

República de Cuba  
Ministerio de Educación Superior  
Instituto Superior Minero Metalúrgico  
"Dr. Antonio Núñez Jiménez"  
Facultad Metalurgia-Electromecánica  
Departamento Mecánica

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

*Microestructuras de uniones disímiles  
obtenidas mediante el proceso de soldadura  
por explosivos*

*Autor: Nolberto Almira Paredes*

*Tutores: Dr. C. Tomás Fernández Columbié  
Ing. Juan Ramón Castillo Matos*

*Moa - 2015  
"Año 57 de la Revolución"*



***Declaración de Autoridad***

**Yo:** Nolberto Almira Paredes

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.

-----  
Norberto Almira Paredes

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

-----  
Ing. Juan Ramón Castillo Matos

## ***Agradecimientos:***

**Este trabajo ha sido posible gracias al apoyo incondicional y la preocupación de muchas personas, que me han ayudado durante todo este tiempo.**

**A mis padres por haberme llevado por este camino, con su educación y con su preocupación.**

**A mis hermanas por obligarme a querer ser siempre un ejemplo para ellas.**

**A mi esposa Roxana por todo su amor y a sus padres.**

**A todos mis profesores que influyeron en mi formación profesional, incitándome cada día a superarme.**

**A mis amigos, con los que he compartido momentos malos y buenos de mi vida.**

**Un agradecimiento a mis tutores Dr. C. Tomás Fernández Columbie y al Ing. Juan Ramón Castillo Matos.**

**por su constante dedicación en la realización de este trabajo, sin ustedes hubiese sido imposible alcanzar esta meta.**

## ***Dedicatoria***

A mi mamá, por todo su amor, dedicación y cariño.

A mi papá por sus siempre buenos consejos, su amor y por estar a mi lado incondicionalmente.

A mi hermana menor por quererme tanto.

A mi hermana mayor que aunque esté lejos siempre extraño.

A mi esposa por hacerme feliz y ser parte de mi vida

Y en especial a mi pequeño Cristian para el que tengo todo el amor de este mundo.

A mis familiares y amigos.

A todos ustedes les doy gracias por existir.



**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. Empleo de los explosivos industriales para la consolidación de metales	4
1.3. Características generales de los explosivos	5
1.4. Características del proceso de detonación	7
1.5. Velocidad de detonación	8
1.5.1. Mecanismos de la soldadura por explosivo	10
1.6. Aspectos metalúrgicos de la soldadura por explosión	11
1.7. Uniones soldadas disímiles	13
1.7.1. Aplicación de uniones soldadas disímiles	15
1.7.2. Soldadura de aceros disímiles	16
1.8. Zona afectada térmicamente en los aceros	19
1.8.1. Disminución de la tenacidad en la ZAT de aceros	19
1.9. Tensiones en las uniones soldadas	20
1.10. Conclusiones del capítulo 1	22
<b>CAPÍTULO. 2 MATERIALES Y MÉTODOS</b>	
2.1. Introducción	23
2.2. Composición química estándar de las aleaciones	23
2.3. Plan experimental	24
2.4. Material explosivo empleado	24
2.4.1. Diseño de experimentos	25
2.4.2. Parámetros en el proceso de soldadura por explosión	27
2.5. Preparación metalográfica	29
2.5.1. Corte de las muestras	29
2.5.2. Cálculo de la velocidad de corte	30
2.5.3. Potencia de corte efectiva	30
2.5.4. Tiempo de maquinado	31



2.5.5. Desbaste de las muestras	31
2.5.6. Pulido y ataque de las muestras	32
2.5.7. Observación microscópica y comportamiento microestructural	32
2.5.8. Ensayo de dureza aplicado a las muestras	34
2.6. Conclusiones del capítulo 2	35
<b>CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS</b>	
3.1. Introducción	36
3.2. Análisis de la composición química de las aleaciones	36
3.3. Análisis de los parámetros del proceso de soldadura por explosión	37
3.4. Análisis del proceso de maquinado de las probetas	39
3.5. Análisis microestructural de la aleaciones titanio – acero AISI 1020	41
3.5.1. Análisis microestructural de la aleaciones AISI 1066 – acero AISI 1008	42
3.6. Análisis de la dureza	45
3.6.1. Análisis de la dureza en relación a la velocidad de detonación	45
3.6.2. Análisis de regresión múltiple	47
3.7. Valoración económica	48
3.8. Valoración del impacto medio ambiental	49
3.8.1. Emanaciones en la soldadura por explosivos	50
3.9. Conclusiones del capítulo 3	51

## **Resumen**

Este trabajo tiene como objetivo establecer 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, para lo cual fue preparada muestras con los diferentes materiales. Se 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 aseguran el flujo plástico para lograr la unión metalúrgica de las aleaciones estudiadas. Las microestructuras obtenidas están compuestas por granos de ferrita exquaxiales, 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. Se analiza el comportamiento de la dureza en las muestras tratadas, donde se observa un incremento de la dureza desde 120 HV para el acero AISI 1008 hasta 250 HV para el acero AISI 1066. Se realiza la valoración económica y el impacto medio ambiental del proceso de explosión.



## **Abstract**

This paper has as objective to establish the behaviour microstructure of unions' dissimilar titanium - steel AISI 1020 and of steel AISI 1066 - steel AISI 1008 for the welding process for explosive, for that which was prepared samples with the different materials. It was considered a feed of detonation of 2 800 m/s, a radius of the load of 0,345 kg and a feed of collision of 1196, 16 m/s, everything it with a volume of explosive of 600 cm<sup>3</sup> and a density of 1.15 g/cm<sup>3</sup>, parameters that assure the plastic flow to achieve the union metallurgic of the studied alloys. The obtained microstructures is composed by grains of ferrite exquiaxiales, very fine grains of the type troostitic and thick grain with ferrite net and the fused area of both materials base exists the presence of fine and aligned grains of the type ferrite. The behaviour of the hardness is analyzed in the treated samples, where an increment of the hardness is observed from 120 HV for the steel AISI 1008 up to 250 HV for the steel AISI 1066. He is carried out the economic valuation and the half environmental impact of the explosion process.



## **INTRODUCCIÓN**

Debido a las crecientes exigencias productivas, los materiales deben trabajar en condiciones cada vez más severas, lo que conduce a la degradación de los mismos por desgaste, corrosión o fatiga. Estas circunstancias han impulsado el desarrollo de nuevos materiales o procesos para la recuperación de superficies y funcionalización de nuevas superficies.

La tecnología de materiales ha experimentado sensibles avances en los últimos años, especialmente en lo que se refiere a recubrimientos superficiales, disponiéndose en la actualidad de recubrimientos con propiedades específicas adecuadas a aplicaciones concretas, resistentes a diversos tipos de sollicitaciones.

En la actualidad existen diferentes materiales que se emplean en la construcción; los diseñadores pueden escoger el 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.

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.

Independientemente de cual sea el material, el proceso de soldadura empleado y el tratamiento térmico posterior, pueden producirse algunos cambios microestructurales en la interfase, como por ejemplo, pequeños precipitados, aumento de tamaño de grano, que en consecuencia pueden originar cambios en sus propiedades metalúrgicas.

Las actuales exigencias tecnológicas ponen de manifiesto la necesidad de disponer de materiales metálicos con elevadas prestaciones bajo condiciones de servicio críticas, así por ejemplo, las matrices metálicas empleadas en los procesos metalúrgicos en la fabricación en frío y en caliente de los materiales,



necesitan alta tenacidad y elevada dureza superficial, especialmente a alta temperatura en algunos casos.

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

Como **situación problemática** se plantea:

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**

Las teorías existentes aún no fundamenta el comportamiento de la zona fundida y de la zona de influencia térmica de una unión disímil de acero estructural y un acero al manganeso y de una aleación de titanio y un acero estructural, sometido a carga por explosivos.

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

Una carga de explosivos con una alta velocidad de impacto, provocará la difusión de los átomos de un acero estructural sobre un acero al manganeso, así como en un acero estructural sobre una aleación de titanio y permitirá una unión con requerimientos metalúrgicos en la zona fundida y la zona de influencia térmica.

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

Determinar la relación microestructura/propiedades obtenidas en la soldadura por explosivos en una soldadura disímil entre un acero estructural y un acero al



manganeso y de un acero estructural y una aleación de titanio en base a la metalurgia a las zonas obtenidas.

El **objeto de estudio** es unión de soldadura por explosivos del acero estructural y del acero al manganeso y de una aleación de titanio sobre un acero estructural.

El **campo de acción** es el comportamiento microestructural y la dureza de la zona fundida y la zona de influencia térmica de uniones soldadas disímiles por el proceso de soldadura por explosivos.

**Objetivos específicos:**

1. Caracterizar los materiales para efectuar el proceso, así como la selección de la carga explosiva para realizar la unión.
2. Describir las zonas formada por la influencia del ciclo térmico de la unión soldada en base a la microestructura obtenida del proceso de soldadura con explosivos del acero estructural y el acero al manganeso y en la aleación de titanio y el acero estructural.
3. Describir las variaciones microestructurales originadas en la zona fundida y la zona de influencia térmica, así como la dureza resultante obtenida después del proceso de explosión de las aleaciones.

Para dar cumplimiento a este objetivo han sido trazadas 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 resultante del proceso de soldadura con explosivos de las aleaciones.
4. Fundamentación de las inestabilidades metalúrgicas que surgen en el proceso de soldadura del acero estructural y del acero al manganeso y en la aleación de titanio con el acero estructural.
5. Planteamiento de los efectos económicos, sociales y ambientales del proceso de soldadura por explosivos.

# **CAPÍTULO 1**

**Marco teórico. Antecedentes investigativos**

## CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO. ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS

### 1.1. Introducción

La soldadura por explosión es un proceso de soldadura en estado sólido y como ha sucedido con numerosos descubrimientos, es difícil asegurar a quien se debe el descubrimiento de este procedimiento de unión, pero el primer reconocimiento público de la utilidad potencial del mismo se atribuye a Philipchuck que en 1957, logro accidentalmente una soldadura por explosión cuando estaba realizando investigaciones sobre la conformación de metales mediante explosivos.

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

### 1.2. Empleo de los explosivos industriales para la consolidación de metales

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).

En la soldadura por explosión (EXW) (figura 1.1), la unión se establece a través de la deformación intensa de la interfase. Una esterilla explosiva se coloca encima de la lámina o placa de revestimiento (la placa móvil), mantenida a una distancia crítica de la superficie del material base.

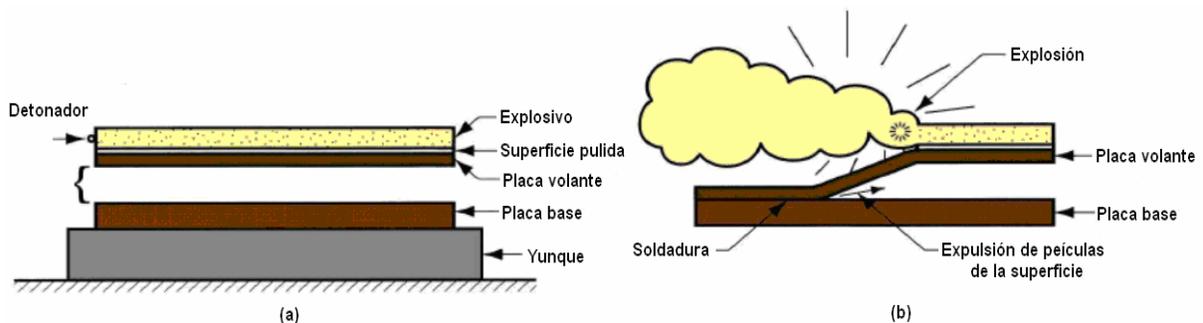


Figura 1.1. Proceso de soldadura por explosivo.

La figura (a) es el proceso de instalación en configuración paralela y la figura (b) es durante la detonación de la carga explosiva.

Según se observa en las figuras anteriores, 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).

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

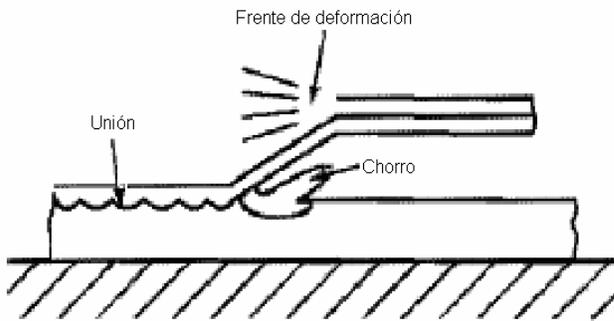


Figura 1.2. Desarrollo del proceso de soldadura por explosión.

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

### 1.3. Características generales de los explosivos

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

Algunos compuestos químicos son sustancias explosivas si son capaces de reaccionar fácilmente, los productos finales de la reacción deben ser gases que

alcancen un volumen que puede ser unas 10 000 veces mayor que el volumen de los productos iniciales. La reacción debe ocurrir tan rápido que la energía liberada en la explosión no se difunda, y sea realmente concentrada en el volumen que inicialmente ocupa la sustancia explosiva. Se diferencian las siguientes formas de transformación química de las sustancias explosivas (Otaño, 1998):

- ✚ Detonación.
- ✚ Combustión explosiva.
- ✚ Deflagración.

La selección de la sustancia explosiva para producir el endurecimiento reviste gran importancia y los criterios fundamentales para su elección son: la velocidad de detonación y la energía específica del explosivo (Drury, 1980). En este sentido, pudieran ser utilizados varios tipos de sustancia explosiva, en particular las combinaciones o mezclas sólidas (exógeno, salitre amoniacal + totril) y las mezclas de sustancias sólidas y líquidas (salitre amoniacal + líquido combustible, nitroéteres + salitre, hidrógeno líquido + combustible sólido). En todo caso si las propiedades no están totalmente definidas por el fabricante, estas pueden ser determinadas de forma experimental.

Explosivos, propelentes y pirotécnicos son compuestos o mezclas de compuestos químicos, que forman el grupo de los materiales energéticos. Los explosivos y los propelentes, cuando se inician adecuadamente, producen grandes volúmenes de gas caliente en muy corto tiempo. La diferencia básica entre estos dos tipos de materiales es la velocidad de reacción. En los explosivos, una reacción rápida da lugar a una muy alta presión de choque en los alrededores.

Este choque es capaz de impulsar o destruir objetos. En los propelentes, una reacción más lenta que la de los explosivos produce presiones menores en un periodo de tiempo mayor. Esta presión baja y sostenida es comúnmente utilizada para impulsar o propeler objetos. Por otro lado, los pirotécnicos desarrollan una mayor cantidad de calor, pero menos gas que los propelentes.

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.

Según el mismo autor, en los explosivos comerciales se producen reacciones químicas importantes por detrás del plano C-J (plano de Chapmant-Jouguet) que marca el paso del frente de detonación. Son particularmente reacciones de los ingredientes en forma de partículas de gran tamaño y de los combustibles metálicos. Estas reacciones secundarias pueden afectar el rendimiento del explosivo, pero no influyen en la estabilidad o velocidad de detonación.

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 de la Cruz (2003), Parodi (1991), relacionado con el endurecimiento del acero Hadfield por el método de explosivos.

#### **1.4. Características del proceso de detonación**

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

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

depende de la presión de los productos de la combustión y la velocidad de quemado se define como la velocidad a la cual la superficie de quemado consume un grano propelente en la dirección normal a la superficie.

Los explosivos tienden a detonar y durante la detonación, un frente casi discontinuo o un cambio abrupto de presión, conocido como onda de choque, se desplaza a velocidades supersónicas a través del explosivo, causando su descomposición. La velocidad de reacción es determinada, en este caso, por la velocidad de la onda de choque y no por la velocidad de transferencia de calor, esta velocidad de onda de choque es también llamada velocidad de detonación. Idealmente, en estado estacionario, la onda de detonación puede considerarse como una discontinuidad viajando a través del explosivo con velocidad.

Las velocidades de detonación varían generalmente entre 1 800 y 10 000  $m s^{-1}$  dependiendo de la composición química y naturaleza de los explosivos. Las altas velocidades de detonación implican 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 (Brien, 1991).

### **1.5. Velocidad de detonación**

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

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

La velocidad de colisión y la velocidad de la plancha volante deben ser menores que la velocidad del sonido en cada uno de los componentes a soldar. Esta condición se establece como una explicación de la condición necesaria para que la onda de

tensión reflejada no interfiera con la onda incidente en el punto de colisión. Como la velocidad de colisión está relacionada con la velocidad de detonación y el ángulo  $\beta$  (ángulo de la placa volante), ésta puede ser ajustada por la reducción de la velocidad  $D$  (velocidad de detonación) o por la introducción de un ángulo de oblicuidad.

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

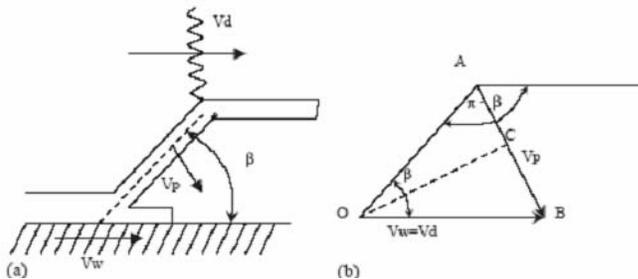


Figura 1.3. Variación del ángulo  $\beta$

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

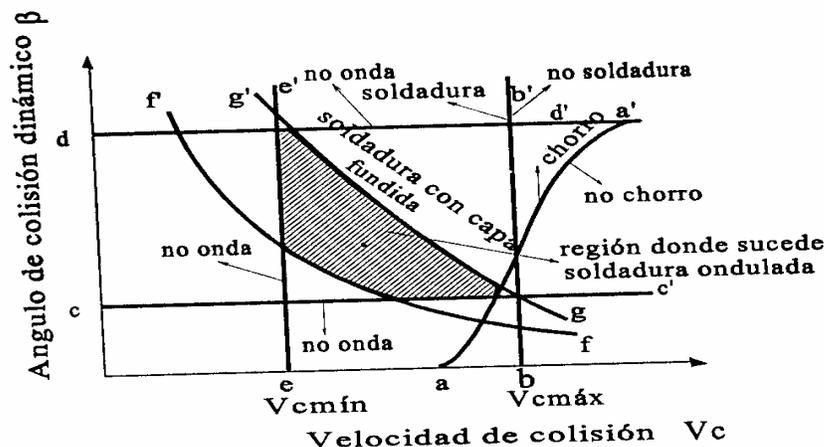


Figura 1.4. Relación del ángulo  $\beta$  con la velocidad de soldadura.

El área rayada de la figura representa el lugar geométrico dentro del cual se puede tomar un punto cuyos parámetros determinen una soldadura aceptable.

La presión de impacto mínima debe ser excedida (y por supuesto 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 observado para evitar exceso de calor y posiblemente fundiciones por disipación viscosa y por lo tanto la formación de capas de compuestos frágiles. Tal límite superior sería buscado en términos de energía de fusión o del más bajo punto de fusión de los metales a soldar.

Una suficiente separación entre las planchas 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. Algunos autores dan diferentes valores de este espacio en función de la gravedad específica del material de la plancha volante. Estos son múltiplos del espesor de la plancha en:  $(1/2 - 2/3)$ ,  $(1/2 - 1)$ ,  $(2/3 - 2)$  para gravedad específica menor que 5, entre 5 y 10, y mayor que 10 respectivamente.

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

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

Numerosos investigadores han atribuido el mecanismo de la soldadura por explosión a la acción de un chorro metálico de alta velocidad que se produce por el impacto oblicuo de la chapa metálica a ser soldadas. Este impacto provoca presiones y tensiones de corte muy elevadas de manera tal que la resistencia al corte de los metales involucrados en el proceso resulta despreciable. Se puede considerar que bajo tales condiciones estos metales 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.

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

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

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

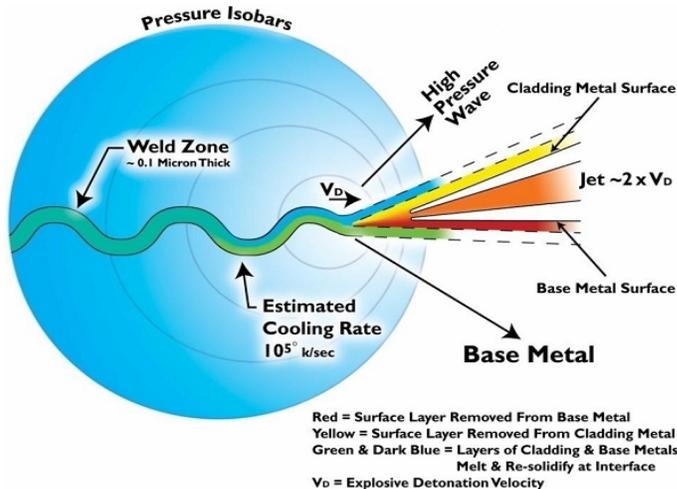


Figura 1.5. Aspecto típico de la intercara de la soldadura por explosivos.

Debido a que la duración del proceso de soldadura en el punto de unión es corta, la zona de calor es reducida así como los efectos del calentamiento en los materiales. Estas zonas fundidas sufren los problemas metalúrgicos normalmente asociados a la

fusión, tales como cavidades de enfriamiento y producción de compuestos intermetálicos.

En la zona fundida asociada a los torbellinos de la intercara se alcanzan velocidades de enfriamiento muy rápidas, el tipo de solidificación de una capa de hierro fundida es de un espesor aproximado de  $30 \mu m$ , en una soldadura por explosión. La relativa delgadez de estas 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. Se ha establecido experimentalmente el hecho de la existencia de un cortante interfacial durante la soldadura y se atribuye ésta 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.

Una aplicación importante de la soldadura de explosión es la unión de metales disimilares que usualmente forman compuestos intermetálicos por los medios convencionales de soldadura. No obstante, hay que tener cuidado en la elección de los parámetros de soldadura, pues también se puede formar compuestos intermetálicos en las pequeñas zonas fundidas cuando se suelda por explosión. Una solución a este problema que han encontrado algunos investigadores consiste en hacer un electrodepósito en una de las componentes a ser soldadas como medio de evitar la formación de compuestos intermetálicos frágiles (como son el que se forma entre el aluminio y el acero inoxidable).

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 reverbera dentro de la misma. La componente de compresión 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.

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.

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. En general, 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. Uniones soldadas disímiles**

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

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

fabricación de uniones soldadas disímiles con aplicación directa en diferentes sectores industriales estas han presentado defectos tanto de fabricación como metalúrgicos, con la promoción de fallas durante su aplicación en servicio. Por lo tanto, el ingeniero de soldadura tiene que resolver el problema de cómo tratar el material y de cómo soldarlo correctamente.

Es ahí donde la unión de materiales disímiles adquiere gran importancia (Metzger y Lison, 1976; Arivazhagan *et al.*, 2008; Madhusudan y Srinivasa, 2009), dando origen a diversos estudios dirigidos hacia la comprensión de las fallas que se presentan durante el servicio, las cuales han sido vinculadas a las uniones disímiles mediante el fenómeno de desunión, que es atribuido al borde de grano tipo II que se presenta en la zona de transición de las uniones disímiles (Nelson *et al.*, 1999; Lippold y Kotecki, 2005; 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, resultando un área sobrepuesta dentro del cual se pueden obtener los parámetros con los que se soldará la combinación en cuestión.

El método de establecer una ventana de soldabilidad para cada material de la combinación a soldar y como resultado de la superposición de ellas dos, obtener una tercera ventana es desde nuestro punto de vista, bastante complicado, lleva recursos, técnicas sofisticadas para determinar las propiedades de los metales involucrados y además aún queda la interrogante de si es la condición de obtener una cara ondulada la que garantiza la calidad de la unión. Las condiciones fronterizas de la soldadura, en base a las cuales se escoge el valor de la carga explosiva, la relación R y la separación entre planchas necesarias deben garantizar que  $V_p$  esté en los límites que indica la siguiente expresión:

$$V_{min} < V_p < V_{máx} \quad (1.1)$$

Para obtener una soldadura con calidad es necesario tener en cuenta un conjunto de factores entre los cuales se tienen:

- Tipos de materiales a soldar.
- Espesores de las planchas
- Cantidad de carga.
- Distancia entre planchas.
- Limpieza de las planchas.
- Deformación producto del choque.
- Choque mecánico entre ellas.

✚ La orientación de los granos en los metales con respecto a la orientación de la detonación. Longitud y tamaño de las planchas a soldar. La distancia entre las planchas base y chocante se garantiza mediante espaciadores, generalmente de madera.

Para garantizar una buena soldabilidad los metales deben poseer una alta conductividad térmica, insignificante coeficiente de dilatación lineal y pequeña contracción.

### **1.7.1. 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.

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.

### **1.7.2. Soldadura de aceros disímiles**

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

Esto es de gran interés cuando las uniones disímiles son expuestas a elevadas temperaturas, como lo pueden ser, las condiciones de servicio o tratamientos térmicos postsoldadura, aunque las condiciones citadas anteriormente pueden no influenciar directamente este efecto.

La difusión del carbono puede influenciar la formación de zonas de alta dureza, incluso cuando el tiempo de permanencia a elevadas temperaturas durante los ciclos de soldaduras son extremadamente cortos, existiendo una ligera disminución del carbono en la ZAT del acero al carbono, lo cual indica que el carbono pudo difundir dentro del metal de soldadura y hacia la región de transición. La manipulación y variaciones de las turbulencias del charco de soldadura tienen una influencia significativa en la formación de la región de transición (Doddy, 1992).

En la soldadura disímil por explosivos la unión soldada presenta características diferentes a la soldadura convencional. En la figura 1.6 se puede observar la

variación en la morfología de la ola en dependencia de la velocidad de detonación del explosivo.

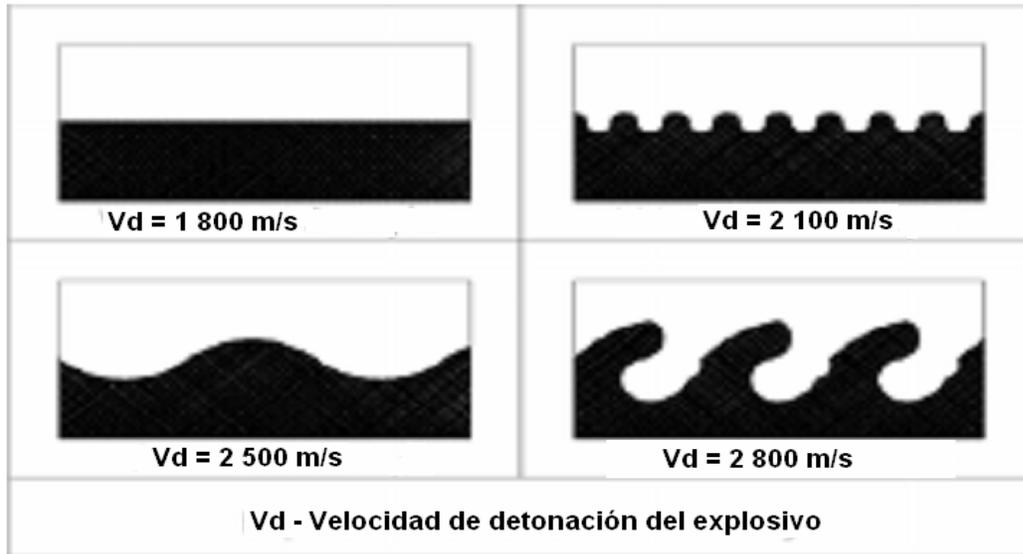


Figura 1.6. Morfología de la ola en dependencia de la velocidad de detonación del explosivo.

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

Se ha observado en la unión de materiales con el empleo de soldadura por explosivos (figura 1.7) la intensidad y propagación de las olas en la unión disímil cobre y tantalio, aluminio, tantalio y acero inoxidable, donde los materiales presentan punto de fusión diferente. Los procesos de compactación dinámica ofrecen ciertas ventajas potenciales sobre otras técnicas de compactación convencional, por ejemplo: se pueden alcanzar presiones extremadamente altas y densidades cercanas a las teóricas, se puede lograr unión entre partículas en estado sólido (sin sinterización subsiguiente), procesar polvos químicamente a fines sin riesgos de la formación de compuestos, reteniendo las propiedades y estructuras de los polvos originales.

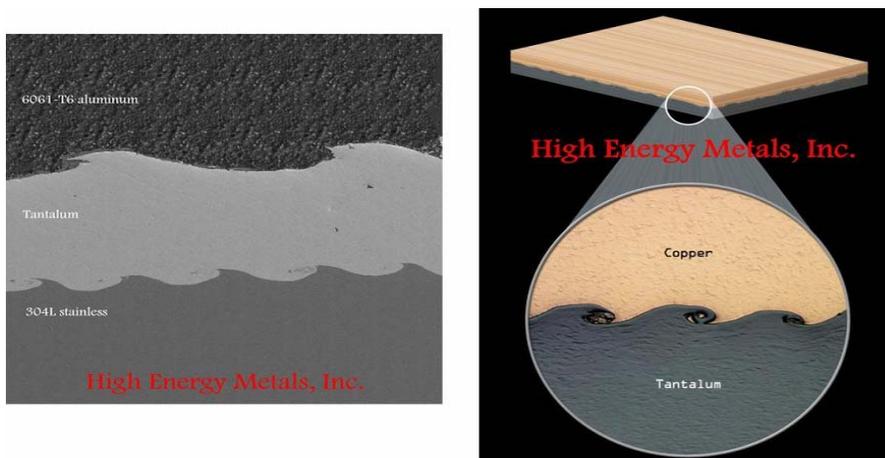


Figura 1.7. Comportamiento de la ola en diferentes materiales soldados.

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

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

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 componente, pero en la zona de soldadura se produce un (ablandamiento) posiblemente porque se

generó suficiente calor en la intercala 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.

### **1.8. Zona afectada térmicamente en los aceros**

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

Posteriormente la temperatura continúa incrementándose hasta alcanzar la temperatura máxima (temperatura pico) antes de iniciar el enfriamiento. El crecimiento del grano de austenita se inicia después de formarse, pero también el crecimiento puede ocurrir después de que la fase de austenitización es completada (Zhang *et al.*, 2005).

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

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

#### **1.8.1. Disminución de la tenacidad en la ZAT de aceros**

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

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

La reducción a la formación de este constituyente se ha relacionado con la disminución de los contenidos de carbono así como el carbono equivalente (AWS, 1990; Easterling, 1992), lo que produce una mejora a la tenacidad.

Sin embargo no es posible cuantificar la influencia de los elementos de aleación sobre la tenacidad de la ZAT debido a las diferentes condiciones de soldadura; por ejemplo, los elementos microaleantes como el niobio y el vanadio son considerados por tener un efecto fragilizante sobre la ZAT, pero pueden ser considerados benéficos bajo ciertas condiciones, tal es el caso del niobio, el cual fomenta la formación de una ferrita acicular que se caracteriza por presentar una morfología de placas lenticulares con tamaño de grano de uno a tres micras y es conocida por mejorar la tenacidad y la resistencia de las uniones soldadas (Ricks *et al.*, 1982; Badeshia *et al.*, 2006).

### **1.9. Tensiones en las uniones soldadas**

En las uniones soldadas se pueden encontrar seis tipos de tensiones residuales fundamentalmente, se encuentran las tensiones transversales y longitudinales (o también llamadas de alargamientos), a lo largo del cordón o en toda su longitud, en las secciones transversales al cordón y las tensiones longitudinales y transversales en espesor. En dependencia de la potencia térmica de la fuente empleada, de la velocidad de soldadura, del espesor, del carácter de fijación de la pieza, la distribución de tensiones puede ser distinta (Bonifaz, 2000)

Las tensiones térmicas que se originan en los procesos de soldadura, pueden ser de tracción y de compresión. Las altas tensiones residuales a tracción son conocidas por promover fractura y fatiga, mientras que las tensiones residuales a compresión pueden inducir a indeseables y a menudo imprevisibles pandeos globales o locales



durante o después de la soldadura. Esta adversidad afecta la fabricación, el ensamblaje y la vida de servicio de las estructuras (Parlane, 1980).

Por lo tanto, la predicción y control de las tensiones residuales y la deformación a partir del proceso de soldadura es extremadamente importante. Hoy en día numerosos investigadores dedicados al tema, hacen gran uso de la modelación por Elementos Finitos con el fin de predecir y determinar con gran exactitud los desplazamientos, las deformaciones y los valores de las tensiones residuales (García *et al.*, 2002, 2003; Masubuchi, 1980; Goldak y Moashi, 1999; Micharelis, 2004; Meo y Vignjevic, 1999).



### 1.10. Conclusiones del capítulo 1

- ❖ La calidad de las uniones soldadas por explosivos, están asociadas a diferentes aspectos como son: el tipo de explosivo, la velocidad de detonación, la carga explosiva, así como a la conductividad térmica que posean los materiales a unir.
- ❖ A través de la bibliografía citada se infiere que la soldadura por explosión no es una forma de sustitución económica de otro tipo de soldadura, pero si tiene ciertas ventajas que son más importantes que sus limitaciones.
- ❖ La zona afectada térmicamente en los aceros durante el proceso de soldadura con el empleo de explosivos es el resultado de los ciclos térmicos originados por el bajo punto de fusión que ocurre en esta zona, sin embargo hay que tener cuidado en la elección de los parámetros de soldadura, pues también se puede formar compuestos intermetálicos en las pequeñas zonas fundidas cuando se suelda por explosión

# **CAPÍTULO 2**

## **Materiales y métodos**



## CAPÍTULO. 2 MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1. Introducción

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

El segundo capítulo tiene como objetivo establecer el procedimiento metodológico del proceso de soldadura por explosivos del acero estructural y el acero al manganeso y del acero con el titanio.

### 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 estructural

C %	Si %	Mn %	P %	S %	Fe
0,18 – 0,23	0,50	0,30 – 0,60	0,040	0,050	Resto

Tabla 2.2. Composición química del acero estructural

C %	Si %	Mn %	P %	S %	Fe
0,08	0,020 -0,025	0,25 – 0,50	0,014	0,016	Resto

La composición química del acero al manganeso aparece en la tabla 2.3.

Tabla 2.3. Composición química nominal del acero al manganeso

C %	Si %	Mn %	P %	S %	Fe
0,60 – 0,71	0,25 – 0,30	0,85 – 1,15	0,040	0,050	Resto

La composición química de aleación de titanio aparece en la tabla 2.4

Tabla 2.4. Composición química de la aleación de titanio

O	N	C	H	Fe	Al	V	Ti
0,25	0,05	0,10	0,015	0,40	5,5 – 6,75	3,5 – 4,5	Balance

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

- ✚ Titanio – acero AISI 1020
- ✚ Acero AISI 1066 – Acero AISI 1008

### 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 1066 y de la aleación de titanio), evitándose en este proceso el fenómeno de la acritud. El diseño aparece en la tabla 2.5.

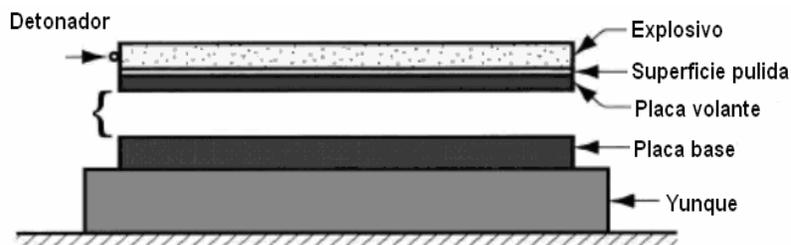


Figura 2.1. Preparación de la unión para la soldadura.

Tabla 2.5. Parámetros para la soldadura de las probetas

No	Aleación	Vd (m/s)	$\beta$	$\Phi$	$\delta$
1	Titanio – acero AISI 1020	2 800	7	0,8	5
2	Acero AISI 1066 – Acero AISI 1008	2 800	7	0,8	5

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

### 2.4. 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 TECTRON 100 se relacionan a continuación (Ulaex, 2000):

- ✚ Densidad ( $\rho$ ) ..... 1,15 g/cm<sup>3</sup> (1150 kg/m<sup>3</sup>)
- ✚ Energía específica (Ee)..... 740 kcal/kg (3 098 232 Nm/kg)
- ✚ Velocidad de detonación (Vd) ..... Se establece en función del diámetro de la carga (según gráfico proporcionado por la firma suministradora).
- ✚ Presión de detonación (Pd) ..... Se establece en función del diámetro de la carga (según gráfico proporcionado por la firma suministradora).

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

#### 2.4.1. 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, estando vinculado en primer lugar con la velocidad de detonación del paquete explosivo y en segundo lugar con las presiones que se generan en las proximidades del frente de detonación, entre otros factores; en la medida en que se incrementan estos valores desde una magnitud crítica y hasta un valor límite.



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

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	δ	Vd
1	1	1	δ1	Vd1
2	- 1	1	δ2	Vd2
3	1	- 1	δ3	Vd3
4	-1	-1	δ4	Vd4

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 consideraran en el proceso de soldadura por explosivos tenemos:

- $V_p$  - Velocidad de impacto.
- $\beta$  - Angulo de colisión.
- $V_c$  - Velocidad del punto de colisión.
- $E_k$  - Energía cinética del explosivo.

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 como:

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

**Donde:**

- Vd - Velocidad de detonación.
- R - radio de carga.

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

$$V = a.b.c \tag{2.2}$$

**Donde:**

- a – largo de la plancha, cm



b – ancho plancha, cm

c – espesor del explosivo, cm

La masa del explosivo se calcula en adecuación a la ecuación 2.3.

$$m = V \cdot \rho \quad (2.3)$$

**Donde:**

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

ρ - densidad del explosivo, g/ cm<sup>3</sup>

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

$$R = \frac{m}{2} \quad (2.4)$$

**Donde:**

m – masa del explosivo, kg

La desviación del explosivo se determina como:

$$\phi = \left( -1 - \frac{V_G}{2E_K} \right)^{\frac{1}{2}} = 0,7 \text{ a } 0,83 \quad (2.5)$$

**Donde:**

φ - desviación del material explosivo.

V<sub>G</sub> - es la velocidad de detonación de la partícula detrás del frente de detonación de los gases.

Para nuestro trabajo escogeremos a Φ como 0,8

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

$$\beta = \tan^{-1} \left[ \frac{V_p \cos(\alpha/2)}{V_c - V_p \sin(\alpha/2)} \right] \quad (2.6)$$

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:

$$U_p = \frac{V_d}{4} \quad (2.7)$$

## 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. Corte de las muestras

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

En la figura 2.2 se puede observar las muestras después del corte.



Figura 2.2. 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.



### **2.5.2. 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 seleccionada fue de 250 mm/rev y el avance del husillo fue de 125 mm/rev Casillas (1987).

$$V_c = \frac{\pi \cdot D_f \cdot n}{1000} \quad (2.8)$$

**Donde:**

$V_c$  - velocidad de corte; m/min .

$D$  - diámetro de la fresa; mm .

$n$  - número de revolución; rev/min .

1 000 - factor de conversión de metro a milímetro.

### **2.5.3. Potencia de corte efectiva**

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.

$$P_z = P \cdot F \quad F = a \cdot b \quad (2.9)$$

**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 se calcula como:

$$NC = \frac{Pz \cdot Vcr}{6120} \tag{2.10}$$

La potencia del husillo se calcula entonces como:

Potencia necesaria que se necesita para poner en movimiento la máquina.

$$Nh = Nmot \cdot \eta \tag{2.11}$$

### 2.5.4. 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.

$$Tm = \frac{L}{n \cdot s} \cdot i \tag{2.12}$$

**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

Los parámetros de la fresa son los siguientes:

Diámetro de la fresa.	Df = 60 mm
Número de dientes.	Z = 40 mm
Sigma de rotura del acero..	$\sigma_r = 55 \text{ kgf/cm}^2$
Durabilidad de la fresa.	T = 180 min
Ancho de la fresa.	B = 3 mm
Avance longitudinal.	Sm = 125 mm/rev

### 2.5.5. Desbaste de las muestras

Después del corte, 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

### **2.5.6. Pulido y ataque de las muestras**

Se realizó para eliminar las rayas finas producidas en la última operación de desbaste hasta que se consiguió una superficie sin rayas y con alto pulimento a 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, se tomó la probeta con la pinza y se sumergió con la cara pulida hacia abajo en el reactivo contenido en el cristizador. Se extrajo, se lavó con alcohol y se secó con aire seco y caliente.

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

Para la observación de las probetas se empleó un microscopio óptico binocular marca NOVEL modelo NIM - 100 (Figura 2.3) 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 2.3. Microscopio óptico NOVEL modelo NIM - 100.

El análisis microestructural consistió en la observación de una muestra patrón de las aleaciones titanio – acero AISI 1020, se seleccionó la zona del metal base, es decir 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, se procedió de igual manera para el acero AISI 1066 – Acero AISI 1008. Las figuras 2.4, 2.5, 2.6 y 2.7 muestran las estructuras metalográficas de las diferentes probetas seleccionadas.

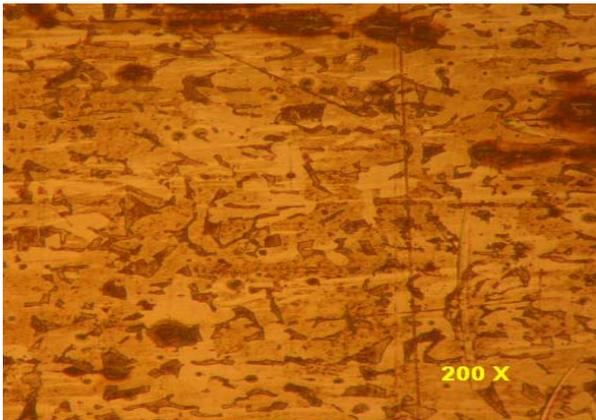


Figura 2.4. Microestructura del acero 1008

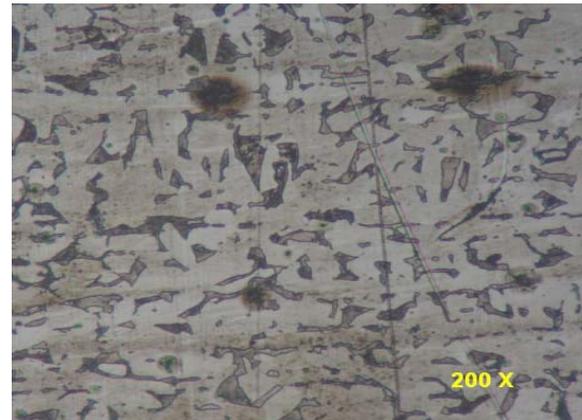


Figura 2.5. Microestructura del acero 1066

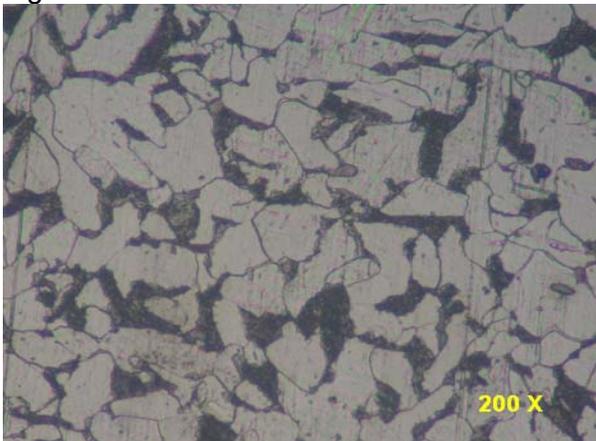


Figura 2.6. Microestructura del acero 1020

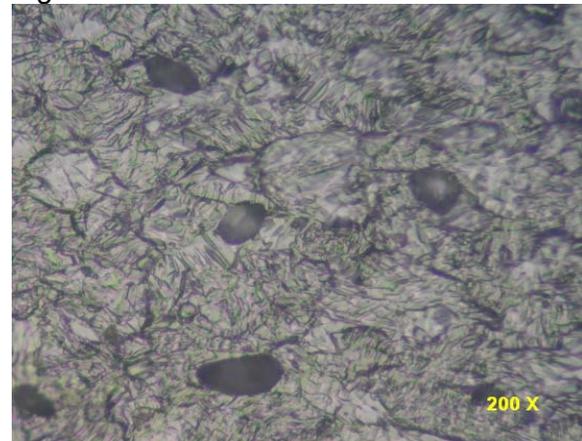


Figura 2.7. Microestructura del titanio

La figura 2.4 que se corresponde con el acero AISI 1008 está compuesta por una estructura ferrítica, típica de estos acero, la microestructura de la figura 2.5 perteneciente al acero AISI 1066 compuesta por una estructura de ferrita + perlita al igual que el de la figura 2.6 correspondiente al acero AISI 1020, la microestructura de la figura 2.7 se corresponde con la muestra patrón de la aleación de titanio y consiste en granos equiaxiales de fase  $\alpha$ .



### 2.5.8. 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 dos ensayos, el primero para una carga de 10 g y el segundo 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 formula:

$$VHN = 1,854 \cdot \frac{P}{\bar{d}^2} \left[ \frac{kgf}{mm^2} \right] \tag{2.12}$$

**Donde:**

1,854 - constante

P - peso (kg)

$$\text{Diámetro medio} = \bar{d} \text{ (mm)} \quad \bar{d} = \frac{(d_1 + d_2) + (d_3 - d_4)}{2} \tag{2.13}$$

$$\text{Microdureza promedio: } \overline{VHN} = \frac{\sum VHN_1 + VHN_2}{2} \left[ \frac{kg}{mm^2} \right] \tag{2.14}$$



## **2.6. 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 TECTRÓN 100, emulsión encartuchada en mangas de polietileno de diferentes diámetros, única sustancia explosiva que se comercializa en la actualidad en Cuba.

# **CAPÍTULO 3**

## **Análisis de los resultados**

## 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 titanio – acero AISI 1020 y de acero AISI 1066 – acero AISI 1008, así como el análisis de las microestructuras obtenidas.

### 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 estructural

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

Tabla 3.2. Composición química real del acero estructural

C %	Si %	Mn %	P %	S %	Fe
0,013	0,020	0,268	0,014	0,016	99,07

La composición química del acero al manganeso aparece en la tabla 3.3.

Tabla 3.3. Composición química real del acero al manganeso

C %	Si %	Mn %	P %	S %	Fe
0,673	0,274	0,958	0,0249	0,038	97,71

La composición química de aleación de titanio 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 de la aleación de titanio

O	N	C	H	Fe	Al	V	Ti
0,25	0,05	0,10	0,015	0,40	5,5	3,5	Balance

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 casi en un 100 % con los de las normas, por lo que estamos en presencia de los aceros AISI 1008, AISI 1020, AISI 1066 y la aleación de titanio Ti - 6Al - 4V.

Es la diferencia en diámetros atómicos lo que va a permitir al elemento del átomo más pequeño difundir a través de la celda del otro elemento de mayor diámetro. Por lo que se considera que al someter a procesos de soldadura por explosivos a las aleaciones, va existir deformaciones reticulares en la estructura interna de las mismas, hay un nuevo acomodo de dichos átomos y nuevas relaciones de los parámetros de la celda unitaria, lo que incrementa generalmente la dureza.

### 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 2 800 m/s, un radio de la carga calculado por la ecuación 2.4 con un valor de 0,345 kg, por lo que tenemos que la velocidad de colisión es 1196, 16 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 forma más efectiva de reacción explosiva, para el endurecimiento de metales es la detonación, definida como: difusión de la reacción por la masa de sustancia explosiva con una velocidad supersónica, constante para cada sustancia y altura límite de la carga, condicionada por el paso de una onda de detonación.

El volumen del explosivo se calculó por la ecuación 2.2 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 las aleaciones de titanio – acero AISI 1020 y de acero AISI 1066 – acero AISI 1008.

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 2.3 se calculó la masa del explosivo la cual es de 0,69 kg. El volumen del explosivo calculado, permitirá el proceso de soldadura por presión, el cual permite la aparición de la deformación plástica en la intercara que permite, entre otras cosas, 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 2.5, 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 2.6.

La velocidad de la partícula ( $U_p$ ) se calculó por la ecuación 2.7 donde se tuvo en cuenta una velocidad de detonación de 2 800 m/s, la cual fue dividida por cuatro y se obtuvo un valor de 700 m/s.

En esta compactación dinámica entre la placa base y la placa volante, 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.

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

En la red cristalina, los átomos se encuentran en posiciones de mínima energía, el deslizamiento exige que un átomo pase de una posición de equilibrio a la siguiente, no solo para los átomos del Fe, sino también para los del C, Mn, Si, Ni, Ti, en consideración a la existencia de dislocaciones que facilitan el desplazamiento y una deformación permanente, que permiten la difusión de un átomo dentro del otro, habrá un deslizamiento de las cristalitas en la red cristalina, lo que consolida los cristales de todos los granos en el agregado, fenómeno que conduce a la obtención de un grano más fino, lo que concuerda con Callister (1999); Pero-Sanz (2000).

Para un contacto lineal, como es el caso de preparación de las muestras para realizar la unión soldada por explosivo, la fluencia debajo de la capa superficial, comienza cuando la presión media de contacto es aproximada a la resistencia máxima de la aleación, sin embargo la zona sub - superficial plástica está rodeada y constreñida por material que aún está respondiendo elásticamente. Se pueden alcanzar magnitudes de la tensión de contacto con el límite de fluencia del material antes de que la zona crezca lo suficiente como para lograr, en la superficie, el resultado de un flujo plástico masivo, lo que es consistente con Mutlon (1992) y Han *et al.* (2002).

### **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 2.7,

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, trabajando 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 coincide con Casillas (1987).

Por la ecuación 2.8 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 40 kgf/cm<sup>2</sup>, luego el valor de  $P_z$  que fue de 0,21,6 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 2.7, se sustituyeron estos valores en la ecuación 2.10 y la potencia de corte necesaria para realizar el corte es de 0,0017 kW.

Por la ecuación 2.11 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 2.12, 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.

### 3.5. Análisis microestructural de la aleaciones titanio – acero AISI 1020

Para realizar el análisis microestructural de las muestras, se tuvo en cuenta las diferentes cargas a la que fueron sometidas cada una de ellas. Todas las muestras fueron observadas a 200x. Las microestructuras analizadas en la figura 3.1a, 3.2b y 3.3c, muestran diferentes orientaciones cristalinicas 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.

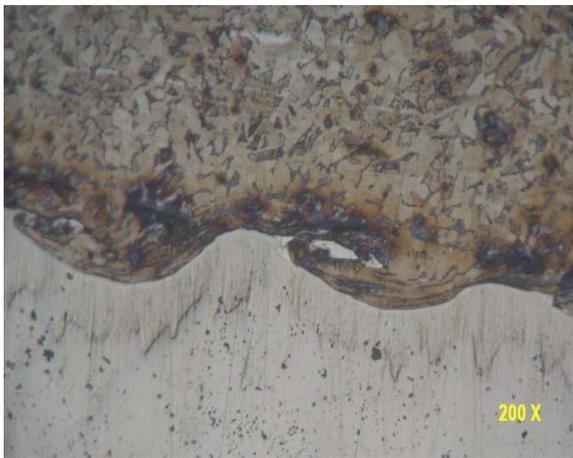


Figura 3.1a. Vista transversal

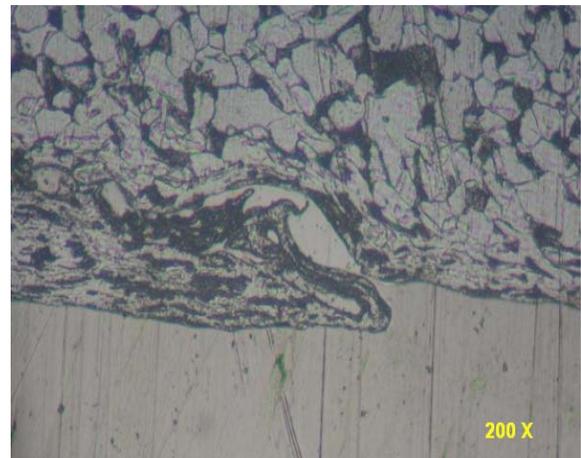


Figura 3.1b. Vista longitudinal

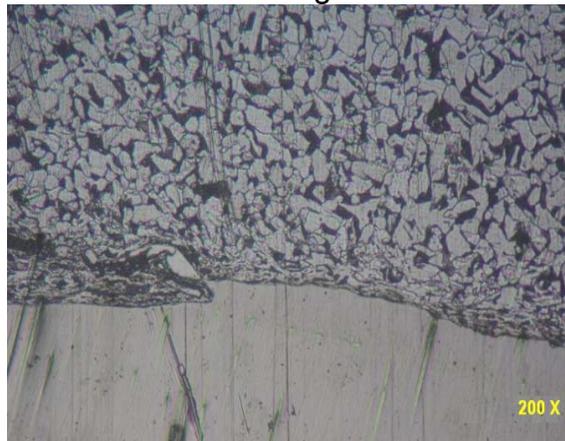


Figura 3.1c. Vista frontal.

Las figuras 3.1a, la 3.1b y la 3.1c se corresponden con la unión soldada disímil titanio – acero AISI 1020, la parte superior que se corresponde con el acero AISI 1020, está compuesta por granos de ferrita exquiaxiales, los cuales se reducen en la medida que se acercan a la zona de fusión de la aleación de titanio.

Como se observa en las figuras, la interface 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 estructura en forma de ola, sin presentar la microestructura de granos columnares 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.

Los efectos, más graves, en el material base serán en las zonas cercanas al cordón, debido a la disipación del calor. Esta zona alcanza temperaturas mayores a la de fusión del propio material y por lo comentado anteriormente, la estructura del titanio varía proporcionalmente a la zona afectada por el calor.

Las microestructuras observadas en las figuras, presentan una estructura de mayor tamaño en el crecimiento de grano. La fuerza impulsora del proceso del crecimiento de grano resulta de la disminución de la energía libre, como consecuencia de la reducción del área de la frontera de grano. El crecimiento de grano se produce por difusión cuando la temperatura es suficientemente elevada y el tiempo de tratamiento térmico suficientemente largo, lo que fue reportado por Fukui *et al.* (2004).

De esta manera, al disminuir el número de granos por unidad de volumen, el tamaño de los granos aumenta y comporta una reducción del área de la frontera de grano, así como una disminución de la energía almacenada, que lleva a que el material alcance un estado de elevada estabilidad termodinámica, lo que coincide con Mangonon (2001).

### **3.5.1. Análisis microestructural de la aleaciones AISI 1066 – acero AISI 1008**

Para realizar el análisis microestructural de esta dos aleaciones, se considera que un acero al carbono, de un bajo contenido de carbono de 0,08 %, estará formado por una proporción de 75 % de fase ferrita (cuyo contenido de carbono a temperatura ambiente, no pasa de 0,008 %) y aproximadamente 25 % de perlita

(cuyo contenido de carbono es fijo y corresponde a 0,8 %); mientras un acero de mayor contenido de carbono (por ejemplo, 0,40 %) tendrá mayor proporción de perlita (aproximadamente 9 %).

Las figuras 3.2a, 3.2b, 3.2c y 3.2d se corresponden con la unión disímil de las aleaciones AISI 1066 – acero AISI 1008.



Figura 3.2a. Vista transversal

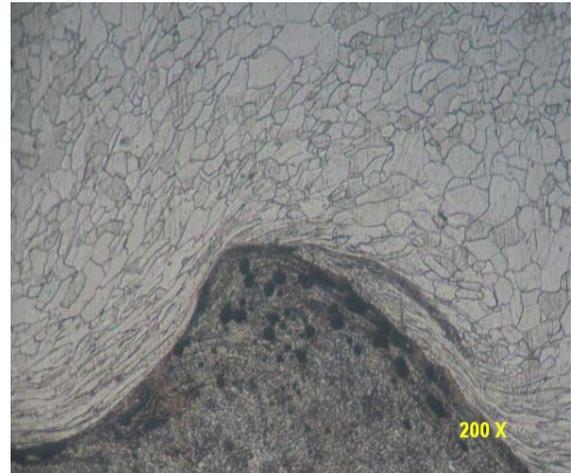


Figura 3.2b. Vista longitudinal

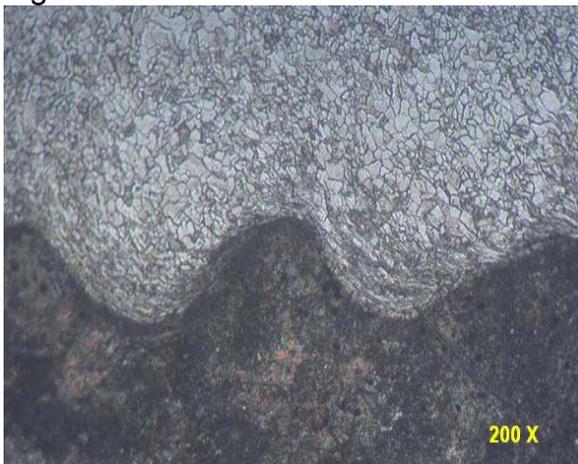


Figura 3.2c. Vista frontal.

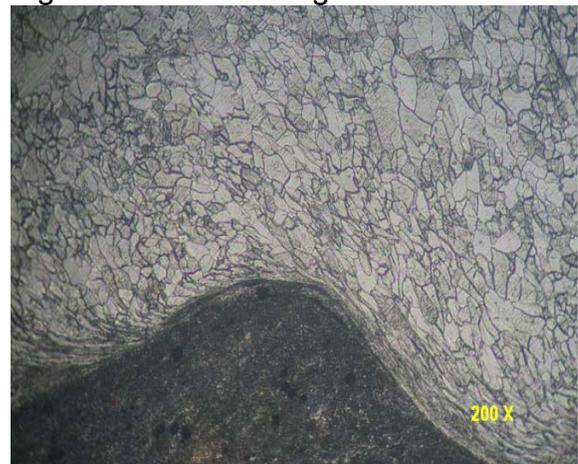


Figura 3.2d. Vista longitudinal.

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 mayor dureza, el acero AISI 1066, se introduce por efecto de la difusión en el acero AISI 1008, 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 una distribución casi preferente 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 su fuerza sobre la placa volante.

La distribución de temperaturas máximas se concentra a ambos lados del cordón de soldadura, en dos bandas estrechas y cuando aumentan la distribución de temperaturas máximas se dispersa, lo que provoca que las bandas se ensanchen.

Cuando analizamos la unión, ya sometidos a las condiciones de soldadura por explosivos, se puede observar que en la unión soldada la estructura del acero AISI 1066 (parte oscura) presenta un fondo de granos muy finos del tipo troostítico y grano grueso con red de ferrita y la zona fundida de ambos materiales base (parte clara) presenta granos finos y alineados del tipo ferrítico.

Debido a que la deformación plástica representa en sí el movimiento de las dislocaciones por los planos de deslizamiento con su salida a la superficie de los cristales, es que el surgimiento de cualquier tipo de obstáculo capaz de dificultar el movimiento de las dislocaciones provoca el endurecimiento del policristal y el incremento de su resistencia (Alfonso, 2002). Entre los referidos obstáculos están, ante todo, otras dislocaciones que se encuentran en el cristal. Este frenaje al movimiento se logra a través de la reducción del tamaño de grano, como ha sido demostrado como consecuencia del endurecimiento por deformación plástica (acritud).

Del análisis metalográfico se llega a la conclusión que como consecuencia del trabajo de deformación en frío realizado por la acción de las cargas explosivas, se origina una textura de deformación plástica con la presencia de líneas características de planos de deslizamientos lo que ha sido planteado por Caraballo (2004).

A partir de la observación de las micrografías de probetas tratadas con explosivos y las probetas patrón que no recibieron tratamiento; no es posible afirmar que bajo la acción de las grandes cargas de choque que impactan la pieza a alta velocidad al detonar la sustancia explosiva, se haya producido la precipitación de fases

secundarias sobre todo del tipo carburo en la matriz austenítica, reportado por Caraballo (2004).

### 3.6. 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, en la tabla 3.5 se muestran los resultados obtenidos.

Tabla 3.5. Resultados de análisis de la dureza

<b>Materiales</b>	AISI 1066	AISI 1008	Titanio	AISI 1020
Dureza (HRB )	97,1	63,3	89,8	83,6
	97,9	64,8	87,6	82,6
	98,9	64,1	90,7	84,3
	HV		HV	
Dureza ZAT	350 HV		220 HV	

Se puede observar que las zonas evaluadas presentan variaciones en cada una de las mediciones a lo largo del ensayo, la diferencia en las mismas es significativa para la obtenida para el acero AISI 1020 - Titanio. Las durezas reportadas en todos los ensayos consecuentes son el promedio de dichas mediciones.

La causa del incremento de la dureza en las muestras soldadas por explosivos se debe a dos factores. El primero es que 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).

#### 3.6.1. Análisis de la dureza en relación a la velocidad de detonación

Para determinar el comportamiento de la dureza en relación a la velocidad de detonación, de las aleaciones objeto de estudio y su comparación con los mismos aceros, sometidos a deformación plástica plana por proceso de soldadura por explosivos, se graficó la dureza vs velocidad de detonación, de donde se obtuvo la figura 3.6.

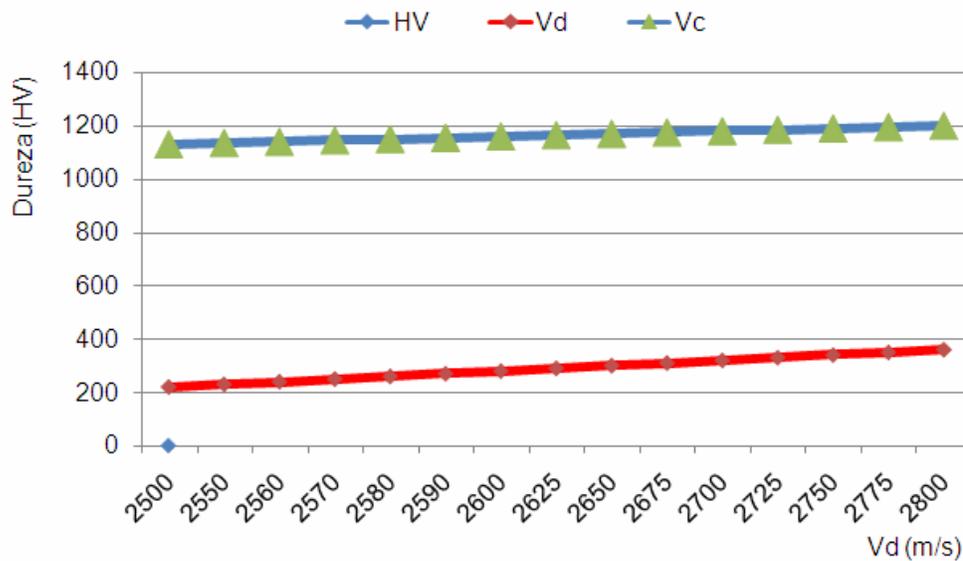


Figura 3.6. Comportamiento de la dureza vs velocidad de detonación y velocidad de colisión.

Para incremento de la velocidad de detonación y velocidad de colisión entre las aleaciones, se puede observar que en la medida que se incrementan estas dos variables, aumenta la dureza. Lo que demuestra que las mismas son directamente proporcionales, ya que las líneas obtenidas mantienen una tendencia lineal a incrementarse en la medida que se incrementan estos valores, lo que trae consigo el incremento de la dureza.

Las tensiones máximas calculadas anteriormente incrementan la dureza por acritud al reducir el tamaño promedio de los granos y permiten el compactamiento de los mismos. Cuando la presión ejercida excede el límite de fluencia de la aleación, la superficie es plásticamente deformada en frío y el material fluye debajo de la capa deformada, entonces como resultado se obtiene una superficie muy pulida y densamente compactada.

El apilamiento o aplastamiento de los granos es resultado de una integración causada por el deslizamiento intracristalino, 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).

### 3.6.2. Análisis de regresión múltiple

Con el empleo del software *stafgraphics* se realizó las influencias de las variables. En la tabla 3.6 aparecen estos resultados.

Tabla 3.6. Resultados del análisis de regresión múltiple

Análisis de Regresión Múltiple					
Variable dependiente: HV					
		Error	Estadístico		
Parámetro	Estimación	estándar	T	P-Valor	
CONSTANTE	- 2 040,0	0,0			
Vc	2,0	0,0			
Vd	0,0	0,0			
Análisis de Varianza					
Fuente	Suma de cuadrados	GL	Cuadrado medio	Cociente-F	P-Valor
Modelo	28000,0	2	14000,0		
Residuo	0,0	12	0,0		
Total (Corr.)	28000,0	14			
R-cuadrado = 96,5 porcentaje					
R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 0,0 porcentaje					
Error estándar de est. = 0,0					
Error absoluto medio = 0,0					

La salida muestra los resultados del ajuste a un modelo de regresión lineal múltiple para describir la relación entre HV y 2 variables independientes. La ecuación del modelo ajustado es:

$$HV = -2040,0 + 2,0 \cdot Vc - 1,02719E-14 \cdot Vd$$

El estadístico R-cuadrado indica que el modelo explica un 96,5 % de la variabilidad en HV. El estadístico R-cuadrado ajustado, que es más conveniente para comparar modelos con diferentes números de variables independientes, es 0,0 %. El error estándar de la estimación muestra la desviación típica de los residuos que es 0,0. El error absoluto medio (MAE) de 0,0 es el valor medio de los residuos. El estadístico Durbin-Watson (DW) examina los residuos para

determinar si hay alguna correlación significativa basada en el orden en el que se han introducido los datos en el fichero.

### 3.7. Valoración económica

La contabilidad de costos, que de una determinación histórica del costo de la producción basado en la materia prima, la mano de obra y los gastos indirectos de producción, ha desembocado en sistemas de costos predeterminados de tipo estimado o de tipo estándar, mediante los cuales el costo de los artículos no se obtiene al finalizar el proceso productivo, si no se calcula de antemano y sirve de base de control y eficiencia.

La contabilidad de costos se ocupa de la planeación, clasificación, acumulación, control y asignación de costos. La contabilidad de costos constituye el complemento amplificado y necesario de la contabilidad financiera, que tiene por objeto brindar información de los hechos en el momento preciso para tomar decisiones respecto a maximizar beneficios o minimizar costos.

Para la realización del análisis económico tomaremos como referencia el tiempo de ejecución obtenido durante cálculo de los parámetros de trabajo en el laboratorio. En la tabla 3.7 se recoge el comportamiento de los costos.

Tabla 3.7. Costo por concepto de tiempo y consumo

Por concepto de tiempo				Por concepto de consumo				
	Tarifa (\$/h)	Tiempo (h)	Costo <sub>T</sub> i (\$)	Cantidad de equipos	Consumo (kW/h)	Tarifa (\$/kW)	Tiempo (h)	Costo <sub>Co</sub> (\$)
Técnico	2,34	2	4,68	2 - lámparas 2 - Aire acondicionado	0,8 0,25 1,12	0,09	2	0,19
Costo Total para la preparación de las muestras			$C_T = \text{Costo}_{T_i} + \text{Costo}_{Co}$ $C_T = \$ 4,87$					

Como se aprecia en la tabla 3.7, 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 4,87 CUP; por lo que se puede considerar un costo relativamente pequeño considerando la importancia que reviste la unión disímil, como alternativa de disminuir el fenómeno de desgaste, defecto muy común en los equipos de las industrias cubanas.

### **3.8. Valoración del impacto medio ambiental**

Es un problema frecuente en talleres y zonas de trabajo de soldadura, la degradación de la calidad ambiental, motivada por los humos y gases producidos por las emanaciones ocasionadas por la fusión de los materiales de aporte y de los mismos metales a soldar.

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

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

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

### **3.8.1. Emanaciones en la soldadura por explosivos**

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

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

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

El bióxido de carbono no es estrictamente un gas venenoso, pero su producción en grandes cantidades ha causado muchas muertes en tronaduras en áreas confinadas. El  $\text{CO}_2$  detiene el funcionamiento de los músculos con movimiento involuntario del cuerpo, por ejemplo, el corazón y pulmones. Una concentración del 15% o más en volumen, puede provocar muerte por asfixia.

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

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

- ❖ Las microestructuras obtenidas han permitido observar y analizar los importantes cambios a la que están sujetas las aleaciones soldadas por el proceso de explosión, lo cual permite plantear que se ha logrado una unión metalúrgica deseable.
- ❖ Se determinó a través de la observación microscópica que las uniones disímiles logradas luego del proceso de soldadura no es producto del cambio de fase, sino a una cohesión entre los átomos de los materiales base.
- ❖ Se caracterizó las incidencias medioambientales del proceso de soldadura por explosivos donde se plantea que entre los gases que se generan se encuentran el bióxido de carbono, el nitrógeno y el vapor de agua, los cuales no son tóxicos en el sentido clásico de la palabra, pero afectan el cuerpo humano.



### **Conclusiones generales**

- Para realizar la uniones disímiles titanio – acero AISI 1020 y de acero AISI 1066 – acero AISI por el proceso de explosión se consideró un volumen de explosivo de  $600 \text{ cm}^3$  y una densidad de  $1,15 \text{ g/cm}^3$  con lo que se logró una velocidad de  $2\ 800 \text{ m/s}$  que permitió el flujo plástico de las aleaciones y lograr la unión metalúrgica.
- Las microestructuras obtenidas en forma de ola luego del proceso de detonación, justifican el comportamiento morfológico obtenido, así como estructuras 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.
- En los perfiles de dureza realizados en las uniones disímiles se determinó un incremento de dureza de  $120 \text{ HV}$  para el acero AISI 1008 hasta  $250 \text{ HV}$  para el acero AISI 1066, motivado por la acritud y el efecto de las dislocaciones.
- Al realizar la valoración económica del proceso de soldadura disímil de las aleaciones, donde se consideró la mano de obra, el consumo de la energía eléctrica de los equipos, la misma incurre en un costo de  $4,87 \text{ CUP}$ .



### **Recomendaciones**

- Realizar en próxima investigación un análisis de microscopía de mayor resolución que permita establecer el mecanismo de unión de los materiales luego del proceso por explosivos.
- Determinar las tensiones de 1er y 2do género que garantizan la unión metalúrgica de las uniones disímiles soldadas en el presente trabajo por el proceso de soldadura por explosivos.
- Aplicar el procedimiento tecnológico descrito en el trabajo, para el proceso de soldadura de uniones disímiles, que por sus características deben estar expuestas a condiciones de trabajo de desgastes o a medios agresivos.

# Referencias



## BIBLIOGRAFÍAS

1. Aguilar, W., Boeri, R., Comportamiento a la Segregación de los Elementos de Aleación usados en Fundiciones Esferoidales de Fabricación, Jornadas SAM – IV Coloquio Latinoamericano de Fractura y Fatiga, Agosto, 2000.
2. 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. ISSN: 14
3. Badeshia, H. y Honeycombe, R. Steels, Third edition. Butterworth-Heinemann, Oxford, UK. 2006
4. Bonifaz, E., Finite Element Analysis of heat flow in single-pass arc welds. Welding Journal. May 2000.
5. Callister, W., Materials Science and Engineering. An Introduction. Fifth Edition. Department of Metallurgical Engineering. University of Utah. John Wiley & Sons, Inc. 1999. 8195 pp.
6. Caraballo, M. A. Recuperación de equipos y piezas por la tecnología de conformación y soldadura por explosivos. Revista Minería y Geología. Vol XIV, No 2. 1997.
7. Caraballo, M. A. Comportamiento de piezas de acero Hadfield endurecidas mediante explosivos. Revista Minería y Geología. Volumen XX. No. 1. 2004
8. 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.
9. Casillas, A., Cálculo de taller. 5<sup>a</sup> ed., Madrid, España 1982. pp 316 – 321.
10. Celik A., Alsaran A. Mechanical and structural properties of similar and dissimilar steel joints, Materials Characterization, V. 43, p. 311-318. 1999.
11. Doddy T. Intermediate mixed zones in dissimilar metal welds for sour service, Welding Journal, V.71, N.3, p.47-54. 1992.
12. Drury, F.C.; WESTMAAS, D.J. Considerations Affecting the selection and use of modern chemical explosives. SEE. 1980



13. Easterling, k., Introduction to the physical metallurgy of welding, s.l. 2nd edition, Butterworth-Heinemann, Oxford, UK., 1992.
14. Fernández, T.; Rodríguez, I.; Alcántara, D.; Fernández, E., Procedimiento para endurecer el acero 45 mediante la deformación plástica con rodillo simple. Revista Ingeniería e Investigación. 28 (1) 15 – 21, 2008(a).
15. Fernández, T.; Rodríguez, I.; Alcántara, D., Tensión – Deformación durante la deformación plástica superficial con rodillo. Revista de Ingeniería Mecánica. 12 (3) 13 - 22, 2009(b).
16. Fernández, T.; Rodríguez, I.; Alcántara, D., Variaciones mecánicas superficiales del acero AISI 1045 endurecido superficialmente por rodadura. Revista Geología Minería. 26 (3) 65 – 74, 2010.
17. Fukui, Y.; Inamura, T., Mechanical properties of a Ti-Nb-Al Shape Memory Alloys. Material Transaction. 45 (4) 1077-1085, 2004.
18. García Y., Burgos, J.; Obtención de campos de temperaturas en juntas soldadas mediante el empleo de MEF. Revista de la Facultad de Ingeniería. Universidad Central de Venezuela.. Editorial Papiro, Venezuela, VOL 18-Nº 2, 2003. (a) Disponible en: <<http://www.revelo.com.ve/programa/indice/>> acceso: julio2005.
19. García Y., Burgos J. Obtención de los campos de temperaturas en juntas soldadas mediante el empleo de MEF. JIFI 2002, Simposio de la red Iberoamericana de Aceros Tradicionales y Aceros Estructurales, Avanzados. 1er, Caracas, Venezuela. 2002.
20. Goldak J., Moashi G. Numerical Aspect of modelling weld. Moashigu, Carleton University. ASM Handbook, Vol 6 Welding, Brazing and Soldering. 1999.
21. Han, C.; Pyoun, Y.; Kim, C., Ultrasonic micro – burnishing in view of eco – materials processing. Advances in Technology of Materials and Materials Processing Journal. 4 (1) 25 – 28, 2002.
22. Joseph, A.; Sanjai, K.; Jayakumar, T.; Murugan, N., International journal of pressure vessel and piping, 2005, Vol 82, N<sup>o</sup> 20, p.700 – 705. ISSN: 0308-0161
23. Klueh R.L., King J.F., Griffith J.L. A simple test for dissimilar-metal welds, Welding Journal, V.62, N.6, p.154s-159s. 1983.



24. Lalonde, D. Austenitic Manganese Steel. Manganese Steel. htm. Página Webb. 2000. <http://mypage.direct.ca/s/sdl/>
25. Leyva, B. Investigación sobre el endurecimiento del acero al alto manganeso (Hadfield), mediante explosivos. Trabajo de Diploma. ISMMMoa. Facultad de Metalurgia y Electromecánica. 2003
26. Lippold, J.; Kotecki, D., Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steel. EE.UU: John Wiley & Sons Inc, 2005.
27. Lundin D. Dissimilar metal welds transition joints literature review, Welding Journal, V.61, N.2, p. 58s-63s. 1982.
28. 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.
29. 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.
30. Madhusudan, G.; Srinivasa, R., Microstructure and mechanical properties of similar and dissimilar stainless steel electron beam and friction welds, International Journal of Advance Manufacturing Technology, 2009, Vol 45, N<sup>o</sup> 5, p. 875 – 888. ISSN: 1433-3015.
31. Mangonon, P., Ciencia de materiales: Selección y diseño. Pearson Educación. México. 2001, p. 563 - 580.
32. Meo M., Vignjevic R. Welding Simulation Using FEA. Vignjevic College Of Aeronautics, Cranfield University, Bedford, UK, MK 43 0AL 1999.
33. Meriño, G. Conformación, soldadura y endurecimiento de metales con explosivos. Reporte de aplicación. Cenic. La Habana. 1977
34. Metzger G., Lison R. Electron beam welding of dissimilar metals, Welding Journal, V.55, N.8, p. 230s-240s. 1976.
35. Micharelis P. Minimization of welding residual stress and distortion in large structure. The Penn State University, University Park. P.A., 2003. Disponible en: <http://www.me.psu.edu/micharelis/pubs/wj99.pdf> acceso: marzo 2004.



36. Mutlon, P., Rolling contact fatigue in railway under high axis loads. *Wear*. 144 (28) 139 – 152, 1992.
37. Nelson D.E., Baeslack III W.A., Lippold J.C. Characterization of the weld structure in a duplex stainless steel using color metallography, *Metallography*, V.18, p. 215-225. 1985.
38. Oystein G., Modelación Metalúrgica de la soldadura. 2da Ed. P 509 – 526. Instituto de Materiales, Londres, Inglaterra. 1994.
39. Otaño, N. J. Fragmentación de rocas con explosivos. Editorial Félix Varela. La Habana. 1998.
40. Parody, G. Investigación sobre el endurecimiento del acero Hadfield por el método de explosivos. ISMMMoA. Facultad de Metalurgia y Electromecánica. 1995.
41. Parlane A. Origin and nature of residual stress in Welded Joints. Welding Institute. 1980.
42. Pernia, J. Manual de perforación y voladura de rocas. IGME. Madrid. 1988.
43. Pero-Sanz, J., Ciencia de los materiales. Metalurgia Física: Estructura y Propiedades, Editorial DUSSAT SA, 3ra Edición. España. 2000. pp 393 – 502.
44. 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*, V.13, N.4, p.363-377. 2008.
45. Ricks R., Howell, P., Barrite, G. The nature of acicular ferrite in HSLA steel weld metals, *Journal of Materials Science*, V.17, p. 732-740. 1982.
46. 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*, V.223, p. 1502-1523. 2009.
47. Sawhill, J., Welding HSLA line pipe steels, *Metallovedenie*, N.7, p. 56-60. 1977.
48. Xiaoyan, Z; Yujiao, L. Effect of chromium on phase structure of austenite manganese steel. Department of Mechanical Engineering, GUT, Guiyang 550003. Página Webb. Enero del 2001. Disponible en la World Wide Web <http://power.luneng.com/power/library/gtyjxb/gtyj99/gtyj9903/990310.htm>
49. Zhang W., Elmer J.W., DebRoy T. Integrated modelling of thermal cycles, austenite formation, grain growth and decomposition in the heat affected zone of carbon



steel, Science and Technology of Welding and Joining, V.10, N.5, p.574-582. 2005.

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