopedia 18th Edition**, Pág. 591, 1992.
3. Oleh Zabara, Czorna, **Soldadura y técnicas afines. Tomo I**, Diferentes procedimientos de soldadura, Editorial Bellisco, Pág. 1-5, 1989.
4. Sociedad Mexicana para la Soldadura, Boletín Técnico en Soldadura, **La Soldadura una especialidad olvidada**, Mayo-Junio, 2006.
5. Sociedad Mexicana para la Soldadura, **Manual de Inspectores de la Sociedad Mexicana para la Soldadura**, Pág. 43-63, 2008.
6. Marc A. Meyers and Lawrence E. Murr, Ed., **Shock Waves and High Strain Rate Phenomena in metals**, Explosive Welding, A review; Steve H. Carpenter. Chapter 53, Pág. 941, Physics Department University of Denver, Colorado 80208, 1981.
7. Marc A. Meyers and Lawrence E. Murr, Ed., **Shock Waves and High Strain Rate Phenomena in metals**, Explosive Welding, A review; Steve H. Carpenter. Chapter 53, Pág. 945, Physics Department University of Denver, Colorado 80208, 1981.
8. Bernard Crossland, **Explosive welding of metals and application**, Pág. 108, 1990.
9. Marc A. Meyers and Lawrence E. Murr, Ed., **Shock Waves and High Strain Rate Phenomena in metals**, Explosive Welding, A review, Steve H. Carpenter, Chapter 53. Pág. 951, Physics Department University of Denver, Colorado 80208, 1981.
10. First International Simposium on Welding, **La soldadura por impacto y estudios de su intercara**, Dr. Jaramillo Viguera*, G. López Chape**, y A. Huerta Cortes**, Pág.107, 1998.
11. Marc A. Meyers and Lawrence E. Murr, Ed., **Shock Waves and High Strain Rate Phenomena in metals**, Explosive Welding, A review, Steve H. Carpenter, Chapter 53. Pág. 956, Physics Department University of Denver, Colorado 80208, 1981.
12. D. Jaramillo V, **Journal of Materials Science 22 (1987) Pág. 3143-3147, Effect of plate thickness on wave size and wave morphology in explosively welded couples**, New Mexico, Institute of Mining and Technology Socorro, 1987.

13. José Luís Lara Enríquez, **Calibración del Generador de Onda de Amplitud Finita**, Tesis, Facultad de Ciencias, Universidad de Guadalajara ,1987.

14. Ing. Salvador I. Medina Rabadán, **Determinación del dominio de la soldadura en el plano Vp-β en el sistema cobre-acero bajo carbono**, Tesis, Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas, Pág. 23-24, 2004.

Lista de Figuras

No. Figura	Página
1 Arreglo para la Soldadura por Explosivo	21
2 Forma típica de la onda	22
3 Forma típica de recta con cierta capa de aleación entre las placas	23
4 Forma típica recta	23
5 Pipa Cobre con Tantalio	24
6 Pipa Acero inoxidable con Cobre	25
7 Cañón de Gas del I.F.U.N.A.M.	27
8 Ventana de Soldadura Cu/Cu	28
9 Ventana de dominio teórico de soldadura por explosivo por Witman y Deribas	29
10 Variación de la longitud de onda con respecto a los espesores de las placas	30
11 Representación esquemática de los factores a considerar en un cañón de gas	31
12 Foto del cañón de gas	33
13 Cámara de Compresión	34
14 Cámara de Ensayo	36
15 Odómetro	37
16 Señales del Odómetro	37
17 Colector	39

18	Arreglos para lograr Soldadura por Explosivo	39
19	Variables presentes en los arreglos de la Soldadura por Explosivo	40
20	Relación entre la soldadura por explosivo e impacto	41
21	Componentes del blanco	42
22	Placa soporte	43
23	Placa base	43
24	Sujetadores de latón	44
25	Dimensiones del proyectil	45
26	Ventana de Soldadura para el Sistema Cobre-Acero	47
27	Ventana de Soldadura para el Sistema Acero-Cobre	48
28	Ventana de Soldadura para el Sistema Cobre-Acero	49
29	Experimento 1/ Sistema Cobre-Acero	50
30	Experimento 2/ Sistema Acero-Cobre	51
31	Experimento 3/ Sistema Cobre-Acero	51
32	Experimento 4/ Sistema Acero-Cobre	52
33	Experimento 5/ Sistema Cobre-Acero	52
34	Experimento 6/ Sistema Acero-Cobre	53
35	Experimento 7/ Sistema Cobre-Acero	53

36	Experimento 8/ Sistema Acero-Cobre	54
37	Probetas Metalograficas	55
38	Mediciones de la deformación de muestras	56
39	Longitud y amplitud de onda	61
40	Microdureza	68

Lista de Tablas

No. Tabla		Página
1	Datos experimentales	46
2	Datos del Experimento 1	61
3	Datos del Experimento 2	61
4	Datos del Experimento 3	63
5	Datos del Experimento 4	63
6	Datos del Experimento 5	64
7	Datos del Experimento 6	64
8	Datos del Experimento 7	66
9	Datos del Experimento 8	66

Lista de Graficas

No. Grafica	Página
1 Curvas de deformación de los experimentos 1-2	57
2 Curvas de deformación de los experimentos 3-4	58
3 Curvas de deformación de los experimentos 5-6	59
4 Curvas de deformación de los experimentos 7-8.	60
5 Curvas de longitud de onda de los experimentos 1-2	62
6 Curvas de amplitud de onda de los experimentos 1-2	62
7 Curvas de longitud de onda de los experimentos 3-4	63
8 Curvas de amplitud de onda de los experimentos 3-4	64
9 Curvas de longitud de onda de los experimentos 5-6	65
10 Curvas de amplitud de onda de los experimentos 5-6	65
11 Curvas de longitud de onda de los experimentos 7-8	66
12 Curvas de amplitud de onda de los experimentos 7-8	67
13 Curvas de Microdureza Vickers de los experimentos 1-2	69
14 Curvas de Microdureza Vickers de los experimentos 3-4	70
15 Curvas de Microdureza Vickers de los experimentos 5-6	71
16 Curvas de Microdureza Vickers de los experimentos 7-8	72

Apéndice

En las siguientes tablas; se muestran los datos obtenidos en cada uno de los experimentos para cada sistema de soldadura.

Experimento 1

No. DE EXPERIMENTO	1
SISTEMA DE SOLDADURA	COBRE-ACERO
ÁNGULO DE COLISIÓN	10°
GAS	HELIO
ESPELOR DE LA PLACA BASE	6.3 mm
ESPELOR DE LA PLACA VOLADORA	3.4 mm
MASA TOTAL DEL PROYECTIL	463 g
PRESIÓN DE CAMARA DE COMPRESIÓN	77 Kg/cm ²
PRESIÓN DE LA ZONA ENTRE DIAFRAGMAS	35 Kg/cm ²
VELOCIDAD	650 m/s

Experimento 2

No. DE EXPERIMENTO	2
SISTEMA DE SOLDADURA	ACERO-COBRE
ÁNGULO DE COLISIÓN	10°
GAS	NITROGENO
ESPELOR DE LA PLACA BASE	6.3 mm
ESPELOR DE LA PLACA VOLADORA	3.4 mm
MASA TOTAL DEL PROYECTIL	425 g
PRESIÓN DE CAMARA DE COMPRESIÓN	150 Kg/cm ²
PRESIÓN DE LA ZONA ENTRE DIAFRAGMAS	75 Kg/cm ²
VELOCIDAD	610 m/s

Experimento 3

No. DE EXPERIMENTO	3
SISTEMA DE SOLDADURA	COBRE-ACERO
ÁNGULO DE COLISIÓN	20°
GAS	NITROGENO
ESPELOR DE LA PLACA BASE	6 mm
ESPELOR DE LA PLACA VOLADORA	3 mm
MASA TOTAL DEL PROYECTIL	350 g
PRESIÓN DE CAMARA DE COMPRESIÓN	60 Kg/cm ²
PRESIÓN DE LA ZONA ENTRE DIAFRAGMAS	30 Kg/cm ²
VELOCIDAD	472 m/s

Experimento 4

No. DE EXPERIMENTO	4
SISTEMA DE SOLDADURA	ACERO-COBRE
ÁNGULO DE COLISIÓN	20°
GAS	NITROGENO
ESPELOR DE LA PLACA BASE	6.2 mm
ESPELOR DE LA PLACA VOLADORA	3.7 mm
MASA TOTAL DEL PROYECTIL	413 g
PRESIÓN DE CAMARA DE COMPRESIÓN	60 Kg/cm ²
PRESIÓN DE LA ZONA ENTRE DIAFRAGMAS	30 Kg/cm ²
VELOCIDAD	452 m/s

Experimento 5

No. DE EXPERIMENTO	5
SISTEMA DE SOLDADURA	COBRE-ACERO
ÁNGULO DE COLISIÓN	20°
GAS	NITROGENO
ESPELOR DE LA PLACA BASE	6 mm
ESPELOR DE LA PLACA VOLADORA	3.2 mm
MASA TOTAL DEL PROYECTIL	505 g
PRESIÓN DE CAMARA DE COMPRESIÓN	57 Kg/cm ²
PRESIÓN DE LA ZONA ENTRE DIAFRAGMAS	30 Kg/cm ²
VELOCIDAD	489 m/s

Experimento 6

No. DE EXPERIMENTO	6
SISTEMA DE SOLDADURA	ACERO-COBRE
ÁNGULO DE COLISIÓN	20°
GAS	NITROGENO
ESPELOR DE LA PLACA BASE	4 mm
ESPELOR DE LA PLACA VOLADORA	3 mm
MASA TOTAL DEL PROYECTIL	505 g
PRESIÓN DE CAMARA DE COMPRESIÓN	65 Kg/cm ²
PRESIÓN DE LA ZONA ENTRE DIAFRAGMAS	32 Kg/cm ²
VELOCIDAD	502 m/s

Experimento 7

No. DE EXPERIMENTO	7
SISTEMA DE SOLDADURA	COBRE-ACERO
ÁNGULO DE COLISIÓN	25°
GAS	HELIO
ESPEJOR DE LA PLACA BASE	6 mm
ESPEJOR DE LA PLACA VOLADORA	3 mm
MASA TOTAL DEL PROYECTIL	390 g
PRESIÓN DE CAMARA DE COMPRESIÓN	35 Kg/cm ²
PRESIÓN DE LA ZONA ENTRE DIAFRAGMAS	-
VELOCIDAD	620 m/s

Experimento 8

No. DE EXPERIMENTO	8
SISTEMA DE SOLDADURA	ACERO-COBRE
ÁNGULO DE COLISIÓN	25°
GAS	NITROGENO
ESPEJOR DE LA PLACA BASE	6 mm
ESPEJOR DE LA PLACA VOLADORA	3.1 mm
MASA TOTAL DEL PROYECTIL	438 g
PRESIÓN DE CAMARA DE COMPRESIÓN	76 Kg/cm ²
PRESIÓN DE LA ZONA ENTRE DIAFRAGMAS	35 Kg/cm ²
VELOCIDAD	520 m/s