

IMPLICACIONES INDUSTRIALES DEL ENDURECIMIENTO POR EXPLOSIVOS DE PIEZAS DE ACERO HADFIELD

*Industrial implications of the hardening by explosive
of Hadfield steel pieces*

Miguel Ángel Caraballo Núñez
Roilbert Lambert Sánchez

E-mail: macaraballo@ismm.edu.cu
Instituto Superior Minero Metalúrgico Dr. Antonio
Núñez Jiménez

RESUMEN

El desgaste prematuro que sufren las piezas fabricadas de acero Hadfield en los equipos de laboreo minero de la industria cubana del níquel, limita la capacidad de trabajo de estos equipos. El trabajo expone los resultados alcanzados en el desarrollo y aplicación de un procedimiento tecnológico de endurecimiento, empleando las cargas de impacto generadas por la energía de detonación de una sustancia explosiva. Este procedimiento ha sido empleado en los dientes de la pala excavadora ESH-5/45 M utilizados en la extracción del mineral laterítico de la mina de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara en Moa, provincia Holguín, y en los martillos de las trituradoras de sínter M - 8 - 6B de la Planta de Calcinación y Sínter de la propia empresa. La utilización de tal procedimiento reportó un alargamiento equivalente a 1,5 y 2 veces de la vida útil de las piezas con su correspondiente efecto económico, social y ambiental.

PALABRAS CLAVE: Acero Hadfield, carga explosiva, elementos finitos, endurecimiento superficial.

ABSTRACT

The premature wear of Hadfield pieces in mining working equipments used by the nickel cuban industry limits the work capacity of them. The results reached in the development and application of the technological procedure of hardening using the impact loads, generated by the energy of detonation of an explosive substance, are exposed in the work. The technological procedure has been employed in the teeth of the excavating shovel ESH-5/45 M used in the extraction of the mineral lateritic of the Mine of the Company Major Ernesto Che Guevara in Moa Holguín province; and in the hammers of the sinter crusher M - 8 - 6B of the Plant of Calcination and Sinter of the own company. It was obtained a lengthening of the period of useful life in these pieces equivalent to 1,5 to 2 times of the current average of time of work; with the corresponding economic, social and environmental effect.

KEY WORDS: Hadfield Steel, explosive loads, finite elements, superficial hardening.

INTRODUCCIÓN

La industria del níquel constituye uno de los principales renglones de la economía cubana. El incremento de la productividad y eficiencia, y la diversificación de su producción en la búsqueda de productos más competitivos, demanda de tecnologías y, con ello, de equipos y aparatos para su desarrollo. Una parte significativa del equipamiento utilizado se encuentra en fase de deterioro progresivo, lo que exige grandes esfuerzos para sustituir o recuperar dispositivos y piezas que conforman los componentes principales del equipamiento.

Diversas piezas de los equipos de laboreo minero fabricadas de acero al alto manganeso (Hadfield), tales como: los dientes de las palas excavadoras y los martillos de las trituradoras, se desgastan prematuramente, lo que afecta la capacidad de trabajo de estos equipos y acorta de manera considerable el tiempo de vida útil durante el servicio de operación; ello implica pérdidas económicas y un efecto negativo en la calidad ambiental de las secciones de trituración y molienda, y de los diversos frentes mineros. El ritmo de desgaste experimenta una reducción en la fase final de explotación de las piezas, cuando sus valores iniciales de dureza, por la acción simultánea de la abrasión y el impacto, casi se duplican, pero esto sucede cuando ya la pérdida de su configuración inicial las inhabilitan para el servicio.

El acero Hadfield logra unificar las propiedades de resistencia al desgaste con un buen comportamiento ante cargas de impacto, y, en consecuencia, constituye el material idóneo para garantizar un servicio eficiente en estas condiciones de explotación. Sin embargo, hasta el presente, en el país no han sido expuestas soluciones que muestren avances significativos acerca de procedimientos tecnológicos que garanticen ese objetivo.

Los resultados obtenidos en la optimización de la tecnología de tratamiento térmico (Mariño, 2000) representa un importante paso de avance para lograr una estructura de austenita homogénea, requisito indispensable en el éxito de cualquier proceso ulterior de deformación plástica. Para piezas y componentes desgastados se plantean alentadoras posibilidades, de utilizar depósitos de soldadura de acero austenítico al alto manganeso (Torres, 2002). El empleo industrial en Cuba de procedimientos tecnológicos para el endurecimiento del acero al alto manganeso con el uso de explosivos, está exclusivamente referido en un reporte de aplicación de investigadores del CENIC (Meriño, 1977), trabajos preliminares llevados a cabo

por el coordinador del grupo de trabajo de los metales con explosivos del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa (Casals, 1997), y en investigaciones realizadas por el autor en esta temática (Caraballo y otros, 1997a, 1997b; Caraballo, 1999).

Como fase previa al desarrollo del procedimiento tecnológico de endurecimiento con explosivos de piezas de equipos de laboreo minero utilizadas por la industria cubana del níquel, fabricadas de acero Hadfield, se realizó una investigación cuyo resultado permitió obtener el comportamiento de probetas y piezas fundidas de este material (Cobas, 1997; Palmero, 2000; De la Cruz y Leyva, 2003), y un modelo de elementos finitos para simular el comportamiento mecánico de la estructura interna del material (Lambert, 2003), el cual se corroboró por los resultados experimentales.

La presente investigación tuvo el objetivo de establecer los parámetros tecnológicos del proceso de endurecimiento mediante explosivos de piezas de acero Hadfield con vistas a incrementar su tiempo de vida útil.

MATERIALES Y MÉTODO

Previo al tratamiento con explosivos, se analizó el comportamiento del deterioro de martillos y dientes de excavadoras durante un período de un año para los primeros y de tres años para los segundos. El análisis se realizó en dos trituradoras (cada una con 18 martillos) y en 6 excavadoras (cada una posee 4 dientes).

El procedimiento seguido para endurecer las piezas industriales investigadas es similar al descrito para las probetas de acero Hadfield (De la Cruz y Leyva, 2003). Una vez definidos las variables y sus niveles, se procedió a la realización de los ensayos de aplicación de carga explosiva en los martillos de las trituradoras y los dientes de las palas excavadoras, utilizando un diseño de experimentos factorial completo. El número de experimentos (N) resultó igual a 9.

La aplicación de cargas explosivas para el desarrollo del proceso de endurecimiento, se hace en un polígono construido en las inmediaciones del ISMM para estos fines. Se trata de una explanada rodeada de mogotes, para disminuir el ruido y las molestias que causan las explosiones. Los ensayos de aplicación de la carga explosiva involucran la realización de las operaciones siguientes:

- Abertura de un canal en la tierra para la introducción de los martillos.
- Introducción del ojo del martillo en la tierra, de forma vertical, de manera tal que la superficie de trabajo del mismo quede al descubierto (Fig. 1).

- Aplicación de la sustancia explosiva en la superficie de trabajo del martillo.
- Ubicación del detonador en la sustancia explosiva.
- Conexión del detonador eléctrico con la fuente de energía y realización de la explosión.

En la Figura 1 se muestra un esquema del conjunto martillo-sustancia explosiva, introducido en la abertura practicada en la tierra.

La prueba con los martillos se realizó colocando en la máquina trituradora nueve martillos tratados con explosivos y nueve sin tratar, con el objetivo de exponerlos todos al mismo régimen. La ubicación dentro de la trituradora de cada martillo fue convenientemente dispuesta, de modo que estuvieran distribuidos de forma uniforme en las seis secciones del equipo, martillos tratados y sin tratar con explosivos.

Para el endurecimiento de los dientes, se procedió de la forma siguiente:

- Abertura de un canal en la tierra para la introducción de los dientes.
- Introducción del diente en la tierra de forma vertical, de manera tal que la superficie de trabajo del mismo quede al descubierto.
- Aplicación de la sustancia explosiva en la superficie de trabajo del diente; es decir, las cuatro caras de la punta del mismo (Fig. 2).
- Ubicación del detonador en la sustancia explosiva.
- Conexión del detonador eléctrico con la fuente de energía y realización de la explosión.

En la Figura 2 se muestra un esquema del conjunto diente-sustancia explosiva, introducido en la abertura practicada en la tierra.

Se realizaron mediciones periódicas de dureza tanto en los dientes como en los martillos, y en estos últimos también, del peso, con el fin de evaluar el comportamiento de estos indicadores y el ritmo de desgaste producido en los martillos. Se realizó la modelación por elementos finitos de piezas fabricadas de acero Hadfield, teniendo como referencia los resultados de la simulación en probetas del mismo material con el objetivo de simular el comportamiento esperado. La modelación por elementos finitos se hizo utilizando como herramienta de cálculo el programa computarizado COSMOS 3.0, el cual recibe la información técnica y geométrica del objeto de modelación, las situaciones de carga, y las condiciones de fronteras respectivas que permitan su ejecución.

Para la solución del problema en el programa se tuvieron en cuenta los pasos siguientes:

1. Importación del modelo: Los modelos del martillo y el diente fueron dibujados con ayuda del

- AutoCAD. Éstos se exportaron como documento ASIS (*.sat) y luego importados desde el Cosmos.
2. Creación de un estudio no lineal: Se creó un estudio no lineal para el análisis de un modelo con comportamiento plástico.
3. Definición de las propiedades del estudio.
4. Entrada de la curva de tiempo.
5. Estimación del material de cada pieza y del modelo por utilizar: el modelo empleado se escogió teniendo en cuenta el tipo de deformación experimentada por el material y los datos que se conocen acerca de éste. Así, el modelo escogido para el martillo y el diente fue Von Mises Plasticity (kinematic), y para la tierra, Linear Elastic Isotropic.
6. Entrada de las condiciones de frontera: fueron considerados el elemento tierra como empotrado, y las piezas en contacto directo con ésta.
7. Entrada de las cargas actuantes: los valores de carga fueron calculados teniendo en cuenta el espesor de la carga explosiva en contacto con las piezas analizadas. Las cargas actúan normal a la superficie sobre la que se aplica la sustancia explosiva.
8. Creación del enmallado: el tipo de enmallado utilizado fue sólido-tetraédrico, con un tamaño de los elementos de 4 mm para la tierra y de 1 mm para las piezas.
9. Establecimiento de las propiedades del estudio.
10. Ejecución del estudio y obtención de los resultados.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A consecuencia del tratamiento con explosivos y antes de la puesta en explotación, se comprobó que la dureza de los martillos tuvo un incremento promedio superior al 80 %. De acuerdo con las mediciones realizadas de forma sistemática durante su explotación, este incremento alcanza el 110 % luego de 76 horas de trabajo, y al cabo de 800 horas de labor su dureza promedio se mantiene aproximadamente igual.

Los martillos que no fueron tratados con explosivos, sólo alcanzaron un incremento de 28 % en sus valores promedio de dureza durante sus primeras 76 horas de trabajo, para similares condiciones de explotación. Sin embargo, el endurecimiento provocado por las condiciones de operación de los mismos hace que se alcance al cabo de 500 horas de explotación el doble de su dureza inicial, valor que permanece inalterable durante el resto del tiempo que duró la prueba.

Históricamente, los martillos de las trituradoras en condiciones normales de explotación, cuando no están tratados con explosivos, tienen una duración promedio de hasta 480 horas con una frecuencia de trabajo de 12 horas diarias, por lo que en un año de trabajo se utilizan hasta 10 juegos de 18 martillos en una trituradora. Luego del tratamiento con explosivos, los registros de operaciones de la planta de calcinación y sínter de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara mostraron que al cabo de 853 horas de trabajo los martillos aún mantenían su capacidad de trabajo. Como se puede apreciar, su vida útil prácticamente se duplicó.

La Figura 3 muestra el comportamiento del ritmo de desgaste experimentado por los martillos. Se puede apreciar que los tratados con explosivos muestran, luego de más de 800 horas de trabajo, un desgaste significativamente inferior al promedio de los que no recibieron el tratamiento. El ritmo de desgaste entre los martillos que recibieron tratamiento con explosivos resultó variable, y se acentuó en la medida que disminuyen los parámetros de detonación de las cargas explosivas aplicadas. El mejor comportamiento correspondió a los martillos tratados con el mayor espesor de carga explosiva ($H = 25$ mm) y el mayor número de impactos ($k = 3$).

Estos resultados evidencian que con la aplicación del tratamiento descrito sólo se requerirán 5 juegos de martillos para una trituradora en un año de trabajo. El costo unitario de adquisición de los martillos de las trituradoras de sínter sin tratamiento con explosivos es de 24, 24 USD. Para una trituradora de 18 martillos el costo asciende a la cifra de 436, 32 USD.

Teniendo en cuenta que la duración promedio de un juego de martillos que no ha recibido el tratamiento de endurecimiento mediante explosivos es de hasta 480 horas, lo cual equivale a utilizar en un año de trabajo hasta 10 juegos de martillos, se requeriría en igual período una erogación de 4 363, 20 USD para adquirir los martillos que requiere una sola trituradora.

El tratamiento con explosivos involucra la realización de una serie de operaciones que incrementa el costo unitario de cada martillo de acuerdo con la expresión 1 (Cobas, 1997; Palmero, 2000; De la Cruz y Leyva, 2003).

$$Q_{te} = Q_m + Q_{mo} + O_{tg} \quad (1)$$

Siendo:

$Q_{mo} = 1, 18$ USD

$O_{tg} = 0, 67$ USD

El costo de materiales (Q_m) lo determina el costo de adquisición del detonador eléctrico y del explosi-

vo; este último está en función de la masa de sustancia explosiva empleada.

Para el cálculo del costo del explosivo se consideró el mayor espesor de carga explosiva ($H = 25$ mm) y el mayor número de impactos ($k = 3$). En estas condiciones, $Q_m = 5, 02$ USD.

El costo del tratamiento con explosivo de un martillo será: $Q_{te} = 6, 87$ USD (Palmero, 2000; De la Cruz y Leyva, 2003). Es decir, el costo unitario de cada uno será ahora la suma del costo de adquisición más el costo del tratamiento con explosivos, y asciende a la cifra de 31, 11 USD. Para una trituradora de 18 martillos será 559, 98 USD, lo que equivale a 2 799, 90 USD para los cinco juegos de martillos requeridos en un año de trabajo. Con este resultado será posible, entonces, reducir a la mitad las compras de nuevos martillos, disminuir los volúmenes de inventario y propiciar un incremento de los índices de eficiencia operacional, por lo que el costo de la actividad de mantenimiento será menor.

En un año de trabajo para una sola trituradora, el efecto económico de la aplicación del procedimiento tecnológico de endurecimiento mediante explosivos de los martillos sería superior a 1 563, 30 USD. Se debe señalar, además, que el impacto económico estará acentuado por el ahorro de portadores energéticos no cuantificados en la investigación, pero que pudiera llegar hasta un 10 % según fuentes especializadas, si se tiene en cuenta que la reducción de los niveles de desgaste de los martillos exige menos esfuerzo en el accionamiento electromecánico del equipo.

Desde el punto de vista social y ecológico, considerando las evidencias de contaminación sónica y deterioro de la calidad ambiental del entorno en la sección de trituración, un elemento de gran importancia lo constituye la reducción de grandes volúmenes de polvos nocivos a la salud del hombre, expulsados a la atmósfera debido a las actividades de limpieza provocadas por la realización de tareas de mantenimiento en ciclos muy cortos. Al mismo tiempo, al disminuir el ritmo de desgaste de los martillos, se reduce el desbalance del equipo y, a su vez, las vibraciones y ruidos excesivos de grandes magnitudes, desajuste y falta de hermeticidad.

Al analizar el comportamiento de los dientes de las palas excavadoras, cuya frecuencia de trabajo oscila entre 16 y 20 horas diarias, se pudo conocer que su capacidad de trabajo decae entre los 6 y 8 meses de explotación cuando éstos no han recibido el tratamiento previo de endurecimiento. Se observó, además, que los dientes más agredidos por el proce-

so de desgaste son los situados en los bordes de la cuchara.

La dureza promedio de los dientes de las palas excavadoras no tratados con explosivos es de 200 HB aproximadamente; este valor se incrementa de forma paulatina con el uso hasta alcanzar valores cercanos a los 400 HB, casi al final de su vida útil. Sin embargo, los dientes endurecidos previamente con explosivos, incrementan su dureza entre 420 y 480 HB, la cual se mantiene casi sin cambios, según se pudo comprobar en sistemáticas mediciones realizadas a este parámetro durante el período de prueba.

Los juegos de dientes tratados con explosivos mantuvieron su capacidad de trabajo en un período de 12 meses de explotación en idénticas condiciones que los no tratados, es decir, su durabilidad se duplicó.

Considerando que cada pala excavadora utiliza 4 dientes, el costo de adquisición unitario de cada diente sin tratamiento con explosivos es de 700 USD, por lo que en una sola excavadora en un año de trabajo será necesario utilizar 5 600 USD para la adquisición de estos artículos.

El tratamiento con explosivos de los dientes considera, de forma similar a los martillos, los costos de mano de obra y otros gastos. En relación al costo de materiales, se tiene en cuenta la masa de sustancia explosiva empleada; en este caso, los dientes también se consideran tratados con el mayor espesor de carga explosiva ($H=25$ mm) y el mayor número de impactos ($k=3$), por lo cual se obtiene un costo de materiales: $Q_m = 18, 34$ USD. El costo del tratamiento con explosivo de un diente será: $Q_{te} = 20, 19$ USD (Cobas, 1997).

Al igual que en los martillos, el costo unitario de cada diente será ahora la suma del costo de adquisición más el costo del tratamiento con explosivos, y asciende a la cifra de 720, 19 USD. Para una excavadora de 4 dientes será de 2 880, 76 USD

La duración promedio de un juego de dientes que han recibido tratamiento con explosivos se duplica y alcanza los doce meses de explotación, por lo que sólo se requerirá del empleo de un juego de dientes en un año de trabajo, y esto equivale a los 2 880, 76 USD correspondientes a una sola trituradora. El efecto económico de la aplicación del procedimiento tecnológico de endurecimiento mediante explosivos de los dientes sería superior a 2 719, 24 USD.

Se puede afirmar que el lograr incrementar el tiempo de vida útil de los dientes, contribuye a un mejor aprovechamiento de las posibilidades productivas de las excavadoras. Es decir, con el aumento de su durabilidad se reportan otras ventajas, tales como: la

reducción del costo de explotación y de mantenimiento del equipo, ahorro de portadores energéticos y la disminución del volumen de inventario de estos elementos, con lo cual podrían disminuir importaciones y derivar recursos hacia otros renglones.

Además de evaluar el comportamiento en condiciones reales de explotación de piezas fabricadas de acero Hadfield, se realizó la simulación del comportamiento de las mismas aplicando el método de los elementos finitos.

Las Figuras 4 y 5 muestran los resultados de la modelación para un impacto en el martillo de las trituradoras y el diente de la pala excavadora, respectivamente. Al comparar los resultados de esta investigación con aquellos obtenidos para probetas (Lambert, 2003) se confirman, experimentalmente, los resultados de la modelación.

Considerando los resultados antes analizados, se puede afirmar que es factible técnicamente la aplicación de la energía de detonación de una sustancia explosiva para el endurecimiento de los dientes de las palas excavadoras y de los martillos de las trituradoras empleadas en la minería. Estos resultados tienen un elevado impacto económico, social y ambiental.

CONCLUSIONES

- La aplicación a dientes y martillos de acero Hadfield, del procedimiento tecnológico de endurecimiento mediante explosivos, duplica su durabilidad.
- El efecto económico de la aplicación del procedimiento de endurecimiento, representa 1 563, 30 USD para los martillos de una trituradora de sínter, y 2 719, 24 USD para los dientes de una excavadora, en un año de trabajo.
- Se establece que para el endurecimiento de las piezas estudiadas, los parámetros óptimos son un espesor de carga explosiva de 25 mm y 3 impactos.
- El modelo de elementos finitos elaborado para las piezas, utilizando 25 mm de espesor y un impacto, responde a las condiciones reales de experimentación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CARABALLO, M. A. (1999): "Investigación sobre el endurecimiento mediante explosivos, del acero al manganeso empleado en los equipos de laboreo minero", Tesis en opción al título de Master, ISMM de Moa, Facultad de Metalurgia y Electromecánica.
- CARABALLO, M. A., B. CASALS B. Y M. FELIU (1997a): Aplicaciones industriales del uso de los explosivos en el trabajo con los metales. Memorias del III Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica, La Habana [CD-Rom].

CARABALLO, M. A., B. CASALS B. Y M. FELIU (1997b): "Recuperación de equipos y piezas por la tecnología de conformación y soldadura por explosivos", *Minería y Geología*, XIV (2): 59-60.

CASALS, B. (1997): "Soldadura y embutición por explosión del titanio con el acero 20K para la fabricación de recipientes a presión", Tesis en opción al grado de Doctos en Ciencias Técnicas, ISMM de Moa, Facultad de Metalurgia y Electromecánica.

COBAS, N. (1997): "Endurecimiento del acero Hadfield por el método de explosivos", Trabajo de Diploma. ISMM de Moa, Facultad de Metalurgia y Electromecánica.

DE LA CRUZ, CLEUDYS YB. LEYVA (2003): "Investigación sobre el endurecimiento del acero al alto manganeso (Hadfield), mediante explosivos", Trabajo de Diploma, ISMM de Moa, Facultad de Metalurgia y Electromecánica.

LAMBERT, R. (2003): "Modelación del comportamiento del acero al alto manganeso en presencia de cargas explosivas aplicando el Método de los Elementos Finitos", Trabajo de Diploma, ISMM de Moa, Facultad de Metalurgia y Electromecánica.

MARIÑO, M. (2000): "Estudio del deterioro por abrasión e impacto de los martillos de las trituradoras de mandíbula, fabricados de acero Hadfield", Tesis en opción al título de Master, ISMM de Moa, Facultad de Metalurgia y Electromecánica.

MERIÑO, G. (1977): "Conformación, soldadura y endurecimiento de metales con explosivos", Reporte de aplicación, CENIC, La Habana.

PALMERO, A. (2000): "Mejoramiento de la calidad de los martillos de las trituradoras de la planta de calcinación y sinter de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara, mediante el empleo de la energía de una sustancia explosiva", Trabajo de Diploma, ISMM de Moa, Facultad de Metalurgia y Electromecánica.

TORRES, E. (2002): "Influencia del Cr y el Ni en las propiedades mecánicas y funcionales de los depósitos de soldadura de acero austenítico al alto manganeso", Tesis en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas, Universidad de Matanzas Camilo Cienfuegos.

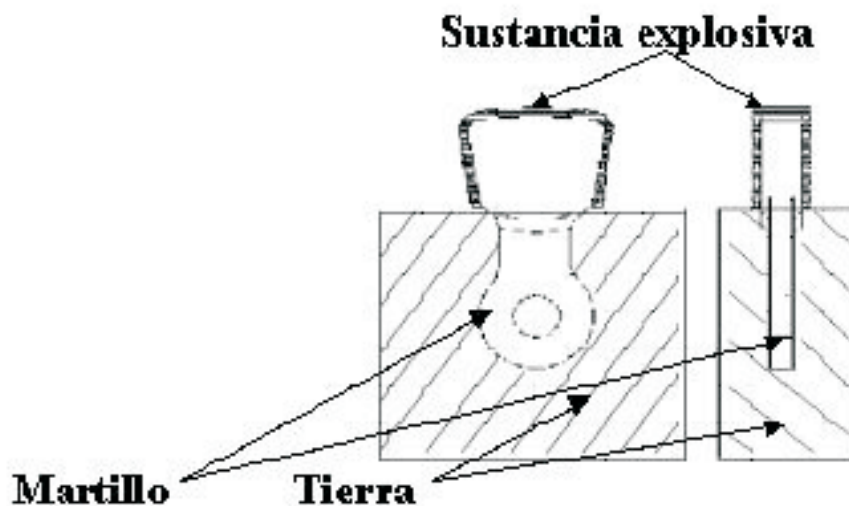


Figura 1. Conjunto: martillo-sustancia explosiva, introducido en la abertura practicada en la tierra.

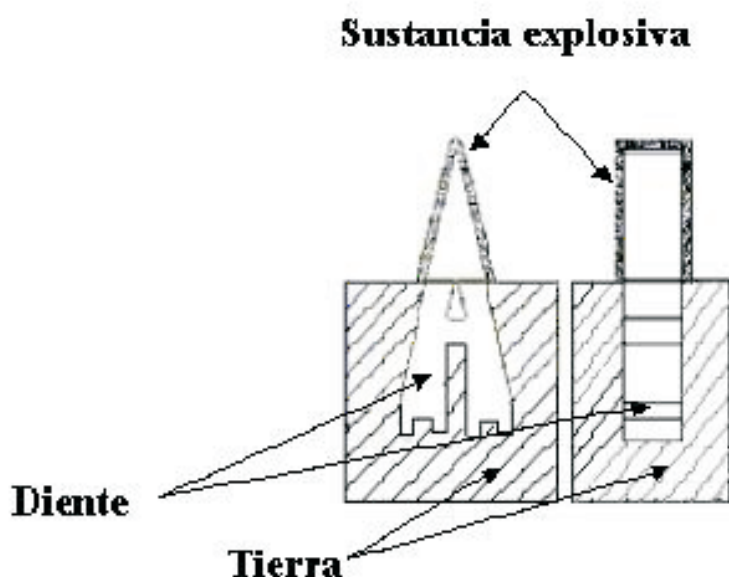


Figura 2. Conjunto: diente- sustancia explosiva, introducido en la abertura practicada en la tierra.

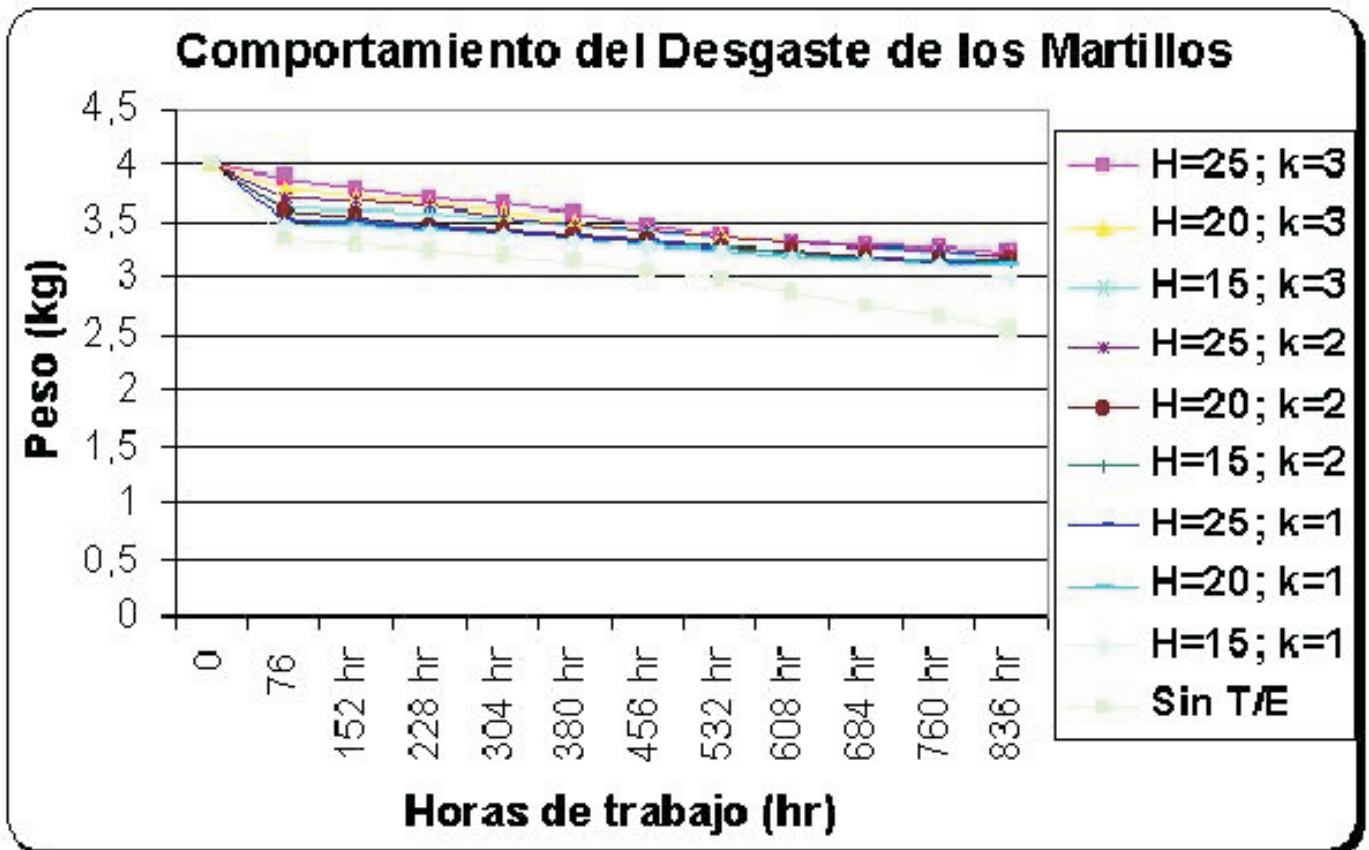


Figura 3. Comportamiento del desgaste de los martillos.

Martillo-Martillo_:: Static Nodal Stress
 Units : MPa Deformation Scale 1 : 0

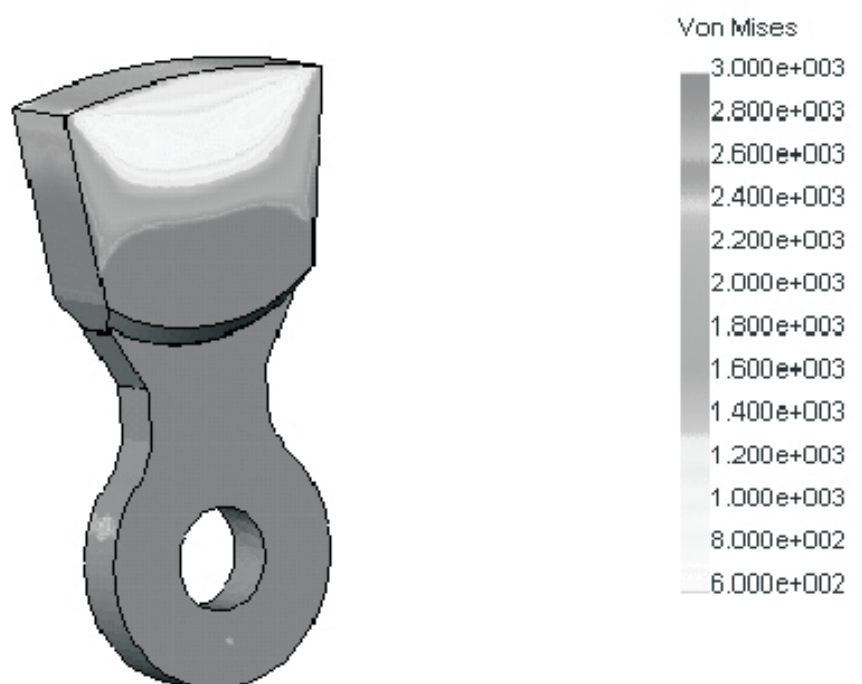


Figura 4. Resultados de la modelación por elementos finitos en el martillo para un impacto y 25 mm de espesor.

Diente-1 :: Static Nodal Stress

Units : MPa Deformation Scale 1 : 359.62

