



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

**EFFECTOS DE LOS PARÁMETROS DE SOLDADURA CON EXPLOSIVOS EN  
LA UNIÓN DE ALEACIONES DISÍMILES**

Tesis presentada en opción al título de Ingeniero Mecánico

Autor: Javier Raúl Alcántara Borges

Tutores: Prof. Tit. Lic. Tomás Fernández Columbié, Dr. C.

Prof Asist. Ing. Dayanis Alcántara Borges, Ms. C.

Moa  
2016



***Declaración de autoridad***

**Yo:** Javier Raúl Alcántara Borges

Autor 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.

-----  
Javier Raúl Alcántara Borges

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

-----  
Ms. C. Dayanis Alcántara Borges



## **Agradecimientos:**

***A todos mis profesores por los conocimientos transmitidos durante el desempeño de mi carrera.***

***A mis tutores por confiar en mí en la realización de este trabajo, el Dr. C. Tomás Fernández Columbie y la Ms. C. Dayanis Alcántara Borges.***

***A mis familiares que me apoyaron en los momentos de mi vida en que más lo necesitaba.***

***A mis amigos que siempre creyeron en mí.***

***A los que de una forma u otra me apoyaron y ayudaron en la realización de este trabajo.***

***A la revolucion, por darme la oportunidad de convertirme en profesional .***

***A todos***

***Muchas Gracias.***



## ***Dedicatoria***

***A mis padres Claribel y Francisco por exhortarme  
todos los días a la realización de la tesis.***

***A mi hermana Dayanis por ser mi guía inspiradora,  
mi luz, mi ejemplo.***

***A todos los que me dieron fuerza y me animaron a  
seguir.***

***A la revolución, por darme la oportunidad.***



**TABLA DE CONTENIDOS**

<b>SÍNTESIS</b>	<b>Pág</b>
<b>INTRODUCCIÓN.</b>	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO. ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS</b>	
1.1. Introducción	4
1.2. Consideraciones acerca de la soldadura de aceros disímiles	4
1.2.1. Empleo de las soldaduras disímiles	5
1.3. Generalidades sobre la soldadura por explosivos	6
1.3.1. Proceso físico del proceso de soldadura por explosión	8
1.4. Parámetros de la soldadura por explosivos	9
1.4.1. Características de la explosión	11
1.5. Proceso de formación de la unión en la soldadura por explosivos	12
1.5.1. Mecanismos de la soldadura por explosivo	15
1.6. Aspectos metalúrgicos de la soldadura por explosión	16
1.7. Aplicación de uniones soldadas disímiles	18
1.8. Características de la zona fundida en la soldadura de aceros disímiles	21
1.9. Zona afectada térmicamente en los aceros	24
1.10. Conclusiones del capítulo 1	25
<b>CAPÍTULO. 2 MATERIALES Y MÉTODOS</b>	
2.1. Introducción	26
2.2. Composición química estándar de las aleaciones	26
2.3. Plan experimental	27
2.4. Material explosivo empleado	28
2.4.1. Diseño de experimentos	29
2.4.2. Parámetros en el proceso de soldadura por explosión	30
2.5. Preparación metalográfica	36
2.5.1. Cálculo de la velocidad de corte	36
2.5.2. Potencia de corte efectiva en el fresado	37
2.5.3. Tiempo de maquinado	38
2.5.4. Corte y desbaste de las muestras	38
2.5.5. Pulido y ataque de las muestras	39



---

2.5.6. Observación microscópica y comportamiento microestructural	40
2.5.7. Ensayo de dureza aplicado a las muestras	41
2.6. Método de los elementos finitos (MEF)	42
2.6.1. Mallado del modelo	43
2.7. Conclusiones del capítulo 2	44
<b>CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS</b>	
3.1. Introducción	45
3.2. Análisis de la composición química de las aleaciones	45
3.3. Análisis de los parámetros del proceso de soldadura por explosión	46
3.4. Análisis del proceso de maquinado de las probetas	50
3.5. Análisis microestructural de la aleaciones AISI 316 - AISI 1010	52
3.5.1. Análisis microestructural del AISI 1045 - acero AISI 1050	53
3.5.2. Análisis de la dureza	55
3.6. Análisis por el Método de los Elementos Finitos	57
3.6.1. Análisis por el Método de los Elementos Finitos (muestra cilíndrica)	58
3.7. Valoración económica	60
3.8. Valoración en la dimensión ambiental	61
3.8.1. Reducción de la concentración de oxidantes	62
3.9. Conclusiones del capítulo 3	63
<b>CONCLUSIONES GENERALES</b>	
<b>RECOMENDACIONES</b>	
<b>BIBLIOGRAFÍAS</b>	



## **Resumen**

Este trabajo tiene como objetivo establecer el comportamiento microestructural, la dureza y la simulación por el Método de los Elementos Finitos de las uniones disímiles AISI 316 - AISI 1010 y del acero AISI 1045 - AISI 1050 por el proceso de soldadura por explosivos. Se empleó como explosivos el TECTRÓN 100 y se estableció una velocidad de detonación de 2 500 m/s. Las muestras fueron preparadas con dos tipos de configuración, la unión AISI 316 - AISI 1010 se realizó con una geometría cilíndrica y la unión AISI 1045 - AISI 1050 con una geometría paralela, en esta última unión el acero AISI 1050 es tratado térmicamente. Fueron observadas las microestructuras a diferentes distancias, desde cinco hasta 25 milímetros del inicio de la explosión donde se observó que la formación de olas es de  $30^\circ$ . Los resultados obtenidos por el Método de los Elementos Finitos se corresponden con los obtenidos en la observación de la microestructura y permiten justificar que en las uniones analizadas existe la interacción molecular de los materiales independientemente de sus características químicas. Se realiza la valoración económica y el impacto medio ambiental del proceso de explosión.



## **Abstract**

It is paper has as objective to establish the behaviour microstructure, the hardness and the simulation for the Method of the Finite Elements of the unions dissimilar AISI 316 - AISI 1010 and of the steel AISI 1045 - AISI 1050 for the welding process for explosive. You use as explosive the TECTRÓN 100 and a speed of detonation of 2 500 m/s settled down. The samples were prepared with two configuration types, the union AISI 316 - AISI 1010 were carried out with a cylindrical geometry and the union AISI 1045 - AISI 1050 with a parallel geometry, in this last union the steel AISI 1050 are treated thermally. The microstructure was observed at different distances, from five until 25 millimetres of the beginning of the explosion where it was observed that the formation of waves is of  $30^{\circ}$ . The results obtained by the Method of the Finite Elements belong together with the obtained ones in the observation of the microstructure and they allow justifying that in the analyzed unions the molecular interaction of the materials exists independently of their chemical characteristics. He is carried out the economic valuation and the half environmental impact of the explosion process.



## INTRODUCCIÓN

En la ingeniería de superficies se engloban diferentes procesos, tanto de tratamientos de superficie y como de deposición. Se distinguen, por un lado los tratamientos superficiales y por otro los procesos de modificación superficial. En los primeros, la composición química o la microestructura de la superficie se ve alterada, mientras que los procesos de deposición, llevan asociados la obtención de un recubrimiento o capa delgada sobre el material sustrato.

La efectividad del tratamiento superficial o del recubrimiento (la mejora de propiedades específicas) depende muy particularmente del método de modificación superficial empleado, así como del sustrato a modificar o el tipo de tratamiento o material a depositar, ya que todos ellos no se comportan igual, ya que existen técnicas específicas para cada sustrato o recubrimiento.

La selección de la técnica más adecuada depende de diversos factores, como los requerimientos específicos de funcionamiento del material durante su vida en servicio, la viabilidad económica y tecnológica o la capacidad de adaptación de la capa al sustrato. Por otro lado, los tratamientos superficiales y las técnicas de deposición deben ser compatibles con el material seleccionado como sustrato y ha de poder conseguirse el recubrimiento del espesor necesario para cada requerimiento.

El interés que representa el recubrimiento antidesgaste, se relaciona con la disposición de una abundante selección de aceros y aleaciones especiales capaces de constituir piezas de toda especie destinadas a trabajar en condiciones muy severas. Sin embargo, estos materiales son cada vez más caros, muchas veces de una elaboración compleja y en general, insuficientemente dúctiles para poder construir enteramente las piezas de que se trata. Por consiguiente, limitando su empleo a aquellos lugares especialmente sujetos al desgaste, es decir, recargando localmente por medio de estas aleaciones especiales aceros ordinarios baratos y dúctiles, se llega a una solución mucho más económica, al mismo tiempo que se reducen los tiempos muertos necesarios para la sustitución de la pieza usada.



Los recubrimientos duros protectores, consisten en la aplicación a una pieza de metal, de una capa superficial más dura y resistente que el metal base. Este recubrimiento se aplica por varias razones: para resistir la corrosión, para protección contra altas temperaturas o cambios bruscos de temperatura y para resistir el desgaste causado por abrasión, erosión, fricción o impacto.

La mejor combinación de los parámetros de calidad superficial le corresponde a aquel método de elaboración que como resultado del procedimiento físico o químico de deposición de los elementos necesarios y del tratamiento térmico final, garantice la estructura y propiedades físico – mecánicas óptimas.

Como **situación problemática** se plantea:

Los aceros soldables se especifican generalmente con orientación hacia las propiedades mecánicas según las normas ASTM con una considerable amplitud en la composición química, acorde a lo estipulado por algún código, norma o especificación, donde uno de ellos es el establecido por la American Welding Society (AWS) que es la normativa más aceptada, sin embargo la relación microestructura - propiedades en el proceso de soldadura por explosivos entre materiales disímiles es trascendente debido a que muchas veces los materiales a unir no son iguales por ende no tienen las mismas propiedades mecánicas y características metalúrgicas tanto antes como después de realizada la soldadura.

### **El problema a investigar lo constituye**

La no existencia de una caracterización microestructural, de la microdureza y la simulación por elementos finitos de los efectos de los parámetros de soldadura con explosivos en la unión de aleaciones disímiles de acero al carbono con acero inoxidable en configuración cilíndrica y de acero bajo carbono con acero de medio contenido de carbono en configuración paralela.

Como posible solución al problema se formula la siguiente **hipótesis**:

Si durante la soldadura por explosivos se consideran los parámetros como: la masa del explosivo, la energía cinética total, la presión de detonación y la temperatura de explosión en una configuración paralela y otra cilíndrica, se puede



determinar los efectos de la carga explosiva en las variaciones microestructurales después de la unión de los materiales disímiles.

El presente trabajo se establece como **objetivo general**

Establecer a partir de los parámetros de la soldadura por explosivos, en una configuración paralela y otra cilíndrica, los efectos de la carga explosiva, en las variaciones microestructurales de las uniones de aceros disímiles en base a la metalurgia de las zonas obtenidas.

El **objeto de estudio** es unión de soldadura por explosivos del acero bajo carbono y del acero inoxidable en configuración cilíndrica y de los aceros de medio carbono, uno tratado térmicamente en configuración paralela.

El **campo de acción** es el comportamiento microestructural y la microdureza de la zona fundida y la zona de influencia térmica de uniones soldadas disímiles por el proceso de soldadura por explosivos, así como las tensiones por el Método de Elementos Finitos.

### **Objetivos específicos**

1. Definir las regularidades de los efectos de los parámetros de soldadura por explosivos en la unión de materiales disímiles, en base a su comportamiento microestructural, la microdureza y de la simulación por el método de los elementos finitos.
2. Establecer el procedimiento metodológico que permita la determinación de los efectos de los parámetros de soldadura por explosivos en la unión de aleaciones disímiles para diferentes tipos de configuración.
3. Describir las variaciones microestructurales originadas en la zona fundida y la zona de influencia térmica, así como la microdureza resultante obtenida después del proceso de explosión en las aleaciones.

Para dar cumplimiento a este objetivo consideran las siguientes **tareas**:

1. Revisión bibliográfica relacionada con el objeto de estudio.
2. Planificación, diseño y realización de experimentos.
3. Análisis de resultados y obtención de las microestructuras y la microdureza



resultante del proceso de soldadura con explosivos en las aleaciones.

4. Fundamentación de las inestabilidades metalúrgicas que surgen en el proceso de soldadura por explosivos del acero bajo carbono y del acero inoxidable y en los aceros de medio contenido de carbono, uno tratado térmicamente.
5. 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. ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS**

### **1.1. Introducción**

En la soldadura de estado sólido, la coalescencia de la superficie de la parte se obtiene; primero, mediante presión solamente o segundo por calor y presión. Para algunos procesos de estado sólido, el tiempo también es un factor. Si se usan calor y presión, la cantidad de calor por sí misma no es para producir la fusión de la superficie de trabajo. En otras palabras, no ocurrirá la presión de las partes con el uso solamente del calor que se aplica en forma externa para estos procesos. En algunos casos, la combinación de calor y presión o el modo particular en el que se aplica la presión sola, generan suficiente energía para producir una fusión localizada de las superficies empalmadas. No se añade metal de relleno en la soldadura de estado sólido.

En el presente capítulo se establece como objetivo realizar la búsqueda bibliográfica existente relacionada con la soldadura por explosivos en materiales disímiles.

### **1.2. Consideraciones acerca de la soldadura de aceros disímiles**

En la actualidad existen diferentes clasificaciones de aceros que sirven como materiales de construcción; los diseñadores pueden escoger el acero que mejor se comporte de acuerdo a las necesidades particulares. Estos materiales difieren no solo en su composición sino también en la forma como han sido manufacturados; lo que los hace más o menos soldables creándose, la necesidad de evaluar a fondo las formas disponibles para su soldadura (López *et al.*, 2007).

En la fabricación de equipos y máquinas destinados a la transformación de energía, es cada vez más frecuente las aplicaciones de soldaduras en aceros disímiles. 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 (Lozano *et al.*, 2000 y Fernández *et al.*, 2014).

Además de las recomendaciones que se encuentran en los catálogos de fabricantes de materiales de aporte (García *et al.*, 2009), que son muy funcionales cuando las soldaduras son entre materiales similares, es necesario hacer un mejor análisis cuando de materiales disímiles se trata y en especial de aceros inoxidables con aceros al carbono u otro tipo de aceros con diferente composición química.

### 1.2.1. Empleo de las soldaduras disímiles

Plantean Celik y Alsaran (1999) y Madhusudan y Srinivasa (2009), que el empleo de las soldaduras disímiles están asociadas a diferentes industrias tales como las termoeléctricas, la química y petroquímica, donde se presentan secciones que están construidas de aceros al carbono o alguna otra aleación y por razones económicas se someten 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 y causan fallas que deben ser reparadas o cambiadas frecuentemente.

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

Por las condiciones de operabilidad que se puedan lograr en las uniones de soldaduras, es donde la unión de materiales disímiles adquiere gran importancia (Metzger y Lison, 1976; Arivazhagan *et al.*, 2008) lo cual da origen a diversos estudios dirigidos hacia la comprensión de las fallas que se presentan durante el servicio y que han sido vinculadas a las uniones disímiles mediante el fenómeno de desunión, que se presenta en la zona de transición de las uniones disímiles (Nelson *et al.*, 1999; Lippold y Kotecki, 2005; Joseph *et al.*, 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, lo que resulta de un área sobrepuesta dentro del cual se pueden obtener los parámetros con los que se soldará la combinación en cuestión.

En la soldadura de aceros disímiles de acero al carbono (A 570) y aceros inoxidables como se muestra en la figura 1.1 han sido empleados para mitigar el efecto del

desgaste, entre otras afectaciones que sufren las aleaciones durante el desempeño de su trabajo.

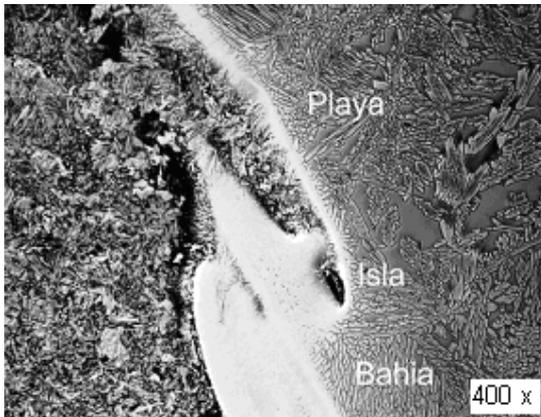


Figura 1.1. Microestructura de acero disímil A570 y 316. Fuente: Peña (2012)

En la unión disímil realizada con procesos de soldadura manual por arco eléctrico y electrodos revestidos del tipo E 316 – 12, se puede observar el comportamiento metalúrgico que se ha obtenido en la zona fundida (ZF) y en la zona de influencia térmica (ZIT), caracterizado por una buena unión metalúrgica, sin embargo hay que precisar que en estos tipos de uniones, al someterse a ambientes donde exista el fenómeno de la corrosión, las mismas son susceptible al agrietamiento bajo tensión, por lo que para estas condiciones de trabajo hay que evaluar otro método de unión, como la soldadura por explosivos.

### 1.3. Generalidades sobre la soldadura por explosivos

La soldadura por explosivos es un proceso de soldadura en estado sólido, que usa una detonación explosiva controlada para forzar dos metales juntos debido a la alta presión. La unión resultante del sistema compuesto se une de forma durable por la unión metalúrgica. La soldadura explosiva bajo alto impacto de velocidad probablemente se le atribuye a Garl en 1944. Este tipo de unión fue descubierta en 1957 en los Estados Unidos por Philipchuck durante un proceso de troquelado con explosivos, las hojas de metal, de forma ocasional, quedaban pegadas a los troqueles. Entre aquel inicio y ahora, el proceso ha sido desarrollado totalmente en aplicaciones industriales (Petushkof, 1976; Young, 2004; Mousavi y Sartangi, 2009).

Autores como Acarer *et al.* (2003); Perkins *et al.* (2005) y Durgutlu *et al.* (2008), exponen que la soldadura por explosión es un proceso de soldadura en el cual una

coalescencia rápida de dos superficies metálicas es causada por la energía de un explosivo detonado, en el mismo no se usa metal de relleno, no se aplica calor externo, no ocurre difusión, el tiempo es demasiado corto, la unión es metalúrgica, combinada con un entrelazado mecánico que resulta de un rizado. Comúnmente usado para unir dos metales disimiles, en particular para revestir un metal en la superficie de un metal base, sobre grandes áreas.

El proceso para revestir una placa de metal sobre otra con el empleo de una carga de detonación, se denomina soldadura por explosivos (*explosive welding*), como se observa en la figura 1.2. En esta distribución, las dos placas están en la configuración paralela y a una cierta distancia de separación, con la carga explosiva encima de la parte superior, denominada la placa volátil. Con frecuencia se usa una capa amortiguadora (hule o de plástico) entre el explosivo y la placa volátil para proteger su superficie. La placa inferior, denominada metal de soporte, descansa en un yunque para apoyo (Petushkov y Titov, 2001).

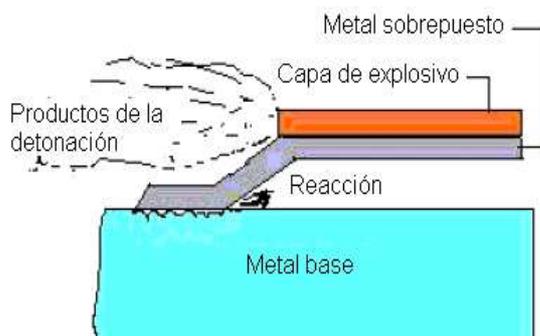


Figura 1.2. Proceso de la soldadura por explosivo.

El proceso puede ser dividido en tres fases básicas.

- a) La detonación del cargo explosivo,
- b) La deformación y aceleración de la placa volante,
- c) La colisión entre las placas.

Al iniciarse la detonación, la carga explosiva se propaga de un extremo de la placa volátil al otro, como se aprecia en la figura. Una dificultad en la comprensión de lo que sucede en la soldadura por explosivos (EW) es el concepto erróneo común de que ocurre al instante una explosión; en realidad es una reacción progresiva, aunque ciertamente muy rápida, que se propaga a velocidades hasta de 8 500 m/seg La zona de alta presión resultante impulsa la placa volátil para que choque con el metal

de soporte en forma progresiva a alta velocidad, por lo que toma una forma angular conforme avanza la explosión, como se ilustra en la figura (Walsh *et al.*, 1953 y Durgutlu *et al.*, 2005).

En este proceso (Byers y Braithwaite, 1993) especifican que la placa superior permanece en su posición en la región donde el explosivo todavía no ha detonado. Debido a que la colisión ocurre a alta velocidad en una forma progresiva y angular, provoca que se vuelvan inestables las superficies en el punto de contacto y las películas de superficie son expelidas hacia delante desde el vértice del ángulo. Por tanto, las superficies que chocan están químicamente limpias y el comportamiento del fluido del metal, que implica una cierta fusión interfacial, proporciona un contacto íntimo entre las superficies y conduce a la unión metalúrgica.

Las variaciones en la velocidad de choque y en ángulo de impacto durante el proceso pueden provocar una interfase ondulada o rizada entre los dos metales. Este tipo de interfase fortalece la unión, debido a que aumenta el área de contacto y tiende a entrelazar mecánicamente las dos superficies por esta razón es muy utilizada (Al-Hassani *et al.*, 1984).

### **1.3.1. Proceso físico del proceso de soldadura por explosión**

La explosión se define como "la transformación física o química rápida de la sustancia, acompañada del paso de la energía potencial de esa sustancia o los productos de su transformación a energía cinética". Uno de los signos de la explosión es el brusco aumento de la presión en el medio circundante, a consecuencia de lo cual surge una onda de choque y un campo de tensiones (Aguilar, 1978; Pernia, 1988, Almira, 2014).

Según Akbari *et al.* (2004), en la soldadura por explosión (EXW), 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.

El proceso de soldadura por explosión, es en el cual una coalescencia rápida de dos superficies metálicas es causada por la energía de un explosivo detonado donde no se usa metal de relleno, 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 (ULAEX, 2000).

Al ser detonado el explosivo (Akbari, 2001) este se desplaza desde un extremo al otro, como se muestra en la figura 1.3, 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.

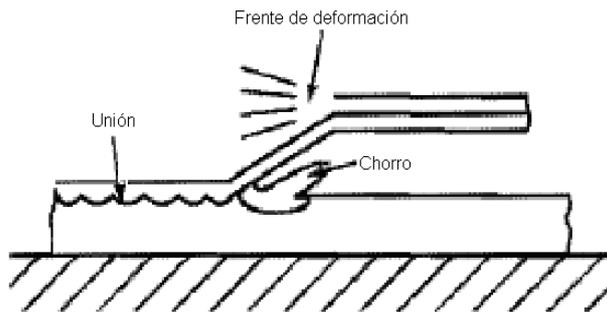


Figura 1.3. Desarrollo del proceso de soldadura por explosión. Fuente: Almira (2014)

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 áreas. (Crossland, 1982 y Amit, 2008).

#### 1.4. Parámetros de la soldadura por explosivos

Coinciden en plantear Cowan *et al.* (1971), que los parámetros específicos para la ejecución del proceso de soldadura por explosivos lo constituyen, el yunque, el cual sirve de apoyo a las dos placas a soldar y el cual debe estar seguro y rígido para evitar distorsiones y alabeos durante la explosión, que a su vez garantiza la fuerza del rendimiento y la dureza de la parte interna. Puede ser un centro sólido o un tubo con un mandril.

La proporción de la masa explosiva con relación a la proporción de placa móvil, se considera que, en relación a la cantidad de explosivos en la parte superior, existirá mayor poder en la explosión. Este parámetro influirá en la fuerza del campo magnético.

La influencia de los parámetros del proceso para la soldadura explosiva ha sido estudiado por varios autores (Robinson, 1975; Drury y Westmaas, 1980 y Davis, 1987) coinciden en plantear que con el aumento de la placa móvil, el impacto transforma la interfase de la vinculación de liso a ondulado, explican que la comprensión radica en que con el aumento de la proporción de la masa explosivas, los aumentos la presión que la explosión ejerce en la placa volante, produce una aceleración superior.

Por otro lado (Dick, 1983) manifiesta que con el aumento de la distancia de la placa volante, alcanza una velocidad superior, con una disminución en el alejamiento, provoca bajas velocidades de impacto, lo cual no producen una superficie ondulada ( $< 200$  m/s). La formación de olas que se obtienen en la unión por explosivos, aparecen, con el aumentando de la proporción de la masa explosivo y el alejamiento de la placa.

El esquema de los parámetros de la soldadura por explosivos (figura 1.4), se muestra como surge el proceso de formación del chorro de reacción.

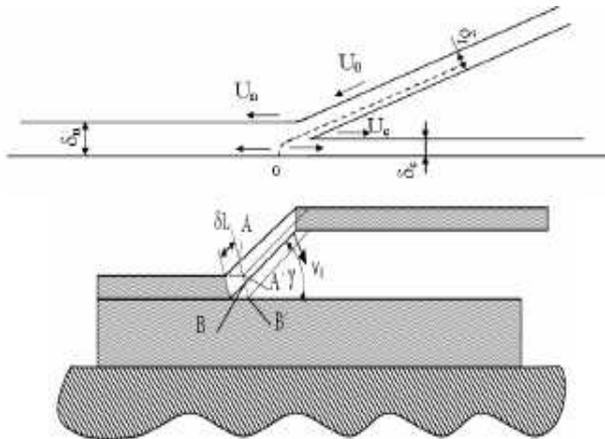


Figura 1.3. Parámetros de formación del chorro de reacción. Fuente: Dick, (1983).

Donde:  $U_o$  - es la velocidad y espesor del chorro de reacción,

$U_c$  - es la velocidad y espesor cumulativo del chorro de reacción, con moviendo a la derecho (marcha atrás),

$U_n$  - es la velocidad y espesor del chorro de reacción, con moviendo a la izquierda

Para obtener una a explosión que logre la soldadura, es necesario tener en cuenta las condiciones siguientes:

$$D < C_o$$

Donde:  $C_o$  - es la velocidad real en los materiales soldados

$D$  - es la velocidad de detonación para una presión de  $P \geq P_{KP}$

$P$  - es una presión para  $\gamma < \gamma_{KP}$

Donde  $\gamma$  es un ángulo de colisión y  $\gamma_{KP}$ , es un ángulo crítico de colisión.

Según los resultados de experimentos sobre el método es necesario enfatizar en dos puntos (Holtzman y Cowan, 1965):

- a) Que la distancia entre la placa móvil, no cambie a lo largo del llenado de la superficie.
- b) Que la placa móvil coincida con las proyecciones de la placa fija.

Holtzman y Cowan (1965) plantean que con el aumento de la distancia y la amplitud, surgen las siguientes interfases: las olas pequeñas, olas más grandes, las olas con el vórtices, las olas con solidificación de bolsas de fusión y las capas continuas fundidas. De todas ellas, la interfase más deseable, es el enlace ondulado de la transición sin ninguna capa intermetálica. Un cambio continuo en la forma de onda (la amplitud y período), el estado detallado de la geometría de la ola puede atribuirse a las variaciones en la velocidad de la placa volante y al el ángulo de impacto.

Con la formación de capa intermetálica, existe la probabilidad de baja la ductilidad y causa de carácter quebradizo (Frenkel y Smit, 2002). Los beneficios de la formación de la ola son: una superficie del contacto superior, superior movilidad de átomos y dislocaciones y levantamiento eficaz de contaminaciones. Algunos investigadores, en los que se destaca Nordlund (2006) plantea que los puntos fuera de la ondulación de la interfases, no tienen un efecto en la fuerza de cohesión.

#### 1.4.1. Características de la explosión

El proceso de explosión es consecuencia de dos elementos: la deflagración y detonación, lo cual según Casals (1997), Otaño (1998); Caraballo (2004) y Almira (2015), la detonación de materiales energéticos son reacciones exotérmicas de oxidación – reducción, reacciones que son autosostenidas después de que cierta energía inicial de activación ha sido aplicada, donde la base de masa, la cantidad de energía liberada por propelentes y explosivos es similar, 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.

La deflagración como proceso (Mariño, 2000 y Almira, 2015), 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.

En estudios realizados por diferentes autores (Staudhammer y Murr, 2001), coinciden en plantear que los explosivos 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, que causa 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 que viaja a través del explosivo con velocidad.

### **1.5. Proceso de formación de la unión en la soldadura por explosivos**

La 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).

Según Sudarshan (1983), la velocidad de colisión (m/s), con la cual la onda de detonación recorre una columna de explosivo, puede ser afectada por el tipo de producto, por su diámetro, por el confinamiento, la temperatura y el cebado. En los explosivos comerciales fluctúan desde cerca de 152 hasta más de 670 m/s. 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 unión. La presión en el punto de colisión, que puede ser entre 700 a 4 200 MPa, es suficiente para mantener el material con aspecto de fluido viscoso.

Considera Brien (1991), que las velocidades de detonación varían generalmente entre 1 800 y 10 000  $ms^{-1}$ , lo cual está en correspondencia de la composición química y la naturaleza de los explosivos, para altas velocidades de detonación, esto implica tiempos de reacción muy cortos, de tal manera que, en la zona de reacción, no existe o hay poca expansión de los productos gaseosos. Como consecuencia, los gases producidos por la detonación ocupan casi el mismo volumen que el explosivo inmediatamente antes de detonar.

Durante el desarrollo del proceso de explosión, considera (Broeckhove, 2010) que como condición, 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, lo cual 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, ya que 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 VD (velocidad de detonación) o por la introducción de un ángulo de oblicuidad.

Consideran Tabbataee y Mahmoudi (2014) que los parámetros más importantes en la soldadura por explosión son atribuidos al ángulo de oblicuidad y a la velocidad de detonación ( $\beta$  y  $V_p$ ) y si  $\beta < 10^\circ$ , se puede utilizar una aproximación para realizar la unión debido a que la formación de una reacción es esencial. En la figura 1.4 aparece mostrado la variación del ángulo

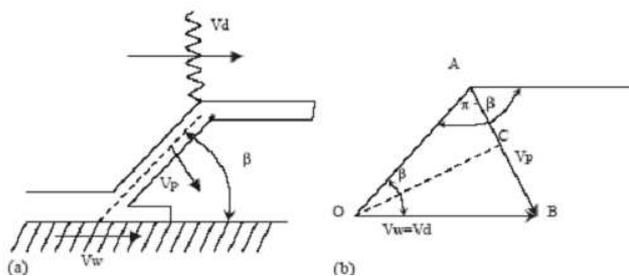


Figura 1.4. Variación del ángulo  $\beta$ . Fuente: Almira (2015).

Según lo mostrado en la figura 1.4 y criterios de Almira (2015), la presión de impacto mínima deben ser excedida, así como la mínima velocidad de la plancha, para que la energía de impacto sea suficiente y ocurra la soldadura. Esto sugiere 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 controlado, con el objetivo de exceder la cantidad de calor y posiblemente fundiciones por disipación viscosa y 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.

Cook (1958) especifica diferentes valores del espacio a considerar entre las placas, las cuales están en función de la gravedad específica del material de la plancha volante y 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. La suficiente separación entre las planchas 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. 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, los cuales los convierte en el análisis de los parámetros físicos más importantes.

### **1.5.1. Mecanismos de la soldadura por explosivo**

El mecanismo responsable de la soldadura por explosivos, según el criterio de Wylie *et al.* (1971), lo atribuye a la acción de un chorro metálico de alta velocidad que se produce por el impacto oblicuo de la chapa metálica a ser soldadas, el impacto, que al provocar presiones y tensiones de corte muy elevadas, la resistencia al corte de los materiales involucrados en el proceso resulta despreciable, ya que bajo tales condiciones, estos materiales, se comportan como fluidos de muy baja viscosidad, durante un pequeño intervalo de tiempo y su comportamiento puede ser tratado mediante las leyes de la mecánica de los fluidos. De esta forma se produce un chorro (jet) metálico que limpia la superficie de óxidos o contaminantes, dando origen a la condición necesaria para una soldadura.

Al pensar en los efectos térmicos que acompañan a las reacciones químicas, cada compuesto posee un contenido calorífico (o "entalpía") definido. El calor de formación en condiciones normales es una medida de este contenido calorífico, expresándose su valor con respecto a un cero arbitrario correspondiente a los elementos constituyentes, la cuestión de si durante una reacción se desprenderá calor o será absorbido queda determinada por el conjunto o suma de los contenidos caloríficos de los productos de la reacción, en comparación con la suma correspondiente a los reactivos (Wittman, 1973).

A estos principios también están sujetas las reacciones explosivas denominadas "convencionales o químicas", cuyo aspecto distintivo no está en el origen de la energía que desprenden sino, en la enorme velocidad con que la transfieren al medio circundante (Watanabe-Cabrera, 2012). Aunque la energía que liberan las explosiones químicas por unidad de masa es incomparablemente menor a la que alcanzan las explosiones nucleares, estas no pueden sustituir a las primeras, al menos en el estado actual de la técnica; antes deberán superarse serios problemas

referentes al control de los productos radiactivos que emiten y el hecho de que para la mayoría de las posibles aplicaciones resultan demasiado potentes.

En consecuencia, los explosivos convencionales continúan ocupando un lugar relevante entre los medios de que dispone el hombre para transformar su entorno, en correspondencia con sus necesidades (Naumovich *et al.*, 1988).

### 1.6. Aspectos metalúrgicos de la soldadura por explosión

Estudios relacionados con el tema de la soldadura por explosivos (Broeckhove, 2010 y Ben-Artzy, 2010), coinciden en plantear que 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 este proceso, como el efecto de las ondas de choque.

En la figura 1.5 se muestra el aspecto típico de la intercara ondulada de una soldadura por explosión.

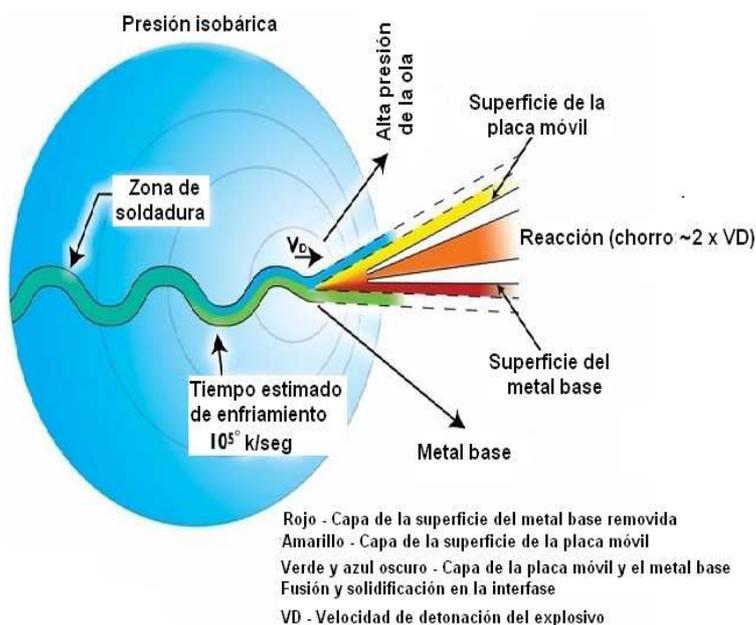


Figura 1.5. Aspecto típico de la intercara de la soldadura por explosivos.

Por lo expuesto en la figura 1.5, plantea Acarer *et al.* (2004), que 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

5º, 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 (Withers y Bhadeshia, 2001).

Plantea Garcia-Jacomino *et al.* (2007), 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 (2004), 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.

### **1.7. Aplicación de uniones soldadas disímiles**

La cronología del uso de uniones disímiles, revela la primera aplicación de un material de aporte tipo austenítico como protección sobre un acero al carbono, lo cual fue desarrollado por Krupp hace más de 70 años (Klueh *et al.*, 1983).

En 1940, las uniones disímiles fueron empleadas para el uso de calderas e intercambiadores de calor las cuales fueron hechas con un material de aporte de acero inoxidable austenítico. En la década de los cincuentas y sesentas se presentó un incremento en su uso en calderas en servicio, especialmente en donde la temperatura del vapor alcanzaba 566 °C. Las primeras fallas de este tipo de uniones fueron encontradas en 1950 y desde entonces, se realizaron esfuerzos para mejorar su comportamiento y entender el fenómeno de falla. Posteriormente, en los setentas y ochentas se incrementó el uso de las uniones disímiles y por consiguiente, la presencia de fallas (Lundin, 1982).

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 interdendritica 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.*, (2010), 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.

Saresoja *et al.* (2011) 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 aquéllos 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.

Merriman (2012) 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 “Procese 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 1976, 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.

Jinxiang *et al.* (2005) 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 desde 20 a más de

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.*, 2009). 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, 1999; 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.

### **1.8. Características de la zona fundida en la soldadura de aceros disímiles**

Plantea Masubuchi (1980) y Almira (2015) que 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, ya que al unir acero al carbono con un acero inoxidable se presenta la migración del carbono, el alto contenido de cromo en el material de soldadura, promueve la difusión del carbono, hacia el acero inoxidable.

Según Doddy (1992), 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.

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.

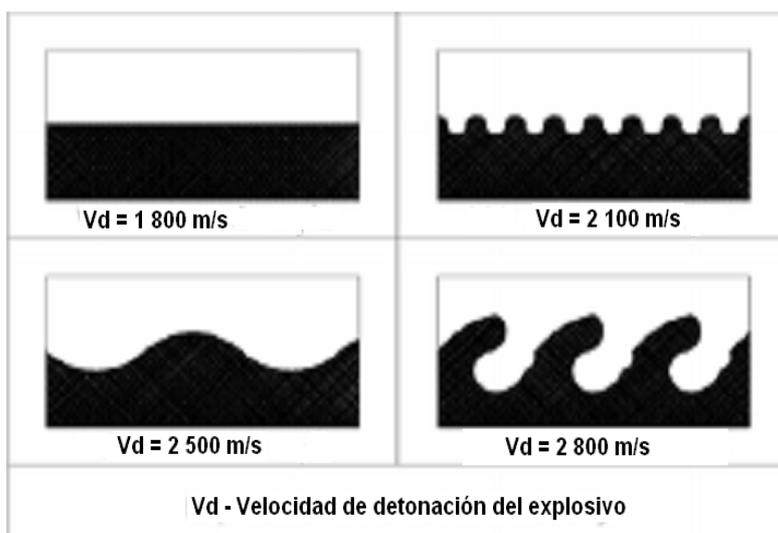


Figura 1.6. Morfología de la ola en dependencia de la velocidad de detonación del explosivo.

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, ya que 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.

En las uniones disímiles como cobre y tantalio, aluminio, tantalio y acero inoxidable, se ha observado que la intensidad y propagación de las olas, se comportan de diferentes maneras, esto se asocia a que estos materiales presentan punto de fusión diferente (Loncke, 2009).

Los autores (Schmidt y Shockey, 1992), coinciden en plantear 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, así como una reducción en la resistencia a la fatiga no importante, sin embargo otro autor (Young, 2004) encontró que la resistencia a la fatiga era levemente mayor que el más resistente de los materiales.

En cuanto a la dureza que se obtiene luego de la ejecución del proceso, en ambos componentes, se ve incrementada, por el paso de la onda de choque a través de ellos, 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 (Harries y Beztie, 1988).

En general, en la soldadura por explosivos se encuentran tres comportamientos básicos:

- ✚ Además del endurecimiento por choque en ambos componentes, se producen endurecimiento interfacial localizado debido a la alta deformación plástica en la zona de la soldadura.
- ✚ Se produce un endurecimiento por choque en ambos componentes, pero en la zona de soldadura se produce un (ablandamiento) posiblemente porque se generó suficiente calor en la intercara como para producir una recristalización total durante y posteriormente al proceso de soldadura.
- ✚ Se produce un endurecimiento por choque en ambos componentes, pero en la zona cercana a la intercara, la dureza aumenta y luego en la intercara disminuye. Este representa un caso intermedio entre los dos anteriores, donde se ha

generado una pequeña cantidad de calor permitiendo sólo una recristalización parcial.

Para determinar la calidad de las uniones soldadas por el método por explosivos, así como para evaluar la influencia de los parámetros del proceso, deben realizarse los experimentos y determinar la calidad de la soldadura, luego se someten a ensayos destructivos y no destructivos (Matsui *et al.*, 2010). Los métodos ultrasónicos y la inspección radiográfica son usados ampliamente para estas soldaduras

### **1.9. 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.

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.

Almira (2015) establece el comportamiento microestructural de uniones disímiles titanio – acero AISI 1020 y de acero AISI 1066 – acero AISI 1008 por el proceso de soldadura por explosivos, consideró una velocidad de detonación de 2 800 m/s, un radio de la carga de 0,345 kg y una velocidad de colisión de 1196, 16 m/s, todo ello con un volumen de explosivo de 600 cm<sup>3</sup> y una densidad de 1,15 g/cm<sup>3</sup>, parámetros que permitieron asegurar el flujo y lograr la unión metalúrgica de las aleaciones estudiadas. Las microestructuras obtenidas están compuestas por granos de ferrita exquiauxiales, granos muy finos del tipo troostítico y grano grueso con red de ferrita y la zona fundida de ambos materiales base existe la presencia de granos finos y alineados del tipo ferrítico. Las durezas obtenidas manifestaron incremento desde 120 HV para el acero AISI 1008 hasta 250 HV para el acero AISI 1066.

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

- ✓ La soldadura por explosivos ha sido explotado con éxito para plaqueado de chapas grandes, plaqueado para la construcción de recipientes a presión, uniones tubo a placa de tubo y obturación de intercambiadores de calor, tanto para la industria convencional como nuclear.
- ✓ Se ha demostrado con este tipo de soldadura que es posible realizar uniones de materiales disímiles, con diferentes espesores e independiente de la conductividad térmica que presenten los materiales.
- ✓ A diferencia de las uniones soldadas disímiles con el empleo de electrodos para realizar la unión metalúrgica de los materiales, en la soldadura por explosivos, la fusión metalúrgica se realiza a través de la introducción de los átomos de los materiales, uno dentro del otro.

**CAPÍTULO 2**  
**MATERIALES Y MÉTODOS**

## CAPÍTULO. 2 MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1. Introducción

Al pensar en los efectos térmicos que acompañan a las reacciones químicas es conveniente imaginar que cada compuesto posee un contenido calorífico (o "entalpía") definido. El calor de formación en condiciones normales es una medida de este contenido calorífico, expresándose su valor con respecto a un cero arbitrario correspondiente a los elementos constituyentes, la cuestión de si durante una reacción se desprenderá calor o será absorbido queda determinada por el conjunto o suma de los contenidos caloríficos de los productos de la reacción, en comparación con la suma correspondiente a los reactivos.

El segundo capítulo tiene como objetivo establecer el procedimiento metodológico del proceso de soldadura por explosivos del acero AISI 316 y el acero AISI 1010 y del acero AISI 1045 con el acero AISI 1050.

### 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 reflejan en la tabla 2.1, 2.2, 2.3 y 2.4

Tabla 2.1. Composición química del acero AISI 1010, en %

Material	C	Mn	P	S	Fe
AISI 1010	0,08 – 0,10	0,30 – 0,60	0,040	0,050	Resto

Tabla 2.2. Composición química del acero AISI 316, en %

Material	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
AISI 316	0,08	1,00	2,00	0,045	0,030	16 - 18	10 - 14	2 - 3

Tabla 2.3. Composición química nominal del acero AISI 1045, en %

Material	C	Mn	Cu	Cr	Si	Ni	Mo	Fe
AISI 1045	0,42 – 0,46	0,65 – 0,90	0,16	0,40	0,25	0,40	0,10	97,75

Tabla 2.4. Composición química nominal del acero AISI 1050, en %

Material	C	Mn	Cu	Cr	Si	Ni	Mo	Fe
AISI 1050	0,47 - 0,55	0,65	0,16	0,40	0,25	0,40	0,10	97,75

La soldadura disímil por explosivos se realizó de la manera siguiente:

- ✚ AISI 316 – acero AISI 1010.
- ✚ Acero AISI 1045 – Acero AISI 1050

### 2.3. 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 2.1, se realizó primeramente la limpieza de la superficie de las probetas (AISI 1045 y del acero AISI 1050).

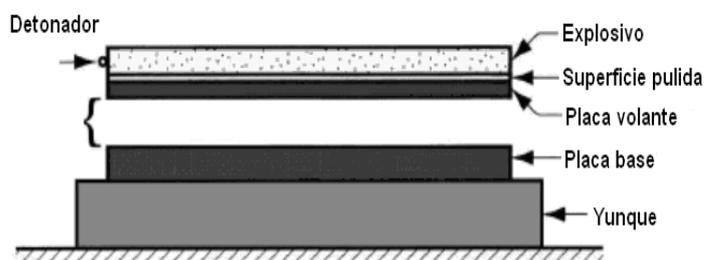


Figura 2.1. Preparación de la unión para la soldadura. F

El otro modelo considerado para el proceso de explosión, fue con probetas cilíndricas, como se expone en la figura 2.2. La soldadura se realizó con el acero inoxidable AISI 316 y el acero al carbono AISI 1010.

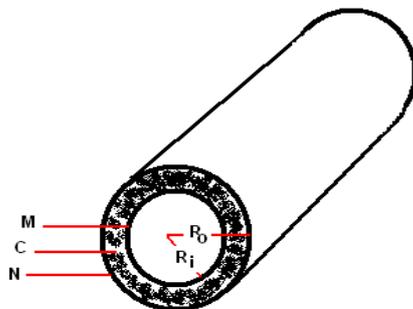


Figura 2.2. Forma de ejecución del proceso de soldadura en muestras cilíndricas.

#### Donde:

- $C$  - masa de la carga explosiva, kg
- $M$  - masa de la placa móvil o volante, kg
- $N$  - masa de la placa protectora de la carga explosivo, kg
- $R_o$  - radio exterior de la carga explosiva.
- $R_i$  - radio interior de la carga explosiva.

Para el desarrollo del plan experimental se prepararon seis probetas de las aleaciones disímiles. La unión se realizó según expuestas anteriormente. En la tabla 2.4 se muestran los parámetros considerados según la forma de realizar la unión por soldadura.

Tabla 2.5. Parámetros para la soldadura de las probetas

No	Aleación	Vd (m/s)	$\beta$	$\Phi$	$\delta$
1	AISI 316 – acero AISI 1010	2 500	7	0,8	5
2	Acero AISI 1045 – Acero AISI 1050	2 500	7	0,8	5

Las muestras para la soldadura paralela se prepararon con una longitud de 200 x 200 mm, se cortaron, en una fresadora 6 H 82 Г, las muestras cilíndricas se cortaron en un torno 16 K 20. La preparación de las muestras para la soldadura se realizó según Norma ASTM E - 92.

Para realizar los cálculos en este proceso de soldadura se consideró la ecuación de Gurney, donde para la implosión se tuvo cuenta el volumen de ambos materiales, así como la ubicación del explosivo, la distribución de la velocidad y energía producto de los gases. Para las implosiones cilíndricas, la geometría involucrada se simplifica para incluir los radios, tanto interno como el del exterior ( $R_i$  y  $R_o$ ).

#### 2.4. Material explosivo empleado

Para la realización del trabajo investigativo de la tesis se utilizó como sustancia explosiva industrial el TECTRÓN 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 TECTRÓN 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.
- ✚ Presión de detonación ( $P_d$ ), se establece en función del diámetro de la carga.

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 estas condiciones se establecerá la presión de detonación cualquiera sea la configuración de la carga explosiva a emplear, solamente si se conoce la densidad de la sustancia explosiva y su velocidad de detonación.

#### **2.4.1. Diseño de 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, está 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, 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. Al tener 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.

Una vez definidas las variables y sus niveles, se procedió a la realización de los experimentos de aplicación de carga explosiva en las probetas, utilizando un diseño factorial (Juran, 1993). Este diseño es muy apropiado cuando han de ser investigados varios factores a dos o más niveles y la interacción entre ellos puede ser importante. En

este caso se investigan dos factores, cada uno a dos niveles, ensayando todas las combinaciones entre los mismos. Se pretende:

1. Estimar y comparar los efectos de los factores seleccionados.
2. Estimar los posibles efectos de la interacción.
3. Estimar la varianza

El número de experimentos a realizar se determina acorde a la siguiente expresión:

$$N = n^x$$

**Donde:**

$N$  - número de experimentos a realizar

$x$  - variables o factores considerados

$n$  - niveles de cada factor.

El número de experimentos ( $N$ ) resultó igual a ocho. La matriz de este diseño de experimento se muestra en la tabla 2.6.

Tabla 2.6. Matriz del diseño de experimento

No	X1	X2	P <sub>D</sub>	V <sub>p</sub>	HV
1	1	1	P <sub>D1</sub>	V <sub>p1</sub>	HV1
2	- 1	1	P <sub>D2</sub>	V <sub>p2</sub>	HV2
3	1	- 1	P <sub>D3</sub>	V <sub>p3</sub>	HV3
4	-1	-1	P <sub>D4</sub>	V <sub>p4</sub>	HV4

En cada experimento se realizaron tres réplicas, por lo que el total de experimentos fue de 12.

La realización de ensayos y experimentos en la rama de los materiales requiere de la disponibilidad del equipamiento necesario en óptimo estado de explotación, con todas las garantías de confiabilidad que exigen los resultados, y un volumen suficiente de información acerca de las normas y procedimientos para el desarrollo de los mismos. Esto exige el empleo de laboratorios acreditados con sus equipos verificados.

#### 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 considerarán en el proceso de soldadura por explosivos tenemos:

$V_p$  - velocidad de impacto.

$\beta$  - ángulo de colisión.

$V_c$  - velocidad del punto de colisión.

$E_k$  - energía cinética del explosivo.

$T$  - temperatura de separación, K

- **Velocidad de impacto** ( $V_p$ ): variable cuantitativa que define la velocidad del punto de colisión paralela a la placa base. Para la soldadura explosiva, controlada por la velocidad de detonación y la velocidad delantera de la capa del explosivo, va a depender del tipo de explosivo usado. Para nuestro proceso la velocidad de la colisión está en el orden de 1 500 a 3 000 m/s La velocidad de la colisión debe permanecer más baja que la velocidad del sonido de la placa volante (Ben-Artzy, 2010).

- **Ángulo de colisión** ( $\beta$ ): variable cuantitativa, es el ángulo formado por la placa base y la placa volante para formar el impacto o colisión, para la soldadura por explosivos se encuentra normalmente entre 0 y 10° (Broeckhove, 2010).

- **Separación o distancia entre placas:** variable cuantitativa, que define la distancia o separación entre la placa base y la placa volante, generalmente se considera el espesor de la placa volante y está entre 0,5 y 3 veces el espesor (Durgutlu, 2008).

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, la velocidad de impacto se calcula según Tabbataee (2014) y Almira (2015) como:

$$V_p = \sqrt{2E_k} \left( \frac{\frac{5}{3R^2}}{R^2 + 5R + \frac{5}{4}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad 0 \quad V_p = 1,2.Vd \left[ \frac{\left(1 + \frac{32}{27R}\right)^{\frac{1}{2}} - 1}{\left(1 + \frac{32}{27R}\right)^{\frac{1}{2}} + 1} \right] \quad (2.1)$$

**Donde:**

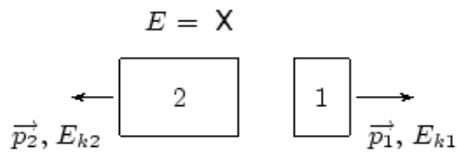
$V_p$  - velocidad de impacto, m/s

$Vd$  - velocidad de detonación, 2 800 m/s

$R$  - radio de carga, m

$E_k$  - energía cinética del explosivo, J

La energía cinética, es la energía que surge en el fenómeno del movimiento. Esta definida como el trabajo necesario para acelerar un cuerpo de una masa dada desde su posición de equilibrio hasta una velocidad dada. Una vez conseguida esta energía durante la aceleración, el cuerpo mantiene su energía cinética sin importar el cambio de la rapidez. Un trabajo negativo de la misma magnitud podría requerirse para que el cuerpo regrese a su estado de equilibrio, se determina según Petushkov (2000) como:



$$E_{ktotal} = E_{k1} + E_{k2}$$
$$E_{ktotal} = \frac{1}{2} m_1 \cdot V_1^2 + \frac{1}{2} m_2 \cdot V_2^2 \quad (2.2)$$

**Donde:**

$E_{ktotal}$  - energía cinética total, J

$m_1$  y  $m_2$  - masas de las placas (fija y volante), kg

$V_1$  y  $V_2$  - velocidad de las placas, m/s

**La velocidad de la placa volante ( $V_f$ ):** variable cuantitativa donde existe una correlación proporcional entre el ángulo de impacto y la velocidad de la placa volante, está entre 250 a 500 m/s y se calcula según Ben-Artzy (2010) como:

$$V_f = V_p \cdot \text{sen}(\alpha) \quad (2.3)$$

Para nuestro trabajo se escogió como velocidad de la placa volante 500 m/s y el ángulo  $\alpha$  se encuentra normalmente entre 3 y 30° (Mousavi y Sartangi, 2009).

El volumen del explosivo se calcula de acuerdo a las dimensiones y el espesor del explosivo (Almira, 2015).

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

**Donde:**

$a$  – largo de la plancha, cm



$b$  – ancho plancha, cm

$c$  – espesor del explosivo, cm

El radio de la carga se determina en adecuación a la ecuación 2.5. Almira (2015).

$$R_c = \frac{m}{2} \quad (2.5)$$

**Donde:**

$m$  – masa del explosivo, kg

La masa del explosivo se calcula en adecuación a la ecuación 2.6.

$$m = V \cdot \rho \quad (2.6)$$

**Donde:**

$V$  - volumen del explosivo, cm<sup>3</sup>

$\rho$  - densidad del explosivo, g/ cm<sup>3</sup>

La desviación del explosivo se determina según Hirsch (1995) como:

$$\phi = \left( -1 - \frac{V_G}{2E_K} \right)^{\frac{1}{2}} = 0,7 \text{ a } 0,83 \quad (2.7)$$

**Donde:**

$\phi$  - desviación del material explosivo ( $\phi = 0,8$ )

$V_G$ - velocidad de detonación de la partícula detrás del frente de detonación de los gases.

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 del 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, se calcula según Zlobin (2002).

$$\beta = \tan^{-1} \left[ \frac{V_p \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)}{V_c - V_p \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \right] \quad (2.8)$$

Si se tiene en cuenta que la velocidad de la partícula es un cuarto de la velocidad de detonación, entonces se obtiene según Caraballo (2004) como:

$$U_p = \frac{V_d}{4} \quad (2.9)$$

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 Akbari *et al.* (2004) como:

$$P_D = 432 \cdot 10^{-6} \cdot \rho_e \cdot \frac{V_d}{1 + 0,8 \cdot \rho_e} \quad (2.10)$$

**Donde:**

$P_D$  - presión de detonación, MPa.

$\rho_e$  - densidad del explosivo, g/cm<sup>3</sup>

$V_d$  - 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 ( $V_d$ ) 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:

$$V_s = \sqrt{\frac{k_v}{\rho}} \quad (2.11)$$

$$k_v = \frac{E}{3(1 - 2\nu)} \quad (2.12)$$

**Donde:**

$\rho$  - densidad del material de la placa volante, kg/m<sup>3</sup>

$k_v$  - volumen adiabático; N.m<sup>2</sup>

$E$  - modulo de Youngs, MPa

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

La temperatura de explosión es un valor teórico calculado a volumen y presión constantes donde los altos valores de temperatura favorecen los fines de la explosión, porque contribuyen a dilatar los gases. Por la ecuación de Boltzmann's se determinó la velocidad de colisión y luego la temperatura de separación de las placas (Hirsch, 1996).

$$V = \sqrt{\frac{3kT}{\mu}} \quad (2.13)$$

$$T = \frac{V^2 \cdot \mu}{3 \cdot k} \quad (2.14)$$

**Donde:**

$k$  - constante universal de los gases; 8,31 J/mol·K

$\mu$  - masa molar del aire

En un cilindro con sustancias explosivas alrededor de su superficie, con una energía y planchas alojadas en su exterior y el modelo expuesto en la figura 2.2, se puede determinar el proceso de soldadura de las muestras cilíndricas con el siguiente procedimiento de cálculo por la fórmula de Gurney (1943).

$$G = \frac{R_o}{R_i} \quad (2.15)$$

$$\alpha = 1$$

$$A = \frac{V_{fo}}{V_{fi}} = \frac{\left( \frac{M}{C} + \alpha \left( \frac{M}{C} \right) (G-1) + \frac{G+2}{3(G+1)} \right)}{\left( \frac{N}{C} + \frac{2G+1}{3(G+1)} \right)} \quad (2.16)$$

$$\frac{V_m}{\sqrt{2E}} = \left[ A \left\{ \frac{\left( \frac{M}{C} + \frac{G+3}{6(G+1)} \right)}{A} + A \left( \frac{N}{C} + \frac{3G+1}{6(\beta+1)} \right) - \frac{1}{3} \right\} \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (2.17)$$

**Donde:**

$\sqrt{2E}$  - constante de Gurney para un explosivo dado.

$V$  o  $V_m$ - velocidad de la placa volante después de la detonación explosiva, m/s

En 1996, Hirsch describió la región de actuación, para las proporciones relativamente pequeñas de  $\frac{M}{C}$ , en que las ecuaciones de Gurney modifican la conducta física real.

El rango de valores para que las ecuaciones de Gurney generen los valores anómalos se describe para:

$$\frac{M}{C} \left[ \left( 4 \frac{N}{C} \right) + 1 \right] < \frac{1}{2}; \frac{M}{C} \approx 0,5; \frac{N}{C} \geq 1,0$$

## 2.5. Preparación metalográfica

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 del metal. Las operaciones se resumen en el siguiente orden, según la norma NC 10 - 56:86 y ASTM E 3 - 95.

1. Selección de la muestra.
2. Montaje y preparación de la muestra.
3. Ataque de la muestra.
4. Análisis microscópico.
5. Obtención de microfotografías.

### 2.5.1. Cálculo de la velocidad de corte

Se define como velocidad de corte la velocidad lineal de la periferia de una herramienta acoplada a una máquina herramienta o la velocidad lineal del diámetro mayor que esté en contacto con la herramienta en la pieza que se esté mecanizando en una máquina herramienta. Su elección viene determinada por el material de la herramienta, el tipo de material a mecanizar y las características de la máquina. Una alta velocidad de corte permite realizar el mecanizado en menos tiempo, pero acelera el desgaste de la herramienta.

La velocidad de corte se expresa en m/min. La velocidad adecuada de corte depende de varios factores y en ningún caso se debe superar la que aconsejan los fabricantes de



las herramientas. La frecuencia de rotación en el fresado seleccionada fue de 250 mm/rev y el avance del husillo fue de 125 mm/rev Casillas (1987).

**El fresado se realizó en la fresadora 6 M 12 L**

$$V_c = \frac{\pi \cdot D_f \cdot n}{1000} \tag{2.18}$$

**Donde:**

$V_c$  - velocidad de corte; m/min

$D_f$  - diámetro de la fresa; mm

$n$  - número de revolución; rev/min

1 000 - factor de conversión de metro a milímetro.

Los parámetros de la fresa son los siguientes:

Diámetro de la fresa.	.	.	.	.	.	.	.	$D_f = 60 \text{ mm}$
Número de dientes.	.	.	.	.	.	.	.	$Z = 40 \text{ mm}$
Sigma de rotura del acero..	.	.	.	.	.	.	.	$\sigma_r = 550 \text{ MPa}$
Durabilidad de la fresa.	.	.	.	.	.	.	.	$T = 180 \text{ min}$
Ancho de la fresa.	.	.	.	.	.	.	.	$B = 3 \text{ mm}$
Avance longitudinal.	.	.	.	.	.	.	.	$S_m = 125 \text{ mm / rev}$

**2.5.2. Potencia de corte efectiva en el fresado**

Es la potencia necesaria para realizar la operación en la máquina seleccionada, la potencia de corte no debe superar la potencia del husillo de la máquina.

$$P_z = P \cdot F \qquad F = a \cdot b \tag{2.19}$$

**Donde:**

$$a = 0,9 \cdot S_z$$

$b$  - ancho de fresado

$P$  - presión específica

Para los aceros  $P = 40 - 55 \text{ kgf/cm}^2$

$F$  - área de la sección transversal del corte.

La potencia de corte efectiva en el fresado se calcula como:

$$NC = \frac{Pz \cdot Vcr}{6120} \quad (2.20)$$

La potencia del husillo, como potencia necesaria que se necesita para poner en movimiento la máquina, se calcula entonces como:

$$Nh = Nmot \cdot \eta \quad (2.21)$$

En el proceso de torneado, realizado en el torno 16 K 20, los parámetros de los regímenes de corte que se tuvo en cuenta fue una frecuencia de rotación de 250 rev/min y el avance de 0,2 mm/rev Casillas (1987).

$$Vc = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \quad (2.22)$$

**Donde:**

$D$  - diámetro de la pieza; mm

### 2.5.3. Tiempo de maquinado

Es el tiempo invertido por el operario en la ejecución del trabajo, también conocido por tiempo básico o tiempo total de maquinado.

$$Tm = \frac{L}{n \cdot s} \cdot i \quad (2.23)$$

**Donde:**

$Tm$  - tiempo de maquinado; min.

$L$  - longitud a maquinar; mm.

$i$  - números de pasadas.

$n$  - números de revoluciones; rev/min.

$s$  - avance; mm/rev

### 2.5.4. Corte y desbaste de las muestras

Las muestras fueron cortadas en consideración a su forma geométrica en la máquina designada, la rectangular en la fresadora y la cilíndrica en el torno, las dimensiones de la muestra rectangular son de 25 x 12 mm y de 12 x 15 mm la cilíndrica. El desbaste se realizó en una debastadora de cinta rotativa sobre papeles abrasivos de diferentes grados de las series: 150, 220, 280, 320, 400, 500 y 600, colocados sobre discos giratorios. Se giró al pasar de un abrasivo a otro para ir borrando por completo las

huellas del abrasivo anterior, luego se lavaron las probetas con agua abundante. Las características de la máquina son las siguientes:

Voltaje:	250 V
Corriente	2,5 Amp
Número de revoluciones	300 – 1 000 rev/min
Potencia del motor	3,7 kW

En la figura 2.3 se puede observar las dimensiones de las mismas.



Figura 2.3. Corte de las muestras.

Durante el trabajo se refrigeró constantemente la pieza para evitar el calentamiento por efecto de la fricción. En la misma máquina se prepararon las superficies que se sometieron a proceso de unión por explosivos.

### 2.5.5. Pulido y ataque de las muestras

En el pulido se empleó lija No 600 y 800, se realizó para eliminar las rayas finas producidas en la última operación de desbaste hasta que se consiguió una superficie sin rayas y con pulimento espejo. Se pulió con el apoyo de la cara desbastada de la probeta sobre un paño embebido con una suspensión acuosa de óxido de cromo el cual se aplicó sobre el disco de la pulidora, el paño utilizado fue de fieltro, luego del pulido se lavaron las probetas con alcohol y secada finalmente con aire seco y caliente.

En el ataque se emplearon como reactivos químicos el Nital al 2 % y una parte de ácido nítrico y tres partes de ácido fluorhídrico en un tiempo de 15 segundos, para los aceros al carbono, en el acero inoxidable se empleó el reactivo químico beraha, se tomaron las

probeta con la pinza y se sumergieron con la cara pulida hacia abajo en el reactivo contenido en el cristizador. Se extrajeron, se lavó con alcohol y se secó con aire seco y caliente.

### **2.5.6. Observación microscópica y comportamiento microestructural**

Para la observación de las probetas se empleó un microscopio óptico binocular marca NOVEL modelo NIM - 100 (figura 2.4) ubicado en el laboratorio de Ciencia de los Materiales del ISMM de Moa, está dotado de una cámara instalada mediante el hardware IMI.VIDEOCAPTURE.exe que refleja la fotografía en el computador. Para colocar las probetas en el microscopio se montaron en un dispositivo con plastilina que permitió la nivelación adecuada de estas.



Figura 2.4. Microscopio óptico NOVEL modelo NIM - 100.

El análisis microestructural consistió en la observación de una muestra patrón de cada una de las aleaciones objeto de estudio. Se seleccionó la zona del metal base lo más alejado de donde pudiera tener influencia el ciclo térmico de soldadura, el objetivo de este análisis fue obtener una muestra sin afectación en su estructura cristalina que nos permitiera determinar posibles cambios ocurridos tanto en la ZF como en la influencia térmica. Las figuras 2.5, 2.6, 2.7 y 2.8 muestran las estructuras metalográficas de las diferentes probetas seleccionadas.

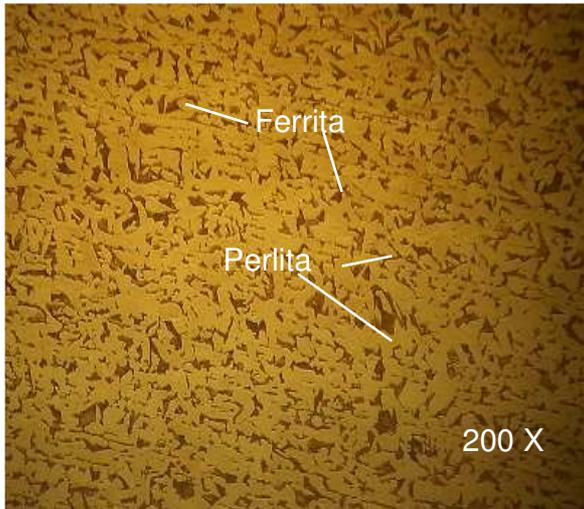


Figura 2.5. Microestructura del acero 1010

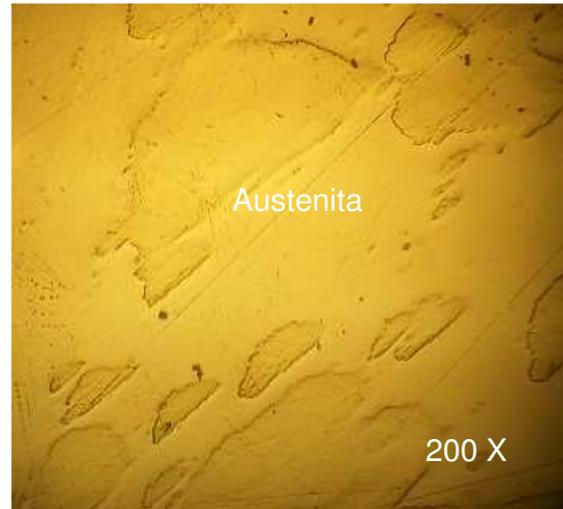


Figura 2.6. Microestructura del AISI 316

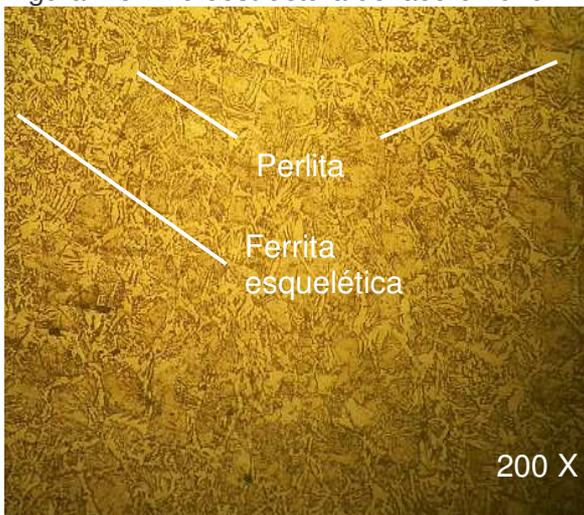


Figura 2.7. Microestructura acero AISI 1045



Figura 2.8. Microestructura acero AISI 1050

La figura 2.5 se corresponde con el acero AISI 1010, la cual al microscopio puede observarse gran proporción de austenita (blanco) y una pequeña cantidad de perlita (negro), la microestructura de la figura 2.6, pertenece al acero AISI 316, la misma está compuesta por una estructura completamente austenítica, la figura 2.7 se corresponde con el acero AISI 1045 está compuesta por estructuras de ferrita esquelética y ferrita acicular, en estado de entrega y la figura 2.8 es del acero AISI 1050, luego de haber sometido a un tratamiento térmico.

### 2.5.7. Ensayo de dureza aplicado a las muestras

El ensayo de dureza se aplicó para determinar la dureza de volúmenes microscópicamente pequeños en la aleación. En el ensayo se utilizó un microscopio

modelo PMT - 3 No 168, del laboratorio de microscopía de minas 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 igualmente que la dureza Vickers.

Para determinar la microdureza (HVN) de las probetas de análisis se realizó para una carga de 20 g, donde se midió los diámetros de la huella de la punta de diamante penetrada en un tiempo de 15 segundos, las medidas se tomaron para diferentes puntos de pruebas, seleccionados aleatoriamente en la superficie.

Para calcular la microdureza (VHN) se utilizará la fórmula:

$$VHN = 1,854 \cdot \frac{P}{d^2} \left[ \frac{kgf}{cm^2} \right] \quad (2.24)$$

**Donde:**

VHN - número de dureza Vickers, MPa

1,854 - constante

P - peso; kg

$$\text{Diámetro medio} = \bar{d} \text{ (mm)} \quad \bar{d} = \frac{(d_1 + d_2) + (d_3 - d_4)}{2} \quad (2.25)$$

$$\text{Microdureza promedio: } \overline{VHN} = \frac{\sum VHN_1 + VHN_2}{2} \left[ \frac{kg}{mm^2} \right] \quad (2.26)$$

## 2.6. Método de los elementos finitos (MEF)

Un análisis de la soldadura mediante MEF, requiere que el proceso se analice de forma no lineal, ya que el mismo depende del tiempo y de la variación de las propiedades del material con respecto a la temperatura. El carácter transitorio, requiere tener en cuenta curvas de tiempo que puedan caracterizar la traslación del foco de calor, a partir de los parámetros de soldadura y tipo de proceso empleado.

Para el modelado de cualquier problema debe definirse primeramente los parámetros geométricos. Un diseño geométrico correcto implica un adecuado modelo físico, ya que desde aquí se parte para elegir la forma de los elementos, las densidades de mallas y a su vez introducir en el caso específico de la modelación de la soldadura, la carga

térmica asociada a las curvas de tiempo, aspecto esencial para lograr la traslación del foco térmico según sea la velocidad de soldadura.

El proceso de simulación se realizó con la ayuda del software Solidword, el cual se encarga de analizar y comprobar los materiales utilizados en los especímenes de pruebas.

### 2.6.1. Mallado del modelo

La resolución de cualquier problema, ya sea mecánico o de cualquier otro tipo, mediante el método de los elementos finitos requiere definir previamente el mallado de elementos (i.e. discretizar el problema). El modelado mediante elementos finitos (FEM) involucra, además, la elección del tipo de elementos (i.e. las funciones de forma), del modelo constitutivo correspondiente a cada elemento y del tipo de algoritmo numérico (*solver*) que se utilizará para resolver el sistema de ecuaciones. En la figura 2.9 se muestra el mallado de la soldadura disímil acero AISI 1045 y del acero AISI 1050.

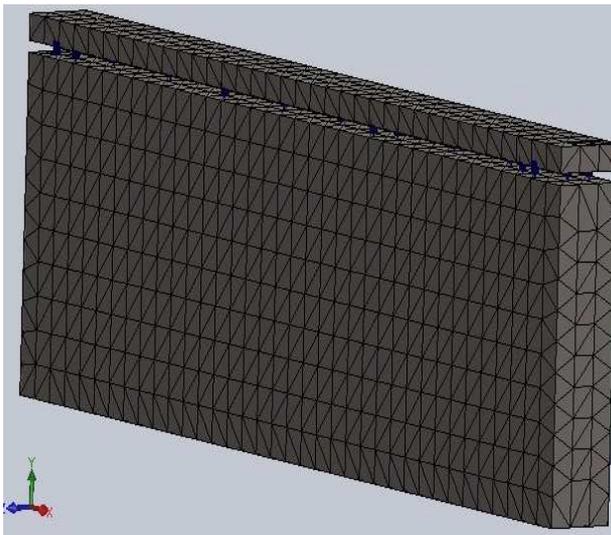


Figura 2.9. Mallado de la soldadura disímil AISI 1045 y del acero AISI 1050.

Para la configuración geométrica cilíndrica se realizó también el proceso de mallado para la unión del acero AISI 316 y el acero AISI 1010, como se muestra en la figura 2.9, donde se ha considerado que el elemento no está restringido al estudio de problemas elásticos lineales, sino con el propósito de abordar la no linealidad de forma geométrica debido al comportamiento del material luego de ser sometido a carga por explosivos.

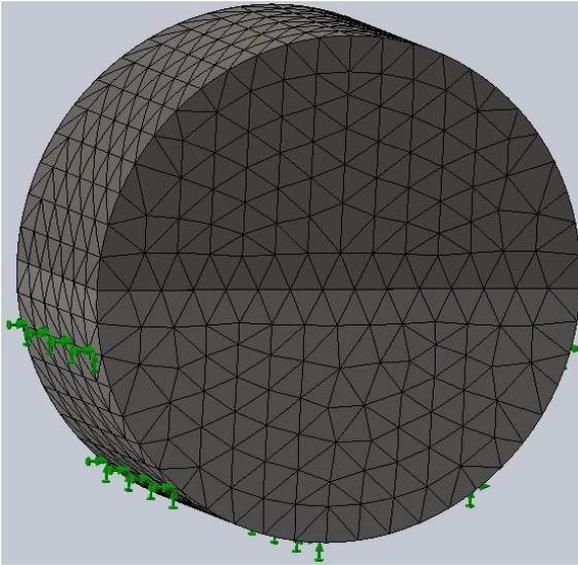


Figura 2.9. Mallado de la soldadura disímil del acero AISI 316 y el acero AISI 1010.

La elección del mallado y de la geometría de los elementos dependió de los factores: geometría del problema, minimización de errores, parámetros que se desean conocer. En ambas figuras se observa, los nodos se encuentran en la frontera entre dos o más elementos contiguos y en el contorno del sólido. Se han definido las condiciones de contorno como parte fundamental de la definición del problema numérico.

## 2.7. Conclusiones del capítulo 2

- ✚ Se caracterizaron los parámetros en el proceso de soldadura por explosión y se determinó que el proceso puede estar 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, lo cual permite lograr una unión satisfactoria.
- ✚ Quedó establecido el comportamiento microestructural de las aleaciones a soldar, a través de las cuales se podrá predecir el comportamiento de la unión soldada disímil en la zona fundida y la zona de influencia térmica.
- ✚ Se seleccionó el explosivo industrial el TECTRON 100, emulsión encartuchada en mangas de polietileno de diferentes diámetros, única sustancia explosiva que se comercializa en la actualidad en Cuba.

**CAPÍTULO 3**

**RESULTADOS EXPERIMENTALES Y SU**

**DISCUSIÓN**

## CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

### 3.1. Introducción

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 acero AISI 316 y el acero AISI 1010 y del acero AISI 1010 con el acero AISI 1050, así como el análisis de las microestructuras obtenidas y del proceso de simulación por el MEF.

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

El análisis químico de los materiales, como se observa en la tabla 3.1, 3.2 y 3.3 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 Mecánica del Níquel "Comandante Gustavo Machín Hoed de Beche", Moa.

Tabla 3.1. Composición química real del acero AISI 1010, en %

Material	C	Mn	P	S	Fe
AISI 1010	0,08	0,35	0,040	0,050	Resto

Tabla 3.2. Composición química nominal del acero AISI 1045, en %

Material	C	Mn	Cu	Cr	Si	Ni	Mo	Fe
AISI 1045	0,45	0,90	0,16	0,40	0,25	0,40	0,10	96,70

Tabla 3.3. Composición química nominal del acero AISI 1050, en %

Material	C	Mn	Cu	Cr	Si	Ni	Mo	Fe
AISI 1050	0,52	0,90	0,16	0,40	0,25	0,40	0,10	96,75

La composición química del acero AISI 316 empleado, como se observa en la tabla 3.4, se realizó empleando un espectrómetro de masa PMI MASTER PRO con electrodo de base tungsteno bajo arco sumergido en atmósfera de argón en el laboratorio de corrosión de la empresa "Comandante Pedro Sotto Alba".

Tabla 3.4. Composición química real del acero AISI 316, en %

Material	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
AISI 316	0,08	1,00	2,00	0,045	0,030	18	12	2

Al comparar la composición química real obtenidas en las tablas anteriores con las especificaciones estándar de las aleaciones planteadas en el epígrafe 2.2 del capítulo 2, podemos afirmar que los resultados obtenidos en los diferentes ensayos se corresponden de forma general en un 100 % con los de las normas, por lo que estamos en presencia de los aceros objetos de estudios.

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

El proceso de unión de materiales diferentes 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 es recomendable.

Para determinar la velocidad de colisión y la velocidad de la plancha volante por la ecuación 2.1 se consideró una velocidad de detonación de 2 500 m/s, un radio de la carga calculado por la ecuación 2.5 con un valor de 0,345 kg, por lo que tenemos que la velocidad de colisión es 1 068 m/s.

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 Caraballo (2004).

La magnitud de la longitud de onda como la altura de la onda del dibujo ondulado formado en el interfaz de la unión después del recubrimiento explosivo incrementa proporcionalmente a la velocidad de colisión y el ángulo de colisión entre el material de recubrimiento y el material de base y la forma de la ondulación, es decir, la proporción de la altura de la onda con respecto a la longitud de onda es determinada por la proporción relativa de densidad entre el material de recubrimiento y el material de base.



En el caso en el que la densidad del material de recubrimiento y el material de base son aproximadamente iguales, en cuanto al metal de recubrimiento, en que la porción de densidad de ambos es aproximadamente igual, como en nuestro caso que se tiene el acero AISI 1010, el AISI 316 y la unión con el AISI 1045 con el AISI 1050 (tratado térmicamente), la ondulación constituida en la interfase de la unión muestra una forma similar a la de una ondulación sinodal.

La energía cinética para poner en movimiento ambas planchas y lograr la colisión entre ellas fue calculada por la ecuación 2.2, en este caso la masa de la placa volante es de 9,42 kg y una velocidad de 500 m/s calculado por la ecuación 2.3, permite establecer que la energía cinética para lograr la unión de los materiales es de 15 750 J.

El resultado de 15 750 J, establece la dinámica de vuelo para la energía cinética eficaz mínima de fragmentación, necesario para la realización del conjunto soldado con diferentes masas, debido a la influencia de ley arrastre del fragmento y a la zona del contacto de las planchas, lo que ha sido reportado por Gold (2007).

El cálculo de la energía cinética a partir de la ecuación 2.2 está basada en las consideraciones de Gurney (1943) que considera que: toda la energía de los gases es liberada instantáneamente y uniformemente dentro de las planchas y esta energía sólo considera la energía cinética de los productos explosivos y el cuerpo sólido parte a ser propulsado durante la expansión de los gases en el proceso de unión.

El volumen del explosivo necesario para realizar la unión fue calculado por la ecuación 2.4 para un largo de la plancha de 20 cm, un ancho de 20 cm y un espesor del explosivo de 1,5 cm, el volumen obtenido fue de 600 cm<sup>3</sup>. Este volumen es suficiente para unir el AISI 1010 – 316 y el 1045 - 1050.

Las cargas explosivas planas tienen un comportamiento diferente al de las cargas explosivas cilíndricas, en particular en lo que respecta a la velocidad de detonación.

Para un volumen de explosivo de 600 cm<sup>3</sup> y una densidad de 1,15 g/cm<sup>3</sup>, por la ecuación 2.6 se calculó la masa del explosivo la cual es de 690 g. El volumen del

explosivo calculado, permitirá el proceso de soldadura por presión, que provoca 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.

Para la desviación del explosivo donde se tuvo en cuenta la ecuación 2.7, se tomó para nuestro trabajo el valor de 0,8, de igual manera se consideró el ángulo de colisión  $\beta$  con un valor de 7 considerando la ecuación 2.8 parámetros también considerados por Almira (2015).

La velocidad de la partícula ( $U_p$ ) se calculó por la ecuación 2.9 donde se tuvo en cuenta una velocidad de detonación de 2 500 m/s, la cual fue dividida por cuatro y se obtuvo un valor de 625 m/s.

La presión y la velocidad involucradas en el proceso, son dictadas por las propiedades y características de los polvos a ser compactados, ya que durante la compactación dinámica, la onda de choque induce altas presiones que permiten la unión entre partículas y formación de compacto con altas densidades, sin inducir difusión de largo alcance o transformación de fase alguna. El efecto de frotación cortante, que se supone tiene lugar durante la compactación dinámica, produce una fuerte unión entre las partículas lo que ha sido reportado por Kulawiak (2004) y Karosich (2006).

La presión de detonación considerada para la unión de los materiales disímiles donde se tuvo en cuenta la velocidad de detonación de 2 500 m/s y la densidad de los materiales más tenaz, en este caso para el acero AISI 1010 y el acero AISI 1045, que es de  $7,85 \text{ kg/dm}^3$ , fue calculada por la ecuación 2.10 donde la misma es de 2 911 MPa.

La velocidad de la detonación es dependiente del espesor de capa explosiva. La presión de detonación de los explosivos comerciales alcanza valores entre 2 y 10 GPa. Estos valores proporcionan un criterio muy importante cuando se precisan unir materiales con dureza (AISI 1050 tratado térmicamente) y compactos y complementan la información que brinda la curva de potencia. La presión de detonación es una propiedad que refleja bien el poder rompedor o brisancia de los explosivos criterio que ha sido expuesto por Verstraete *et al.* (2011).



La velocidad o dinámica de propagación de la onda sonora fue calculada por la ecuación 2.11, pero se determinó el volumen adiabático del explosivo por la ecuación 2.12, para  $E = 210\,000\text{ MPa}$ ,  $\nu = 0,21$  se tiene que  $k_v = 120\,689\text{ Pa}$ , al sustituir en la ecuación 2.11 entonces la velocidad del sonido de la placa volante es de  $3\,875\text{ m/s}$ .

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).

Por las ecuaciones 2.13 y 2.14 se determinaron la velocidad de colisión y la temperatura de separación de las placas ( $T$ ), para la variable temperatura se consideró una velocidad de  $2\,500\text{ m/s}$ , la masa molar del aire que es de  $0,029\text{ J/mol}$  y la constante universal de los gases que es de  $8,31\text{ J/mol}\cdot\text{K}$ , al sustituir los valores se obtiene que la temperatura necesaria para la unión de la placa volante es de  $7\,270\text{ K}$ . La velocidad de colisión por la ecuación 2.11 es de  $4\,320\text{ m/s}$

La velocidad determinada de  $4\,320\text{ m/s}$  se considera como una condición para la formación del chorro de reacción en el punto de la colisión, esencial para la soldadura. Es la velocidad necesaria para realizar el barrido de las capas del óxido delante de la superficie de los metales y garantizar la limpieza de las caras y formar la unión metalúrgica entre los átomos de los materiales a una distancia interatómica y formar las olas de presión producidas por el explosivo.

Para considerar la geometría que involucra los radios internos y exteriores de la carga del explosivo,  $R_i$  y  $R_o$  se consideró la ecuación 2.15 donde se obtuvo que la misma sea de 2. Luego este valor se sustituye en la ecuación 2.16, donde además se tiene en cuenta para una configuración paralela asimétrica, la relación  $\frac{M}{C} = 0,5$ ;

$\frac{N}{C} = 1$ , el ángulo  $\alpha = 1$ ; al sustituir los valores el resultado de  $A$  es igual a 0,9. En sustitución de los valores se tiene que la relación del explosivo seleccionado con densidad de 1,15 tiene relación con el calculado que es de 1,12.

Las asunciones usuales por derivar la fórmula de Gurney, donde se considera la densidad uniforme y la distribución de la velocidad lineal del producto explosivo, demuestra que puede ser mutuamente incoherente para uniones cilíndricas y configuraciones paralelas al considerar la distribución del explosivo que rodean los centros rígidos. La ecuación de Gurney ha permitido realizar el análisis de velocidad de fragmentación, así como la geometría de los radios tanto interno como externo, que coincide además con lo reportado por Zecevic *et al.* (2006) y Zecevic *et al.* (2010).

#### **3.4. Análisis del proceso de maquinado de las probetas**

Como el mecanizado es el proceso que consiste en la fabricación de piezas de gran precisión y el método se basa en el arranque de material de un bloque inicial de materia prima, mediante una herramienta, hasta la obtención de la geometría de la pieza final para la fabricación de las muestras se consideró la ecuación 2.18, el diámetro de la fresa empleado fue de 60 mm y el número de revoluciones fue de 250 mm/rev, por lo que la velocidad de corte será de 47,1 m/min.

La velocidad de corte calculada está entre los parámetros establecidos para el maquinado de las aleaciones objeto de estudio, la influencia de la velocidad de corte durante el maquinado con una determinada herramienta, donde se trabaja el mismo material y sin modificar el avance y la profundidad de pasada, han demostrado que para bajas velocidades de corte el rendimiento es pequeño, si se aumenta la velocidad, aumenta el rendimiento. A partir de una velocidad de corte más elevada, el rendimiento de la herramienta disminuye notablemente, por el aumento de temperatura, que reblandece el filo lo que ha sido expuesto además por Casillas (1987) y Almira (2015).

Por la ecuación 2.19 se calculó la potencia de corte necesaria para realizar el corte, se determinó  $P_z$  donde se tuvo en cuenta el valor de  $a$  que fue de 0,18 mm,

un ancho de fresado de 3 mm, una presión específica de 400 MPa, luego el valor de  $P_z$  que fue de 0,21 kg se empleó para determinar la potencia de corte efectiva con una velocidad de corte de 47,1 m/min calculado por la ecuación de 2.18, se sustituyeron estos valores en la ecuación 2.20 y la potencia de corte necesaria para realizar el corte es de 0,0017 kW.

Por la ecuación 2.21 se determinó la potencia necesaria para poner en movimiento la máquina, donde se determinó que para una potencia del motor  $N_m = 10$  kW y un rendimiento de la fresadora  $\eta = 0,8$ , el resultado es de 8 kW, es posible realizar el proceso de maquinado.

El tiempo de maquinado consumido para realizar el proceso de corte se determinó por la ecuación 2.23, para una longitud de fresado de 200 mm, un número de revoluciones de 250 rev/min y un avance de 125 mm/min, el tiempo es de 0,0064 minutos.

Los elementos fundamentales de los elementos de fresado calculados como: la profundidad y ancho del fresado, el avance, la fuerza de corte, potencia consumida y tiempo de maquinado, permitieron determinar que es posible realizar el corte de las muestras con este proceso de arranque de virutas.

El proceso de torneado se calculó por la ecuación 2.23 para un diámetro a cortar de 12 mm, una frecuencia de rotación de 250 mm/rev, se tiene que la velocidad de corte es de 9,42 m/s.

Su elección viene determinada por el material de la herramienta, el tipo de material de la pieza y las características de la máquina. Una velocidad alta de corte permite realizar el mecanizado en menos tiempo pero acelera el desgaste de la herramienta. Los fenómenos de contacto entre el material de la viruta y la herramienta dependen de numerosas variables locales como la presión, la temperatura o el valor de fricción implementado, donde para una velocidad de corte de 9,42 m/s se considera como un factor que no provoca un desgaste acelerado en la herramienta, aspecto este que ha sido reportado por Molinari y Moufki (2008) y Rech et al. (2009).

Con el aumento de la velocidad de corte, las fuerzas que actúan sobre el contacto deslizando, tienen cada vez menos importancia en los resultados globales, comparándolos con las aportaciones de las fuerzas que actúan en la zona de contacto

### 3.5. Análisis microestructural de la aleaciones AISI 316 - AISI 1010

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 en la figura 3.1a, 3.2b, 3.3c y 3.3d muestran diferentes orientaciones cristalinas del grano, las que contribuyen a la activación de un conjunto de sistemas de deslizamiento y se convierten en un sistema activo que determina los niveles de deformación y tensiones locales del grano y consecuentemente con la deformación a nivel macroscópico.

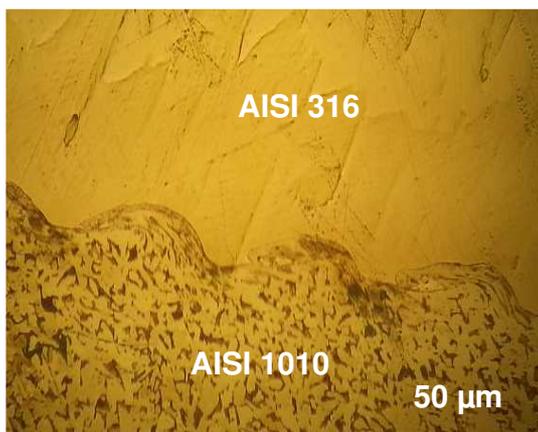


Figura 3.1a. Zona a 5 mm de la explosión.

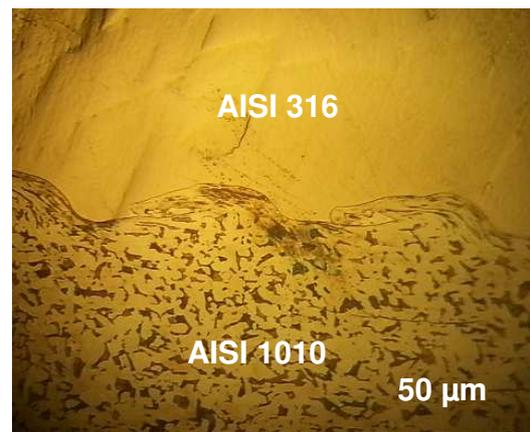


Figura 3.1b. Zona a 7 mm de la explosión.

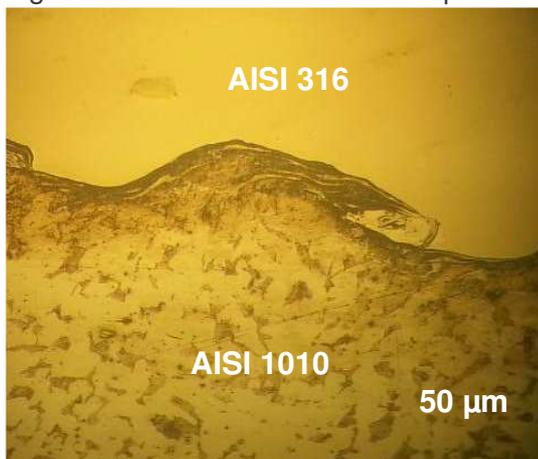


Figura 3.1c. Zona a 15 mm de la explosión.

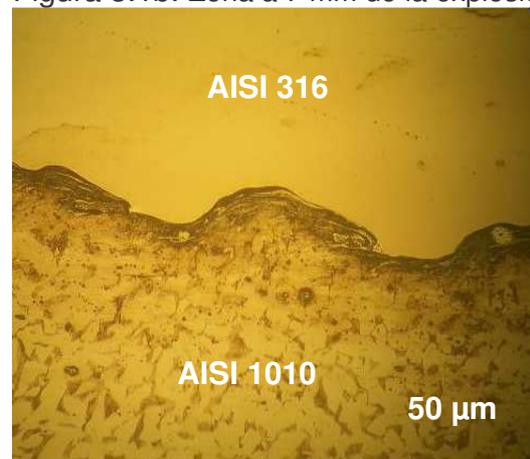


Figura 3.1d. Zona a 25 mm de la explosión.

Las figuras 3.1a, la 3.1b, la 3.1c y la 3.1d, se corresponden con la unión soldada disímil acero AISI 316 - AISI 1010, la parte superior que se corresponde con el acero AISI 316, está compuesta por una estructura austenítica y en la parte inferior que es la del acero AISI 1010 la morfología es de granos de ferrita equiaxiales, los cuales se reducen en la medida que se acercan a la zona de fusión del acero AISI 316.

Como se observa en las figuras, la interfase del cordón presenta una modificación de la microestructura en la línea de fusión con refinamiento de grano, mientras que en la ZAT existe un crecimiento de grano marcado, por los límites de grano y en el interior de los granos existen pequeños subgranos, en cuanto al cordón de soldadura presenta una morfología en forma de ola.

En la figura 3.1a que se corresponde con la estructura tomada a cinco milímetros de distancia de realizada la explosión, se observa que las olas tiene un comportamiento ondulado no profundo, lo cual puede estar asociado a la presión al inicio de la detonación.

En las figuras 3.1b, la 3.1c y la 3.1d, para las otras distancias consideradas, la formación de las olas es en forma de cresta, con mayor deformación de la estructura, lo que demuestra que en la medida que el chorro de reacción interactúa entre los dos materiales, se logra un compactamiento metalúrgico más sólido. En la interfase de todas las uniones existe la disminución del tamaño de los granos por la compactación dinámica cerca de la línea de fusión, mientras que en el centro del cordón de soldadura, la microestructura es equiaxial debido a la solidificación constitucional del cordón después de realizado el proceso de soldadura.

### **3.5.1. Análisis microestructural del AISI 1045 - acero AISI 1050**

Para realizar el análisis microestructural de esta dos aleaciones, se considera que ambos aceros son clasificados como de medio contenido de carbono, formados por una proporción de ferrita y perlita (41,2 % de ferrita y 58,8 % de perlita), el acero AISI 1045 para el proceso de explosión se encuentra en estado de

suministro, mientras que el acero AISI 1050 fue sometido a un proceso de tratamiento térmico.

Las figuras 3.2a, 3.2b y 3.2c se corresponden con la unión disímil de las aleaciones AISI 1045 – acero AISI 1050.

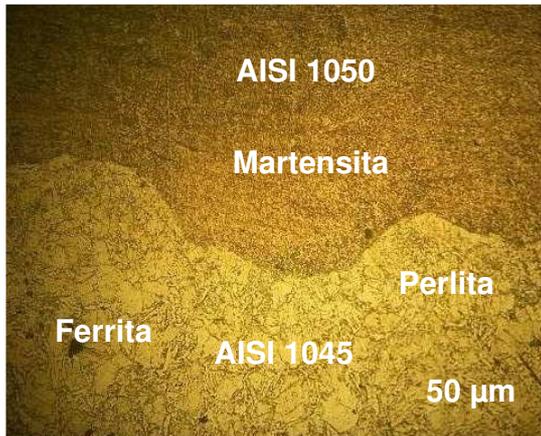


Figura 3.2a. Zona iniciación en la explosión.

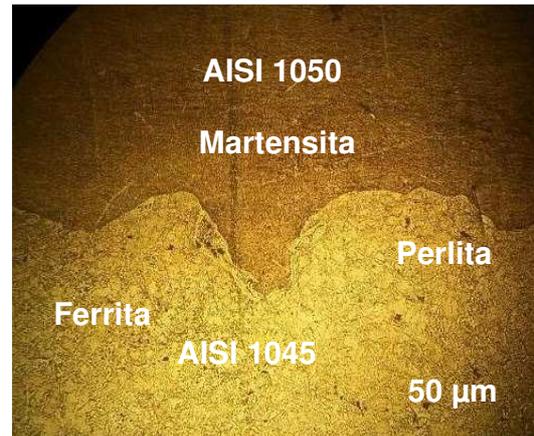


Figura 3.2b. Zona a 15 mm de distancia de la explosión.



Figura 3.2c. Zona a 25 mm de distancia de la explosión.

En las microestructuras obtenidas, se puede observar el comportamiento descrito por la ola obtenida en la zona de fusión del material, donde el material de menor dureza, el acero AISI 1045, se introduce por efecto de la difusión en el acero AISI 1050, ya que este es más dúctil y tenaz, que el primero, permitiendo que por los átomos del mismo se difunda las estructuras de los átomos del material de mayor dureza.

Se aprecia en la zona de soldadura que el acero AISI 1050 con una estructura de martensita (constituyente más duro de los aceros) y una dureza de 450 HV, ofrece

resistencia a ser penetrado por el acero AISI 1045 (180 HV), no obstante para una presión de detonación de 2 500 m/s, los átomos de este último se difunden por los átomos del primero lográndose la unión metalúrgica entre ambas aleaciones.

En las figura 3.2a, 3.2b y 3.2c se ha obtenido una distribución homogénea de los granos de ambas aleaciones en un sentido preferente, lo cual está asociado a la presión de detonación y la onda expansiva del explosivo al ejercer una presión de 2 911 MPa sobre la placa volante.

Por la propiedad mecánica que presenta el acero AISI 1060, no se garantiza una formación de olas con características continua y no se logre un ensanchamiento en las bandas de ambas interfase del cordón, pero si se pone de manifiesto el fenómeno de la acritud.

### 3.5.2. Análisis de la dureza

Para la evaluación de la dureza se realizó tres mediciones de dureza como mínimo en cada una de la zona de soldadura de las aleaciones, las que luego fueron promediadas, para ello se empleó las ecuaciones 2.24, 2.25 y 2.26 las cuales consideran las diagonales medidas de cada ensayo de indentación. En la figura 3.3 se muestran los resultados obtenidos.

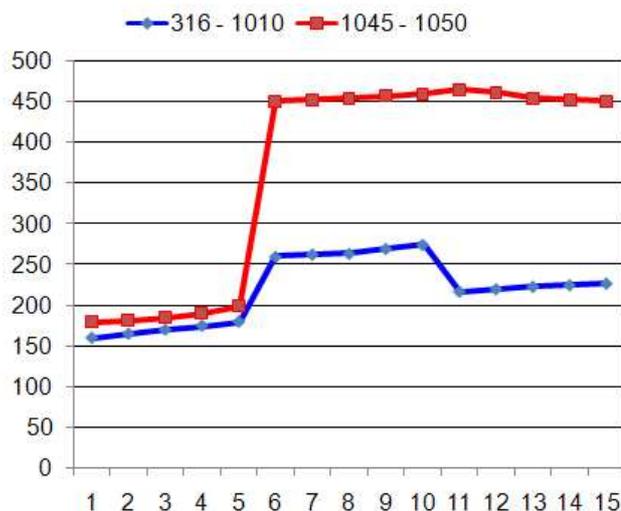


Figura 3.3. Resultados del análisis de la dureza

Al realizar el análisis de la dureza para la unión entre el acero AISI 316 y el AISI 1010, desde una dureza inicial de 217 HV para el primero y una dureza de 160 HV



para el segundo, luego del proceso de soldadura, el incremento ha sido de 50 HV en la interfase del cordón, esta variación de dureza está asociada a dos condiciones, la primera es que el AISI 316 es un acero austenítico de la serie 300, el cual no endurece por tratamiento térmico, en segundo lugar, el acero AISI 1010, es considerado como un acero de bajo contenido de carbono, donde para lograr dureza en él tiene que ser sometido a tratamiento térmico de cementación, carburación o nitruración, por lo que el incremento obtenido está asociado al fenómeno de la acritud.

En la unión disímil del acero AISI 1045 y el AISI 1050 se ha elevado la dureza inicial desde 180 HV hasta 200 HV para el acero AISI 1045, ya que a diferencia de las aleaciones analizadas anteriormente, el contenido de carbono es el elemento fundamental que garantiza templabilidad como lo fue demostrado en el acero AISI 1050 al ser sometido a tratamiento térmico, sin embargo para el AISI 1050 existe un descenso en la dureza desde 480 HV hasta 465 HV ya que el efecto de la explosión ha actuado como un tratamiento de alivio de tensiones.

El acero AISI 1045 al ser sometido a carga de impacto por explosivo provoca la disminución de la estructura intercrystalina y su disminución de los granos, al disminuir el tamaño aumenta el número de fronteras de grano en una misma área, esto provoca una elevación de las tensiones a nivel cristalino. El otro es que en los metales y aleaciones policristalinas, los bordes de los cristales constituyen un obstáculo ante el que se acumulan las dislocaciones, reportado por Callister (1999), Alcántara *et al.* (2011) y Fernández *et al.* (2012).

El apilamiento o aplastamiento de los granos es resultado de una integración causada por el deslizamiento intracrystalino, por la migración de dislocaciones, acompañada de endurecimiento por deformación, lo que consolida progresivamente el cristal. Por otra parte el estado de tensiones en el grano, presumiblemente activan otros sistemas de deslizamiento, los que interactúan con él o los sistemas ya existentes, este mecanismo dificulta aún más la movilidad de los átomos y origina el fenómeno conocido como endurecimiento latente, lo que fue expuesto por Fernández *et al.* (2008a; 2009b y 2010).

### 3.6. Análisis por el Método de los Elementos Finitos

Se realizó el análisis por el Método de los Elementos Finitos para las uniones metalúrgicas (AISI 316 - AISI 1010) configuración paralela asimétrica y el AISI 1045 - AISI 1050 tratado térmicamente. Las simulaciones numéricas identifican los factores como el nivel de tensión inducido en las placas y la dirección de la tensión en la zona de la colisión, independientemente de las características de los materiales, el chorro de reacción logra el proceso de soldadura. En la figura 3.4 se muestra el comportamiento de dichas tensiones y en la figura 3.5 el proceso de unión entre el acero AISI 316 y el acero AISI 1010.

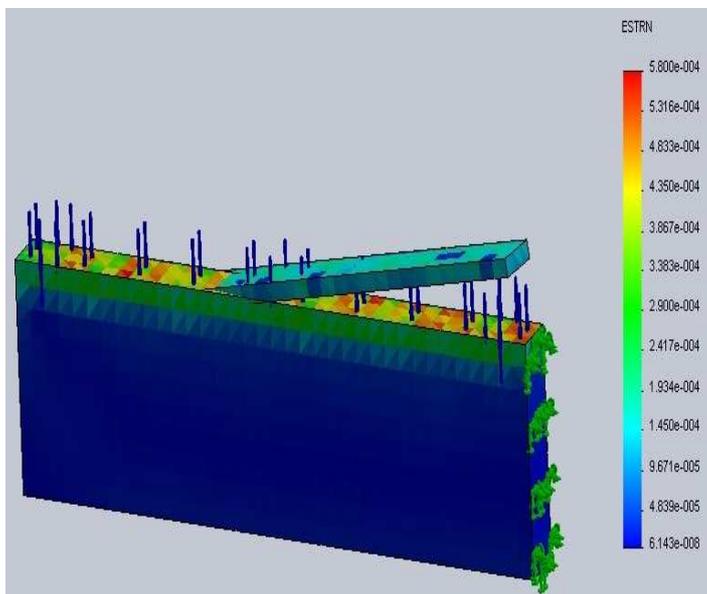


Figura 3.4. Tensiones en la interfase de la unión AISI 1045 - AISI 1010.

Al realizar el análisis de la tensión, la proporción mecánica se encuentra en el orden  $5\ 800 \times 10^{0,04}$ . El análisis muestra que son tensiones con valores de tensión que se corresponden con el comportamiento de la teoría hidrodinámica y asumiendo la fuerza de choque entre ambas aleaciones.

Las teorías hidrodinámicas dan un alto valor de presión y por eso una tensión-proporción muy alta. Según los resultados obtenidos en la simulación, los tamaños de las olas de la interfase producido con el tratamiento hidrodinámico se corresponden con los resultados obtenidos en la microestructura, que según

reporta Akbari *et al.* Las tensiones obtenidas representan un 30 % cuando se obtiene este comportamiento computacional.

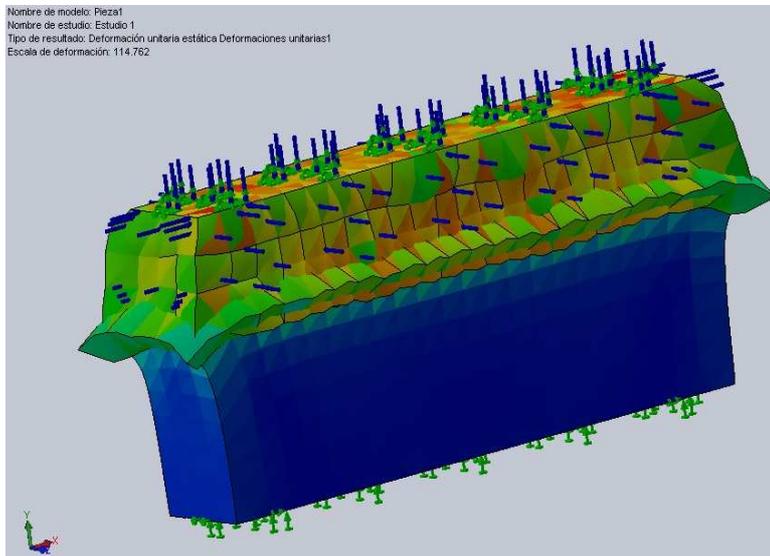


Figura 3.5. Perfiles de los ángulos dinámicos de la unión AISI 1045 - AISI 1050.

El ángulo dinámico es uno de los parámetros influyentes en la soldadura por explosivos. Los ángulos dinámicos predijeron en las simulaciones como se observa en la figura 3.5, que los ángulos entre el eje x de la placa volante y la placa fija para una geometría inclinada, las presiones del contacto y el perfil de presión de contacto se extienden más allá delante del punto de la colisión obteniéndose la unión entre ambas placas. El ángulo dinámico considerado para la geometría inclinada fue de  $7^\circ$ .

### 3.6.1. Análisis por el Método de los Elementos Finitos (muestra cilíndrica)

Las simulaciones para la configuración cilíndrica muestran mapas y perfiles de un el número de parámetros físicos, como la presión de contacto, tensión de la placa volante, la tensión normal, la tensión plástica, la tensión eficaz, la proporción de tensión, la energía interior cinética, la energía, temperatura y velocidad de la placa volante. En la figura 3.6 se muestra el comportamiento de los resultados obtenidos.

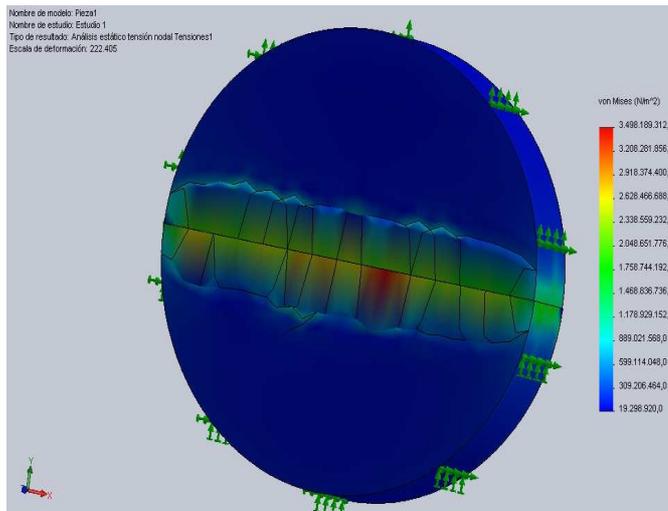


Figura 3.6. Tensiones en la interfase de la unión AISI 316 - AISI 1010.

La figura 3.6 se corresponde con las tensiones de contacto obtenidas en la interfase entre la unión del acero AISI 316 - AISI 1010, se observa que la presión más alta obtenida en el punto de colisión es de 3 498 189 MPa, lo cual puede estar asociada a la dureza inicial de ambos materiales y que a su vez, el choque producido en las placas con este tipo de configuración reduce la velocidad de deformación, ya que la presión no se propaga con intensidad delante del punto de colisión para producir la deformación de la superficie.

Los perfiles de los ángulos dinámicos para la unión del AISI 316 y el AISI 1010 se muestran en la figura 3.7.

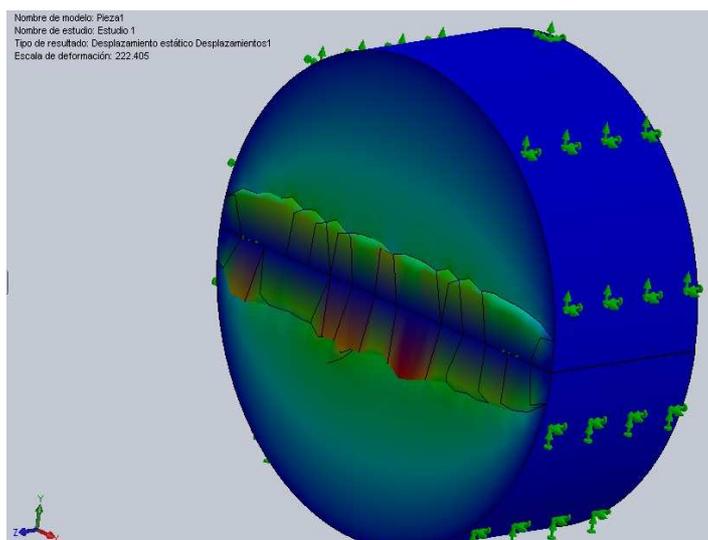


Figura 3.7. Perfiles de los ángulos dinámicos para la unión del AISI 1045 y el AISI 1050

En la figura 3.7 se observa que durante la colisión, por efecto de la velocidad y la presión de detonación, ambas son suficientes para exceder el límite elástico dinámico del material y asegurar la deformación de las superficies de las placas. Las distribuciones de presión alrededor del punto de contacto y la presión en la superficie dependen del ángulo de impacto y la magnitud de la presión y que la distribución de presión depende del ángulo entre la placa volante y la placa base.

Se obtiene en el modelo que la velocidad aumenta desde cero al punto más alto de la colisión. Las velocidades horizontales logran la fusión casi instantánea durante la explosión. La distribución de la velocidad se comporta de forma lineal y mantiene una densidad uniforme a todo lo largo la interfase de la unión. La energía cinética en el explosivo debe asociarse a su deformación volumétrica por aumento de la presión, mientras que en las paredes de las placas está relacionada con su deformación plástica.

Al analizar el comportamiento del análisis por el Método de los Elementos Finitos, se aprecia la existencia de una primera etapa correspondiente al inicio del chorro de reacción en el interior de las placas, donde la energía cinética del primero se transfiere a través de las mismas. La fusión y la penetración de un material en otro en el recibe el impacto se produce en el instante. En este instante, el trabajo realizado sobre el conjunto cesa y a partir de él, se produce una transferencia entre las componentes de energía de la estructura.

### **3.7. Valoración económica**

Para la estimación de los costos que se desean determinar se parte de la metodología del cálculo del costo de fabricación conocida como “Ficha para costos, precios y su componente en pesos convertibles” que en formato de hoja de cálculo se utiliza como norma empresarial en la empresa Mecánica del Níquel Comandante” Gustavo Machín Hoed de Beche” de Moa.

Una vez considerados los tiempos para la elaboración de las uniones por explosivos y teniendo en cuenta la incidencia de máquinas, operarios, energía eléctrica, el costo estimado de fabricación por concepto de explosión se muestran en la tabla 3.5.

Tabla 3.5. Costo por concepto de tiempo y consumo

<b>Elementos</b>	<b>CUP</b>	<b>CUC</b>
Materias prima y materiales	1,60	1,60
Materiales	0,71	0,71
Combustibles y lubricantes	0,01	0,01
Energía eléctrica	0,28	0,28
Agua	0,32	0,32
Útiles y herramientas	0,28	0,71
<b>Sub total gastos de elaboración</b>	<b>10,14</b>	<b>3,61</b>
<b>Otros gastos directos</b>	<b>1,37</b>	<b>0,17</b>
Depreciación	0,90	0,00
<b>Gastos de fuerza de trabajo</b>	<b>3,53</b>	<b>0,57</b>
Salarios	1,95	0,00
Vacaciones	0,18	0,00
Otros gastos de fuerza de trabajo	0,83	0,00
Estimulación	0,57	0,57
<b>Gastos indirectos de producción</b>	<b>3,42</b>	<b>2,40</b>
Depreciación	0,05	0,00
Materiales	0,67	1,21
Mantenimiento y reparación	2,70	1,19
<b>Gastos generales y de administración</b>	<b>0,78</b>	<b>0,19</b>
Depreciación	0,03	0,00
Materiales	0,02	0,05
Combustible y lubricantes	0,02	0,00
otros	0,70	0,13
Energía eléctrica	0,01	0,01
<b>Gastos bancarios</b>	1,04	0,28
Gastos Totales o Costo de Producción (1+2)	11,74	5,21
Margen utilidad S/ base autorizada 20 %	2,03	0,10
% sobre el gasto en divisas (hasta un 10 %)		0,16
Componente en pesos convertibles	8,39	5,37

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 8,39 CUP y 5,37 CUC; por lo que se puede considerar un costo relativamente pequeño al tener en cuenta 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.

### 3.8. Valoración en la dimensión ambiental

Las explosiones resultan de la descomposición de sustancias puras. Cualquier reacción química puede provocar una explosión si se emiten productos gaseosos,



si se evaporizan sustancias ajenas por el calor liberado en la reacción o si se eleva la temperatura de gases presentes, por la energía liberada.

La reacción química más conocida que produce gases a alta presión por medio de otros gases o vapores, en la combustión de gases en el aire. Sin embargo, otros gases oxidantes como el oxígeno, cloro, fluor, pueden ser sustituidos por algo, produciendo con frecuencia procesos de combustión muchos más intensos.

Los polvos y nebulizadores (líquidos en estado pulverizado) pueden generar, al quemarse en el aire o en otro medio gaseoso reactivo, gases a elevada presión. La combustión puede producirse con cualquier partícula, pero en la práctica de mayores riesgos se encuentran en las de 840 micras o menos. A medida que disminuye el tamaño más fácil se produce la dispersión y más estable y duradera resulta. Las partículas más finamente definida implica mayor riesgo al facilitar la formación de dispersiones, mantenerlas durante más tiempo y quemarse más rápidamente las partículas de mayor tamaño.

### **3.8.1. Reducción de la concentración de oxidantes**

Las explosiones se pueden evitar manteniendo la concentración de oxígeno u otros oxidantes en el local por debajo de la necesaria para que se produzca la combustión a la temperatura y presión del proceso. El método más común de reducir dicha concentración es el purgado o inertizado del espacio con un gas poco oxidante.

El riesgo de incendio y explosiones de muchos materiales se puede evitar durante su almacenaje y procesos su se utiliza un gas inerte adecuado. Esto se puede hacer porque la combustión de la mayoría de los materiales no se produce si hay poco oxígeno en la atmósfera o si su concentración se reduce por debajo de un límite dado.

Cuando se utiliza un gas inerte como medio de controlar los fuegos y explosiones, su principal función es evitar las mezclas explosivas de vapor y aire, generalmente en espacios cerrados. Algunos ejemplos son la inertización de los depósitos antes de repararlos o el vaciado de los depósitos donde ha habido líquidos inflamables mediante aire a presión.



### **3.9. Conclusiones del capítulo 3**

- ❖ Se han establecidos los parámetros que permiten caracterizar el comportamiento microestructural y la dureza de la unión disímil AISI 316 - AISI 1010 en configuración geométrica cilíndrica y la del AISI 1045 - AISI 1050 en configuración geométrica paralela luego de ser unidas por el proceso de soldadura por explosivos.
- ❖ Se determinó a través del empleo del Método de los Elementos Finitos, que los resultados obtenidos a través de la simulación se corresponden con el comportamiento microestructural de las aleaciones AISI 316 - AISI 1010 y la del AISI 1045 - AISI 1050 luego de realizado el proceso de soldadura por explosivos.
- ❖ La interrelación entre la velocidad de colisión y la presión de detonación establecida durante el proceso de soldadura por explosivos, provocan tensiones de compresión y tracción, así como variaciones en la macro y microdeformación por efecto de la deformación reticular.



### Conclusiones generales

- La distribución de tensiones en las secciones de las interfases de las aleaciones AISI 316 - AISI 1010 y del acero AISI 1045 - AISI 1050 fue lograda con una velocidad de detonación de 2 500 m/s y una velocidad de colisión de 1 068 m/s con formación de olas de 30°.
- Al establecer el comportamiento microestructural de las aleaciones AISI 316 - AISI 1010 y del acero AISI 1045 - AISI 1050 se determinó que a cinco milímetros del inicio de la explosión, existen formaciones de olas diferentes a distancia de 25 milímetros, asociado a la presión de detonación y a la velocidad de colisión.
- Al someter las aleaciones AISI 316 - AISI 1010 a proceso de soldadura por explosivos en la interfase del cordón existe un incremento de la dureza de 50 HV, sin embargo en la unión metalúrgica de las aleaciones AISI 1045 - AISI 1050, este último tratado térmicamente, existe un descenso de 480 HV hasta 465 HV por efecto del tratamiento de alivio de tensiones que ha provocado la explosión.
- En la soldadura disímiles de las aleaciones AISI 316 - AISI 1010 y del acero AISI 1045 - AISI 1050 por explosivos donde se consideró la incidencia de máquinas, operarios, energía eléctrica, materias primas y mano de obra indirecta tiene un el costo estimado de 8,39 CUP y 5,37 CUC, por lo que se considera un proceso económico para la unión de aceros.



### **Recomendaciones**

- Realizar en próxima investigación proceso de soldadura por arco eléctrico en materiales disímiles y luego unirlos por proceso de soldadura por explosivos para determinar el efecto de este proceso en el alivio de tensiones de la unión soldada.
- Someter a ensayos de desgastes con el empleo de un tribómetro las aleaciones AISI 316 - AISI 1010 y del acero AISI 1045 - AISI 1050 para evaluar la resistencia de las mismas luego de ser sometidas a soldadura por explosivos.
- Considerar someter a ensayos de tensión muestras de soldaduras realizadas por explosivos para determinar la resistencias de las mismas luego de aplicado este proceso.

## **REFERENCIAS**



## BIBLIOGRAFÍAS

1. Acarer, M., Gulenc, B.; F. Findik, Investigation of explosive welding parameters and their effects on microhardness and shear strength. *Materials & Design*, 24 (8), 2003. p. 659 - 664.
2. Acarer, M., Gulenc, B.; Findik, F. The influence of some factors on steel/steel bonding quality on there characteristics of explosive welding joints. *Journal of Materials Science*, 39 (21), 2004. p. 6457 - 6466.
3. Akbari, M.; Al-Hassani, S.; Burley, S.; Byers, B. Simulation of explosive welding with ANFO mixture, *J Prop Exp Pyro* 29 (3), 2004. pp. 188 - 196.
4. Akbari, M. The mechanics of explosive welding. University of Manchester Institute of Science and Technology UMIST PhD thesis; 2001.
5. Al-Hassani, S.; Salem, S.; Lazari, G. Explosive welding of flat plates in free flight, *Int J Imp Eng* 1 (2), 1984. pp. 85 - 101.
6. 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
7. Amit, J. Introduction to Explosive Welding. *Metal Web News*. 4 (28), 2008
8. Arivazhagan, N.; Singh, S.; Prakash, S.; Reddy, G., An assessment of hardness, impact strength, and hot corrosion behaviour of friction-welded dissimilar weldments between AISI 4140 and AISI 304, *International Journal of Advance Manufacturing Technology*, 2008, Vol 39 N<sup>o</sup> 15, p. 679 - 689.
9. Ben-Artzy, A. Wave formation mechanism in magnetic pulse welding. *International Journal of Impact Engineering*, 37 (4), 2010. p. 397 - 404.
10. Blanc, J.; Thiard, R. *L'Energie des Explosifs*. Explosifs, 1984
11. Broeckhove, J. Experimental research on magnetic pulse welding of dissimilar metals. 2010, UGent.
12. Byers, B.; Braithwaite, M. Williamsburg equation of state for detonation product fluid. *Shock Comp Cond Matt*, Colorado; 1993.
13. Caraballo, M. Recuperación de equipos y piezas por la tecnología de conformación y soldadura por explosivos. *Revista Minería y Geología*. XIV (2). 1997.



14. Caraballo, M. A. Comportamiento de piezas de acero Hadfield endurecidas mediante explosivos. *Revista Minería y Geología*. XX (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. Celik A., Alsaran A. Mechanical and structural properties of similar and dissimilar steel joints, *Materials Characterization*, 43 (11), 1999. p. 311 - 318.
17. Cook, M. *The science of high explosives*, Reinhold Publishing Corporation, New York 1958.
18. Cowan, G.; Bergman, O.; Holtzman, A. Mechanics of bond wave formation in explosive cladding of metals, *Met Tran* 2, 1971. p. 3145.
19. Crossland, B. *Explosive welding of metals and its application*, Oxford University Press, New York. 1882.
20. Davis, W. The detonation of explosives, *Sci Am* 256 (5), 1987. pp. 98 - 106.
21. Didyk, R.; Yunnik, A.; Zil, V.; Masakovskii, A. Explosive treatment as a means of redistribution of residual stresses in machine parts, *Problemy Prochnosti*, No. 11, 1994. pp. 50 - 54.
22. Dick, R. *Explosives and Blasting Procedures Manual*. U.S. Bureau of Mines, 1983
23. Doddy T. Intermediate mixed zones in dissimilar metal welds for sour service, *Welding Journal*, 71 (3), 1992. p.47 - 54..
24. Durgutlu, A., B. Gulenc, and F. Findik, Examination of copper/stainless steel joints formed by explosive welding. *Materials & Design*, 26 (6), 2005. p. 497 - 507.
25. 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.
26. Drury, F.C.; Westmaas, D.J. *Considerations Affecting the selection and use of modern chemical explosives*. SEE. 1980
27. Fernández, T.; Alcántara, D.; Rodríguez, I.; Correa, R. Soldadura disímil de una aleación HK 40 y un hierro fundido 24. *Revista de Ingeniería Mecánica*. 17 (2), 2014, p. 98 - 107.



28. Frenkel, D.; Smit, B. Understanding Molecular Simulation: From Algorithms to Applications, Vol. 1 of Computational Science Series, 2 Edn., Academic Press, San Diego 2002.
29. García, A., Gómez, C., Oria, V. Valoración del desempeño de un dispositivo de autoalimentación diseñado para la evaluación operativa de electrodos revestidos". Soldagem & Inspeção. 14 (1), 2009, p. 15 - 21.
30. García-Jacomino, J.; Burgos, J.; Álvarez, M.; García, J. Efecto del tratamiento con explosivos sobre las tensiones residuales en uniones soldadas de acero al carbono. Revista de la Facultad de Ingeniería Universidad Central de Venezuela. 22 (.2), 2007.
31. Harries, G.; Beztie, T. The Underwater Testing of Explosives and Blasting. Explosives in Mining Workshop. The Australasian Institute of Mining and Metallurgy. 1988.
32. Holtzman, A.; Cowan, G. Bonding of metals with explosives. WRC Bulletin No.104, New York, N.Y. Welding Research Council. 1965.
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.
35. Klueh R.L., King J.F., Griffith J.L. A simple test for dissimilar-metal welds, Welding Journal, 62 (6), 1983. p.154s - 159s.
36. Leyva, B. Investigación sobre el endurecimiento del acero al alto manganeso (Hadfield), mediante explosivos. Trabajo de Diploma. ISMMMoA. Facultad de Metalurgia y Electromecánica. 2003
37. Lippold, J.; Kotecki, D., Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steel. EE.UU, John Wiley & Sons Inc, 2005.
38. Loncke, K. An exploratory study into the feasibility of the magnetic pulse forming process. 2009, Ghent University.
39. López, R.; Aguirre, H.; Parra, H. Soldabilidad en aceros inoxidables y aceros disimiles. Scientia et Technica Año XIII, No 34, Mayo de 2007.



40. Lozano, P.; Moreda, C.; Llorente, L. y Bilmes, P. Características de Fusión de Soldaduras GMAW de Aceros Inoxidables Austeníticos. Jornadas SAM 2000 – IV Coloquio Latinoamericano de Fractura y Fatiga, Agosto de 2000, 171 - 178.
41. Lundin D. Dissimilar metal welds transition joints literature review, *Welding Journal*, 61 (2), 1982. p 58s - 63s.
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, 1980, pp.88 - 110, pp. 112 - 145, pp. 148 - 187, pp. 328 - 335.
44. 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*, 45 (5), 2009. p. 875 - 888.
45. 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
46. Meriño, G. Conformación, soldadura y endurecimiento de metales con explosivos. Reporte de aplicación. Cenic. La Habana. 1977
47. Metzger G., Lison R. Electron beam welding of dissimilar metals, *Welding Journal*, 55 (8), 1976 p. 230s - 240s.
48. 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.
49. Mousavi, S.; Sartangi, P. Experimental investigation of explosive welding of cp titanium/AISI 304 stainless steel. *Materials & Design*, 30 (3), 2009. p. 459 - 468.
50. Naumovich, N.; Yadevich, A.; Chigrinova, N. In *Shock Waves for Industrial Applications* (Ed: L. E. Murr) Noyes Publications, Park Ridge, New Jersey 1988, Ch. 5, pp. 170 - 213.



51. Nelson, D.; Baeslack, W.; Lippold, J. Characterization of the weld structure in a duplex stainless steel using color metallography, *Metallography*, 18 (4), 1999.p. 215 - 225.
52. Nordlund, K., Parcass computer code. The main principles of the molecular dynamics algorithms are presented in [15, 16]. 2006
53. Oystein G., *Modelación Metalúrgica de la soldadura*. 2da Ed. P 509 – 526. Instituto de Materiales, Londres, Inglaterra. 1994.
54. Parody, G. Investigación sobre el endurecimiento del acero Hadfield por el método de explosivos. ISMMMoa. Facultad de Metalurgia y Electromecánica. 1995.
55. Peña, A. Soldadura de acero disímil por arco eléctrico del impelente del ventilador de la torre de absorción. Tesis en opción al título de ingeniero mecánico. ISMMM. Tutor: Dr. C. Tomás Fernández Columbié, 2012
56. Perkins, J.; Akin, K.; Nylund, Z. Explosive Welding of a 12" x 12" x 0,125" ASTM B152 Copper Plate to a 12" x 12" x 0,5" ASTM A516 Gr70 Normalized Steel Plate. 2005, Colorado School of Mines.
57. Pernia, J. Manual de perforación y voladura de rocas. IGME. Madrid. 1988.
58. Petushkof, G.; Kudinof, B.; Trufiakof, B. Parámetros de cargas de sustancias explosivas para eliminación de tensiones residuales soldadas a tope, *Avtomatichescaia Esvarca*, No 1. 1976.
59. Petushkov, V.; Titov, V. Parameters of shockwave loading used to relieve residual welding stresses by explosion treatment, *Paton Welding Journal*, No.4, Pp. 57. 2001.
60. Reddy G.M., Rao K.S., Sekhar T. Microstructure and pitting corrosion of similar and dissimilar stainless steel welds, *Science and technology of welding and joining*, 13 (4), 2008. p.363 - 377.
61. Robinson, J. A fluid model of impact welding. In: *Proc 5th int conf high ener rate form phil mag*, vol. 31(1); 1975. p. 587.
62. Samal, M., Balani, K., Seidenfuss, M., Ross, E. An experimental and numerical investigation of fracture resistance behaviour of a dissimilar metal welded joint, *Journal of Mechanical Engineering Science*, 223 (45), 2009. p. 1502 - 1523.