



Ministerio de Educación Superior  
Instituto Superior Minero Metalúrgico  
“Dr. Antonio Núñez Jiménez”  
Facultad Metalurgia-Electromecánica  
Departamento Mecánica

# ***Carga de impacto de alta velocidad para la unión de materiales disímiles***

***Tesis en opción al título de Ingeniero Mecánico***

***Autor (a): Arays Vidal Hernández***

***Tutores: Ing. Juan Ramón Castillo Matos***

***Prof. Tit. Tomás Fernández Columbié, Dr. C.***

***Moa - 2018***



## Declaración de autoridad

**Yo:** Arays Vidal Hernández

Autora de este trabajo de diploma, certifico su propiedad intelectual a favor del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa "Dr. Antonio Núñez Jiménez", el cual podrá hacer uso del mismo con la finalidad que estime conveniente.

-----  
Arays Vidal Hernández

-----  
Ing. Juan Ramón Castillo Matos

-----  
Dr. C. Tomás H. Fernández Columbié



## ***Pensamiento***

*El ignorante afirma, el sabio duda y reflexiona.*

*El sabio no dice todo lo que piensa, pero siempre piensa todo lo que dice.*

***Aristóteles.***



# **Agradecimientos**

***Este trabajo ha sido posible gracias al apoyo incondicional y la preocupación de muchas personas, por eso quisiera agradecer a:***

***La Revolución por brindarme esta oportunidad de superarme y convertirme en una profesional.***

***A toda mi familia por haberme apoyado durante mis cinco años de estudio.***

***Un agradecimiento a mis tutores el Ing. Juan Ramón Castillo Matos y el Dr. C. Tomás Fernández Columbié por su constante dedicación en la realización de este trabajo, sin ustedes hubiese sido imposible alcanzar esta meta.***

***A todos mis profesores que influyeron en mi formación profesional.***

***A todos mis compañeros(as) de cuarto y de aula por haber compartido conmigo estos años de estudio.***

***A todos:***

**MUCHAS GRACIAS**



## **Dedicatoria**

***Quisiera dedicar este trabajo a:***

***Mi madre: Ismelda Hernández Domínguez por ser mi mayor  
inspiración para este trabajo.***

***A mis abuelos: Jesús Rodríguez y Yolanda Domínguez por ser la  
fuerza que me impulsa a lograr todos mis deseos.***

***A todos mis tíos y tías por su dedicación todo este tiempo y en  
especial a mi tía Iraidis por su apoyo incondicional.***

**A TODOS GRACIAS POR EXISTIR**

## Resumen

En el trabajo tiene como objetivo establecer el comportamiento microestructural de uniones disímiles cobre – acero AISI 1020 por el proceso de soldadura por explosivos. Se consideró parámetros como velocidad de impacto con valor de 341 m/s, una velocidad de colisión de 2841 m/s suficiente para la unión de estos materiales. Cuenta con un radio de la carga de 0,534 kg, todo ello con un volumen de explosivo de 930 cm<sup>3</sup> y una densidad de 1,15 g/cm<sup>3</sup>, parámetros que aseguran el flujo plástico para lograr la unión metalúrgica de las aleaciones estudiadas. Se utilizó como sustancia explosiva el TECTRÓN 100. En las microestructuras de ambos materiales se observó que el cobre presenta granos equiaxiales de diferentes tamaños orientados al azar, de bordes rectos y curvados, con algunas partículas pequeñas de segunda fase dispersas dentro de ellos y el AISI 1020 compuesta por granos de ferrita exquiaxiales, los cuales se reducen en la medida que se acercan a la zona de fusión del cobre. En los perfiles de dureza, la misma se incrementa en el cobre de 109 HRB hasta 202 HV y desde 170 HB hasta 230 HV en la interfase de la unión soldada. Por último se realiza el impacto ambiental y la valoración económica.

## Abstract

The objective of the work is to establish the microstructural behavior of dissimilar copper - steel AISI 1020 joints by the process of welding by explosives. Parameters were considered as speed of impact with value of 341 m / s, a collision speed of 2841 m / s sufficient for the union of these materials. It has a load radius of 0,534 kg, all with an explosive volume of 930 cm<sup>3</sup> and a density of 1,15 g / cm<sup>3</sup>, parameters that ensure the plastic flow to achieve the metallurgical union of the alloys studied. The TECTRÓN 100 was used as the explosive substance. In the microstructures of both materials it was observed that the copper presents equiaxed grains of different sizes oriented at random, with straight and curved edges, with some small particles of second phase dispersed inside them and the AISI 1020 composed of exquiaxial ferrite grains, which are reduced as they approach the copper melting zone. In the hardness profiles, it increases in copper from 109 HRB to 202 HV and from 170 HB to 230 HV at the interface of the welded joint. Finally, the environmental impact and economic valuation are carried out.



No.	TABLA DE CONTENIDOS	Pág.
	<b>Capítulo1. Marco Teórico. Antecedentes Investigativos</b>	4
1.1	Introducción	5
1.2	Resistencia mecánica a diferentes temperaturas	6
1.3	Generalidades de los aceros	7
1.3.1	Acero al carbono	7
1.3.2	Proceso de recristalización aleaciones	8
1.4	Proceso físico de la soldadura por explosión	9
1.5	Características generales de los explosivos	11
1.6	Velocidad de detonación	13
1.7	Aspectos metalúrgicos de la soldadura por explosivos	15
1.8	Uniones soldadas disímiles	18
1.8.1	Aplicación de uniones soldadas disímiles	19
1.9	Soldadura de aceros disímiles por explosión	22
1.9.1	Zona afectada térmicamente en los aceros	24
1.10	Conclusiones del capítulo 1	26
	<b>Capítulo. 2 Materiales Y Métodos</b>	27
2.1	Introducción	27
2.2	Composición química estándar de las aleaciones	27
2.2.1	Microestructura patrón de las muestras	28
2.3	Material explosivo empleado para la unión	29
2.4	Plan experimental	30
2.4.1	Realización de experimento	31
2.4.2	Parámetros en el proceso de soldadura por explosión	31
2.5	Preparación metalográfica de la probeta	34
2.5.1	Corte y pulido de las muestras	35
2.5.2	Ataque químico de las muestras	36
2.6	Observación microscópica	37
2.7	Ensayo de dureza aplicada a las muestras	38
2.8	Obtención del porcentaje de microconstituyentes	39
2.9	Diseño de experimentos	40
2.9.1	Calculo de la varianza	41



2.10	Conclusiones del capítulo 2	42
	<b>Capítulo 3. Análisis de los Resultados</b>	43
3.1	Introducción	43
3.2	Análisis de la composición química de las aleaciones	43
3.3	Análisis de los parámetros del proceso de soldadura	44
3.4	Análisis microestructural de la aleaciones cobre-acero AISI 1020	46
3.5	Análisis del porcentaje de microconstituyentes en las muestras	47
3.6	Análisis de la dureza	50
3.7	Diseño de experimentos	51
3.7.1	Procesamiento estadístico de los datos	52
3.8	Análisis económico	54
3.9	Valoración del impacto medio ambiental	54
3.9.1	Emanaciones en la soldadura por explosivos	55
3.10	Conclusiones del capítulo 3	57
	<b>Conclusiones Generales</b>	
	<b>Recomendaciones</b>	
	<b>Bibliografías</b>	

## INTRODUCCION

Desde tiempos inmemoriales la unión de piezas siempre ha sido una preocupación del hombre. Esta unión que inicialmente se convirtió en un asunto de supervivencia para el hombre de la antigüedad luego se convertiría a partir de ese momento en una cuestión fundamental.

En la actualidad, debido a las progresivas reclamaciones en aras de la producción, con el desarrollo de nuevos materiales, estos deben trabajar en condiciones cada vez más severas, lo que conduce a la degradación de los mismos por desgaste, corrosión o fatiga. Debido a estas condiciones, se ha impulsado el desarrollo de nuevos materiales o procesos para la recuperación y funcionalización de nuevas superficies.

La necesidad de unir materiales disímiles mediante procesos de soldadura por explosión surge como resultado de la complejidad existente en la construcción de algunos equipos y maquinarias requeridas en la industria de generación de energía, tales como calderas, intercambiadores y recuperadoras de calor, turbinas, refinerías. El diseño de tales equipos tiene un alto nivel de exigencia en cuanto a la selección de los materiales a utilizar en su construcción, además del proceso de soldadura empleado en la unión de estos. Esto lleva a que se tenga que investigar y ensayar cuidadosamente con el fin de descubrir las mejores condiciones bajo las cuales se deban efectuar dichas uniones.

Independientemente de cual sea el material, el proceso de soldadura empleado y el tratamiento térmico posterior, pueden producir algunos cambios microestructurales en la interfase, que en consecuencia pueden originar cambios en sus propiedades metalúrgicas.

Las actuales exigencias tecnológicas ponen de manifiesto la necesidad de disponer de materiales metálicos con elevadas prestaciones bajo condiciones de servicio críticas, así por ejemplo, las matrices metálicas empleadas en los procesos metalúrgicos en la fabricación en frío y en caliente de los materiales, necesitan alta tenacidad y elevada dureza superficial, especialmente a alta temperatura en algunos casos.

La mayor parte de las piezas que componen las máquinas y motores, se fabrican de forma que sus propiedades mecánicas sean bastante uniformes en toda la masa. Sin embargo, en ciertos mecanismos es necesario que algunas piezas tengan superficies muy duras o resistentes al desgaste y a la penetración y el núcleo central muy tenaz, para poder soportar los choques a que están sometidas.

Como **situación problemática** se plantea:

La soldadura por explosivo de materiales es una técnica que ha sido investigada, sin embargo solo se ha basado en la aplicación de la tecnología, tipos de explosivos, velocidad de detonación, como proceso para endurecer materiales, unir materiales disímiles, no obstante a ello, las literaturas consultadas no precisan estudios acerca de la estructura interna de esta unión, así como de las propiedades mecánicas luego de realizado el proceso.

### **Problema**

El estudio acerca de las propiedades metalúrgicas y mecánicas de uniones disímiles cobre y AISI 1020 sometidas a proceso de soldadura por explosivo, aún es insuficiente.

### **Objeto**

Unión disímil de cobre y AISI 1020 por proceso de soldadura por explosivo

### **Campo**

Propiedades metalúrgicas y mecánicas de uniones disímiles por proceso de soldadura por explosivo.

### **Hipótesis**

A partir de la unión de materiales disímiles obtenidos por proceso de soldadura por explosivo, es posible establecer su comportamiento metalúrgico y mecánico en correspondencia con la temperatura de fusión de estos materiales.

## **Objetivo general**

Determinar la relación microestructural y las propiedades mecánicas obtenidas mediante la soldadura por explosivos en una unión disímil entre cobre y AISI 1020 en base a la metalurgia de las zonas obtenidas.

## **Objetivos específicos**

1. Caracterizar los materiales empleados en el proceso de unión de soldadura con el empleo de las cargas explosivas.
2. Caracterizar las zonas formada por la influencia de la carga explosiva en base a la microestructura obtenida, así como de las propiedades mecánicas luego del proceso de soldadura con explosivos.
3. Analizar las variaciones microestructurales originadas en la zona fundida y la zona de influencia térmica, así como la dureza resultante obtenida después del proceso de soldadura por explosivo.

## **Tareas de trabajo**

- ✓ Revisión bibliográfica relacionadas con el objeto de estudio,
- ✓ Planificación, diseño y realización de experimentos,
- ✓ Fundamentación de las inestabilidades metalúrgicas que surgen en el proceso de soldadura por explosivo de los aceros disímiles,
- ✓ Análisis de resultados y obtención de las microestructuras resultante del proceso de soldadura con explosivos de los aceros,
- ✓ Planteamiento de los efectos económicos, sociales y ambientales del proceso de soldadura por explosivos.

# **Capítulo 1**

## **Marco teórico de la investigación**

## **CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO DE LA INVESTIGACIÓN**

### **1.1. Introducción**

Con el desarrollo de nuevos materiales, los métodos de unión de piezas han ido variando con el de cursar del tiempo. Las uniones soldadas disímiles (USD) han sido utilizadas en la industria química, petroquímica y en la conducción de hidrocarburos como una alternativa para solucionar problemas de corrosión o pérdida de propiedades mecánicas que experimenta un componente o sección de un equipo; pero la mezcla de materiales disímiles no ha sido suficientemente estudiada en comparación con las uniones soldadas entre aceros del mismo tipo.

En el presente capítulo se establece como objetivo realizar un análisis de la bibliografía existente relacionada con la soldadura por explosivos en materiales disímiles como el cobre y el acero AISI 1020.

### **1.2. Generalidades sobre el cobre**

El cobre es el tercer metal más utilizado en el mundo, por detrás del hierro y el aluminio; es un metal de transición de color cobrizo (rojizo) y brillo metálico que, junto con la plata y el oro, forma parte de la llamada familia del cobre, se caracteriza por ser uno de los mejores conductores de electricidad (el segundo después de la plata). Gracias a su alta conductividad eléctrica, ductilidad y maleabilidad, se ha convertido en el material más utilizado para fabricar cables eléctricos y otros componentes eléctricos y electrónicos.

El cobre forma parte de una cantidad muy elevada de aleaciones que generalmente presentan mejores propiedades mecánicas, aunque tienen una conductividad eléctrica menor. Las más importantes son conocidas con el nombre de bronce y latones. Por otra parte, el cobre es un metal duradero porque se puede reciclar un número casi ilimitado de veces sin que pierda sus propiedades mecánicas.

El cobre, lo mismo que el oro y la plata se encuentra en forma nativa, por lo que ya en la antigüedad el hombre, que desconocía aún la metalurgia, pudo emplearlo. A pesar de que el contenido de cobre en la corteza terrestre es pequeño (0,01 %), no es un metal disperso, sino que se concentra en los minerales de cobre, por lo que su

concentración es del orden del 5 %. El volumen de la producción de cobre va aumentando. Actualmente el cobre se obtiene de minerales sulfurosos que contienen perita de cobre ( $\text{Cu-FeS}_2$ ), mediante una serie de procesos metalúrgicos. El cobre bruto obtenido después de estos procesos contiene una pureza de 99,5 – 99,9 % de Cu (cobre primario, técnicamente puro) (Guliaev, 1977).

El cobre puro recocido posee un límite de resistencia) que varía de 220 – 240 MPa, una dureza de 40 – 50 HB y alargamiento relativo del 50 %. El cobre puro se utiliza en la industria electrónica dada su alta conductibilidad eléctrica (después de la plata es el mejor conductor de la electricidad) y se fabrica en forma de producto semi acabado: alambre, varillas, cintas, hojas, flejes y tubos.

Como consecuencia de su baja resistencia mecánica el cobre no se emplea como material de construcción, sino que se utilizan sus aleaciones con zinc, estaño, aluminio, silicio, manganeso y plomo. Además el cobre puro presenta una gran plasticidad, alta conductibilidad calorífica y pequeña oxidabilidad.

Plantea Ettlíng (1978) y Montoliu (2007) que debido a la ductilidad que presenta el mismo, permite transformarlo en cables de cualquier diámetro, a partir de 0,025 mm. La resistencia a la tracción del alambre de cobre estirado es de unos 420 MPa y puede emplearse tanto en cables y líneas de alta tensión exteriores como en el cableado eléctrico en interiores, cables de lámparas y maquinaria eléctrica en general: generadores, motores, reguladores, equipos de señalización, aparatos electromagnéticos y sistemas de comunicaciones.

La resistencia a la corrosión del cobre, el bronce y el latón permitió que estos metales hayan sido utilizados no solo como decorativos sino también como funcionales desde la Edad Media hasta nuestros días. Además del uso bélico del cobre para la fabricación de objetos, como hachas, espadas, cascos o corazas; también se utilizó el cobre en la Edad Media en luminarias como candiles o candelabros; en braseros y en objetos de almacenamiento, como arcas o estuches.

El cobre cristaliza según una red cúbica centrada en las caras. Los átomos están situados en cada uno de los vértices y en el centro de las caras. Estas características de la estructura son importantes dado que a ellas se debe la gran capacidad de

deformación del cobre. Quintero (1994) señala que, en la mayoría de los metales, la temperatura de recristalización para el caso estático coincide con el 60 % de la temperatura de fusión para las aleaciones y el 40 % de la temperatura de fusión para metales puros. En particular para el cobre desoxidado, la temperatura de recristalización depende de la cantidad de oxígeno presente en el metal, a menores deformaciones previas y mayor contenido de oxígeno presente, las temperaturas de recristalización serán mayores para el cobre (Levinson, 1977 y Anderson (1977)).

### **1.2.1. Resistencia mecánica a diferentes temperaturas**

Las características mecánicas del cobre mejoran generalmente con el descenso de temperatura. La resistencia a la tracción y el límite elástico son más elevados que a temperatura ambiente, el alargamiento también aumenta. Las propiedades de resistencia a la deformación del cobre descienden muy rápidamente por encima de los 100 °C, aunque la capacidad de deformación permanece muy elevada hasta temperaturas próximas a la de fusión, siendo ésta una indicación de excelente aptitud para la deformación en caliente.

Las propiedades mecánicas del cobre permanecen a nivel satisfactorio hasta 150 °C ó 200 °C. Por encima de esta temperatura las características mecánicas disminuyen rápidamente y el metal experimenta un aumento de grano muy perjudicial para su comportamiento en servicio (Prasad y Rao, 2004).

Considera Humphreys (2006) que a la temperatura ordinaria, la superficie del cobre en aire seco, se recubre de una película de  $\text{Cu}_2\text{O}$  que protege la superficie, a 150 °C ésta película crece rápidamente. Bajo película de la acción de la humedad de los sulfuros, del gas carbónico, esta se ennegrece y adquiere posteriormente una pátina negra (azufre) o verde. A temperatura más elevada, la película de  $\text{Cu}_2\text{O}$  formada al aire aumenta se espesor y según la pureza del metal puede o no escamarse.

La ley de crecimiento y adherencia de la película tienen una gran importancia para ciertas aplicaciones. Las adiciones de fósforo favorecen el escamado de la película, sobre todo mediante un rápido enfriamiento por temple en agua después del calentamiento.

Según Lugo *et al.* (2003) el cobre fundido puede absorber una cierta cantidad de carbono, sin embargo el carburo no es estable en el cobre solidificado. Debido a su acción el  $\text{Cu}_2\text{O}$  se reduce en la interfase metal/CO, y las partículas subyacentes de  $\text{Cu}_2\text{O}$  permiten la difusión de oxígeno, por solubilidad en el cobre, y debido al gradiente provocado por la producción que se ha llevado a cabo en la superficie. Es posible, con tiempo suficiente, desoxidar totalmente un cobre oxidado por calentamiento en atmósfera de CO, y sin que se produzca ningún daño como ocurre en el caso del hidrógeno. Los ácidos orgánicos atacan fácilmente al cobre y a todas sus aleaciones.

### 1.3 Generalidades de los aceros

En el procesamiento, obtención y comercialización de aleaciones ferrosas, el principal productor siderúrgico es el acero, correspondiéndole aproximadamente el 90% de su producción a los aceros al carbono y el 10% a los aceros aleados. Por lo tanto, el material metálico más importante para la industria es el acero al carbono.

Los dos componentes principales del acero se encuentran en abundancia en la naturaleza, lo que favorece su producción a gran escala. Esta variedad y disponibilidad lo hace apto para numerosos usos como la construcción de maquinaria, herramientas, edificios y obras públicas, contribuyendo al desarrollo tecnológico de las sociedades industrializadas.

Otra razón del amplio dominio de los aceros es la diversidad de microestructuras y propiedades finales que presentan, las cuales pueden ser generadas por transformaciones en estado sólido y el método de procesamiento tal como ocurre en los aceros de alta resistencia y baja aleación (Badeshia y Honeycombe; 2006).

#### 1.3.1 Acero al carbono

El acero al carbono es una aleación de composición química compleja, entre un metal (el hierro) y un metaloide (el carbono), que conserva las características metálicas del primero, pero con propiedades notablemente mejoradas gracias a la adición del segundo y de otros elementos metálicos y no metálicos.

Además de hierro, cuyo contenido puede oscilar entre 97,0 - 99,5 %, hay en él muchos elementos (impurezas) cuya presencia se debe a los procesos de su

producción (manganeso y silicio, que añaden como desoxidantes), a la dificultad de excluirlos totalmente del metal (azufre, fósforo, oxígeno, nitrógeno e hidrógeno, elementos que provienen generalmente de los combustibles utilizados para el procesamiento) o a circunstancias casuales (cromo, níquel, cobre y otros que pueden estar presentes en los yacimientos). En la tabla 1.1 se muestra la clasificación de los aceros al carbono.

Tabla 1.1. Clasificación de los aceros al carbón. Fuente: Guliaev (1983).

Nombre común	% de C	Soldabilidad
Acero de bajo carbono	0,15 máx.	Excelente
Acero suave o dulces	0,15	Buena
Acero de medio carbono	0,30-0,50	Poca (precalentar y calentar)
Acero de alto carbono	0,50-1,00	Poca (difícil soldar si no se calienta y precalienta)

Los primeros aceros eran caracterizados por contener altos porcentajes de carbono, lo cual los hacía susceptibles a la fisuración en frío y por lo tanto solo era posible unirlos mediante remaches. Sin embargo, en la década de los cuarenta se fabricaron aceros con bajos porcentajes de carbono, donde se disminuyó el problema de la fisuración en frío y por consiguiente se incrementó la soldabilidad de estos aceros.

### 1.3.2 Proceso de recristalización en aleaciones

Otro hecho que tiene lugar cuando los metales y sus aleaciones se someten a diferentes temperaturas es la recristalización. El término temperatura de cristalización se refiere no a una temperatura definida por debajo de la cual el proceso de recristalización no ocurrirá, sino a la temperatura aproximada a la que una material altamente trabajado en frío se recristaliza por completo en una hora (Gesnouin *et al.*, 2004).

Los metales puros suelen tener bajas temperaturas de recristalización en comparación con los metales y aleaciones impuras. El zinc, el estaño tienen temperaturas de recristalización inferiores al ambiente. Esto significa que estos metales no pueden trabajarse en frío a temperatura ambiente, ya que se recristalizan espontáneamente, reconstruyendo una estructura reticular libre de tensión (Tarín y Badía, 2006).

Plantea Kuznik *et al.* (2008) que a medida que se alcanza la temperatura superior del intervalo de recuperación, aparecen nuevos cristales en la microestructura, los cuales tienen la misma composición y estructura reticular que los granos originales no deformados y no están alargados, sino que son aproximadamente uniformes. Los nuevos cristales suelen aparecer en las porciones del grano más drásticamente deformadas, por lo general en los límites de granos y planos de deslizamiento.

El agrupamiento átomos del que se forman los nuevos granos se llama núcleo. La recristalización tiene lugar mediante una combinación de nucleación de granos libres de deformación y crecimiento de estos núcleos para abarcar todo el material trabajado en frío. A mayor cantidad de deformación previa, menor es la temperatura necesaria para iniciar el proceso de la recristalización, ya que habrá mayor distorsión y más energía interna disponible (Hyuk *et al.*, 2000).

Al aumentar el tiempo de recocido disminuye la temperatura de recristalización. El proceso de recristalización es sensible a cambios en temperatura, otro procedimiento para ver la temperatura desarrollada en el incendio. Otro dato a tener en cuenta es el crecimiento de sufren los granos de la estructura metálica con la temperatura (Polmear, 2006). Todos los granos crecen al aumentar la temperatura. Los granos grandes tienen menor energía libre que los pequeños, esto se asocia con la menor cantidad del área de frontera de grano; por tanto, en condiciones ideales, el menor estado de energía para un metal será aquel que tendría si estuviera formando un cristal (Askeland, 1998).

#### **1.4. Proceso físico de la soldadura por explosión**

Esta soldadura hace lo que ningún otro método de soldadura puede hacer. Unir prácticamente cualquier trozo de metal, no importa el tipo ni su composición. La soldadura por explosión permite que metales muy diferentes como el aluminio, el acero al carbono o la aleación de metal, el acero inoxidable o aleaciones de cobre puedan ser soldadas unas a otras (Bataev *et al.*, 2017).

En la soldadura por explosión por sus siglas en inglés (EXW) (Explosión Welding) y como se muestra en la figura 1.1, la unión se establece a través de la deformación intensa de la interfase. Una esterilla explosiva se coloca encima de la lámina o placa

de revestimiento (la placa móvil), mantenida a una distancia crítica de la superficie del material base.

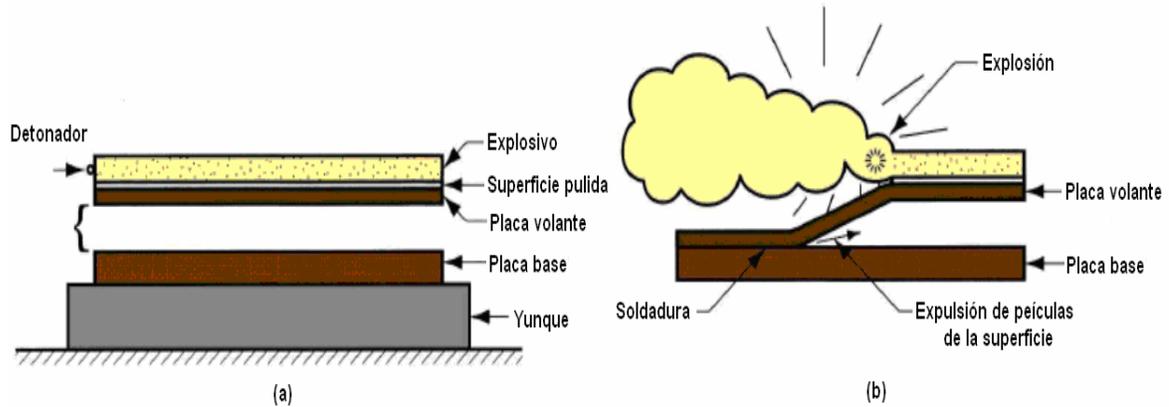


Figura 1.1. Proceso de soldadura por explosivo. Fuente: Almira (2015).

La figura (a) es el proceso de instalación en configuración paralela y la figura (b) es durante la detonación de la carga explosiva. Según se observa, el proceso de soldadura por explosión, es donde una coalescencia rápida de dos superficies metálicas es causada por la energía de un explosivo detonado donde no se usa metal de relleno (ULAEX, 2000), no se aplica calor externo, no ocurre proceso difusivo y el tiempo es demasiado corto. La unión es metalúrgica, combinada con un entrelazado mecánico que resulta de un rizado.

Cuando el explosivo es detonado desde un extremo como se muestra en la figura 1.2, la presión desarrollada acelera la placa móvil en un ángulo respecto a la superficie. Bajo la intensa presión, se forma un chorro fluido que expulsa los contaminantes superficiales.

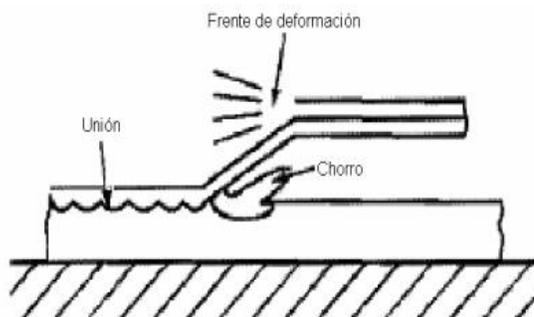


Figura 1.2. Desarrollo del proceso de soldadura por explosión.

En muchos casos no hay fusión, pero la combinación de la adhesión y del entrelazado mecánico asegura una unión fuerte. La técnica se utiliza para revestir placas grandes para la industria química, aunque el proceso se ha generalizado a otras industrias. Comúnmente usado para unir dos metales disímiles, en particular para revestir un metal en la superficie de un metal base, sobre grandes aéreas. Explosive welding (EXW).

### **1.5. Características generales de los explosivos**

Se le llaman explosivos o sustancias explosivas, a las combinaciones químicas o mezclas mecánicas, que bajo la acción de determinados factores externos tienen la propiedad de hacer la explosión; es decir que son capaces de transmitir rápidamente la transformación química, formando gases recalentados y a considerable presión que al dilatarse producen un trabajo mecánico (Brunton y Wilson 1970).

Esta soldadura implica la aplicación de calor altamente localizado en metales que responden a la ley física de expansión - contracción, capaces de afectar su estructura y en condiciones de movimiento restringido, de esta manera se puede afirmar que durante el calentamiento que la soldadura impone a una pequeña parte de las piezas, el aumento de volumen de ésta resulta impedido por el calentamiento desigual del metal base y por el grado de embridamiento que tenga la misma, por lo que el crecimiento del volumen libre será función directa del gradiente de temperatura y del coeficiente de dilatación del material calentado (Masubuchi, 1980; Mochizuki *et al.*, 2005).

En la soldadura por explosivos (Kalpakjian y Schmid, 2006) la composición del explosivo y el tipo se selecciona para rendir un descargo de energía específico y una proporción de la detonación específica (la velocidad a que la detonación viaja delante de la capa explosiva). La proporción de la detonación debe ser supersónica con respecto a las velocidades acústicas de los metales.

El explosivo que es generalmente granular es uniformemente distribuido en la superficie de la placa de revestimiento, que llena el marco de la contención, el explosivo, con una alta velocidad de propulsión, se enciende en un punto predeterminado de la superficie de la placa, luego la detonación viaja fuera de los

límites de iniciación y por la superficie de la placa, se genera la expansión del gas y la detonación explosiva acelera la placa del revestimiento, produciéndose una colisión angular. El impacto resultante crea las altas presiones localizadas en el punto de la colisión (Didyk *et al.*, 1994).

La reacción debe ocurrir tan rápido que la energía liberada en la explosión no se difunda, y sea realmente concentrada en el volumen que inicialmente ocupa la sustancia explosiva. Se diferencian las siguientes formas de transformación química de las sustancias explosivas (Otaño, 1998):

- Detonación
- Combustión explosiva
- Deflagración

Abordado en Almira (2015); Casals (1997), Otaño (1998) y Caraballo (2004), afirman que la deflagración y detonación de materiales energéticos, son reacciones exotérmicas de óxido – reducción. Estas reacciones son auto sostenidas después de que cierta energía inicial de activación ha sido aplicada. Sobre las bases de masa, la cantidad de energía liberada por propelentes y explosivos es similar. Sin embargo, esta energía es considerablemente menor que la producida por combustibles comunes, tales como el carbono quemado en aire. Los propelentes sufren deflagración, que es una combustión muy rápida resultado de tener un combustible y un oxidante en íntimo contacto.

Por otro lado Mariño (2000) considera que esta deflagración se lleva a cabo de la misma manera que un quemado normal cuya reacción se inicia en la superficie y prosigue al interior de la partícula. Los factores que gobiernan la deflagración son la velocidad de transferencia de calor dentro de la partícula del propelente y la velocidad de descomposición del mismo. La velocidad de transferencia de calor depende de la presión de los productos de la combustión y la velocidad de quemado se define como la velocidad a la cual la superficie de quemado consume un grano propelente en la dirección normal a la superficie.

Los explosivos, plantean Bahrani *et al.* (1966), tienden a detonar y durante la detonación, un frente casi discontinuo o un cambio abrupto de presión, conocido

como onda de choque, se desplaza a velocidades supersónicas a través del explosivo, causando su descomposición. La velocidad de reacción es determinada, en este caso, por la velocidad de la onda de choque y no por la velocidad de transferencia de calor, esta velocidad de onda de choque es también llamada velocidad de detonación. Idealmente, en estado estacionario, la onda de detonación puede considerarse como una discontinuidad viajando a través del explosivo con velocidad.

### 1.6. Velocidad de detonación

Es la velocidad expresada en metros por segundo, con la cual la onda de detonación recorre una columna de explosivo. La velocidad puede ser afectada por el tipo de producto, su diámetro, el confinamiento, la temperatura y el cebado.

Las velocidades de detonación de los explosivos comerciales fluctúan desde 152 hasta más de 670 m/seg. Durante el proceso, las primeras capas de material tienen características de plasma debido a la alta velocidad de impacto de 200 a 500 m/s. Mientras mayor sea la rapidez de la explosión, mayor suele ser el efecto de fragmentación. La presión en el punto de colisión, que puede ser entre 700 a 4 200 MPa, los cuales son suficientes para mantener el metal con aspecto de fluido viscoso.

Según Ben-Artzy (2010), la velocidad de colisión y la velocidad de la plancha volante deben ser menores que la velocidad del sonido en cada uno de los componentes a soldar. Esta condición se establece como una explicación de la condición necesaria para que la onda de tensión reflejada no interfiera con la onda incidente en el punto de colisión. Como la velocidad de colisión está relacionada con la velocidad de detonación y el ángulo  $\beta$  (ángulo de la placa volante), ésta puede ser ajustada por la reducción de la velocidad  $D$  (velocidad de detonación) o por la introducción de un ángulo de oblicuidad.

Cuando  $\beta < 10^\circ$  se puede utilizar una aproximación  $\beta$  y  $V_p$  son los dos parámetros más importantes en la soldadura por explosión. La formación de una reacción es esencial. En la figura 1.3 se muestra la variación del ángulo.

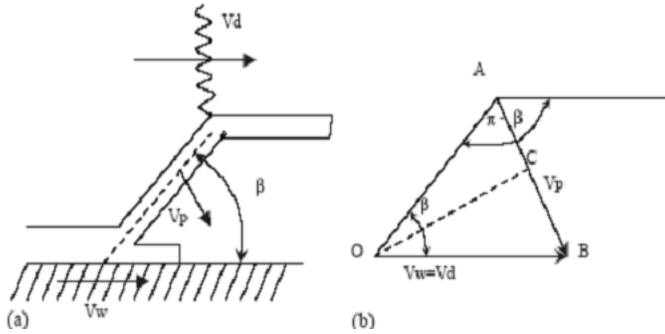


Figura 1.3 Variación del ángulo  $\beta$ . Fuente: Hayet *et al.* (1971).

Wylie *et al.* 1971 desarrollaron un gráfico (figura 1.4) en el que se relaciona el ángulo  $\beta$  con la velocidad de soldadura  $V_w$ . Estudiaron la formación de la propulsión, la presión de impacto crítica, la máxima velocidad de impacto y la transición de velocidad ondular suave.

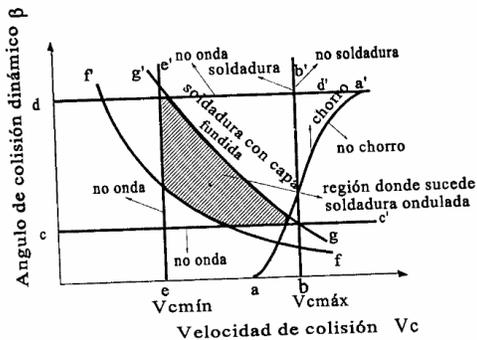


Figura 1.4. Relación del ángulo  $\beta$  con la velocidad de soldadura.

Fuente: Arnold *et al.* (2002).

El área rayada de la figura representa el lugar geométrico dentro del cual se puede tomar un punto cuyos parámetros determinen una soldadura aceptable. La presión de impacto mínima debe ser excedida, así como la velocidad mínima de la plancha para que la energía de impacto sea suficiente y ocurra la soldadura (Durgutlu *et al.*, 2008). Esto sugiere según estudio realizado por Durgutlu *et al.* (2005), que la energía de impacto requerida está en relación con la energía de deformación y con la resistencia a la fluencia dinámica de la plancha volante. Un límite superior para el valor de la energía tiene que ser observado para evitar exceso de calor y posiblemente fundiciones por disipación viscosa y por lo tanto la formación de capas

de compuestos frágiles. Tal límite superior sería buscado en términos de energía de fusión o del más bajo punto de fusión de los metales a soldar.

Una suficiente separación entre las planchas (Matsui *et al.*, 2013) tiene que ser prevista de tal manera que la plancha volante sea acelerada con una velocidad de impacto requerida. Esa separación satisfactoria puede tomar valores comprendidos entre la mitad del espesor de la plancha y su valor completo. Aunque existen diferentes valores de este espacio en función de la gravedad específica del material de la plancha volante. Estos son múltiplos del espesor de la plancha en:  $(1/2 - 2/3)$ ,  $(1/2 - 1)$ ,  $(2/3 - 2)$  para gravedad específica menor que 5; entre 5 y 10 y mayor que 10 respectivamente.

Del análisis de los parámetros físicos más importantes, la interacción entre la geometría y los parámetros de la colisión dinámica por un lado y las características del material por el otro, hace muy difícil separar completamente sus respectivos papeles. Consecuentemente algunos autores han intentado estimar la energía total requerida y de ésta, la cantidad de carga explosiva en preferencia a una aproximación teórica basada en el mecanismo de este proceso de soldadura (Mousavi y Sartangi, 2009).

### **1.7. Aspectos metalúrgicos de la soldadura por explosión**

Los problemas metalúrgicos en la soldadura por explosión no son tan severos como los asociados con los métodos convencionales de soldadura por fusión, excepto aquellos problemas relacionados con la soldadura de material muy disimilares, los cuales no pueden ser soldados por medios convencionales. Sin embargo, hay algunos aspectos que están relacionados solamente con la soldadura por explosión, como el efecto de las ondas de choque.

En la soldadura por explosivos para garantizar una buena soldabilidad los metales deben poseer una alta conductividad térmica, insignificante coeficiente de dilatación lineal y pequeña contracción. En la figura 1.5 se muestra el aspecto típico de la intercara de la soldadura por explosivos.

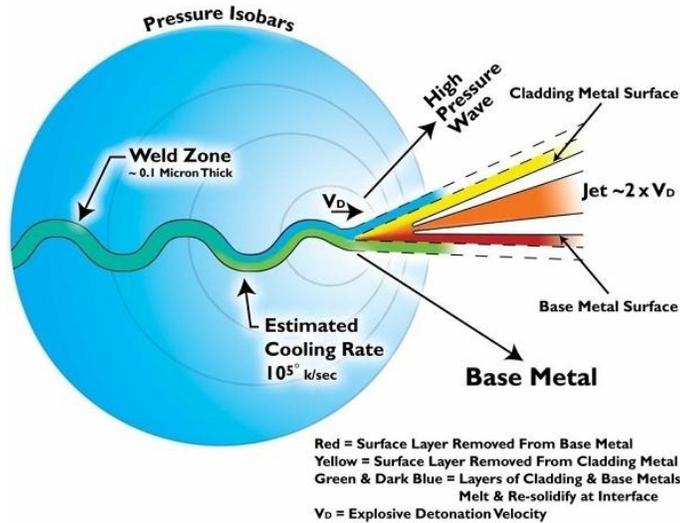


Figura 1.5. Aspecto típico de la intercara de la soldadura por explosivos.

Como se puede apreciar en la figura 1.5 Acarer *et al.* (2004) plantea el aspecto típico de la intercara ondulada de una soldadura por explosión. Para ángulos de oblicuidad grandes  $15^\circ$  el chorro escapa completamente de la intercara y esto conduce a una soldadura en fase sólida. Cuando el ángulo de impacto es menor de  $5^\circ$ , el chorro queda total o parcialmente atrapado. En este caso, la energía cinética que posee se convierte en energía térmica, produciendo fusión en cierta zona y observándose (bolsitas) del metal fundido por delante y por detrás de las crestas de las ondas. Bajo condiciones extrema, es posible producir una intercara de soldadura que consiste totalmente en unión por fusión.

Por la ocurrencia del proceso de soldadura, que tiene un tiempo de duración, en el punto de unión corta (Durgutlu *et al.*, 2008), la zona de calor es reducida así como los efectos del calentamiento en los materiales, donde las zonas fundidas sufren los problemas metalúrgicos normalmente asociados a la fusión, tales como cavidades de enfriamiento y producción de compuestos intermetálicos, ya que al estar asociada a los torbellinos de la intercara, se alcanzan velocidades de enfriamiento muy rápidas.

En la soldadura por explosión, la relativa delgadez de las capas interfaciales en este tipo de soldadura, se debe a las altas velocidades de calentamiento y enfriamiento y por consiguiente, al intervalo de tiempo extremadamente pequeño en que esta intercara permanece a alta temperatura. La deformación del grano interfacial y la

formación de una onda sugieren que el mecanismo de soldadura debe ser asociado con un proceso de flujo. La existencia de un cortante interfacial durante la soldadura se atribuye al efecto del calor generado por dicho cortante en la intercara. Este podría causar suficiente calor en las capas límites como para propiciar la unión y podría también estar relacionado con la formación de la onda (Bhadeshia, 2001)

Plantea Garcia-Jacomino *et al.* (2003), que las velocidades de deformación extremadamente altas en la zona de la intercara pueden conducir a altas concentraciones de defectos puntuales y dislocaciones. La recuperación y recristalización indican que se ha producido un reacondicionamiento de átomos y dislocaciones durante e inmediatamente después de la soldadura y no es irracional suponer que se puede producir difusión interfacial en la soldadura de materiales disimilares. Debido a la detonación de la carga explosiva, la placa volante se encuentra sometida a una onda de choque de alta presión, la cual flamea dentro de la misma. La componente de compresión de la detonación normal de la superficie de la placa se refleja en la superficie inferior como una onda de extracción.

Como consecuencia la placa es acelerada hacia abajo en una serie de pasos. Se ha demostrado que el 90% de la velocidad terminal de la placa volante se alcanza después de que tres ondas de compresión han atravesado la misma (Titov *et al.*, 2002). Cuando la placa volante choca contra la placa base, se generan nuevamente ondas de choque de alta presión en ambas placas. Estas ondas de choques de alta presión provocan un endurecimiento por choque, pero cerca de la intercara de soldadura, donde la liberación de calor es significativa, puede producirse una relajación de tensiones, dando lugar a la reducción de la dureza.

Según Caraballo (1997), en la soldadura por explosión se observa frecuentemente maclado, no solo en las estructuras CC, sino también en las estructura CCC de baja energía de apilamiento, otro efecto de las ondas de choque es el resquebrajamiento, que es causado por la onda de tracción reflejada en la superficie inferior de la placa volante y en condiciones normales de soldadura, este efecto no se produce, pues se usa una cantidad moderada de explosivo. Además este efecto tiene lugar cuando se usan explosivos de alta velocidad de detonación.

## 1.8. Uniones soldadas disímiles

Diversas industrias, tales como las termoeléctricas, la química y petroquímica presentan secciones que están hechas de aceros al carbono o alguna otra aleación las cuales por razones económicas están sometidas a temperaturas menores a 100 °C. Sin embargo, otras secciones operan a elevadas temperaturas donde los problemas de corrosión o pérdida de las propiedades mecánicas están presentes, que causan fallas que deben ser reparadas o cambiadas frecuentemente (Celik y Alsaran, 1999), Almira (2015).

Por tal razón es importante seleccionar la aleación correcta para estas aplicaciones con base en su funcionalidad, efectividad y economía, siendo necesario producir uniones disímiles de alta calidad para tomar las ventajas de ambos materiales; así lo refleja (Madhusudan y Srinivasa, 2009; Reddy *et al.*, 2008) y Almira (2015).

A pesar de la factibilidad de la fabricación de uniones soldadas disímiles con aplicación directa en diferentes sectores industriales estas han presentado defectos tanto de fabricación como metalúrgicos, con la promoción de fallas durante su aplicación en servicio. Por lo tanto, el ingeniero de soldadura tiene que resolver el problema de cómo tratar el material y de cómo soldarlo correctamente. Es ahí donde la unión de materiales disímiles adquiere gran importancia (Metzger y Lison, 1976; Arivazhagan *et al.*, 2008; Madhusudan y Srinivasa, 2009), dando origen a diversos estudios dirigidos hacia la comprensión de las fallas que se presentan durante el servicio, las cuales han sido vinculadas a las uniones disímiles mediante el fenómeno de desunión, que es atribuido al borde de grano tipo II que se presenta en la zona de transición de las uniones disímiles (Nelson *et al.*, 1999; Lippold y Kotecki, 2005).

En el caso de la soldadura de dos metales diferentes en la soldadura por explosivos, hay que establecer una ventana de soldabilidad para cada metal y sobreponer una sobre la otra, resultando un área sobrepuesta dentro del cual se pueden obtener los parámetros con los que se soldará la combinación en cuestión. El método de establecer una ventana de soldabilidad para cada material de la combinación a soldar y como resultado de la superposición de ellas dos, obtener una tercera ventana es desde nuestro punto de vista, bastante complicado, lleva recursos,

técnicas sofisticadas para determinar las propiedades de los metales de materiales a soldar.

### 1.8.1 Aplicación de uniones soldadas disímiles

Entre las reducidas aplicaciones de esta soldadura están la calderería, para la fabricación de recipientes a presión, y la industria eléctrica, para la fabricación de juntas de transición donde entran en juego materiales difícilmente soldables entre sí como el aluminio y el cobre.

Fernández *et al.* (2014) establece el comportamiento microestructural de una unión soldada disímil en una aleación HK 40 y el hierro fundido 24, realizó una caracterización química de ambas aleaciones, para ello tuvo en cuenta un total de nueve muestras, las que fueron soldada por proceso manual por arco eléctrico (SMAW), en este trabajo se emplearon electrodos revestidos del tipo E 312 – 16, el UTP 65 y el Castell Xiron 244, demostrándose en el análisis microestructural y en el diagrama de Schaeffler, que la disposición de la unión con el electrodo E 312 – 16 provoca la aparición de estructura interdendrítica con origen a la fundición blanca, siendo más favorable la unión con el electrodo UTP 65. Los autores del trabajo realizaron además el análisis de microdureza en cada unión.

Matsui *et al.*, (2013), en su trabajo consideran aleaciones de las series Al 5052 - O, 6061 T6, 6 M 83 - T4 y 7075 - T6, la aleación de magnesio AZ 31 B - O y titanio comercialmente puro TP 270 C, los autores consideran que de ser posible la unión metálica de estas aleaciones por el método de la soldadura por explosivos, entonces el automóvil al usar los metales ligeros seleccionados (aluminio, magnesio y la aleación de titanio) se evitaría el uso de los remaches. En la experimentación controlan la temperatura para evitar la formación de fase intermetálica a partir del bajo punto de fusión y la reactividad del aluminio y las aleaciones del Magnesio.

Sikka *et al.* (1987) estudian el proceso de soldadura a nivel atómico a través de las simulaciones de la dinámica moleculares para establecer la formación del chorro de reacción y la correlación con la fundición instantánea de la región de la interfase, en la observación microscópica observaron los tamaños de cristales en el orden de los

10 – 20 nm. Con la simulación precisan las velocidades de impacto y ángulos seleccionados para la ocurrencia del chorro de reacción.

Verstraete *et al.* (2011 ) en su trabajo destacan la diferencia entre la soldadura por pulso magnético y la del proceso de soldadura por explosivos, los autores plantean que en el sector privado, en particular el transporte e industrias frigorífica, apoyan la evolución del establecimiento del primer proceso por presentar mejor calidad, en el artículo se demuestra que ambos procesos son iguales, pero no son los mismos ya que por los parámetros del proceso y sobre todo aquellos de la soldadura explosiva, la placa móvil, por la velocidad que alcanza se traduce en una transformación de la interfase por la ocurrencia de la formación de liso a ondulado y un aumento en la dureza en las superficies de ambos metales.

Concluyen que, aunque ambos procesos usan un impacto de alta velocidad para lograr la unión metalúrgica, al realizar la observar las imágenes microscópicas se revela la apariencia de una vinculación ondulada similar, sin embargo en la soldadura por explosivos, el chorro de reacción limpia las superficies durante la soldadura y que en la soldadura por pulso magnético se necesita un desengrasado para obtener el efecto positivo en las soldaduras.

Metzger (1976) al exponer sobre los fundamentos de la soldadura por explosivos precisa que la aplicación del proceso no solo tiene como únicas ventajas la unión de metales de uso frecuente como el titanio o circonio y acero, que estos materiales unidos fuertemente se usan en los procesos químicos, que intuitivamente, puede asumirse que las grandes presiones producidas por los diferentes tipos de explosivos usados en la unión pueden lograr uniones energicamente fuertes, sin embargo, la alta presión no es solo lo suficiente para formar una unión metálica satisfactoria.

Crossland (1982) plantea que la soldadura por explosivos es un proceso considerado de gran aplicación, uno de los primeros reconocimientos está establecido en el año 1960, donde DuPont en Estados Unidos, se acredita la patente No. 3, 140, 539, denominada "Proceso por unir Metales por los medios explosivos. Desde entonces, el proceso ha sido continuamente refinado y aplicado al incremento de numerosas aplicaciones en muchas industrias industriales. También precisa la existencia de

otras patentes americanas como la 228.107 específicamente, "Uso de explosivo en la unión de metal por fusión".

Precisa este mismo autor que se lista 148 patentes emitidas desde 1 976, donde algunas de ellas son para los refinamientos básico del procedimiento, mientras otros cubren las aplicaciones de la soldadura por explosión de materiales diversos para las industrias como el empaquetado hermético electrónico, los clubes de golf y utensilios de cocción.

Jonas *et al.* (2003) al referirse a los explosivos considera que el material explosivo más común usado es ANFO (el nitrato - combustible del amonio de aceite), pero se usan otros explosivos para aplicaciones dónde se requiere una detonación particular, velocidad y rendimiento. La cantidad de explosivo varía ampliamente, pero los trabajos de la soldadura pueden completarse con cargas que van 2 000 lb, en esta soldadura, el proceso debe realizarse en áreas seguras y debe realizarse con autorización y no experimentar con explosivos diseñado por uno mismo, ya que existen numerosos códigos que establecen el manejo y cuidado de los explosivos que deben ser cuidadosamente observado.

Según Pernia (1988), en los explosivos detonantes la velocidad de las primeras moléculas gasificadas es tan grande que no ceden su calor por conductividad a la zona inalterada de la carga, sino que lo transmiten por choque deformándola y produciendo su calentamiento y explosión adiabática con generación de nuevos gases. El proceso se repite con un movimiento ondulatorio que afecta a toda la masa explosiva y se denomina onda de choque.

La soldadura de materiales disímiles impone un reto para los ingenieros relacionado con la integridad estructural de las uniones disímiles debido a su diferencia en términos de microestructura, propiedades mecánicas, térmicas y propiedades de fractura (Samal *et al.*, 2011). El problema de la unión de materiales disímiles ha sido bien reconocido. La aplicación industrial ha experimentado fallas en la zona de transición entre los materiales debido a las diferencias en los coeficientes de expansión térmica por los metales base y el material de aporte) (Klueh *et al.*, 1983; Celik y Alsaran, 1 999; Joseph *et al* 2005 estas fallas pueden presentarse después de 15 ó 20 años de operación o cuando la vida útil ha sido cumplida.

El empleo industrial en Cuba de procedimientos tecnológicos para el uso de explosivos, es exclusivamente referido en un reporte de aplicación de investigadores del CENIC (Meriño, 1977), trabajos preliminares llevados a cabo por el coordinador del grupo de trabajo de los metales con explosivos del ISMMMoa (Casals, 1997); e investigaciones realizadas por (Caraballo, 1997 y 2004). También se reportan trabajos en este campo realizadas por Leyva (2003), Parodi (1991), relacionado con el endurecimiento del acero Hadfield por el método de explosivos.

### **1.9 Soldadura de aceros disímiles por explosión**

En la soldadura de materiales disímiles, donde el material de aporte y uno de los materiales base presentan una diferencia significativa en la composición química en comparación al otro material, presentan diferentes efectos durante la unión. Por ejemplo, al unir acero al carbono con un acero inoxidable se presenta la migración del carbono ya que el alto contenido de cromo en el metal de soldadura promueve la difusión del carbono, hacia el acero inoxidable.

Esto es de gran interés cuando las uniones disímiles son expuestas a elevadas temperaturas, como lo pueden ser, las condiciones de servicio o tratamientos térmicos postsoldadura, aunque las condiciones citadas anteriormente pueden no influenciar directamente este efecto. La difusión del carbono puede influenciar la formación de zonas de alta dureza, incluso cuando el tiempo de permanencia a elevadas temperaturas durante los ciclos de soldaduras son extremadamente cortos, existiendo una ligera disminución del carbono en la ZAT del acero al carbono, lo cual indica que el carbono pudo difundir dentro del metal de soldadura y hacia la región de transición. La manipulación y variaciones de las turbulencias del charco de soldadura tienen una influencia significativa en la formación de la región de transición (Doddy, 1992).

En la soldadura disímil por explosivos la unión soldada presenta características diferentes a la soldadura convencional. En la figura 1.6 se puede observar la variación en la morfología de la ola en dependencia de la velocidad de detonación del explosivo.

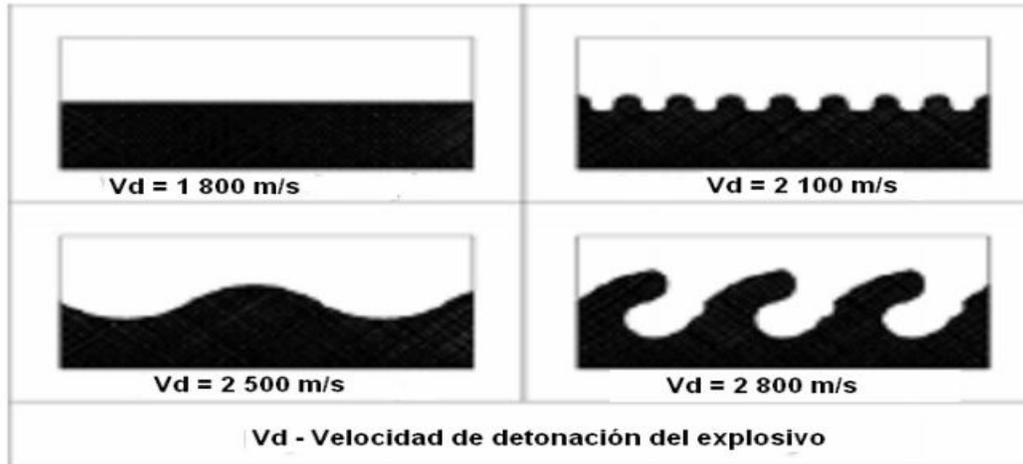


Figura 1.6. Morfología de la ola en dependencia de la velocidad de detonación del explosivo.

Según las morfologías de las olas que se obtienen durante el proceso, se observa que a una mayor velocidad de detonación, el comportamiento de la ola en unión soldada es mayor, lo cual está asociado a que este es un proceso de soldadura esencialmente por fusión, a partir de una disipación de la energía cinética en la intercara la cual es una fuente de calor suficiente como para causar la fusión bilateral a través de la intercara y una difusión dentro de las capas fundidas. Tal difusión de fluido permitiría una transición gradual desde un metal hacia el otro.

Se ha observado en la unión de materiales con el empleo de soldadura por explosivos (figura 1.7) la intensidad y propagación de las olas en la unión disímil cobre y tantalio, aluminio, tantalio y acero inoxidable, donde los materiales presentan punto de fusión diferente.

Los procesos de compactación dinámica ofrecen ciertas ventajas potenciales sobre otras técnicas de compactación convencional, por ejemplo: se pueden alcanzar presiones extremadamente altas y densidades cercanas a las teóricas, se puede lograr unión entre partículas en estado sólido (sin sinterización subsiguiente), procesar polvos químicamente a fines sin riesgos de la formación de compuestos, reteniendo las propiedades y estructuras de los polvos originales.

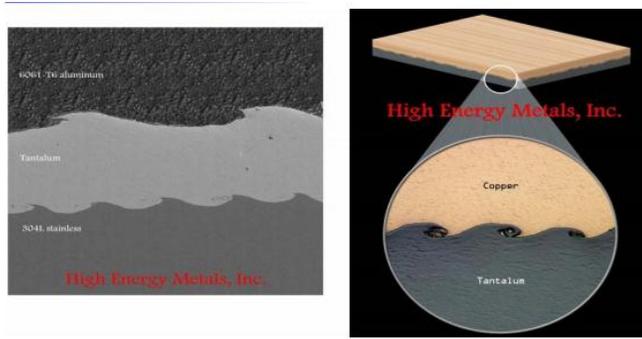


Figura 1.7. Comportamiento de la ola en diferentes materiales soldados.

Se ha hallado que, bajo condiciones ideales de soldadura, la resistencia a la tracción y al cizallamiento del compuesto soldado es mayor que la del más débil de los componentes, debido al endurecimiento por choque y que el porcentaje de alargamiento del compuesto soldado es en cambio apreciablemente menor. Algunos han encontrado una reducción en la resistencia a la fatiga no importante, mientras que otros encontraron que la resistencia a la fatiga era levemente mayor que el más resistente de los materiales. Se ha comprobado la dureza en secciones normales a la soldadura.

El resultado de estos ensayos varía considerablemente pero sin excepción, la dureza general de ambos componentes se ve aumentada por el paso de la onda de choque a través de ellos. En muchos casos se ha encontrado valores muy altos de dureza como resultado de la fusión y del rápido enfriamiento. El efecto del endurecimiento interfacial, que muchas veces se encuentra en este tipo de soldadura, ha sido aprovechado en el endurecimiento de superficies de rieles.

### 1.9.1 Zona afectada térmicamente en los aceros

La zona afectada térmicamente (ZAT) es el resultado de los ciclos térmicos originados por el proceso de soldadura (calentamientos y enfriamientos rápidos) (Sunghak *et al.*, 1992; Oystein, 1994), los cuales promueven transformaciones microestructurales en estado sólido de la fase en la zona adjunta a la zona de fusión.

Posteriormente la temperatura continúa incrementándose hasta alcanzar la temperatura máxima (temperatura pico) antes de iniciar el enfriamiento. El crecimiento del grano de austenita se inicia después de formarse, pero también el

crecimiento puede ocurrir después de que la fase de austenitización es completada (Zhang *et al.*, 2005).

La región supercrítica puede ser dividida en dos regiones; región de crecimiento de grano y región de grano refinado, todas las cuales están definidas por la temperatura pico y al historial térmico al que fueron sometidas (AWS, 1990; Zhang *et al.*, 2005).

El crecimiento de grano se presenta cuando la temperatura pico del ciclo térmico de soldadura alcanza la temperatura de dilución de los precipitados. Los cuales evitaban este efecto. Debajo de esta temperatura, el ciclo térmico usualmente produce un tamaño de grano menor que el del metal base.

Ciertas regiones de la ZAT sufren un crecimiento de grano posterior a la fase de austenitización, ocasionando que la tenacidad sea usualmente menor que la del material base (Sawhill, 1977). Este efecto puede vincularse a la estabilidad termodinámica de los elementos de aleación a elevadas temperaturas y los precipitados que estos forman.

El otro factor relacionado a la disminución de tenacidad en la ZAT es la cantidad de constituyentes M - A, las cuales se forman a partir de la austenita rica en carbón en conjunto con los elementos como el Mo y B (Oystein, 1994). La formación de este constituyente aumenta en relación del porcentaje de manganeso, debido a que este elemento promueve la disminución en la actividad del carbono dentro de la fase austenita que resulta en la formación del constituyente M - A. La reducción a la formación de este constituyente se ha relacionado con la disminución de los contenidos de carbono así como el carbono equivalente (AWS, 1990; Easterling, 1992), lo que produce una mejora a la tenacidad.

### **1.10 Conclusiones del capítulo 1**

- ❖ Se ha demostrado que con la realización de este tipo de soldadura es posible realizar uniones de materiales disímiles, con diferentes espesores e independiente de la conductividad térmica que presenten los materiales.
- ❖ Para obtener una mayor calidad de las uniones soldadas por explosivos, se tienen en cuenta parámetros como: el tipo de explosivo, la velocidad de detonación, la carga explosiva, así como a la conductividad térmica que posean los materiales a unir.
- ❖ La zona afectada térmicamente en los aceros durante el proceso de soldadura con el empleo de explosivos es el resultado de los ciclos térmicos originados por el bajo punto de fusión que ocurre en esta zona, sin embargo hay que elegir los parámetros de soldadura, pues también se puede formar compuestos intermetálicos en las pequeñas zonas fundidas cuando se suelda por explosión.

# **Capítulo 2**

## **Materiales y Métodos**

## CAPÍTULO. 2 MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1. Introducción

Los explosivos son sustancias que tienen poca estabilidad química y que son capaces de transformarse violentamente en gases. Esta transformación puede realizarse a causa de una combustión como en el caso de la pólvora o por causa de un golpe, impacto, fricción, en cuyo caso recibe el nombre de explosivos detonantes, como es el caso de las dinamitas y los nitratos de amonio. Cada explosivo tiene características específicas definidas por sus propiedades, el conocimiento de estas propiedades es un factor importante para el buen diseño de operación, además permiten elegir el más adecuado de ellos.

El segundo capítulo tiene como objetivo establecer el procedimiento metodológico del proceso de soldadura por explosión del acero AISI 1020 y del cobre.

### 2.2. Composición química estándar de las aleaciones

La composición química estándar de estas aleaciones según Alloy Casting Institute (ACI), muestra la designación adoptada por la ASTM, de la American Society for testing Materials – ASTM y la SAE, se refleja en la tabla 2.1.

Tabla 2.1. Composición química del acero estructural AISI 1020, en %

Tipo	C	Si	Mn	P	S	Fe
AISI 1020	0,18 - 0,23	0,50	0,30 - 0,60	0,040	0,027	Resto

Aunque el contenido del carbono no es el único factor que afecta la soldabilidad de los aceros, al incrementar el porcentaje de este elemento, aumentan los problemas de agrietamiento de los mismos. Cuando los niveles de carbono alcanzan el rango de 0,30 a 0,35 %, normalmente se requiere tomar precauciones especiales, como son el precalentamiento, el control de la entrada de calor y el tratamiento térmico post soldadura. Se recomienda el uso de materiales y procesos que introduzcan bajos niveles de hidrógeno para lograr una soldadura exitosa, aspecto éste de gran importancia, expuesto por Holtzman *et al* (1965).

Pequeñas cantidades de impurezas originan variaciones significativas en las características tecnológicas, lo que ha hecho indispensable caracterizar el cobre por

su calidad. Las normas internacionales clasifican el cobre en diversos tipos y las composiciones químicas de estos tipos varían ligeramente según la norma utilizada. En la tabla 2.2 se muestra la composición química del cobre según la Norma ASTM B 224, la cual clasifica 21 tipos de cobre para diversos usos.

Tabla 2.2. Composición química del cobre, en %

Cobre	ASTM	Cu + Ag	Bi	Pb	P
Cu-DHP	B224	99,90	2,5 máx	0,23 máx	0,015 a 0,040

La clasificación del cobre por esta norma, es del tipo Cu-DHP, cobre de la más alta conductividad, dentro de sus elementos, el fósforo, afecta la conductividad eléctrica. Material de alta conductibilidad eléctrica (58 ó 57 m/mm<sup>2</sup> en estado recocido), con un contenido de oxígeno: 0,005-0,040 % poco adecuado para soldar (sin aportación) y soldadura fuerte, debido al peligro de rajarse (malo al hidrógeno) se utiliza en todas las aplicaciones, donde es necesario alta conductibilidad eléctrica, como la electrotécnica y la electrónica.

Las características de ductilidad y maleabilidad del cobre permiten que este metal sea capaz de experimentar profundas transformaciones plásticas, pero ante todo, sus características tecnológicas más importantes son su aptitud para la elaboración secundaria por extrusión, laminación, trefilación y fabricación de curvas y embocinados, su solubilidad en fase sólida que le permite unirse a otros metales para formar aleaciones y su facilidad para unirse con otras piezas de cobre o con otros metales por medio de soldadura.

### 2.2.1 Microestructura patrón de las muestras

Para determinar el comportamiento microestructural de los materiales objeto de estudio se consideró la microestructura de una muestra patrón de cada uno de ellos, como se observa en la figura 2.1. La muestra 2.1(a) se corresponde con la muestra del acero AISI 1020 y la figura 2.1 (b) es del cobre.

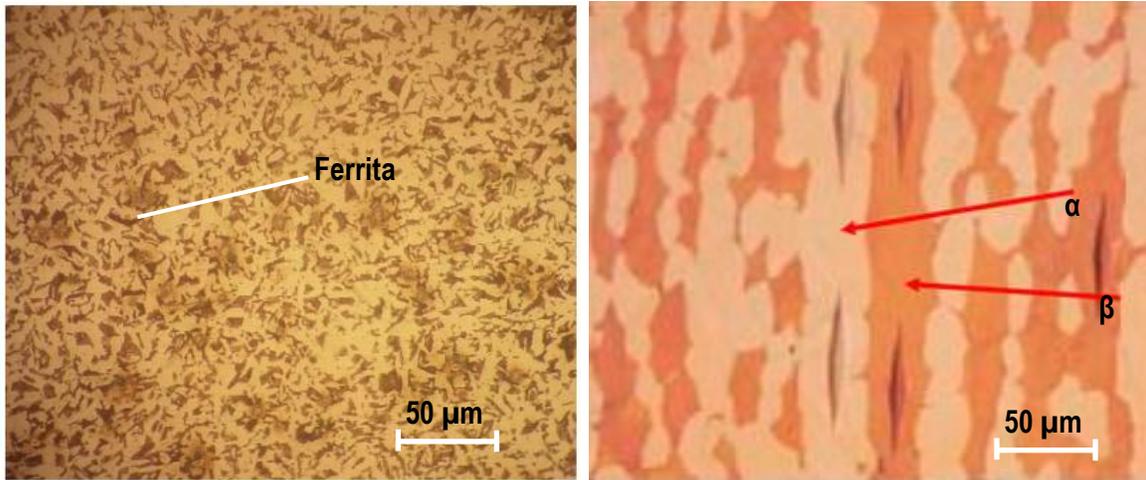


Figura 2.1(a). Acero AISI 1020.

Figura 2.1 (b). Estructura del cobre

La figura 2.1(a) que se corresponde con el acero estructural AISI 1020, está compuesta por una matriz de grano de ferrita distribuido de forma equiaxial en toda su matriz, y la figura 2.1 (b) corresponde a la del cobre que presenta una estructura fase  $\alpha$  y fase  $\beta$  en toda su estructura.

### 2.3 Material explosivo empleado

Para la realización de la unión se utilizó como sustancia explosiva industrial, el TECTRON 100, emulsión encartuchada en mangas de polietileno de diferentes diámetros, única sustancia explosiva que se comercializa en la actualidad en Cuba, el cual cumple con todos los requerimientos exigidos para la realización de la soldadura por explosivos de las aleaciones objeto de estudio.

Los parámetros de detonación del TECTRON 100 se relacionan a continuación (Ulaex, 2000):

Densidad ( $\rho$ )..... 1,15 g/cm<sup>3</sup> (1150 kg/m<sup>3</sup>)

Energía específica ( $E_e$ )..... 740 kcal/kg (3 098 232 Nm/kg)

Velocidad de detonación ( $V_d$ )..... Se establece en función del diámetro de la carga (según gráfico proporcionado por la firma suministradora).

Presión de detonación ( $P_d$ )..... Se establece en función del diámetro de la carga (según gráfico proporcionado por la firma suministradora).

Aunque la presión de detonación también puede obtenerse utilizando el gráfico correspondiente para el caso de la carga cilíndrica, se prefiere realizar el cálculo de esta presión teniendo como información primaria la velocidad de detonación de la sustancia explosiva y su densidad. Con esto estaremos en condiciones de establecer la presión de detonación cualquiera sea la configuración de la carga explosiva a emplear, solamente conociendo la densidad de la sustancia explosiva y su velocidad de detonación.

## 2.4 Plan experimental

Para el desarrollo del plan experimental se prepararon las muestras de las aleaciones objeto de estudio. La unión se realizó en configuración paralela, como se muestra en la figura 2.2, se realizó primeramente la limpieza de la superficie de las probetas del (AISI 1020 y la del cobre.)

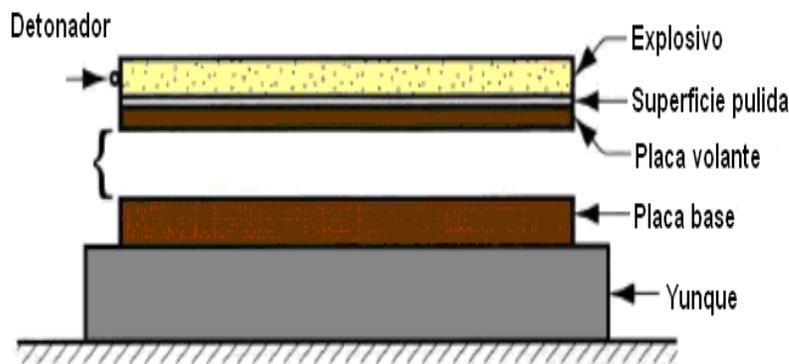


Figura 2.2. Preparación de la unión para la soldadura.

Tabla 2.3. Parámetros para la soldadura de las probetas

No	Aleación	Vd (m/s)	$\beta$
1	AISI1020 y Cobre	x	x

Las diferentes probetas se prepararon con longitud de 200 x 200 mm, se cortaron longitudinalmente, en una fresadora, la selección de los diferentes materiales a soldar se basa en buscar un material que permita una buena unión metalúrgica, también pueda emplearse para atenuar los problemas de desgastes que surgen en mecanismos expuesto a este fenómeno. La preparación de las muestras para la soldadura se realizó según Norma ASTM E - 92.

### 2.4.1 Realización de los experimentos

En la realización de los experimentos, se han escogidos dos variables a partir de las cuales es posible considerar los principales parámetros de detonación de la sustancia explosiva utilizada.

Las variables escogidas después de un estudio preliminar del tema, consideradas como las más importantes son: el espesor de la carga explosiva  $\delta$  y la velocidad de detonación, teniendo en cuenta que son fáciles de controlar como parámetros de la experimentación.

**El espesor de la carga explosiva ( $\delta$ ):** cantidad de sustancia explosiva a utilizar, y en consecuencia sobre el efecto de endurecimiento que se produzca. Es una magnitud que se relaciona con las propiedades energéticas de la sustancia explosiva empleada, estando vinculado en primer lugar con la velocidad de detonación del paquete explosivo y en segundo lugar con las presiones que se generan en las proximidades del frente de detonación, entre otros factores; en la medida en que se incrementan estos valores desde una magnitud crítica y hasta un valor límite.

**Velocidad de detonación (Vd.):** es una variable cuantitativa, se puede repetir cuantas veces sean necesarias (obteniéndose un nuevo resultado en cada impacto) y se ajusta a las características que poseen las aleaciones objeto de estudio para variar sus propiedades mecánicas por impactos repetidos. Teniendo en cuenta cada valor de (Vd.), se podrá conocer el valor total de la velocidad de deformación acumulada, considerada la misma como el producto de la magnitud (energía específica en relación a masa de sustancia explosiva) que recibe la probeta.

### 2.4.2 Parámetros en el proceso de soldadura por explosión.

Para el proceso de soldadura con explosivos, este puede ser dividido en tres etapas básicas, la detonación de la carga explosiva, la deformación y aceleración de la plancha volante y la colisión entre ambas planchas, los parámetros que se consideran para proceso de soldadura por explosivos se muestran a continuación:

Vp - velocidad de impacto.

$\beta$ - ángulo de colisión.

Vc- velocidad del punto de colisión.

La velocidad de impacto ( $V_p$ ) se calcula como:

$$V_p = 2V_d \times \text{sen} \frac{1}{2} \beta \quad (2.1)$$

**Donde:**

$v_d$  - velocidad de detonación; m/s

$\beta$  - Angulo de colisión.

Como se requiere de un chorro en la región de choque, el valor mínimo del ángulo de colisión  $\beta$  debe ser excedido para un metal dado. El valor de ángulo es una función de la velocidad de colisión, se calcula este valor crítico como una función de la velocidad de colisión y de la ecuación dinámica de estado por lo que  $\beta$  se calcula según la ecuación siguiente:

$$\beta = \tan^{-1} \left[ \frac{V_p \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)}{V_c - V_p \text{sen}\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \right] \quad (2.2)$$

**Donde:**

$V_c$  - Velocidad de colisión; m/s

$\alpha$  - se encuentra entre 3 y 30°

Debido a esto la velocidad de colisión vendría a ser calcula de la siguiente manera:

$$V_c = \frac{V_p}{2 \text{sen} \beta / 2} \quad (2.3)$$

El volumen del explosivo se calcula de acuerdo a las dimensiones y el espesor del explosivo.

$$V = a.b.c \quad (2.4)$$

**Donde:**

$a$  – largo de la plancha, cm

$b$  – ancho plancha, cm

$c$  – espesor del explosivo, cm

Para la masa del explosivo tenemos según Caraballo (2004) que la misma se calcula por la ecuación siguiente.

$$m = v \cdot \rho \quad (2.5)$$

**Donde:**

$v$  - volumen del explosivo,  $\text{cm}^3$

$\rho$  - densidad del explosivo,  $\text{g/cm}^3$

El radio de la carga se determina en adecuación a la ecuación siguiente:

$$R = \frac{m}{2} \quad (2.6)$$

**Donde:**

$m$  – masa del explosivo, kg

La componente de la presión de la detonación normal de la superficie de la placa se refleja en la superficie inferior de la misma como una onda de extracción. Como consecuencia la placa es acelerada hacia abajo en una serie de pasos. Se ha demostrado que el 90 % de la velocidad terminal de la placa volante se alcanza después de que tres ondas de compresión han atravesado la misma. Se calcula según Akbariet al. (2004) como:

$$P_D = 432 \cdot 10^{-6} \cdot \rho_e \cdot \frac{Vd}{1 + 0,8 \cdot \rho_e} \quad (2.7)$$

**Donde:**

$P_D$  - presión de detonación, MPa.

$\rho_e$  - densidad del explosivo,  $\text{g/cm}^3$

$Vd$  - velocidad de detonación, m/s

La velocidad del sonido del material de la placa volante depende del tipo explosivo y de su composición, se selecciona para lograr una detonación específica la velocidad ( $Vd$ ) y descargo de energía por el área de la unidad. La velocidad de la detonación

del explosivo debe estar aproximadamente menos del 120 % de la velocidad sónica del material. Se calcula según Durgutlu *et al.* (2008) como:

$$V_s = \sqrt{\frac{k_v}{\rho}} \quad (2.8)$$

$$k_v = \frac{E}{3(1-2\nu)} \quad (2.9)$$

**Donde:**

$\rho$  - densidad del material de la placa volante,  $\text{kg/m}^3$

$k_v$  - volumen adiabático;  $\text{N.m}^2$

$E$  - módulo de Young, MPa

$\nu$  - coeficiente de Poisson del material de la placa volante (0,21)

## 2.5 Preparación metalográfica de la probeta

Cuando se le practica la metalografía a una muestra dada, estamos dándole apertura al estudio de ciertas características estructurales que serán de gran ayuda para tener una amplia relación de sus propiedades tanto físicas como mecánicas, todo esto gracias a la ayuda del microscopio metalográfico. La preparación defectuosa de las probetas puede arrancar las inclusiones importantes, destruir los bordes de grano, revenir un acero templado o en general, originar una estructura superficial distorsionada que no guarda ninguna relación con la superficie representativa y características de la aleación. Las operaciones que se realizaron para la obtención de las propiedades del acero AISI 1020 y el cobre se resumen en el orden siguiente (NC 10-56:86 y ASTM E3- 95).

1. Corte de la muestra.
2. Desbaste y pulido.
3. Montaje y preparación de la probeta.
4. Ataque de la probeta.
5. Observación microscópica
6. Obtención de micrografías.
7. Obtención del por ciento de microconstituyentes

### 2.5.1. Corte y pulido de las muestras

Las operaciones de corte para la toma de las probetas, se realizaron en una fresadora del tipo 6 M 12 L, los regímenes de corte empleados con números de revoluciones de 40 rev/min y avance de 25 mm/rev, las dimensiones de las muestras son de 50 x 12,4 mm. En la figura 2.3 se muestran las mismas.



Figura 2.3. Corte de las muestras.

Se prepararon por corte 3 muestras metalográficas, las cuales serán sometidas a posterior análisis como son: el análisis microestructural, el análisis de la dureza. Los regímenes de corte empleados son: números de revoluciones de 40 rev/min y avance de 25 mm/rev, se empleó estos parámetros tratando en lo posible que, por efecto de la fricción pudiera existir variaciones en el comportamiento microestructural en algunas de las zonas de las muestras soldadas, además se empleó abundante refrigeración. Las dimensiones de las muestras son de 50 x 12,4 mm

El pulido con los papeles abrasivos se realizó variando la granulometría del mismo al ser aplicadas a la pieza de trabajo, desde la más gruesa a la más fina. Se emplearon lijas del tipo No 180, 240, 600, 800 y 1000 (ASTM E 3 - 95), la lija se montó sobre un plato para pulir, donde se cambió el sentido del lijado a 90° al pasar de un pliegue a otro para eliminar la capa de material distorsionado y deslizado dejado por el anterior, esto permitió obtener una superficie lisa y pulida, libre de impurezas o ralladuras. Las muestras se pulieron en una pulidora metalográfica marca PM 52 D, como se muestra en la figura 2.4.



Figura 2.4. Pulidora metalográfica marca PM 52 D.

Trabaja con un voltaje de 220 V a 60 Hz, presenta un peso total incluido el motor de 115 Kg. La fabricación de la pulidora es del 2015 con un número de serie 201500001946 de procedencia italiana, llevada el mercado internacional por la firma echoLAB.

Es una máquina automática cuenta con dos platos y un soporte para múltiples muestras, la misma fue diseñada para la preparación de las probetas metalográficas utilizando como material de trabajo lijas de variadas granulometrías para el desbaste de las probetas y paños utilizados en el pulido o acabado de las probetas metalográficas.

Para el acabado final se utilizó un paño de fieltro grueso, se usó como sustancia abrasiva suspensión de diamante GR 6 micrón. Una vez pulida se lavaron con agua destilada, secándose con papel de filtro, se volvieron a lavar con alcohol para evitar cualquier vestigio de grasa y pastas de pulir, se empleó la técnica de ataque químico.

### 2.5.2. Ataque químico de las muestras

En la tabla 2.4 se muestra el modo de preparación del reactivo químico empleado.

Tabla 2.4. Reactivos químicos empleados.

Materiales	Reactivos	Condiciones
AISI 1020	Nital: una parte de ácido nítrico y tres partes de ácido fluorhídrico	Ataque por inmersión
Cobre	Medio crisol de dicromato potásico (10 g) con una gota de ácido clorhídrico.	

Preparado el reactivo, se vierte un poco en una cápsula en la que se introduce la probeta unos instantes, mojando la superficie pulida. Se detiene el ataque con agua y

se observa la superficie. La operación se repite hasta que la superficie a examinar esté bien atacada. El tiempo de ataque es muy variable y sólo la práctica o la observación repetida de la probeta al microscopio dirán cuándo debe darse por terminado.

Después del ataque se lavó la probeta de nuevo con abundante agua corriente, se secó con alcohol (absoluto) y secada al aire. El ataque se realizó para poner de manifiesto el tamaño, forma y distribución del grano (fases o microconstituyentes), las heterogeneidades en la estructura y la segregaciones.

## 2.6. Observación microscópica

Para la observación de las probetas se empleó un microscopio óptico binocular reflexivo marca echoLAB como se muestra en la figura 2.5. Este microscopio óptico está dotado de una cámara instalada mediante el hardware que refleja la fotografía en el computador.

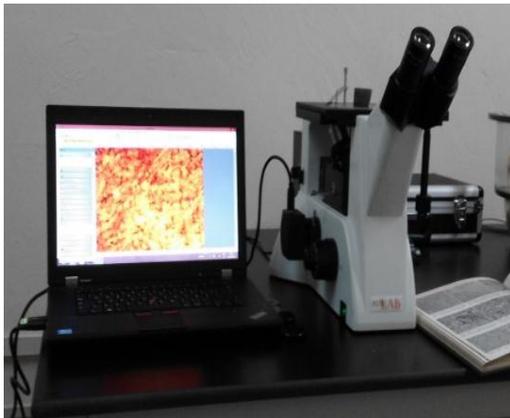


Figura 2.5. Microscopio óptico reflexivo.

Realiza la reflexión de la luz de una probeta ya pulida con el objetivo de evaluar los microconstituyentes con una cámara digital acoplada, la cual va desde el microscopio hacia una laptop marca LENOVO en la cual se encuentra un programa analizador de imágenes tomadas desde la cámara donde se evalúan las fases, tamaño del grano, inclusiones, afectaciones en los granos, en la misma se elabora un reporte técnico con estas características.

En este microscopio se determinó el comportamiento microestructural de las muestras del acero AISI1020 y las del cobre, así como el conteo del porcentaje de los microconstituyentes presentes.

## 2.7. Ensayo de dureza aplicada a las muestras

El ensayo de dureza se aplicó para determinar la dureza volumétrica en la aleación. En el ensayo se utilizó un microscopio modelo МПВ-1, del laboratorio de microscopía de Ciencia de los Materiales del ISMM Moa. La superficie de las probetas se prepararon de igual forma que para el análisis microestructural (desbaste y pulido). El número de dureza HV se determinó por el tamaño de las huellas.

Para determinar la dureza (HV) de las probetas de análisis se realizó para una carga de 5 kg, donde se midieron las diagonales de la huella de la punta de diamante penetrada en un tiempo de 10 segundos, las medidas se tomaron para diferentes puntos de pruebas, seleccionados aleatoriamente en la superficie.

Para la correcta medición de la dureza de las muestras

Para calcular la dureza (VH) se utilizará la fórmula:

$$VH = 1,854 \cdot \frac{P}{\bar{d}^2} \left[ \frac{kgf}{mm^2} \right] \quad 2.10$$

**Donde:**

$VH$  - número de dureza Vickers, MPa

1,854 - constante

$P$  - peso en el indentador; kg

El diámetro medio de las diagonales se determina por la ecuación siguiente:

$$\bar{d} = \frac{(d_1 + d_2)}{2} \quad 2.11$$

**Donde:**

$\bar{d}$  - diámetro medio; mm

$d_1; d_2; d_3; d_4$  - longitud de las diagonales; mm

$$\overline{VH} = \frac{\sum VH_1 + VH_2}{2} \left[ \frac{kg}{mm^2} \right] \quad 2.12$$

**Donde:**

$\overline{VH}$  - dureza promedio; MPa

El indentador empleado fue el de pirámide de diamante, con un ángulo de 136° según la ASTM E 92-82.

Para la dureza HRB se utilizó el durómetro digital Rockwell HRS-150 con un penetrador de bolas de diámetro 1,588 mm y una fuerza de 980 N para un tiempo de permanencia de 10s.

**2.8. Obtención del por ciento de microconstituyentes**

El por ciento de microconstituyentes fue determinado en el microscopio reflexivo. Este tipo de microscopio funciona básicamente por medio de la combinación entre el sistema óptico y la iluminación. En este ensayo los granos van a presentar colores diferentes, lo que indica que poseen una microestructura diferente. Adicionalmente los átomos en los límites de grano son más reactivos durante el ataque químico y se disuelven en mayor cantidad que el grano mismo, por ello la reflexividad cambia y se acrecienta su visibilidad. En la tabla 2.5 se muestra el procedimiento para el análisis de los microconstituyentes según la norma ASTM A 247.

Tabla 2.5. Procedimiento para el análisis de los microconstituyentes.

<b>Datos de la fase</b>		
Microconstituyentes	Área	Área %
1	Área 1	Área 1 %
2	Área 2	Área 2 %
3	Área 3	Área 3 %
4	Área 4	Área 4 %

El análisis de imagen fue necesario para caracterizar las fases presentes, como para estimar los porcentajes de los microconstituyentes presentes en la unión y poder estimar el porcentaje de elementos. Para el análisis de imagen se tomaron en cuenta los diferentes tipos de estructura, con el fin de evitar excesivas partículas muy pequeñas que se encuentran segregadas a lo largo de la matriz.

## 2.9 Diseño de experimentos

El diseño de experimentos se puede definir como un conjunto de métodos que se utilizan para manipular un proceso con el fin de obtener información de cómo mejorarlo. El diseño de experimentos permitió analizar los datos mediante modelos estadísticos y observar la interacción entre las variables independientes y como afectan a la variable dependiente. El diseño de experimentos que se consideró fue realizado con la ayuda del paquete office de Excel y el software STATGRAPHICS en su versión 1.5 en español.

Las probetas se sometieron a la acción de explosión en diferentes condiciones, a fin de evaluar la influencia de aquellos factores que pudieran tener un efecto significativo. Teniendo en cuenta que no se dispone de elementos, que permitan fijar de antemano los parámetros de aquellas variables que definan la calidad del proceso, se propone realizar el tratamiento matemático de las variables involucradas en la soldadura por explosión, el cual está relacionado con la velocidad de detonación y el ángulo de colisión y para determinar los cambios metalúrgicos internos que ocurren en las aleaciones.

### 2.9.1. Determinación de los coeficientes de regresión

En los modelos de regresión la variable dependiente  $Y$ , es siempre una variable aleatoria, mientras que los factores o variables independientes son considerados como variables no aleatorias. Se argumenta en el hecho de que en las aplicaciones prácticas los valores de las  $X_i$  suelen ser controladas o elegidas de antemano por el investigador, a los factores también se les denomina variables explicativas, ya que ellos en definitiva son los que explican el comportamiento de la variable dependiente (Box y Hunter, 1989).

La regresión del diseño de experimento se determina como:

$$Y_1 = b_0 + b_{1X_1} + b_{2X_2} + b_{12X_{12}} \quad (2.13)$$

Donde  $Y_1$  es la dureza obtenida del ensayo en N;  $X_1$  es el tiempo de duración de la soldadura, en s y  $L$  es la longitudes que se obtiene en cada probeta después de concluida la unión por soldadura, en mm.

### 2.9.2. Cálculo de la varianza

Ostle (1975) y Sarache (2004), consideran que el ANOVA, como técnica estadística, permite el estudio de las características medidas u observadas, cuyos valores dependen de varias clases de efectos que operan simultáneamente, esta técnica se basa en la división de la variabilidad total de una característica medible en la variabilidad causada por diferentes factores que intervienen en el problema. Después de calcular los coeficientes de regresión se realiza el procesamiento estadístico de los datos, determinando la varianza como:

$$J_y^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n_o} J_{y_i}^2}{N_o} \quad (2.14)$$

La significación de los coeficientes de regresión se comprueba por el criterio de t de student para una probabilidad de un 95 % o un intervalo de confianza de 0,05 y 15 grado de libertad ( $N_o - 1$ ).

Posteriormente se calcula la varianza por la ecuación siguiente:

$$J_{aj}^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n_o} (y - y^{\text{mod } f})^2}{N_o - K_o - 1} \quad (2.15)$$

Donde  $N_o = j$  y  $K_o$ , son el número de coeficientes significativos.

Por la ecuación 2.16 se calcula el coeficiente de fisher ( $F_{cal}$ ) y se compara con el fisher tabulado ( $F_{tab}$ ) según los grados de libertad del numerador y del denominador:

$$F_{cal} = \frac{J_{aj}^2}{J_y^2} \quad (2.16)$$

Si el  $F_{cal} > F_{tab}$ , entonces la ecuación describe adecuadamente el campo de la experimentación.

## **2.10 Conclusiones del capítulo 2**

- ❖ Se logró determinar que para una buena soldadura por explosión la velocidad de impacto y la velocidad de detonación junto con otros parámetros, juegan un papel importante en el proceso de unión de materiales.
- ❖ Se seleccionó como material explosivo empleado la sustancia explosiva industrial TECTRON 100, emulsión encartuchada en mangas de polietileno de diferentes diámetros, única sustancia explosiva que se comercializa en la actualidad en Cuba.
- ❖ Se estableció que el análisis de los perfiles de dureza y del comportamiento microestructural se realizará en correspondencia con las diferentes zonas seleccionadas, así como el porcentaje de microconstituyentes presentes en el acero AISI 1020 y el cobre.

# **Capítulo 3**

## **Análisis de los Resultados**

## CAPÍTULO 3: ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

### 3.1. Introducción

El acero es uno de los metales más usados y en combinación con el cobre, forman una aleación que nos ha permitido hacer materiales más accesibles y resistentes, gracias a las propiedades que presentan cada uno.

Debido a esto, se exponen los resultados derivados del trabajo experimental y a partir de los mismos, las expresiones matemáticas estadísticas que describen las regularidades del comportamiento deformacional del proceso de soldadura por explosivos de aleaciones disímiles sometidas a la acción de las cargas por explosivos.

El objetivo de este capítulo es establecer el procedimiento para el proceso de soldadura por explosivos de las aleaciones disímiles cobre – acero AISI 1020, así como el análisis de las microestructuras obtenidas.

### 3.2. Análisis de la composición química de las aleaciones

El análisis químico del material, como se observa en la tabla 3.1, se realizó empleando un espectrómetro de masa cuántico, ESPECTROLAB 230, con electrodo de carbón bajo arco sumergido en atmósfera de argón, ubicado en el laboratorio del taller de fundición de la empresa "Comandante Gustavo Machín Hoed de Beche", Moa.

Tabla 3.1. Composición química del acero AISI 1020, en %

C	Si	Mn	P	S	Fe
0,20	0,083	0,626	0,032	0,034	98,72

Al comparar la composición química real obtenida en la tabla anterior con la especificación estándar de la aleación planteada en el epígrafe 2.2 del capítulo 2, podemos afirmar que el resultado obtenido en el ensayo realizado anteriormente está en correspondencia con el establecido por la norma, por lo que estamos en presencia de los aceros AISI 1020.

### 3.3. Análisis de los parámetros del proceso de soldadura por explosión

El proceso de unión de materiales disímiles mediante soldadura por explosión comienza por la limpieza de las superficies a unir. Aunque el barrido de la onda explosiva ejerce una limpieza de las superficies durante el desarrollo del proceso.

Para determinar la velocidad de impacto por la ecuación 2.1 se tuvo presente tomar como velocidad de detonación 2800 m/s y un ángulo de colisión calculado por la ecuación 2.2 igual a 7 arribando como resultado final de 341 m/s.

El cálculo de la velocidad de colisión para unir el cobre y el acero es de 2 841 m/s determinada por la ecuación 2.3, tomando como datos los antes expuestos. La velocidad de colisión lograda es suficiente para mantener el metal con aspecto de fluido viscoso y lograr la unión metalúrgica entre ellos, ya que este mecanismo está basado en que bajo la acción de grandes cargas de choque que impactan la pieza a alta velocidad pueden precipitar fases secundarias, sobre todo del tipo carburo, en la matriz austenítica, lo que fue planteado por Zuidema *et al.* (1987), Lalonde (1998) y Xiaoyan y Yujiao (2001) y referenciado en Caraballo (2004) y Castillo-Matos *et al.* (2017).

De acuerdo con las dimensiones de la plancha de 50 x 12,4 cm aproximadamente y espesor del explosivo de 1,5 cm se obtuvo por la ecuación 2.4 un volumen de 930 cm<sup>3</sup>; siendo este volumen suficiente para unir al AISI 1020 y el cobre.

Para un volumen de explosivo de 930 cm<sup>3</sup> y como densidad del explosivo 1,15 g/cm<sup>3</sup> calculado por la ecuación 2.5 se obtuvo como resultado una masa de 1,06 kg y un radio de carga igual a 0,534 kg determinado por la ecuación 2.6. El volumen del explosivo calculado, permitirá el proceso de soldadura por presión, el cual permite la aparición de la deformación plástica en la intercara, así como la limpieza de la superficie para facilitar el proceso de difusión sólida que tiene lugar.

Antes de la unión, se consideró que el material de recubrimiento que se desplaza debido a la explosión de los explosivos comprimiera y produjera la eliminación del aire existente en el intersticio, despidiéndolo hacia el espacio libre. Sin embargo, particularmente en el caso donde el área de unión es grande, se producirán casos en los que el aire comprimido permanezca sin ser eliminado o se alcanzarán

temperaturas extremadamente elevadas debido a efectos de compresión adiabática, que tendrán el efecto de impedir que el material de recubrimiento pueda colisionar con el material de base de modo uniforme secuencialmente, con el resultado de que se presenten problemas tales como defectos en los que no se producirá el recubrimiento o en los que no se obtenga suficiente resistencia de la unión, lo que ha sido reportado por autores como Arnold *et al.* (2002) y Fehimet *et al.* (2011).

La presión de detonación considerada para la unión de los materiales disímiles donde se tuvo en cuenta la velocidad de detonación de 2 800 m/s y la densidad de los materiales más tenaces, en este caso para los aceros, que es de 1150 kg/m<sup>3</sup>, fue calculada por la ecuación 2.7 donde la misma es de 1510 MPa.

La velocidad o dinámica de propagación de la onda sonora fue calculada por la ecuación 2.8, pero se determinó el volumen adiabático del explosivo por la ecuación 2.9, para  $E=210\ 000\text{MPa}$ ,  $\nu=0,21$ , se tiene que  $k_v=120\ 689\ \text{Pa}$  y con una densidad de la placa volante igual a 0,00896 kg/cm<sup>3</sup>; al ser sustituida en la ecuación 2.8 entonces la velocidad del sonido de la placa volante es de 3 670 m/s.

La velocidad del sonido de la placa volante depende de las características del medio en que se realiza dicha propagación y no de las características de la onda o de la fuerza que la genera. La velocidad del sonido varía también ante los cambios de temperatura del medio. Esto se debe a que un aumento de la temperatura se traduce en un aumento de la frecuencia con que se producen las interacciones entre las partículas que transportan la vibración y este aumento de actividad hace aumentar la velocidad, criterio expuesto por Moga y Kisielewski (1979) y Durgutlu *et al.* (2008).

Los parámetros de soldadura obtenidos para la unión de las aleaciones por explosivos, es la menor magnitud de tensión obtenida ocasionada por la onda de choque de las planchas producidas por la velocidad de detonación, es el esfuerzo mínimo necesario para que se produzca el desplazamiento en los aceros empleados, pero al incrementar gradualmente la masa de explosivo, las aleaciones fluirán deformándose plásticamente.

### 3.4 Análisis microestructural de la aleaciones cobre – acero AISI 1020

Para realizar el análisis microestructural de las muestras, se tuvo en cuenta las diferentes cargas a la que fueron sometidas cada una de ellas. Todas las muestras fueron observadas a 200x. Las microestructuras analizadas de la interfase del cordón se muestran en las figuras 3.1 y 3.2.

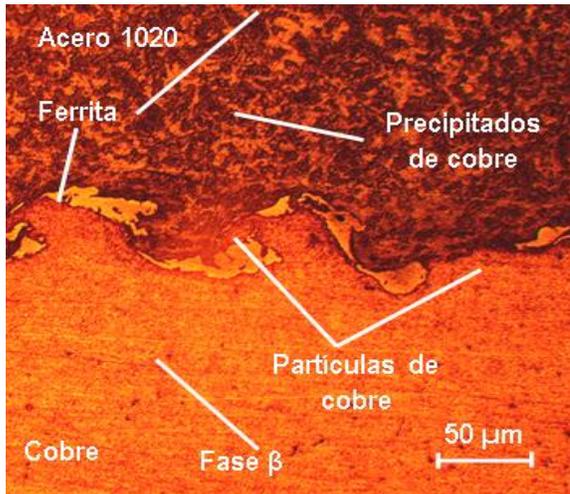


Figura 3.1. Interfase del cordón (5 mm).

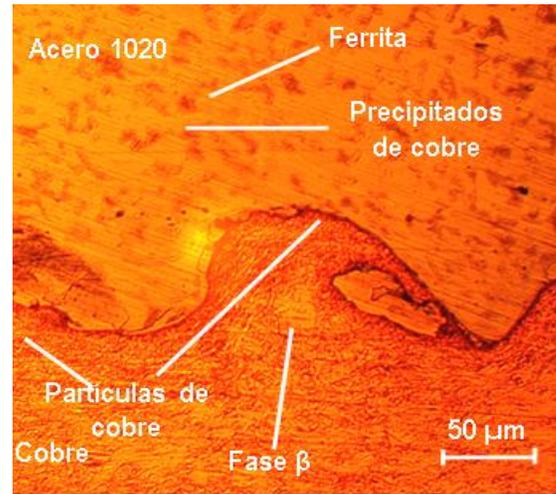


Figura 3.2. Interfase del cordón (15 mm).

En la figura 3.1 se observa que en la interfase de la unión, a 5 mm del inicio de la explosión se observa que la estructura, en ambos materiales, se caracteriza por su heterogeneidad microestructural, en el cobre, los granos son equiaxiales de diferentes tamaños orientados al azar, de bordes rectos y curvados, con algunas partículas pequeñas de segunda fase dispersas dentro de ellos y maclas térmicas.

En la parte superior que se corresponde con el acero AISI 1020, está compuesta por granos de ferrita exquiaxiales, los cuales se reducen en la medida que se acercan a la zona de fusión del cobre.

En las micrografías de ambas interfase y formadas a temperatura de 1083°C, obtenidas a diferentes distancias, se observan granos de diferentes tamaños orientados al azar, de bordes rectos y curvados, algunos no muy bien revelados, con partículas pequeñas de segunda fase dispersas dentro de ellos, algunas maclas térmicas y escasos granos recristalizados en el cobre más deformado con una diferencia aparentemente mayor entre el tamaño de sus granos.

Luego el proceso de explosión, se mantiene la heterogeneidad microestructural, aunque se observa más refinado en la medida que se acerca a la interfase, con algunos bordes menos definidos que otros, pero las microestructuras siguen conservando en esencia todas las características. Con el aumento de la colisión, a partir de esta condición, los bordes de grano se definen más en aspecto y tamaño, adquiriendo una forma más regular y redondeada.

La deformación plástica en la interfase. La amplitud y la longitud de onda de la morfología ondulada estiman el grado de deformación de como las placas pueden unirse por el choque. Se ha señalado que la tasa para la formación de interfase está relacionada con el efecto del oxígeno en la tasa de generación de dislocaciones. Cuando el oxígeno está presente en la forma de partículas de óxido,  $\text{Cu}_2\text{O}$ , la tasa de generación de dislocaciones aumentará de manera mucho más significativa, disminuyendo la tasa de deformación necesaria para su comienzo, reportado por Ravichandran y Prasad (1992).

### 3.5. Análisis del por ciento de microconstituyentes en las muestras

La representación digital de la imagen consistió en una serie de números que describieron el color y el brillo de pequeñas porciones de imagen (píxeles), usualmente de forma cuadrada. Los píxeles obtenidos se corresponden a sensores individuales de la luz dentro de la cámara, donde cada número describió el color y el brillo promedio que llega a cada sensor de luz. En la figura 3.3 se muestra el por ciento de microconstituyentes obtenido para una distancia de 5 mm.

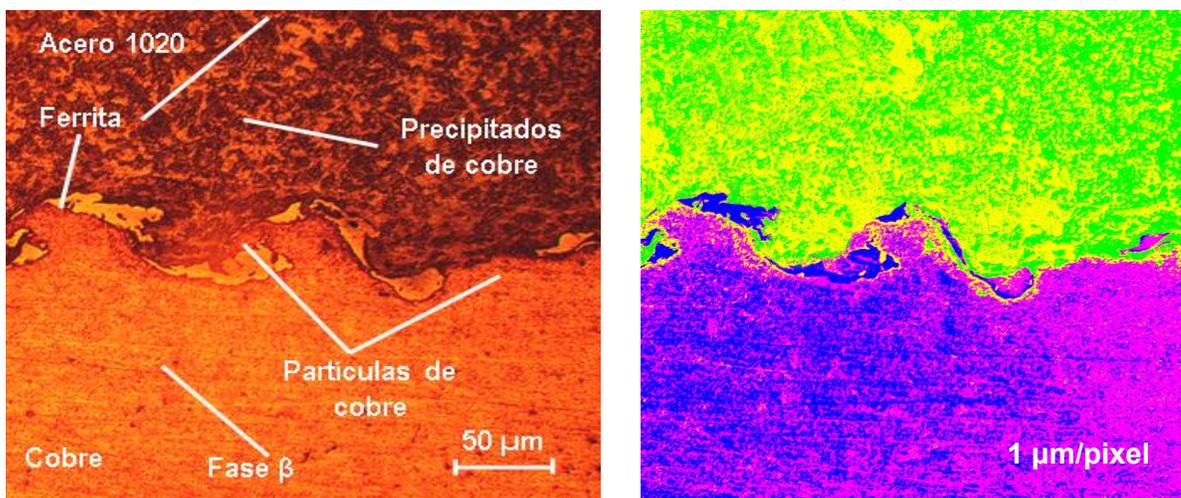


Figura 3.3 Porcentaje de microconstituyentes presentes en la muestra 1.

Con el tamaño de pixel seleccionado (1  $\mu\text{m}$ ) se ha determinado la mínima región que puede distinguirse en la imagen. Como la profundidad de color indica el número de colores que puede tomar cada pixel, en este caso se han distinguido en una imagen en escala de diferentes colores el porcentaje de microconstituyentes. Se consideró la información de brillo de cada pixel, con una cantidad de tonos diferentes a igual profundidad de color.

Cuando observamos a través del microscopio podemos ver granos como microcomponentes del acero. Estos granos pueden ser de alguna de las fases, o mezcla de fases, que están presentes en todo acero. Los granos, a su vez, están formados por agregados de cristales. Son estos cristales los que van a determinar en gran medida las propiedades del acero. En algunos casos, especialmente en aceros aleados, aparecerán otras fases, como carburos, nitruros, que otorgarán, favorable o desfavorablemente, propiedades diferenciadas a ese tipo de acero.

En la figura 3.4 se muestra la distribución de fases obtenidas en esta muestra.

### Distribucion de las fases

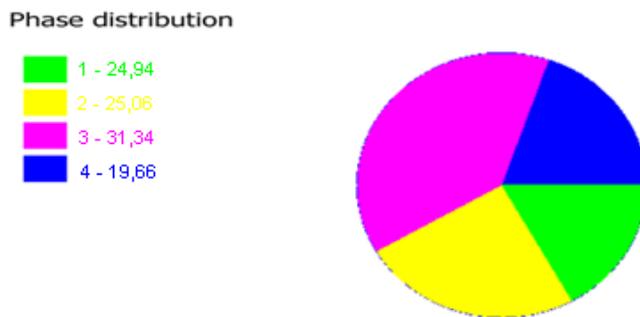


Figura 3.4. Distribución de las fases.

En la tabla 3.2 se muestran los microconstituyentes obtenidos en la microestructura con el porcentaje en cada área.

Tabla 3.2. Datos de la fase de los microconstituyentes para la muestra 1

Microconstituyentes	Área $\mu\text{m}^2$	Área %
Precipitados de cobre	141 374	24,94
ferrita	205 822	25,06
Partículas de cobre	321 841	31,34
Fase $\beta$	165 323	19,66

Luego del proceso de explosión la fase predominante es la de partículas de cobre, con un 31,34 %, encontrándose en la zona del AISI 1020 y la del cobre, la temperatura generada no provoca transformaciones de fases, pero provoca la migración del cobre hasta el acero por presentar menor temperatura de fusión 1 183 °C, se observa una disminución del tamaño de grano por la compactación dinámica.

Se realizó el análisis para la muestra 2. Los resultados obtenidos para una distancia de 15 mm del inicio de la detonación se muestran en la figura 3.5.

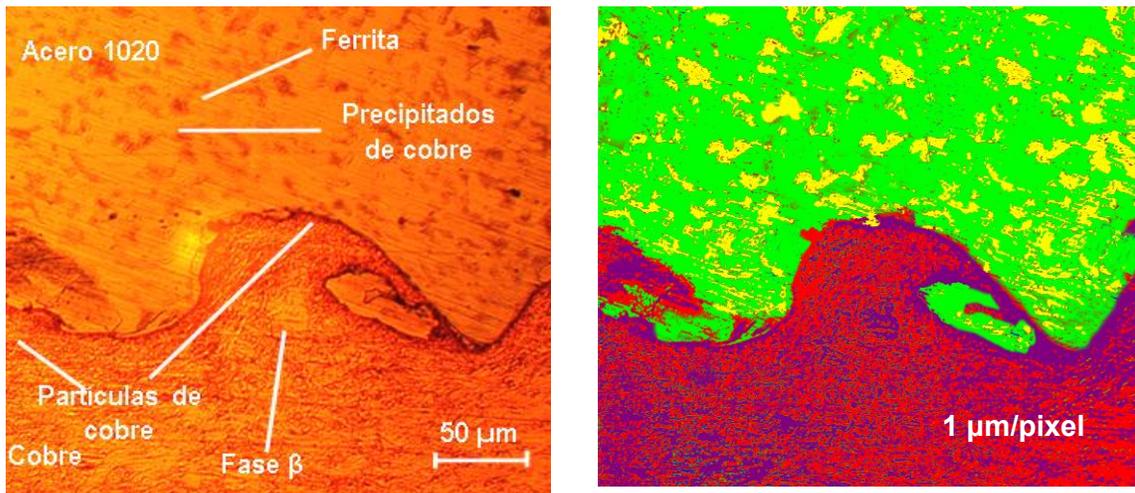


Figura 3.5. Porcentaje de microconstituyentes presentes en la muestra 2.

En la figura 3.6 se muestra la distribución de las fases.

#### Distribucion de las fases

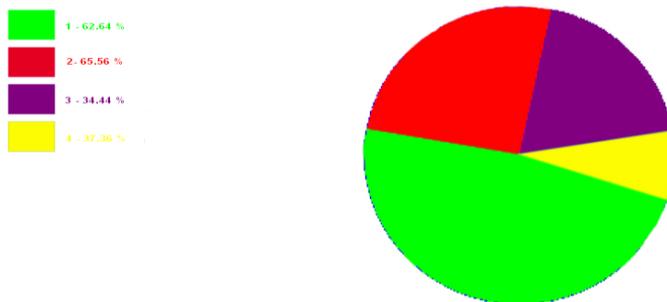


Figura 3.6. Distribución de las fases.

En la tabla 3.3 se muestran los microconstituyentes obtenidos con el área que ocupa en la microestructura.

Microconstituyentes	Área $\mu\text{m}^2$	Área %
Ferrita	439205	62,64
Partículas de cobre	213935	65,56
Precipitado de cobre	160439	37,36
Fase $\beta$	20781	34,44

A 15 mm se observa una homogeneidad en la estructura, sin embargo la energía cinética del explosivo de distancia, el microconstituyente más denso es la ferrita, que representa el 62,64 % del área en la microestructura.

El límite entre la matriz y los microconstituyente ha determinado la forma de una curva cerrada llamada contorno de los granos, el cual ha pasado a través de los centros de los pixeles que forman el contorno. Los pixeles que forman el contorno, junto con los que se encuentran dentro del contorno de los granos se consideran interiores en la red cristalina. A pesar de que estas mediciones han provistos información detallada sobre la imagen completa y sobre cada microconstituyente, no describen claramente el número de grano que se obtiene en la microestructura.

Se observa que hay un gran número de partículas de muy pequeño tamaño en ambas muestras, que corresponden a inclusiones y defectos pequeños, propio del proceso de obtención de los materiales. Los resultados obtenidos mostraron que los parámetros de textura extraídos a partir de las imágenes obtenidas permitieron describir cuantitativamente la microestructura de la superficie.

### 3.6 Análisis de la dureza

Para la evaluación de la dureza se tuvo en cuenta que la placa volante está sujeta a una intensa ola de tensión por la detonación de la capa explosiva en el contacto con él y como consecuencia, entre la placa volante y la placa base, experimentan una intensa esta tensión, que es el resultado del impacto de alta velocidad. Estas intensas olas dan lugar a los cambios metalúrgico y como resultados en un aumento en la dureza, desde una dureza inicial de 109 HRB hasta 202 HV en el cobre y desde 170 HB hasta 230 HV en la interfase de la unión.

El aumento en la dureza es consistente con la deformación plástica experimentada por la placa volante durante el impacto, las líneas de la deformación relacionan a la interfase de la soldadura con el cobre y el acero, causado por la deformación plástica que ejerce el cobre sobre el acero durante el impacto, contra la placa base (acero). La deformación es marcada en las microirregularidades que ocurren en la placa volante. Tal deformación plástica marcada altera las propiedades mecánicas de la placa volante, particularmente su dureza.

### 3.7. Diseño de experimentos

Las herramientas estadísticas realizan un análisis de regresión lineal, utilizando el método de los "mínimos cuadrados" para ajustar una línea a una serie de observaciones. Se empleó esta herramienta para analizar la forma en que los valores de las variables el tiempo de explosión (s) variable independiente, afecta a la variable dependiente, el "ángulo de inclinación" ( $\beta$ ). Donde el valor dependiente Y es una función de los valores independientes X. En la figura 3.7 se muestra el comportamiento de las variables.

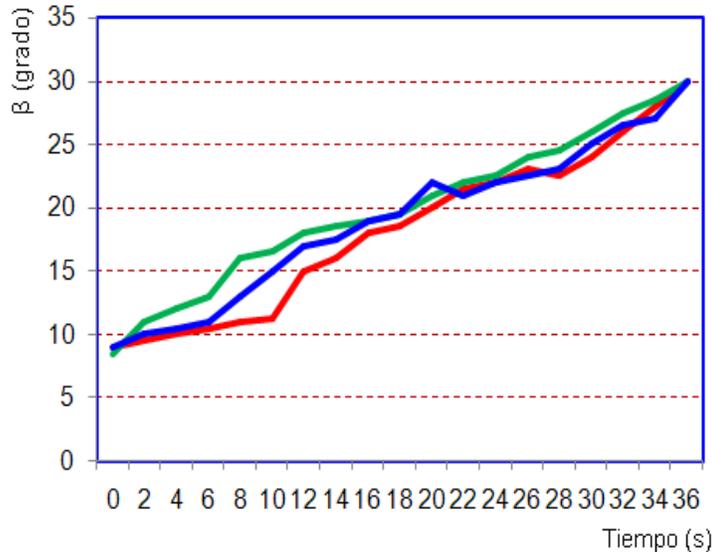


Figura 3.7. Comportamiento del ángulo de inclinación vs tiempo.

Los resultados del análisis muestran cómo se comporta el ángulo de inclinación con el tiempo durante el proceso de soldadura por explosión. Para un ángulo inicial de  $7^\circ$ , se observa que en la medida que transcurre el tiempo durante la unión, este ángulo  $\beta$  no es constante, más bien tiende a incrementarse con este tiempo. Esta condición es

proporcional con el comportamiento metalográfico a diferentes distancias del inicio de la detonación y la morfología de la soldadura, porque el espesor de la placa volante se mantiene constante.

### 3.7.1. Procesamiento estadístico de los datos

En el análisis de regresión, calcula para cada punto el cuadrado de la diferencia entre el valor Y estimado para ese punto y su valor Y real. La suma de estas diferencias cuadradas se denomina suma de los cuadrados residual. En la tabla 3.4 se muestran los resultados del análisis.

Tabla 3.4. Análisis de regresión

Análisis de Regresión Múltiple					
Variable dependiente: Col_1					
Errorestadístico					
Parámetro	Estimación	estándar	T	P-Valor	
CONSTANTE	-5,06815	3,46247	-1,46374	0,1712	
Col_2	0,594012	0,204182	2,90923	0,0142	
Col_3	0,119772	0,252153	0,474998	0,6441	
Col_4	0,717128	0,31469	2,27884	0,0436	
Col_5	-0,0730111	0,27346	-0,266991	0,7944	
Análisis de Varianza					
Fuente	Suma de cuadrados	GL	Cuadrado medio	Cociente-F	P-Valor
Modelo	1376,11	4	344,027	670,94	0,0000
Residuo	5,64029	11	0,512754		
Total (Corr.)	1381,75	15			
R-cuadrado = 99,5918 porcentaje					
R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 99,4434 porcentaje					
Error estándar de est. = 0,716068					
Error absoluto medio = 0,49341					
Estadístico de Durbin-Watson = 1,64865 (P=0,0432)					
Autocorrelación residual en Lag 1 = -0,0279628					

La salida muestra los resultados del ajuste a un modelo de regresión lineal múltiple para describir la relación entre el ángulo de inclinación y 4 variables independientes. La ecuación del modelo ajustado es:

$$\text{Ángulo de inclinación} = -5,06 + 0,59 \cdot \text{Tiempo} + 0,119 \cdot \text{áng}_{incl1} + 0,717 \cdot \text{áng}_{incl2} - 0,071 \cdot \text{áng}_{incl3}$$

Dado que el p-valor en la tabla ANOVA es inferior a 0,01; existe relación estadísticamente significativa entre las variables para un nivel de confianza del 99 %. El estadístico R-cuadrado indica que el modelo explica un 99,5918 % de la

variabilidad en el ángulo de inclinación. El estadístico R-cuadrado ajustado, que es más conveniente para comparar modelos con diferentes números de variables independientes, es 99,44%. El error estándar de la estimación muestra la desviación típica de los residuos que es 0,716. Este valor puede usarse para construir los límites de predicción para las nuevas observaciones relacionadas con el ángulo de inclinación. El error absoluto medio (MAE) de 0,493 es el valor medio de los residuos. El estadístico Durbin-Watson (DW) examina los residuos para determinar si hay alguna correlación significativa basada en el orden en el que se han introducido los datos en el fichero. Dado que el p-valor es inferior a 0,05; hay indicio de una posible correlación serial.

En la figura se 3.9 muestra el gráfico de superficie de respuesta, la estimaciones del tipo:  $10 + 2*X + 3*Y - 10*X*Y$

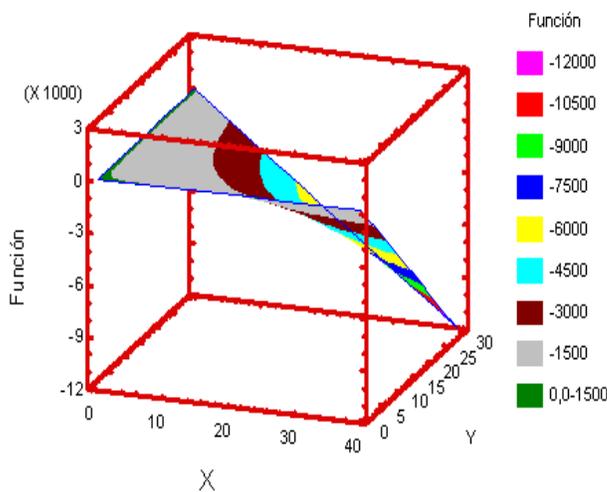


Figura 3.8. Gráfico de superficie de respuesta.

Al estimar el error del modelo experimental con el calculado existe diferencia estadísticamente significativa entre las medias de las dos muestras para un nivel de confianza del 95,0 %.

Los resultados expuestos demuestran que se mantiene la tendencia a incrementar el ángulo de inclinación en la medida que se inicia y concluye el proceso de detonación. Se confirma las variaciones que existen durante el proceso por explosión a diferentes distancias desde la formación del chorro de reacción.

### 3.8. Análisis económico

La contabilidad de costos, que de una determinación histórica del costo de laproducción basado en la materia prima, la mano de obra y los gastos indirectosde producción, ha desembocado en sistemas de costos predeterminados detipo estimado o de tipo estándar, mediante los cuales el costo de los artículosno se obtiene al finalizar el proceso productivo, si no se calcula de antemano ysirve de base de control y eficiencia. La contabilidad de costos se ocupa de la planeación, clasificación, acumulación, control y asignación de costos. La contabilidad de costos constituye el complemento amplificado y necesario de la contabilidad financiera, que tiene por objeto brindar información de los hechos en el momento preciso para tomar decisiones respecto a maximizar beneficios o minimizar costos. Para la realización del análisis económico tomaremos como referencia el tiempo de ejecución obtenido durante cálculo de los parámetros de trabajo en el laboratorio.

En la tabla 3.5se recoge el comportamiento de los costos.

Tabla 3.5. Costo por concepto de tiempo y consumo

Por concepto de tiempo			Por concepto de consumo					
	Tarifa (\$/h)	Tiempo (h)	Costo $T_i$ (\$)	Cantidad de equipos	Consumo (kW/h)	Tarifa (\$/kW)	Tiempo (h)	Costo $C_o$ (\$)
Técnico	2,47	2	4,94	4-lámparas 1-Aire acondi- cionado	0,8 0,25 $T_c=1,05$	0,09	2	0,19
Costo Total para la preparación de las muestras			$C_T = \text{Costo } T_i + \text{Costo } C_o$ $C_T = \$ 5,129$					

Como se aprecia en la tabla 3.5 el gasto en el que se incurre trabajando en el laboratorio en preparación y observación de las muestras luego del proceso de soldadura con explosivos es de 5,129CUP; por lo que se puede considerar un costo relativamente pequeño considerando la importancia que reviste la unión disímil, como alternativa de disminuir el fenómeno de desgaste, defecto muy común en los equipos de las industrias cubanas.

### 3.9 Valoración del impacto medio ambiental

Es un problema frecuente en talleres y zonas de trabajo de soldadura, la degradación de la calidad ambiental, motivada por los humos y gases producidos por las

emanaciones ocasionadas por la fusión de los materiales de aporte y de los mismos metales a soldar.

La solución más común consiste en despedir el aire viciado al exterior, lo cual si bien soluciona el problema inmediato, significa expulsar al exterior elementos contaminantes, acción que las legislaciones medioambientales al respecto restringen severamente.

Las personas que trabajan con explosivos, están habituados a ver no solo la destrucción que pueden causar, sino que también son testigos de un fenómeno cuando menos curioso, en muchas ocasiones, trozos de metal que salen proyectados de la explosión (metralla de un proyectil o trozos del objetivo a destruir) se quedan literalmente pegados contra otros objetos metálicos al impactar contra ellos cerca de la explosión, la unión es tan fuerte incluso sobre una superficie totalmente lisa y pulida que hay dos opciones, dejar esos fragmentos "de adorno" a perpetuidad, o emplear un soplete o cincel y martillo para desprenderlos.

Entre los inconvenientes que tiene éste procedimiento, el principal de todos, es peligroso, requiere de una licencia y titulación para manipular explosivos, unas instalaciones adecuadas (la mayoría de empresas que llevan a cabo soldadura por explosión están cerca de minas en desuso para aprovechar la seguridad que brindan los túneles excavados) y es lento, sólo se puede soldar una plancha de cada vez y al hacerlo, hay que esperar varias horas a que el polvo que se ha producido en el túnel se disipe y asiente, y al ser un proceso tan exigente, en seguridad, preparación y tiempo, es altamente costoso, por norma general se usan explosivos específicos para unir cada combinación de metales, ya que cada tipo de explosivo tiene una velocidad de detonación determinada que optimiza el proceso en base a la densidad, dureza y demás características de los metales a unir.

### **3.9.1 Emanaciones en la soldadura por explosivos**

En este medio se le denominan emanaciones a los gases tóxicos. Los gases que se originan de la detonación de explosivos principalmente, pero también se forman en cualquier detonación gases venenosos como el monóxido de carbono y óxidos de nitrógeno.

En trabajos a cielo abierto (como en nuestro trabajo), las emanaciones se pueden dispersar rápidamente por el aire, por lo que provocan poca preocupación, pero en trabajos subterráneos deben considerarse detenidamente, ya que las emanaciones no se disipan fácilmente y en este caso la ventilación es de fundamental importancia. También hay que considerar que las emanaciones provocan, mientras se disipan, tiempos de espera para poder reanudar los trabajos.

Tanto la naturaleza como la cantidad de gases venenosos varían en los diferentes tipos y clases de explosivos. Algunos de los factores que pueden incrementar los gases tóxicos son: fórmula pobre del producto, cebado inadecuado, falta de resistencia al agua, falta de confinamiento, reactividad del producto con el material y la reacción incompleta del producto.

El bióxido de carbono no es estrictamente un gas venenoso, pero su producción en grandes cantidades ha causado muchas muertes en tronaduras en áreas confinadas. El CO<sub>2</sub> detiene el funcionamiento de los músculos con movimiento involuntario del cuerpo, por ejemplo, el corazón y pulmones. Una concentración del 15% o más en volumen, puede provocar muerte por asfixia.

Como el bióxido de carbono tiene densidad de 1,53 g/cc, tiende a estancarse en los sitios más bajos de la excavación o donde hay poco movimiento. Una solución práctica al problema es usar aire comprimido para diluir cualquier alta concentración posible.

### 3.10 Conclusiones del capítulo 3

- ❖ Se calcularon los parámetros para el proceso de soldadura por explosivos, los cuales nos permiten establecer los procedimientos para evaluar el comportamiento estructural de la unión disímil del cobre con el acero AISI1020.
- ❖ Se determinó que luego del proceso de explosión la fase predominante es la de partículas de cobre, con un 31,34 %, encontrándose en la zona del AISI 1020 y la del cobre.
- ❖ Se caracterizó las incidencias medioambientales del proceso de soldadura por explosivos donde se plantea que entre los gases que se generan se encuentran el bióxido de carbono, el nitrógeno y el vapor de agua, los cuales no son tóxicos en el sentido clásico de la palabra, pero afectan el cuerpo humano.

## CONCLUSIONES GENERALES

- ❖ Parámetros como el volumen de explosivo con un valor de  $930 \text{ cm}^3$  y una velocidad de detonación de  $2\,800 \text{ m/s}$  es empleada en la unión disímil cobre y acero AISI 1020 por el proceso de explosión, ejerciendo influencia en el flujo plástico en las aleaciones lográndose una unión metalúrgica deseable.
- ❖ Las microestructuras obtenidas revelan que ambos materiales se caracterizan por su heterogeneidad microestructural con granos equiaxiales de diferentes tamaños orientados al azar, de bordes rectos y curvados (cobre) y por granos de ferrita exquiaxiales, los cuales se reducen en la medida que se acercan a la zona de fusión del cobre (AISI 1020).
- ❖ Debido a los cambios metalúrgicos y como resultado de los mismos hay un aumento en la dureza, que va desde una dureza inicial de 109 HRB hasta 202 HV en el cobre y desde 170 HB hasta 230 HV en la interfase de la unión soldada.
- ❖ Al realizar la valoración económica del proceso de soldadura disímil de las aleaciones, donde se consideró el consumo, la tarifa y el tiempo empleado en la realización y preparación de las muestras incurre en un costo de \$ 5,129; determinado como un método económico y factible para la unión de materiales por explosión.

# **Referencias bibliográficas**

1. Acarer, M., Gulenc, B.; Findik, F. The influence of some factors on steel/steel bonding quality on their characteristics of explosive welding joints. *Journal of Materials Science*, 39 (21), 2004. p. 6457 - 6466.
2. Akbari, M.; Al-Hassani, S.; Burley, S.; Byers, B. Simulation of explosive welding with ANFO mixture, *J Prop Exp Pyro* 29 (3), 2008. pp. 188 - 196.
3. Almira, N. Microestructuras de uniones disímiles obtenidas mediante el proceso de soldadura por explosivos. Tesis en opción al título de ingeniero mecánico ISMMM, Tutor: Dr. C. Tomás Fernández Columbié, 2015
4. Anderson, R. Surface Analysis of Electrical Arc Residues in Fire Investigation *Journal of Forensic Sciences* Vol. 34, May, pp. 633 - 637.y 1:4, 1539 – 1544, 1989
5. Arnold, A. Estermann, M.; Koch. A. A Simple Relation between the Detonation Velocity of an Explosive and its Gurney Energy. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, pp. 365 – 368, 2002
6. Askeland, D., *La Ciencia e Ingeniería de los materiales*. Grupo Ed. Iberoamérica, México, 1998
7. AWS. The metallurgy, welding and qualification of microalloyed (HSLA) steel weldments, AWS international conference, Houston, Texas, Nov 6 - 8. 1990.
8. Badeshia, H.; Honeycombe, R. *Steels*, Third edition. Butterworth-Heinemann, Oxford, UK. 2006
9. Bahrani, A.; T.J. Black.; B. Crossland. 1966. The mechanics of wave formation in explosive welding. *Royal Soc. Ser. A* 296. p. 123.
10. Bataev I.A., Lazurenko D.V., Tanaka S., Hokamoto K., Bataev A.A., Guo Y., Jorge A.M. High cooling rates and metastable phases at the interfaces of explosively welded materials. *Acta Mater.* 2017; 135: 277–289.
11. Ben-Artzy, A. Wave formation mechanism in magnetic pulse welding. *International Journal of Impact Engineering*, 2010. 37(4): p. 397-404.
12. Brunton, H.P.W.; Wilson, J. Wave formation between impacting liquids in explosive welding and erosion: *Nature*, 1970, Vol. 226, pp. 534–538.

13. Caraballo, M. A. Recuperación de equipos y piezas por la tecnología de conformación y soldadura por explosivos. *Revista Minería y Geología*. Vol XIV, No 2. 1997.
14. Caraballo, M. A. Comportamiento de piezas de acero Hadfield endurecidas mediante explosivos. *Revista Minería y Geología*. Volumen XX. No. 1. 2004.
15. Casals, B. Soldadura y embutición por explosión del titanio con el acero 20K para la fabricación de recipientes a presión. Tesis en opción al grado de Doctos en Ciencias Técnicas. ISMMMoA. Facultad de Metalurgia y Electromecánica. 1997.
16. Castillo-Matos, J.; Fernández-Columbié, T.; Alcántara-Borges, D.; Rodríguez-González, I. Comportamiento microestructural de uniones de materiales disímiles obtenidas por explosión. *Minería y Geología*, 33 (2): 77-91, 2017
17. Celik, A., Alasaran, A. Mechanical and structural properties of similar and dissimilar steel joints, *Materials Characterization*, V. 43, p. 311-318. 1999.
18. Crossland, B. Explosive welding of metals and its application, Oxford University Press, New York. 1882.
19. Didyk, R.; Yunnik, A.; Zil, V.; Masakovskii, A. Explosive treatment as a means of redistribution of residual stresses in machine parts, *Problemy Prochnosti*, 11 (2): 50 - 54, 1994.
20. Durgutlu, A.; Okuyucu, H.; Gulenc, B. Investigation of effect of the stand-off distance on interfaz characteristics of explosively welded copper and stainless steel. *Materials & Design*, 29 (7), 2008. p. 1480 - 1484.
21. Doddy T. Intermediate mixed zones in dissimilar metal welds for sour service, *Welding Journal*, V.71, N.3, p.47-54. 1992.
22. Easterling, k. Introduction to the physical metallurgy of welding, s.l. 2nd edition, Butterworth-Heinemann, Oxford, UK., 1992.
23. Ettlign, B. Electrical Wiring in Building Fires. V. *Fire Technology* 14, 317 – 325, 1978.

24. Fernández-Columbié, T.; Rodríguez-González, I.; Alcántara-Borges, D.; Salazar-Preval, A.; Abad-Brocard, A. Caracterización microestructural de uniones soldadas de acero AISI 316L en tuberías. *Minería y Geología*, 32 (1): 60-75, 2016
25. Fehim Findil, Ramazan Yilmaz and Tolga somyurek. The effect of heat treatment on the microstructure and microhardness of explosive welding. *Scientific Research and essay vol.6 (19)*; pp.4141-4151, 2011.
26. García, J.; Espinoza, R.; Palma H.; Sepúlveda, A. Deformación a alta temperatura de aleaciones de cobre endurecidas por dispersión, *NUCLEOTECNICA* 23 (37), 7 – 15, 2003.
27. Guliaev, A. P: Metalografía. Ed. Mir, Moscú T.I y II, 1977.
28. Gesnouin, C.; Hazarabedian, A.; Bruzzoni, P.; Ovejero, J.; Bilmes, P.; Llorente, C. Effect of post-weld heat treatment on the microstructure and hydrogen permeation of 13CrNiMo steels, *Corrosion Science* 46 1633 – 1647, 2004.
29. Holtzman, A.; Cowan, G. Bonding of metals with explosives. WRC Bulletin No.104, New York, N.Y. Welding Research Council. 1965.
30. Humphreys, J. Recrystallization, Materials Science Center. The University of Manchester, [On-Line]. 2006. Disponible en la web: <http://www.recrystallization.info>
31. Hyuk, S.; Cheol-Kim, R.; Park, K. Microstructure Changes in Equal Channel Angular Pressed Low Carbon Steel by Static Annealing. *Acta Materialia*, (48) 3245 – 3252, 2000.
32. Jonas, A.; Walters, W. editors. Explosive Effects and Applications. Springer-Verlag, 2003.
33. Joseph, A.; Sanjai, K.; Jayakumar, T.; Murugan, N., *International journal of pressure vessel and piping*, 82 (20), 2005. p.700 – 705.
34. Kalpakjian, Serope; Schmid, Steven R *Manufacturing Engineering and Technology* (5th ed). Prentice Hall, 2006. Kuznik, F.; Virgone, J.; Noel, J., Optimization of a phase change material wallboard for building use, *Applied Thermal Engineering*, 28 (11-12) 1291 – 1298, 2008.

35. Kotecki, D. Welding metallurgy and weldability of stainless steel. EE.UU: John Wiley & Sons Inc, 8-19, 2005.
36. Klueh, R.; King, J.; Griffith, J. A simple test for dissimilar-metal welds, *Welding Journal*, V.62, N.6, p.154s-159s. 1983.
37. Levinson, D. Copper metallurgy as a diagnostic tool for analysis of the origin of building fire. *W. Fire Technology* 13, 211 – 222, 1977.
38. Lugo, N.; Cabrera, J.; Puchi, E.; y Prado, J. Deformación a alta temperatura bajo condiciones de deformación variable de un acero ARMCO. *Revista de la Facultad de Ingeniería de la U.C.V.* Vol. 18 (2), pp. 47 – 61. 2003.
39. Lalonde, D. Austenitic Manganese Steel. *Manganese Steel*. htm. Página Webb. 1998. <http://mypage.direct.ca/s/sd//>
40. Madhusudan, G.; Srinivasa, R., Microstructure and mechanical properties of similar and dissimilar stainless steel electron beam and friction welds, *International Journal of Advance Manufacturing Technology*, 2009, Vol 45, NO 5, p. 875 – 888. ISSN: 1433-3015.
41. 1980, pp.88-110, pp. 112-145, pp. 148-187, pp. 328 - 335.
42. Mariño, M. Estudio del deterioro por abrasión e impacto de los martillos de las trituradoras de mandíbula, fabricados de acero hadfield. Tesis en opción al título de Master. ISMMMoa. Facultad de Metalurgia y Electromecánica. 2000
43. Masubuchi, K., Analysis of welded structures: Residual stresses, distortion, and their consequences, Massachusetts Institute of Technology, USA,
44. Matsui, Y.; Masahiko, O; Takeshi, H.; Erik, C. Shigeru, I. Explosive Welding of Light Weight Metal Sheets. 8th International LS-DYNA Users Conference Penetration/Explosive. 4 (8) 2013.
45. Montoliu, A. El fuego y la electricidad en instalaciones de baja y alta tensión. Fundación Mapfre. 2007
46. Mochizuki, M., Matsushima, S., Toyoda, M. & Thaulow, C. Fundamental study of thermal stress generation during welding heat cycles. *Studies on numerical simulation of temperature, microstructure and thermal stress histories during*

welding, and their application to welded structures. *Welding International*. 19 (9), 2005. pp. 702 - 710.

47. Mousavi, S.; Sartangi, P. Experimental investigation of explosive welding of cp titanium/AISI 304 stainless steel. *Materials & Design*, 30 (3), 2009. p. 459 - 468.

48. Metzger G., Lison R. Electron beam welding of dissimilar metals, *Welding Journal*, V.55, N.8, p. 230s-240s. 1976.

49. Meriño, G. Conformación, soldadura y endurecimiento de metales con explosivos. Reporte de aplicación. Cenic. La Habana. 1977.

50. Moga, N.; Kisielewski, K. Vertical wind tunnel tests to determine subsonic drag characteristics of unscored warhead fragments, NSWC TR 79-112, Dahlgren, Virginia, May 1979.

51. Nelson, D.; Baeslack, W.; Lippold, J. Characterization of the weld structure in a duplex stainless steel using color metallography, *Metallography*, V.18, p. 215-225. 1985.

52. Otaño, N. J. Fragmentación de rocas con explosivos. Editorial Félix Varela. La Habana. 1998.

53. Oystein, G. Modelación Metalúrgica de la soldadura. 2da Ed. P 509 – 526. Instituto de Materiales, Londres, Inglaterra. 1994.

54. Ostle, B., Estadística Aplicada. Limusa - Wiley, México, 1975, Cap. 10.

55. Prasad, Y.; Rao, K. Mechanisms of high temperature deformation in electrolytic copper in extended ranges of temperature and strain rate. *Materials Science and Engineering A*. 3 (74) 335 – 341. 2004.

56. Parody, G. Investigación sobre el endurecimiento del acero Hadfield por el método de explosivos. ISMMMoa. Facultad de Metalurgia y Electromecánica. 1995..

57. Pernia, J. Manual de perforación y voladura de rocas. IGME. Madrid. 1988.

58. Polmear, I., Light Alloys, from traditional Alloys to Nanocrystals. Ed. Elsevier 2006.

59. Prasad, Y.; Rao, K. Mechanisms of high temperature deformation in electrolytic copper in extended ranges of temperature and strain rate. *Materials Science and Engineering A*. 3 (74) 335 – 341. 2004.
60. Quintero, O. Aleaciones Férricas Especiales. Departamento de Ciencia de los Materiales. Universidad Simón Bolívar. Venezuela. 1994 Cap. 2.
61. Reddy, G.; Rao, K.; Sekhar, T. Microstructure and pitting corrosion of similar and dissimilar stainless steel welds, *Science and technology of welding and joining*. 13 (4): 363-377. 2008.
62. Samal, M.; Seidenfuss, M.; Roos, E.; Balani, K. Investigation of failure behavior of ferritic–austenitic type of dissimilar steel welded joints. *Engineering Failure Analysis*. 18 (3): 999-1008, 2011.
63. Sarache, L., Diseño de experimentos y análisis multifactorial aplicado a la industria. Facultad de Ingeniería, *Revista Ingeniería Industrial*. 4 (5) 585 – 590. 2004.
64. Sawhill, J., Welding HSLA line pipe steels, *Metallovedenie*, 7 (5): 56-60, 1977.
65. Sunghak, L.; Byung Chun Kim, Gongil Kwon Correlation of microstructure and fracture properties in weld heat affected zones of thermomechanically controlled processed steels, *Metallurgical Transactions A*, 23A (12): 2803-2816, 1992.
66. Sikka, V.; Liu, C.; Loria, E. Processing of structural metals by rapid solidification, p.417, Ed. F.H. Froes S.J. Savage, American Society of Metals, Metals Park, Ohio. 1987.
67. Tarín, R.; Badía, P., Apuntes Aleaciones Ligeras (guiones y figuras) E.T.S.I. de Aeronáuticos, 2006.
68. Titov, V.; Bryzgalin, A.; Petushkov, V. Limiting thickness of welded joints to treated. *Paton Welding Journal*, 1 (3), 2002. pp. 20 - 27.
69. ULAEX. Accesorios para voladuras. 2000.
70. Verstraete, J.; De Waele, W.; Faes, K. Magnetic pulse welding lesson to be learned from explosive welding. *Sustainable and construction design* 2011.



71. Wylie, H.; Williams, P.; Crossland, B. Further experimental investigation of explosive welding parameters. In: Proc 2nd int conf cent high energy fab, 1 (3); 1971. 1 - 43.

72. Xiaoyan, Z; Yujiao, L. Effect of chromium on phase structure of austenite manganese steel. Department of Mechanical Engineering, GUT, Guiyang 550003. Página Webb. Enero del 2001. Web: <http://power.luneng.com/power/library/gtyjxb/gtyj99/gtyj9903/990310.htm>

73. Zhang, W.; Elmer, J.; DebRoy, T. Integrated modelling of thermal cycles, austenite formation, grain growth and decomposition in the heat affected zone of carbon steel, Science and Technology of Welding and Joining, V.10, N.5, p.574-582. 2005.

74. Zuidema, B. The effect of Aluminium on the work Hardening and Wear Resistance of Hadfield Manganese Steel. Metallurgicals and Materials Transaction. A. Volume 18 A. September 1987. p 1629.