

República de Cuba
Ministerio de Educación Superior
Instituto Superior Minero Metalúrgico
Facultad de Metalurgia y Electromecánica

Tesis en opción al título de Master en
Electromecánica

**Título: Investigación sobre el endurecimiento mediante explosivos, del
acero al manganeso empleado en los equipos de laboreo minero.**

Autor: Ing. Miguel Angel Caraballo Nuñez

Tutor: Dr. Benito Casals García.

Moa
“Año del 40 Aniversario del triunfo de la Revolución”

DEDICATORIA

A mi hijo Raudelkis, que le sirva de ejemplo.

A mis padres y hermanas, por el aliento que me motiva.

A mi esposa, por su comprensión y apoyo.

A nuestra revolución, por las posibilidades que me ofrece.

AGRADECIMIENTOS

A los Drs. Benito Casals y Rafael Pérez Barreto, MsC Marcos Medina y Lic. Arístide Legrá por su asesoría científica y disposición desinteresada para ofrecerme ayuda.

Al MsC. Mario Feliu por su colaboración.

A todos los que de un modo u otro contribuyeron con el desarrollo de mi trabajo.

INDICE

RESUMEN

Capitulo I .- INTRODUCCION

- I.1.- Planteamiento del problema
- I.2.- Fundamentos teóricos y antecedentes investigativos
 - I.2.1.- Mecanismo microestructural del desgaste
 - I.2.2.- Mecanismo macroestructural del desgaste
 - I.2.3.- Modo de acción de los distintos tipos de desgaste
 - I.2.4.- Revisión bibliográfica
- I.3.- Hipótesis científica. Objetivos y tareas del trabajo

Capitulo II.- MATERIALES Y METODOS

- II.1.- Diseño teórico de la investigación
- II.2.- Material y equipamientos auxiliares
 - II.2.1.- Caracterización del acero al manganeso
 - II.2.2.- Elaboración mecánica de las probetas
- II.3.- Técnica operatoria
 - II.3.1.- Algunas consideraciones para el trabajo con explosivos
 - II.3.2.- Descripción del proceso experimental

Capitulo III.- RESULTADOS

- III.1.- Ensayos de dureza
- III.2.- Procesamiento estadístico y análisis de los resultados
 - III.2.1.- Análisis de varianza
 - III.2.2.- Análisis de regresión
 - III.2.3.- Análisis de optimización
 - III.2.4.- Análisis metalográfico
- III.3.- Aplicaciones industriales
 - III.3.1.- Tecnología de endurecimiento del diente
- III.4.- Valoración cualitativa del efecto técnico, económico y social de los resultados

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

BIBLIOGRAFIA

ANEXOS

RESUMEN

Se utiliza un método matemático estadístico de planificación de experimentos para la investigación del comportamiento, antes y después de una explosión, del acero al alto manganeso (Hadfield), y se obtiene la correlación y regresión entre las variables de entrada que intervienen en el proceso: velocidad de detonación (**D**), espesor de la muestra (**b**) y tipo de tratamiento térmico (**k**), y la dureza (**HB**) como variable de salida. El análisis de optimización realizado al modelo matemático que se obtiene, muestra los mejores resultados para **D** = 3 000 m/s, **b** = 5.09 cm y **k** = 2. Se establecen los parámetros tecnológicos del proceso de endurecimiento mediante una explosión del diente de la pala excavadora ESH – 5 / 45 M empleada en la extracción del mineral laterítico de la mina de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara, y se muestran las potencialidades del método y las condiciones creadas, para el desarrollo a escala industrial de los trabajos de endurecimiento mediante una explosión de otras piezas y agregados de los equipos de laboreo minero que requiere la industria cubana del níquel, obtenidas de acero Hadfield. La valoración cualitativa del efecto técnico, económico y social de los resultados ofrecen alentadoras perspectivas sobre la aplicación industrial de la propuesta.

SUMMARY

A statistical mathematical method of planning of experiments is used for the investigation of the behavior, before and after an explosion, of the steel to the high manganese (Hadfield), and it is obtained the correlation and regression among the entrance variables that intervene in the process: detonation speed (**D**), thickness of the sample (**b**) and type of thermal treatment (**k**), and the hardness (**HB**) as exit variable. The analysis of optimization carried out to the mathematical pattern that one obtains, shows the best results for **D** = 3 000 m/s, **b** = 5.09 cm and **k** = 2. The technological parameters of the hardening process settle down by means of an explosion of the tooth of the excavating shovel ESH - 5 / 45 M used in the extraction of the lateritic mineral of the mine of the Company Major Ernesto Che Guevara, and the potentialities of the method and the created conditions are shown, for the development to industrial scale of the hardening works by means of an explosion of other pieces and attachés of the teams of mining laboreo that it requires the Cuban industry of the nickel, obtained of steel Hadfield. The qualitative valuation of the technical, economic and social effect of the results offers encouraging perspectives on the industrial application of the proposal.

CAPITULO I

INTRODUCCIÓN

I.1.- Planteamiento del Problema.

La Industria del Níquel con 60 años de creada en Cuba constituye uno de los principales renglones de nuestra economía. El incremento de la eficiencia y la diversificación de su producción en la búsqueda de productos más competitivos, demanda de tecnologías y con ello equipos y aparatos para su desarrollo. El equipamiento utilizado se encuentra en fase de deterioro progresivo, exigiendo grandes esfuerzos para sustituir y recuperar los dispositivos, partes y piezas que conforman los componentes principales del equipamiento.

En la actualidad se están presentando problemas de deterioro prematuro por abrasión e impacto del material empleado en agregados y piezas de equipos de laboreo minero tales como los dientes de las palas excavadoras, los martillos de las trituradoras y las bolas de los molinos entre otras. Todos estos agrados y piezas muestran como defecto principal el *desgaste* intenso que sufren al entrar en contacto con el mineral, lo que no garantiza las condiciones de longevidad durante el servicio de operación, e implica pérdidas económicas considerables y un efecto negativo en la calidad ambiental de las secciones de trituración y molienda y los diversos frentes mineros.

A pesar de la gran variedad de factores que influyen en la situación planteada, tales como: tipo del mineral laterítico, régimen de explotación, etc, se distingue por su significación en el alargamiento del período efectivo de trabajo de estos elementos, las propiedades mecánicas y tecnológicas que puedan desarrollar. Una de estas propiedades es la *dureza*, la cual alcanza valores considerables, que debían garantizar las condiciones de longevidad durante la explotación de los mismos, prácticamente al finalizar su etapa de vida útil.

El fenómeno del desgaste es tema de gran interés y la necesidad de incrementar la dureza para contrarrestarlo, hacen que resulte de gran importancia hallar en cada caso el material

adecuado para determinadas características y parámetros de trabajo. El acero al alto manganeso (Hadfield) logra unificar las propiedades de resistencia al desgaste y de resistencia al impacto y en consecuencia constituye el material idóneo para garantizar la asignación de servicio de estas piezas y agregados, no obstante en las condiciones en que se ofertan en el mercado dichos elementos fabricados de este material, no se garantiza la dureza requerida antes de su puesta en explotación.

Teniendo en cuenta todo lo anteriormente referido, se declara la siguiente **Situación Problémica:**

Existencia de deterioro prematuro por abrasión e impacto del acero al alto manganeso (Hadfield), empleado en los accesorios de los equipos de laboreo minero tales como dientes de las palas excavadoras, martillos de las trituradoras y las bolas de los molinos entre otras. Constituye una contradicción la dureza requerida antes de la puesta en explotación y los valores promedios de dureza con los que se exponen al trabajo. Sólo al término de su vida útil se alcanzan valores de dureza que debían garantizar las condiciones de longevidad durante el servicio de operación.

I.2.- Fundamentos teóricos y antecedentes investigativos.

El desgaste es uno de los efectos más destructivos a que están sometidos los metales, el cual se puede definir como el deterioro ocurrido a consecuencia del uso o del medio ambiente, y puede considerarse de forma general un fenómeno superficial.

W. N. Kaszezejew y W. M. Glazkow, al investigar el desgaste de los metales en una corriente de granos abrasivos, confirmaron que existe una estrecha relación entre la resistencia al desgaste y las fuerzas de los enlaces en la red cristalina de los metales.

Mecanismo microestructural del desgaste.

Sabemos que los metales son cuerpos cristalinos y, como tales, están constituidos por un conjunto de granos, cada uno de los cuales se hallan ordenados en cierta distribución geométrica, guardando sus posiciones determinada posición de simetría.

Estos átomos se hallan sujetos a sus posiciones (vibrando alrededor de ellas por su energía cinética) en virtud de las fuerzas de atracción y repulsión que se equilibran.

Cuando el metal soporta una carga todos los cristales se hallan sometidos a un estado de tensión - efecto de los esfuerzos que les corresponde soportar.

Veamos como se comportan, pues, un cristal aisladamente y luego un conjunto. Cuando un cristal (Figura 1a) se halla sometido a la acción de un esfuerzo p todos sus átomos se hallaran en un estado de tensión y sobre una sección AB del cristal se desarrollan esfuerzos normales σ y tangenciales τ que dependen del esfuerzo p . Los esfuerzos tangenciales τ (figura 1b) tienden a cizallar el cristal, según la sección AB, deslizando un fragmento sobre otro. Los esfuerzos normales σ (figura 1c) tienden a separar (o a juntar) las dos porciones del cristal seccionado por AB. El que lo logren o no dependerá de los valores de σ y τ que a su vez dependerán de p y de la dirección de AB.

Los esfuerzos tangenciales aunque producen ruptura de los enlaces atómicos no ocasionan, en general, la ruptura del cristal metálico, pues la sencillez y regularidad de la distribución atómica da lugar a que la red se restablezca a cada avance de un espacio interatómico, con lo que la cohesión se restablece y el efecto de los sucesivos deslizamientos produce una deformación plástica.

Por el contrario, los esfuerzos normales al vencer la cohesión producen la ruptura total de la red cristalina, ya que ningún restablecimiento de la cohesión es posible.

Figura 1.- Representación de un cristal bajo carga.

Al aplicar estas condiciones a un conjunto de cristales o agrupación de granos cristalinos diversamente orientados, se puede observar que su comportamiento real dista mucho del que debiera ser. Esta anomalía reside en el enorme efecto reforzador que sobre el deslizamiento cristalino ejercen los contornos de los granos y otro tanto sucede con los cambios de dirección que las diversas orientaciones de dichos granos imponen, todo lo cual da lugar a un considerable incremento de la resistencia a la deformación.

Es de vital importancia conocer la influencia que ejercen las tensiones en las diferentes capas del metal. En la Figura 2 se muestra la distribución de cargas en cuerpos en contacto. En esta figura se observa la variación de los componentes de las tensiones con la profundidad. Es evidente que las tensiones de compresión a lo largo del eje Z (σ_z) son máximas sobre la capa superficial (P_0) y disminuyen con la profundidad. En el eje Y (σ_y) son también máximas sobre la superficie y con un valor próximo a P_0 , llegando a ser nulas cuando la profundidad es equivalente 1.5 veces el ancho del contacto (2 b). Y en el eje X (σ_x) alcanza también un máximo en la superficie aunque solo de $0.6 P_0$, decreciendo igualmente con la profundidad. La tensión de cizalladura (τ_{yz}) es nula en la superficie pero alcanza un valor máximo de $0.3 P_0$, a $0.78 b$.

Figura 2.- Magnitud de las tensiones en función de la profundidad Z por debajo de la superficie ($Z = 0$).

El análisis de la figura 2 nos permiten llegar a la conclusión de que al tomar la tensión de cizallamiento (τ_{yz}) su valor máximo, la cohesión tecnológica entre los enlaces que forman los granos cristalinos llega a su valor mínimo. En este instante ocurre la ruptura de los enlaces en la superficie o a profundidades pequeñas de esta, y estaremos en presencia del fenómeno de desgaste.

Mecanismo macroestructural del desgaste.

En todos los materiales existen siempre aunque sea a microescala defectos superficiales medibles o asperezas, y se puede considerar que las superficies se encuentran en contacto por medio de estas y las zonas de apoyo son el centro de las deformaciones plásticas. La carga global no se reparte sobre la totalidad de la superficie de contacto, sino sobre algunos puntos, es decir, que solo una superficie reducida soporta efectiva y plásticamente la carga.

Por el efecto del movimiento de estas deformaciones que en general sobrepasan el límite elástico, combinada con la elevación de la temperatura que los disminuye rápidamente en las zonas de contacto, se engendran instantáneamente fenómenos físicos (difusión, temple, etc.), transformaciones de fase, hay una trituración de la estructura cristalina casi hasta un estado amorfo de la superficie en una profundidad de 0.1 - 0.5 μm conocida como capa de Bailby. Más profundamente hay una estructura deformada de 5 - 25 μm , y de 0.02 - 0.5 mm la estructura permanece invariable. Además la elevación de la temperatura puede llegar a alcanzar la fusión de uno de los metales en contacto, aunque sea de forma fugaz y puntual originándose las microsoldaduras.

Para poder seguir siendo posible el movimiento, deberán cizallarse la microsoldaduras. Si la resistencia a la cizalladura de estas soldaduras es superior a la resistencia a la cizalladura de uno de los metales en contacto, para que continúe el movimiento deben arrancarse partículas del metal más blando y a la vez arrastrarse y así, cada vez, se produce más transporte sobre el metal más duro deteriorándose la superficie del más blando y al cabo del tiempo la fricción se realiza sobre el metal más blando.

Si las soldaduras en la entrecara son más frágiles que el metal más blando, se desgarran al seguir el movimiento y no habrá transporte de un metal sobre otro, y será débil la lesión de la superficie.

En la práctica real el contacto de las superficies no puede ser puntual, porque las presiones serían enormes, produciendo al mismo tiempo deformaciones hertzianas que alcanzan capas muy profundas.

Modo de acción de los distintos tipos e desgaste.

Como se conoce hay tres tipos de desgaste, los cuales no suelen presentarse de forma aislada, sino conjuntamente y aún en etapas sucesivas, dependiendo de las condiciones de trabajo a que esta sometida la pieza. La acción conjunta de los distintos tipos de desgaste conduce a la destrucción del estado superficial del material o la pieza.

El desgaste metálico y abrasivo están caracterizados por el deslizamiento y arranque de la superficie metálica, la única diferencia radica en que uno ocurre entre metales y el otro con un abrasivo metálico o no metálico. Por lo que el modo de acción será análogo en los dos casos.

En el primer instante del funcionamiento, se caracteriza por la destrucción mecánica de las asperezas, que son despuntadas hasta un aumento de la superficie real de contacto y hay un reparto suficiente y regular de la carga. Este es el período más difícil del rodaje, debido a los efectos dinámicos de choque, entre las asperezas y los efectos térmicos de calentamiento microlocalizado. El gradiente térmico creado, da lugar a la dilatación diferencial de la pieza y como consecuencia a la creación de tensiones y además disminuye el límite elástico. Todo esto puede dar lugar a un período en el que el deterioro de la superficie puede llegar a ser elevado o mantenerse dentro de los límites captados en dependencia de la resistencia del metal a choques térmicos.

Luego de la destrucción mecánica de las asperezas en el caso de que las cargas sean pequeñas y exista fricción, siempre habrá cizalladura y las débiles microsoldaduras formadas se rompen en la misma entrecara sin desgarrar los metales presentes. Se trata de un deterioro mecánico debido a las interacciones atómicas o moleculares, en la que sólo

hay que cortar una transferencia de metal de molécula a molécula. En este caso el desgaste es pequeño. Si uno de los metales del par de fricción es más blando, generalmente la ruptura no tiene lugar en la entrecara sino en gran proporción en el metal más blando y solo ocasionalmente en el más duro.

Ahora bien, si las cargas son importantes con fricción, durante el deslizamiento se produce arrastre y acumulación de material delante de las asperezas, aumentando las áreas de contacto, las microsoldaduras son muy densas y se acumulan esfuerzos crecientes hasta el deterioro total de la superficie, sin regeneración posible, haciendo inservible la pieza.

En el caso de sobrecargas y fricción pura, la elevación de la temperatura en la zona de contacto producida por todas estas resistencias mecánicas, alcanza valores que pueden producir transformaciones estructurales deseables o no, y cuyo efecto sobre el desgaste, puede ser importante.

Si se logra en el proceso de fricción una estructura de martensita con un 5 -10 % de austenita retenida, el desgaste será pequeño.

Lo anterior puede provocar el efecto de endurecimiento debido a las tensiones normales y tangenciales que se crean, esto se traduce como un aumento de la acritud en las subcapas del material.

Cuando la deformación alcanza un valor crítico por encima del límite de acritud, el material se rompe por fractura frágil. Durante este proceso las tensiones de cizalladura, producen deslizamiento en el interior de los granos cristalinos o ruptura de los mismos, y crean tensiones de cizalladura que alcanzan un valor máximo en algún punto, apareciendo deformaciones permanentes o fracturas, punto a partir del cual se inicia el fallo del material.

Revisión bibliográfica.

Han sido varias las vías utilizadas para combatir el desgaste abrasivo y frenar las pérdidas que el mismo ocasiona. La resistencia al desgaste se consigue con una alta dureza superficial. En esta dirección han trabajado varios investigadores.

Son diversos los métodos para el endurecimiento de los metales. Clauser [11] realiza una descripción detallada de varios de ellos:

- ◆ El *endurecimiento por dispersión*, según los metalurgistas puede ocurrir de dos formas; las aleaciones forjadas o fundidas son endurecidas por fases dispersas cuando se precipitan partículas finas desde la matriz. La otra variante corresponde a aleaciones a las que se añade una segunda fase insoluble, esta última es la más aceptada. En todo caso los aspectos comunes son: las aleaciones se preparan por técnicas de pulvimetalurgia; la fase dispersa es dura e insoluble, y las aleaciones se consolidan por extrusión o trabajos similares de alta proporción de deformación. Herrera [23] considera que a este respecto resulta muy efectivo el endurecimiento producido por impacto. La mayoría de los trabajos realizados en este sentido, y donde han sido obtenidos los mejores resultados, han estado dirigidos al reforzamiento o a mejorar las propiedades de polvos metálicos lo cual no es el caso que nos ocupa.

- ◆ El *endurecimiento por precipitación* se consigue mediante un tratamiento térmico en las dos etapas siguientes:
 1. Tratamiento de solubilización o calentamiento de la aleación por encima de la línea de solubilidad, esto es, el límite de solubilidad de la fase sólida, con el fin de introducir en solución sólida todos los constituyentes de la aleación. La aleación se mantiene a la temperatura del tratamiento de solubilización durante un período conveniente, y entonces se enfría rápidamente para retener la estructura correspondiente a temperatura elevada, es decir una solución sólida sobresaturada a temperatura ambiente.
 2. Maduración o precipitación de una segunda fase de la solución sólida sobresaturada producida por el tratamiento de solubilización. El envejecimiento de la solución sólida

sobresaturada permite la formación de un precipitado y aumenta la resistencia de la aleación. El procedimiento es también conocido por *endurecimiento por envejecimiento*. La reacción de precipitación se acelera mediante un aumento de la temperatura.

El endurecimiento por precipitación actúa interfiriendo los planos de deslizamiento en los cristales metálicos y, por esta razón aumenta la resistencia del metal. Esto sólo es posible si el precipitado es coherente, es decir, precipitados no separados de la matriz por un límite de grano.

Las propiedades a temperatura ambiente de las aleaciones endurecidas por precipitación son competitivas con las de las aleaciones que aumentan su resistencia por un mecanismo de transformación de fase. No obstante según se aproxima a su temperatura de solubilidad, una aleación endurecida por precipitación pierde resistencia, y es aquí según Peckner [11] dónde radica la limitación de este método. Para proporcionar resistencia por encima de la temperatura de solubilidad, se requieren diferentes aleaciones que aumenten su resistencia por mecanismos de endurecimiento por solubilización, endurecimiento por deformación o endurecimiento por dispersión, y esto encarecería notablemente el proceso.

- ◆ El tratamiento de solubilización ha sido ya descrito, como una etapa del endurecimiento por precipitación. Sin embargo es posible incrementar la resistencia de una aleación por si sola, formando una solución sólida, compleja, que contenga un gran número de elementos. El aumento de resistencia tiene lugar solamente en tanto se mantenga una solución sólida como única fase. Si se sobrepasa los límites de solubilidad, y se forma una segunda fase, los elementos en exceso no contribuyen al reforzamiento de la aleación. Por otro lado, de acuerdo con Spink [11] se obtienen los mejores resultados cuando el tamaño atómico de los elementos añadidos difiere en gran manera del de la matriz, y desafortunadamente los elementos que presentan las

mayores diferencias de tamaño atómico tienen la menor solubilidad mutua. Los inconvenientes referidos le restan posibilidades de generalización al método de *endurecimiento por solubilización*.

- ◆ El *endurecimiento por laser*, se produce siempre que la densidad de la energía aportada con el laser supere un cierto valor crítico. En este caso se obtiene una capa superficial que llega a fundir en el tratamiento, dando lugar a una estructura ledeburítica de muy alta dureza, obteniéndose por debajo de ella una segunda capa, también muy dura, de fundición martensítica.

De acuerdo con los trabajos de Maco [31] se obtienen variaciones de dureza en la microestructura introducida y en las profundidades afectadas por el tratamiento, al modificar tanto la densidad de potencia como la velocidad de pasada del laser.

Los lasers inducidos tienen una aplicación creciente para el procesado metalúrgico, y más concretamente para el endurecimiento por transformación de la superficie de los aceros y fundiciones de hierro. El principal inconveniente lo constituyen los requerimientos de equipamientos sofisticados para su aplicación, así como el dominio de los detalles de la tecnología, lo cual lo hace inalcanzable para países con economía subdesarrolladas o en vías de desarrollo.

- ◆ Para elevar la resistencia de los metales son ampliamente utilizados diferentes tipos de tratamiento térmico, los cuales constituyen adicionalmente a los métodos ya referidos otras formas de consolidación. En este sentido es ampliamente utilizado el temple, la cementación, etc. En todo caso es muy importante considerar la composición química y la estructura del material que será tratado térmicamente.

Para elevar la resistencia al desgaste se emplean materiales con características especiales. De acuerdo con los criterios de Guliaev [22], existe un acero austenítico

que en las condiciones de rozamiento ordinario acompañado de grandes presiones, tiene una gran resistencia al desgaste. Este es el acero al alto manganeso, llamado acero Hadfield (primer acero de aleación descubierto por Hadfield, empezó a utilizarse en la industria desde 1882 aproximadamente), contiene un 1.2 % de C y un 13 % de Mn (Γ_{13}). Este acero se utiliza fundido y con menos frecuencia, deformado en caliente, y posee la alta tenacidad y plasticidad típica de los aceros austeníticos al mismo tiempo que una resistencia bastante buena. La alta tenacidad de la austenita, al mismo tiempo que la suficiente resistencia mecánica y al desgaste, hacen del acero Hadfield un material insustituible para las piezas sometidas a desgaste y percusión simultáneamente.

El tratamiento térmico para lograr en este material el endurecimiento deseado, según Herrera [23] es un hipertemple consistente en una austenización alrededor de 1 000 °C seguida de enfriamiento rápido en agua u otro medio refrigerante. La dureza del material hipertemplado es de aproximadamente 200 HB, pero puede aumentar en servicio mediante endurecimiento por deformación. La experiencia del empleo de este material en las condiciones del laboreo minero demuestra que la dureza lograda en el austenizado puede llegar incluso a duplicarse, pero esto sólo es posible al término de la vida útil de las piezas y agregados. Este inconveniente podría ser resuelto aplicando procedimientos de deformación previa a la entrada en servicio de dichos elementos.

Según los propios trabajos de Herrera, la capacidad de endurecimiento por trabajo en frío de los aceros austeníticos al manganeso se ha atribuido a una transformación martensítica inducida mecánicamente, es decir en estos aceros se formaría martensita por deformación. Entre los mecanismos por los cuales endurecen los aceros tipo Hadfield, están la creación de defectos de empaquetamiento, maclado múltiple, transformación a martensita épsilon y transformación a martensita alfa. Sin embargo, existen diferencias de opinión sobre el mecanismo concreto de endurecimiento, e incluso sobre si se produce martensita durante el trabajo en frío.

- ◆ Existen otras formas o tecnologías para incrementar la resistencia al desgaste, entre las que se encuentra el *endurecimiento por deformación*.

A partir de los resultados expuestos por Jruschov en 1957, se discute entre especialistas en cuanto a la dureza incrementada en el material por la deformación plástica del mismo en la superficie desgastada.

De acuerdo con Lim [29] se ha demostrado que los metales simples de estructura cristalina cúbica son más desgastados que los que poseen una estructura hexagonal, y por tanto, menos endurecido por deformación plástica debido a que estos poseen un solo plano simple de desplazamiento normalmente activo, mientras que los cúbicos tienen una gran cantidad de planos equivalentes, multiplican el deslizamiento y las altas concentraciones de dislocaciones y por tanto, un alto trabajo de endurecimiento.

El endurecimiento por deformación aumenta la resistencia de las aleaciones endurecidas por precipitación de una fase.

El endurecimiento por deformación es el factor básico de tres métodos nuevos de consolidación: la deformación en la fase austenítica o ausformado, la laminación a temperaturas inferiores a 0 °C y la deformación con empleo de energía a gran velocidad.

Deformación en la fase austenítica o ausformado. Aún no se conoce por completo, en el aspecto técnico, la utilidad real del ausformado en la consolidación de los aceros, y es necesario realizar más investigaciones para hacer el proceso completamente práctico desde el punto de vista comercial.

De acuerdo con Clauser, para que pueda ser endurecido por deformación en la fase austenítica, el acero debe tener una región en forma de bahía en la parte del diagrama temperatura - tiempo que corresponde a la fase austenítica del acero (Entre 425 y 540 °C aproximadamente). La austenita se deforma en la región de la bahía y luego se enfría y transforma en martensita.

Los aceros que se han sometido a este esquema de deformación y transformación tienen una resistencia mayor que los que se templean y revienen en la forma convencional .

Existen tres métodos prácticos de deformación en la fase austenítica:

- a) *Laminado*. Es el método aplicado más frecuentemente; está restringido al conformado de las formas más sencillas.
- b) *Forjado*. Es un método prometedor, ya que con él es posible conformar secciones relativamente complejas que requieren poca cantidad de trabajo posterior.
- c) *Entallado en caliente*. Esta técnica se ha aplicado con éxito a la deformación en la fase austenítica de las envueltas de los motores de cohetes con propulsión sólida.

El método del ausformado presenta una desventaja: la soldadura con fusión destruye las propiedades obtenidas por deformación en la fase austenítica en la proximidad del depósito de soldadura y en la zona afectada por el calor.

Laminación a temperaturas inferiores a 0 °C. La resistencia del acero austenítico se puede aumentar grandemente por deformación a temperaturas inferiores a 0 °C.

El trabajo en frío según datos suministrados por la compañía Arde-Portland, aumenta la cantidad de tensión necesaria para el deslizamiento. Este hecho se puede relacionar con la teoría de la dislocación, ya que la red cristalina deformada del metal impide el movimiento de las dislocaciones y la dislocación bloqueada solamente puede

desplazarse si se incremento la tensión. De esta forma, un metal endurecido por deformación se puede someter a tensiones mayores que el mismo metal recocido antes de que ocurra la deformación.

Esto es de una importancia fundamental en la consolidación de los metales, tanto en los metales puros como en sus aleaciones. En el último caso, el efecto del trabajo en frío, superpuesto al efecto de endurecimiento por solubilización de la fase sólida, da lugar a la obtención de un metal más resistente que el que se podría producir por cualquiera de los dos tratamientos solos.

Hay que tener en cuenta lo siguiente: en la actualidad no se suministran comercialmente aceros laminados a temperaturas inferiores a 0 °C.

Deformación con empleo de energía a gran velocidad. En la actualidad este es el método de deformación de mayores perspectivas.

El uso de cargas de contacto puede lograr mayor profundidad de endurecimiento que los métodos convencionales y lo hace con menor deformación que el endurecimiento por trabajado en frío convencional.

El endurecimiento por explosivo es usualmente una operación sencilla y rápida, que puede realizarse en zonas apartadas sin necesidad de equipos sofisticados. Se puede usar para tamaños y formas de piezas que son inapropiadas en los métodos convencionales, y si se desea, el proceso se aplica sólo a una parte de la pieza en específico.

El uso principal en la industria de este proceso es en piezas de acero al alto manganeso austenítico, las cuales están sujetas a grandes impactos y a la abrasión, tales como: dispositivos de conexión de rieles, muelas de trituradoras, martillos y bolas de molinos, dientes de jaibas de excavadoras, etc.

El desarrollo de la tecnología de endurecimiento por explosivos, sólo ha sido posible en los países mas desarrollados del mundo, no obstante las referencias bibliográficas sobre esta tecnología y sus aplicaciones industriales son casi nulas.

En el mundo, sobre la base de estudios realizados a finales de la década del 40, se introdujo en la industria a escala comercial a mediados de los 50. En las investigaciones realizadas a través de diferentes bibliografías hemos llegado a la conclusión de que en nuestro país, no se ha empleado aún este método de endurecimiento, o al menos no han sido publicados sus resultados. La única referencia en este sentido lo constituye los trabajos del investigador Gabriel Meriño del CENIC [38].

Considerando no obstante, los escasos elementos técnicos que ha sido posible consultar y la experiencia práctica acumulada por nuestro grupo de investigación científica de Soldadura y Conformación por explosivos, hemos asumido el reto de la investigación sobre el endurecimiento del acero Hadfield con el uso de explosivos. Casals [10] expone en sus trabajos las potencialidades del método. Parody [42] muestran algunos resultados experimentales obtenidos preliminarmente. Cobas [12] describe el proceso de endurecimiento aplicado a una pareja de dientes de las palas excavadoras. Caraballo [9] sintetiza los resultados alcanzados y propone nuevas perspectivas.

I.1.- Hipótesis científica. Objetivos y tareas del trabajo.

Teniendo en cuenta los aspectos teóricos reseñados en el epígrafe anterior, así como los resultados de la revisión bibliográfica realizada, hemos formulado preliminarmente la siguiente **Hipótesis Científica**:

El acero al alto manganeso (Hadfield), incrementa su dureza en presencia de cargas de impulso provocadas por la acción de una sustancia explosiva, existiendo

correlación entre las variables de entrada D , b y k , y la variable de salida HB que intervienen en el proceso.

A fin de confirmar esta hipótesis científica, se realizan las corridas experimentales que se exponen en el capítulo II según el diseño de experimento escogido, y posteriormente en el capítulo III se analizan sus resultados; se describe además la tecnología de endurecimiento de los dientes de las palas excavadoras teniendo en cuenta los resultados experimentales obtenidos. El **Objetivo** que se pretende alcanzar es el siguiente:

Establecer los parámetros tecnológicos del proceso de endurecimiento del acero al alto manganeso (Hadfield), mediante explosivos.

Para garantizar el cumplimiento de este objetivo nos situamos como **Tareas del trabajo** lo siguiente:

- ◆ ***Obtener la correlación y regresión entre las variables de entrada D , b y k y la variable de salida HB , que intervienen en el proceso de endurecimiento del acero al alto manganeso (Hadfield) mediante explosivos.***
- ◆ ***Establecer la tecnología para el endurecimiento mediante explosivos, del diente de la pala excavadora.***

CAPITULO II

MATERIALES Y METODO

II.1.- Diseño teórico de la investigación.

Para el desarrollo de la parte experimental de la investigación, se utilizan probetas de acero al manganeso fundidas en la Empresa Mecánica del Níquel, y se someten a la acción de cargas explosivas en diferentes condiciones, a fin de evaluar la influencia de aquellos factores que pudieran tener un efecto significativo en la calidad del proceso de endurecimiento.

Teniendo en cuenta que no se dispone de una expresión matemática que haya sido publicada, que permita fijar de antemano los valores de aquellas variables que definan la calidad óptima del proceso de endurecimiento del acero al alto manganeso (Hadfield), nos proponemos realizar el tratamiento matemático de las variables involucradas en el proceso que después de un estudio preliminar de tema, consideramos que son las más importantes. Estas son: la velocidad de detonación **D**, el espesor de la muestra **b** y el tipo de tratamiento térmico **k**. A cada una de las variables se le asignan 3 niveles.

Las variables **D**, **b** y **k** fueron escogidas por las consideraciones siguientes:

Velocidad de detonación **D**: Es el principal parámetro que caracteriza una sustancia explosiva, de ella dependen casi todas sus características energéticas; es una característica fácil de medir por un método muy sencillo.

Aplicando el método de Dautriche el cual aparece en [40] adaptado por Casals [10] a las condiciones reales de la geometría de la carga, fueron realizados los experimentos necesarios y se obtuvo la ecuación de regresión que relaciona el espesor de la sustancia explosiva, **H** con su velocidad de detonación, **D**, para la Amonita 6JV A- 40.

En este caso, como elemento explosivo con velocidad de detonación conocida se toma un cordón detonante con una velocidad de detonación igual a 6 000 m/s.. Como elemento fusible se tomaron, en todos los casos, planchas de plomo de 500 x 100 x 6 mm. La distancia, desde un punto de contacto al otro del cordón con la sustancia que se investiga, se mantuvo fija, e igual a 300 mm. El punto medio del cordón detonante se sitúa sobre la plancha testigo de plomo sobre la que se hace una marca de referencia. Realizada la detonación de la sustancia que se investiga se mide la distancia desde el punto marcado en la plancha hasta el punto donde se encuentran los dos frentes de la onda de detonación del cordón detonante. Posteriormente se calcula la velocidad de detonación desconocida, aplicando la expresión que se expone en la literatura en correspondencia con el método. Los resultados de los experimentos se exponen en [10]

Se muestran a continuación los resultados obtenidos después del procesamiento de los datos para $H = f(D)$, para la Amonita A-40.

$$H_{40} = -1375.373 - 0,1774 D + 221.92 \ln D + 1.344 \cdot 10^{-8} D^{2.92}$$

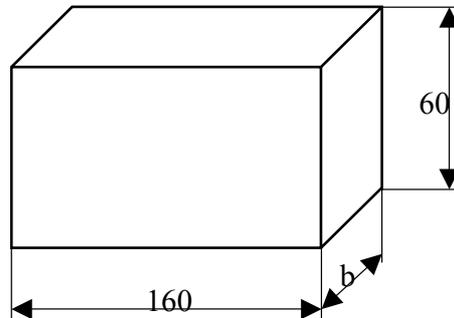
La velocidad de detonación se encuentra entre límites determinables y dependientes del explosivo seleccionado. El límite inferior está determinado por la altura mínima del explosivo depositado para que se produzca la detonación, el límite superior está determinado en el caso de la Amonita 6JV A-40, por el valor del espesor del explosivo a partir de la cual la velocidad de detonación (D) se hace asintótica respecto al eje de las H.

Los niveles escogidos de esta variable son:

- Nivel 1: 1 500 m/s
- Nivel 2: 2 250 m/s
- Nivel 3: 3 000 m/s

Espesor de la muestra b : Es una de las dimensiones de la probeta objeto de estudio. Se estima en ella, una influencia considerable sobre la cantidad de sustancia explosiva a utilizar, y en consecuencia sobre el efecto de endurecimiento que se produzca.

Las dimensiones generales de la probeta utilizada se muestran a continuación:



Para esta variable adoptamos los siguientes niveles:

- Nivel 1: 1.50 cm
- Nivel 2: 3.75 cm
- Nivel 3: 6.00 cm

La dimensión que representa el nivel superior está determinado por la altura de la probeta, teniendo en cuenta que no debe ser mayor que esta. El nivel inferior se determina por razones de índole práctico a los efectos de facilitar las mediciones de dureza.

Tipo de tratamiento térmico **k**: Es una variable cualitativa que representa en cada uno de sus niveles, un medio de enfriamiento diferente para el tratamiento térmico de austenizado realizado a $1\ 100\ ^\circ\text{C}$, con un tiempo de permanencia de la probeta en el horno aproximadamente igual a 1,4 veces su espesor **b**.

Las características de los medios refrigerantes utilizados se muestran en la siguiente tabla:

Medios refrigerantes	Densidad (g/cm^3)	Viscosidad (cp)	Intervalo de temperatura de ebullición ($^\circ\text{C}$)	Capacidad refrigerante relativa	Velocidad de enfriamiento. ($^\circ\text{C}/\text{s}$)
Sol. NaCl (10 %)	1.0707	1.35	650 - 100	1.23	600 - 500
Agua	0.9989	1.14	400 - 100	1.00	200 - 172
Aceite	1.5500	3.45	500 - 250	0.20	130 - 103

La elección de cada uno de los niveles está determinada por el mayor o menor grado de presencia de carburos en la estructura que se obtiene, o lo que es lo mismo, por la mayor o menor homogeneidad de estructura de austenita en cada caso. Resulta evidente que mientras mayor sea la velocidad de enfriamiento y la capacidad refrigerante relativa, menor será la posibilidad de formación de carburos y se obtendrá una estructura con un mayor porcentaje de austenita homogénea.

Los niveles de esta variable son:

- Nivel 1: Probetas enfriadas en Solución de NaCl al 10 %
- Nivel 2: Probetas enfriadas en agua
- Nivel 3: Probetas enfriadas en aceite

Para la confirmación de la hipótesis científica se escogió un diseño de experimento factorial completo con las tres variables y los tres niveles en cada una, que han sido referido anteriormente. Este método de planificación estadística de la investigación, establece el número de ensayos (N) a realizar; en nuestro caso $N = 3^3 = 27$.

La matriz de este diseño de experimento se muestra a continuación:

No	X ₁	X ₂	X ₃	D	b	k
1	1	1	1	3000.0	6.00	3.00
				0		
2	1	1	0	3000.0	6.00	2.00
				0		
3	1	1	-1	3000.0	6.00	1.00
				0		
4	1	0	1	3000.0	3.75	3.00
				0		
5	1	0	0	3000.0	3.75	2.00
				0		
6	1	0	-1	3000.0	3.75	1.00
				0		
7	1	-1	1	3000.0	1.50	3.00
				0		
8	1	-1	0	3000.0	1.50	2.00
				0		
9	1	-1	-1	3000.0	1.50	1.00
				0		

10	0	1	1	2250.0	6.00	3.00
				0		
11	0	1	0	2250.0	6.00	2.00
				0		
12	0	1	-1	2250.0	6.00	1.00
				0		
13	0	0	1	2250.0	3.75	3.00
				0		
14	0	0	0	2250.0	3.75	2.00
				0		
15	0	0	-1	2250.0	3.75	1.00
				0		
16	0	-1	1	2250.0	1.50	3.00
				0		
17	0	-1	0	2250.0	1.50	2.00
				0		
18	0	-1	-1	2250.0	1.50	1.00
				0		
19	-1	1	1	1500.0	6.00	3.00
				0		
20	-1	1	0	1500.0	6.00	2.00
				0		
21	-1	1	-1	1500.0	6.00	1.00
				0		
22	-1	0	1	1500.0	3.75	3.00
				0		
23	-1	0	0	1500.0	3.75	2.00
				0		
24	-1	0	-1	1500.0	3.75	1.00
				0		
25	-1	-1	1	1500.0	1.50	3.00
				0		
26	-1	-1	0	1500.0	1.50	2.00
				0		
27	-1	-1	-1	1500.0	1.50	1.00
				0		

En cada una de las 27 probetas se realizaron 3 mediciones de dureza, a una distancia la primera de 40 mm de la cara donde fue colocado el detonador (HB₁), la segunda a 40 mm de la primera (HB₂), y la tercera a 40 mm de la segunda (HB₃). Cada uno de estos valores de dureza en cada una de las posiciones referidas, constituye la media de 5 mediciones. Finalmente el total de mediciones a considerar es 81. En el Capitulo III se reflejará el procesamiento estadístico-matemático de la matriz de resultados que se obtiene.

II.2.- Equipamiento y Materiales Auxiliares.

Caracterización del acero al manganeso.

El acero al alto manganeso o acero Hadfield es un acero que después de la colada posee una estructura austenítica con carburos excesivos $(Fe,Mn)_3C$, que se forman en los bordes de los granos y disminuyen la resistencia y ductibilidad del acero.

La composición química del mismo (según norma GOST) es la siguiente:

C = 1 – 1.5 %

Mn = 11 – 15 %

Mo = 0.2 %

Si = 0.6 – 0.8 %

P y S < 0.02 %

El resto de Fe y otros componentes de aleación.

Según su composición química se puede considerar como un acero hipereutectoide altamente aleado. Posee una porosidad marcada y presencia de rechupe exterior.

El acero al alto manganeso austenítico fundido posee un umbral de fragilidad en frío claramente definido, con la particularidad de que este umbral se eleva a medida que aumenta el contenido de fósforo. Por esto en el acero Hadfield que se emplea para piezas de fundición de gran responsabilidad está reglamentado rigurosamente el contenido de fósforo (no más del 0.02 %).

Las probetas utilizadas en la investigación se obtienen en la Empresa Mecánica del Níquel a través de un proceso de fundición en los hornos de inducción. Las piezas y agregados de los equipos de laboreo minero objetos de nuestra atención, también son fundidas (en su mayor parte en el extranjero) y generalmente son puestas en explotación en estado de recocido, o sea durante su proceso de fabricación el tratamiento térmico no se realiza. El tratamiento térmico consiste en el temple desde 1 050 – 1 100 °C, y un posterior

enfriamiento rápido que detenga la precipitación de carburos y forme una estructura puramente austenítica. Posteriormente es necesario la aplicación de un revenido bajo para el alivio de tensiones internas producidas en el austenizado.

Las características mecánicas aproximadas de este acero, fundido y templado para conseguir la austenización completa son las siguientes:

Tensión límite de resistencia: 800 – 900 MPa

Tensión límite de fluencia: 260 – 400 MPa

Alargamiento y estricción relativa: 40 – 50 %

Dureza: 180 – 200 HB

A pesar de su relativa baja dureza, el acero Hadfield posee una resistencia al desgaste extraordinariamente alta cuando el rozamiento va acompañado de presión y golpes. Esto se explica debido a que el proceso de desgaste va acompañado de la deformación plástica del metal; en el caso específico del Hadfield, la deformación provocará en el seno de la pieza la reorganización de la estructura (acritud).

La acritud se define como la capacidad de la red cristalina de deformarse y dividir los bloques de la estructura en mosaicos.

La capacidad de deformación elevada de este acero, le proporciona la ocurrencia de cambios estructurales significativos y la estructura obtenida posee las propiedades mecánicas requeridas para piezas sometidas a impacto y abrasión simultáneamente.

La capacidad que tiene el acero Hadfield para adquirir acritud (ver figura 3), es mucho mayor que la de los aceros ordinarios con la misma dureza.

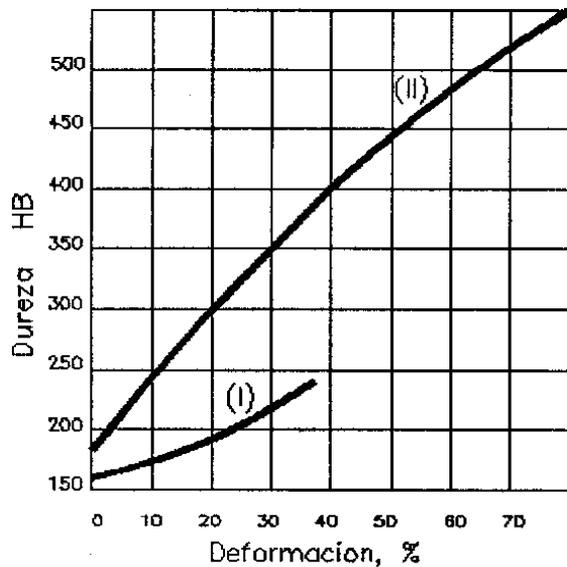


Figura 3.- Influencia de la acritud en la dureza del acero al carbono 40 (I) y del acero Hadfield(II).

Se suponía también que un endurecimiento tan alto por deformación plástica era debido a la formación de martensita de deformación, pero las investigaciones más recientes muestran que en las mayores deformaciones, incluso en las que se efectúan a bajas temperaturas, no se forma más de un 0,5 - 1.5 % de martensita, cantidad que no puede elevar mucho la dureza del acero. En realidad sucede que la austenita es una estructura cúbica centrada en las caras que posee cuatro planos de deslizamiento en tres direcciones cada uno para un total de doce sistemas de deslizamientos, con un 74 % del volumen ocupado por los átomos, lo que hace de esta una estructura compacta. Lo anterior posibilita que el movimiento de las dislocaciones y la capacidad de deformación del metal sea grande.

Al someter un metal con esta estructura a la acción de cargas que sobrepasen el límite de fluencia, después de eliminarlas persistirá la deformación. Si se vuelve a poner al metal bajo la acción de cargas nuevamente, su actitud para la deformación plástica habrá disminuido y el límite de fluencia se elevará. Esto significa que el metal se ha endurecido por acritud. Por lo dicho anteriormente sabemos que la deformación plástica se efectúa por el movimiento de las dislocaciones. Por ejemplo dentro del cristal, un par de dislocaciones

en movimiento genera centenares y centenares de nuevas y como resultado de esto la densidad de las dislocaciones aumenta, lo que ocasiona el endurecimiento. Además se producen importantes variaciones en la estructura del metal como es la deformación de la red cristalina y la reorientación de los granos en la dirección de la deformación; el mismo pasa de forma equiaxial a tener ejes desiguales (alargados y aplastados).

Como se ha dicho, la gran capacidad de endurecimiento del acero Hadfield se debe a la acritud. Con un mismo grado de deformación, los bloques de la estructura en mosaico de este acero se dividen en mayor proporción que los de otros aceros, incluidos los austeníticos. La alta tenacidad de la austenita, al mismo tiempo que la suficiente resistencia mecánica y al desgaste, hacen del acero Hadfield un material insustituible para las piezas sometidas a desgaste y percusión simultáneamente.

A fin de caracterizar las condiciones en que ocurren los procesos de desgaste, se puede utilizar el coeficiente de endurecimiento deformacional (Kd)

$$Kd = \frac{HBf}{HBi}$$

Dónde:

HBf : Valor final de dureza del material sometido al trabajo

HBi : Valor inicial de dureza del material.

A partir de este criterio, aplicado al acero Hadfield por Martínez [35], se valoran las cargas de impacto en presencia de desgaste abrasivo. En la siguiente tabla se establecen los valores de Kd bajo diferentes condiciones, para el acero Hadfield.

Condición	Kd
Desgaste abrasivo sin impacto	1.0
Desgaste abrasivo con impactos débiles	1.0 – 1.5
Desgaste abrasivo con impactos medios	1.5 – 2.0

Las probetas se sujetaron con una mordaza que a la vez fue fijada a la mesa de la fresadora utilizando pernos de sujeción.

La herramienta utilizada para la operación de fresado fue una fresa frontal con cuchillas insertadas BK8 (K30) de 150 mm de diámetro.

Rectificado

Para garantizar el acabado superficial requerido así como las dimensiones preestablecidas utilizamos el método de rectificado.

Este proceso se llevó a cabo en una rectificadora plana Modelo 3D722 cuyas principales características técnicas son las siguientes:

- Superficie de trabajo de la mesa o placa electromagnética (l x a) (mm) 1 000 x 320
- Peso máximo de la pieza a trabajar (Kg) 600
- Velocidad límite del desplazamiento longitudinal de la mesa (m/min) 3 – 45

Teniendo en cuenta la propiedad antimagnética del acero Hadfield austenizado las probetas se sujetaron con una mordaza fijada a la mesa electromagnética.

La herramienta utilizada para la operación de rectificado fue una muela abrasiva plana forma No. 1:

Dimensiones (mm)	Características
450 x 80 x 203	24A25ΠC17K5

II.2.- Técnica Operatoria.

Algunas consideraciones para el trabajo con explosivos.

Explosión se le llama a 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.

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.

En la explosión de la mayoría de las sustancias explosivas ocurre la oxidación de los elementos combustibles (hidrógeno y carbono), con el oxígeno contenido en la composición de las propias sustancias explosivas a diferencia del proceso de combustión, en el cual la oxidación ocurre tomando oxígeno del aire. Esto provee una alta concentración de energía por unidad de volumen de sustancia explosiva.

Se diferencian las siguientes formas de la transformación química de las sustancias explosivas:

- *Detonación*: Difusión de la reacción por la masa de sustancia explosiva con una velocidad supersónica, constante para cada sustancia y altura de la carga, condicionada por el paso de una onda de detonación.
- *Combustión explosiva*: Reacción de oxidación con velocidad variable, que surge en presencia de alta temperatura de una llama y basada en la termotransferencia.
- *Deflagración*: Reacción lenta que se propaga por la masa de la sustancia explosiva al calentarse esta con una temperatura más baja que la de combustión. En una masa grande de sustancia, al elevarse la presión de deflagración puede convertirse en detonación.

La forma más efectiva de reacción explosiva, para la consolidación de metales es la detonación.

Para los trabajos con explosivos hay que observar las siguientes *reglas generales de seguridad*:

1. Durante la ejecución de los trabajos es necesario observar un orden riguroso y cumplir con exactitud las indicaciones correspondientes.
2. Las personas designados para realizar el trabajo deben conocer los explosivos, los medios de explosión, sus cualidades, las reglas para su manipulación y también las reglas y orden de ejecución de los trabajos a realizar
3. No se permite la permanencia en los lugares donde se realizan los trabajos a las personas que no se hallen directamente ocupadas en los mismos.
4. Se prohíbe fumar durante la manipulación de explosivos y medios de explosión.

Para la explosión de sustancias explosivas se emplean los siguientes métodos: pirotécnico, eléctrico y mecánico.

En nuestro caso, para provocar la explosión utilizamos el método eléctrico, que se emplea para hacer detonar la carga en el momento exacto que se precise.

Cuando se emplea el método eléctrico de explosión es necesario:

1. Colocar los detonadores eléctricos en las cargas al descubierto, sólo inmediatamente antes de realizar la explosión, cuando el responsable del trabajo lo ordene.
2. No conectar la fuente de energía a los cables conductores maestros antes de terminarse la colocación de detonadores eléctricos en las cargas y de que se haya alejado todo el personal a una distancia de seguridad.
3. Mantener aislados en la estación de explosión los terminales de los cables conductores maestros.

Para realizar la explosión por este método dispusimos de los siguientes medios:

- Sustancia explosiva.
- Detonadores eléctricos.
- Cable conductor.
- Fuente de energía eléctrica.

- Instrumento eléctrico de comprobación y medida.

Sustancia explosiva.

Como sustancia explosiva utilizamos la Amonita 6 JV cuyas características se reflejan a continuación:

◆ Energía de la explosión (Kcal/Kg)	1 025
◆ Capacidad de trabajo (cm ³)	360 – 380
◆ Aplastamiento de la columna de plomo (mm)	14 - 16
◆ Densidad (gr/cm ³)	1.0 – 1.2
◆ Diámetros de los cartuchos (mm)	32 – 36
◆ Trasmisión de la detonación (cm)	5 – 10
◆ Velocidad de detonación (m/s)	3 600 – 4 200
◆ Sensibilidad al golpe (cm)	16 – 32

En la realización de los trabajos fue empleada la Amonita 6JV con una proporción en masa de un 40 % de sal común (NaCl), a fin de reducir la cantidad total de sustancia explosiva a emplear y disminuir la velocidad de detonación; por este motivo es necesario realizar nuevamente el cálculo de este parámetro. El producto obtenido lo denominamos Amonita 6JV A-40

Detonador eléctrico.

El detonador eléctrico utilizado consta de una cápsula detonante No.8 y un fulminante eléctrico metidos todos en una vaina de cobre.

El fulminante eléctrico consiste en un puente soldado a los extremos de dos conductores aislados y envuelto en una sustancia inflamable. Los conductores salen del puente al exterior de la vaina atravesando un taco de plástico que taponea fuertemente la boca de la vaina.

Cable conductor

En nuestro caso utilizamos un cable conductor de cobre con aislamiento termoplástico (TW) de dos hilos.

Fuente de energía

La fuente de energía utilizada para provocar la explosión fue un explosor de condensador modelo KPM - IA que consta de un dinamo de corriente continua y excitación mixta, de un mecanismo con una llave para accionarlo y del cuerpo del explosor con su tapa.

Instrumento de comprobación y medida.

El instrumento que utilizamos fue un ohmímetro que se emplea para probar los cables conductores, los detonadores y los circuitos y también para medir aproximadamente la resistencia entre los límites de 0 a 5000 ohmio.

Descripción del Proceso

La aplicación de cargas explosivas para el desarrollo del proceso de endurecimiento, se realiza en un polígono construido en las inmediaciones del ISMM para estos fines. Se trata de una enplanada rodeada de mogotes para disminuir el ruido y las molestias que causan las explosiones. En el propio polígono se realizan las operaciones de soldadura y conformación con explosivos de nuestro grupo de investigación científica. Las condiciones creadas en el polígono pueden posibilitar en la actualidad, y teniendo en cuenta los resultados que se obtienen en la presente investigación, el desarrollo a escala industrial de los trabajos de endurecimiento de las piezas y agregados de los equipos de laboreo minero que requiere la industria cubana del níquel.

En el polígono se seleccionó un área dónde se cavó un pozo, para introducir las probetas del experimento diseñado y las piezas que serían endurecidas, con sus correspondientes cargas explosivas. En cada caso el conjunto se recubre de tierra o arena hasta el nivel de la superficie

Para estudiar el efecto de la onda expansiva sobre las probetas, se cubrieron las 6 caras de las mismas con una capa de sustancia explosiva. De acuerdo con la matriz del diseño del experimento descrito en el epígrafe II.1, en 9 probetas se utiliza un espesor de 60 mm, que

corresponde a una velocidad de detonación de 3 000m/s, otras 9 probetas se cubren con explosivos en un espesor de 20 mm para una velocidad de detonación de 2 250m/s, en las restantes 9 probetas se utiliza un espesor de 6 mm, para una velocidad de detonación de 1500 m/s. En cada grupo de probetas se consideran, según la propia matriz del experimento, las variables **b** y **k** como ya ha sido explicado.

Con el objetivo de mantener la sustancia explosiva adherida a las probetas y garantizar en todo momento un espesor constante, las mismas se introdujeron en unas cajitas de cartón, cada una fabricada con sus medidas correspondientes.

El detonador eléctrico en todos los casos fue colocado en un extremo de su longitud y precisamente en este sitio se incremento el espesor de la sustancia explosiva en 20 mm más, para dar margen a la estabilización al inicio de la explosión.

El conjunto compuesto por la probeta, la sustancia explosiva y la cajita de cartón, se introdujo en el agujero y se cubre con arena o tierra, como ya se explicó y se muestra en el Anexo1, con el objetivo de aprovechar al máximo el efecto de la onda expansiva provocada por la explosión sobre las superficies de la probeta.

Finalmente se procede a realizar la explosión, teniendo en cuenta las reglas generales de seguridad y las particularidades para el empleo del método eléctrico de explosión.

El orden general de las operaciones a realizar se describe a continuación:

1. Elaboración del paquete explosivo, cuyas dimensiones estarán en dependencia del espesor de sustancia explosiva, lo cual a su vez depende de la velocidad de detonación en función con el diseño de experimento que ya ha sido explicado. Toda la superficie de la probeta debe quedar en contacto con la sustancia explosiva.
2. Colocación del conjunto en un agujero soterrado, garantizando el cubrimiento de todo el conjunto. Previamente el detonador eléctrico debe ser colocado en un extremo del paquete explosivo.
3. Conexión del detonador eléctrico a la magistral, y esta al explosor.

4. Realización de la explosión.

CAPITULO III

RESULTADOS

III.1.- Ensayo de Dureza.

Las mediciones de dureza las realizamos por el método Rockwell (HRC) que luego convertimos en Brinell (HB) con ayuda de la tabla de conversión de dureza de la firma UTP.

Para realizar este ensayo utilizamos un durómetro tipo Rockwell modelo 2018TP con las siguientes características:

- Carga aplicable (N)
 - Previa 98.1
 - Total 588,4; 980,7 y 1471
- Tiempo de aplicación de la carga (seg) 8
- Tipo de penetrador Cono de diamante
- Cambio de la carga Manual
- Dimensiones exteriores (mm)
 - Largo 780
 - Ancho 275
 - Altura 905
- Masa del equipo (Kg) 155

En nuestro caso utilizamos un penetrador de cono de diamante con un ángulo de incidencia de 360 y una carga aplicada de 1471 N.

Antes de la explosión se realizaron mediciones de dureza en las probetas sometidas a los tres tipos de tratamiento térmico, el valor medio de las mediciones de dureza obtenido en cada caso fueron:

- Probetas enfriadas en Solución de NaCl al 10 % (Nivel 1) 200 HB
- Probetas enfriadas en agua (Nivel 2) 190 HB

- Probetas enfriadas en aceite (Nivel 3)

180 HB

En cada una de las 27 probetas sometidas a la acción de la carga explosiva, de acuerdo con el diseño del experimento anteriormente descrito en el Capítulo II, se consideran 3 mediciones: la primera a 40 mm de la cara dónde fue colocado el detonador (HB1), la segunda a 40 mm de la primera (HB2), y la tercera a 40 mm de la segunda (HB3). Los resultados de los 81 ensayos de dureza realizados en las probetas se muestran a continuación en la siguiente matriz de resultados:

No	D	b	k	HB1	HB2	HB3
1	3000.00	6.00	3.00	410.00	393.00	376.00
2	3000.00	6.00	2.00	360.00	340.00	330.00
3	3000.00	6.00	1.00	260.00	250.00	240.00
4	3000.00	3.75	3.00	328.00	338.00	350.00
5	3000.00	3.75	2.00	320.00	306.00	310.00
6	3000.00	3.75	1.00	295.00	290.00	285.00
7	3000.00	1.50	3.00	240.00	231.00	224.00
8	3000.00	1.50	2.00	280.00	270.00	260.00
9	3000.00	1.50	1.00	320.00	314.00	302.00
10	2250.00	6.00	3.00	330.00	325.00	320.00
11	2250.00	6.00	2.00	306.00	300.00	292.00
12	2250.00	6.00	1.00	270.00	280.00	285.00
13	2250.00	3.75	3.00	265.00	280.00	293.00
14	2250.00	3.75	2.00	290.00	297.00	304.00
15	2250.00	3.75	1.00	310.00	320.00	330.00
16	2250.00	1.50	3.00	180.00	185.00	190.00
17	2250.00	1.50	2.00	235.00	250.00	250.00
18	2250.00	1.50	1.00	295.00	302.00	314.00
19	1500.00	6.00	3.00	280.00	290.00	298.00
20	1500.00	6.00	2.00	300.00	320.00	330.00
21	1500.00	6.00	1.00	370.00	380.00	390.00
22	1500.00	3.75	3.00	250.00	260.00	270.00
23	1500.00	3.75	2.00	290.00	300.00	310.00
24	1500.00	3.75	1.00	370.00	380.00	390.00
25	1500.00	1.50	3.00	231.00	236.00	242.00
26	1500.00	1.50	2.00	187.00	195.00	204.00
27	1500.00	1.50	1.00	270.00	285.00	292.00

III.2.- Análisis de los Resultados.

Análisis de varianza

Tomando como referencia la base de datos, resultado de las 81 mediciones de dureza realizada, procedimos a la realización del análisis de varianza para evaluar el nivel de significación de las variaciones provocadas por los diferentes experimentos.

Para la realización del análisis de varianza se utilizó el programa Microsoft Excel. El resultado obtenido de la computadora se muestra a continuación:

ANÁLISIS DE VARIANZA						
<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Muestra	83968.39506	8	10496.04938	4.74655947	0.000190229	2.115221776
Columnas	358.5432099	2	179.2716049	0.08107082	0.922240401	3.16824611
Interacción	4115.45679	16	257.2160494	0.11631912	0.999987336	1.834628449
Dentro del grupo	119410	54	2211.296296			
Total	207852.3951	80				

Como se puede apreciar, la probabilidad para variaciones por muestras es de un 0.019 %, para variaciones por columnas es del 92.22 % y para variaciones por interacción es del 99.99 %. Estos resultados permiten arribar a las siguientes conclusiones:

1. El hecho de que la probabilidad para variaciones por **muestras** sea del 0.019 %, indica que las diferencias provocadas por las variaciones de los factores **D**, **b** y **k** para cada experimento, son significativas. Esto quiere decir que las variaciones de estos factores tienen gran influencia en los valores de dureza que se obtengan.
2. El hecho de que la probabilidad para variaciones por **columnas** sea del 92.22 %, indica que las diferencias provocadas en cada experimento no son significativas. Esto quiere decir que las variaciones en los valores de las mediciones en cada probeta, son pequeñas y no son provocadas por las variaciones de los factores **D**, **b** y **k**, sino por otros factores aleatorios no tenidos en cuenta.

Según este criterio, la influencia de la carga explosiva (para un mismo juego de valores **D**, **b** y **k**) genera valores de dureza similares en todo la superficie de la

probeta, de modo que a los efectos de posteriores análisis sólo nos referiremos al valor medio de dureza.

3. El hecho de que la probabilidad para variaciones por **interacción** sea del 99.99 %, indica que las variaciones provocadas por los diferentes experimentos (valores **D**, **b** y **k**) entre cada columna (o posición de la medición), no son significativas es decir, tienen tendencia a ser iguales.

Esto confirma el criterio de que lo determinante en las variaciones de la dureza del acero Hadfield, son los factores **D**, **b** y **k**.

Análisis de Regresión.

Los resultados experimentales fueron procesados por el análisis de regresión lineal aplicando el Modelo Lineal Generalizado que tiene como expresión general para este caso:

$$Z = a_0 + \sum_{i=1}^m a_i f_i(x, y)$$

Primeramente realizaremos un análisis del comportamiento del valor medio de la dureza $z=HB$, en función de las variables $x=D$ y $y=b$, para cada valor de k donde se tomaron $m=5$ funciones: $f_1(x,y)=D$; $f_2(x,y)=B$; $f_3(x,y)=D*B$; $f_4(x,y)=D^2$; $f_5(x,y)=B^2$.

Para k=1

Ecuación de regresión:

$$HB_{med} = (267.76361111)*(1) + (-0.07403000)*(D) + (96.87000000)*(B) + (-0.02365481)*(D*B) + (0.00002676)*(D^2) + (-5.71753086)*(B^2)$$

Análisis de varianza

Variación explicada :	14557.92895833	Grados de libertad:	5
Variación residual :	1150.30564167	Grados de libertad:	3
Variación total :	15708.23460000	Grados de libertad:	8

Error standart de una estimación: 23.98234394

Error probable de una observación: 13.20772298

Coefficiente de correlación, $r = 0.96268922$

Para una prueba t de Student con nivel de confianza 0.90:

Intervalo de confianza de r : [0.95874066, 0.96626641]

Para una prueba F de Fisher con nivel de confianza 0.90:

Valor de F_c para el ajuste : 7.5934

Valor de F_t por la tabla : 5.2848

El ajuste es estadísticamente significativo ya que $F_c > F_t$.

Para $k=2$

Ecuación de regresión:

$$\text{Hbmed} = (124.41046296)*(1) + (-0.02103667)*(D) + (71.07493827)*(B) + (-0.00711259)*(D*B) + (0.00001620)*(D^2) + (-4.88362140)*(B^2)$$

Análisis de Varianza

Variación explicada : 14438.88620278 Grados de libertad: 5

Variación residual : 1114.81655278 Grados de libertad: 3

Variación total : 15553.70275556 Grados de libertad: 8

Error standart de una estimación: 23.60949547

Error probable de una observación: 13.00238529

Coefficiente de correlación, $r = 0.96349607$

Para una prueba t de Student con nivel de confianza 0.90:

Intervalo de confianza de r : [0.95963114, 0.96699721]

Para una prueba F de Fisher con nivel de confianza 0.90:

Valor de F_c para el ajuste : 7.7711

Valor de F_t por la tabla : 5.2848

El ajuste es estadísticamente significativo ya que $F_c > F_t$.

Para k=3

Ecuación de regresión:

$$\text{HBMED} = (433.10583333)*(1) + (-0.24781889)*(D) + (13.75888889)*(B) + (0.01604889)*(D*B) + (0.00005047)*(D^2) + (-3.14962963)*(B^2)$$

Análisis de Varianza

Variación explicada : 31240.97269167 Grados de libertad: 5

Variación residual : 713.21970833 Grados de libertad: 3

Variación total : 31954.19240000 Grados de libertad: 8

Error standart de una estimación: 18.88411645

Error probable de una observación: 10.39999174

Coefficiente de correlación, r = 0.98877699

Para una prueba t de Student con nivel de confianza 0.90:

Intervalo de confianza de r : [0.98757179, 0.98986591]

Para una prueba F de Fisher con nivel de confianza 0.90:

Valor de Fc para el ajuste : 26.2816

Valor de Ft por la tabla : 5.2848

El ajuste es estadísticamente significativo ya que $F_c > F_t$.

Como se puede apreciar en los tres casos, el coeficiente de correlación es superior a 0.96 y el ajuste realizado es estadísticamente significativo. Esto significa que por un lado la ecuación de regresión obtenida refleja fielmente el proceso, y por otro que sus resultados son correctos

.

En los Anexos 2, 3 y 4 se muestran los gráficos que reflejan, para cada caso (k=1, k=2 y k=3) el comportamiento de la dureza promedio **HBmed** en función de los valores de **D** y **b**. Del análisis de los mismos se puede concluir que:

- ◆ Existe tendencia al incremento de la dureza en la misma medida en que se incrementan los valores de **D** y **b**, lo cual confirma la hipótesis científica preliminarmente planteada. Sólo para $k=1$, cuando se alcanzan los valores extremos de **D** y **b**, el incremento no se produce; esto pudiera explicarse por el hecho de que en condiciones de un rápido enfriamiento el metal ha adquirido además de una estructura con mayor porcentaje de austenización, una dureza inicial mayor también, lo que a su vez implicaría la posibilidad de un menor grado de endurecimiento ulterior, por la acción de otros factores.
- ◆ Teniendo en cuenta los valores iniciales de dureza para $k=1$, $k=2$ y $k=3$, y los valores promedios de dureza observados en más del 50 % del área de los gráficos correspondiente a cada nivel (Ver Anexos 2, 3 y 4), una vez aplicada las cargas explosivas, se puede afirmar que para $k=1$ el efecto de las cargas de impacto se puede valorar de medio a fuerte, según la caracterización que se propone en el Capítulo II, para los diferentes valores que se obtenga en el coeficiente de endurecimiento deformacional K_d . En el caso de $k=2$ el efecto de las cargas aplicadas a alta velocidad se valora de medio, y para $k=1$ la valoración es de impacto débil.
- ◆ El comportamiento más estable con valores de dureza relativamente altos, se aprecia para $k=2$ (Ver Anexos 3 y 5), es decir para cuando las probetas se enfrían en agua. También en este caso se obtienen los mejores resultados, según investigaciones anteriores, tanto desde el punto de vista de la resistencia al desgaste como de la resistencia al impacto.
- ◆ Para $k=3$ se manifiesta un pico de dureza puntual (Ver Anexo 4), poco probable desde el punto real, cuando **D** y **b** alcanzan valores máximos. Este resultado carece de sentido práctico y pudiera deberse a errores de medición. El espectro de dureza, en las mismas condiciones, para otros valores de **D** y **b** mantienen el comportamiento ya explicado.

Las conclusiones parciales aquí expresadas, en particular la 2da y 3ra, permiten suponer un mejor comportamiento para las probetas enfriadas en agua ($k=2$).

A continuación se muestran los resultados del procesamiento realizado para la obtención de

HB = f (D, b, k) aplicando el Modelo Lineal Generalizado que tiene en este caso la expresión general:

$$U = a_0 + \sum_{i=1}^m a_i f_i(x, y, z)$$

Se realizó el análisis del comportamiento del valor medio de la dureza $u=HB$, en función de las variables $x=D$, $y=b$ y $z=k$, donde se tomaron $m=9$ funciones: $f_1(x,y,z)=D$; $f_2(x,y,z)=B$; $f_3(x,y,z)=k$; $f_4(x,y,z)=D*B$; $f_5(x,y,z)=D*k$; $f_6(x,y,z)=B*k$; $f_7(x,y,z)=D^2$; $f_8(x,y,z)=B^2$; $f_9(x,y,z)=k^2$.

Considerando la influencia de cada una de las variables establecidas en el diseño de la investigación, se obtuvo el modelo matemático que describe el proceso:

Ecuación General

$$\begin{aligned} \text{HBMED} = & (616.16126543)*(1)+ \\ & (-0.19607519)*(D)+ (35.08646091)*(b)+ (-193.52250000)*(k)+ \\ & (-0.00490617)*(D*b)+ (0.04089000)*(D*k)+ (12.74074074)*(b*k)+ \\ & (0.00003114)*(D^2)+ (-4.58359396)*(B^2)+ (9.85222222)*(k^2) \end{aligned}$$

Análisis de Varianza

Variación explicada : 52806.52906111 Grados de libertad: 9
 Variación residual : 14689.99839074 Grados de libertad: 17
 Variación total : 67496.52745185 Grados de libertad: 26

Error standart de una estimación : 30.30057589

Error probable de una observación: 19.82751867

Coefficiente de correlación, $r = 0.88451071$

Para una prueba t de Student con nivel de confianza 0.90:

Intervalo de confianza de r : [0.87879939, 0.88996866]

Para una prueba F de Fisher con nivel de confianza 0.90:

Valor de F_c para el ajuste : 6.7900

Valor de Ft por la tabla : 2.0010

El ajuste es estadísticamente significativo ya que $F_c > F_t$.

Como se puede observar, el modelo matemático obtenido permite calcular con bastante precisión el valor medio de la resistencia a la dureza, a partir de los valores de las variables establecidas para el proceso. En el Anexo 5 se muestra en un sólo gráfico, para cada uno de los niveles de la variable **k**, el comportamiento de la dureza promedio **HBmed** en función de los valores de **D** y **b**. El gráfico demuestra el resultado de las observaciones parciales para cada caso concreto ($k=1$, $k=2$ y $k=3$) y confirma el criterio de que para $k=2$, es decir para una probeta austenizada y enfriada en agua, se obtienen los mejores resultados desde el punto de vista de las posibilidades de lograr el endurecimiento del acero Hadfield.

Análisis de optimización.

El análisis de optimización se realizó de manera independiente para cada caso $k=1$, $k=2$ y $k=3$, mediante métodos numéricos evaluativos, para esto se desarrolló un programa de computación en lenguaje Pascal que puede observarse en el Anexo 6

Después de correr este programa se obtuvieron los siguientes resultados:

Para $k=1$:

	D	b	HBmed
Mínimo	3 000	6	236.12
Máximo	1 500	5.37	381.71

Para $k=2$:

	D	b	Hbmed
Mínimo	1 500	1.5	208.93
Máximo	3 000	5.09	333.74

Para $k=3$:

	D	b	Hbmed
Mínimo	2 216.25	1.5	198.68
Máximo	3 000	6	401.93

Asumiendo como válida la apreciación de que para $k=2$, se obtienen los mejores resultados se puede afirmar entonces de que en las condiciones de la experimentación, los valores óptimos de las variables que intervienen son:

D: 3 000 m/s

B: 5.09 cm

K: 2

Análisis Metalográfico.

El análisis metalográfico consistió en la observación e identificación de las características de la estructura metalográfica en probetas de acero alto manganeso (Hadfield).

Fueron observadas probetas sin tratamiento térmico, y con tratamiento térmico de austenizado en tres medios de enfriamiento diferentes de acuerdo con el diseño de experimento expuesto en el capítulo anterior. Estas últimas antes y después de ser sometidas a la acción de cargas explosivas. (Ver micrografías en el anexo 7, figuras 1 y 2).

Para observar la estructura de las probetas, fue necesario previamente la preparación de la superficie de las probetas, y posteriormente la utilización de un microscopio metalográfico.

Para la preparación de la superficie de las probetas, que posibilite el desarrollo los análisis metalográficos, utilizamos una rectificadora de secciones metalográficas modelo 3E881 – M.

En esta máquina se realizaron las operaciones de rectificado y pulido de la superficie del material.

En el ahondamiento del plato se colocó el papel de lija previamente humedecido con agua, de forma circular como el plato.

Para obtener buenos resultados en la operación de rectificado debe cumplirse con los siguientes aspectos:

- La muestra no debe apretarse demasiado sobre el papel abrasivo para evitar que ocurra una elevación notable de la temperatura en la superficie pulida.
- La posición de la muestra debe ser constante en un mismo tipo de papel de lija.
- Cuando se pasa a otro papel según el número que corresponda se rota la muestra de tal forma que las direcciones de las líneas sean perpendiculares a la anterior.
- El papel de lija a utilizar se comienza desde la granulometría más gruesa hasta la más fina. En nuestro caso, utilizamos en el mismo orden papel No. 60, 80, 120, 180 y 220.

La operación de pulido se realiza en el disco utilizando un fieltro o paño, el cual está pegado a la superficie del plato.

El fieltro o paño se humedece con una solución de pasta GOI disuelta en agua destilada. La muestra se frota sobre el fieltro y periódicamente ésta se sumerge en petróleo.

Luego de concluido el proceso de pulido las probetas se lavaron con tetracloruro de carbono para eliminar los vestigios de grasa y pasta de pulir. Posteriormente se procedió al ataque de la superficie objeto de análisis con una solución saturada de cloruro férrico en ácido clorhídrico más ácido nítrico.

El microscopio metalográfico modelo MMP-4 utilizado, tiene las siguientes características técnicas:

- | | |
|-----------------------------------|------------------|
| • Rango de aumento | 50 – 1600 |
| • Aumento de los objetivos | 8; 31; 7; 50; 80 |
| • Aumento de los oculares | x 10 |
| • Dimensiones de la pantalla (cm) | 9 x 12 |
| • Dimensiones del fothoplate (mm) | 24 x 36 |
| • Fuente luminosa | KGM9 – 70 |
| • Consumo de energía (VA) | 160 |
| • Dimensiones exteriores (mm): | |
| ▪ Microscopio | 250 x 410 x 270 |
| ▪ Bloque de alimentación | 280 x 180 x 190 |

Utilizando un aumento en el microscopio x 500 podemos observar en la probeta sin tratamiento térmico, una estructura de austenita y abundantes y grandes colonias de carburos situadas por los límites de los granos, desordenadamente. (Ver figura 1, Anexo 7).

En las probetas sometidas a tratamiento térmico, empleando un aumento del microscopio (x 100), podemos observar una estructura casi totalmente monofásica de austenita, Los límites de los granos son muy finos, y se observa el maclaje en algunos granos, característico de la austenita. Los granos austeníticos son desiguales y de forma polihédrica. (En las probetas enfriadas más rápidamente, el % de austenita es mucho mayor en la estructura).

Después de ser sometidas a la acción de cargas explosivas, en la probeta se notan vestigios de deformación plástica, con bloques de la estructura en mosaico divididos en grandes proporciones y una deformación clara de la red cristalina, típico del fenómeno de la acritud. (Ver figura 3, Anexo 7). La micrografía mostrada con un aumento del microscopio (x 100) corresponde a una probeta enfriada en agua y luego expuesta al efecto de cargas aplicadas a gran velocidad.

III.3.- Aplicaciones Industriales.

Teniendo en cuenta los resultados anteriormente expuestos en el desarrollo de la parte experimental, podemos concluir que se confirma la hipótesis científica planteada preliminarmente, es decir se puede afirmar que el acero al alto manganeso (Hadfield), incrementa su dureza en presencia de cargas de impulso provocadas por la acción de una sustancia explosiva, existiendo correlación entre las variables de entrada **D**, **b** y **k**, y la de salida **HB** que intervienen en el proceso. Fueron establecidas además las variables que inciden de forma significativa en el proceso de endurecimiento, y los valores óptimos de cada una de ellas.

El campo de las aplicaciones el trabajo se orienta al endurecimiento del material empleado en agregados y piezas de los equipos de laboreo minero, entre los cuales pueden ser citados los dientes de las palas excavadoras, los martillos de las trituradoras y las bolas de los molinos entre otros.

En nuestro trabajo nos hemos limitado a la elaboración de la tecnología de endurecimiento, con el empleo de explosivos, de los dientes de las jaibas de las excavadoras andantes ESH-5 / 45 M, empleadas en la extracción del mineral laterítico de las minas de la Empresa Comandante Ernesto Ché Guevara, perteneciente a la Unión de Empresas del Níquel en el nordeste de la Provincia de Holguín.

Como defecto principal por el que se deterioran los dientes en su trabajo diario en la mina, se encuentra el desgaste que sufren los mismos al entrar en contacto con el mineral observándose claramente una disminución de su longitud original y su espesor. En la siguiente tabla se reflejan las variaciones que se producen en estas dimensiones, en una muestra de cuatro dientes ya en desuso respecto a un diente nuevo.

	Diente Nuevo	Diente Viejo			
		1	2	3	4
Longitud de la punta del diente	390	310	325	330	320
Espesor del diente	180	170	165	168	173
Longitud total del diente	900	820	835	840	830

Como se puede apreciar la longitud total del diente se reduce entre 50 y 70 mm, y la de la punta entre 60 y 80 mm. En cuanto al espesor, en la parte más ancha de la punta del diente, la reducción en las dimensiones es del orden de 7 a 15 mm. Es decir que es la punta del diente la que más se afecta por el desgaste.

Tomando como referencia, los resultados de un análisis estadístico realizado en una muestra de 6 excavadoras por un período de tiempo de 3 años y cuya frecuencia de trabajo osciló entre 16 y 20 horas diarias, se pudo determinar que el cambio de los dientes se realiza entre los 6 y 8 meses de explotación de los mismos, jugando un papel fundamental

el tipo de mineral que se está extrayendo; observándose que los cambios más frecuentes se realizan dónde las máquinas extraen mineral del tipo serpentina, caracterizándose el mismo por tener elevada dureza respecto a los demás tipos de mineral existentes en la zona de trabajo. La elevada dureza del mineral trae consigo que el mismo sea más abrasivo y un desgaste mucho más rápido del diente. Entre los dientes más agredidos por el proceso de desgaste están los situados en los bordes de la cuchara.

Los dientes son importados por nuestro país a un costo de 700 USD cada uno. De acuerdo a su configuración y complejidad de fabricación los mismos son obtenidos por el proceso de fundición en moldes de arena. De acuerdo a su ficha técnica, estos poseen una masa de 80 Kg, su longitud es de 900 mm, el ancho de 150 mm y su dureza al entrar en explotación es de alrededor de 20 HRC (220 HB aproximadamente).

Para el proceso de endurecimiento con el uso de energía a alta velocidad que nos ocupa, utilizaremos como sustancia explosiva la Amonita 6JV A-40, cuyas propiedades se describen en el capítulo anterior.

Teniendo en cuenta que para obtener un endurecimiento hay que aumentar la resistencia al movimiento de las dislocaciones, y que esta resistencia al movimiento de las dislocaciones crece con la interacción entre ellas, e igualmente al entrar en contacto con los distintos defectos de la red cristalina que surgen durante el tratamiento del metal, en este caso con explosivos como se explico anteriormente; decidimos recubrir las cuatros caras con que cuenta la punta del diente, y que mayoritariamente interactúan con el mineral laterítico, para evitar que las dislocaciones se desplacen hacia las caras que no van a ser sometidas a la acción de las ondas de choque, ya que dicho movimiento de las dislocaciones puede traer consigo el no endurecimiento del diente. Además al recubrir las cuatro caras del diente estamos logrando que el mismo sea expuesto a un estado tensional de compresión, con lo cual se garantiza la fragmentación de los granos, provocando un aumento en el número de defectos de la red cristalina lográndose así el frenado de las dislocaciones y por tanto un ulterior aumento de la dureza.

Es importante además previamente caracterizar desde el punto de vista microestructural el material de los dientes, ya que generalmente estos se ofertan en el mercado en estado recocido, y se hace necesario aplicar un tratamiento térmico de austenizado para eliminar carburos y obtener una estructura lo más homogénea posible de austenita.

En el caso que nos ocupa, se aplicó la tecnología de endurecimiento con explosivos a una pareja de dientes, cuya dureza promedio era de 200 HB antes de la aplicación de energía alta velocidad, por lo cual no fueron austenizados.

El paquete explosivo diseñado posee la configuración exacta de la punta del diente (Ver Anexo 8), es decir una pirámide de base rectangular, dispuesta de forma tal que entre el diente y las paredes del paquete se mantenga una distancia uniforme equivalente al espesor de sustancia explosiva para la cual la velocidad de detonación según criterios de optimización de los parámetros que intervienen el proceso, se mantiene en el rango de 3 000 m/s. En todo caso la sustancia explosiva debe estar en contacto con el diente en toda la extensión superficial que cubre el propio paquete. La ubicación del detonador en la punta del diente, se realiza en un punto situado a una distancia de 5 mm por encima del espesor del paquete explosivo. Esto se hace para garantizar que en esta tramo se establezca el inicio de la explosión.

El conjunto diente y paquete explosivo acoplado a la punta del mismo, se introducen en un agujero practicado en la tierra, a una profundidad igual o mayor al triple de su altura, para aprovechar al máximo la energía de la onda expansiva.

Posteriormente y cumpliendo estrictamente con todas las medidas de seguridad reseñadas en el capítulo anterior se procede a la explosión, con lo cual quedaría materializado el proceso de endurecimiento.

En términos generales la secuencia de tecnológica de las operaciones que intervienen en el proceso de endurecimiento se establece a continuación:

1. Caracterización microestructural del material empleado en la fabricación de los dientes de la excavadora.
2. Realización del tratamiento térmico de austenizado en el caso que no se observe una estructura de austenita homogénea (no más de un 6 % de carburos y una dureza promedio superior a los 180 HB)
3. Elaboración del paquete explosivo, cuyas dimensiones estarán en dependencia de las dimensiones del diente y del espesor de sustancia explosiva a emplear, lo cual a su vez depende de la velocidad de detonación que se desea obtener.
4. Colocación del paquete explosivo en la punta del diente, de forma tal que toda su superficie quede en contacto directo con la sustancia explosiva.
5. Colocación del conjunto en un agujero soterrado, garantizando el cubrimiento de todo el conjunto.
6. Conexión del detonador eléctrico a la magistral, y esta al explosor.
7. Realización de la explosión.

Como resultado de la aplicación de cargas explosivas, el promedio de las mediciones de dureza en los dientes tratados por esta tecnología fue de 50 - 55 HRC (.....- 560 HB). Este resultado es superior al obtenido incluso en las corridas experimentales, y puede ser atribuido a que en estas condiciones, dadas las reales dimensiones del diente superiores a las de las probetas, fue utilizado un mayor volumen de sustancia explosiva con el consiguiente incremento del efecto que esta produce; por lo que se debe profundizar en este sentido en investigaciones futuras ya que la optimización de nuestro modelo aporta los máximos y los mínimos sólo en el rango definido por los niveles de las variables estudiadas.

III.4.- Valoración cualitativa del efecto técnico, económico y social de los resultados.

En la actualidad, y teniendo en cuenta lo publicado en el país y las relaciones de trabajo del autor con otros grupos de investigación que utilizan industrialmente los explosivos en el trabajo con los metales, se puede afirmar que no se realizan en Cuba investigaciones que

estudien el comportamiento del acero al alto manganeso (Hadfield) en presencia de cargas aplicadas a gran velocidad.

Ante esta evidencia, el desarrollo de la investigación reflejada en el texto del presente trabajo significa un aporte importante en el campo del conocimiento científico técnico y tecnológico, relacionado con el empleo de sustancias explosivas para el mejoramiento de la resistencia al desgaste del acero Hadfield y propician a su vez el punto de partida para el inicio del desarrollo de investigaciones más profundas en esta dirección, particularmente se evidencia la necesidad de la realización de ensayos de desgaste e impacto del material sometido a este tratamiento, así como de la caracterización metalográfica de la estructura deformada por las cargas de impulso a fin de poder establecer el mecanismo de deformación del acero hadfield en estas condiciones, además de que se hace necesario realizar la optimización del modelo matemático en un rango superior al mostrado en la presente investigación. Ha quedado claro también, la necesidad de profundizar en el diseño de la tecnología de tratamiento térmico óptima que garantice una estructura de austenita homogénea, teniendo en cuenta su influencia en los valores de dureza que se obtienen.

Los resultados parciales obtenidos posibilitan el establecimiento de variantes tecnológicas para el endurecimiento mediante explosivos, del material empleado en piezas y agregados de equipos de laboreo minero. La determinación de los parámetros óptimos de este proceso, aportan el punto de partida para obtener resultados de calidad desde el punto de vista tecnológico.

Desde el punto de vista económico, los beneficios estimados de la aplicación de la tecnología descrita para el caso particular de los dientes de las palas excavadoras, son significativos.

La tecnología que se describe en el texto del trabajo ha sido aplicada a 2 dientes de una pala excavadora que se mantiene en explotación, y hasta la fecha prácticamente supera el tiempo promedio de servicio de estos elementos y se estima que lo duplique.

Los dientes nuevos, sin el endurecimiento que les proporcionan la aplicación de cargas a alta velocidad, tienen un costo en el mercado internacional de 700 USD cada unidad. La aplicación de la tecnología de endurecimiento mediante explosivos implica gastos por concepto de empleo de sustancias explosivas, detonadores, otros materiales auxiliares, salarios, etc. En todo caso y teniendo en cuenta la sencillez y facilidad del método y el poco tiempo que requiere su aplicación, los gastos estimados en la aplicación de la tecnología no sobrepasan para cada unidad, la cifra total de 50 USD. En [12] se detalla los cálculos realizados en este sentido. Entre otros gastos a realizar debe ser considerado también los que se incurren por concepto de tratamiento térmico, no obstante estos no son significativos y además no siempre se justifica su empleo.

En resumen, la utilización de una pareja de dientes en la actualidad implica gastos por un total de 1 400 USD cada 6 meses; aplicando la tecnología de endurecimiento por explosivos el costo de la pareja se incrementa ligeramente, pero su tiempo de servicio se duplica.

Una pala excavadora utiliza 4 dientes; en un año se requieren 8 dientes no tratados con explosivos y esto implica gastos del orden de los 5 600 USD anuales. Tratados con explosivos sólo se requieren 4 dientes; y el costo de los mismos agregando los gastos de aplicación de la tecnología y el tratamiento térmico, no supera los 3 000 USD, en consecuencia el ahorro superará los 2 600 USD para una sola excavadora en un año de trabajo.

Extrapolando esta valoración al caso de los martillos de las trituradoras y a las bolas de los molinos, llegamos a la conclusión de que el empleo de la tecnología de endurecimiento mediante explosivos, pudiera reportar ahorro por varios decenas de miles de dolores al año sólo en la Subdirección de Minas de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara, sin incluir el efecto económico para otras plantas de la misma empresa que emplean equipos similares, como la planta de secaderos, molienda, la planta de sinter, etc, u otras plantas similares de otras empresas de la Unión del Níquel.

Se puede afirmar que el lograr incrementar el tiempo de vida útil de estas piezas y agregados, contribuye en determinada medida a un mejor aprovechamiento de las posibilidades productivas de estos equipos. Es decir, con el aumento de su durabilidad, se reporta otras ventajas tales como: la reducción del costo de explotación y de mantenimiento del equipo, y la disminución del volumen de inventario de estos elementos, con lo cual podrían disminuir importaciones y derivar recursos hacia otros renglones.

Precisamente en esta última afirmación, se refleja parte del efecto social de los resultados de la investigación. Otro aspecto de indudable impacto social, lo constituye el reflejo en el ecosistema de la investigación realizada y sus perspectivas a partir de los resultados parciales obtenidos.

Se puede afirmar que cualquier investigación encaminada a estudiar los problemas teórico-prácticos que afectan el medio ambiente en sus más variados contextos constituye, sin dudas, una eficaz herramienta para trabajar esta temática en aras de garantizar el sano desarrollo de las actividades sociales y económicas.

En el caso particular de los martillos de las trituradoras y de las bolas de los molinos, se presentan evidencias de contaminación atmosférica y contaminación sónica.

El hecho de que el desgaste sea muy periódico implica la realización de tareas de mantenimiento en ciclos muy cortos que generan riesgos de contaminación por la expulsión de polvos a la atmósfera, debido a las actividades de limpieza e inhalación de polvos por las vías cutánea y respiratoria.

Por otra parte, el desgaste producido en los martillos origina la pérdida de dimensiones en los mismos, provocando el desbalanceo del sistema y a su vez vibraciones de grandes magnitudes que generan ruidos excesivos, desajustes y falta de hermeticidad en la instalación, lo cual también contamina la atmósfera por el escape de polvos.

CONCLUSIONES

1. Se confirma experimentalmente la hipótesis de que el acero al alto manganeso (Hadfield) incrementa su dureza en presencia de cargas de impulso provocadas por la acción de una explosión, y que existe correlación entre las variables de entrada **D, b y k** y la variable de salida **HB**, que intervienen en el proceso. Se logró la optimización de las variables de entrada, mediante métodos numéricos evaluativos teniendo en cuenta su interrelación, Los valores óptimos obtenidos son:
D: 3 000 m/s
b: 5.09 cm
k: 2
2. Como resultado del análisis de varianza se establecen diferencias significativas provocadas por las variaciones por muestras de los factores **D, b y k**, no siendo así las variaciones por columnas para cada muestra y las variaciones por interacción de los 3 factores. Es decir, puede ser considerado como valor de dureza para cada muestra, el promedio de las 3 mediciones.
3. La correlación entre las variables de entrada **D, b y k** y la variable de salida **HBmed**, expresada en el modelo matemático establece de modo significativo la dependencia entre la dureza **HBmedia** y las variables **D, b y k**, con un elevado coeficiente de correlación.
4. Los mejores resultados desde el punto de vista de un comportamiento más estable con valores de dureza relativamente altos, y por tanto de lograr el endurecimiento del acero Hadfield, se obtienen en probetas austenizadas y enfriadas en agua (**k=2**).
5. Es factible técnicamente la aplicación de la tecnología descrita en el texto del trabajo, para el endurecimiento mediante una explosión del diente de las palas excavadoras. La valoración cualitativa del efecto técnico, económico y social de los resultados hacen atractiva la aplicación de esta propuesta.

BIBLIOGRAFIA

1. Alvarez, L y J. González. Máquina para el estudio del desgaste abrasivo en pares tribológicos. Revista construcción de maquinaria. Santa Clara, No2: 69-76,1993.
2. Andrés, M. de. Desgaste mecánico: aspectos metalúrgicos y modo de acción en engranajes y piezas de automóvil. Revista de metalurgia. Madrid, Vol 17, No 4: 231-243, 1981.
3. Bayoume, M. R. Effect of surface finish on fatigue strength. Engineering fracture mechanics. Vol 51. No 5: 861- 870. 1995.
4. Benchaita, M. T. Wear behavior of base oil fractions and their mixtures. Tribology Transactions. Vol 33 No 3: 371-383. 1990.
5. Bengton, U. Design requeriments materials properties: a basics for materials selection. American society for testing. USA: 230-250, 1991.
6. Berjano, S. Y J. Ordieres. Modelo de desgaste interno en cables de acero. Revista de minas. Madrid, No13: 19-23, 1996.
7. Blazynski, T.Z. Introduction to high – energy – rate. Explosive welding, forming and compaction. Applied science publishers. Metalworking. London and New York. 1983.
8. Bold, P.E. Shear mode crace growth and rolling contact fatigue. Wear. Vol 144: 307-317. 1991.
9. Caraballo, M. A. y otros. Aplicaciones industriales del uso de los explosivos en el trabajo con los metales. CDRom de las memorias del III Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica. La Habana. 1997.

10. Caraballo, M. A. y otros. Recuperación de equipos y piezas por la tecnología de conformación y soldadura por explosivos. Revista Minería y Geología. Vol XIV, No 2. 1997.
11. Caraballo, M. A. Soldadura de tubos de acero inoxidable con el uso de explosivos. Revista Minería y Geología. Vol XIV, No 1: 49-51. 1997.
12. Casals, B. Soldadura y embutición por explosión del titanio con el acero 20K para la fabricación de recipientes a presión. Tesis para optar por el grado de Doctos en Ciencias Técnicas. ISMMMoA. Facultad de Metalurgia y Electromecánica. 1997.
13. Clauser. H. R. Diccionario de materiales y procesos de ingeniería. Editorial Labor S.A. Barcelona. 1985.
14. Cobas, N. Endurecimiento del acero Hadfield por el método de explosivos. Trabajo de Diploma. ISMMMoA. Facultad de Metalurgia y Electromecánica. 1997.
15. Dehua, Y. The friction and wear of metals. Surface and coatings technology. Vol 63:43-48. 1994.
16. Diez, C. J. El índice de endurecimiento en las fundiciones nodulares austemperizadas. CD Rom de las memorias del III Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica. La Habana. 1997.
17. Dikshit, V. Investigation of rolling contact fatigue in a head hardened rail. Wear. Vol 144: 89-109. 1991.
18. Faura, F y J. López. Criterion for tool wear limitation on blaking 18-8 stainless steel strips. Revista de metalurgia. Madrid, Vol 33, No 5: 304-310,1997.
19. Ganapathi, S. K. Residual stress and their effect on the wear behavior of polycrystalline zirconia overcoated diseng. The transactions on magnetics. Vol 28, No 5: 2533- 2535. 1992.

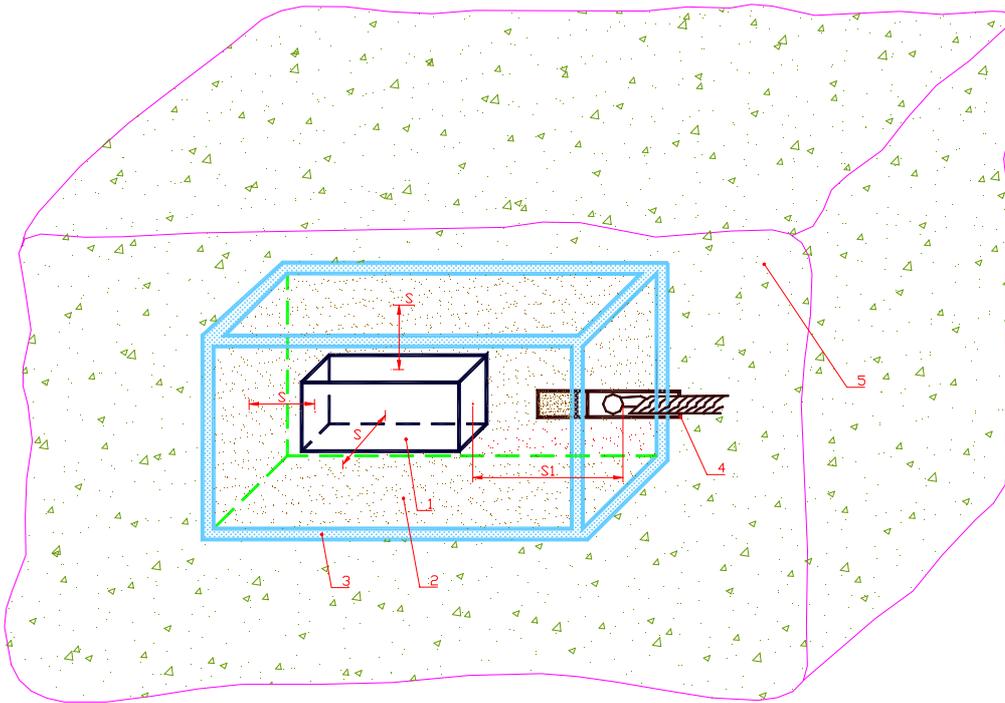
20. Gordón, J. y F. Martínez. Teoría y tecnología del tratamiento térmico. La Habana. Editorial pueblo y educación. 1990.
21. Govantes, G. Y G. Rodríguez. Relación entre el desgaste abrasivo, composición química y propiedades mecánicas de una familia de aceros inoxidable Al Cr-Ni-Cu-Al. Revista construcción de maquinarias. Santa Clara, No 1: 21-26, 1989.
22. Gudenau, H. W. Thermomechanical and thermochemical wear mechanism in the blast furnace heart. Journal of university of science and technology Beijing. China: 37-42. 1998.
23. Gueorguievich, Y y K. Kiev. Comportamiento de desgaste hidroabrasivo corrosivo de algunas aleaciones (1ra parte). Revista construcción de maquinaria. Santa Clara, Vol 9, No 3: 53-78, 1981.
24. Guliaev, A. Metalografía. Tomo I y II. Moscú. Editorial Mir. 1978
25. Herrera, E. y J. Gallardo. Algunos casos prácticos de fallos metálicos relacionados con el desgaste. Revista de metalurgia. Madrid, Vol 22, No 4: 261-263, 1986.
26. Hirofumi, S. Effects of vibration characteristics of measuring system on friction and wear. Japanese journal of tribology. Vol 33. No 5:578-585. 1990.
27. Jarquin, G. Análisis matemático del endurecimiento superficial con sales de boro. CD Rom de las memorias del III Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica. La Habana. 1997.
28. Jeang, J. Experimental study of the effects of surface roughness on friction. Tribology transactions. Vol33 No 3: 402-410. 1990.
29. Kagawa, Akio. Wear properties of Fe₃Cr₇C₃ carbide bulk alloys. Materials transactions, jtm. Vol 33, No 12: 1171-1177. 1992.
30. Lajtin, Y. Metalografía y tratamiento térmico. Moscú. Editorial Mir. 1973.

31. Legrá, A. Software Tierra ©. Versión 1.01. 1999.
32. Lim, D.S. El efecto del grado de endurecimiento por deformación plástica en la fricción y el desgaste durante la abrasión. *Wear*. Vol 13: 91-97. 1969.
33. Liu, G. H. Improvement in tribological properties of chromium oxide coating at high temperature by solid lubricants. *Wear*. Vol 160: 181-189, 1993.
34. Maco, A y F. Belzume. Estudio del endurecimiento superficial por láser de fundiciones grises. *Revista de metalurgia*. Madrid, Vol 34, No 2: 126-130, 1998.
35. Mariam, K. Uso de la energía de los explosivos. *Magf. Metallic. Materiale*. Cechoslovakia. 1973.
36. Martínez, F. y L. Wieslaw. Aspectos físico – químicos del desgaste abrasivo. *Revista construcción de maquinaria*. Santa Clara. No 2: 11-35. 1981.
37. Martínez, F. y H. Martínez. Relación entre la resistencia máxima y el desgaste abrasivo en los aceros al carbono. *Revista construcción de maquinarias*. Santa Clara. No 2: 57-73. 1982.
38. Martínez H. y L. Goyos. Aleaciones austeníticas resistentes al desgaste y esfuerzos de impacto. *Revista construcción de maquinarias*. Santa Clara. No 3: 38-42. 1989.
39. Martínez F. y H. Martínez. Adaptación de máquinas pulidoras para ensayos de desgaste abrasivo. *Revista construcción de maquinaria*. Santa Clara. No 1: 47-55. 1981.
40. Meliam, M. C. y F. Vazquez. Estudio del comportamiento de aleaciones resistentes al desgaste en el jugo mezclado. *Revista construcción de maquinarias*. Santa Clara. No 2: 103-115. 1982.

41. Meriño, Gabriel. Conformación, soldadura y endurecimiento de metales con explosivos. Reporte de aplicación. Cenic. La Habana. 1977.
42. Mutlon, P. Rolling contact fatigue in railway under high axis loads. Wear. Vol 144: 139-152, 1992.
43. Otaño, A. Fragmentación de rocas con explosivos. Editorial pueblo y educación. La Habana. 1980.
44. Pagounis, E. Influence of metal / ceramic interface on the microstructure and mechanical properties of hiped iron – based composites. Published by elsevier science limited. Finland. 1996.
45. Parody, G. Investigación sobre el endurecimiento del acer Hadfield por el método de explosivos. Trabajo de Diploma. ISMMMoa. Facultad de Metalurgia y Electromecánica. 1995.
46. Pires, E. B. The steady sliding problem with nonlocal friction. Engng. Sci. Vol 28, No7: 631-641. 1990.
47. Rinehart, J. S. y J. Pearson. Explosive working of metals. New York. 1963.
48. Rivas, S. M. determinación del número de muestras para ensayos de desgaste de herramientas de corte. Revista construcción de maquinarias. Santa Clara. No 4. 1989.
49. Rodriguez, Y. Estudio del deterioro por abrasión e impacto de los martillos de las trituradoras para óxido de níquel en la Planta de Calcinación y Sínter de la Empresa Ernesto Guevara. Trabajo de Diploma. ISMMMoa. Facultad de Metalurgia y Electromecánica. 1998.
50. Round, Fred. Effects of organic molybdenum compounds on the friction and wear observed with zdp containing lubricant blends. Tribology transactions. Vol 33, No 3: 345-354, 1990.

51. Singh, T. Room temperature erosion behaviour of 304, 316 and 410 stainless steels. *Wear*. Vol 145: 77-100. 1991.
52. Stecle, R. K. The effect of metal removal steel cleanlines and wheel load on the fatigue cite of rail. *Wear*. Vol 144: 71-87. 1991.
53. Steele, R.R. Strategies for maximizing rail life. *J. Am. Ceram. Soc.* Vol 73. No 11: 3466-3469. 1990.
54. Suarez, A. Resistencia al desgaste abrasivo del hierro fundido de baja aleación. *Boletin de información científico técnico. La Habana*, No 2: 40-54, 1988.
55. Sugino, K. Metallurgical improvement of rail for the reduction of rail wheel contact fatigue failwes. *Wear*. Vol 144: 319-328, 1992.
56. Tervo, J. Wear properties of high nitrogen austenitic stainless. *Acta polytechnica scandinavica. Helsinki*, No 128: 1-88, 1998.
57. Verdeja, L y R González. El desgaste de materiales en el crisol de horno alto: conceptos generales. *Revista de minas. Madrid*: No 13 y 14, 1996.
58. Villca, G. Mejoramiento de la calidad de las bolas de molino fundidas en Camibol por tratamiento térmico. *Revista de metalurgia. Madrid*. No 11: 7-16. 1992.

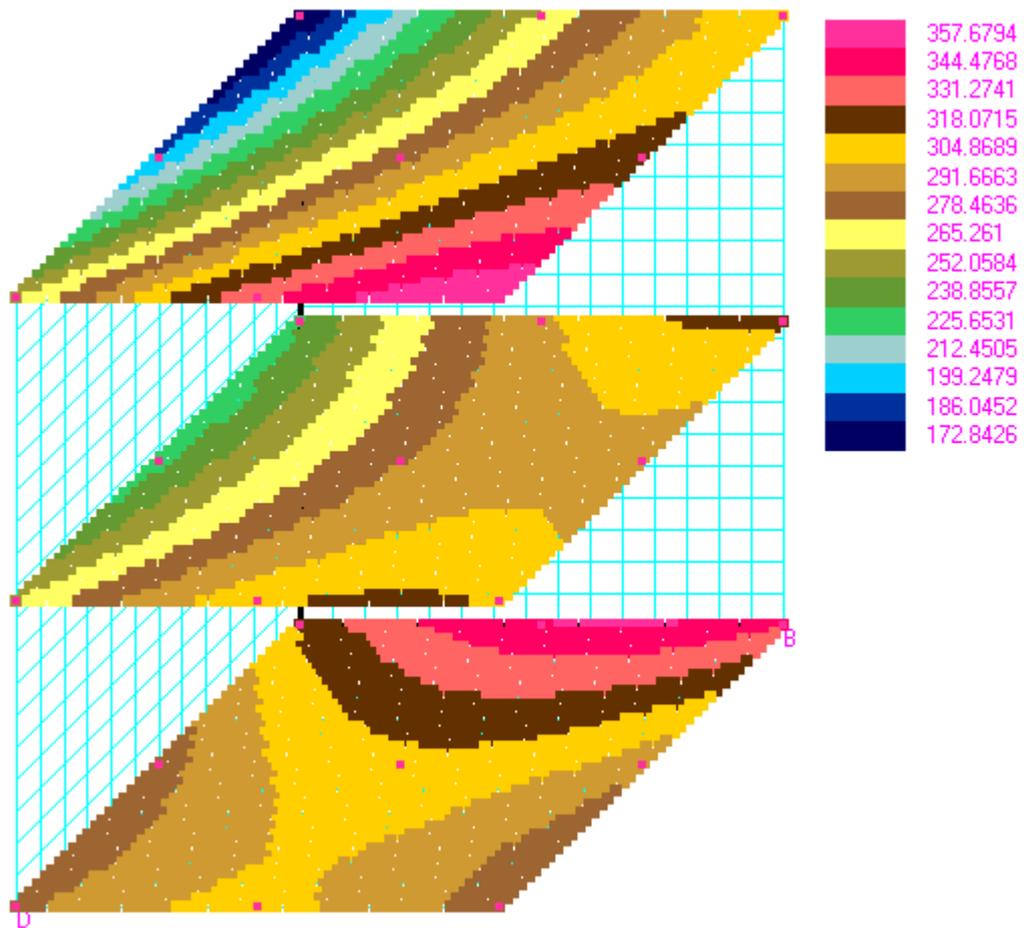
Anexo 1



Ubicación del conjunto para la explosión.

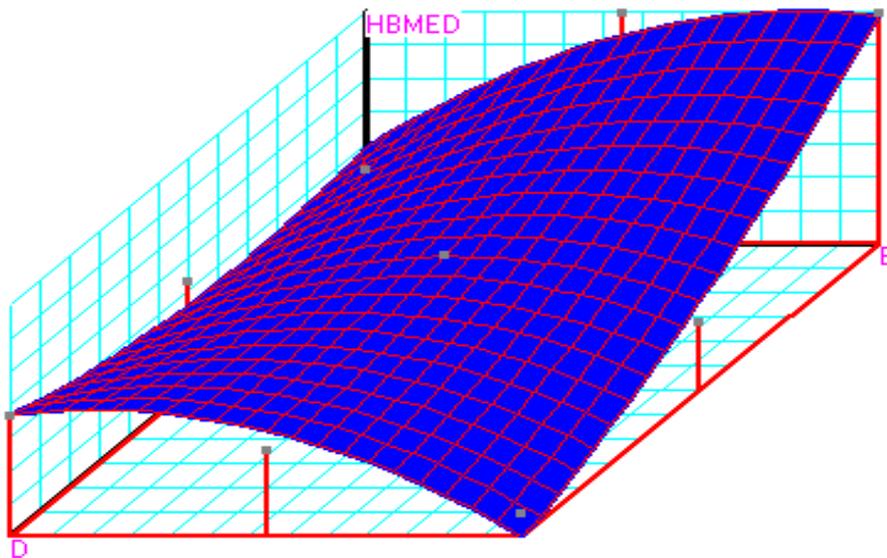
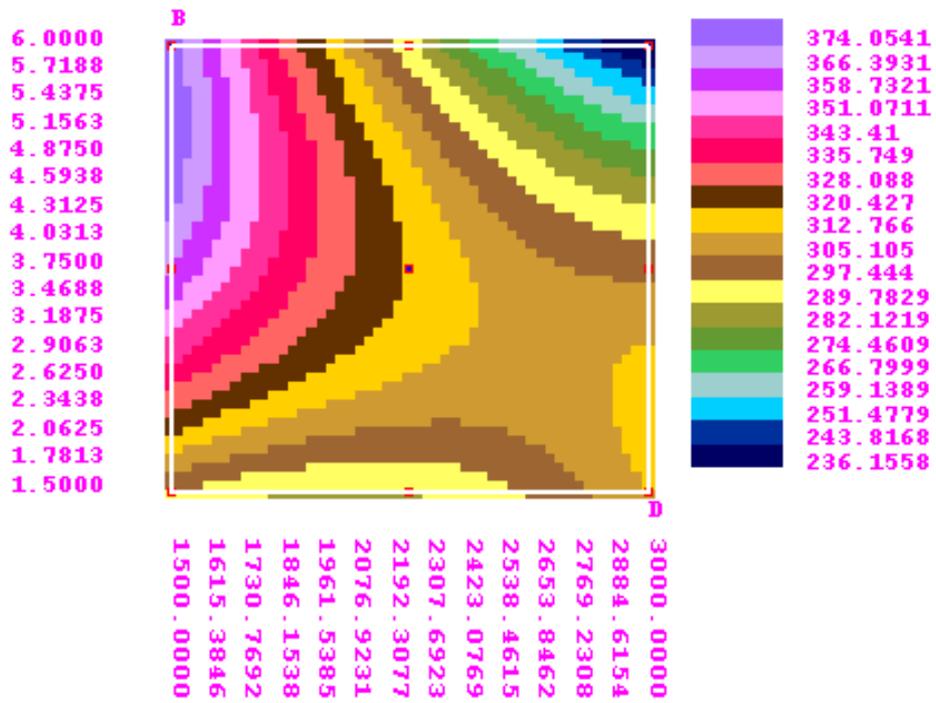
- 1.- Probeta.
 - 2.- Sustancia explosiva.
 - 3.- Caja de cartón.
 - 4.- Detonador eléctrico.
 - 5.- Arena.
- S.- Espesor de la sustancia explosiva.
 $S_1 = S + 20$ mm. Sobre espesor de la sustancia explosiva.

Anexo 5



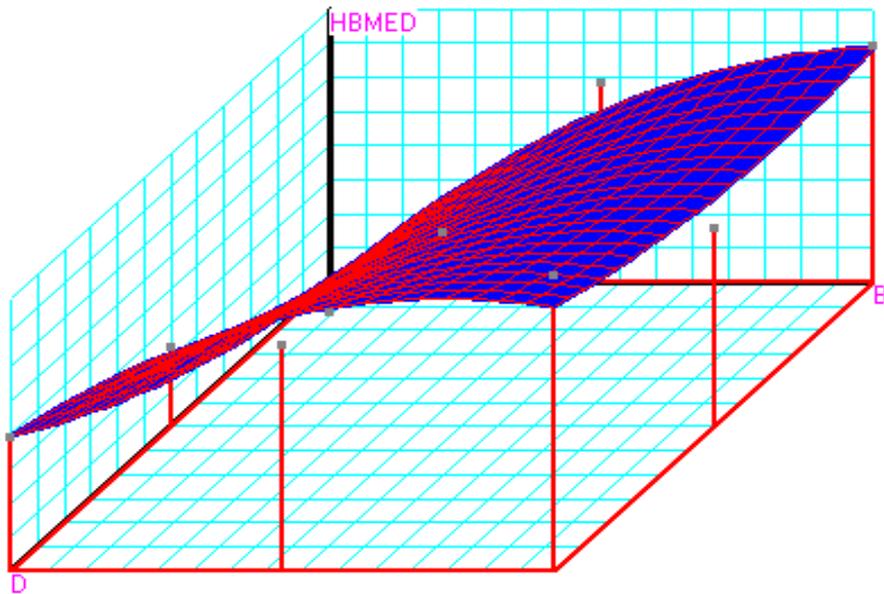
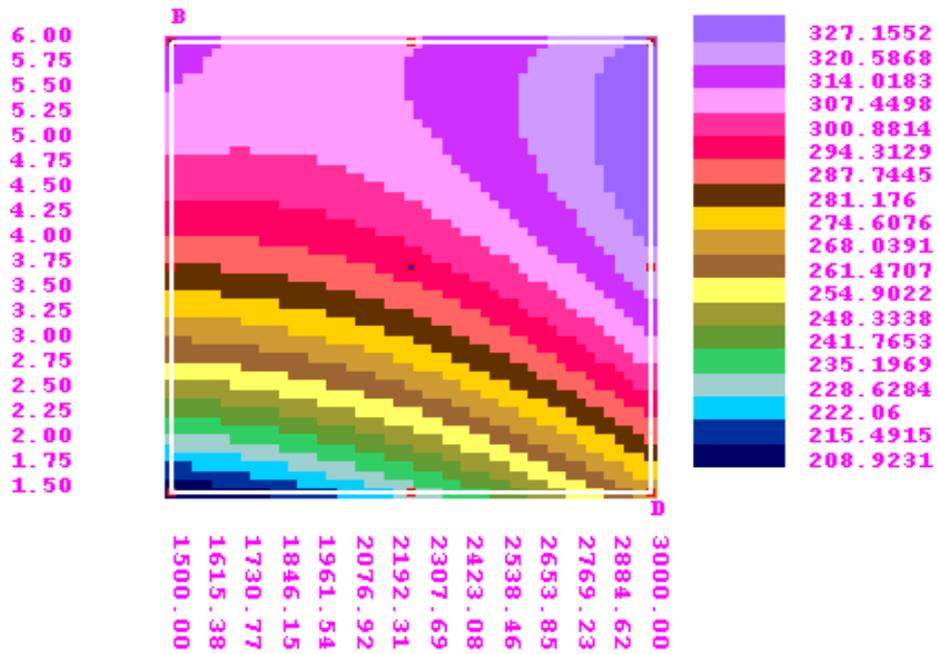
Comportamiento de la dureza promedio HB_{med} en función de los valores de D y b , para cada uno de los niveles de la variable k .

Anexo 2



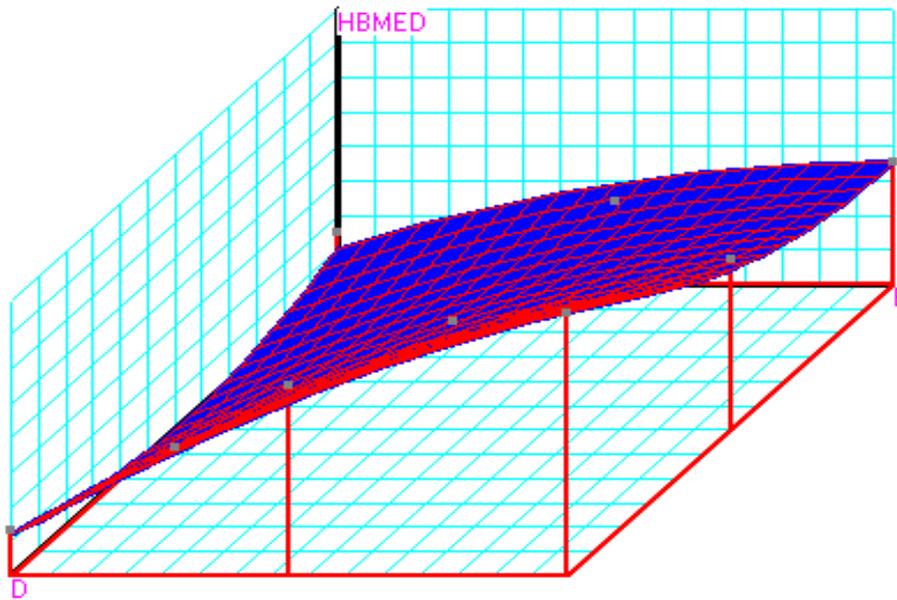
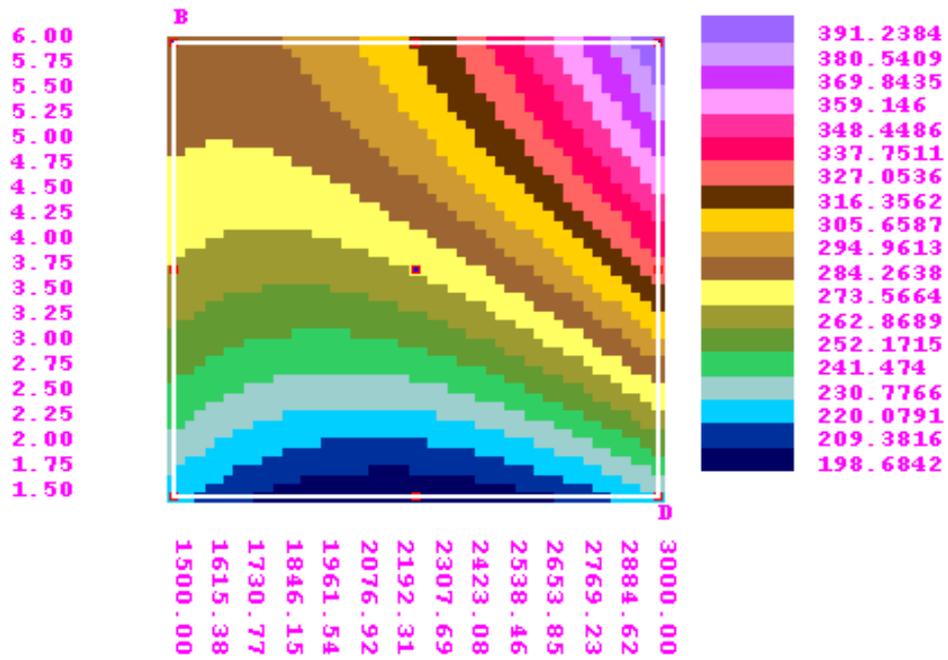
Comportamiento de la dureza promedio **HBmed** en función de los valores de **D** y **b**, para $k = 1$.

Anexo 3



Comportamiento de la dureza promedio **HBmed** en función de los valores de **D** y **b**, para $k = 2$.

Anexo 4



Comportamiento de la dureza promedio **HBmed** en función de los valores de **D** y **b**, para $k = 3$.

Anexo 6

Programa para la optimización del Modelo Matemático:

```
program MinMaxNu;
uses crt;
const divi = 2000;
var total,
    xi,yi,xf,yf,dx,dy,x,y,z,
    xmin,ymin,xmax,ymax,min,max : real;
    ctos : longint;
begin
  { para k=1 }
  xi:=1500; xf:=3000; yi:=1.50; yf:=6;
  dx:=(xf-xi)/divi; dy:=(yf-yi)/divi;
  total:=((xf-xi)/dx)*((yf-yi)/dy);
  xmin:=xi; ymin:=yi; xmax:=xi; ymax:=yi;
  min:=1000000; max:=-1000000;
  ctos:=0;
  x:=xi;
  repeat
    y:=yi;
    repeat
      inc(ctos);
      z:=(267.76361111)*(1)+
        (-0.07403000)*(x)+
        (96.87000000)*(y)+
        (-0.02365481)*(x*y)+
        (0.00002676)*sqr(x)+(-5.71753086)*sqr(y);
      if z<min then
        begin
          xmin:=x; ymin:=y; min:=z;
        end;
      if z>max then
        begin
          xmax:=x; ymax:=y; max:=z;
        end;
      y:=y+dy;
    until y>yf;
    writeln('Efectuado : ',100*ctos/total:6:2,' %');
    x:=x+dx;
  until x>xf;
  writeln('Valor Mínimo : ',xmin:12:6,ymin:12:6,min:12:6);
  writeln('Valor Máximo : ',xmax:12:6,ymax:12:6,max:12:6);
  readln;

  { para k=2 }
  xi:=1500; xf:=3000; yi:=1.50; yf:=6;
  dx:=(xf-xi)/divi; dy:=(yf-yi)/divi;
  total:=((xf-xi)/dx)*((yf-yi)/dy);
  xmin:=xi; ymin:=yi; xmax:=xi; ymax:=yi;
  min:=1000000; max:=-1000000;
  ctos:=0;
  x:=xi;
  repeat
    y:=yi;
    repeat
      inc(ctos);
      z:=(124.41046296)*(1)+
```

```

(-0.02103667)*(x)+
(71.07493827)*(y)+
(-0.00711259)*(x*y)+
( 0.00001620)*sqr(x)+
(-4.88362140)*sqr(y);
if z<min then
begin
xmin:=x; ymin:=y; min:=z;
end;
if z>max then
begin
xmax:=x; ymax:=y; max:=z;
end;
y:=y+dy;
until y>yf;
writeln('Efectuado : ',100*ctos/total:6:2,' %');
x:=x+dx;
until x>xf;
writeln('Valor Mínimo : ',xmin:12:6,ymin:12:6,min:12:6);
writeln('Valor Máximo : ',xmax:12:6,ymax:12:6,max:12:6);
readln;

```

```

{ para k=3 }
xi:=1500; xf:=3000; yi:=1.50; yf:=6;
dx:=(xf-xi)/divi; dy:=(yf-yi)/divi;
total:=((xf-xi)/dx)*((yf-yi)/dy);
xmin:=xi; ymin:=yi; xmax:=xi; ymax:=yi;
min:=1000000; max:=-1000000;
ctos:=0;
x:=xi;
repeat
y:=yi;
repeat
inc(ctos);
z:=(433.10583333)*(1)+
(-0.24781889)*(x)+
(13.75888889)*(y)+
(0.01604889)*(x*y)+
(0.00005047)*sqr(x)+
(-3.14962963)*sqr(y);
if z<min then
begin
xmin:=x; ymin:=y; min:=z;
end;
if z>max then
begin
xmax:=x; ymax:=y; max:=z;
end;
y:=y+dy;
until y>yf;
writeln('Efectuado : ',100*ctos/total:6:2,' %');
x:=x+dx;
until x>xf;
writeln('Valor Mínimo : ',xmin:12:6,ymin:12:6,min:12:6);
writeln('Valor Máximo : ',xmax:12:6,ymax:12:6,max:12:6);
readln;

```

end.

Anexo 7

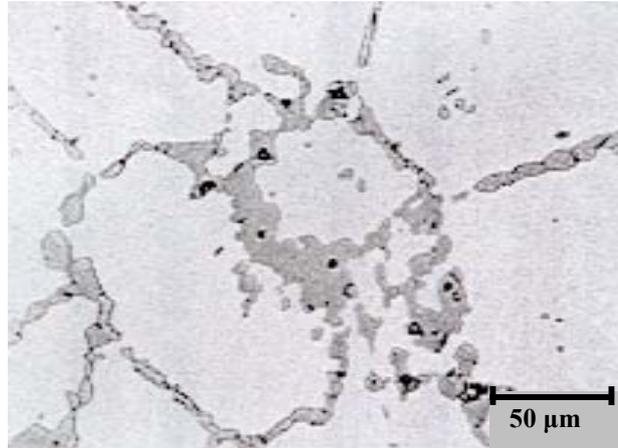


Figura 1.- Probeta de Acero Hadfield sin austenizado.

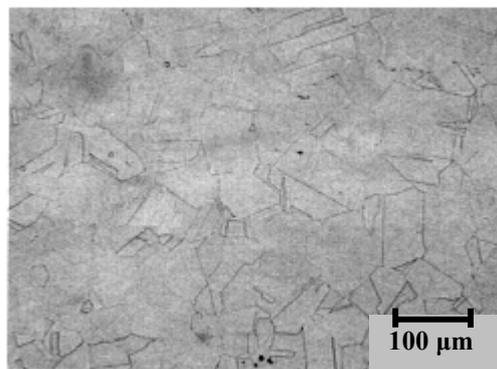
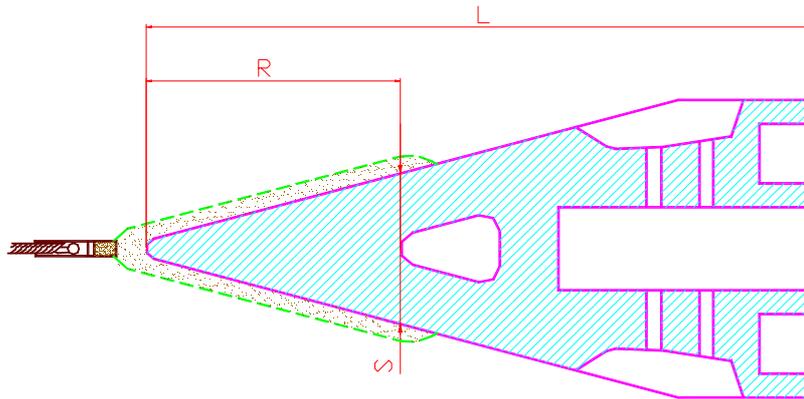


Figura 2.- Probeta de acero Hadfield austenizada.



Figura3.- Probeta de acero Hadfield austenizada y deformada por cargas de impacto.

Anexo 8



	Diente Nuevo	Diente Viejo			
		1	2	3	4
R	390	310	325	330	320
S	180	170	165	168	173
L	900	820	835	840	830