

# EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO FÍSICO DEL ACERO HADFIELD SOMETIDO A CARGAS EXPLOSIVAS

*Evaluation of physical behaviour of Hadfield steel  
exposed to explosives loads*

Miguel Ángel Caraballo Núñez  
Carlos Vinardell García

E-mail: macaraballo@ismm.edu.cu  
Instituto Superior Minero Metalúrgico

## RESUMEN

Se investigó el efecto que produce la detonación de una sustancia explosiva en el comportamiento físico del acero al alto manganeso (Hadfield); para ello se emplearon técnicas de difracción de Rayos X y ensayo metalográfico con microscopía óptica, que permitieron describir el mecanismo de deformación del material. Se revelaron las fases presentes en la estructura, las particularidades de su comportamiento y evidencias de deformación plástica, el tamaño promedio del grano y su influencia en el crecimiento del semiancho físico del pico de los difractogramas, lo cual está relacionado con los defectos de empaquetadura de acuerdo con los mecanismos de deslizamiento y maclado, que quedan evidenciados tanto en las micrografías como por el análisis cuantitativo de la difracción por Rayos X.

**PALABRAS CLAVE:** Acero Hadfield, carga explosiva, deformación plástica, acritud, deslizamiento, maclado.

## ABSTRACT

The results reached in the investigation carried out about the effects that are produced by the employment of the energy that generates the detonation of an explosive substance, on the physical behavior of the high manganese steel (Hadfield) are exposed in the work. The diffraction techniques by x rays and the metallographic examination with optic microscopic to

describe the mechanism of hardening of the material under those conditions are used. At the same time, phases that are present are revealed in the structure, the particularities of their behavior and evidences of plastic deformation, the size average of the grain and their influence in the growth of the physical semiwidth of the pick of the diffractograms related with the defects of agreement packing with the slip and twin mechanisms that are evidenced as much in the micrographics as for the quantitative analysis of the diffraction by x rays.

**KEY WORDS:** Hadfield Steel, Explosive Loads, Plastic Deformation, Strain Hardening, Slip, Twin.

## INTRODUCCIÓN

El acero austenítico al alto manganeso fue el primer acero de aleación descubierto por *sir* Robert Hadfield, precursor del desarrollo en la industria de construcción de maquinarias; de ahí que en el mundo entero este material es más conocido por el nombre de su creador y denominado comúnmente como acero Hadfield. Comenzó a utilizarse en la industria desde 1882 aproximadamente. Su principal característica desde el punto de vista de la composición, es poseer una relación  $\% \text{ Mn} / \% \text{ C} > 10$  (Guliaev, 1983).

El acero Hadfield es considerado en la práctica industrial como el único material que combina elevada tenacidad-ductilidad con una gran capacidad de endurecimiento por deformación, y una resistencia

al desgaste extraordinariamente alta, a pesar de su relativa baja dureza cuando es sometido al trabajo de golpeo continuo combinado con fricción.

Teniendo en cuenta las cualidades antes descritas de este material, son amplias sus aplicaciones en la industria, por lo que se destina, fundamentalmente, para la fabricación de piezas tales como los martillos de las trituradoras de mineral, dientes de palas excavadoras, cuchillas de bulldozer, cruces de rieles para las vías férreas, etcétera.

Las referencias bibliográficas muestran una gran variedad de enfoques con relación al comportamiento físico del acero Hadfield y la explicación de su mecanismo de deformación; sin embargo, no queda clara la descripción del mismo ni la caracterización metalográfica cuando el material es sometido a las cargas de contacto que se producen a partir de la propagación de un pulso generado por la detonación de una sustancia explosiva.

El presente trabajo tiene como objetivo conocer el comportamiento físico del acero Hadfield sometido a cargas explosivas mediante el empleo de técnicas de microscopía óptica y difracción de Rayos X, con el fin de establecer su mecanismo de deformación.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Se utilizaron probetas cilíndricas de acero al alto manganeso, fundidas y austenizadas en la Empresa Mecánica del Níquel (Caraballo, 1999; De la Cruz y Leyva, 2003), las cuales se sometieron 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 el comportamiento de la microestructura y el mecanismo de endurecimiento de este material. Se fabricaron previamente cámaras de prueba en las cuales serían ubicadas las probetas y la carga explosiva por emplear; cada cámara de prueba tiene diámetros interiores diferentes, en dependencia del espesor escogido de carga explosiva alrededor de la probeta. El material de la cámara de prueba es acero 40X.

Como variables del proceso, fueron escogidos el número de impactos ( $k$ ) y el espesor de carga explosiva alrededor de las probetas ( $\delta$ ).

El número de impactos ( $k$ ) es una variable cuantitativa, fácil de controlar, se puede repetir cuantas veces sea necesario (con la obtención de un nuevo resultado en cada impacto) y se ajusta a la característica que posee el acero Hadfield de variar sus propiedades mecánicas por impactos repetidos.

El espesor de la carga explosiva alrededor de las probetas ( $\delta$ ) se relaciona con las propiedades energéticas de la sustancia explosiva empleada y los parámetros de detonación, en la medida en que se incrementa su valor desde una magnitud crítica y hasta un valor límite; está vinculado, en primer lugar, con la velocidad de detonación del paquete explosivo y, en segundo, con las presiones que se generan en las proximidades del frente de detonación, entre otros factores.

A cada una de las variables se le fijaron tres niveles, teniendo como base para la selección la información proporcionada por la firma comercializadora de explosivos, y la experiencia de trabajo acumulada por el Grupo de Tratamiento de Metales con el Uso de Explosivos, radicado en el Instituto Superior Minero Metalúrgico Dr. Antonio Núñez Jiménez, de Moa.

Como sustancia explosiva fue empleada el Tectron - 100, algunas de cuyas características se relacionan a continuación (ULAEX, 2000):

- Densidad ..... 1,15 g/cm<sup>3</sup>
- Energía ..... 740 kcal/kg
- Velocidad de detonación ..... Se establece en función del diámetro de la carga (según gráfico proporcionado por la firma suministradora)
- Presión de detonación ..... Se establece en función del diámetro de la carga (según gráfico proporcionado por la firma suministradora)

Una vez definidos las variables y sus niveles, se procedió a la realización de los experimentos, utilizando un diseño factorial. En este caso, el número de experimentos ( $N$ ) resultó igual a 9. En cada uno se realizaron tres réplicas, por lo que el total de experimentos fue de 27.

La matriz de este diseño de experimento se muestra en la Tabla 1.

La aplicación de cargas explosivas se realiza en un polígono construido en las inmediaciones del ISMM para estos fines. Se trata de una explanada rodeada de mogotes, a fin de disminuir el ruido y las molestias que causan las explosiones. Los ensayos de aplicación de la carga explosiva en las probetas de acero al alto manganeso, involucran la realización de un conjunto de operaciones que aparecen convenientemente descritas en Lambert (2003) y en De la Cruz y Leyva (2003).

Una vez realizada la aplicación de las cargas de impacto, utilizando la sustancia explosiva en diferentes condiciones según el diseño de experimentos, se procede a la realización de los distintos ensayos para la caracterización del comportamiento físico del

material, el análisis de la microestructura y del mecanismo de endurecimiento del acero.

El ensayo metalográfico realizado para la observación de la microestructura metalográfica de las muestras se efectuó en un plano seccionado de la probeta, paralelo al plano exterior de referencia.

Para la observación de las microestructuras se empleó un microscopio óptico metalográfico marca Carl Zeiss, modelo Neophot 30, con lentes planocromáticas HD y cámara de vídeo marca COHO acoplada a la computadora. Este microscopio se ubica en el laboratorio de Metalografía del CIME, acreditado por el Órgano Nacional de Acreditación de la República de Cuba, según Resolución de otorgamiento 06-2003 y Registro no. 074 del 17 de enero de 2003, en correspondencia con el cumplimiento de las exigencias establecidas en la NC ISO/IEC 17025 "Requisitos Generales para la Competencia de los Laboratorios de Ensayo y Calibración" y demás regulaciones complementarias. Previamente, las probetas fueron desbastadas, pulidas y atacadas químicamente según las normas correspondientes.

Como normas de referencia, fueron utilizadas las siguientes ASTM: E 407-70 (reaprobada en 1989) y E 3-80 (reaprobada en 1986).

La difracción se realizó en un Difractómetro HZG-4A de la Freiburger Präzisionsmechanik, ubicado en el laboratorio de Análisis Estructural del IMRE, adjunto a la Facultad de Física de la Universidad de La Habana. La medición se realizó bajo las condiciones siguientes:  $I = 30$  mA;  $V = 30$  kV. Fue empleada la radiación de una lámpara de cobre con una longitud de onda ( $\lambda$ ) de 0,15182 nm (1,54182 Å). El análisis se realizó desde un valor angular  $2\theta = 10^\circ$  hasta  $2\theta = 100^\circ$ , con un paso de  $0,2^\circ$  y un tiempo de irradiación de 5 s, a fin de caracterizar cualitativamente las fases presentes en la muestra. Para la caracterización cuantitativa de las muestras, el rango de mediciones va desde un valor angular  $2\theta = 67^\circ$  hasta  $2\theta = 79^\circ$ , correspondiente a la reflexión (220), con un paso de  $0,05^\circ$  y un tiempo de 15 s.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En las micrografías de las Figuras 1 a la 4, se muestran imágenes de la estructura metalográfica a 519x presente en probetas patrón de acero al alto manganeso (Hadfield) y en probetas del mismo material, tratadas en condiciones diferentes de aplicación de las cargas de impacto generadas por la energía de detonación del Tectron - 100, según el diseño de experimentos.

A partir de la observación metalográfica, se establece lo siguiente:

- En muestras que no fueron sometidas a la acción de cargas explosivas (probetas patrón de la Figura 4):
  - Se observa una estructura típica de austenita con tendencia a formación dendrítica.
  - No hay evidencias de deformación plástica.
  - Tamaño promedio del grano 1, según norma ASTM E - 112 - 88.
- En muestras sometidas a condiciones diferentes de aplicación de las cargas:
  - Se evidencia una estructura de austenita en forma de granos deformados.
  - Existe una textura de deformación plástica con presencia de líneas características de los planos de deslizamiento y de los planos de maclas en cada una de las micrografías de las probetas tratadas con explosivos. La densidad es mayor cuanto mayor es el espesor de carga explosiva empleada y mayor el número de impactos al que fue puesta la muestra.
  - Tamaño promedio del grano 2, según norma ASTM E - 112 - 88.

En el análisis cualitativo de los difractogramas de todas las muestras evaluadas durante el experimento de difracción de Rayos X, se detecta la presencia de la red cristalina de la austenita lo cual coincide con la valoración que han hecho otros autores sobre este material (ASM Volume 11, 1992; Torres, 2002). Los máximos de intensidad de los Rayos X difractados se corresponden en todos los casos con los pertenecientes al patrón de difracción de la austenita.

Las posiciones de los máximos de intensidad (picos) de los difractogramas obtenidos en la difracción de Rayos X de acuerdo con los índices racionales de Miller, son:

- Pico 1 (111): Entre  $41^\circ$  y  $44^\circ$
- Pico 2 (200): Entre  $48^\circ$  y  $50^\circ$
- Pico 3 (220): Entre  $72^\circ$  y  $74^\circ$
- Pico 4 (311): Entre  $88^\circ$  y  $90^\circ$
- Pico 5 (222): Entre  $94^\circ$  y  $96^\circ$

Se observó que los difractogramas correspondientes a todas las muestras tratadas con explosivos (probetas 1 a la 9) y el de la muestra patrón (probeta 30) son coincidentes al ser superpuestos, lo cual es indicativo de que existe coincidencia en la posición de los picos de difracción, y, en consecuencia, la composición física de la estructura es similar en todos los casos.

Los valores de la tensión tangencial de primer género para el maclado ( $\tau_{cl}$ ) y para el deslizamiento ( $\tau_{cs}$ ),

resultado del registro de los difractogramas y en correspondencia con la utilización de coeficiente de Schmid escogido (Chen, 2000; Torres, 2002), se muestran en la Tabla 2.

En los metales la deformación plástica puede desarrollarse a partir del mecanismo de deslizamiento, y también del mecanismo de maclado y de la combinación de ambos mecanismos (Chen, 2000; Elgun, 2003), en correspondencia con el cumplimiento de las desigualdades siguientes:

Si  $t_{cs} \geq [t_{fc}] \Rightarrow$  El material fluye por deslizamiento.

Si  $t_{ct} \geq [t_{fc}] \Rightarrow$  El material fluye por maclado.

Según los valores determinados de tensión tangencial para el maclado y para el deslizamiento, se puede apreciar que el menor valor de tensión tangencial obtenido es de 198,60 MPa y dicho valor supera la magnitud límite de fluencia de cizallamiento (175 MPa). Es decir, el material fluye por deslizamiento y, a la vez, fluye por maclado, por lo que en el proceso de deformación plástica se conjugan ambos mecanismos y con esto se confirma la presencia de los planos de deslizamiento y de los planos de maclas que fueron observados en las micrografías de las Figuras 1 a la 3.

El semiancho físico del pico en cada una de las probetas ensayadas muestra un comportamiento creciente según una ley lineal con coeficiente de correlación  $R=0,86$ . La ecuación del modelo experimental es la siguiente:

$$Wl = (0,61) + (4,04 \times 10^{-3})(\delta) + (0,12)(k)$$

Del análisis metalográfico fue posible establecer que el grano metalográfico pasa de un tamaño promedio 1 a 2, una vez que las probetas son sometidas al efecto de las cargas explosivas; sin embargo, el grano que se ha reducido luego del proceso de deformación plástica, mantiene aproximadamente igual su tamaño promedio cualesquiera que fueran las condiciones en las cuales fueron aplicadas las cargas explosivas.

Al mantener aproximadamente igual el tamaño promedio de grano, se puede asumir entonces que su aporte al perfil del máximo de difracción es el mismo y, por tanto, la contribución al crecimiento del semiancho físico del pico es atribuible en exclusivo al incremento del tensionamiento de la estructura cristalina, lo cual a su vez se relaciona con el crecimiento de la densidad de defectos observados en la estructura mediante el análisis metalográfico.

Resulta evidente la tendencia al crecimiento del semiancho físico del pico en correspondencia con el

incremento de la densidad de defectos que genera el proceso de deformación plástica (micrografías mostradas en las Figuras 1 a la 3), en la misma medida que se hace mayor el espesor de la carga explosiva empleada y mayor el número de impactos al que fue expuesta la muestra.

Teniendo en cuenta los resultados combinados del ensayo metalográfico y el análisis de difracción por Rayos X es posible explicar el mecanismo de endurecimiento del acero Hadfield en presencia de cargas explosivas, a partir del aumento de los defectos de empaquetamiento de acuerdo con los mecanismos de deslizamiento y maclado, a consecuencia del aumento de las variables asociadas con el estado tensional de la red, combinado con la reducción del tamaño de los granos y el incremento de la acritud como resultado del aumento de la densidad de dislocaciones, todo lo cual trae como consecuencia el incremento de los parámetros que caracterizan el endurecimiento por trabajo de deformación.

## CONCLUSIONES

1. Las probetas fundidas de acero Hadfield, antes y después del tratamiento con explosivos, muestran una estructura de austenita con tendencia a formación dendrítica, confirmado por el análisis cualitativo de la difracción por Rayos X.
2. Con posterioridad al tratamiento con explosivos se evidencia una textura de deformación plástica con líneas características de los planos de deslizamiento y de los planos de maclas, lo cual fue confirmado por la difracción de Rayos X, siendo mayor la densidad de los mismos cuanto mayor es el espesor de carga explosiva empleada y mayor el número de impactos al que fue expuesta la muestra.
3. El tamaño promedio del grano se reduce con posterioridad a la acción de los explosivos, pero permanece aproximadamente constante en todas las probetas con independencia de las condiciones de su aplicación, por lo que la contribución al incremento del semiancho físico del pico de los difractogramas se puede considerar que es atribuible exclusivamente al incremento de la densidad de los defectos de la estructura en correspondencia con los mecanismos de deslizamiento y maclado.
4. El mecanismo de endurecimiento del acero Hadfield en presencia de cargas explosivas, se explica por la ocurrencia de los mecanismos de deslizamiento y maclado provocada por la acción combinada

del aumento de las variables asociadas con el estado tensional de las muestras, la reducción del tamaño de los granos, y el incremento de la acritud como resultado del trabajo de deformación en frío.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASM. ASM Handbook. Volume 11 (1992): Atlas of phase equilibria in ternary alloys microstructures. The Materials Information Society, ASM International, United States of America.

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 Moa, Facultad de Metalurgia y Electromecánica.

CHEN, Z. (2000): "Yield surfaces of fcc crystals with crystallographic slip and mechanical twinning", Transactions of Nonferrous Metals Society of China, Vol.10. No.1. pp. 34-39, 2000. Disponible en la World Wide Web <http://www.chinainfo.gov.cn/periodical/index.htm>

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

ELGUN, S. (2003): Plastic Deformation. Página Web. Última actualización diciembre de 2003. Disponible en la Wide World Web <http://info.lu.farmingdale.edu/depts/met/met205/index.html>

GULIAEV, A. (1983): *Metalografía*, t. II, Ed. Mir, Moscú.

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 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 Martha Abreu.

ULAEX (2000): *Accesorios para voladuras*. (Catálogo Industrial.)

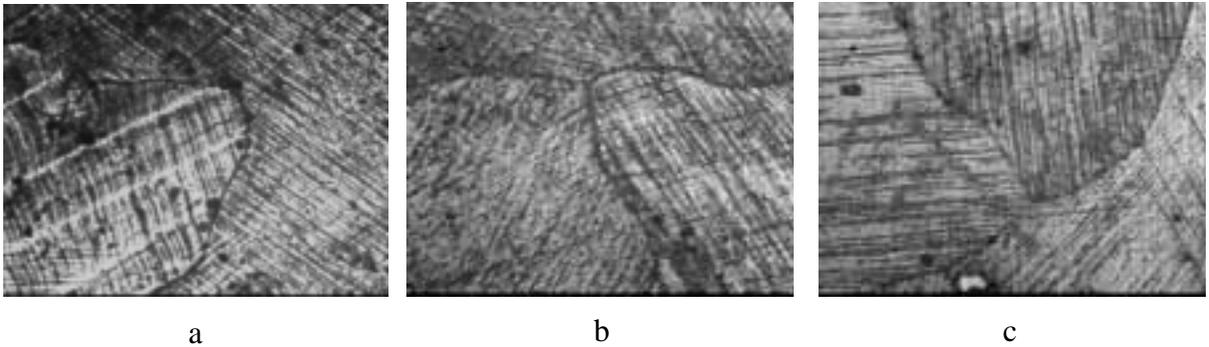


Figura 1. Micrografías de muestra de acero Hadfield, tratadas con 35 mm de espesor de carga explosiva. a) 3 impactos, b) 2 impactos, c) 1 impacto.

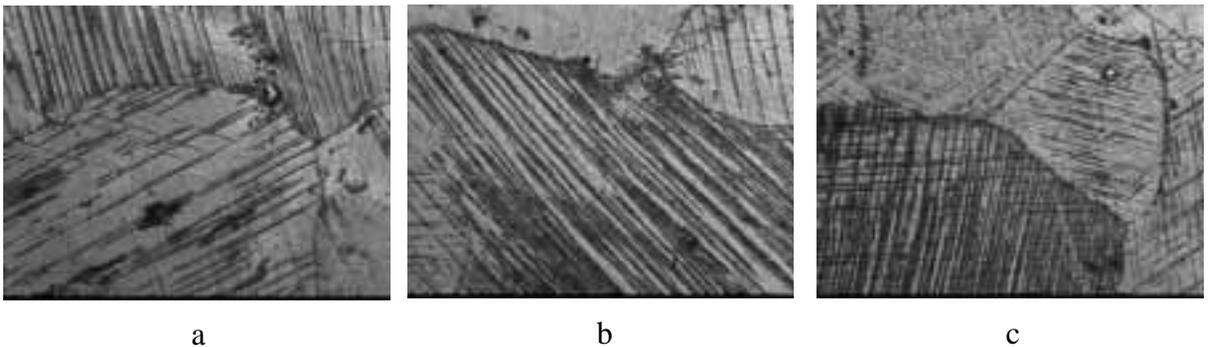


Figura 2. Micrografías de muestra de acero Hadfield, tratadas con 22,5 mm de espesor de carga explosiva. a) 3 impactos, b) 2 impactos, c) 1 impacto.

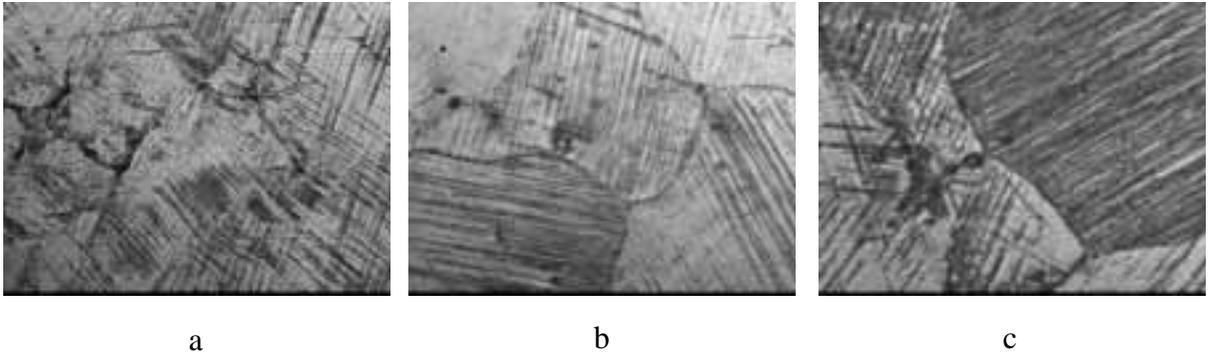


Figura 3. Micrografías de muestra de acero Hadfield, tratadas con 10 mm de espesor de carga explosiva. a) 3 impactos, b) 2 impactos, c) 1 impacto.

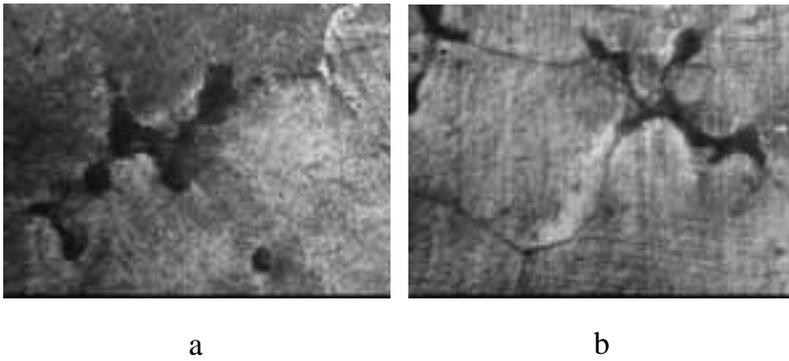


Figura 4. Micrografías de probeta patrón.

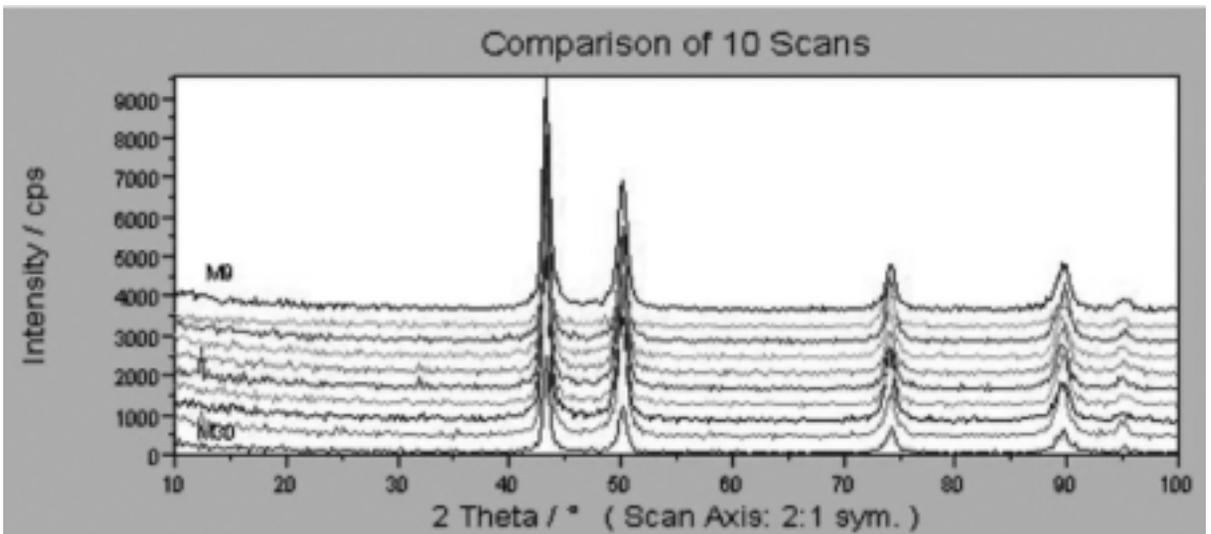


Figura 5. Comparación entre los difractogramas de las muestras tratadas con explosivos (Probetas 1 a la 9), y la probeta patrón (Probeta 30).

<b>TABLA 1. MATRIZ DEL DISEÑO DE EXPERIMENTO</b>				
No. Exp.	$X_1$	$X_2$	h	k
1	1	1	35	3
2	0	1	22,5	3
3	-1	1	10	3
4	1	0	35	2
5	0	0	22,5	2
6	-1	0	10	2
7	1	-1	35	1
8	0	-1	22,5	1
9	-1	-1	10	1

<b>TABLA 2. TENSIONES TANGENCIALES PARA EL MACLADO Y EL DESLIZAMIENTO</b>								
No. Exp.	$\delta$	$\kappa$	Réplica a		Réplica b		Réplica c	
			$\pi_{des.}$ (MPa)	$\pi_{mac.}$ (MPa)	$\pi_{des.}$ (MPa)	$\pi_{mac.}$ (MPa)	$\pi_{des.}$ (MPa)	$\pi_{mac.}$ (MPa)
1	35	3	544,98	314,65	526,59	304,03	539,01	311,20
2	22,5	3	498,24	287,66	489,62	282,68	500,14	288,75
3	10	3	435,69	251,54	434,04	250,60	425,65	245,75
4	35	2	503,93	290,94	505,38	291,78	518,73	299,49
5	22,5	2	440,74	254,46	431,31	249,02	426,10	246,01
6	10	2	414,12	239,09	428,04	247,13	424,74	245,22
7	35	1	395,87	228,56	374,40	216,16	401,27	231,67
8	22,5	1	378,25	218,38	356,36	205,74	379,49	219,10
9	10	1	343,98	198,60	347,35	200,54	384,24	221,84