

**REPÚBLICA DE CUBA
MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR
INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALURGICO
“Dr. ANTONIO NÚÑEZ JIMÉNEZ”
FACULTAD DE METALURGIA Y ELECTROMECAÁNICA
DEPARTAMENTO DE MECÁNICA**

ENDURECIMIENTO MEDIANTE EXPLOSIVOS DEL ACERO HADFIELD

**Tesis presentada en opción al Grado Científico de Doctor en
Ciencias Técnicas**

AUTOR: M. Sc. Ing. Miguel Angel Caraballo Núñez

TUTORES: Dr. C. Urbano Ordóñez Hernández

**Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría
Facultad de Mecánica
Departamento de Construcción de Maquinaria**

**Dr. C. Benito Casals García
Empresa Mecánica del Níquel “Gustavo Machín”**

**Dr. C. Arístides Alejandro Legrá Lobaina
Instituto Superior Minero Metalúrgico “Dr. Antonio Núñez Jiménez”
Facultad de Metalurgia y Electromecánica
Departamento de Matemática y Computación**

Moa, 2004

AGRADECIMIENTO

A los Drs Urbano Ordóñez, Benito Casals y Arístides Legrá,
por su asesoría científica y disposición desinteresada para ofrecerme ayuda.

A todos mis compañeros del departamento y la facultad,
por su apoyo y colaboración.

A los compañeros de las Empresas: Mecánica del Níquel, Che Guevara y Cromo Moa,
que creyeron en el trabajo y aseguraron su realización.

A los compañeros de la Facultad de Mecánica del ISPJAE, el CIME y el IMRE,
que brindaron sus laboratorios, conocimientos y experiencias.

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

DEDICATORIA

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

A mis hijos, que les sirva de ejemplo.

A la memoria de mi tío Osmay.

A nuestra revolución, por las posibilidades que me ofrece.

SINTESIS

El trabajo realiza una investigación, sobre la influencia de las cargas de impacto generadas por la energía de detonación de una sustancia explosiva en las regularidades del comportamiento del acero Hadfield, obteniéndose modelos lineales de mínimos cuadrados estadísticamente significativos que muestran una tendencia creciente de sus propiedades mecánicas y funcionales en la misma medida que se incrementan las variables independientes del proceso de experimentación (δ y k), las cuales están relacionadas con los valores de presión de detonación (P_d) y energía específica (E_e), que representan los parámetros de detonación de la sustancia explosiva empleada. Se utilizaron técnicas de microscopía óptica, y de difracción por rayos x para la caracterización metalográfica y la determinación del estado tensional de las muestras; al mismo tiempo se realizaron ensayos de dureza y desgaste abrasivo gravimétrico. A partir del análisis de los resultados, fue posible establecer el mecanismo de endurecimiento del material fundamentado por el incremento de los defectos de empaquetamiento de acuerdo con los mecanismos de deslizamiento y maclado; los cuales se producen por la acción combinada de los efectos del tensionamiento de la estructura cristalina de la red, la reducción del tamaño promedio de los granos, y el incremento de la acritud como resultado del trabajo de deformación en frío. Finalmente se describe el procedimiento tecnológico de endurecimiento mediante explosivos, que permite duplicar el tiempo de explotación de piezas de equipos de laboreo minero utilizadas por la industria cubana del níquel fabricadas de acero Hadfield, con un significativo efecto económico, social y ambiental.

TABLA DE CONTENIDOS

SÍNTESIS

	Pág.
INTRODUCCIÓN.	1
CAPITULO I. MARCO TEORICO DE LA INVESTIGACIÓN.	6
I.1. Introducción	6
I.2. Generalidades acerca del acero al alto manganeso (Hadfield) y su empleo industrial en Cuba.	7
I.2.1. Composición química típica de los aceros autenísticos al alto manganeso (Halfield).	9
I.2.2. Formación de la estructura austenística del acero al alto manganeso (Hadfield).	12
I.2.3. Propiedades físico, mecánicas y funcionales del acero al alto manganeso (Hadfield).	15
I.3. Transformaciones estructurales del acero al alto manganeso (Hadfield) durante el trabajo de deformación en frío.	18
I.3.1. Mecanismo de endurecimiento del acero al alto manganeso (Hadfield).	18
I.3.2. Tensiones residuales.	23
I.4. Conclusiones del Capítulo I.	25
CAPITULO II. MATERIALES Y MÉTODOS.	27
II.1. Introducción	27
II.2. El empleo de los explosivos industriales para la consolidación de metales	27
II.2.1. Determinación de los parámetros de trabajo de la sustancia explosiva, para los experimentos de la tesis.	33
II.3. Planificación del diseño experimental	38
II.4. Descripción de la técnica experimental	40
II.4.1. Preparación de las Probetas y Accesorios para el trabajo experimental.	41
II.4.2. Ensayos Metalográficos en las probetas de acero al alto manganeso.	44

II.4.3 Ensayos de Difracción por Rayos X en las probetas de acero al alto manganeso.	46
II.4.3.1 Utilización de los difractogramas de rayos x, para la determinación de las tensiones de primer género.	47
II.4.4. Ensayos para la evaluación de la Macro dureza y Micro dureza, en las probetas de acero al alto manganeso.	53
II.4.4.1 Parámetros que caracterizan el endurecimiento por trabajo de deformación.	55
II.4.5. Ensayos para la evaluación del Desgaste Abrasivo, en las probetas de acero al alto manganeso.	58
II.5. Desarrollo del procedimiento tecnológico para el endurecimiento mediante explosivos, de piezas de equipos de laboreo minero utilizadas por la industria cubana del níquel, fabricadas de acero hadfield.	60
II.6. Análisis de regresión para determinar la influencia del tratamiento con explosivos, en el comportamiento del acero hadfield.	66
II.7. Conclusiones del Capitulo II.	68
CAPITULO III. RESULTADOS EXPERIMENTALES Y SU DISCUSIÓN.	69
III.1. Introducción	69
III.2. Modelos experimentales del comportamiento mecánico y funcional del acero Hadfield ante cargas explosivas.	69
III.2.1. Comportamiento de las tensiones principales normales de primer género en probetas de acero Hadfield.	70
III.2.2. Comportamiento del semiancho físico del pico en probetas de acero Hadfield	71
III.2.3. Comportamiento de la macro dureza en las probetas de acero Hadfield.	72
III.2.4. Comportamiento de la micro dureza en las probetas de acero Hafield.	73
III.2.5. Coeficiente de endurecimiento y de resistencia, en probetas de acero Hadfield.	75
III.2.6. Grado de acritud en probetas de acero Hadfield.	78
III.2.7. Comportamiento del desgaste abrasivo gravimétrico en las	79

probetas de acero Hadfield.	
III.2.8. Capacidad de endurecimiento en probetas de acero Hadfield.	80
III.3. Mecanismo de endurecimiento del acero Hadfield	84
III.3.1. Análisis metalográfico de las probetas de acero Hadfield.	84
III.3.2. Análisis de difracción por rayos x de las probetas de acero Hadfield.	87
III.3.2.1. Análisis cualitativo de la difracción por rayos x.	87
III.3.2.2. Análisis cuantitativo de la difracción por rayos x.	88
III.3.3. Fundamentación del mecanismo de endurecimiento del acero Hadfield en presencia de cargas explosivas.	90
III.4. Evaluación del comportamiento de piezas fabricados de acero Hadfield endurecidas mediante explosivos.	94
III.4.1. Valoración económica, social y ambiental.	96
III.5. Conclusiones del Capítulo III.	100
CONCLUSIONES GENERALES	102
RECOMENDACIONES	103
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	
LISTADO DE SÍMBOLOS	
PRODUCCIÓN CIENTÍFICA DEL AUTOR	
ANEXOS	

INTRODUCCIÓN

La Industria Cubana del Níquel con 60 años de creada, a partir del año 2000 constituye la primera fuente de exportación del país y se encuentra enfrascada en un proceso de ampliación de sus capacidades y modernización de su tecnología, y con ello equipos y aparatos para su desarrollo, lo que permitirá ir incrementando su papel en la economía nacional.

En la resolución económica del V Congreso del Partido Comunista de Cuba (1997) se plantea que para la recuperación y desarrollo de la economía cubana es necesario intensificar el desarrollo de la industria minero metalúrgica, y como objetivo estratégico incrementar la producción de concentrados de níquel con mayor eficiencia en las inversiones.

Para cumplir estos lineamientos a mediano y largo plazo, se requiere que paralelamente al crecimiento progresivo de la producción se perfeccionen los parámetros y regímenes de trabajo de las instalaciones y el equipamiento tecnológico, para explotar de una forma más racional y eficiente las grandes reservas de recursos minerales existentes en los yacimientos niquelíferos de la región oriental de Cuba y se perfeccione el sistema de extracción minera; lo que garantizará la existencia de un proceso productivo continuo.

El costo de producción del níquel está incrementado en gran medida por el elevado consumo energético debido a que una parte significativa del equipamiento utilizado se encuentra en fase de deterioro progresivo, exigiendo grandes esfuerzos para sustituir o recuperar los dispositivos, agregados y piezas que conforman los componentes principales del equipamiento.

En el costo de extracción del níquel y en la eficiencia de su proceso tecnológico, incide de forma especial el deterioro prematuro provocado por la acción simultánea de la abrasión y el impacto, en diversos componentes de equipos de laboreo minero tales como: los dientes de las palas excavadoras, los martillos de las trituradoras y las paletas de las lavadoras de mineral entre otras. Estas piezas se fabrican de acero al alto manganeso (Hadfield), teniendo en cuenta la propiedad que éste posee de aumentar su dureza en las superficies de contacto, con el incremento del trabajo de deformación en frío.

Todos estos elementos muestran como rasgo distintivo de su comportamiento, 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. El desgaste es menos acentuado prácticamente en la fase final de explotación de estas piezas, cuando sus valores iniciales de dureza han sido casi duplicados; pero también cuando la pérdida de su configuración inicial la inhabilitan para el servicio.

A pesar de la gran variedad de factores que influyen en la situación planteada, tales como: tipo del mineral laterítico, abrasividad, régimen de explotación, etc, se distinguen por su significación en el alargamiento del período de trabajo de estos elementos, las propiedades mecánicas y funcionales que puedan desarrollar, en particular la dureza.

Las propiedades mecánicas y funcionales idóneas en el acero Hadfield para la eficaz explotación del equipamiento que lo utiliza, se han tratado de obtener por diferentes vías; tanto mediante la aplicación de tecnologías y procedimientos en el material fundido, como por la utilización de técnicas de recuperación mediante el empleo de depósitos soldados.

Uno de los procedimientos que ofrece perspectivas más alentadoras para lograr el endurecimiento preliminar por trabajo de deformación en frío, y así las características preoperacionales requeridas para el incremento del período de explotación de las piezas que utilizan este material, lo constituye el empleo de energía a alta velocidad; en particular la generada por la detonación de una sustancia explosiva.

En la búsqueda bibliográfica realizada, se aprecia una gran variedad de enfoques con relación a la descripción del mecanismo de endurecimiento del acero Hadfield y las regularidades de su comportamiento mecánico y funcional; sin embargo no queda claro su fundamentación 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.

Teniendo en cuenta lo anteriormente expuesto, se plantea la siguiente situación problémica:

Situación problémica:

Desde el punto de vista científico, existe diversidad de enfoques con relación a la fundamentación del mecanismo de endurecimiento del acero Hadfield y las regularidades de su comportamiento mecánico y funcional; y desde el punto de vista tecnológico, se manifiesta desgaste prematuro de piezas fabricadas de este material debido a que las mismas inician su explotación con una baja dureza relativa. Lo anterior da lugar a un insuficiente aprovechamiento de su capacidad de trabajo.

A partir de la situación problémica planteada y del análisis del estado del arte en la temática, el problema científico a investigar se define de la siguiente forma:

Problema Científico: Las teorías existentes no fundamentan adecuadamente el mecanismo de endurecimiento del acero Hadfield ni explican las regularidades de su comportamiento mecánico y funcional, en condiciones de aplicación de cargas explosivas con energía específica de 3×10^6 Nm/kg y presión de detonación entre 4 y 7 GPa.

Sobre la base del problema científico se establece el objeto de la investigación, los objetivos del trabajo y la hipótesis científica.

Objeto de la Investigación: El acero austenítico al alto manganeso tipo Hadfield.

Objetivo General:

- Fundamentar el mecanismo de endurecimiento del acero Hadfield con el uso de explosivos y las regularidades de su comportamiento mecánico y funcional.

Objetivo Específicos:

- Establecer las regularidades del comportamiento mecánico y funcional del acero Hadfield, a partir de los resultados del trabajo experimental.

- Argumentar el mecanismo de endurecimiento mediante explosivos del acero Hadfield, a través del análisis metalográfico, la difracción por rayos x y los modelos matemáticos que sean obtenidos de los datos experimentales.
- Establecer el procedimiento tecnológico de endurecimiento mediante explosivos de piezas fabricadas de acero Hadfield.

Hipótesis Científica: Si se aplican al acero Hadfield, cargas de impacto generadas por la energía de detonación de una sustancia explosiva, puede provocarse en éste la aparición de un estado tensional de compresión que incrementa su dureza y la resistencia al desgaste abrasivo, según un mecanismo de endurecimiento por deslizamiento y maclado.

Consecuentemente con el cumplimiento de los objetivos propuestos y la hipótesis planteada, constituyen novedades y aportes del trabajo las siguientes:

Novedades Científicas:

- Se establecen las regularidades del comportamiento mecánico y funcional del acero Hadfield en presencia de cargas explosivas.
- Se demuestra la acción simultánea del maclado y el deslizamiento y no las transformaciones de fases, como fundamentación del mecanismo de endurecimiento del acero Hadfield en presencia de cargas explosivas.

Novedad Tecnológica:

- Se establece un procedimiento tecnológico, técnicamente factible y económicamente racional, para el endurecimiento mediante explosivos de piezas fabricadas de acero Hadfield.

Aportes Metodológicos:

- La introducción de los nuevos conocimientos desarrollados, acerca de las regularidades del comportamiento mecánico y funcional y el mecanismo de endurecimiento mediante explosivos del acero Hadfield, en temáticas vinculadas a Metalurgia, Mecánica y Minería.

- La utilización de los métodos de investigación empleados y la caracterización de los parámetros del proceso de endurecimiento, como referencia bibliográfica para futuros trabajos investigativos.

Para asegurar el aporte de las novedades científicas, dar cumplimiento a los objetivos declarados y confirmar la hipótesis del trabajo se realizan las siguientes tareas.

Tareas del Trabajo:

1. Establecimiento del estado del arte y sistematización de los conocimientos y teorías relacionadas con el objeto de estudio.
2. Planificación del diseño experimental de la tesis y fundamentación de las variables del proceso.
3. Preparación de las Probetas y Accesorios, y realización de los experimentos de la tesis.
4. Obtención de las regularidades del comportamiento mecánico y funcional del acero Hadfield, y de los parámetros que caracterizan su capacidad de endurecimiento por trabajo de deformación, bajo las condiciones estudiadas.
5. Análisis de los resultados y fundamentación del mecanismo de endurecimiento del acero Hadfield ante cargas explosivas.
6. Establecimiento e implementación del procedimiento de endurecimiento mediante explosivos de piezas fabricadas de acero Hadfield

CAPITULO I

CAPITULO I. MARCO TEORICO DE LA INVESTIGACION

I.1. Introducción

Los equipos de laboreo minero empleados en la industria cubana del níquel utilizan para la construcción de gran parte de sus agregados y accesorios el acero austenítico al alto manganeso (Hadfield), teniendo en cuenta las propiedades que estos poseen de incrementar su dureza en la zona de servicio por trabajo de deformación en frío. Tal es el caso de los martillos de las trituradoras, los dientes de las palas excavadoras y las paletas de las lavadoras de mineral, entre otros.

Por razones tecnológicas en los procesos minero metalúrgicos este equipamiento estará sometido a condiciones de operación extremadamente exigentes y requiere de propiedades que aseguren su funcionalidad; las mismas que no han podido ser totalmente resueltas por las tecnologías y procedimientos tradicionales.

Entre los métodos de endurecimiento por deformación resalta por su bajo costo y posibilidades de empleo para tamaños y formas de piezas que son inapropiados por los métodos tradicionales, el método de endurecimiento con el empleo de la energía a alta velocidad que resulta de la detonación de una sustancia explosiva, considerado aún en el mundo como una novedad, sin referencia de haber sido investigado en Cuba hasta la fecha.

La necesidad de determinar con mayor precisión, las regularidades del comportamiento de las propiedades mecánicas y funcionales del acero al alto manganeso (Hadfield) en presencia de las cargas de impacto que generan la energía de detonación de una sustancia explosiva, el efecto que ellas provocan en la capacidad de endurecimiento del material y la explicación de su mecanismo de endurecimiento, motivan la presente investigación.

A continuación se realizará el análisis de los distintos aspectos relacionados con el tema que se aborda en la bibliografía consultada, con la finalidad de disponer de los elementos básicos

invariantes y de las tendencias actuales que resulten esenciales para el correcto desarrollo del trabajo.

Serán abordados aspectos relacionados con la caracterización del acero austenítico al alto manganeso (Hadfield), y la interrelación composición química – estructura – propiedades, además de las particularidades de las transformaciones estructurales del material durante el trabajo de deformación en frío, con énfasis en el análisis de su mecanismo de endurecimiento y las tensiones residuales que se generan en el proceso.

En el presente capítulo se establece como **objetivo**:

- Realizar un análisis de la bibliografía existente que permita definir el estado del arte en la temática abordada y sustentar los resultados alcanzados en la investigación.

I.2. Generalidades acerca del acero al alto manganeso (Hadfield) y su empleo industrial en Cuba.

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 $Mn/C \geq 10$ (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 (Varela, 2003). Esto se explica debido a que el proceso de desgaste va acompañado de la deformación plástica del metal. La principal desventaja es que su maquinado se dificulta por los métodos tradicionales.

Teniendo en cuenta las cualidades anteriormente descritas del acero Hadfield, son amplias sus aplicaciones en la industria; destinándose fundamentalmente para la fabricación de piezas tales como: los martillos de las trituradoras de mineral y canteras de piedra, paletas de las lavadoras de mineral, dientes de palas excavadoras, cuchillas de bulldozer, cruces de rieles para las vías férreas, etc. Sin embargo los procedimientos tecnológicos y soluciones referenciados en la literatura, no aseguran un alargamiento significativo del período de vida útil de estas piezas.

Los resultados obtenidos en la optimización de la tecnología de tratamiento térmico (Mariño, 2000) y la caracterización de la estructura de este tipo de aleación (Martínez, 1981; Martínez y Goyos, 1989), constituyen un importante paso de avance en la consecución de una estructura de austenita homogénea, requisito indispensable en el éxito de cualquier proceso ulterior de deformación plástica del acero al alto manganeso. Para piezas y componentes desgastados se plantean alternativas empleando 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, es exclusivamente referido en un reporte de aplicación de investigadores del CENIC (Meriño, 1977), trabajos preliminares llevados a cabo por el coordinador del grupo de trabajo de los metales con explosivos del ISMMMoa (Casals, 1997); e investigaciones realizadas por el autor en esta temática (Caraballo, 1997_a, 1997_b, 1999, 2000, 2004_a, 2004_b). En ninguno de los casos se ha intentado explicar las regularidades del comportamiento mecánico y funcional del acero al alto manganeso (Hadfield), cuando es sometido al proceso de deformación plástica que provocan las cargas de impacto generadas por la energía de detonación de una sustancia explosiva, y tampoco se ha profundizado sobre la fundamentación del mecanismo de endurecimiento del material en esas condiciones.

A nivel mundial, existe en la actualidad variedad de criterios para explicar el mecanismo de endurecimiento del acero Hadfield, sobre todo a partir de la diversidad de métodos y procedimientos empleados en el proceso de deformación plástica.

I.2.1. Composición química típica de los aceros auténticos al alto manganeso (Hadfield).

La composición química estándar del acero austenítico al alto manganeso tipo Hadfield de acuerdo a la norma ASTM A128 (AFNOR/AIR: Z120M12 (old); DIN: N° 1.3401, X120Mn12; GOST: Г13) se refleja a continuación en la tabla 1.1 (Varela, 2003; Key to Steel, 2002).

Tabla 1.1. Composición química estándar del acero austenítico al alto manganeso (Hadfield)

Grado	C	Mn	Cr	Mo	Ni	Si (max)	P (max)
A	1,05-1,35	11,0 min				1,00	0,07
B-1	0,9-1,05	11,5-14,0				1,00	0,07
B-2	1,05-1,2	11,5-14,0				1,00	0,07
B-3	1,12-1,28	11,5-14,0				1,00	0,07
B-4	1,2-1,35	11,5-14,0				1,00	0,07
C	1,05-1,35	11,5-14,0	1,5-2,5			1,00	0,07
D	0,7-1,3	11,5-14,0			3,0-4,0	1,00	0,07
E-1	0,7-1,3	11,5-14,0		0,9-1,2		1,00	0,07
E-2	1,05-1,45	11,5-14,0		1,8-2,1		1,00	0,07
F	1,05-1,35	6,0-8,0		0,9-1,2		1,00	0,07

El resto de la composición es 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 carbono, hasta contenidos ligeramente superiores a 1,00 % proporciona elevada resistencia mecánica, incrementa la dureza, el límite de fluencia (hasta aproximadamente 350 MPa), la capacidad de endurecimiento y la resistencia al desgaste abrasivo; disminuyendo en contraposición los valores de resistencia al impacto y de la elongación relativa (Subramanyan et al, 1999; Manganese Centre, 1998).

El alto contenido de manganeso tiene un efecto estabilizador sobre la austenita, de manera que ésta es retenida completamente durante un enfriamiento rápido del acero desde altas temperaturas hasta la temperatura ambiente. Se tiene así un acero de alta tenacidad, resistente al impacto y endurecible por trabajo de deformación (Bilmes, 2001).

Cuando el manganeso se encuentra entre 12,2 y 13,8 %; la máxima resistencia a la abrasión se obtiene para 1,2 a 1,4 % de carbono, el esfuerzo de fluencia crece con aumentos en el % de carbono de 1,05 a 1,35, y en este mismo rango se obtiene la máxima elongación (Varela, 2003)

El manganeso aporta elevada resistencia al impacto obteniéndose los máximos valores para contenidos entre 12 y 16 % (Subramanyan et al, 1999; Manganese Centre, 1998); en este mismo rango se alcanzan también los valores máximos de resistencia mecánica y elongación relativa, siendo poco el efecto sobre la fluencia y sí marcada la influencia sobre la resistencia a la tracción (Varela, 2003); la ductilidad también se incrementa en ese rango. Como es conocido, para esta composición química se eleva la capacidad de endurecimiento por golpeo. A partir del 18 % de manganeso, disminuyen la resistencia mecánica y la elongación del acero austenítico al alto manganeso.

En los últimos tiempos se están fabricando aceros austeníticos al alto manganeso aleados con Cr, Mo y Ni. El cromo y el molibdeno tienden a elevar la dureza y la resistencia al desgaste abrasivo, pero su contenido en la aleación debe ser cuidadosamente escogido debido a que son fuertes formadores de carburos y ferritizantes; además disminuyen la resistencia mecánica, la elongación y la resistencia al impacto. En contraposición el níquel disminuye la dureza y la resistencia al desgaste abrasivo, pero incrementa la capacidad de soportar cargas dinámicas (Torres, 2002).

En el caso del cromo, se refuerza la resistencia a la corrosión atmosférica y la abrasión entre 1,5 a 2,5 %; entre 2 y 8 %, la elongación se reduce de 40 % a menos de 15 %, y la resistencia a la rotura disminuye de 900 MPa a 650 MPa (Torres, 2002; Varela, 2003).

El acero al manganeso aleado con molibdeno grado E-1 (1 % de Mo) es resistente al recalentamiento y se emplea en piezas gruesas que son frecuentemente recalentadas. El acero al manganeso aleado con molibdeno grado E-2 (2 % de Mo) es usado en condiciones de endurecimiento por dispersión, donde desarrolla alto esfuerzo a la fluencia y se obtiene un reforzamiento de la resistencia a la abrasión (Varela, 2003). Para contenidos de molibdeno entre 2 y 4 % la resistencia mecánica disminuye de 900 MPa a 800 MPa, y la elongación se reduce de 40 a 20 %.

El acero al manganeso aleado con níquel grado D (3,0 a 4,0 % de Ni) incrementa la tenacidad, la ductilidad, aumenta el porcentaje de elongación, retiene cualidades no magnéticas, disminuye ligeramente la fluencia y la resistencia a la abrasión, y mejora la soldabilidad (Torres, 2002; Varela, 2003).

Con respecto a los otros elementos de aleación: el silicio se introduce con el objetivo principal de desoxidación (hasta 1 %); en contenidos cercanos al 2 % produce un cierto aumento en el límite de fluencia y resistencia a la deformación plástica bajo choques repetitivos. El azufre, su contenido no es crítico debido a la cantidad de manganeso. El fósforo en cantidades hasta un 0,06 % garantiza buena soldabilidad. El vanadio al ser buen formador de carburos aumenta el esfuerzo de fluencia pero disminuye la ductilidad y es muy útil para refinar el grano. El cobre es utilizado para refinar la austenita. El titanio reduce el carbono en la austenita y forma carburos muy estables, también neutraliza el exceso de fósforo y refina la estructura de la pieza fundida (Varela, 2003).

El acero al alto manganeso austenítico fundido o forjado sin níquel en su composición 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 (Guliaev, 1983). Durante tiempo, se consideró que las aleaciones con red cúbica centrada en las caras no poseían umbral de fragilidad en frío, y se permitía contenidos relativamente elevados de fósforo (hasta 0,12 %) en el acero Hadfield; hoy se demuestra que los aceros con red cúbica centrada en las caras que no contienen níquel tienen tendencia a la fragilidad en frío. 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 %).

Como se aprecia en la bibliografía consultada, está relacionada la influencia de los elementos de aleación con las propiedades mecánicas y funcionales de los aceros austeníticos al alto manganeso. Es significativo el papel que tiene el manganeso (en el rango de 12 a 14 %) conjuntamente con el carbono (para valores entre 0,9 y 1,4 %) en el incremento de la resistencia mecánica, particularmente la resistencia a la tracción y la elongación relativa, al igual que en la resistencia a la abrasión y la capacidad de endurecimiento por golpeo; las cuales constituyen las propiedades que se quieren obtener en las piezas que se fabrican con este material.

I.2.2. Formación de la estructura austenística del acero al alto manganeso (Hadfield).

Los diagramas de estado y los diagramas estructurales, describen las transformaciones que experimentan las aleaciones en el estado sólido. Una representación de un corte del diagrama ternario correspondiente al diagrama **Fe – C – Mn** para 13 % de manganeso y hasta 1,6 % de carbono, se representa en la figura 1.1 (ASM Volume 11, 1992).

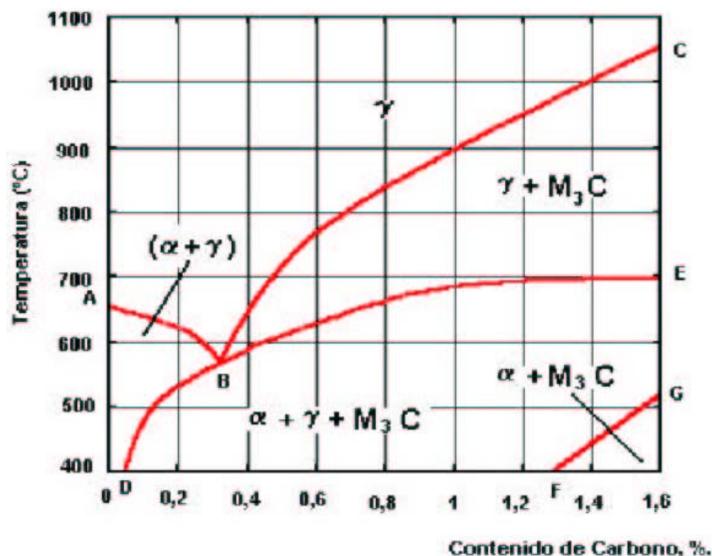


Figura 1.1 Corte transversal en el diagrama de estado **Fe – C – Mn**, para 13 % de manganeso

Como se puede apreciar es posible diferenciar una extensa zona monofásica γ , una zona trifásica compuesta por las fases $\alpha + \gamma + M_3C$, y tres zonas bifásicas que estarán conformadas de la manera siguiente: $\alpha + \gamma$, $\alpha + M_3C$ y $\gamma + M_3C$.

La fase α representa una solución sólida de manganeso y carbono en hierro α . La fase M_3C se corresponde con el carburo de manganeso y hierro; la letra **M** representa los elementos metálicos presentes en el compuesto de modo que se puede plantear que estos carburos son del tipo $(Fe, Mn)_3C$. La fase γ es una solución sólida de manganeso y carbono en hierro γ .

El acero Hadfield es un acero que después de la colada y a temperatura ambiente posee una estructura austenítica con carburos excesivos $(Fe, Mn)_3C$, los cuales se forman en los bordes de los granos y disminuyen la resistencia y ductilidad del acero (Guliaev, 1983). En este estado estructural se limita el trabajo de endurecimiento por deformación en frío debido a que las fases secundarias (carburos) funcionan como barreras impidiendo el movimiento de las dislocaciones. La presencia perjudicial de estas estructuras, se puede corregir mediante el tratamiento térmico de austenizado.

El tratamiento térmico de austenizado recomendado para obtener una estructura de austenita homogénea libre de carburos, se consigue calentando la aleación a temperaturas superiores a la línea de precipitación de carburos (línea BC) con el objetivo de garantizar la disolución de los mismos en la matriz metálica, seguido de un mantenimiento y un posterior enfriamiento en un medio enérgico que impida una nueva segregación de fases secundarias en el interior y el borde de los granos. Según Mariño (2000) y Permana y Suratman (2001), el tratamiento térmico de austenizado 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.

El diagrama estructural del sistema Fe – Mn – C (Mangense Centre, 1998) para temperaturas inferiores a 700°C no ofrece cambios significativos desde el punto de vista estructural con respecto a la versión de diagrama de estado (ASM Volume 11, 1992).

En la figura 1.2 se muestra el diagrama estructural del sistema Fe – Mn – C

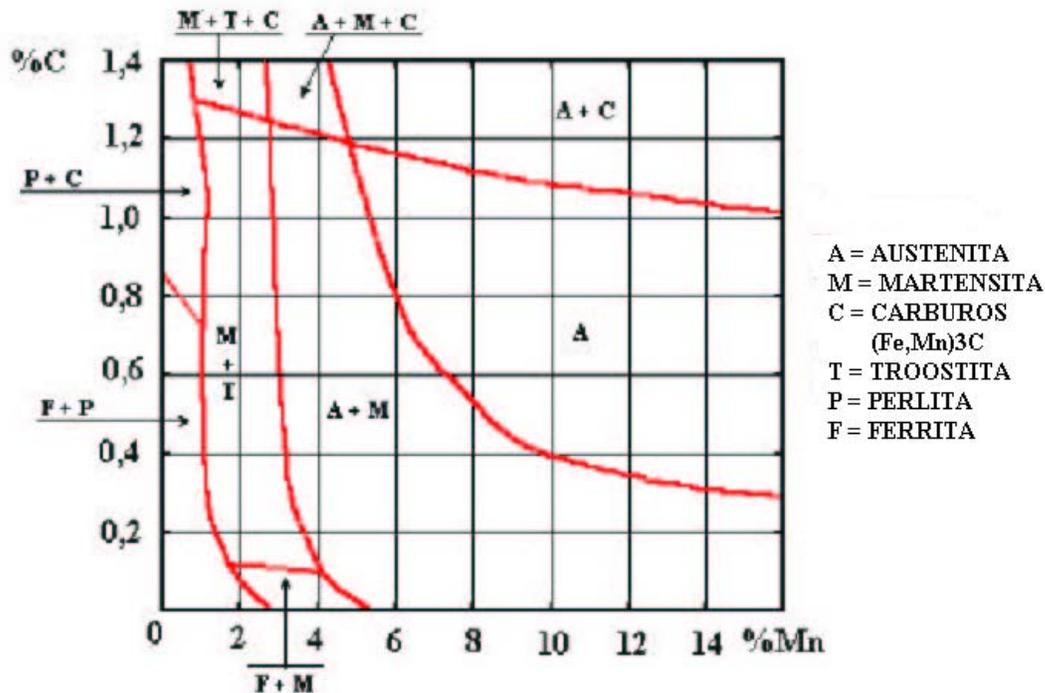


Figura 1.2 Diagrama estructural del sistema Fe – Mn – C

Como puede observarse con un contenido de manganeso de entre 12 y 16 %, y para contenidos de carbono superiores al 0,4 % la estructura del acero empieza a ser enteramente austenítica. Esta estructura se mantiene sin cambios hasta que se alcanzan contenidos de carbono aproximadamente de un 1,00 %, en que aparece la fase carburo en el acero. Estos carburos son del tipo $(\text{Fe}, \text{Mn})_3\text{C}$ lo cual coincide con ASM Volume 11 (1992). El tratamiento térmico recomendado en Manganese Centre (1998) para disolver los carburos y evitar su precipitación no presenta diferencia con respecto al recomendado por el resto de los autores.

En resumen, para la composición típica (0,9-1,4 % de C y 12-14 % de Mn) de los aceros austenítico al manganeso del tipo Hadfield, se puede asegurar que existe una estructura de austenita con pequeñas colonias de carburos los cuales pueden ser disueltos y eliminados de la estructura, aplicando adecuadamente el tratamiento térmico de austenizado.

I.2.3. Propiedades físico, mecánicas y funcionales del acero al alto manganeso (Hadfield).

En diferentes bases de datos (Materiales, 1996, Key to Steel, 2002) se hace referencia a las propiedades físico y mecánicas a temperatura ambiente, obtenidas en el acero Hadfield fundido y templado hasta conseguir la austenización completa. Estas son:

Propiedades Físicas:

Densidad [kg/dm ³]	7.9
Módulo de Elasticidad [MPa]	190
Módulo de Distorsión [Mpa]	73,076
Coefficiente de Poisson	0,3
Conductibilidad Térmica [W/(m.K)]	13
Capacidad de Calor Específico[J/(kg.K)]	500
Resistividad Eléctrica Específica [V.mm ² /m]	0.68
Expansión Térmica[m/(m.K)]	10 ⁻⁶

Propiedades Mecánicas:

Tensión Límite de Fluencia mínima [Mpa]	350
Tensión Límite de Fluencia de Cizallamiento [MPa]	175
Tensión Límite de Resistencia [MPa]	800 – 1 000
Elongación mínima [%]	35
Estricción mínima [%]	35
Dureza [HB]	200
Resiliencia (J/ mm ²)	100

Otros autores abundan sobre el comportamiento físico, mecánico y funcional del acero Hadfield en diferentes condiciones. Fucheng y Tinquan (1997) realizaron un estudio acerca de la formación de martensita inducida por deformación plástica en el acero austenítico al manganeso ASTM A 128. La microdureza promedio reportada en la martensita de

deformación plástica detectada en la investigación, fue de 740 HV. La referencia no precisa la fuente que provoca la deformación plástica.

En Chu et al (1995) se mide la microdureza en la sección transversal de las probetas de acero Hadfield, después de haber sido sometidas a choques superficiales provocados por un láser de pulsos de alta potencia. Se realiza el ensayo conocido como perfil de dureza, que consiste en medir la microdureza desde la superficie hacia el interior de la sección transversal de la pieza. La microdureza medida en la superficie alcanzó valores de hasta 500 HV.

En Zuidema et al (1987) se realiza un estudio acerca de la influencia de la adición de aluminio entre 0,7 y 1,1%, en la composición química de los aceros Hadfield. El autor elabora los modelos de comportamiento de las diferentes propiedades con respecto a la variación de las concentraciones de dicho elemento. Se evaluó la resistencia al desgaste abrasivo de estos aceros cuando habían alcanzado la máxima dureza, después de ser sometidas las probetas cilíndricas, obtenidas por fundición, a un número constante de golpes (4 golpes) con una energía de golpeo constante de 260 Nm. Se empleó la metodología de ensayo para máquina de rueda de goma descrita en ASTM G 65 – 94 (1994). Cuando se aumentó el contenido de aluminio entre 0,7 y 1,1 la resistencia al desgaste abrasivo aumentó. Es decir, el desgaste gravimétrico promedio disminuyó de 0,16 gramos a 0,09 gramos.

Un trabajo de corte similar aparece reflejado en Dong et al (1998). Solo que en este caso el ensayo de desgaste abrasivo se llevó a cabo utilizando como abrasivo alúmdum, en lugar de arena sílice seca.

En la referencia Villca (1992), mediante el análisis del control de la calidad se evalúan las propiedades de las bolas de molinos para la molienda de minerales construidas de acero Hadfield ASTM A 128. Las propiedades obtenidas en los ensayos se encuentran dentro de los estándares que fija la norma ASTM para este material. Se evaluó la capacidad de soportar cargas de impacto a través de una máquina de martillos giratorios que sometía a las bolas a golpes repetidos con una energía de 200 Nm; la máquina registraba el número de impactos. El

ensayo se daba por terminado cuando aparecían los primeros indicios de agrietamiento en las piezas.

En el trabajo Wilson y Not (1996) se comparan las propiedades mecánicas de dos aceros cuya composición se corresponde con el ASTM A 128. La singularidad de este trabajo está dada porque un grupo de muestras se obtuvieron por pulvimetalurgia y otras por fundición. Aunque la dureza después de golpeados alcanzó en ambos casos un promedio de 500 HB, la resiliencia del acero Hadfield fundido (150 J/mm^2), resultó superior al obtenido por pulvimetalurgia (122 J/mm^2).

En Ogel (1998) se estudia la metalografía del acero austenítico al manganeso. En el mismo, se realiza un estudio del efecto del grado de conformación con respecto a la dureza, microestructura y la resistencia al impacto del acero ASTM A 128. Se realizó metalografía óptica y electrónica de barrido. Los ensayos de dureza e impacto se realizaron sobre probetas las cuales fueron sometidas a diferentes variantes de tratamiento térmico de austenización, temple y revenido posterior. Los valores de dureza máxima promedio oscilaron entre los 420 y 460 HB, y la resiliencia obtenida por el ensayo Charpy con probetas entalladas estuvieron entre 135 y 167 J/mm^2 .

Las propiedades de probetas de acero Hadfield (ASTM A – 128; C = 1,2 %, Mn = 14 %) obtenidas por fundición, fueron determinadas por Adler et al (1986). Después fueron tratadas térmicamente con temple en agua desde los $1050 \text{ }^\circ\text{C}$ y revenido a $200 \text{ }^\circ\text{C}$. De esa manera se fabricaron probetas de ensayo convencional de tracción e impacto. En el trabajo solo se reporta, en su parte metalográfica, la formación de maclas de deformación, no se reporta la formación de martensita. Se realizaron a las muestras ensayos de Dureza, Resistencia Mecánica e Impacto. Las propiedades promedios se encontraron entre los siguientes rangos: $\sigma_r = 640 - 865 \text{ Mpa}$, $\sigma_f = 275 - 340 \text{ Mpa}$, $\alpha_k = 120 - 140 \text{ J/mm}^2$, dureza inicial = $164 - 168 \text{ HB}$, dureza después del golpeo = $430 - 490 \text{ HB}$.

En Torres (2002), se realiza un estudio sobre las adiciones de cromo y níquel para los consumibles de soldadura AWS: E - FeMn, E – FeMnCr y E – FeMnCrNi, respectivamente.

En dicho trabajo se determina la influencia de estos componentes en las propiedades mecánicas y funcionales del depósito, obteniéndose los modelos experimentales correspondientes.

A modo de resumen, se puede plantear que las referencias presentan una gran diversidad de criterios en relación con las propiedades físico, mecánicas y funcionales del acero Hadfield fundido y austenizado, en dependencia de su composición, estructura y método de deformación empleado. En los trabajos analizados no se exponen modelos experimentales o teóricos que relacionen las propiedades mecánicas (Resistencia Mecánica y Dureza) y funcionales (resistencia al desgaste abrasivo), con la variación de las condiciones de aplicación de las cargas de impacto generadas por la detonación de una sustancia explosiva.

I.3. Transformaciones estructurales del acero al alto manganeso (Hadfield) durante el trabajo de deformación en frío.

Existen diversas teorías para explicar el mecanismo de endurecimiento del acero Hadfield, tanto a partir de la influencia térmica en su estructura como por la aplicación de cargas externas. Variadas son también en este último caso, las condiciones de aplicación de las cargas externas y el nivel de respuesta correspondiente en el material.

I.3.1. Mecanismo de endurecimiento del acero al alto manganeso (Hadfield).

Los primeros trabajos acerca de las transformaciones estructurales durante los procesos de deformación en frío de los aceros al alto manganeso fueron (White, 1948; Samans, 1950; Clark y Varney, 1963). Según estos autores, la razón por la cual el acero al alto manganeso se endurece en un grado extraordinario por golpeo, se debe a que la austenita superficial dúctil se transforma en martensita dura. Todos estos estudios fueron realizados en el acero Hadfield fundido ASTM 128-33, utilizando como agente para la deformación un martillo de caída libre.

En Morozovshaya (1963) se plantea que el acero austenítico con alto contenido de manganeso (GOST: Г13) cuya composición química es similar al acero ASTM 128 (0,8 – 1,2 % C; 12 – 14 % Mn), presenta después del proceso de austenización y temple en agua, una estructura

austenítica inestable que al ser golpeada se transforma en martensita. Esta martensita se formará en las capas superficiales. En la medida que el acero se desgasta, las capas inferiores no endurecidas de austenita se transformarán a su vez en martensita al ser sometidas al efecto del golpeo. Coinciden con Morozovshaya (1963) otros autores (Hadbroken y Brower, 1966; Lajtin, 1973; Sarkar, 1980; Kuzmin y Samojostki, 1984; Avner, 1985; Desforges et al, 1989; Southwell y Young, 1990; Tokonami y Otsuka, 1990; Zeemaun et al, 1992; Bortoni et al, 1992; Pickering, 1996; Caian, 1997; Fucheng y Tingquan, 1997; Speidel, 1998; Dong et al, 1998; Asamura et al, 1998; Ando et al, 2000; Larmi, 2000), es decir un total de 18 referencias. Las citadas referencias no precisan las condiciones de golpeo para producir la transformación martensítica.

Al consultar la bibliografía clásica proveniente de la antigua Unión Soviética en la década de los años 70, se observa una nueva interpretación acerca del mecanismo de endurecimiento de los aceros austeníticos al manganeso.

Según Guliáev (1983), se suponía que un endurecimiento tan alto en este tipo de acero era debido a la formación de martensita de deformación plástica. Pero mediciones realizadas por su equipo de trabajo demostraron que en las mayores deformaciones solo se forma entre 0,5 y 1,5% de martensita, cantidad que no puede elevar mucho la dureza del acero. De acuerdo con este autor, la gran capacidad de endurecimiento del acero austenítico al manganeso se debe a la acritud. Con un mismo grado de deformación, los bloques de las estructuras en mosaico de los aceros austeníticos al alto manganeso se dividen en mayor proporción que los otros aceros austeníticos. Al existir una mayor división de las estructuras internas de los granos, aparecerán una mayor cantidad de barreras que limitarán el desplazamiento de las dislocaciones a través de los cristales. De esta manera se originarán en los puntos de acumulación una elevación de la densidad de dislocaciones que traerá como consecuencia el frenaje del desplazamiento de estas imperfecciones de la red cristalina, con la consiguiente elevación de la dureza y la resistencia de la aleación. En Guliáev (1983) se da asimismo prioridad al mecanismo de deslizamiento en el proceso de deformación plástica del acero.

Coinciden con Guliáev (1983) otros autores (Barinov, 1976; Kozlov, 1986; Herrera y Gallardo, 1986; Arzamazov, 1989; Belyashin et al, 1990; Yakimov y Krasikov, 1990; ASM, 1992; Rodríguez, 1998; Ogel, 1998; Villca, 1992; Bayoumin y Latif, 1995; Lalonde, 2000; Reynolds, 2000), es decir un total de 13 referencias. Estas referencias abordan el estudio del sistema aleante clásico del acero Hadfield (0,8 – 1,2% C; 12 – 14% Mn), y en ellas tampoco se precisan las fuentes que producen la deformación.

En Oda et al (1997), se deja entrever la posibilidad de que el mecanismo de endurecimiento de la austenita de los aceros Hadfield tenga carácter dual, teoría que comparten también Manganese Centre (1998) y Wilson y Knott (1996). Es decir, que bajo determinadas condiciones, se endurezca por acritud, y en otras se endurezca por transformación martensítica inducida por la deformación plástica.

En el caso de Manganese Centre (1998), abordó como composición química (0,4% C, 14% Mn) mientras que Wilson y Knott (1996) estudiaron un sistema con (0,2% C, 14% Mn). Teniendo en cuenta el bajo contenido de carbono (por debajo de 0,45%) es factible la aparición de martensita de acuerdo con el diagrama estructural del sistema Fe – Mn – C, mostrado en la figura 1.2; sin embargo, atendiendo al análisis realizado en el epígrafe 1.2.1, el acero al alto manganeso requiere contenidos de carbono entre 0,9 y 1,4 para asegurar un efecto estabilizador sobre la austenita (Bilmes, 2001) y una elevada tenacidad, resistencia al impacto y capacidad de endurecimiento por deformación, que constituyen atributos insustituibles del acero al alto manganeso del tipo Hadfield.

En Adler, et al (1986), se defiende la tesis de que el mecanismo de endurecimiento de los aceros austeníticos al manganeso tiene lugar por efecto de la deformación plástica, pero los autores dan un lugar preponderante al mecanismo de maclado sobre los fenómenos de deslizamiento de los planos cristalinos. En este trabajo no se reporta la aparición de martensita.

Los autores Zuidema et al (1987), Lalonde (1998) y Xiaoyan y Yujiao (2001), asocian el endurecimiento por fases secundarias, con el mecanismo de endurecimiento de los aceros

austeníticos al manganeso. De acuerdo a sus defensores, este mecanismo está basado en que bajo la acción de grandes cargas de choque que impactan la pieza a alta velocidad pueden precipitar fases secundarias, sobre todo del tipo carburo, en la matriz austenítica. Sin embargo no hacen referencia a los explosivos como la posible fuente de energía que pudiera provocar este efecto sobre el material.

En Torres (2002), a partir de la aplicación de energía máxima de golpeo acumulada de 916,3 Nm, a depósitos de soldadura de aceros austeníticos al manganeso tipo Hadfield de los grupos AWS: E - FeMn, E - FeMnCr y E - FeMnCrNi; se establece que el mecanismo de endurecimiento no está relacionado con la presencia de la fase martensítica, el maclaje o la presencia de fases secundarias.

El investigador ruso Yury Chumlyakov en dos trabajos (Chumlyakov et al, 1997; Chumlyakov et al, 1998), concede suma importancia a la orientación cristalográfica de la acción de las cargas en los cristales de la austenita de los aceros Hadfield, para que se desarrolle el endurecimiento de los mismos a partir de la formación de maclas o de deslizamientos. Incluye el mecanismo de envejecimiento por acción de cargas dinámicas, como una posible causa del endurecimiento del acero al alto manganeso, por acción de las cargas de impacto sin precisar su origen. Yuri Chumlyakov realizó su trabajo a partir de monocristales de acero Hadfield con una composición de (0,9%C; 13%Mn).

Un dato de interés aporta Larimi (2000) en su trabajo. En el mismo, el autor plantea que las austenitas metaestables por efecto del trabajo de deformación en frío podrán transformarse en dos tipos de martensita: una tetragonal centrada en el cuerpo (α') y otra hexagonal (ϵ). Indica que durante el proceso de deformación primeramente, se forma la martensita ϵ de forma hexagonal, y que con las mayores deformaciones se forma la martensita tetragonal α' . Ambas formaciones martensíticas presentan elevadas propiedades de dureza y tenacidad. En este trabajo no se precisa la composición de la aleación.

Según Subramanyam et al (1999), la transformación inducida por deformación plástica desde la fase austenítica a la martensítica no ocurre en los aceros Hadfield ordinarios (0,8 – 1,2 % C;

12 – 14 % Mn). Plantea además, que varios mecanismos contribuyen al endurecimiento por golpeo. Estos mecanismos incluyen el maclaje, el apilamiento de defectos de la red (acritud) y el envejecimiento por tensiones dinámicas. Se considera por estos autores con toda razón, que el que uno u otro mecanismo prevalezca sobre el otro depende, de un conjunto de factores como son: la composición química en elementos de aleación (que influye en el grado de apilamiento de las dislocaciones, y en el grado de tensionamiento de la red), la temperatura y el rango de las tensiones.

Teorías similares acerca de la existencia de múltiples mecanismos de endurecimiento, actuando simultáneamente en el acero Hadfield, la presentan Chu et al (1995), Xie y Zhu (1999) y Yun-Hua et al (2000). En estos tres artículos, la aleación que se estudió fue nuevamente el sistema clásico de aceros al manganeso (0,8 – 1,2 % C; 12 – 14 % Mn), aunque tampoco se precisan las fuentes de la deformación plástica.

A modo de resumen, se puede concluir que la bibliografía consultada se refieren generalmente a la influencia en el mecanismo de endurecimiento de los aceros austeníticos al alto manganeso del tipo Hadfield, de factores tales como: la composición química en elementos de aleación, la magnitud y velocidad de aplicación de las cargas dinámicas aplicadas por los métodos tradicionales, y el rango de las tensiones, entre otras.

En general se presenta una gran diversidad de enfoques con relación a la explicación del mecanismo de endurecimiento del acero Hadfield, sin embargo no queda claro su fundamentación ni la influencia del mismo sobre las propiedades que de él dependen, 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.

Se llegó a la conclusión de que las dos hipótesis más aceptadas, relacionadas con el mecanismo de endurecimiento de los aceros austeníticos al alto manganeso del tipo Hadfield, son: la del endurecimiento por formación de estructuras martensíticas de deformación plástica, y la del endurecimiento por acritud del acero.

I.3.2. Tensiones residuales.

Según Alfonso (2002), una de las clasificaciones más aceptadas de las tensiones residuales es la de Davidienko. N. N., acorde a la cual existen tres géneros de tensiones que se diferencian entre sí por el volumen donde se equilibran:

1. Tensiones de primer género (macroscópicas, zonales o tecnológicas): Se equilibran en el volumen de todo el cuerpo. Estas tensiones están orientadas en correspondencia con la forma del artículo. En presencia de ellas, la separación de cualquier parte de la pieza conduce a la ruptura del equilibrio entre el resto de las partes, lo que en muchos casos provoca deformaciones (alabeos y distorsiones) del artículo. Además, pueden ser perjudiciales (las de tracción) o beneficiosas (generalmente las de compresión).
2. Tensiones de segundo género (microscópicas o cristalíticas): Se equilibran en el volumen de algunos cristales o bloques. Estas tensiones pueden o no estar orientadas (en dirección al esfuerzo que produjo la deformación plástica).
3. Tensiones de tercer género (deformaciones estáticas de la red cristalina): Se equilibran en los límites de pequeños grupos de átomos. En los metales deformados ellas se equilibran en los grupos de átomos que se encuentran cercanos a la frontera de los granos, a los planos de deslizamiento, etc. Las deformaciones pueden estar relacionadas con la presencia de dislocaciones. El desplazamiento de los átomos de las posiciones ideales puede surgir también en los cristales de las soluciones sólidas debido a la diferencia entre las dimensiones de los átomos y a la interrelación química entre los átomos del mismo género y de géneros diferentes, que componen la solución.

Las piezas de acero austenítico al manganeso, de forma general se encuentran sometidas durante el trabajo al impacto repetido de alta energía. Este surge como resultado de contactos de cuerpos como fragmentos metálicos, rocas, minerales u otras sustancias; que acompañados de determinada velocidad, originan choques intermitentes contra la pieza (Permana y Sutraman, 2001).

La destrucción de la pieza según Sarkar (1980), se produce por la transferencia de energía cinética de un cuerpo simple sobre una superficie de extensión apreciable. Este efecto produce

deformación superficial y subsuperficial del material que altera su forma, sus dimensiones, y principalmente los estados tensionales a nivel de la red cristalina. Todos estos fenómenos pueden provocar la fractura por fatiga debido a los impactos repetidos.

Según Guliáev (1983), la durabilidad de una pieza depende de la acción repetida de las cargas. Tal es el caso de los procesos de destrucción paulatina como son: el desgaste abrasivo, la fatiga y la fluencia. Durante el proceso de fatiga por impacto, cuando el material es deformado por encima del límite de fluencia (σ_{02}) se desarrolla una deformación plástica en la que se puede provocar la aparición de una microgrieta (Key to Steel, 2002). En la zona cercana a la misma la cantidad de metal deformado plásticamente es considerable.

La magnitud de la deformación plástica, depende de la restricción a que es sometido el material deformado plásticamente (granos con acritud) por el metal que lo rodea, y que permanece en estado elástico (granos indicadores). El nivel de tensionamiento del metal que no ha sido deformado plásticamente (granos indicadores), lo caracterizan según Barret (1957) y Cullity (1967) las tensiones residuales de primer género. Es por ello que la magnitud de las tensiones residuales, después de la deformación plástica, serán un indicador del estado tensional de la pieza durante la primera etapa de la destrucción por fatiga denominada Período de Iniciación de la Grieta (Key to Steel, 2002).

Según Key to Steel (2002), la fatiga superficial se relaciona fundamentalmente con estados tensionales del tipo plano. Es decir, aquellos donde no existen tensiones normales a la superficie de la pieza. Los valores de tensiones en la red cristalina se verán influenciados por la magnitud de las cargas aplicadas al material y la velocidad de aplicación de dichas cargas, entre otros factores que someten el enrejado cristalino a esfuerzos de tracción y compresión (las cuales actuarán en el mismo sentido o en sentido contrario a las provocadas por los desplazamientos de los cristales) y cuyos átomos constituyen barreras u obstáculos al movimiento de las dislocaciones (Callister, 1999).

Según Alfonso (1990), Alfonso y Martín (2000) y Torres (2002), el control de las tensiones de primer género tiene una gran importancia práctica, ya que permite elevar considerablemente la seguridad de las instalaciones, máquinas y mecanismos durante su explotación.

En Chumlyakov et al (1998), se realizó un estudio de difracción por rayos x donde se determinó la influencia de la temperatura en los valores de las tensiones de primer género (tanto normales como tangenciales) en monocristales de acero Hadfield (% C = 1,1; % Mn = 13). A temperatura ambiente el valor promedio de las tensiones normales durante el ensayo de compresión dinámica fue de 1 000 Mpa, y las tensiones tangenciales alcanzaron un valor promedio de 300 MPa. Este estudio no precisa la fuente de deformación dinámica.

Los trabajos de Torres (2002), realizan un estudio de las tensiones residuales por rayos x en depósitos de soldadura de aceros austeníticos al manganeso tipo Hadfield de los grupos AWS: E - FeMn, E – FeMnCr y E – FeMnCrNi. En ellos se valora la influencia que sobre el valor de las tensiones residuales presentan los elementos de aleación en los depósitos de soldadura obtenidos, sin embargo el estudio no abarca las fundiciones de acero Hadfield y además considera solamente como agente para la deformación a un martillo de caída libre con energía máxima de golpeo acumulada igual a 916,3 Nm.

En resumen, todas las referencias resaltan la importancia de la determinación de las tensiones residuales de primer género, para caracterizar el nivel de tensionamiento del metal que ha sido deformado plásticamente. En algunas de ellas, muestran el resultado de su determinación en el acero Hadfield por difracción de rayos x; aunque no reportan la aplicación de dicha técnica cuando este material se deforma por la acción de una carga explosiva

I.4. Conclusiones del Capítulo I.

El análisis de las fuentes bibliográficas consultadas permite plantear las siguientes conclusiones:

1. Las condiciones de servicios exigidas a piezas que trabajan bajo la acción simultánea de abrasión e impactos repetidos, requieren el empleo del acero al alto manganeso

(Hadfield) con una composición en su estructura que contenga entre 0,9 y 1,4 % de carbono y entre 12 y 14 % de manganeso. El resto de los componentes de la aleación deben estar en los límites sugeridos en el epígrafe I.2.1. Para esta composición, la estructura es de austenita con pequeñas colonias de carburos, los cuales pueden ser disueltos y eliminados aplicando adecuadamente el tratamiento térmico de austenizado.

2. La bibliografía consultada, aporta información sobre el valor de propiedades físicas, mecánicas y funcionales del acero Hadfield fundido; pero son escasas las referencias a modelos teóricos o experimentales, y en ninguno de ellos se muestran las regularidades del comportamiento de dichas propiedades en correspondencia con la variación de las condiciones de aplicación de las cargas de impacto generadas por la energía de detonación de una sustancia explosiva.
3. El análisis bibliográfico refleja gran variedad de enfoques con relación a la explicación del mecanismo de endurecimiento del acero Hadfield, sin embargo no queda claro su fundamentación (si es por formación de estructuras martensíticas de deformación plástica, o si el endurecimiento es por acritud del acero u otra causa) 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.
4. Las tensiones residuales de primer género, caracterizan el nivel de tensionamiento del acero Hadfield deformado plásticamente, y su determinación se puede realizar a partir de la difracción por rayos x. No obstante, las referencias consultadas no reportan la aplicación de esta técnica en el acero Hadfield deformado por una carga explosiva.

CAPITULO II

CAPITULO II. MATERIALES Y METODOS

II.1. Introducción

El segundo capítulo desarrolla los conceptos fundamentales relacionados con la fuente de energía utilizada en la investigación, la justificación de su empleo y las variables que le caracterizan con sus niveles.

Se establece el diseño del plan experimental y se describen las normas y procedimientos del proceso de experimentación. Al mismo tiempo se fundamentan las propiedades a investigar y se establecen los parámetros que caracterizan el endurecimiento por trabajo de deformación. Se describe además, el análisis de regresión para determinar la influencia del tratamiento con explosivos en el comportamiento del acero Hadfield

Finalmente, se desarrollan los procedimientos tecnológicos para el endurecimiento mediante explosivos de piezas de equipos de laboreo minero utilizadas por la industria cubana del níquel, fabricadas de acero Hadfield.

En este capítulo se plantea como **objetivo**:

1. Fundamentar las propiedades a investigar y explicar los métodos, procedimientos y condiciones experimentales para la solución del problema.

II.2. El empleo de los explosivos industriales para la consolidación de metales.

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

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

Algunos compuestos químicos son sustancias explosivas si son capaces de reaccionar fácilmente, los productos finales de la reacción deben ser gases que alcancen un volumen que puede ser unas 10 000 veces mayor que el volumen de los productos iniciales. La reacción debe ocurrir tan rápido que la energía liberada en la explosión no se difunda, y sea realmente concentrada en el volumen que inicialmente ocupa la sustancia explosiva.

Se diferencian las siguientes formas de transformación química de las sustancias explosivas (Otaño, 1998):

- Detonación.
- Combustión explosiva.
- Deflagración.

La forma más efectiva de reacción explosiva, para el endurecimiento de metales es la detonación, definida como: difusión de la reacción por la masa de sustancia explosiva con una velocidad supersónica, constante para cada sustancia y altura límite de la carga, condicionada por el paso de una onda de detonación.

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

Según Pernia (1988), en los explosivos detonantes la velocidad de las primeras moléculas gasificadas es tan grande que no ceden su calor por conductividad a la zona inalterada de la carga, sino que lo transmiten por choque deformándola y produciendo su calentamiento y explosión adiabática con generación de nuevos gases. El proceso se repite con un movimiento ondulatorio que afecta a toda la masa explosiva y se denomina onda de choque.

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

Por detrás del plano C-J se encuentran también los productos de reacción, y en algunos casos las partículas inertes. La mayoría de los productos son gases que alcanzan temperaturas del orden de $1\ 500\ ^\circ\text{C}$ a $4\ 000\ ^\circ\text{C}$, las cuales no afectan el metal y se disipan con gran rapidez (en el orden de los segundos), y presiones que oscilan entre 2 y 10 GPa. Los gases en esas condiciones de presión y temperatura, se expanden rápidamente y producen un choque u onda de tensión alrededor del medio que les rodea.

La formación de una onda de choque en la iniciación de una sustancia explosiva, se muestra en la figura 2.1

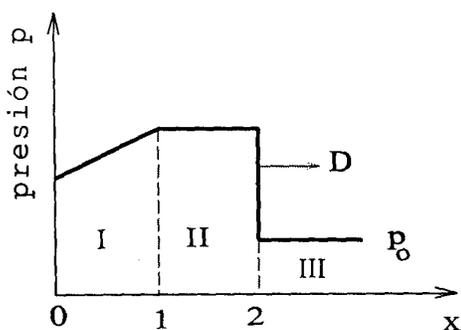


Figura 2.1 Formación de una onda de choque.

Donde:

I : Zona de los productos de la explosión.

II : Zona de la compresión límite de los productos de la explosión.

III : Mezcla inicial.

D : Frente de la onda de detonación.

X : Distancia desde el punto de iniciación de la carga.

Como puede apreciarse en la figura 2.1, y ha sido demostrado por Zeldovich y Raizer (1966) utilizando las ecuaciones de la dinámica de los gases para el análisis de la formación y desplazamiento de la zona de alta presión que surge como resultado de la detonación, la variación de la presión entre la zona de los gases comprimidos y los productos iniciales no puede ser continua, formándose una ruptura en el frente de alta presión.

En el punto 0 ocurre la iniciación de la sustancia explosiva y en el tramo 0-1 la explosión no estacionaria; en el punto 1 la velocidad del proceso alcanza la velocidad de detonación lo que provoca la formación del frente de la onda de detonación que se difunde con la velocidad de detonación V_d , y generándose la presión de detonación P_d con una energía específica E_e en relación a masa de sustancia explosiva, las cuales se determinan experimentalmente. Después que la detonación abarca totalmente la carga, la onda de detonación pasa al medio formando una onda de choque.

La intensidad inicial de la onda de choque que el medio recibe, depende de los parámetros de detonación (V_d , P_d , E_e , ρ) y de las propiedades del medio, siendo: V_d la velocidad de detonación, P_d la presión de detonación, E_e la energía específica en relación a masa de sustancia explosiva, y ρ la densidad de la sustancia explosiva (Mohanty, 1981; Pernia, 1988).

Para la realización del trabajo investigativo de la tesis se utilizó como sustancia explosiva industrial el TECTRON 100, emulsión encartuchada en mangas de polietileno de diferentes diámetros, única sustancia explosiva que se comercializa en la actualidad en Cuba, el cual cumple con todos los requerimientos exigidos para la realización del endurecimiento del acero

Hadfield. Los parámetros de detonación del TECTRÓN 100 se relacionan a continuación (Ulaex, 2000):

- Densidad (ρ) 1,15 g/cm³ (1150 kg/m³)
- Energía específica (Ee)..... 740 kcal/kg (3 098 232 Nm/kg)
- Velocidad de Detonación (Vd) Se establece en función del diámetro de la carga (según gráfico proporcionado por la firma suministradora)
- Presión de Detonación (Pd) Se establece en función del diámetro de la carga (según gráfico proporcionado por la firma suministradora)

Los gráficos que proporciona la firma suministradora se muestran en las figuras 1 y 2 del anexo 1, y corresponden al comportamiento de la velocidad de detonación y la presión de detonación respecto al diámetro de la carga, considerando que las cargas explosivas tienen una configuración cilíndrica.

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

El plano plano C-J se mueve a la velocidad de detonación V_d , mientras que la velocidad de movimiento de los productos de la explosión determinada mediante fotografías de rayos x, alcanza un valor de 0,25 la velocidad de detonación (Pernia, 1988). La presión máxima de la onda explosiva es:

$$Pd = \rho \times Vd \times Up \quad (2.1)$$

Donde:

Pd : Presión de detonación	[MPa]
ρ : Densidad del explosivo	[kg/m ³]
Vd : Velocidad de detonación	[m/s]
Up : Velocidad de la partícula	[m/s]

Si se tiene en cuenta que la velocidad de la partícula es un cuarto de la velocidad de detonación, se obtiene:

$$Pd = \frac{\rho \times Vd^2}{4} \quad (2.2)$$

Si la carga explosiva está en contacto íntimo con la superficie del metal, la presión ejercida sobre la misma por los gases de la explosión, es igual a la presión termoquímica (Pe). Según el mismo autor (Pernia, 1988), la presión termoquímica o presión máxima disponible para efectuar un trabajo (Pe) es igual a la mitad de la presión de detonación..

$$Pe = \frac{Pd}{2} \quad (2.3)$$

Siendo:

Pe : Presión máxima disponible para efectuar el trabajo	[MPa]
Pd : Presión de detonación	[MPa]

En los cálculos efectuados en la tesis, para la realización del proceso de aplicación de las cargas explosivas en diferentes condiciones según el plan experimental y para el desarrollo del procedimiento tecnológico de endurecimiento de piezas, se ha considerado como presión de trabajo la magnitud de la presión Pe . En cualquier caso, la magnitud de presión de detonación se tiene en cuenta a los efectos de establecer el rango de validez de los experimentos de la tesis.

II.2.1. Determinación de los parámetros de trabajo de la sustancia explosiva, para los experimentos de la tesis.

Como se ha señalado en el epígrafe anterior, al evaluar el efecto de los explosivos industriales lo realmente importante es su comportamiento energético, el mismo que puede ser descrito a partir de los parámetros de detonación.

En la realización de los experimentos de la tesis, se han escogidos dos variables a partir de las cuales es posible considerar los principales parámetros de detonación de la sustancia explosiva utilizada.

Las variables escogidas después de un estudio preliminar del tema, consideradas como las más importantes son: el espesor de la carga explosiva δ , y el número de impactos k . Nos estaremos refiriendo a ellas para la realización práctica de los experimentos de la tesis, teniendo en cuenta que son fáciles de controlar como parámetros de la experimentación.

Las variables δ y k fueron escogidas por las consideraciones siguientes:

El número de impactos (k): es una variable cuantitativa, se puede repetir cuantas veces sean necesarias (obteniéndose 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. Teniendo en cuenta cada valor de k , se podrá conocer el valor total de la energía de golpeo acumulada, considerada la misma como el producto de la magnitud k por la energía de golpeo unitaria (energía específica en relación a masa de sustancia explosiva) que recibe la probeta en cada impacto.

El espesor de la carga explosiva (δ): 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. Es una magnitud que se relaciona con las propiedades energéticas de la sustancia explosiva empleada, estando vinculado en primer lugar con la velocidad de detonación del paquete explosivo y en segundo lugar con las presiones que se

generan en las proximidades del frente de detonación, entre otros factores; en la medida en que se incrementan estos valores desde una magnitud crítica y hasta un valor límite.

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.

Los niveles escogidos de las variables son:

Variable **k**:

- Nivel 1: **1**
- Nivel 2: **2**
- Nivel 3: **3**

Los números enteros 1, 2 y 3 corresponden a la sucesión de impactos que recibirán las probetas.

Variable **δ** :

- Nivel 1: **10 mm**
- Nivel 2: **22,5 mm**
- Nivel 3: **35 mm**

Los espesores 10 mm, 22,5 mm y 35 mm, se corresponden con diámetros intermedios de la carga explosiva entre su magnitud crítica y la límite.

Para la determinación de la presión de detonación, primeramente es necesario obtener la velocidad de detonación.

Utilizando el gráfico 1 del anexo 1, se obtiene la velocidad de detonación (V_d) para cada espesor (δ).

Los valores correspondientes de la velocidad de detonación serán:

Vd = 3 950 m/s

Para: $\delta = 10$ mm;

Vd = 4 750 m/s

Para: $\delta = 22,5$ mm;

Vd = 5 000 m/s

Para: $\delta = 35$ mm;

La presión de detonación (Pd) y la presión máxima disponible para efectuar el trabajo (Pe), serán calculadas por las expresiones 2.2 y 2.3, respectivamente. Los resultados del cálculo se muestran en la tabla 2.1

Tabla 2.1 Presiones que se generan en las proximidades del frente de detonación para cada experimento

δ (mm)	Pd (Mpa)	Pe (Mpa)
10	4485,72	2242,86
22,5	6486,72	3243,36
35	7187,50	3593,75

La energía de golpeo unitaria, se obtiene a partir de la energía específica en relación a masa de sustancia explosiva (Ee), considerando el volumen de sustancia explosiva empleada en cada experimento.

La siguiente expresión proporciona el valor de la energía de golpeo unitaria.

$$E_{gu} = Ee \times m \quad (2.4)$$

Donde:

Egu : Energía de golpeo unitaria [Nm]

Ee : Energía específica en relación a masa de sustancia explosiva [Nm/kg]

m : Masa de sustancia explosiva [kg]

La masa de sustancia explosiva para cada experimento, depende de la densidad de la sustancia explosiva (ρ) y del volumen que ocupa la misma en cada experimento.

$$m = V \times \rho \quad (2.5)$$

Siendo:

m : Masa de sustancia explosiva	[kg]
V: Volumen de sustancia explosiva	[m ³]
ρ : Densidad del explosivo	[kg/m ³]

El volumen que ocupa la sustancia explosiva en cada experimento, se calcula teniendo en cuenta las dimensiones de las cámaras de prueba y de la probeta, por la expresión siguiente:

$$V = \frac{\pi \times \delta^2}{4} \times h - V_{pro} \quad (2.6)$$

En la cual:

V: Volumen de sustancia explosiva	[m ³]
δ : Espesor de la carga explosiva	[m]
h : Longitud de la carga explosiva	[m]
V _{pro} : Volumen de la probeta	[m ³]

La magnitud (h) representa la profundidad de las cámaras de pruebas en las que fueron introducidas las probetas junto a la sustancia explosiva, y fue la misma para cada experimento (ver figuras 2.2 y 2.3 del epígrafe II.4.1). Se consideró en todos los casos igual a 70 mm (h = 0,07 m).

El espesor de la carga explosiva (δ) es una magnitud que varía entre uno y otro experimento. Constituye una de las variables del proceso, y se corresponde con el diámetro de las diferentes cámaras de pruebas utilizadas en los experimentos.

El volumen de la probeta (V_{pro}) es el mismo para cada ensayo, y su valor será calculado teniendo en cuenta la geometría de las probetas según se muestra en el epígrafe II.4.1 (ver figura 2.2).

$$V_{pro} = 0,00001413 \text{ m}^3 \quad (\text{De la Cruz y Leyva, 2003})$$

Utilizando la expresión 2.6 se calcula el volumen de carga explosiva utilizado en cada experimento.

$$V_1 = 0,00012331 \text{ m}^3 \quad \text{Para: } \delta = 10 \text{ mm}$$

$$V_2 = 0,00029512 \text{ m}^3 \quad \text{Para: } \delta = 22,5 \text{ mm}$$

$$V_3 = 0,00053564 \text{ m}^3 \quad \text{Para: } \delta = 35 \text{ mm}$$

Empleando la expresión 2.5, se obtiene la masa total de sustancia explosiva empleada en cada caso:

$$m_1 = 0,1418065 \text{ kg} \quad \text{Para: } V_1 = 0,00012331 \text{ m}^3$$

$$m_2 = 0,339388 \text{ kg} \quad \text{Para: } V_1 = 0,00029512 \text{ m}^3$$

$$m_3 = 0,615986 \text{ kg} \quad \text{Para: } V_3 = 0,00053564 \text{ m}^3$$

Finalmente, el valor de la energía de golpeo unitaria utilizada en cada experimento, se determina haciendo uso de la expresión 2.4

$$E_{gu1} = 439349,4361 \text{ Nm} \quad \text{Para: } \delta = 10 \text{ mm}$$

$$E_{gu2} = 1051502,762 \text{ Nm} \quad \text{Para: } \delta = 22,5 \text{ mm}$$

$$E_{gu3} = 1908467,537 \text{ Nm} \quad \text{Para: } \delta = 35 \text{ mm}$$

La energía de golpeo acumulada (E_{ga}), se obtiene considerando la energía de golpeo unitaria (E_{gu}) por el número de impactos (k) que reciben las probetas, según la expresión 2.7

$$E_{ga} = E_{gu} \times k \quad (2.7)$$

Los niveles de energía de golpeo acumulada empleados en los experimentos se muestran en la tabla 2.2

Tabla 2.2 Niveles de energía de golpeo para cada experimento

δ (mm)	Egu (Nm)	Ega (Nm)	
	k = 1	k = 2	k = 3
35	1908467,537	3816935,074	5725402,611
22,5	1051502,762	2103005,524	3154508,286
10	439349,4361	878698,8722	1318048,3083

II.3. Planificación del Diseño Experimental.

Teniendo en cuenta, que se requiere obtener los modelos experimentales que expliquen las regularidades del comportamiento físico, mecánico y funcional del acero Hadfield en diferentes condiciones de aplicación de las cargas de impacto generadas por la energía de detonación de una sustancia explosiva, y que aún no han sido publicadas expresiones matemáticas que las describan; se propone realizar el tratamiento matemático de las variables involucradas en el proceso (δ y k) las cuales han sido descritas en el epígrafe anterior.

La forma de relacionar las variables involucradas en el proceso de experimentación, con los parámetros de detonación, también aparece descrita en el epígrafe II.2.1.

Una vez definidas las variables y sus niveles, se procedió a la realización de los experimentos de aplicación de carga explosiva en las probetas, utilizando un diseño factorial (Juran, 1993). Este diseño es muy apropiado cuando han de ser investigados varios factores a dos o más niveles y la interacción entre ellos puede ser importante. En este caso se investigan dos factores, cada uno a tres niveles, ensayando todas las combinaciones entre los mismos. Se pretende:

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

3. Estimar la varianza

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

$$N = n^x \quad (2.7)$$

Donde:

N: Número de experimentos a realizar

x: Variables o factores considerados

n: Niveles de cada factor

El número de experimentos (N) resultó igual a 9. La matriz de este diseño de experimento se muestra en la tabla 2.3.

Tabla 2.3 Matriz del diseño de experimento

No. Exp.	X ₁	X ₂	δ	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

En cada experimento se realizaron tres réplicas, por lo que el total de experimentos fue de 27.

Al analizar el aspecto de la reproducción para decidir cuantas réplicas realizar en cada experimento, se tuvo en cuenta que en los posibles modelos que pudieran obtenerse a partir de la matriz experimental se consideran los que incluyen las relaciones lineales entre las variables

y sus interacciones, por lo que sería necesario examinar el error experimental de cada variable y de sus interacciones, cosa que solo puede hacerse si se tienen tres o más réplicas; ya que con una réplica la media μ de los valores para un experimento coincide con el valor de la réplica y

el error experimental $e_e = \frac{\sum |x_i - \mu|}{n}$ (donde n es el número de réplicas) es nulo; con dos

réplicas los resultados de la media y del error experimental pueden estar influenciados por una

medición anómala (lo cual sería contraproducente) y además la varianza $S^2 = \frac{\sum (x_i - \mu)^2}{n - 1}$

tendría una dificultad semejante.

Considerando que la validación de las normas y procedimientos y el nivel de acreditación de los laboratorios y equipamiento que se utilizarían para desarrollar las mediciones permitía una alta precisión con muy pocas posibilidades de que se introdujeran errores sistemáticos; y que además, el nivel de aseguramiento, riesgo y obstaculización de cada experimento con explosivos era alto, lo cual implicaba que debía seleccionarse el número mínimo de réplicas que garantizará la confiabilidad de los resultados; se decidió que en las corridas experimentales se realizaran solo tres réplicas.

II.4. Descripción de la técnica experimental

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

Los experimentos de la tesis han sido desarrollados en los laboratorios del Centro de Investigaciones Metalúrgicas (CIME), en el laboratorio de Materiales adjunto al departamento de Construcción de Maquinarias de la Facultad de Mecánica del ISPAJE, y en el laboratorio de Análisis Estructural adjunto al Instituto de Materiales y Reactivos (IMRE), perteneciente a

la Facultad de Física de la Universidad de la Habana. Estos laboratorios disponen de todas las garantías requeridas para la realización de los experimentos de la tesis.

Los trabajos previos de obtención y preparación de las probetas y accesorios que se necesitan en el trabajo experimental, se desarrollaron en las instalaciones de la Empresa Mecánica del Níquel “Comandante Gustavo Machín”. Las aplicaciones industriales del trabajo se desarrollan en diferentes plantas de la Empresa Ernesto Che Guevara. La aplicación de cargas explosivas a las probetas según el diseño del experimento y a las piezas reales, se realiza en el polígono de tratamiento de los metales con explosivos del ISMMMoa.

II.4.1. Preparación de las Probetas y Accesorios para el trabajo experimental.

Para desarrollar el trabajo experimental, fueron elaboradas probetas metálicas cilíndricas de acero Hadfield. Las dimensiones generales de las probetas se muestran en la Figura 2.2

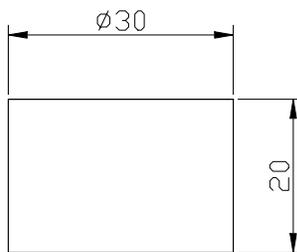


Figura 2.2 Esquema de la probeta del experimento

Las probetas fueron obtenidas por el método de fundición, en las instalaciones del Taller 08 de la Empresa Mecánica del Níquel “Comandante Gustavo Machín”.

La descripción de las tecnologías de moldeo, fundición y tratamiento térmico de las probetas, aparecen descritas en De la Cruz y Leyva (2003). Fueron empleadas la norma ASTM: A 128 / A 128 M-90, y las especificaciones técnicas que se establecen en Departamento Técnico de Fundición (2003).

Una vez fundidas las probetas y efectuadas las pruebas para el control de la calidad según la especificación A 781/ A 781 M (Annual Book of ASTM Standard, Vol 01.02), se les realizó un análisis químico para determinar su composición química..

Para la determinación de la composición química de las probetas, se empleó un espectrómetro multicanal marca ESPECTROLAB en régimen de chispa, con fuente de 300 Hz y 15 s de análisis.

El análisis se realizó, para muestras fundidas escogidas aleatoriamente. A cada una se le realizó un total de 4 tomas de composición. La precisión de la medición de la composición química fue de 0,0001%. El equipo calculó los promedios de composición química por cada una de las muestras. Se dispone además del análisis químico realizado durante el proceso de fundición.

La composición química promedio calculada, en las probetas de acero Hadfield obtenidas en el proceso de fundición, y considerada en el trabajo investigativo de la tesis, se muestra en la tabla 2.4

Tabla 2.4 Composición química promedio de las muestras en probetas fundidas de acero al alto manganeso (Hadfield).

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Cu	V	Fe
1,16	0,42	13,78	0,017	0,012	0,17	0,10	0,13	0,0271	0,16	0,03	83,9939

Se puede apreciar que la composición química de las muestras, en probetas fundidas de acero al alto manganeso (Hadfield), se encuentra dentro de los límites establecido para cada elemento según las conclusiones del epígrafe I.2.1.

Para conformar el plan experimental, se estableció un código de números y letras que indican, el número del experimento según el diseño experimental (números), y la réplica correspondiente a cada experimento (letras). De esta forma, a modo de ejemplo, el experimento “5c”, indica que se trata del experimento número 5: que corresponde al

experimento con valores intermedios en los niveles de cada variable (nivel 0 de cada variable, es decir, $X_1 = \delta = 22,5$, y $X_2 = k = 2$); y que para ese experimento (No. 5) corresponde la tercera réplica (letra c).

En total, para el desarrollo de los experimentos se utilizaron 27 probetas tratadas con explosivos (probetas marcadas todas del 1 al 9, seguido de la letra “a” para la primera réplica, la letra “b” para la segunda, y la letra “c” para la tercera réplica). Las probetas analizadas en los experimentos y que no fueron tratadas con cargas explosivas se marcaron con los números 30, 33 y 36.

Además de las probetas, fueron obtenidas cámaras de pruebas en las cuales serían introducidas las probetas para la aplicación de las cargas explosivas. Estas cámaras de pruebas se utilizan con la finalidad de aprovechar al máximo la energía que se genera en el proceso de detonación de la carga explosiva.

La cámara de prueba, está constituida por un cilindro elaborado de acero 40X, en uno de cuyos extremos se practica un agujero cilíndrico de 70 mm de largo. Como la probeta tiene un alto de 20 mm, por encima de ella quedaría una altura de carga explosiva de 50 mm, suficiente para estabilizar el frente de detonación una vez producida la explosión, y asegurar que la superficie superior de la probeta reciba el impacto de la carga explosiva con los máximos valores de los parámetros de detonación.

El diámetro del agujero tiene en cada caso una dimensión diferente, de acuerdo con el diseño del plan experimental ($\delta = 10$; 22,5 y 35 mm, respectivamente) y determinará el volumen deseado de carga explosiva a aplicar en cada probeta. El proceso tecnológico de elaboración de las cámaras de prueba aparece descrito en De la Cruz y Leyva (2003).

La aplicación de cargas explosivas se realiza en el polígono de tratamiento de los metales con explosivos del ISMM. 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 en las probetas de acero al alto manganeso, involucra la realización de las siguientes operaciones:

- Introducción de las cámaras de prueba en posición vertical y el agujero ubicado hacia arriba en una abertura practicada en la tierra.
- Marcaje de cada probeta y su colocación en los agujeros de las cámaras de prueba, y llenado de este con sustancia explosiva. Debe asegurarse el contacto de la superficie de la probeta con la carga explosiva (Ver figura 2.3).
- Ubicación del detonador en la sustancia explosiva.
- Conexión del detonador eléctrico con la fuente de energía y realización de la explosión.

En la figura 2.3, se muestra el conjunto: cámara de prueba – probeta – sustancia explosiva, introducido en la abertura practicada en la tierra.

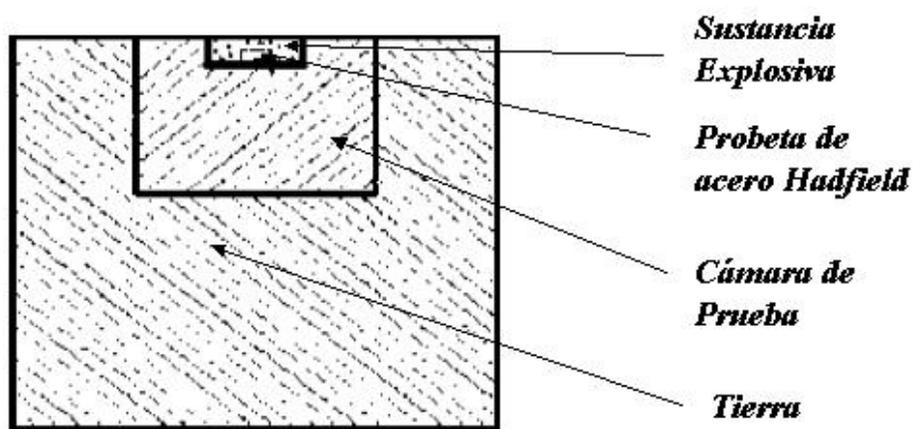


Figura 2.3 Conjunto: cámara de prueba – probeta – sustancia explosiva, introducido en la abertura practicada en la tierra.

II.4.2. Ensayos Metalográficos en las probetas de acero al alto manganeso.

Para la observación de la microestructura metalográfica de las probetas sometidas a las diferentes condiciones de aplicación de las cargas de impactos generadas por la energía de detonación de la sustancia explosiva, se realizó el ensayo metalográfico.

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

La preparación y observación metalográfica se efectuó en un plano seccionado de la probeta, paralelo al plano exterior de referencia (el plano de referencia es el que recibe directamente el impacto generado por la energía de detonación de la sustancia explosiva, considerando para la misma el comportamiento típico de cargas cilíndricas) para cada una de las probetas del diseño de experimentos expuesto. Sobre este plano se realizaron también las mediciones de microdureza.

Las muestras fueron desbastadas en una desbastadora marca “Metasinex”, de fabricación Alemana, utilizando papel abrasivo con una secuencia acorde a lo establecido en el PO-SCT(LM)-02. El pulido se realizó en una pulidora “Struers AP 1” (Dinamarca), con paño y aceite DIAMET para lubricación, según el procedimiento PO-SCT(LM)-03. El ataque químico se realizó utilizando Nital al 2 %.

Fue empleado para la observación de las microestructuras un microscopio óptico metalográfico marca “Carl Zeiss” modelo Neophot 30, con lentes planocromáticas HD y cámara de video marca COHO acoplada a la computadora. El microscopio se encuentra ubicado 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.

Las muestras fueron observadas después de atacadas a 125x y 625x. El factor de corrección fue de 0,81 para el objetivo de 12,5 utilizado para observar a 125x, por lo que en realidad esas micrografías son captadas a 101x. En el caso del objetivo de 50x que se emplea para observar a 625x, el factor de corrección es de 0,83 por lo que el aumento real con que fueron captadas esas micrografías es de 519x.

El tamaño del grano, se determinó según norma ASTM: E 112-88 a 101x.

Las variables de salida son:

Y1 = Estructura metalográfica típica

Y2 = Evidencias de deformación plástica

Y3 = Tamaño del grano

II.4.3. Ensayos de Difracción por Rayos X, en las probetas de acero al alto manganeso.

Los ensayos de difracción por rayos x, permiten realizar análisis cualitativos y cuantitativos.

El análisis cualitativo se efectúa con el objetivo de conocer las fases presentes en cada una de las probetas del diseño experimental; y establecer con respecto a la probeta patrón las posibles transformaciones de fases a consecuencia del efecto de las diferentes condiciones de aplicación de las cargas de impactos, generadas por la energía de detonación de la sustancia explosiva.

El análisis cuantitativo, permite obtener el comportamiento de las tensiones residuales de primer género (tanto normales como tangenciales) en cada una de las probetas según diseño del experimento, así como el comportamiento del semiancho físico del pico.

El equipo utilizado se encuentra en el laboratorio de Análisis Estructural, adjunto al Instituto de Materiales y Reactivos (IMRE), perteneciente a la Facultad de Física de la Universidad de la Habana. Es un Difractómetro HZG – 4A de la Freiburger Prezisionsmechanik.

La medición se realizó bajo las siguientes condiciones: $I = 30 \text{ mA}$, $V = 30 \text{ kV}$. Fue empleada la radiación de una lámpara de cobre con una longitud de onda (λ) de $0,15182 \text{ nm}$ ($1,54182 \text{ \AA}$). Las mediciones se realizaron sobre el plano superior de la probeta; este plano recibe directamente el impacto generado por la energía de detonación de la sustancia explosiva, considerando para la misma el comportamiento típico de cargas cilíndricas.

El análisis se realizó desde un valor angular $2\theta = 10^\circ$ hasta $2\theta = 100^\circ$; el paso empleado fue de $0,2^\circ$ con un tiempo de irradiación de 5 s para 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.

Para el análisis cualitativo de los difractogramas fue empleado el software Analize, y la base de datos de la International Center for Diffraction Data (ICDD, 2000). Los difractogramas para la caracterización de las fases se muestran en el anexo 2.

Durante el ensayo para la realización del análisis cuantitativo se registran los parámetros correspondientes al difractograma; es decir, el semiancho físico del pico, el ángulo de bragg, y la distancia interplanar correspondiente. Como herramienta de trabajo se utilizó el software Origin 5.0 Profesional para determinar el ángulo de bragg y los semianchos de los picos. Los valores de todos estos parámetros, resultados del registro del difratograma, se reflejan también en el anexo 2.

Las variables de salida son:

Y1 = Angulo de difracción o de bragg ($^\circ$)

Y2 = Semiancho de los picos del difratograma ($^\circ$)

Y3 = Valor de la suma de las tensiones principales normales de primer género (MPa)

Y4 = Valor de las tensiones tangenciales de primer género (MPa)

II.4.3.1 Utilización de los difractogramas de rayos x, para la determinación de las tensiones de primer género.

Los ensayos de difracción de rayos x tienen gran utilidad práctica para la determinación de las tensiones residuales de primer género. El mismo se fundamenta en la medición exacta de los parámetros de las redes cristalinas, y las investigaciones se ejecutan sin necesidad de destruir

las piezas. Las tensiones se miden en capas superficiales muy finas de metal (Alfonso, 1995) y las mismas pueden ser determinadas en áreas muy pequeñas, y por lo tanto establecer a partir de ahí la distribución de las tensiones por toda la probeta.

La difracción de rayos x, solo registra tensiones existentes en la superficie de un objeto metálico debido a que la radiación apenas penetra en el interior, por esta razón sólo se estudian con él tensiones correspondientes tanto a los estados tensionales lineales (monoaxiales) como planos (biaxiales) (Alfonso, 1994); por esta razón es que la componente de tensión normal a la superficie es siempre nula. Sin embargo, el caso de las piezas de acero Hadfield cuya destrucción obedece al mecanismo de fatiga superficial por impacto, este tipo de deterioro se relaciona con estados tensionales de tipo plano (Key to Steel, 2002) por lo que el método puede ser aplicado sin dificultad.

En la búsqueda bibliográfica, se encontraron un conjunto de referencias (Chumlyakov et al, 1998; Chumlyakov et al, 1997; Alfonso, 1990; Alfonso, 1994; Alfonso, 1995; Prevey, 1990; Hall, 1993; Hall, 1994; Lambda Research, 2002; Torres, 2002) en las cuales los investigadores emplearon la difracción por rayos x, con el objetivo de realizar medición de tensiones de primer género en agregados policristalinos que fueron sometidos a diferentes procesos tecnológicos en los cuáles las muestras sufrieron deformación plástica de la superficie.

Aunque las composiciones químicas estudiadas en las referencias antes mencionadas y su correspondiente estructura cristalina, no se corresponden con las de los aceros Hadfield fundidos y endurecidos con una gran energía de deformación, estos trabajos permitieron justificar la validez del empleo de las técnicas de difracción por rayos x para el caso objeto de estudio.

Para la medición del incremento de las tensiones producto del trabajo de las cargas de impacto generadas por la energía de detonación de una sustancia explosiva, se utilizó la metodología que prevé el empleo de muestra patrón con irradiación de rayo paralelo (Barret, 1957; Cullity, 1967, Alfonso y Martin, 2000; Buraya, 2001; Lectures Notes, 2001; Torres, 2002). Según dicha metodología, para determinar la suma de las tensiones principales normales de primer

género existentes en el plano de la superficie se necesitan dos difractogramas, uno del material libre de tensiones y otro del mismo tensionado. En la investigación se tomó como muestra patrón la probeta antes de ser sometida al proceso de aplicación de cargas explosivas, y como muestras tensionadas la misma probeta una vez realizado el proceso de aplicación de las cargas explosivas en diferentes condiciones según el diseño de experimento descrito.

Si bien la muestra sin golpear presenta tensiones de las cuales se desconoce su origen y magnitud; dado el carácter relativo del cálculo de las tensiones, la misma puede ser considerada en cada caso como muestra patrón. En realidad, de acuerdo a la bibliografía lo que realmente se determina durante el experimento es la variación que sufren los parámetros de la red cristalina, y la suma de las tensiones principales que esta deformación genera a través de la deformación de los planos cristalinos. Este procedimiento se aplicó para cada una de las probetas del diseño de experimentos y sus réplicas correspondientes.

De acuerdo a X Rays Diffraction (1999); y Krawitz (2002), el espaciado de los planos reticulares paralelos a la superficie cambiará de d_0 (valor cuando no hay tensiones) a d_f (valor cuando hay tensionamiento). El análisis matemático de este efecto se reproduce a continuación tal y como aparece descrito en Barret (1957); Cullity (1967) y Torres (2002).

Si se limita un paralelepípedo infinitamente pequeño del material tensionado, por ejemplo un cubo en el cuerpo deformado, y se toman sus aristas como ejes coordenados existirán en general tres componentes de tensión actuando sobre cada cara como se ve en la Figura 2.4. Pero en las condiciones de equilibrio algunas de ellas son iguales, por ejemplo: $\tau_{yz} = \tau_{zy}$ y $\sigma_x = \sigma_{-x}$, bastan de hecho seis de estas componentes de tensión para especificar completamente el estado de tensiones en un punto de un cuerpo isótropo: $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}$ y τ_{zx} .

Según Barret (1957), se consigue una simplificación cuando se dirigen los ejes coordenados de la Figura 2.4 de tal manera que resulten nulas las componentes tangenciales que actúan en todas las caras, lo cual siempre es posible por complejo que sea el sistema de tensiones. Las tensiones que actuarían entonces normalmente a las caras del cubo, son las tensiones

principales σ_1 , σ_2 , y σ_3 que se relacionan con las deformaciones principales de los cuerpos isotropos por las ecuaciones 2.8.

Los distintos granos de un material policristalino son generalmente anisotropos, porque E varía con la dirección cristalográfica, pero a los efectos de los cálculos de tensiones por rayos x, empleando las expresiones anteriormente señaladas, el material se considera como isotropo.

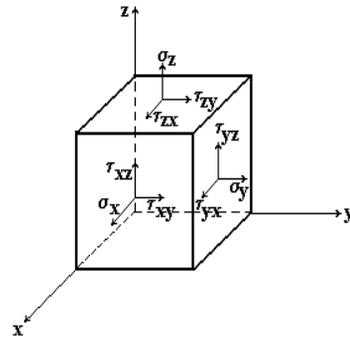


Figura 2.4 Esquema que muestra el equilibrio de las tensiones tangenciales τ y normales σ .

$$\begin{aligned} \varepsilon_1 &= \frac{1}{E} \cdot [\sigma_1 - \nu (\sigma_2 + \sigma_3)] \\ \varepsilon_2 &= \frac{1}{E} \cdot [\sigma_2 - \nu (\sigma_1 + \sigma_3)] \\ \varepsilon_3 &= \frac{1}{E} \cdot [\sigma_3 - \nu (\sigma_1 + \sigma_2)] \end{aligned} \quad (2.8)$$

Si se supone que el material es elásticamente isotropo y está sometido a las tensiones principales σ_1 y σ_2 que quedan en el plano de su superficie, la deformación normal a dicha superficie es ε_3 en la superficie externa, la tensión normal a ella es nula ($\sigma_3 = 0$) (Barret, 1957; Cullity, 1967; Torres 2002). Debido a la acción de la suma de las tensiones principales, el espaciado de los planos cristalinos (distancias interplanares) paralelos a la superficie cambiará de d_0 (valor cuando no hay tensiones) a d_f (valor de la muestra tensionada), por lo que:

$$\varepsilon = \left(\frac{df - do}{do} \right) \quad (2.9)$$

Por tanto a partir de las mediciones de **do** y **df**, se puede determinar la suma de las tensiones principales normales de primer género (2.10).

$$\sigma_1 + \sigma_2 = -\frac{E}{\nu} \cdot \left(\frac{df - do}{do} \right) \quad (2.10)$$

Donde:

- $\sigma_1 + \sigma_2$: Suma de las tensiones normales principales de primer género (MPa).
- E: Módulo de Elasticidad Normal de Young (190000 MPa para el acero Hadfiel fundido).
- ν : Coeficiente de Poisson (0,3 para el acero hadfiel fundido).
- do: Distancia interplanar de la muestra patrón libre de tensiones.
- df: Distancia interplanar de la muestra tensionada.

Atendiendo a las diversas fuentes consultadas (Barret, 1957; Cullity, 1967, Alfonso y Martin, 2000; Buraya, 2000; Lectures Notes, 2000; Torres, 2002), las distancias interplanares se calculan empleando la expresión de Bragg (2.11) a partir de los ángulos (θ) obtenidos en los difractogramas.

$$n \cdot \lambda = 2d \cdot \text{sen}\theta \quad (2.11)$$

Donde:

- n: Orden de reflexión ($n = 1$, debido a que el equipo registra los rayos x reflejados en las reflexiones de primer orden).
- λ : Longitud de onda de los rayos x emitidos.
- d: Distancia interplanar (nm).
- θ : Ángulo de reflexión del rayo reflejado.

Las tensiones tangenciales, se determinan a través de la expresión (2.12) desarrollada por Schmid y reflejada en Chen et al (2000) y Torres (2002).

$$\vec{\sigma} \bullet m_k^s = \tau_c \quad (2.12)$$

Donde:

$\vec{\sigma} = \sigma_1 + \sigma_2$: Suma de las tensiones normales principales de primer género (MPa).

m_k^s : Coeficiente de Schmid para cuerpos policristalinos.

τ_c : Tensión tangencial de primer género (MPa).

En las referencias (Casals, 1997; Chen et al, 2000; Torres, 2002), los autores proponen también el cálculo de las tensiones tangenciales a partir de la expresión de Schmid, pero en estos trabajos se incluyeron nuevos valores de coeficientes de Schmid desarrollados para el cálculo de las tensiones tangenciales de primer género en policristales.

De acuerdo con las referidas fuentes, los valores de m_k^s , se pueden determinar indistintamente para el maclado y para el deslizamiento en cuerpos policristalinos de redes cúbicas centradas en las caras. Estos cálculos estarían en concordancia con lo planteado en Chen et al (2000) y Elgun (2003), de que en los metales la deformación plástica puede desarrollarse a partir del mecanismo de deslizamiento, del mecanismo de maclado y de la combinación de ambos mecanismos. De acuerdo con este planteamiento, la expresión de Schmid asumiría las formas siguientes:

Expresión de Schmid para el deslizamiento

$$\vec{\sigma} \bullet m_{ks}^s = \tau_{cs} \quad (2.13)$$

Donde:

$\vec{\sigma} = \sigma_1 + \sigma_2$: Valor modular de la suma de las tensiones normales principales de primer género (MPa).

m_{ks}^s : Coeficiente de Schmid para el deslizamiento en cuerpos policristalinos.

τ_{cs} : Tensión tangencial de deslizamiento de primer género (MPa).

Expresión de Schmid para el maclado

$$\vec{\sigma} \bullet m_{kt}^s = \tau_{ct} \quad (2.14)$$

Donde:

$\vec{\sigma} = \sigma_1 + \sigma_2$: Valor modular de la suma de las tensiones normales principales de primer género (MPa).

m_{kt}^s : Coeficiente de Schmid para el deslizamiento en cuerpos policristalinos.

τ_{ct} : Tensión tangencial de maclado de primer género (MPa).

Estos valores de tensiones tangenciales permiten determinar si la deformación del material después de alcanzar el límite de fluencia de cizallamiento $[\tau_{fc}]$, tiene lugar por maclado o por deslizamiento de acuerdo a las siguientes desigualdades:

$$\text{Si } \tau_{cs} \geq [\tau_{fc}] \Rightarrow \text{El material fluye por deslizamiento.} \quad (2.15)$$

$$\text{Si } \tau_{ct} \geq [\tau_{fc}] \Rightarrow \text{El material fluye por maclado.} \quad (2.16)$$

II.4.4. Ensayos para la evaluación de la Macro dureza y Micro dureza, en las probetas de acero al alto manganeso.

Para la medición de la macro dureza, se utilizó un durómetro universal marca IBERTEST MODELO DU-200 de fabricación española.

Este equipo se encuentra en el laboratorio de Propiedades Mecánicas y Tribológicas 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. La última calibración del equipo se realizó con fecha 2 de Octubre de 2003.

El durómetro permite la realización de ensayos de macrodureza Rockwell y Brinell; en nuestro caso la medición se realizó en la escala Brinell utilizando una bola de acero de diámetro 2,5 mm y cargas de 1875,0 N (187 kgf) y 625 N (62,5 kgf). El tiempo de aplicación de las cargas fue de 15 s. La incertidumbre del equipo es de $\pm 2,30\%$.

La medición de la huella se realizó con la ayuda del microscopio Neophot 30 del laboratorio de Metalografía del CIME, acreditado también por la misma resolución y certificado de registro que el laboratorio de Propiedades Mecánicas y Tribológicas. El ocular de medición se calibró con una escala de 0,001 mm.

La medición de macrodureza se realizó sobre el plano superior de referencia, que es el que recibe directamente el impacto generado por la energía de detonación de la sustancia explosiva, considerando para la misma el comportamiento típico de cargas cilíndricas

Para la medición de microdureza Vickers se empleó el microdurómetro de procedencia japonesa marca SHIMADZU.

El microdurómetro se encuentra en el laboratorio de Ciencia de los Materiales del ISPJAE; este equipo mide con una apreciación de 0,0005mm.

El penetrador lo constituye una pirámide recta de diamante de base cuadrada. Las cargas empleadas fueron de 50 gf y 100 gf. El tiempo de aplicación de las cargas fue de 10 s. Los valores de microdureza estarán expresados en HV.

La microdureza se midió en un plano seccionado de la probeta paralelo al plano superior de la misma (dónde fue medida la macrodureza). El hecho de medir sobre la superficie plana elimina la necesidad de correcciones en los valores de dureza producto de la forma.

La finalidad de estos ensayos es obtener el comportamiento de la macrodureza en la superficie plana exterior de la probeta, y la microdureza en profundidad o perfil de microdureza en un plano de corte paralelo al plano exterior de referencia, para cada una de las probetas del diseño de experimento expuesto. Al mismo tiempo se pretende obtener la magnitud del coeficiente de endurecimiento y de resistencia, del acero al alto manganeso en diferentes condiciones de aplicación de cargas explosivas, y el grado de acritud correspondiente. La medición de microdureza se realizó a todas las probetas que fueron preparadas metalográficamente según diseño del experimento.

Los experimentos para la evaluación de la Macrodureza y Microdureza, en las probetas de acero al alto manganeso, se realizaron de acuerdo a las normas cubanas que se relacionan a continuación:

- NC 04-10: 72 Ensayos de dureza Brinell en materiales metálicos.
- NC 04-11: 72 Ensayos de dureza Vickers en materiales metálicos.

Las variables de salida fueron:

- Y1 = Macrodureza de las probetas en HB.
- Y2 = Microdureza en profundidad de las probetas en HV.
- Y3 = Coeficiente de endurecimiento de las probetas (n) y de resistencia (c).
- Y4 = Grado de acritud de las probetas (N).

Los valores correspondientes a las mediciones de macrodureza (HB) y microdureza (HV) aparecen registrados en el anexo 3.

II.4.4.1 Parámetros que caracterizan el endurecimiento por trabajo de deformación.

Actualmente se admite que la dureza es uno de los parámetros más importante de los materiales. Se admite también que este parámetro es el más importante en cuanto a la influencia en la resistencia al desgaste.

Como se ha dicho, el endurecimiento por deformación está relacionado con el incremento de la tensión requerida para producir deslizamiento debido a una deformación plástica anterior. En este proceso se reduce la aptitud para la deformación plástica y se eleva el límite de fluencia.

Entre los parámetros que caracterizan el endurecimiento por trabajo de deformación en frío, varios autores coinciden en señalar a los coeficientes de endurecimiento (n) y de resistencia (c), y el grado de acritud (N) (Katarzynski, et al, 1969; Sakwa, et al, 1984; Mata, 2002; Alfonso, 1995, 2002).

Se sabe que la curva real de tensiones–deformaciones (Dieter, 1967), usualmente es expresada por medio de la relación matemática:

$$\sigma = c\varepsilon^n \quad (2.17)$$

Donde:

σ : Tensión real

ε : Deformación real

c : Coeficiente de resistencia

n : Coeficiente de endurecimiento por deformación

El coeficiente de endurecimiento por deformación es la pendiente de la representación logarítmica de la ecuación 2.17

De forma análoga al análisis del diagrama real de tensiones – deformaciones, se describe la interacción entre dos cuerpos sólidos en el caso del proceso de indentación para las mediciones de dureza (Dieter, 1967; Katarzynski, et al, 1969; Sakwa, et al, 1984; 1969; Mata, 2002). En este caso la representación matemática se establece mediante la ley de Kick modificada por Meyer.

El planteamiento de la ley de Meyer es el siguiente.

$$P = cd^n \quad (2.18)$$

Siendo:

P : Fuerza aplicada

d : Diámetro de la huella

Los parámetros **c** y **n** continúan siendo constantes del material que caracterizan en este caso, al coeficiente de resistencia del metal a la penetración y al coeficiente de endurecimiento por deformación respectivamente; y constituyen dos importantes informaciones sobre el carácter de los materiales.

La determinación de los parámetros **c** y **n** se realiza haciendo mediciones de dureza para diferentes valores de la carga P, lo que permite entonces trazar un gráfico lineal en el sistema de coordenadas $\ln P - \ln d$. En efecto, de la ecuación 2.18 es posible plantear la siguiente expresión.

$$\ln P = C + n \times \ln d \quad (2.19)$$

En el anexo 3 se registran las bases de datos correspondientes a las mediciones de macro y microdureza, con sus correspondientes valores de P y d con lo cual se obtendrán los modelos de los parámetros **c** y **n**.

El grado de acritud estará dado por el máximo valor de la microdureza y la magnitud de la misma en el núcleo de la probeta, obtenidos de los perfiles de microdureza (Alfonso, 1995, 2002), y se determina haciendo uso de la siguiente expresión.

$$N = \frac{H\mu_{\max} - H\mu_{\text{base}}}{H\mu_{\text{base}}} \times 100 \quad (2.20)$$

Donde:

N : Grado de acritud

H_{μmax} : Máximo valor de microdureza (HV)

H_{μbase} : Valor de microdureza en el núcleo de la probeta (HV)

Las bases de datos que posibilitan la determinación del grado de acritud, aparecen reflejadas en el anexo 3

En la investigación, se introduce además un nuevo parámetro que no ha sido reflejado con anterioridad en la literatura consultada. Se le ha denominado **capacidad de endurecimiento (Ce)**. Este parámetro es capaz de caracterizar de un modo integral la capacidad que posee un material de adquirir dureza, y se introduce por el nivel de información que proporciona acerca del proceso de endurecimiento por trabajo deformacional en frío del acero al alto manganeso, cuando se dispone de las bases de datos correspondientes a la mediciones de las tensiones de primer género así como las de dureza y de desgaste abrasivo gravimétrico, cuyos comportamientos dependen del primero. El parámetro capacidad de endurecimiento, considera en sí mismo a las variables: tensiones de primer género, macrodureza y desgaste abrasivo gravimétrico.

II.4.5. Ensayos para la evaluación del Desgaste Abrasivo, en las probetas de acero al alto manganeso.

El ensayo de desgaste abrasivo se realizó en una instalación de tipo FARGO. La máquina se encuentra ubicada en el laboratorio de Propiedades Mecánicas y Tribológicas del CIME, acreditado por el Organo 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.

El método utilizado fue el gravimétrico o de diferencia de peso. Las probetas fueron cuidadosamente limpiadas con gasolina y pesadas antes y después de cada prueba. Para el pesaje de las probetas se utilizó una balanza analítica de procedencia rusa con un rango de medición (0 – 200) g, modelo BAP-200g, clase 2 KΛACC, con un error $e = 0,5$ mg, ubicada en el propio laboratorio.

Para expresar el desgaste abrasivo por el método gravimétrico o de diferencia de peso (Martínez y Goyo, 1989; Martínez 1981; Álvarez y González, 1995), se utiliza la expresión:

$$PP = G_i - G_f \quad (2.21)$$

Donde:

PP : Desgaste gravimétrico (g)

G_i : Peso inicial (g)

G_f : Peso final (g)

Se utilizó un tiempo de desgaste para todas las probetas de 1 hora, equivalente a 3600 vueltas del rodillo de goma de 98 mm de diámetro girando a 60 rpm, para un recorrido total de 1108 m. El peso colocado en el brazo de la máquina de ensayo fue de 1,03 kg, lo cual asegura una fuerza de presión sobre la probeta de 3,347 kg.

Como abrasivo se empleó arena sílice (SiO₂), con una granulometría entre 0,6 y 0,074 mm.

El experimento para la evaluación del desgaste abrasivo, se realizó de acuerdo a la norma cubana:

- NC 04-79: 87 Ensayos de desgaste abrasivo en aceros.

Fue consultada también la norma ASTM: G 65-94.

Como variable de salida se considera el desgaste abrasivo gravimétrico (PP):

- Y_1 = Desgaste abrasivo gravimétrico de las probetas (g).

Los valores correspondientes a las mediciones de pérdida de peso durante el ensayo de desgaste abrasivo gravimétrico, aparecen recogidos en el anexo 4

II.5. Desarrollo del procedimiento tecnológico para el endurecimiento mediante explosivos de piezas de equipos de laboreo minero utilizadas por la industria cubana del níquel, fabricadas de acero Hadfield.

Las aplicaciones industriales del trabajo, lo constituyen el desarrollo del procedimiento tecnológico para el endurecimiento mediante explosivos de piezas de equipos de laboreo minero utilizadas por la industria cubana del níquel, fabricadas de acero Hadfield.

Se estableció el procedimiento de endurecimiento mediante explosivos, para los martillos de las trituradoras de sinter M – 8 - 6B de la Planta de Calcinación y Sinter de la Empresa Comandante Che Guevara y para los dientes de la pala excavadora ESH – 5 / 45 M, utilizados en la extracción del mineral laterítico de la Mina de la propia Empresa.

En ambos casos es importante determinar la magnitud de la presión de trabajo y la energía de golpeo que recibirán las piezas que serán sometidas al proceso de endurecimiento mediante explosivos; y de hecho fijar en cada caso la configuración del paquete explosivo que será utilizado en dicho procedimiento.

Teniendo en cuenta la diversidad en las formas y configuraciones de las superficies a endurecer, y el hecho de que el propio proceso de endurecimiento será aplicado a una parte específica de la pieza (superficie de trabajo) y no a todo su volumen, se define una forma de configuración plana de la carga explosiva para establecer el procedimiento de endurecimiento.

Las cargas explosivas planas tienen un comportamiento diferente al de las cargas explosivas cilíndricas, en particular en lo que respecta a la velocidad de detonación. Es por ello que se hace necesario obtener experimentalmente la ley de variación y el gráfico correspondiente de

velocidad de detonación vs altura de carga explosiva, para el caso de este tipo de configuración plana.

Aplicando el método de Dautriche el cual aparece descrito en Pernia (1988) adaptado por Casals (1997) a las condiciones reales de la geometría de una carga plana, fueron realizados los experimentos necesarios y se obtuvo la ecuación de regresión que relaciona la altura de la carga explosiva (H) con su velocidad de detonación (Vd), para el TECTRÓN 100 (Palmero, 2000).

En este caso como elemento explosivo con velocidad de detonación conocida, se toma un cordón detonante con una velocidad de detonación igual a 7 100 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 de la sustancia explosiva para cada altura de la carga, aplicando la expresión que se expone en la literatura en correspondencia con el método. Los resultados de los experimentos se exponen en el anexo 1 (figura 3).

Por criterios semejantes a los considerados durante los experimentos con las probetas, para la selección del diámetro de la carga (en el caso de cargas explosivas cilíndricas) se fijan los valores de altura del paquete explosivo en cargas explosivas planas, a los efectos de establecer el procedimiento de endurecimiento mediante explosivos de piezas y accesorios de la industria minero metalúrgica.

Los valores escogidos de altura de carga son de 15, 20, y 25 mm. Haciendo uso de la figura 3 del anexo 1 se obtienen los correspondientes valores de la velocidad de detonación; estos serán:

$$Vd = 4\ 000\ \text{m/s}$$

Para: H = 15 mm;

$$Vd = 6\ 000\ \text{m/s}$$

Para: H = 20 mm;

$$Vd = 7\ 000\ \text{m/s}$$

Para: H = 25 mm;

Utilizando las expresiones 2.2 y 2.3, se calculan la presión de detonación (Pd) y la presión máxima disponible para efectuar el trabajo (Pe) respectivamente. Los resultados del cálculo se muestran en la tabla 2.5

Tabla 2.5 Presiones aplicadas a las piezas y accesorios, generadas en las proximidades del frente de detonación

H (mm)	Pd (MPa)	Pe (MPa)
15	4 600	2 300
20	10 350	5 175
25	14087,50	7043,75

Haciendo uso de la expresión 2.4, se calcula el valor de la energía de golpeo unitaria para cada una de las piezas y agregados a endurecer. Es necesario tener en cuenta que el cálculo de la masa explosiva se realiza a partir de la determinación del volumen de sustancia explosiva a emplear en cada caso.

En el caso del diente de la pala excavadora ESH – 5 / 45 M, para cada uno de los valores de altura de carga escogidos (15, 20 y 25 mm respectivamente) se obtienen los siguientes volúmenes de sustancia explosiva empleada (Cobas, 1997):

$$V = 0,0015575625\ \text{m}^3$$

Para: H = 15 mm;

$$V = 0,002118\ \text{m}^3$$

Para: H = 20 mm;

$$V = 0,0026996875\ \text{m}^3$$

Para: H = 25 mm;

En relación con los martillos de las trituradoras de sínter M – 8 - 6B, utilizando el mismo procedimiento (Palmero, 2000; De la Cruz y Leyva, 2003) el volumen será:

$$V = 0,00029451 \text{ m}^3 \quad \text{Para: } H = 15 \text{ mm};$$

$$V = 0,00041908 \text{ m}^3 \quad \text{Para: } H = 20 \text{ mm};$$

$$V = 0,0005581 \text{ m}^3 \quad \text{Para: } H = 25 \text{ mm};$$

Los resultados del cálculo de la masa explosiva para cada caso, empleando la expresión 2.5 se muestra en la tabla 2.6

Tabla 2.6 Masa de sustancia explosiva empleada en el endurecimiento de martillos y dientes.

H (mm)	m (kg)	
	Dientes	Martillos
15	1,791196875	0,3386865
20	2,4357	0,481942
25	3,104640625	0,641815

De esta forma, por la expresión 2.4, se obtiene:

Para los dientes:

$$E_{gu_1} = 5549543,476 \text{ Nm} \quad \text{Para: } H = 15 \text{ mm}$$

$$E_{gu_2} = 7546363,682 \text{ Nm} \quad \text{Para: } H = 20 \text{ mm}$$

$$E_{gu_3} = 9618896,933 \text{ Nm} \quad \text{Para: } H = 25 \text{ mm}$$

Para los martillos:

$$E_{gu_1} = 1049329,352 \text{ Nm} \quad \text{Para: } H = 15 \text{ mm}$$

$$E_{gu_2} = 1493168,127 \text{ Nm} \quad \text{Para: } H = 20 \text{ mm}$$

$$E_{gu_3} = 1988491,771 \text{ Nm} \quad \text{Para: } H = 25 \text{ mm}$$

La energía de golpeo acumulada al igual que para el caso de las probetas; será calculada por la expresión 2.7 a partir de la energía de golpeo unitaria (Egu) y del número de impactos (k) que recibirá cada pieza.

Los niveles de energía de golpeo acumulada utilizados en el proceso de endurecimiento de los dientes y los martillos, se muestran en la tabla 2.7

Tabla 2.7 Niveles de energía de golpeo acumulada, empleados en el proceso de endurecimiento de los dientes y los martillos

H (mm)	Ega (Nm)					
	Dientes			Martillos		
	k = 1	k = 2	k = 3	k = 1	k = 2	k = 3
15	5549543,476	11099086,95	16648630,43	1049329,352	2098658,704	3147988,056
20	7546363,682	15092727,36	22639091,05	1493168,127	2986336,254	4479504,381
25	9618896,933	19237793,87	28856690,8	1988491,771	3976983,542	5965475,313

En términos generales, el procedimiento de endurecimiento mediante explosivos de las piezas y accesorios fabricados de acero Hadfield involucra la realización de las siguientes operaciones, para cada uno de los impactos.

En el caso de los martillos:

- 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 las superficies de trabajo del mismo queden al descubierto (Ver figura 2.5).
- Aplicación de la sustancia explosiva en las superficies de trabajo del martillo. Las dimensiones del paquete explosivo consideran los valores de altura H y su efecto correspondiente en la magnitud de la energía de golpeo y las presiones aplicadas a las piezas y accesorios.
- Ubicación del detonador en la sustancia explosiva.
- Conexión del detonador eléctrico con la fuente de energía y realización de la explosión.

En la figura 2.5, se muestra un esquema del conjunto: martillo – sustancia explosiva, introducido en la abertura practicada en la tierra.

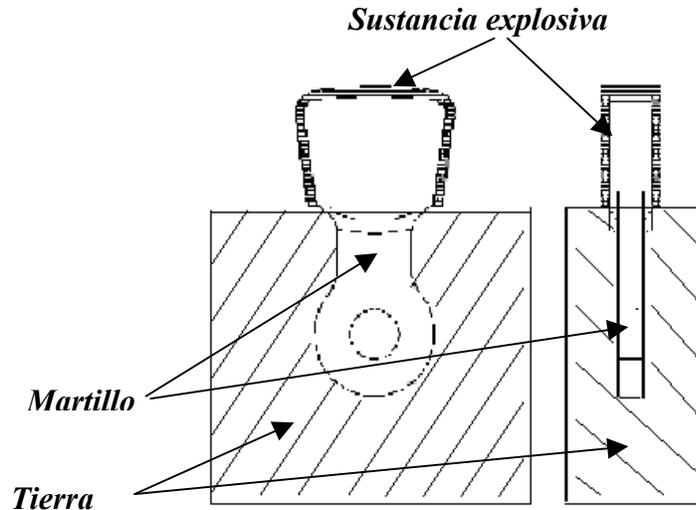


Figura 2.5 Conjunto: martillo – sustancia explosiva, introducido en la abertura practicada en la tierra.

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

- 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 las superficies de trabajo del mismo queden al descubierto.
- Aplicación de la sustancia explosiva en las superficies de trabajo del diente; es decir, las cuatro caras de la punta del mismo (Ver figura 2.6). Las dimensiones del paquete explosivo consideran los valores de altura H y su efecto correspondiente en la magnitud de la energía de golpeo y las presiones aplicadas a las piezas y accesorios.
- Ubicación del detonador en la sustancia explosiva.
- Conexión del detonador eléctrico con la fuente de energía y realización de la explosión.

En la figura 2.6, se muestra un esquema del conjunto: diente – sustancia explosiva, introducido en la abertura practicada en la tierra.

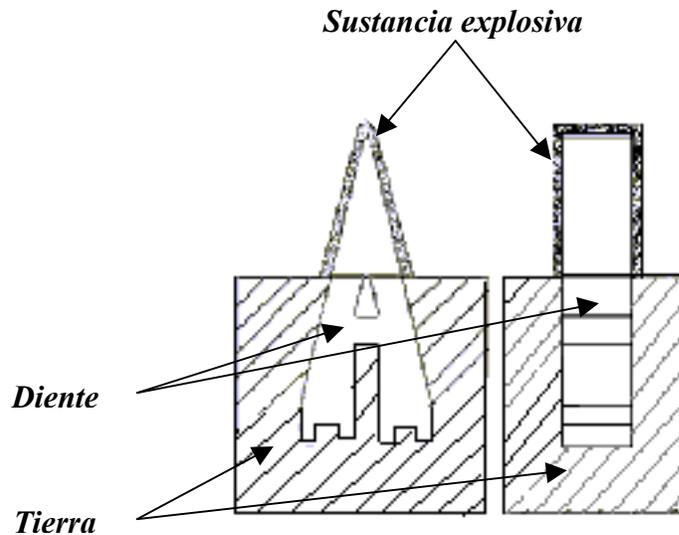


Figura 2.6 Conjunto: diente – sustancia explosiva, introducido en la abertura practicada en la tierra.

II.6. Análisis de regresión para determinar la influencia del tratamiento con explosivos, en el comportamiento del acero hadfield.

A partir de los resultados experimentales obtenidos, y con el objetivo de evaluar la influencia cuantitativa de las diferentes condiciones de aplicación de las cargas de impactos generadas por la energía de detonación de la sustancia explosiva en las propiedades de muestras fundidas de acero alto manganeso (Hadfield), se desarrolló un análisis de correlación y regresión.

Se realizó el tratamiento estadístico de los resultados experimentales para obtener los modelos experimentales y comprobar su idoneidad. Para ello, se utilizaron los paquetes estadísticos Microsoft Excel 2000 y Tierra Versión 2.5B (Legrá, 2004).

Se seleccionaron como variables independientes, el espesor de la carga explosiva (δ) y la cantidad de impactos que recibe cada probeta (k), las cuales están relacionadas con los valores de presión de trabajo y energía de golpeo que representan los parámetros de detonación de la sustancia explosiva empleada. Para el análisis de regresión los niveles de estas variables son: 10, 22,5 y 35 mm de diámetro de la carga, y 1, 2 y 3 impactos, respectivamente.

Una vez definidas las variables independientes y sus niveles, se pasó a modelar estadísticamente su influencia en las diferentes variables dependientes de respuesta. Estas variables dependientes o funciones respuestas son:

- Tensiones principales normales de primer género ($\sigma 1^{\circ}\text{gen}$)
- Semiancho físico del pico (Wl)
- Macro dureza (HB)
- Micro dureza en profundidad (HV)
- Coeficiente de endurecimiento (n) y de resistencia (c)
- Grado de acritud (N)
- Desgaste abrasivo gravimétrico (PP)
- Capacidad de endurecimiento (Ce)

Entre estas variables dependientes, se destaca por el nivel de información que pudiera proporcionar acerca del proceso de endurecimiento por trabajo deformacional en frío con el uso de explosivos del acero al alto manganeso, la variable capacidad de endurecimiento (**Ce**). Se trata en este caso de una variable estadísticamente multivariante obtenida por componentes principales, capaz de caracterizar de un modo integral la aptitud del material para el endurecimiento, debido a que incluye en sí misma el comportamiento de la dureza, el desgaste abrasivo gravimétrico y las tensiones residuales.

Para realizar el análisis de regresión, se empleó el software Tierra Versión 2.5B (Legrá, 2004) que permitió procesar un gran número de modelos a partir de los resultados experimentales, en un período de tiempo muy breve. En este programa, cuando se determinan los parámetros de los modelos mínimos cuadrados, se efectúan simultáneamente las pruebas de comprobación de la validez estadística de los coeficientes del modelo, por medio de la prueba t de Student, y de su validez global a través de la prueba F de Fisher, el Análisis de Varianza y la determinación del Coeficiente de Correlación.

Los modelos desarrollados en este trabajo, serán válidos en aquellos casos en que se empleen las variables de entrada con los niveles establecidos para este estudio, y para condiciones de experimentación similares a las utilizadas en el mismo.

II.7. Conclusiones del Capítulo II.

1. Los parámetros de detonación (V_d , P_d , E_e) constituyen los principales factores energéticos de los explosivos industriales para el trabajo de endurecimiento de metales, y ellos pueden ser considerados a partir de las variables del proceso experimental: espesor de la carga explosiva δ y número de impactos k (cada una de ellas evaluadas en tres niveles), mediante la utilización de un diseño factorial de planificación de experimentos que ofrece la posibilidad de estimar la incidencia de dichas variables en el comportamiento mecánico y funcional del acero Hadfield, así como los posibles efectos de la interacción.
2. Los ensayos realizados durante el trabajo investigativo (Metalografía, Difracción por Rayos X, Dureza y Desgaste Abrasivo) en laboratorios debidamente acreditados, permiten establecer las regularidades del comportamiento del acero Hadfield en las diferentes condiciones de aplicación de las cargas explosivas, y describir el mecanismo de endurecimiento en esas condiciones.
3. El procedimiento tecnológico descrito en el epígrafe II.5, establece la secuencia tecnológica para el endurecimiento mediante explosivos, de piezas de equipos de laboreo minero utilizadas por la industria cubana del níquel, fabricadas de acero Hadfield

CAPITULO III

CAPITULO III. RESULTADOS EXPERIMENTALES Y SU DISCUSION

III.1. Introducción

En este capítulo se exponen los resultados derivados del trabajo experimental, y a partir de los mismos, las expresiones matemático estadísticas que describan las regularidades del comportamiento mecánico y funcional del acero Hadfield sometido a la acción de las cargas de impacto que genera la detonación de una sustancia explosiva en las condiciones descritas en los experimentos. Así mismo se revela a partir del análisis metalográfico, la difracción por rayos x, y los modelos experimentales obtenidos; el mecanismo de endurecimiento del acero Hadfield en las referidas condiciones.

Finalmente, se realiza una evaluación del procedimiento tecnológico para el endurecimiento mediante explosivos, de piezas de equipos de laboreo minero utilizados por la industria cubana del níquel fabricados de acero Hadfield.

El objetivo del capítulo es:

1. Realizar la valoración crítica de los resultados y a través de ella, explicar los fundamentos científicos que dan solución al problema planteado a partir de la interpretación de las regularidades observadas.

III.2. Modelos experimentales del comportamiento mecánico y funcional del acero Hadfield ante cargas explosivas.

Se modeló estadísticamente a través del análisis de regresión, la influencia de las diferentes condiciones de aplicación de las cargas de impacto generadas por la energía de detonación de una sustancia explosiva, en el comportamiento de diversas propiedades mecánicas y funcionales de muestras fundidas de acero austenítico al alto manganeso del tipo Hadfield. Este análisis se realizó atendiendo a los principios enunciados en el epígrafe II.6. Las variables independientes para el análisis de regresión fueron el espesor de la carga explosiva (δ) y la cantidad de impactos que reciben cada probeta (k), las cuales están relacionadas con los

valores de presión de trabajo (P_e) y energía de golpeo (E_{ga}), que representan los parámetros de detonación de la sustancia explosiva empleada. Los niveles de variación de cada variable se establecen en el epígrafe II.2.1

Las propiedades mecánicas y funcionales cuyo comportamiento se describe en los modelos que se desarrollan son: tensiones principales normales de primer género, macrodureza, microdureza, coeficiente de endurecimiento y de resistencia, grado de acritud y capacidad de endurecimiento (propiedades mecánicas); así como el comportamiento del desgaste abrasivo gravimétrico (propiedad funcional). Se obtuvo además el comportamiento del semiancho físico del pico.

III.2.1. Comportamiento de las tensiones principales normales de primer género en probetas de acero Hadfield.

El comportamiento de las tensiones principales normales de primer género fue obtenido a través de un modelo experimental de mínimos cuadrados, a partir de las bases de datos reflejadas en la tabla 2.2 del anexo 2.

- Modelo estadístico de la tensión principal normal de primer género ($\sigma_{1^{\circ}gen}$), con respecto a las variables que representan los parámetros de detonación de la sustancia explosiva.

$$\sigma_{1^{\circ}gen} = (629.14) + (7.32)(\delta) + (140.54)(k) \quad (3.1)$$

En la figura 3.1 se muestra gráficamente el comportamiento de la tensión principal normal de primer género

Como se puede apreciar en la expresión del modelo matemático estadístico y el gráfico de tendencia correspondiente, la tensión principal normal de primer género tiene un comportamiento creciente siguiendo una ley lineal con un coeficiente de correlación (R) de 0,93. El modelo cumplió satisfactoriamente todas las pruebas estadísticas para su validación (ver anexo 5).

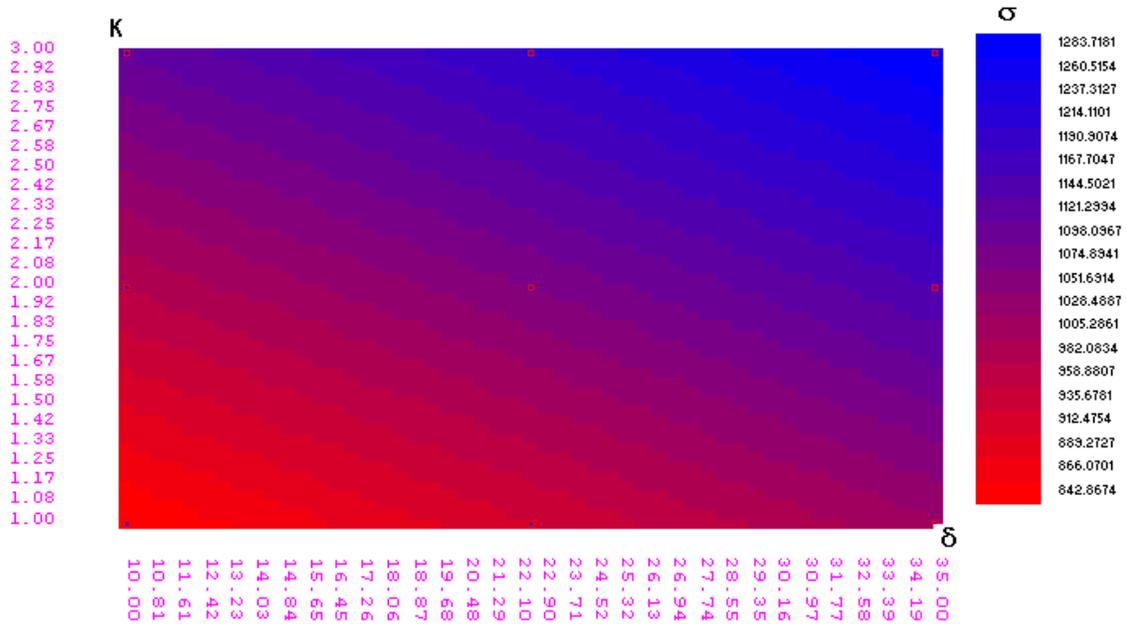


Figura 3.1 Gráfico del comportamiento de la tensión principal normal de primer género, respecto a las variables δ y k

De acuerdo al modelo experimental obtenido y como se puede observar en los gráficos correspondientes, el incremento de las variables del proceso de experimentación que representan los parámetros de detonación de la sustancia explosiva empleada, trae consigo un aumento del tensionamiento de la red en las muestras fundidas de acero austenítico al alto manganeso del tipo Hadfield. Este aumento es consecuencia directa del trabajo de deformación en frío provocado por la acción de las cargas explosivas y obedece a la reducción observada en las distancias interplanares del metal tensionado.

III.2.2. Comportamiento del semiancho físico del pico en probetas de acero Hadfield.

En la tabla 2.1 del anexo 2, se registran los valores correspondientes al semiancho físico del pico, a partir de los difractogramas de cada una de las probetas sometidas a ensayo.

Se obtuvo el modelo experimental de semiancho físico del pico en función de las variables independientes del proceso (δ y k), cuya expresión general está dada por la ecuación 3.2

- Modelo estadístico del semiancho físico del pico (Wl), con respecto a las variables que representan los parámetros de detonación de la sustancia explosiva.

$$Wl = (0.61) + (4.04 \times 10^{-3})(\delta) + (0.12)(k) \quad (3.2)$$

Como se puede apreciar en la figura 3.2, el valor del semiancho físico del pico se incrementa en la misma medida en que crecen las variables que representan los parámetros de detonación de la sustancia explosiva. Este aumento tiene lugar siguiendo una ley lineal con un coeficiente de correlación (R) de 0,86. El modelo cumplió satisfactoriamente todas las pruebas estadísticas para su validación (ver anexo 5).

Del análisis metalográfico que se describe en el epígrafe III.3.1 es posible establecer que se produce una reducción en el tamaño del grano una vez que las probetas son sometidas al efecto de las cargas explosivas; sin embargo el grano que se ha reducido mantiene aproximadamente igual su tamaño promedio, cualesquiera fueran las condiciones en que fueron aplicadas las cargas explosivas.

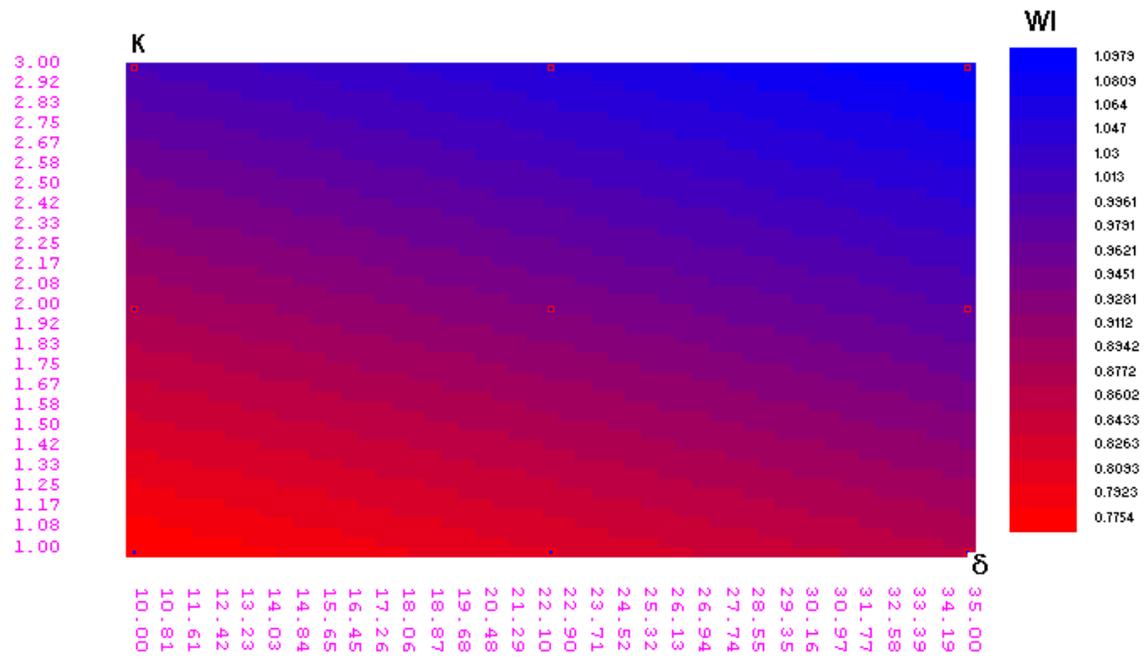


Figura 3.2 Gráfico del comportamiento del semiancho físico del pico, respecto a las variables δ y k

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

Resulta evidente la tendencia al crecimiento del semiancho físico del pico (ver figura 3.2), en correspondencia con el incremento de la densidad de defectos que genera el proceso de deformación plástica (micrografías que se muestran en las figuras 3.16, 3.17 y 3.18); en la misma medida que se hace mayor el espesor de carga explosiva empleada y mayor el número de impactos al que fue expuesta la muestra.

III.2.3. Comportamiento de la macrodureza en las probetas de acero Hadfield.

Se obtuvo un modelo mínimo cuadrado que expresa estadísticamente el comportamiento de la macrodureza en función de las variables independientes del proceso (δ y k), cuya expresión general está dada por la ecuación 3.3

- Modelo estadístico de macrodureza (HB), con respecto a las variables que representan los parámetros de detonación de la sustancia explosiva.

$$HB = (194.67) + (2.21)(\delta) + (42.84)(k) \quad (3.3)$$

En la figura 3.3 se muestra gráficamente el comportamiento de la macrodureza

De acuerdo al modelo experimental obtenido y como se puede observar en el gráfico correspondiente, el incremento de las variables del proceso de experimentación que representan los parámetros de detonación de la sustancia explosiva empleada, trae consigo un aumento de la macrodureza en las muestras fundidas de acero austenítico al alto manganeso del tipo Hadfield. Este aumento tiene lugar siguiendo una ley lineal con un coeficiente de

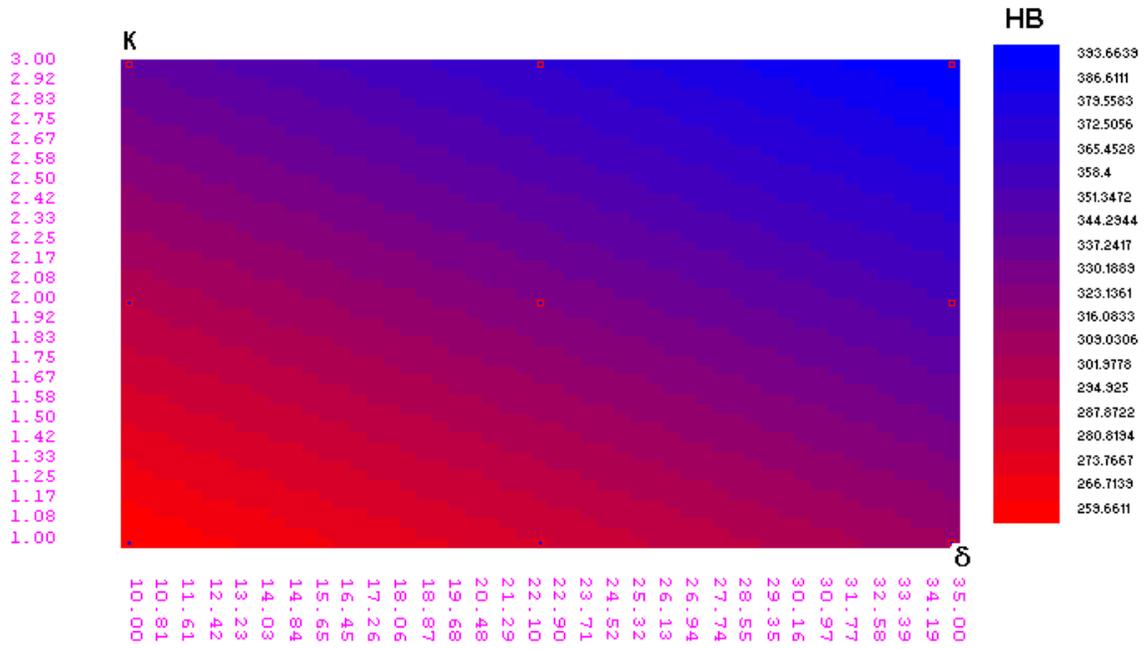


Figura 3.3 Gráfico del comportamiento de la macrodureza, respecto a las variables δ y k

correlación (R) de 0,94. El modelo cumplió satisfactoriamente todas las pruebas estadísticas para su validación (ver anexo 5).

Como el comportamiento de la dureza es función del estado tensional del material, se obtuvo el modelo experimental de macrodureza en relación a la tensión principal normal de primer género. En la expresión 3.4 y la figura 3.4, se muestra la tendencia de crecimiento de la macrodureza respecto a la tensión.

- Modelo estadístico de macrodureza (HB), con respecto a la tensión principal normal de primer género.

$$HB = (23.25) + (0.28)(\sigma 1^{\circ} \text{gen}) \quad (3.4)$$

El modelo de mínimo cuadrado tiene un coeficiente de correlación (R) de 0,97. Este modelo cumplió satisfactoriamente todas las pruebas estadísticas para su validación (ver anexo 5).

III.2.4. Comportamiento de la microdureza en las probetas de acero Hadfield.

El comportamiento de la microdureza que refleja el modelo experimental de mínimos cuadrados cuya expresión general está dada por la ecuación 3.5; tiene lugar siguiendo una ley lineal con un coeficiente de correlación (R) de 0,94. En este caso también se han cumplido todas las pruebas estadísticas para su validación tal y como se refleja en el anexo 5.

- Modelo estadístico de microdureza (HV), con respecto a las variables que representan los parámetros de detonación de la sustancia explosiva, y el radio.

$$HV = (-96.77) + (1.71)(\delta) + (26.94)(k) + (2.28 \times 10^{-2})(\text{RADIO}) \quad (3.5)$$

El modelo reflejado en la Expresión 3.5 y los gráficos correspondientes, muestran que la microdureza medida en la profundidad tiene una fuerte dependencia del radio o la profundidad a la que se realiza la medición (el coeficiente de correlación parcial más elevado del modelo obtenido, es el que corresponde al radio). El perfil de microdureza se orienta con valores

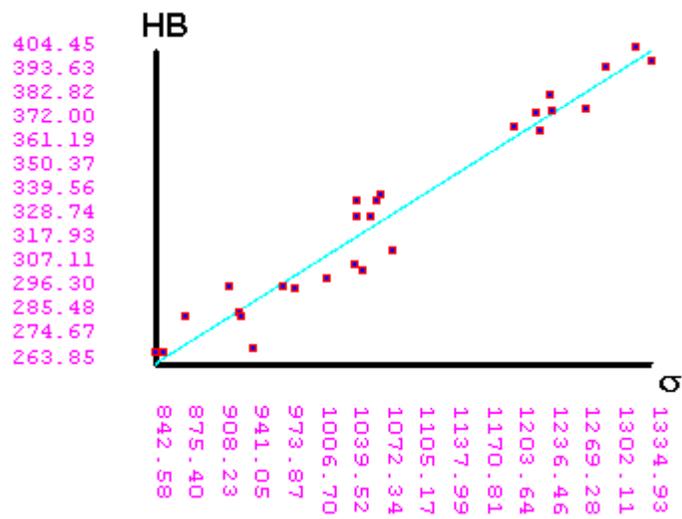


Figura 3.4 Gráfico del comportamiento de la macrodureza, respecto a la tensión.

máximos en el borde exterior del plano dónde se realizaron las mediciones; y ésta disminuye según una ley lineal hacia el interior del núcleo de la probeta.

El modelo y los gráficos de tendencia, también muestra un incremento en los perfiles de la microdureza de cada una de las probetas del diseño experimental, mientras mayores aumentos se tenga de las variables del proceso (δ y k).

La gráfica que muestra el comportamiento de la microdureza, se ilustra en la figura 3.5

En el análisis metalográfico que se describe en el epígrafe III.3.1, se demuestra que las técnicas experimentales utilizadas en la investigación no detectan la existencia en la matriz austenítica de estructuras del tipo martensítico ni de fases secundarias precipitadas (sobre todo del tipo carburo); esto se corrobora por el análisis cualitativo de la difracción por rayos x. Por ello se puede afirmar que su macrodureza depende de la microdureza de la matriz metálica, y por lo tanto, el comportamiento de la macrodureza y la microdureza en el borde externo del plano en las probetas estudiadas coinciden en un grado significativo.

La elevación de la dureza a nivel cristalino, se comprobó que era provocado por una deformación por compresión de la red cristalina y consecuentemente por el incremento de las tensiones residuales. Mediante la difracción por rayos x, se ha podido determinar que las distancias interplanares de la red cristalina disminuyen en la misma medida en que se incrementa la presión de detonación y la energía de golpeo acumulada por las probetas; es decir, con un incremento de los valores de las variables δ y k , se produce un aumento de la deformación de la red cristalina y de su tensionamiento.

Como el valor de la suma de las tensiones principales normales de primer género depende fundamentalmente de la deformación de la red cristalina, aumentando en la misma medida que se reducen las distancias interplanares de dicha red (Barret, 1957; Cullity, 1967, Alfonso y Martin, 2000; Buraya, 2000; Lectures Notes, 2000; Torres, 2002), al aumentar la presión de detonación y la energía de golpeo también hubo un incremento del valor de las tensiones normales de primer género, y esto a su vez trajo consigo un incremento de las tensiones

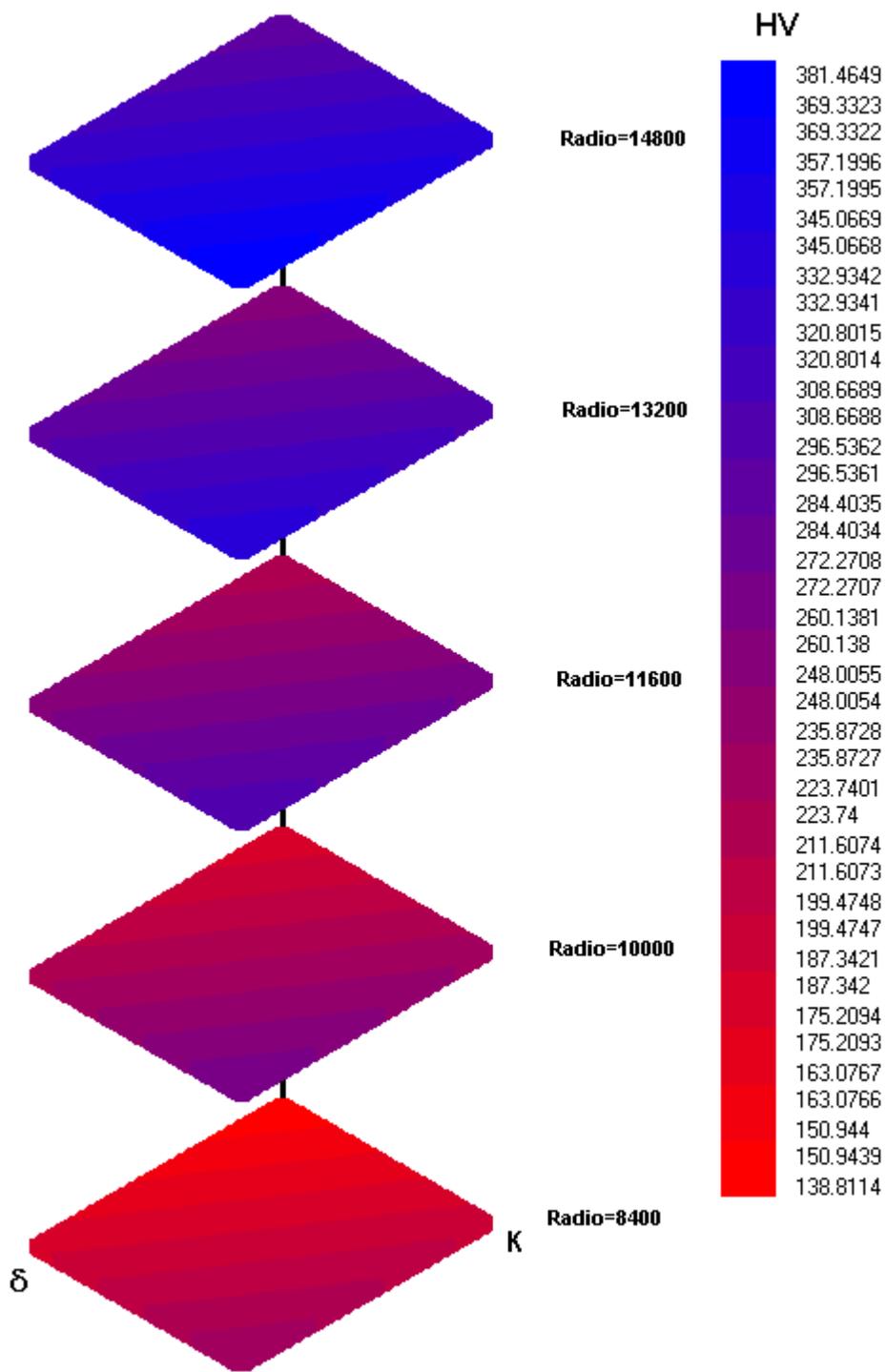


Figura 3.5 Gráfico del comportamiento de la microdureza, respecto a las variables δ y k y el radio.

tangenciales de primer género. Finalmente se produce un incremento de la dureza por las causas explicadas.

III.2.5. Coeficiente de endurecimiento y de resistencia en probetas de acero Hadfield.

La ley de Kick modificada por Meyer tal y como fue planteada en el epígrafe II.4.4.1, contiene dos informaciones importantes sobre el carácter de los materiales: el coeficiente de endurecimiento por deformación del metal (**n**), y el coeficiente de resistencia del metal a la penetración (**c**); los cuales determinan la relación entre la fuerza de ensayo **P**, y la dimensión de la huella **d** (Dieter, 1967; Katarzynski et al, 1969; Sakwa et al, 1984; Mata, 2002).

A partir de la base de datos de los ensayos de macrodureza se obtuvieron los modelos de mínimos cuadrados $\ln(P)$ vs $\ln(d)$, con el objetivo de determinar el coeficiente de endurecimiento (**n**) y el coeficiente de resistencia (**c**), correspondientes a cada uno de los 27 experimentos realizados en la tesis. El coeficiente de correlación en todos los casos osciló entre 0,996 y 0,999.

Con las datas obtenidas, se modeló el comportamiento de cada uno de estos coeficientes obtenidos de los ensayos de macrodureza respecto a las variables del proceso (**δ** y **k**). Las expresiones matemáticas de dichos modelos se muestran en las ecuaciones 3.6 y 3.7; las pruebas de validación de cada uno de los modelos se recogen en el anexo 5.

- Modelo estadístico del coeficiente de endurecimiento (**n**), con respecto a las variables que representan los parámetros de detonación de la sustancia explosiva.

$$n = (2.03) + (-1.87 \times 10^{-4})(\delta) + (2.78 \times 10^{-3})(k) \quad (3.6)$$

- Modelo estadístico del coeficiente de resistencia (**c**), con respecto a las variables que representan los parámetros de detonación de la sustancia explosiva.

$$c = (158.79) + (1.76)(\delta) + (35.05)(k) \quad (3.7)$$

Como puede apreciarse en el anexo 5, el modelo del coeficiente de endurecimiento (n) no cumple las pruebas estadísticas para su validación; el coeficiente de correlación (R) es igual a 0,16.

Un análisis de los valores de la media aritmética (2,036081) y de la desviación estándar (0,017942) muestra que el coeficiente de variación es muy pequeño (0,008812) lo cual quiere decir que este parámetro es prácticamente constante. El valor del coeficiente de endurecimiento (n) resultó ser aproximadamente igual a 2, lo cual coincide con la magnitud correspondiente al de los metales completamente endurecidos por deformación en frío (Dieter, 1967). En la figura 3.6 se muestra el gráfico del comportamiento de n para cada uno de los experimentos.

El coeficiente de resistencia (c) sin embargo, tiene un comportamiento creciente de acuerdo con una ley lineal cuando se incrementan la presión de detonación y la energía de golpeo acumulada por las probetas, evaluadas a través de las variables del experimento δ y k (ver figura 3.7). El modelo experimental obtenido tiene un coeficiente de correlación (R) de 0,96. Este modelo cumplió satisfactoriamente todas las pruebas estadísticas para su validación (ver anexo 5).

En el caso del acero Hadfield endurecido mediante explosivos, lo que sucede en realidad es que para que el penetrador logre la misma huella (d) en el material sometido al ensayo de dureza, se requiere mayor carga (P) sobre el penetrador en la misma medida en que se hace mayor la magnitud de los parámetros de la detonación considerados en los ensayos; y es por esta razón que el coeficiente de resistencia (c) tiene un comportamiento creciente. Y esta tendencia se mantiene independientemente de que la recta que se logra en el sistema de coordenadas $\ln P - \ln d$, en cada uno de los ensayos, mantenga aproximadamente la misma pendiente durante los mismos (valores de n aproximadamente iguales).

Como resumen parcial se puede decir que en las condiciones de realización de los ensayos de dureza de la tesis, se ha demostrado que el coeficiente de endurecimiento (n) tiene tendencia a un valor constante (aproximadamente igual a 2); mientras que el coeficiente de resistencia (c)

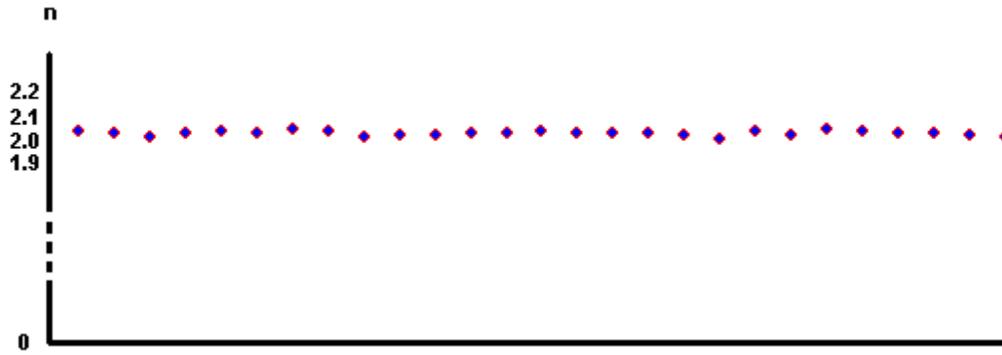


Figura 3.6 Gráfico del comportamiento del coeficiente de endurecimiento (n) para cada uno de los experimentos

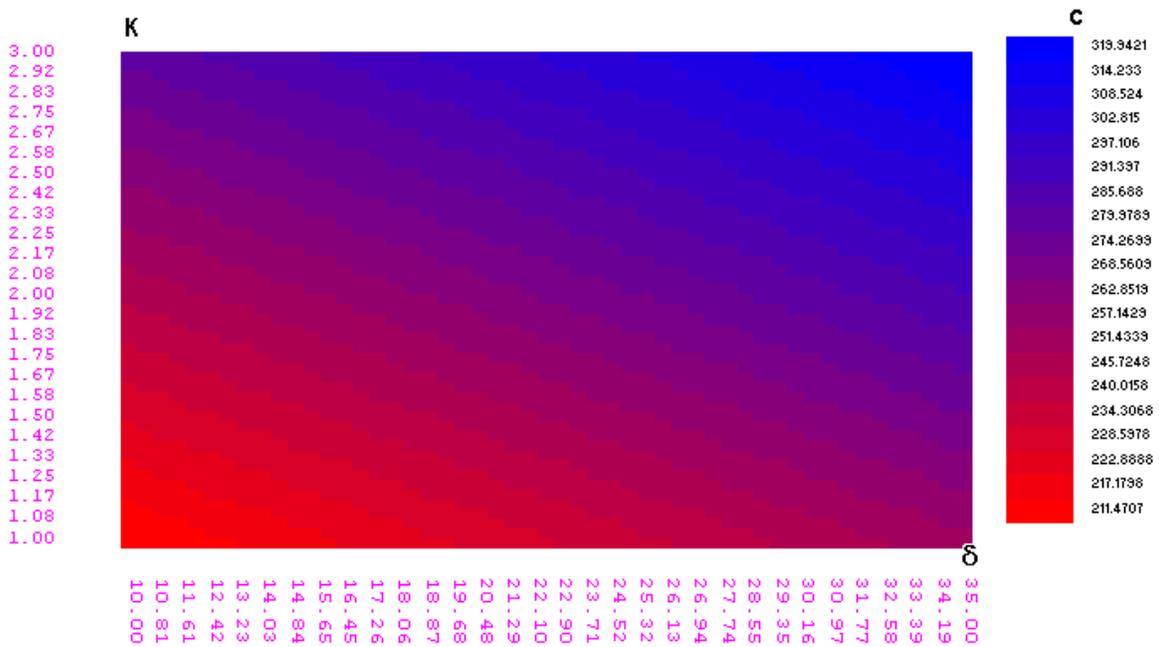


Figura 3.7 Gráfico del comportamiento del coeficiente de resistencia (c), respecto a las variables δ y k .

crece en la misma medida que se intensifican los valores de las variables que caracterizan el efecto que ejercen las cargas explosivas en el proceso de consolidación del acero Hadfield (en los experimentos realizados, los valores de **c** oscilan entre 218 y 328).

Este resultado confirma el incremento del tensionamiento de la red y el endurecimiento del material, puesto que el mismo ofrece mayor resistencia a la penetración una vez deformado plásticamente; lo cual ha sido demostrado en los epígrafes III.2.1, III.2.2 y III.2.3

A partir de las bases de datos del experimento de microdureza, también fue posible obtener el coeficiente de endurecimiento (**n**) y de resistencia (**c**), en profundidad, utilizando modelos de mínimos cuadrados $\ln(P)$ vs $\ln(d)$. Al igual que con la macrodureza, en este caso se obtuvieron también modelos experimentales de **c** y **n**; pero estos se realizan respecto a las variables del proceso (**δ** y **k**), y además respecto al **radio** en el que fue medida la microdureza.

Las expresiones matemáticas de dichos modelos se muestran en las ecuaciones 3.8 y 3.9; las pruebas de validación de cada uno de los modelos, se recogen en el anexo 5.

- Modelo estadístico del coeficiente de endurecimiento (**n**), con respecto a las variables que representan los parámetros de detonación de la sustancia explosiva y el radio.

$$n = (2.19) + (-1.60 \times 10^{-3})(\delta) + (1.58 \times 10^{-2})(k) + (-2.12 \times 10^{-5})(\text{RADIO}) \quad (3.8)$$

- Modelo estadístico del coeficiente de resistencia (**c**), con respecto a las variables que representan los parámetros de detonación de la sustancia explosiva y el radio.

$$c = (-5.65 \times 10^{-2}) + (9.28 \times 10^{-4})(\delta) + (1.78 \times 10^{-2})(k) + (1.24 \times 10^{-5})(\text{RADIO}) \quad (3.9)$$

El gráfico correspondiente de **c**, se muestra en la figura 3.8

En este caso se mantienen las mismas tendencias explicadas en la determinación de dichos coeficientes durante el ensayo de macrodureza. El modelo de mínimo cuadrado del coeficiente de endurecimiento (**n**) no cumple las pruebas de validación estadística, y su coeficiente de

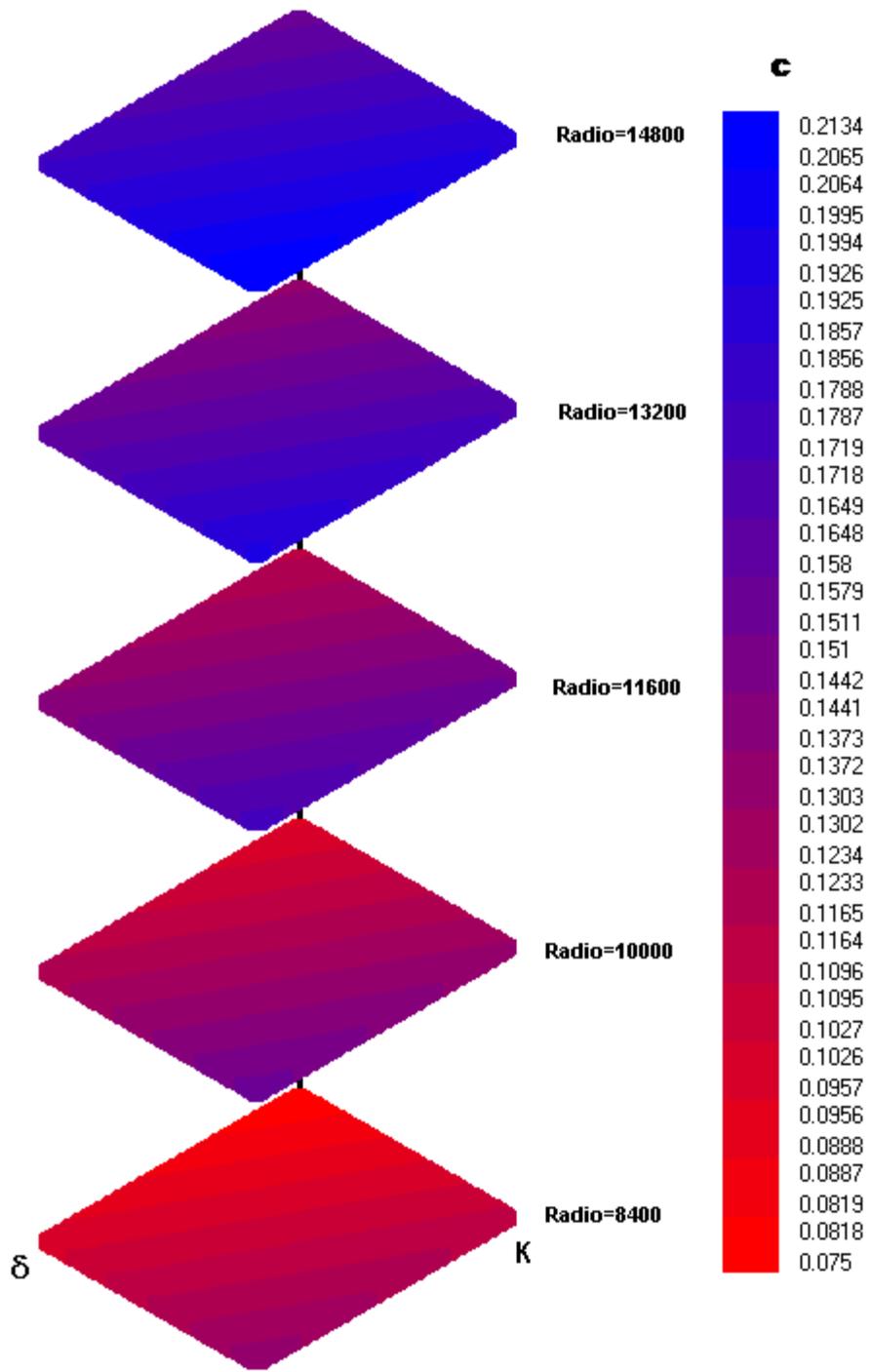


Figura 3.8 Gráfico del comportamiento del coeficiente de resistencia (c), respecto a las variables δ y k , y el radio.

correlación (R) es de 0,16 (ver anexo 5). El modelo del coeficiente de resistencia (c) cumplen las pruebas de validación, y el coeficiente de correlación (R) resultó igual a 0,83 (ver anexo 5).

A modo de conclusión se puede afirmar que durante las mediciones de dureza, se identifica el coeficiente de resistencia (c) como un parámetro característico de la capacidad del material de endurecerse a consecuencia del incremento de las tensiones residuales de primer género.

El coeficiente de resistencia (c) crece según una ley lineal a nivel de macrodureza, en función de las variables del proceso (δ y k); y mantiene ese mismo comportamiento a nivel de microdureza, en cada una de las profundidades consideradas. Pero en este último caso se considera también como variable independiente el radio en el cual se mide la microdureza.

III.2.6. Grado de acritud en probetas de acero Hadfield.

Las bases de datos de microdureza ofrecen la posibilidad de establecer el comportamiento del grado de acritud, como un importante parámetro relacionado con la capacidad del material para endurecerse por deformación plástica en frío.

Utilizando la expresión 2.20, se calcula el grado de acritud en cada una de las probetas del plan experimental de la tesis. El modelo de mínimos cuadrados que describe su comportamiento en relación con las variables del plan experimental, tiene lugar de acuerdo a una ley lineal, con un coeficiente de correlación (R) de 0,95; este modelo cumple con todas las pruebas estadísticas para su validación (ver anexo 5).

- Modelo estadístico de grado de acritud (N), con respecto a las variables que representan los parámetros de detonación de la sustancia explosiva.

$$N = (11.82) + (1.12)(\delta) + (21.01)(k) \quad (3.10)$$

El modelo reflejado en la Expresión 3.10 y el gráfico correspondiente, muestra que el grado de acritud de muestras fundidas de acero Hadfield, tiene valores crecientes en la medida que se incrementan la presión de detonación y la energía de golpeo acumulada por las probetas. Este

resultado está condicionado por la aptitud del material para adquirir dureza por trabajo de deformación en frío.

En la figura 3.9 se muestra gráficamente el comportamiento del grado de acritud.

III.2.7. Comportamiento del desgaste abrasivo gravimétrico en las probetas de acero Hadfield.

Por el modelo experimental descrito por la expresión 3.11 y el gráfico de tendencia correspondiente (figura 3.10), se establece que al ser sometidas las muestras fundidas de acero Hadfield a las cargas de impacto que genera la energía de detonación de una carga explosiva, el incremento de las variables que representan los parámetros de detonación de la sustancia explosiva trae consigo una disminución del desgaste gravimétrico (aumento de la resistencia al desgaste abrasivo).

La disminución del desgaste gravimétrico tiene lugar de acuerdo a una ley lineal, con un coeficiente de correlación (R) de 0,95. El modelo cumplió satisfactoriamente todas pruebas estadísticas para su validación (ver anexo 5).

- Modelo estadístico de Desgaste Abrasivo Gravimétrico (PP), con respecto a las variables que representan los parámetros de detonación de la sustancia explosiva

$$PP = (3.28 \times 10^{-2}) + (-2.04 \times 10^{-4})(\delta) + (-5.75 \times 10^{-3})(k) \quad (3.11)$$

La causa fundamental de la disminución del desgaste gravimétrico como resultado del incremento de la presión de detonación y la energía de golpeo acumulada por las probetas, es el aumento de la dureza de las mismas de acuerdo con lo expuesto en el epígrafe III.2.3; que relaciona el incremento de la dureza, con el efecto provocado por una deformación por compresión del enrejado cristalino, en el aumento del valor de la suma de las tensiones principales de primer género y del endurecimiento por acritud de la matriz austenítica.

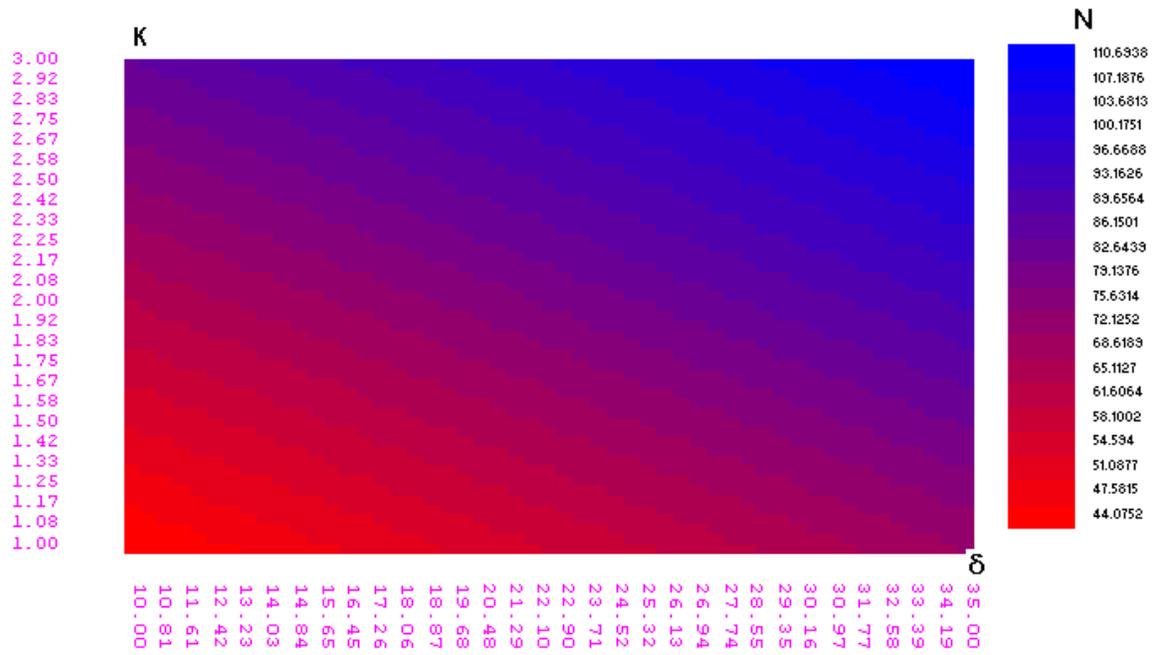


Figura 3.9 Gráfico del comportamiento del grado de acritud, respecto a las variables δ y k

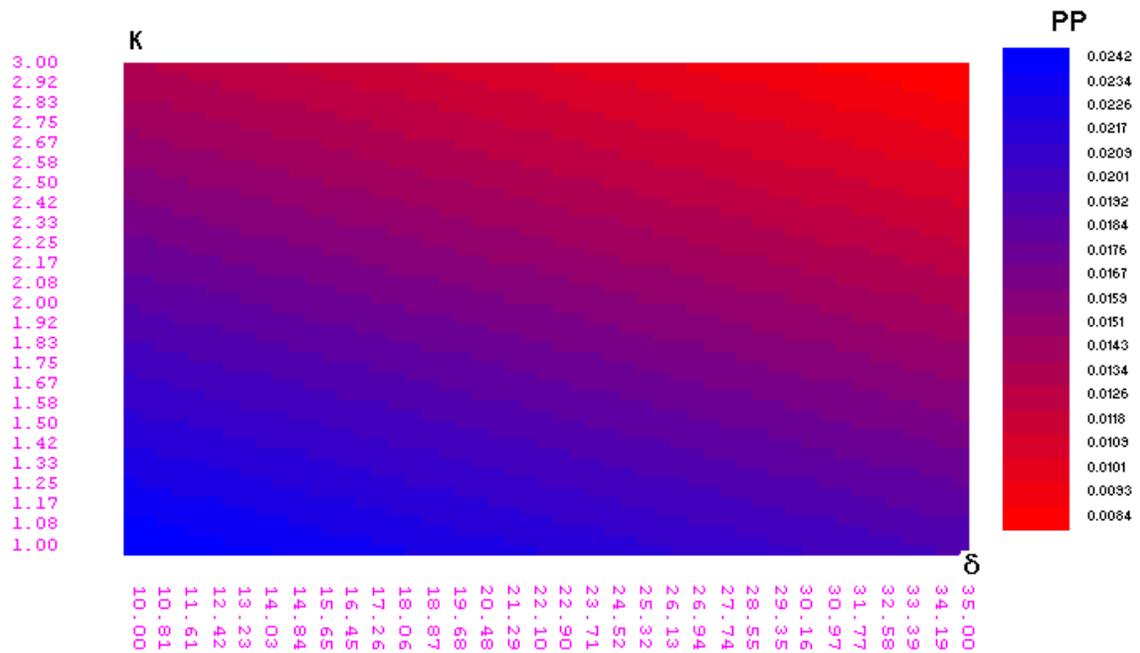


Figura 3.10 Gráfico del comportamiento del desgaste abrasivo gravimétrico, respecto a las variables δ y k

Esto se explica mediante los modelos experimentales de mínimos cuadrados (expresiones 3.12 y 3.13) y los gráficos correspondientes (figuras 3.11 y 3.12) que relacionan el desgaste gravimétrico con la macrodureza de las muestras y las tensiones principales normales de primer género.

El modelo de desgaste gravimétrico respecto a macrodureza se describe según una ley lineal, con un coeficiente de correlación (R) de 0,96; el mismo también cumplió satisfactoriamente todas las pruebas estadísticas para su validación (ver anexo 5).

- Modelo estadístico de Desgaste Abrasivo Gravimétrico (PP), con respecto a la macrodureza.

$$PP = (5.63 \times 10^{-2}) + (-1.19 \times 10^{-4})(HB) \quad (3.12)$$

En el caso del modelo de desgaste gravimétrico respecto a la tensión, el comportamiento se describe según una ley lineal con un coeficiente de correlación (R) de 0,93. El modelo cumplió satisfactoriamente todas pruebas estadísticas para su validación (ver anexo 5).

- Modelo estadístico de Desgaste Abrasivo Gravimétrico (PP), con respecto a la tensión.

$$PP = (5.34 \times 10^{-2}) + (-3.41 \times 10^{-5})(\sigma 1^{\circ} \text{gen}) \quad (3.13)$$

III.2.8. Capacidad de endurecimiento en probetas de acero Hadfield.

En el capítulo II, se hace referencia a la capacidad de endurecimiento (Ce) como el parámetro idóneo para caracterizar de un modo integral la aptitud que posee un material de adquirir dureza, teniendo en cuenta que desde el punto de vista matemático constituye una variable estadísticamente multivariante obtenida por componentes principales, que se introduce por el nivel de información que proporciona acerca del proceso de endurecimiento por trabajo de deformación en frío del acero al alto manganeso, cuando se dispone de las bases de datos correspondientes.

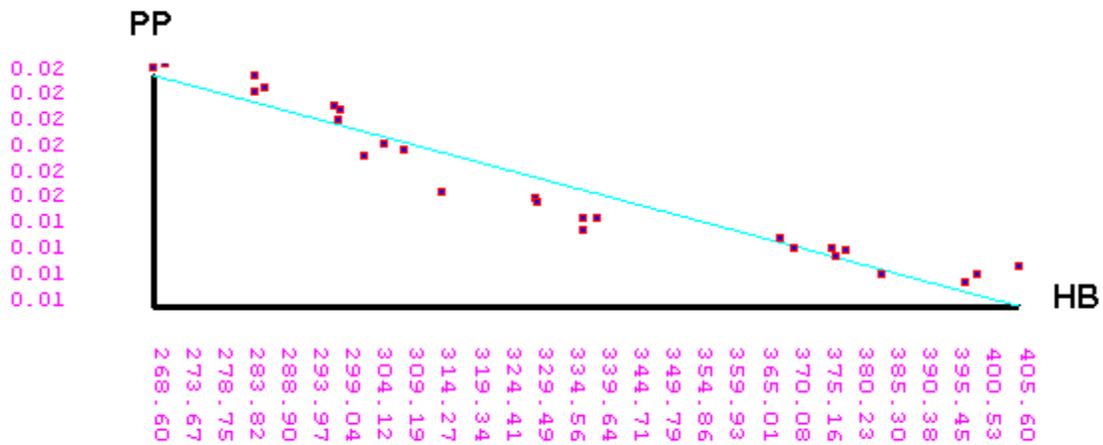


Figura 3.11 Gráfico del comportamiento del desgaste abrasivo gravimétrico, respecto a la macrodureza.

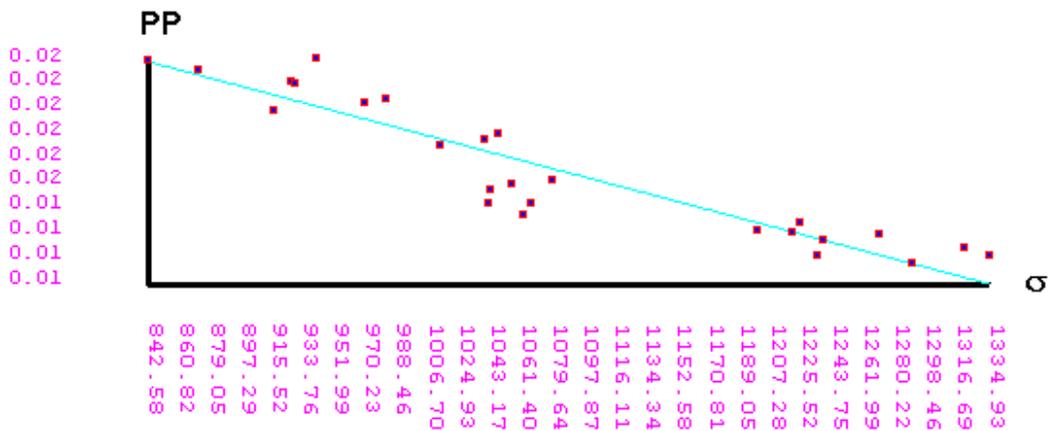


Figura 3.12 Gráfico del comportamiento del Desgaste Abrasivo Gravimétrico, con respecto a la tensión.

Para medir la capacidad de endurecimiento se parte de tres atributos que pueden medirse directa o indirectamente, estos son:

- a. Macro dureza, HB.
- b. Desgaste abrasivo gravimétrico, PP.
- c. Tensiones normales de primer género, σ .

Si se conoce un conjunto de mediciones de estos atributos para un material sujeto a diferentes condiciones de deformación plástica, se puede explorar la posibilidad de expresar de manera compactada dichos atributos en un solo parámetro. Para ello se aplica el Método de Componentes Principales según se explica en Alfonso (1989).

El primer paso es tipificar las tres variables que se denominarán X_1 , X_2 y X_3 , mediante una transformación del tipo:

$$X_i^* = \frac{X_i - \mu}{\sigma}, \quad (3.14)$$

Donde μ es la media aritmética del atributo X_i y σ es su desviación estándar; $i = 1,2,3$. Para cada variable se tienen n mediciones.

El segundo paso es obtener la matriz de correlación R de los atributos estudiados. Esta matriz es siempre definida positiva.

El tercer paso es obtener los valores propios y los vectores propios de la matriz, los cuales son reales y positivos dadas las características de R . Se denominan V_1 , V_2 y V_3 a estos valores propios, y sean los vectores propios:

$$\begin{aligned} W_1 &= (w_{11}, w_{12}, w_{13}) \\ W_2 &= (w_{21}, w_{22}, w_{23}) \\ W_3 &= (w_{31}, w_{32}, w_{33}) \end{aligned} \quad (3.15)$$

Se pueden obtener nuevos valores de las variables mediante las transformaciones siguientes:

$$\begin{aligned} Y_{1k} &= w_{11} X_{1k} + w_{12} X_{2k} + w_{13} X_{3k} \\ Y_{2k} &= w_{21} X_{1k} + w_{22} X_{2k} + w_{23} X_{3k} \\ Y_{3k} &= w_{31} X_{1k} + w_{32} X_{2k} + w_{33} X_{3k} \end{aligned} \quad (3.16)$$

Donde $k=1,2,\dots,n$

Ahora se determina el porcentaje que aporta cada valor propio V_i a la suma de ellos. El valor propio que más aporta es el que corresponde a la variable Y_i que contiene mayor información útil respecto a los atributos originales.

Para los datos analizados (ver tablas 3.2, 4.1 y 5.1 de los anexos 3, 4 y 5 respectivamente) se obtuvieron los vectores propios:

$$\begin{aligned} W_1 &= (0.80, 0.30, -0.51) \\ W_2 &= (0.58, -0.57, 0.58) \\ W_3 &= (0.12, 0.76, 0.63) \end{aligned} \quad (3.17)$$

Los valores propios calculados son:

$$\begin{aligned} V_1 &= 1.98 \times 10^{-2} \\ V_2 &= 2.91 \\ V_3 &= 6.65 \times 10^{-2} \end{aligned} \quad (3.18)$$

Se puede observar que el segundo valor propio constituye el 97.12% de la suma de los valores propios lo cual quiere decir que los valores $Y_{21}, Y_{22}, \dots, Y_{2n}$ resumen casi toda la información contenida en las mediciones de X_1, X_2 y X_3 .

Ahora se puede establecer que el parámetro Y_2 denominado Capacidad de Endurecimiento (Ce), compacta la información de los atributos originales HB, PP y σ mediante la siguiente transformación lineal:

$$\begin{aligned} Ce = & 0.58 \times HB' \\ & -0.57 \times PP' \\ & + 0.58 \times \sigma' \end{aligned} \quad (3.19)$$

Siendo:

$$HB' = \frac{HB - \mu_{HB}}{DE_{HB}}$$

$$PP' = \frac{PP - \mu_{PP}}{DE_{PP}}$$

$$\sigma' = \frac{\sigma - \mu_{\sigma}}{DE_{\sigma}}$$

Donde:

DE_{HB} , DE_{PP} y DE_{σ} D: Desviación estándar de la macrodureza, el desgaste abrasivo gravimétrico y la tensión normal de primer género, respectivamente.

El parámetro integrador (Ce) obtenido por Componentes Principales, tiene valores que oscilan entre -2,72 y 2,68. Por razones de una mayor comprensión en la práctica industrial, conviene expresarlo entre 0 y 1 (Ver tabla 5.1 del anexo 5). Los valores del coeficiente de endurecimiento (Ce) se transformaron en este caso, mediante la expresión 3.20

$$Ce(n) = 0,18 \times Ce + 0,50 \quad (3.20)$$

Se puede establecer también que Ce es una función de δ y de k , cuando se utiliza el procedimiento de endurecimiento mediante explosivos.

La expresión 3.21 ofrece el modelo experimental de mínimos cuadrados de la capacidad de endurecimiento, y la figura 3.13 ilustra el comportamiento de este parámetro respecto a δ y k

$$C_e = (5.30) + (8.05 \times 10^{-2})(\delta) + (1.74)(k) \quad (3.21)$$

El coeficiente de correlación (R) del modelo es de 0,96; las pruebas estadísticas para su validación cumplidas satisfactoriamente se muestran en el anexo 5.

Como se aprecia, la capacidad de endurecimiento (C_e) tiene un comportamiento creciente en la misma medida que se incrementan las variables del proceso de experimentación, y este resultado se corresponde con la hipótesis de que al incrementar las tensiones residuales de primer género y en consecuencia la dureza, se reducen los niveles de desgaste mejorando el comportamiento del material en correspondencia con el mecanismo de endurecimiento que explica el fenómeno.

III.3. Mecanismo de endurecimiento del acero Hadfield

La fundamentación del mecanismo de endurecimiento del acero Hadfield en las condiciones de aplicación de las cargas explosivas descritas en los experimentos (energía específica de 3×10^6 Nm/kg, y presión de detonación entre 4 y 7 Gpa), se realiza a partir de los resultados del trabajo experimental. De modo particular se tienen en cuenta: el análisis metalográfico y el ensayo de difracción por rayos x realizado. Se considera además, el comportamiento de las regularidades relacionados con las propiedades mecánicas y funcionales del acero Hadfield para las condiciones descritas en los experimentos, expresadas en los modelos experimentales obtenidos.

III.3.1. Análisis metalográfico de las probetas de acero Hadfield.

Las micrografías que ilustran el análisis metalográfico, fueron captadas a 101x para medir tamaño del grano según norma ASTM E – 112 – 88, y a 519x para determinar la estructura.

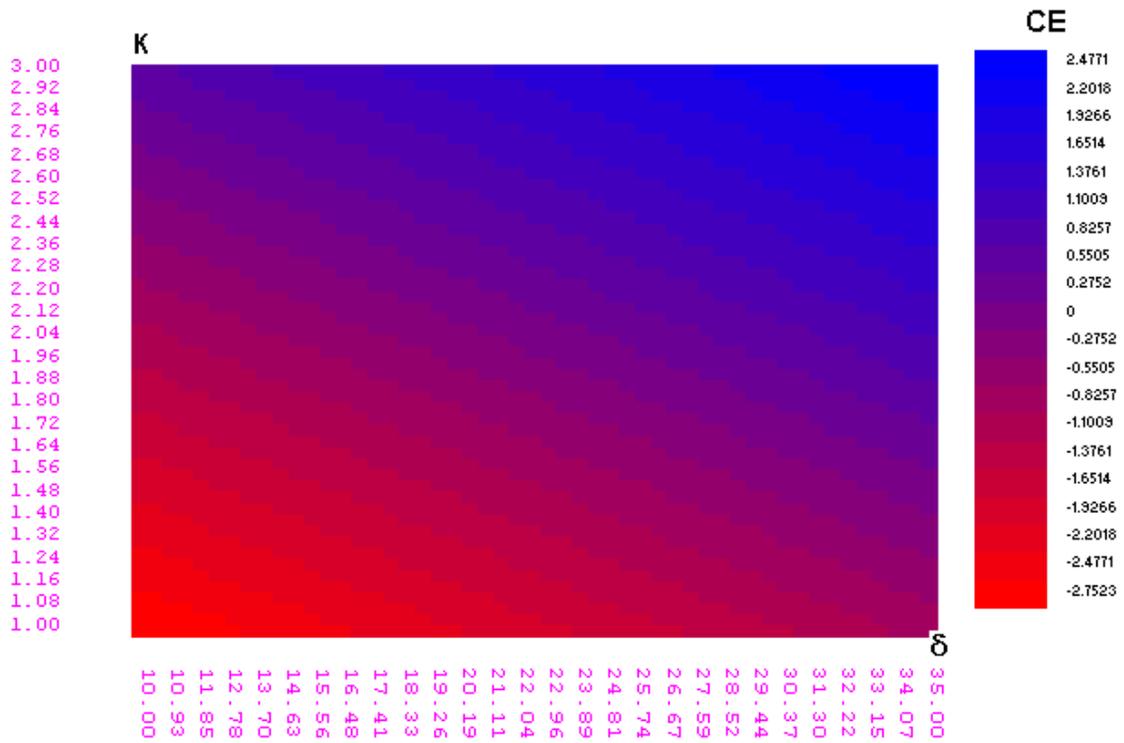


Figura 3.13 Gráfico del comportamiento de la capacidad de endurecimiento (Ce).

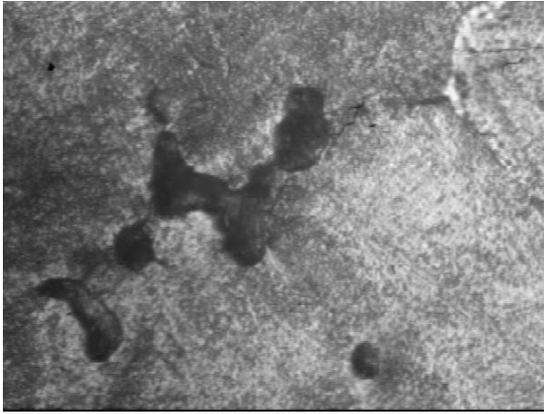
El análisis metalográfico con microscopía óptica, realizado a las probetas patrón que no habían recibido ningún trabajo de deformación debido a la acción dinámica de las cargas explosivas, demuestra que existe una estructura típica de austenita con tendencia a formación dendrítica, como se ilustra en las micrografías a y b de la figura 3.14

En estas probetas no se encontraron evidencias de deformación plástica y se observan más bien granos de forma irregular y configuración con tendencia equiaxial.

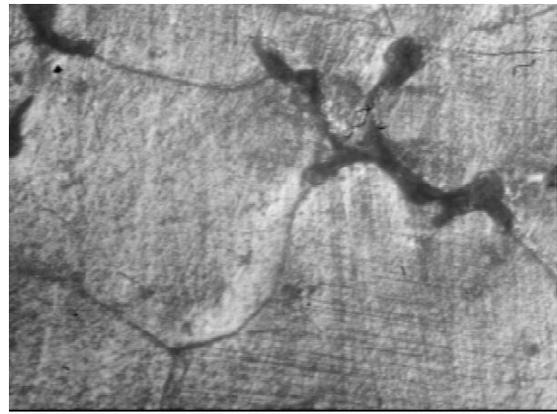
El tamaño promedio del grano según norma es el No. 1, y este resultado se corresponde con lo reflejado en la literatura; según Guliaev (1983), CIME (1993) y Callister (1999) el manganeso, se encuentra entre los elementos que contribuyen a que aumente el tamaño de los granos o dendritas.

Con relación a las muestras sometidas a condiciones diferentes de aplicación de las cargas de impacto generadas por la energía de detonación de una sustancia explosiva, según el diseño del plan experimental; en el análisis metalográfico con microscopía óptica se observa una estructura de austenita en forma de granos deformados (ver a modo de ejemplo las micrografías a y b de la figura 3.15). Según Guliaev (1983), en el proceso de deformación plástica el grano austenítico se deforma, se aplasta, y de equiaxial pasa a tener los ejes desiguales; y lo observado concuerda con este criterio.

La textura de deformación plástica observada como resultado del trabajo de compresión dinámica, se distingue por la presencia de líneas características de los planos de deslizamientos o de los planos de maclas en cada una de las micrografías de las probetas tratadas con explosivos (micrografía de las figuras 3.16, 3.17 y 3.18). La demostración de la ocurrencia de uno u otro mecanismo será abordado más adelante, pero resulta evidente a juzgar por lo que se observa en las micrografías de referencia, que la densidad de defectos que identifican la presencia de uno u otro mecanismo de deformación, es mayor cuanto mayor es el espesor de carga explosiva empleada y mayor el número de impactos al que fue expuesta la muestra.

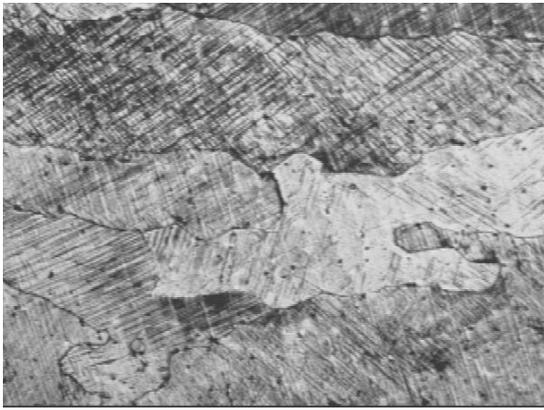


a

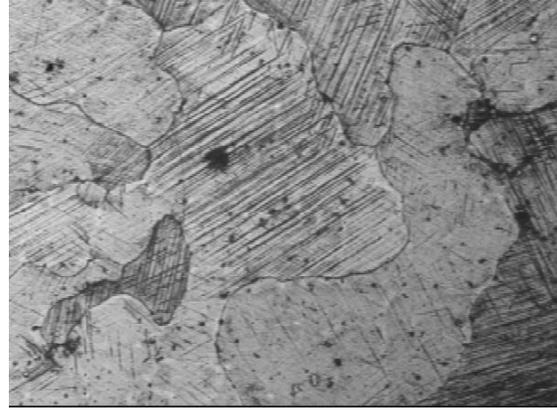


b

Figura 3.14 Micrografías de Probetas Patrón, captadas a 519x.



a



b

Figura 3.15 Micrografías de acero Hadfield deformado por explosivo, captadas a 101x

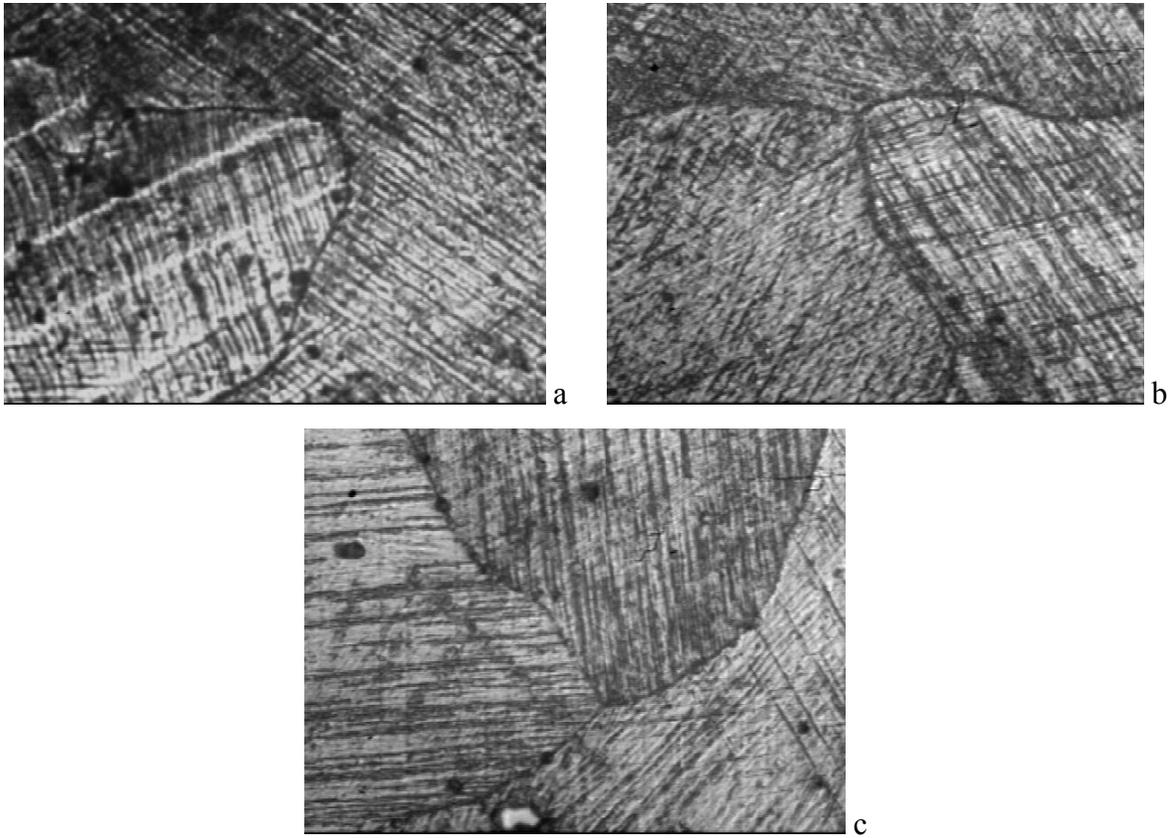


Figura 3.16 Micrografías de muestra de acero Hadfield captadas a 519x, tratadas con 35 mm de espesor de carga explosiva y 3 impactos (a), 2 impactos (b), y 1 impacto (c).

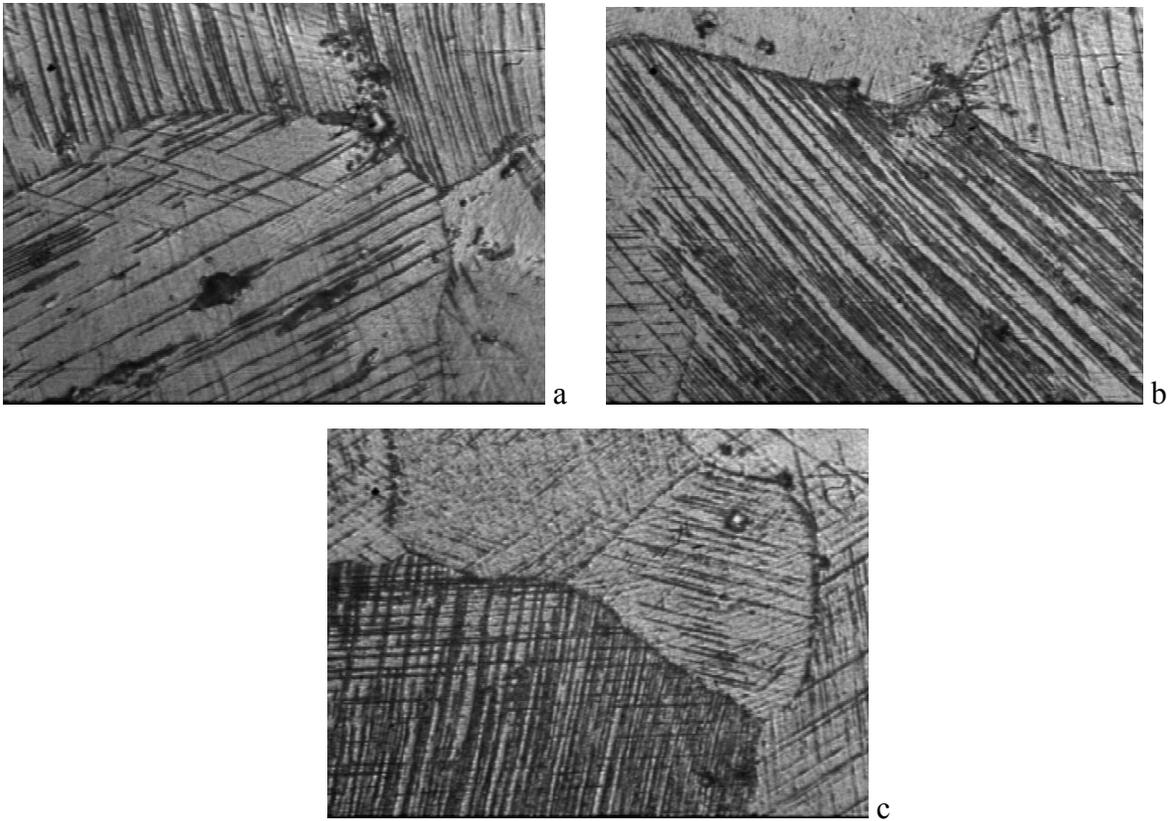


Figura 3.17 Micrografías de muestra de acero Hadfield captadas a 519x, tratadas con 22,5 mm de espesor de carga explosiva y 3 impactos (a), 2 impactos (b), y 1 impacto (c).

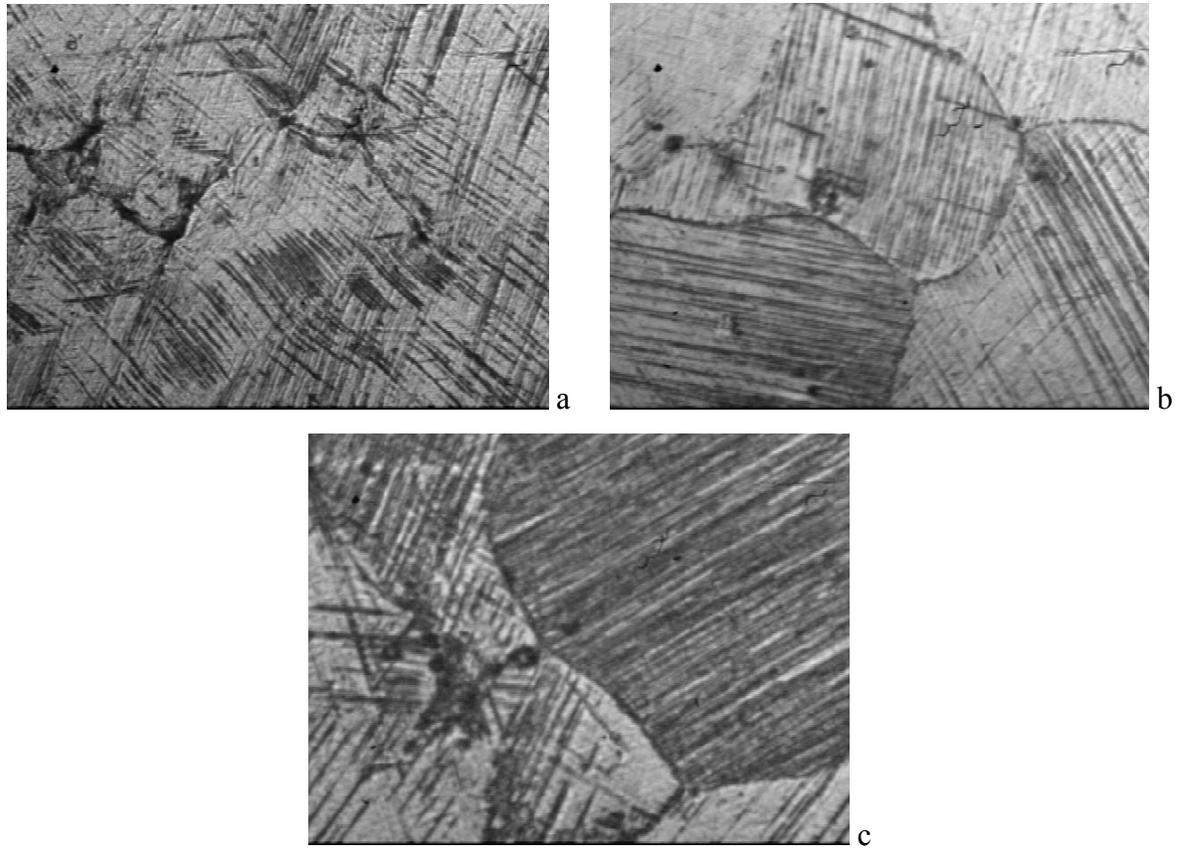


Figura 3.18 Micrografías de muestra de acero Hadfield captadas a 519x, tratadas con 10 mm de espesor de carga explosiva y 3 impactos (a), 2 impactos (b), y 1 impacto (c).

Esto se corresponde con el criterio de que la densidad de los deslizamientos y de las maclas en el acero, crece con el aumento de la presión de las ondas de choque hasta alcanzar aproximadamente 13 GPa (Casals, 1997). La presión de trabajo durante el trabajo experimental osciló entre 4 y 7 GPa.

A partir de la observación de las micrografías de probetas tratadas con explosivos y las probetas patrón que no recibieron tratamiento; no es posible afirmar que bajo la acción de las grandes cargas de choque que impactan la pieza a alta velocidad al detonar la sustancia explosiva, se haya producido la precipitación de fases secundarias sobre todo del tipo carburo en la matriz austenítica. De modo que puede inferirse que el mecanismo de endurecimiento de los aceros austeníticos al manganeso tratados con explosivos no está asociado el endurecimiento por precipitación de fases secundarias.

Utilizando la norma ASTM E – 112 – 88, se determinó que a las probetas tratadas con explosivos le corresponde un tamaño promedio del grano entre 2 y 3. Esta dimensión del grano es aproximadamente la misma para cada una de las probetas que recibieron el efecto de las cargas explosivas, independientemente del número de impactos y el espesor de carga escogidos. Es decir, que se puede considerar que luego del tratamiento con explosivos el tamaño promedio de grano se reduce de 1 a entre 2 y 3 en todas las probetas, cualesquiera fueran las condiciones del experimento; y esta es otra de las causas del incremento de la dureza en el acero Hadfield que recibe la acción de la onda de choque provocada por la detonación de la carga explosiva.

Según Callister (1999), la causa por la que una disminución del tamaño de grano trae como consecuencia un aumento de la dureza se debe a dos factores. El primero es que al disminuir el tamaño aumenta el número de fronteras de grano en una misma área, esto provoca una elevación de las tensiones a nivel cristalino. El otro es que en los metales y aleaciones policristalinas, los bordes de los cristales constituyen un obstáculo ante el que se acumulan las dislocaciones.

En la observación metalográfica con microscopía óptica hasta 519x, no se detecta la presencia de estructuras de tipo martensítico; de modo que tampoco podrá asociarse el mecanismo de endurecimiento mediante explosivos del acero Hadfield, a la formación de estructuras de tipo martensítico.

Los resultados parciales obtenidos del análisis metalográfico, muestran como el posible mecanismo de endurecimiento por acritud durante el proceso de deformación plástica, a los mecanismos de maclado, de deslizamiento o la combinación de ambos mecanismos.

III.3.2. Análisis de difracción por rayos x de las probetas de acero Hadfield.

Los análisis de difracción por rayos x se realizaron a todas las probetas que recibieron los efectos derivados de las diferentes condiciones de aplicación de la energía de detonación de una sustancia explosiva, según el diseño de experimentos; y a las probetas patrón que no recibieron el efecto de las cargas explosivas.

En el anexo 2, se muestran los difractogramas para el análisis cualitativo y los parámetros que les corresponden, resultados del registro de los mismos para la realización del análisis cuantitativo.

III.3.2.1. Análisis cualitativo de la difracción por rayos x.

Se obtuvieron los difractogramas para la caracterización cualitativa de las fases presentes en muestras fundidas de acero Haddfield, con y sin tratamiento por explosivos.

En las figuras 2.1 a 2.10 del anexo 2, se muestran los difractogramas realizados en las condiciones descritas en el epígrafe II.4.3

En el análisis cualitativo de los difractogramas de todas las muestras evaluadas durante la difracción de rayos x, solo se detecta la presencia de una sola red cristalina, la de la austenita, lo cual coincide con la valoración que han hecho otros autores sobre este acero (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 a los índices racionales de Miller son:

- Pico 1 (111): Entre 42° y 44°
- Pico 2 (200): Entre 48° y 50°
- Pico 3 (220): Entre 72° y 74°
- Pico 4 (311): Entre 88° y 90°
- Pico 5 (222): Entre 94° y 96°

Como se puede apreciar en la figura 3.19, los difractogramas correspondientes a todas las muestras tratadas con explosivos (probetas 1 a la 9) y el de la muestra patrón (probeta 30) se superponen unos a otros. Este resultado indica 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.

III.3.2.2. Análisis cuantitativo de la difracción por rayos x.

Para la realización del análisis cuantitativo de la difracción por rayos x, han sido registrados los parámetros correspondientes a los difractogramas de cada una de las muestras tratadas con explosivos; es decir el semiancho físico del pico así como el ángulo de bragg, y la distancia interplanar correspondiente, que permitió obtener los valores de las tensiones residuales de primer género. Los valores de todos estos parámetros resultados del registro del difratograma, se reflejan en las tablas 2.1 y 2.2 del anexo 2.

En los epígrafes III.4.1 y III.4.2, se describen los modelos estadísticos de mínimos cuadrados del comportamiento de la tensión principal normal de primer género y el del semiancho físico del pico.

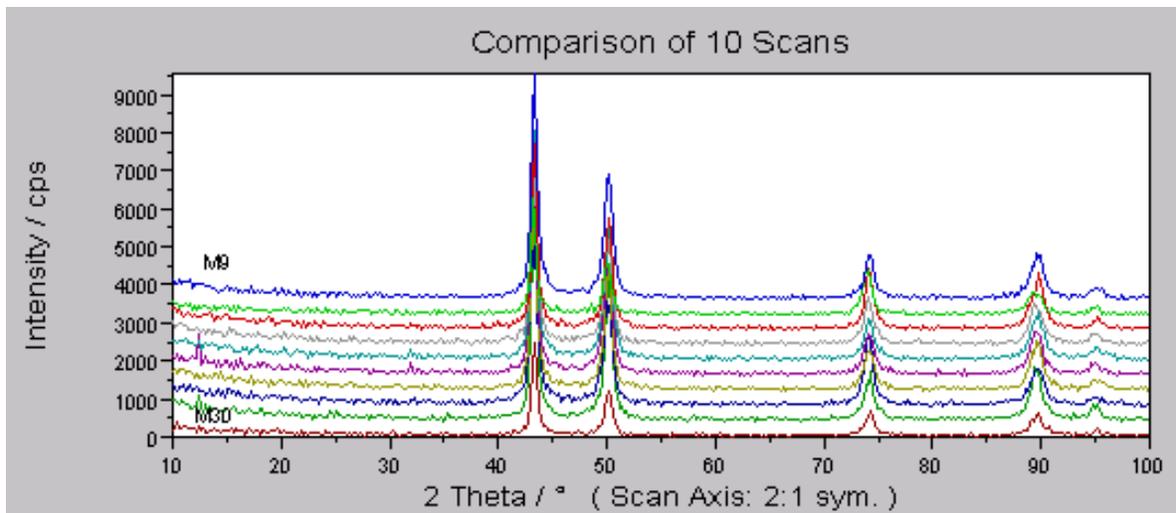


Figura 3.19 Comparación entre los difractogramas de las muestras tratadas con explosivos (Probetas 1 a la 9), y la probeta patrón (Probeta 30).

Con respecto a la tensión tangencial de primer género, se diferencia la magnitud de tensión tangencial para el maclado, y la de tensión tangencial para el deslizamiento, en correspondencia con la utilización de coeficiente de Schmid escogido (ver tabla 3.1).

Tabla 3.1 Tensiones Tangenciales para el maclado y para el deslizamiento

No. Exp.	δ	k	Replica a		Replica b		Replica c	
			$\tau_{des.}$ (MPa)	$\tau_{mac.}$ (MPa)	$\tau_{des.}$ (MPa)	$\tau_{mac.}$ (MPa)	$\tau_{des.}$ (MPa)	$\tau_{mac.}$ (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

La deformación plástica en los metales puede desarrollarse a partir del mecanismo de deslizamiento, a partir del mecanismo de maclado y también de la combinación de ambos mecanismos. El criterio de decisión lo establece el cumplimiento de las desigualdades contenidas en las expresiones 2.15 y 2.16. Se considera el límite de fluencia de cizallamiento igual a 175 MPa (Materiales, 1996, Key to Steel, 2002).

Según los valores determinados de tensión tangencial para el maclado y para el deslizamiento, recogidos en la tabla 3.1, se puede apreciar que el menor valor de tensión tangencial obtenido es de 198,60 MPa (correspondiente a la tensión tangencial para el maclado de la probeta 9a), y dicho valor supera la magnitud límite de fluencia de cizallamiento (175 MPa).

Se puede decir entonces, que el material fluye por deslizamiento y a la vez fluye por maclado; por lo que los granos deformados en realidad poseen una textura de deformación caracterizada por líneas típicas de los planos de deslizamientos y de los planos de maclas, y tal y como se revela en las micrografías de las figuras 3.16, 3.17 y 3.18

Es resumen, en el proceso de deformación plástica de las muestras fundidas de acero Hadfield sometidas a las cargas de impacto que genera la energía de detonación de una sustancia explosiva, se revela la ocurrencia de los mecanismos de deslizamiento y maclado para lograr el endurecimiento del material por acritud.

III.3.3. Fundamentación del mecanismo de endurecimiento del acero Hadfield en presencia de las cargas explosivas.

Teniendo en cuenta los resultados combinados del análisis metalográfico, del análisis de difracción por rayos x, y la evaluación de las regularidades que reflejan los modelos experimentales del comportamiento de las propiedades mecánicas y funcionales del acero Hadfield, en relación con las variables del proceso de experimentación que representan a los parámetros de detonación de la sustancia explosiva empleada como fuente de energía; se explica el mecanismo de endurecimiento de este material en las condiciones descritas.

La metalografía óptica no revela la presencia de la fase martensita en la estructura, lo cual se corrobora con el análisis cualitativo de la difracción por rayos x, dónde solo se confirma la estructura de austenita en el metal fundido. Al no haber sido observadas con las técnicas utilizadas en la investigación, ninguna otra fase en la matriz austenítica ni detectarse que se haya producido la precipitación de fases secundarias sobre todo del tipo carburo; entonces no es posible atribuir el mecanismo de endurecimiento del material a la formación de estructuras de tipo martensítico ni relacionarlo con la aparición de fases precipitadas por comprensión dinámica.

La austenita, única red cristalina detectada en las muestras, es una estructura cúbica centrada en las caras con un 74 % del volumen ocupado por los átomos, en la cual los planos

octaédricos $\{111\}$ y las direcciones $\langle 110 \rangle$ son sistemas compactos (Dieter, 1967). En esta estructura existen cuatro sistemas de planos (111) de densidad atómica predominante, y cada uno contiene tres direcciones $\langle 110 \rangle$, por lo que en total se presentan doce sistemas de deslizamiento. La existencia de suficientes sistemas de deslizamiento en la austenita, garantiza que haya siempre un plano y una dirección con orientación adecuada disponible para que se produzca la micro-deformación plástica.

Fue comprobado a través del análisis metalográfico y de difracción por rayos x, que el incremento de las variables δ y k además de aumentar los niveles de tensiones residuales de primer género, produce un incremento de los defectos de empaquetamiento y favorece la reducción del tamaño de los granos, es decir favorece el endurecimiento por deformación plástica de la matriz austenítica.

Del modelo experimental de mínimos cuadrados se determinó un incremento de la suma de las tensiones principales de primer género (de 872 a 1315 MPa en las probetas del experimento). El incremento de estos valores debido a la deformación de la red (provocados por los esfuerzos de compresión) en la misma medida en que se incrementaba el valor de la presión de detonación y la energía de golpeo acumulada por las probetas, tiene como consecuencia el aumento de la densidad de dislocaciones y el endurecimiento por acritud de las muestras.

La densidad de dislocaciones aumenta en el metal como resultado del trabajo en frío, a través de la multiplicación de las dislocaciones existentes previamente. Según Guliáev (1983), el movimiento de un par de dislocaciones genera el movimiento de centenares y centenares de ellas. Consecuentemente, la distancia promedio de separación entre las dislocaciones disminuye. Este fenómeno provoca el apilamiento de dichos defectos. El aumento de la densidad de dislocaciones resultante frena el movimiento del resto de las dislocaciones. Como resultado del frenaje del movimiento de las dislocaciones, se incrementa la resistencia a su desplazamiento lo que provoca una elevación de las tensiones en el enrejado cristalino.

Para vencer a las fuerzas de repulsión de las dislocaciones de un mismo signo y de los puntos de intersección de las diferentes dislocaciones, se requiere un gasto de energía

complementaria. Por esta razón, es que el aumento del número total de dislocaciones (es decir, el incremento de la densidad de las dislocaciones) a causa de su generación por la fuente de Frank-Read en el proceso de deformación plástica, va acompañado del endurecimiento por deformación.

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

De acuerdo a la bibliografía (Laudon, 1988; Prevey, 1987; Cullity, 1967 y Barret, 1957), en el ensanchamiento de los picos de difracción, influye la reducción del tamaño del grano y el aumento del trabajo de deformación en frío del metal, el cual provoca un aumento de la densidad de dislocaciones, defectos de apilamiento reticular, y un incremento de las tensiones residuales de segundo género. Se ha demostrado que el incremento del semiancho físico del pico, se debe exclusivamente a los defectos que aparecen en la estructura luego de la compresión dinámica, y que se identifican en las micrografías de la tesis mediante las líneas características de los planos de deslizamiento y los planos de maclas.

El incremento de la dureza en las probetas de la tesis (de 270 a 400 HB entre las probetas del experimento, a partir de un valor inicial promedio igual a 190 HB en las probetas patrón), se produce entre otras causas, por la reducción que provoca en el tamaño del grano la acción de las cargas explosivas. Según Callister (1999); Guliáev (1978); Subramanyam et al (1999); y Buraya (2001), los bordes de los granos son una barrera para el desplazamiento de las dislocaciones. Al reducirse el tamaño de grano, aumenta el número de barreras que frenan el desplazamiento de las dislocaciones; esto se debe a que el desorden atómico existente en el borde de grano traerá como resultado una discontinuidad de los planos de deslizamiento de un grano a otro. Es decir, la reducción del tamaño del grano austenítico lo hace más duro y más

resistente debido a que aumenta el área total de fronteras de grano que impiden el movimiento de las dislocaciones (Alfonso, 2002).

Del análisis metalográfico se llega a la conclusión que como consecuencia del trabajo de deformación en frío realizado por la acción de las cargas explosivas, se origina una textura de deformación plástica con la presencia de líneas características de planos de deslizamientos y de los planos de maclas, lo cual se confirma en el análisis cuantitativo de difracción por rayos x, cuando se comprobó que las tensiones tangenciales obtenidas para el deslizamiento y el maclado superan el valor límite de tensión al cizallamiento (198,60 MPa mayor que 175 MPa), con lo cual se puede afirmar que el material fluye por deslizamiento y fluye por maclado en correspondencia con el cumplimiento de las desigualdades contenidas en las expresiones 2.15 y 2.16

El maclaje se produce en las direcciones $\langle 112 \rangle$, sobre la misma familia de planos $\{111\}$, de densidad atómica predominante que ha sido considerado en la deformación por deslizamiento (Dieter, 1967).

El mecanismo de endurecimiento de las muestras fundidas de acero Hadfield, en las condiciones de realización de los experimentos (energía específica de 3×10^6 Nm/kg y presión de detonación entre 4 y 7 GPa), se explica por la ocurrencia de los mecanismos de deslizamiento y maclado; como ha quedado demostrado a través de la observación metalográfica, el análisis de difracción por rayos x y la evaluación de las regularidades del comportamiento mecánico y funcional del material en las condiciones descritas.

La aparición de los planos de deslizamiento y de los planos de maclas en el acero Hadfield tratado con cargas explosivas, estará condicionado por el aumento de las variables asociadas con el estado tensional de la red (tensiones de primer género), 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 la elevación de la microdureza y la macrodureza, de la resistencia al desgaste gravimétrico, del coeficiente de resistencia a la

penetración, del grado de acritud, y del parámetro integrador que refleja la capacidad de endurecimiento del metal.

El mecanismo de endurecimiento no podrá ser atribuido en las condiciones descritas en la tesis; a la formación de estructuras martensíticas inducidas por deformación plástica, ni el envejecimiento provocado por la acción de cargas dinámicas

III.4. Evaluación del comportamiento de piezas fabricados de acero Hadfield endurecidas mediante explosivos.

Martillos

Los martillos de las trituradoras de sínter de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara, fundidos de acero Hadfield en la Empresa Mecánica de Níquel, tienen en condiciones normales de explotación (cuando no están tratados con explosivos) 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.

A consecuencia del tratamiento con explosivos según el procedimiento descrito en el epígrafe II.5 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 alcanzan 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 y estos valores se mantienen durante el resto del tiempo que duró la prueba.

En el período de prueba correspondiente a los meses de Mayo a Julio de 2003, los registros de operaciones de la planta de calcinación y sínter de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara ofrecían el resultado de 853 horas de trabajo con los martillos tratados con explosivos, aún en condiciones adecuadas para continuar su explotación por lo que se decidió mantener el trabajo de los mismos. Hasta ese momento se había prácticamente duplicado el promedio estimado de vida útil de estos artículos.

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 exponer todos los martillos al mismo régimen. La ubicación dentro de la trituradora de cada martillo, fue convenientemente dispuesta de modo que estuvieran uniformemente distribuidos en las seis secciones del equipo, martillos tratados y sin tratar con explosivos.

Se realizaron mediciones periódicas del peso de cada martillo, con el objetivo de determinar el ritmo de desgaste que se produce en condiciones reales de explotación. La figura 3.20 muestra el comportamiento de este indicador.

Interpretando los resultados que se ilustran en la figura 3.20, se puede apreciar que los martillos tratados con explosivos muestran luego de más de 800 horas de trabajo, un desgaste significativamente inferior al promedio de los martillos que no recibieron el tratamiento. El ritmo de desgaste entre los martillos que recibieron tratamiento con explosivos es variado, y se acentúa en la medida que disminuyen los parámetros de detonación de las cargas explosivas aplicadas. El mejor comportamiento corresponde al martillo tratado con el mayor espesor de carga explosiva ($H = 25 \text{ mm}$) y el mayor número de impactos ($k = 1$).

Si se tiene en cuenta solamente un incremento del doble duración en la explotación de estos artículos, solo se requerirán 5 juegos de martillos para una trituradora en un año de trabajo. Con este resultado será posible entonces reducir en la mitad las compras de nuevos martillos, y disminuir los volúmenes de inventario por lo que el costo de la actividad de mantenimiento será menor.

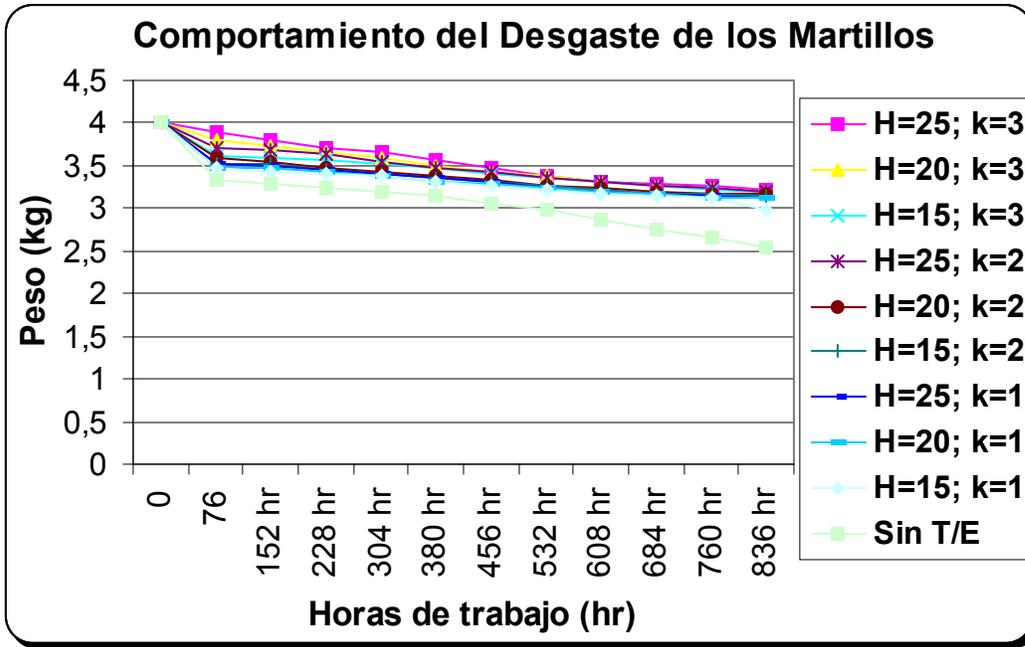


Figura 3.20 Comportamiento del desgaste de los martillos.

Dientes

En el caso de los dientes de las palas excavadoras, a partir 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 no tratados con explosivos se realiza entre los 6 y 8 meses de explotación de los mismos. Entre los dientes más agredidos por el proceso de desgaste están los situados en los bordes de la cuchara.

Cuando no se tratan con explosivos, los dientes de las palas excavadoras entran en funcionamiento con una dureza promedio de 200 HB aproximadamente; y con posterioridad incrementan paulatinamente su dureza hasta alcanzar valores cercanos a los 400 HB, prácticamente al final de su vida útil.

Los dientes endurecidos previamente con explosivos, incrementan su dureza entre 420 y 480 HB; y con posterioridad, realizan su trabajo manteniendo esta dureza promedio según se pudo comprobar en sistemáticas mediciones realizadas a este parámetro durante el período de prueba.

Las pruebas realizadas en la mina de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara, muestran el resultado de la explotación durante 12 meses de varios juegos de dientes tratados con explosivos, en idénticas condiciones de operación que los dientes que no habían sido tratados con explosivos. A partir de este resultado es posible afirmar, que la aplicación del procedimiento tecnológico de endurecimiento mediante una explosión de los dientes, incrementa al doble la durabilidad de los mismos.

III.4.1. Valoración económica, social y ambiental.

El desgaste prematuro de las piezas fabricadas de acero Hadfield empleadas en equipos de laboreo minero incrementa sensiblemente los costos del mantenimiento. Estas piezas se ubican en equipos que son en la mayoría de los casos parte integrante de una planta de proceso. Si el

sistema no está disponible en el momento requerido porque precisa mantenimiento, la planta completa puede pararse e incurrir en costos elevados. Cuando la planta opera a plena capacidad el costo se aproximará al valor de la producción durante el período de tiempo de la parada, más el costo propio de la reparación. Si la operación está por debajo de la plena capacidad, el costo se aproximará al tiempo de trabajo necesario para alcanzar la producción requerida.

Martillos

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 de tiempo 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 2.32 (Cobas, 1997; Palmero, 2000; De la Cruz y Leyva, 2003).

$$Q_{te} = Q_m + Q_{mo} + O_{tg} \quad (3.22)$$

Siendo:

$$Q_{mo} = 1,18 \text{ USD}$$

$$O_{tg} = 0,67 \text{ USD}$$

El costo de materiales (Q_m) lo determina el costo de adquisición del detonador eléctrico y del explosivo, estando en función este último de la masa de sustancia explosiva empleada, que para cada caso se especifica en la tabla 2.6

Para el cálculo del costo del explosivo se considera que los martillos serán tratados con el mayor espesor de carga explosiva ($H = 25 \text{ mm}$) y el mayor número de impactos ($k = 3$).

En estas condiciones, $Q_m = 5,02 \text{ USD}$

El costo del tratamiento con explosivo de un martillo será, $Q_{te} = 6,87 \text{ USD}$ (Palmero, 2000; De la Cruz y Leyva, 2003).

Es decir, el costo unitario de cada martillo será ahora la suma del costo de adquisición más el costo del tratamiento con explosivos, y asciende a la cifra de $31,11 \text{ USD}$. Para una trituradora de 18 martillos será $559,98 \text{ USD}$

La duración promedio de un juego de martillos que han recibido tratamiento con explosivos es superior a las 960 horas, por lo que solo se requerirá el empleo de 5 juegos de martillos en un año, y esto equivale a $2\,799,90 \text{ USD}$.

Con este resultado será posible entonces reducir en 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 $1\,563,30 \text{ USD}$. 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 esfuerzos en el accionamiento electromecánico del equipo.

Desde el punto de vista social y ecológico teniendo en cuenta 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 limpiezas provocados 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, vibraciones y ruidos excesivos de grandes magnitudes, desajuste y falta de hermeticidad.

Dientes

Cada pala excavadora utiliza cuatro dientes que tienen una duración promedio cuando no son tratados con explosivos de seis meses. 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.

Aplicando los procedimientos tecnológicos desarrollados en la tesis, se duplica la durabilidad de los mismos por lo que un juego de dientes dura un año en cada excavadora.

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 según se indica en la tabla 2.6. 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 que 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 mas el costo del tratamiento con explosivos, y asciende a la cifra de 720,19 USD. Para una excavadora de 4 dientes será 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 solo se requerirá el 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 en determinada medida a un mejor aprovechamiento de las posibilidades productivas de las excavadoras. 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, 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.

III.5. Conclusiones del Capítulo III.

1. Se establecen las regularidades del comportamiento mecánico y funcional del acero Hadfield endurecido mediante explosivos. Los modelos experimentales describen la interacción entre las mismas según una ley lineal, y cumplen satisfactoriamente todas pruebas estadísticas para su validación.
2. Los resultados del análisis metalográfico, revelan en las muestras fundidas de acero Hadfield una estructura de austenita con tendencia a formación dendrítica, antes y después del tratamiento con explosivos, lo cual se confirma con el análisis cualitativo de la difracción por rayos x. No se detectó la presencia de estructuras de tipo martensítico ni la aparición de nuevas fases por el trabajo de compresión dinámica, de modo que no se puede atribuir a estas causas el mecanismo de endurecimiento mediante explosivos del acero Hadfield. Se comprobó la reducción del tamaño del grano austenítico.
3. El análisis metalográfico revela las líneas características de los planos de deslizamiento y de los planos de maclas, siendo mayor la densidad de estos cuanto mayor es el espesor de carga explosiva empleada y mayor el número de impactos. Las tensiones tangenciales de primer género para el deslizamiento y el maclado, superan la magnitud de tensión límite al

cizallamiento (198,60 MPa mayor que 175 MPa); lo que demuestra que el material fluye por deslizamiento y a la vez fluye por maclado, y esto confirma el resultado del análisis metalográfico

4. La ocurrencia de los mecanismos de deslizamiento y maclado se produce a consecuencia del tensionamiento de la estructura cristalina de la red, la reducción del tamaño promedio de los granos, y el aumento de la acritud y de los parámetros que caracterizan la capacidad de endurecimiento del material como resultado del trabajo de deformación en frío.
5. El procedimiento tecnológico de endurecimiento mediante explosivos de piezas fabricadas de acero Hadfield, es técnicamente factible y económicamente racional. En un año de trabajo para una sola trituradora, el efecto económico de la aplicación del procedimiento tecnológico de endurecimiento en los martillos es superior a 1 563,30 USD, y para el caso de los dientes de las palas excavadoras rebasa la cifra de 2 719,24 USD en igual período. Desde el punto de vista social y ambiental se contribuye a evitar los riesgos de contaminación sónica y la expulsión a la atmósfera de polvos nocivos a la salud humana

CONCLUSIONES GENERALES

1. Se establecieron las regularidades del comportamiento mecánico y funcional del acero Hadfield endurecido mediante explosivos. Se produce un incremento de las tensiones principales normales de primer género y de la dureza de 872 a 1315 MPa y de 270 a 400 HB respectivamente, y una disminución del desgaste gravimétrico de 0,02524 a 0,00981 g.
2. La observación metalográfica y el análisis de difracción por rayos x, demuestran la ocurrencia de los mecanismos de deslizamiento y maclado (el menor valor de tensión tangencial para el deslizamiento y el maclado, supera la magnitud de tensión límite al cizallamiento). No se detectó la presencia de estructuras de tipo martensítico ni la aparición de fases precipitadas por compresión dinámica.
3. El mecanismo de endurecimiento del acero Hadfield en presencia de cargas explosivas, se fundamenta por el incremento de los defectos de empaquetamiento de acuerdo con los mecanismos de deslizamiento y maclado.
4. La ocurrencia de los mecanismos de deslizamiento y maclado se produce a consecuencia del tensionamiento de la estructura cristalina de la red, la reducción del tamaño promedio de los granos, y el aumento de la acritud y de los parámetros que caracterizan la capacidad de endurecimiento del material como resultado del trabajo de deformación en frío.
5. El procedimiento tecnológico de endurecimiento mediante explosivos, de piezas fabricadas de acero Hadfield que utiliza la industria cubana del níquel, duplica la durabilidad de las mismas con un significativo efecto económico (1 563,30 USD para los martillos de una trituradora de sinter, y 2 719,24 USD para los dientes de una excavadora, en un año de trabajo).

RECOMENDACIONES

1. Aplicar el procedimiento tecnológico descrito en el trabajo, para el endurecimiento mediante explosivos de las piezas fabricados de acero Hadfield.
2. Considerar en futuras investigaciones, la utilización de técnicas de microscopía electrónica de transmisión o de fuerza atómica para la posible detección de la fase martensítica en muestras de acero Hadfield, endurecidas mediante explosivos con presión detonación superior a 7 GPa
3. Utilizar los métodos de investigación empleados en la tesis y la caracterización de los parámetros del proceso de endurecimiento, como referencia en futuros trabajos investigativos.
4. Emplear en la realización de las actividades académicas, los nuevos conocimientos desarrollados en la investigación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ADLER, P H; et al. Strain Hardening of Hadfield Manganese Steel. Metallurgical and Materials Transactions. A. Volume 17 A. October 1986. p 1725
2. AGUILAR, F. Los explosivos y sus aplicaciones. Editorial Labor, S.A. 1978
3. ALFONSO, E; MARTIN, J. Aplicación de la Ley de Wolf – Bragg en la determinación de las tensiones residuales de primer género. Memorias del II Taller Internacional de Didáctica de la Física “DIDACFISU’ 2000”. Universidad de Matanzas “Camilo Cienfuegos”. 2000. 7p. Disponible en la World Wide Web en <http://www.ucbca.edu.bo/institut/cexactas/didacfisus/documentos/ActasHTML/AplicacionDeLaLeyDeWolfBragg.html>
4. ALFONSO, E. Formación de la estructura y propiedades de las capas superficiales de las piezas de acero templado y revenido mediante su elaboración por corte. Tesis en opción al grado de Doctor en Ciencias Técnicas. 199 p. Instituto de Construcción de Maquinarias Químicas. Moscú. 1990
5. ALFONSO, E. et.al., Determinación de las tensiones residuales de primer género en las capas superficiales del acero templado y revenido, tratado por corte, utilizando la difracción por rayos x, La Habana: Fondo Nacional de Manuscritos Científico - Técnicos del CITMA, 1994. 6p
6. ALFONSO, E. et.al., Investigación del mecanismo de formación de la acritud y tensiones residuales en las capas superficiales durante el proceso de corte de piezas endurecidas, p.52-56, Construcción de Maquinarias (Santa Clara). No. 1. Ene-Abr. 1995
7. ALFONSO, E. Apuntes sobre la interrelación composición – microestructura – propiedades del acero. Monografía. ISBN 959-16-0188-3. Universidad de Matanzas. 2002. Disponible en la IntraWeb de la Facultad de Ingenierías Química y Mecánica de la UMCC en <http://lib.fiqm.umcc.cu/download.asp?id=steel/cover.pdf&typ=book>
8. ALFONSO, JR. Estadísticas en las Ciencias Geológicas. Tomo 2. Editorial ISPJAE. 1989.
9. ALVAREZ, E; GONZALEZ, JM. Máquina para el estudio del desgaste abrasivo en pares tribológicos. Construcción de Maquinaria. UCLV. Año 20. N^o2. Mayo-Agosto. 1995. p 69-76.

10. ANDO, F; KIMATA, S; TAKEUCHI, H. Prevention of microfisures in Austenitic Manganese Steel weldment. 1978031.htm. Prevention in Services. Failures in Welded Structures Webb Site. Enero del 2000. Disponible en la World Wide Web.
<http://www.metallography.com/bboard/forum.html>
11. ARZAMAZOV; B. Materials Science. 2 ed. Mir Publishers. Moscow. 1989. 600p
12. ASAMURA, T; USHIODA, K; SENUMA, T; YOSHINAGA, N. Recent progress in physical metallurgy of cold rolled – sheet steel. Algemene Metalurgie. 1998. 10p
13. ASM. ASM Handbook. Volume 9. Atlas of microstructures. The Materials Information Society. ASM International. United States of America. 1992
14. ASM. ASM Handbook. Volume 11. Atlas of phase equilibria in ternary alloys microstructures. The Materials Information Society. ASM International. United States of America. 1992
15. ASM. ASM Handbook. Volume 18. Friction, lubrication and wear technology. The Materials Information Society. ASM International. United States of America. 1992
16. ASM. Aceros al manganeso austeníticos. Aleación de Manganeso. Htm. Junio del 2000. Disponible en el World Wide Web. <http://www.ASM.org>
17. ASTM. Atlas of microstructures. A.S.T.M. Editions . New York . 1988
18. ASTM: A 128 / A 128 M-90. Standard Specification for Steel Casting, Austenitic Manganese. 1990
19. ASTM: G 65-94. Standard Test Method for the Measuring Abrasion using the Dry Sand / Rubber Wheel Apparatus. American Society for Testing and Materials. Reprinted from the Annual Book of ASTM Standard. Philadelphia. USA. 1994. 11 p.
20. ASTM: E 407-70.
21. ASTM: E 3-80.
22. ASTM: E 112-88.
23. AUSTENITE. Austenite Single Variant of Martensite Microstructure.htm. 2000. Disponible en la World Wide Web. <http://www.alloysteeltchnology.com/index.html>
24. AVNER, Sidney. Introducción a la metalurgia física. Editorial Ciencia y Técnica. Instituto del libro. La Habana. 1985. p 288 – 289
25. BARINOV, N; LANDA, A. Metalurgia y metalografía. 1 ed. Editorial MIR. Moscú. 1976. p 149 – 150

26. BARRET, C. Estructura de los metales. 1 ed. Editorial Aguilar. Madrid. 1957. 838p
27. BAYOUMI, M R; ABD EL LATIF, A K. Characterization of cyclic plastic bending of austenitic AISI 304 stainless steel. Engineering Fracture Mechanics. Great Britain. 51 (6). 1995
28. BELYASHIN, P.A; MOTUS, E.P; TARLINSKY, V.D. Increase in weldability of High Manganese cast Steel. Khimicheshoci Neftyanoe Mashinostroiie. Moscú. Marzo 1990. p 23 - 25
29. BILMES, P.D. Microscopia óptica y electrónica de aceros al carbono. Monografía. La Habana. 2001.
30. BORTONI, O; TIMERMAN, R; ROSAS, E. Recuperación de componentes desgastados mediante procesos de soldadura por arco, automático y semiautomático. Latin American Welding Congress. Vol 2. Río de Janeiro. Brasil, abril 1992. p 1355 – 1371
31. BRONSHTEIN, I; SEMENDIAEV, K. Manual de Matemáticas para ingenieros y estudiantes. Editorial Mir. Moscú. 4ta Ed. 1982
32. BURAYA, D. Cristal Structure Analysis. Department of Metallurgical and Materials Engineering. Materials Science and Engineering (3 – 0) 3. Febrero de 2001. Disponible en la World Wide Web. <http://euclid.ii.metu.edu.tr/~mete222/index.htm>
33. CAIAN, Q. Prediction of the nitrogen solubility in liquid Fe – Cr – Mn alloys. Dept. of Physical Metallurgy and Ceramics. Royal Institute of Technology. Stockholm. Sweden. Reprinted of Scandinavian Journal of Metallurgy. Printed in Denmark. 1997. 5 p
34. CALLISTER, W. Materials Science and Engineering. An Introduction. Fifth Edition. Department of Metallurgical Engineering. University of Utah. John Wiley & Sons, Inc., 1999. 8195 pp. ISBN 0-471-32013-7
35. CARABALLO, M. A.; et al. Aplicaciones industriales del uso de los explosivos en el trabajo con los metales. CD Rom de las memorias del III Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica. La Habana. 1997
36. CARABALLO, M. A.; et al. Recuperación de equipos y piezas por la tecnología de conformación y soldadura por explosivos. Revista Minería y Geología. Vol XIV, No 2. 1997

37. CARABALLO, M. A. Investigación sobre el endurecimiento mediante explosivos, del acero al manganeso empleado en los equipos de laboreo minero. Tesis en opción al título de Master. ISMMMoa. Facultad de Metalurgia y Electromecánica. 1999
38. CARABALLO, M. A. Investigación sobre el endurecimiento mediante explosivos del acero al manganeso. CDRom de las memorias del II Congreso Cubano de Ingeniería Mecánica CCIM'2000 (ISBN 959-261-010-X). 12 p
39. CARABALLO, M. A. Comportamiento de piezas de acero Hadfield endurecidas mediante explosivos. Revista Minería y Geología. Volumen XX. No. 1. 2004
40. CARABALLO, M. A. Comportamiento físico del acero Hadfield, en presencia de cargas explosivas. Revista Minería y Geología. Volumen XX. No. 2. 2004
41. CARABALLO, M. A. Investigación sobre el endurecimiento mediante explosivos del acero al manganeso. ISMM Moa. CDRom de las memorias del Evento científico CINAREM'2004 (ISBN 959-16-0258-4). 9 p
42. CASALS, B. Soldadura y embutición por explosión del titanio con el acero 20K para la fabricación de recipientes a presión. Tesis en opción al grado de Doctos en Ciencias Técnicas. ISMMMoa. Facultad de Metalurgia y Electromecánica. 1997
43. CHEN, Z; et al. Yield surfaces of fcc crystals with crystallographic slip and mechanical twinning. Transactions of Nonferrous Metals Society of China. Vol.10. No.1. P.34-39. 2000. Disponible en la World Wide Web
<http://www.chinainfo.gov.cn/periodical/index.htm>
44. CHU, JP; et al. Effects of Laser-Shock Processing on the Microstructure and Surface Mechanical Properties of Hadfield Manganese Steel. Metallurgicals and Materials Transaction. A. Volume 26 A. June 1995. Disponible en la World Wide Web
<http://www.tms.org/pubs/journals/MT/MT.html>
45. CHUMLYAKOV, Y.I; et al. The orientational dependence of critical shear stresses in single crystal of high strength austenitic steel. Doklady Physics. Vol. 42. N°1. 1997. p 18 - 21.
46. CHUMLYAKOV, Y.I; et al. Plastic deformation in single crystal of Hadfield Steel. Physiscs - Doklady. Vol. 43. N°7. 1998. p 415 - 418.
47. C.I.M.E. Grupo Nacional para la Recuperación de Piezas. Manual de recuperación de piezas – 1 ed -. C.I.M.E. La Habana. 1993

48. CLARK, D; VARNEY, W. Physical metallurgy for engineers. 1 ed. D.Van Nostrand Company Inc. New York 1963. p 228 – 229
49. COBAS, N. Endurecimiento del acero Hadfield por el método de explosivos. Trabajo de Diploma. ISMMMoa. Facultad de Metalurgia y Electromecánica. 1997
50. CULLITY, B D. Elements of X – Ray Diffraction. Department of Metallurgical Engineering and Materials Science. University of Notre Dame. Instituto Cubano del Libro. Ediciones Revolucionarias. La Habana. 1967. 514p
51. DE LA CRUZ, C; LEYVA B. Investigación sobre el endurecimiento del acero al alto manganeso (Hadfield), mediante explosivos. Trabajo de Diploma. ISMMMoa. Facultad de Metalurgia y Electromecánica. 2003
52. DEPARTAMENTO TÉCNICO DE FUNDICIÓN. Especificaciones Técnicas para la fundición de aceros al manganeso Mn 130 para fundición de piezas. Boletín Tecnológico No. 1. Empresa Mecánica del Níquel. 2003
53. DESFORGES, C; DUCKWORTH, W; RYAN, J. Manganese in Iron and Steel Metallurgy. Manganese Centre. París. 1989. 20 p
54. DIETER, G. Metalurgia Mecánica. MacGraw-Hill Book Company, Inc. 1967
55. DONG, S; et al. Study on Effect of Impacting Velocity of Alundum Particle to Erosion Behaviors of High Manganese Steel. Journal of Xi'an Jiaotong University. Vol.32 No.6. 1998. China. Disponible en la World Wide Web
<http://www.xjtu.edu.cn/xjnet/xb/zrb/zhong.html>
56. DRURY, F.C.; WESTMAAS, D.J. Considerations Affecting the selection and use of modern chemical explosives. SEE. 1980
57. ELGUN, S. 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>
58. FUCHENG, Z; TINGQUAN, L. A study of friction – induced martensitic transformation for austenitic manganese steel. Wear, Vol: 212, Issue: 2, pp. 195 – 198. December 10, 1997. Science Server Logo Web Site. Enero del 2000. Disponible en la World Wide Web. <http://www.metallography.com/bboard/forum.html>
59. GULIAEV, A. Metalografía. Tomo I. Moscú. Editorial Mir. 1983
60. GULIAEV, A. Metalografía. Tomo II. Moscú. Editorial Mir. 1983

61. HALL, J.F; et al. Measurement of Residual Stresses in Alloy 600 pressurizer penetrations. Conference on the contribution of materials investigation to the resolution of problem encountered in pressurized water reactors. September 1994. p 12–16. 2002. Disponible en la World Wide Web <http://www.lambda-research.com/212.pdf>
62. HALL, J.F; et al. XRD residual stress measurements on alloy 600 pressurizer heater sleeve mockups. Proceedings of the sixth International Symposium of Enviromental Degradations of materials in Nuclear Power Systems – Water Reactors. San Diego. CA. 1993. p 855 – 861. 2002. Disponible en la World Wide Web <http://www.lambda-research.com/211.pdf>
63. HALE, R. Behavior and manufacturing properties of materials. 2001. Disponible en la Worl Wide Web <http://www.engr.ukans.edu/~rhale/>
64. HERRERA, E; GALLARDO, J. Algunos casos prácticos de fallos metálicos relacionados con el desgaste. Revista de Metalurgia CENIM. Madrid, 22 (4), 1986
65. ICDD. Powder Diffraction Files (PDF). International Center for Diffraction Data (ICDD). 2000
66. JURAN, J.M.; GRZYNA, F.M. Manual de control de calidad. Editorial McGraw-Hill. 1993
67. KATARZYŃSKI, S; et al. Badanie własności mechanicznych metali. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne Warszawa. Poland. 1969
68. KEY TO STEEL. Influence of Alloying Elements on Steel Microstructure. Key to Steel Web Site. 2002. Disponible en la World Wide Web en <http://www.key-to-steel.com/>
69. KEY TO STEEL. Fracture Toughness. Key to Steel Web Site. 2002. Disponible en la World Wide Web en <http://www.key-to-steel.com/>
70. KOZLOV, Y. Ciencia de los Materiales. 1 ed. Editorial MIR. Moscú. 1986. p 76 – 78
71. KRAWITZ, A. Stress measurement. 2002. Disponible en la World Wide Web en http://www.chemistry.gatech.edu/faculty/wilkinson/MSE3010_notes/slides/Stressmeasurement6up.pdf
72. KUZMIN, B; SAMOJOSTKI, A. Metalurgia Metalografía y materiales de construcción. 1 ed. Editorial MIR. Moscú. 1984. p 188 – 189.

73. LAJTIN, Y. Metalografía y tratamiento térmico de los metales. 1 ed. Editorial MIR. Moscú. 1973. p 359 – 360.
74. LALONDE, D. Austenitic Manganese Steel. 508.htm. Expert Metallography Forum Webb Site. 1997. <http://www.metallography.com/bboard/forum.html>
75. LALONDE, D. Presence of carbides Austenitic Manganese Steel. 849.htm. Expert Metallography Forum Webb Site. 1998. <http://www.metallography.com/bboard/forum.html>
76. LALONDE, D. Austenitic Manganese Steel. Manganese Steel. htm. Página Webb. 2000. <http://mypage.direct.ca/s/sdl//>
77. LAMBERTS, R. Modelación del comportamiento del acero al alto manganeso en presencia de cargas explosivas aplicando el Método de los Elementos Finitos. Trabajo de Diploma. ISMMMoA. Facultad de Metalurgia y Electromecánica. 2003
78. LAMBDA RESEARCH. The effect of prior cold working on the development of tensile residual stress following bulk deformation. Diffraction Notes. N°28. Winter 2002. Disponible en la World Wide Web <http://www.lambda-research.com/dn28.pdf>
79. LARMI, J. About the Alpha Martensite and Md30-Temperatures in Austenitic Steels.htm. 2000. Disponible en la World Wide Web <http://www.geocities.com/CapeCanaveral/Lab/7492/index.htm>
80. LAUDON, D: Estudio de los métodos de determinación del ancho de la línea en el difractograma. Folleto. Departamento de Física. Universidad de Matanzas. 1988
81. LECTURES NOTES. The Structure of Imperfects Solids. Department of Metallurgical and Materials Engineering. Materials Science and Engineering (3 – 0) 3. 2001. Disponible en la World Wide Web. <http://euclid.ii.metu.edu.tr/~mete222/index.htm>
82. LEGRA, A. Software Tierra ©. Versión 2.5B. 2004
83. MANGANESE CENTRE. Manganese in powder metallurgy alloys. Manganese Centre. Paris. 1998. 53 p
84. MARIÑO, M. Estudio del deterioro por abrasión e impacto de los martillos de las trituradoras de mandíbula, fabricados de acero hadfield. Tesis en opción al título de Master. ISMMMoA. Facultad de Metalurgia y Electromecánica. 2000.
85. MARTÍNEZ, F; GOYOS, L. Aleaciones austeníticas resistentes al desgaste y esfuerzos de impacto. Construcción de Maquinaria. UCLV. Villa Clara. Cuba. 1989.

86. MARTINEZ, F; MARTINEZ, H. Adaptación de máquinas pulidoras para ensayos de desgaste abrasivo. Revista Construcción de Maquinaria. N^o1. 1981. p 47-55.
87. MARTÍNEZ, F. Influencia de la estructura metalográfica del acero 65 Γ sobre la resistencia al desgaste abrasivo. Revista Construcción de Maquinaria N^o 2. 1981. p 23-35
88. MAST HOME PAGE. Scientific Principles. Metals Tables Contents. 2001. Disponible en la World Wide Web <http://matse1.mse.uiuc.edu/~tw/home.html>
89. MATA, M; et al. Ecuaciones de dureza para la caracterización de metales mediante indentación puntiaguda. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona. 2002. Disponible en la World Wide Web http://www.upv.es/pms2002/Comunicaciones/105_MATA.PDF
90. MATERIALES. Bohler special steel manual for PC. Version 1.1. 1996
91. MERIÑO, G. Conformación, soldadura y endurecimiento de metales con explosivos. Reporte de aplicación. Cenic. La Habana. 1977
92. MOHANTY, B. Energy, Strength and Performance and their implications in Rating Commercial Explosives. SEE. 1981
93. MOROZOVSHAYA, E N. Sobre la prevención del agrietamiento durante el rellenado de aceros del tipo Γ13 sobre aceros al carbono. Revista Automatichevskaya Svarka. Número 12. 1963
94. NC 04-10: 72. Norma Cubana. Ensayos de dureza Brinell en materiales metálicos. Comité Estatal de Normalización. La Habana. 1972.
95. NC 04-11: 72. Norma Cubana. Ensayos de dureza Vickers en materiales metálicos. Comité Estatal de Normalización. La Habana. 1972.
96. NC 04-79: 87. Norma Cubana. Ensayos de desgaste abrasivo en aceros. Comité Estatal de Normalización. La Habana. 1987.
97. ODA, K; FUJIMURA, H; INO, H. Local interactions in carbon – carbon an carbon – M (M: Al, Mn, Ni) atomics pairs in fcc γ - iron. Department of Materials, Faculty of Engineering, University of Tokio. Japan. Reprinted of IOP Publishing. Printed in the UK. 1997. 9 p
98. OGEL, B. Efecto de una austenización doble sobre la microestructura y la tenacidad a la rotura del acero ASM A - 128. Revista Steel Research. Great Britain: N 69. (6) 1998

99. OTAÑO, N. J. Fragmentación de rocas con explosivos. Editorial Félix Varela. La Habana. 1998
100. PALMERO, A. 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. ISMMMoA. Facultad de Metalurgia y Electromecánica. 2000
101. PARODY, G. Investigación sobre el endurecimiento del acero Hadfield por el método de explosivos. ISMMMoA. Facultad de Metalurgia y Electromecánica. 1995.
102. PERMANA, M. S; SURATMAN, R. Effect of solution treatment on Hadfield's Steel Microstructures. University of Pasundan. West Java. Indonesia. 2001. Disponible en la World Wide Web http://www.maxpages.com/msper2000/A1_Alloy
103. PERNIA, JM; et al. Manual de perforación y voladura de rocas. IGME. Madrid. 1988
104. PICKERING, F B. Proceedings of High Manganese Steel, ASTM A 128 AB. Edited by Foct and A. Hendry, Institute of Metals. 1996. 34 p
105. PREVEY, P. X Rays Difraccion Residual Stress Techniques. Metals Handbook. ASM Handbook. p 380 – 392. 1988. Consultada en Mayo de 2003. Disponible en la World Wide Web <http://www.lambda-research.com/200.pdf>
106. PREVEY, P. X Rays Difraccion Characterization of Residual Stresses produced by Shot Peening. Shot Peening Theory and Application. p 81 – 93. 1990. Consultada en Mayo de 2003. Disponible en la World Wide Web <http://www.lambda-research.com/202.pdf>
107. PREVEY, PAUL. The measurement of subsurface residual stresses and cold work distributions in nickel base alloys. Residual Stress in desingn. Process and Materials Selection. ASM. p 11 – 19. 1987. Consultada en Mayo de 2003. Disponible en la World Wide Web <http://www.lambda-research.com/204.pdf>
108. RAYNOR, G.V; RYVLIN, V.G. Phase Equilibria in iron ternary alloys. 1 ed. The Institute of Metals. North American Publications Center. U.S.A. 1988. 485 p.
109. REYNOLDS, W. Austenitic Manganese Steel, ASTM composition E – 1. 2733. htm. Expert Metallography Forum Webb Site. 2000. Disponible en el World Wide Web. <http://www.metallography.com/bboard/forum.html>

110. Resolución Económica del V Congreso del PCC. La Habana: DOR del CC del PCC, 1997
111. RODRÍGUEZ, Y. N. 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. ISMM. Moa. 1998. 50 p
112. SAMANS, C. Engineering Metals and their alloys – 1 ed -. The Mac Millan Company. New York. 1950. p 714 – 715
113. SAKWA, W; et al. Opracowanie staliwa na opancersenia młynów wentylatorowych i innych elementów podlegających zużyciu erozyjnemu. Instytut Odlewnictwa Politechniki Śląskiej w Gliwicach. Poland. 1984
114. SARKAR, A.D. Friction and wear. Academic Press Inc. (London) LTD. London. 1980. 423 p
115. SOUTHWELL, G; YOUNG, D. Sulfidation Behavior of a Binary Fe-Mn Alloy. Department of Industrial Chemistry, University of New South Wales. Kensington. Australia. Reprinted from Oxidation of Metals. Vol.34. N° 3 and 4. 1990. 12 p
116. SPEIDEL, MO. Proceedings of austenitic manganese steel. Iron and Steel Institute of Japan. Chiba. Japan. Reprint. 1998. 27 p
117. SUBRAMANYAN, D K; et al. Austenitic Manganese Steel. ASTM. Specialty Steel and Heat Resistant Alloys. ASTM Handbook. USA. 1999. pag 822-840
118. TOKONAMI, M; OTSUKA, K. Cristal structure analysis of Fe-C-Mn martensite using conventional X- Rays and Synchrotron Radiations. Institute of Materials Science , University of Tsukuba. Japan. Reprinted of Metallurgical Transactions. Volume 23. 1990. 10 p
119. TORRES, E. 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”. 2002.
120. ULAEX. Accesorios para voladuras. 2000
121. UMESH, S. Austenitic Manganese Steel. 844.htm. Expert Metallography Forum Webb Site. 1997. <http://www.metallography.com/bboard/forum.html>

122. VANDER VOORT, G. ASTM Committee E-4 and grain size measurements. ASTM Committee E-4. Publicado en la www en 2001. Disponible en la World Wide Web. <http://metallography.aasp.net/bboard/faq.html>
123. VARELA, A. Presentación de Metalurgia Física II. Acero Hadfield. Octubre de 2003. Disponible en el World Wide Web. <http://www.metallography.com/bboard/forum.html>
124. VILLCA, G. Mejoramiento de la calidad de las bolas de molino fundidas en Comibol por tratamiento térmico. Revista Metalúrgica. N 11. Colombia. Febrero. 1992. 22 p
125. WHITE, A. Engineering Materials – 1 ed -. MacGraw Hill Book Company. New York. 1948. pag 198 – 202
126. WILSON, F G; KNOTT, B R. Comparison between P/M and Conventional Manganese Steel. International Journal of Powder Metallurgy and Powder Technology. Reprint. 1996. 7 p
127. YAKIMOV, A; KRASIKOV, K. Reasons and features of high temperatures breakdown of steel 110Г13L in welding. Svarochnoe Proizvodstvo. Moscú. Septiembre de 1990. pag 12 – 13
128. YUN HUA, X; et al. Mechanism of Hadfield Steel under high energy impact. Laboratory of Materials Strength of Xian Jiaotong University. Hot Working Technology. N° 1. P 10. 2000. Disponible en la World Wide Web <http://www.xjtu.edu.cn/xjnet/xb/zrb/xb07/xb86e.html>
129. XIAOYAN, Z; YUJIAO, L. Effect of chromium on phase structure of austenite manganese steel. Department of Mechanical Engineering, GUT, Guiyang 550003. Página Webb. Enero del 2001. Disponible en la World Wide Web <http://power.luneng.com/power/library/gtyjxb/gtyj99/gtyj9903/990310.htm>
130. XIE, J; ZHU, Y. Observation of medium manganese steel during TEM in-situ tension. Luoyang Institute of Technology, Luoyang 471039, China. Journal of Chinese Electron Microscopy Society. Vol 18 No.5 1999. Disponible en la World Wide Web <http://www.xjtu.edu.cn/xjnet/xb/zrb/xb07/xb86e.html>
131. X RAYS DIFFRACTION. Application note 202. Parallel beam X Ray Diffraction Geometry for stress and texture Analysis. X Rays Optical System. Inc. Albany New York. 1999. Disponible en la World Wide Web en <http://www.xrayoptics.com/appnotes/app202.pdf>

132. ZAKHAROVA, E. G; et al. Deformation Mechanisms and Strain Hardening of Hadfield-Steel Single Crystals Alloyed with Aluminum. Doklady Physics. Julio 2002. Vol. 47 Issue 7. p515, 3p.
133. ZEEMAUN, A; et al. Estudio del desgaste en componentes y piezas de acero austenítico al manganeso. Latin American Welding Congress. Vol 2. Río de Janeiro. Brasil, Abril 1992. p 545 – 570
134. ZELDOVICH, Ya B.; RAIZER, Yu. P. Fizika udarnix voln i visokotemperatumix gidrodinamicheskix yavlenii. M., Nauka, 1966. p 686
135. ZUIDEMA, B K; et al. The effect of Aluminium on the work Hardening and Wear Resistance of Hadfield Manganese Steel. Metallurgicals and Materials Transaction. A. Volume 18 A. September 1987. p 1629

LISTADO DE SÍMBOLOS.

Vd:	Velocidad de detonación [Nm]
Pd:	Presión de detonación [MPa]
Ee:	Energía específica en relación a masa de explosivo [Nm/kg]
ρ :	Densidad del explosivo [kg/m ³]
Pe:	Presión termoquímica o presión de trabajo [MPa]
δ :	Espesor de la carga explosiva [mm]
k:	Número de impactos que recibe la probeta
Egu:	Energía de golpeo unitaria [Nm]
m:	Masa de sustancia explosiva [kg]
V:	Volumen de sustancia explosiva [m ³]
Vpro:	Volumen de la probeta [m ³]
Ega:	Energía de golpeo acumulada [Nm]
σ 1ºgen :	Suma de las tensiones normales principales de primer género [MPa]
m_{ks}^s :	Coefficiente de Schmid para el deslizamiento en cuerpos policristalinos.
τ_{cs} :	Tensión tangencial de deslizamiento de primer género [MPa]
m_{kt}^s :	Coefficiente de Schmid para el deslizamiento en cuerpos policristalinos
τ_{ct} :	Tensión tangencial de maclado de primer género [MPa]
c:	Coefficiente de resistencia del metal a la penetración
n:	Coefficiente de endurecimiento por deformación
N:	Grado de acritud
Ce:	Capacidad de endurecimiento
Ce(n):	Capacidad de endurecimiento (normalizada)
PP:	Desgaste abrasivo gravimétrico (g)
H:	Altura de la carga explosiva [mm]
HB:	Macro dureza
HV:	Micro dureza en profundidad
Wl :	Semiancho físico del pico
Qte:	Costo del tratamiento con explosivos
Qm:	Costo de materiales
Qmo:	Costo de la mano de obra
Otg:	Otros gastos

PRODUCCIÓN CIENTÍFICA DEL AUTOR RELACIONADA CON LA TESIS DOCTORAL

Ponencias presentadas en Eventos Científicos:

1. Aplicaciones industriales de los explosivos en el trabajo de los metales. (CIDIM'97)
2. Investigación sobre el endurecimiento mediante explosivos del acero al manganeso. (EXPLO'99)
3. Investigación sobre el endurecimiento mediante explosivos del acero al manganeso. (CCIM'2000)
4. Mejoramiento de la calidad de equipos y accesorios de laboreo minero, mediante el endurecimiento por explosivos del acero Hadfield. (CINAREM'2000)
5. Mejoramiento de la calidad del acero al alto manganeso (Hadfield), mediante el endurecimiento por explosivos. (COBIM'2001)
6. Mejoramiento de la calidad de equipos y accesorios de laboreo minero, mediante el endurecimiento por explosivos del acero al alto manganeso. (Taller Materiales'2003)
7. Investigación sobre el endurecimiento mediante explosivos del acero al manganeso. (CINAREM'2004)

Publicaciones de Ponencias presentadas en Eventos científicos:

1. Aplicaciones industriales de los explosivos en el trabajo de los metales. (CIDIM'97)
2. Investigación sobre el endurecimiento mediante explosivos del acero al manganeso. (CCIM'2000)(ISBN 959-261-010-X)
3. Investigación sobre el endurecimiento mediante explosivos del acero al manganeso. (CINAREM'2004) (ISBN 959-16-0258-4)

Publicaciones en Revistas Científicas:

1. Recuperación de equipos y piezas por la tecnología de conformación y soldadura por explosivos. (Revista Minería y Geología, Vol XIV, No 2, 1997)
2. Comportamiento de piezas de acero Hadfield endurecidas mediante explosivos. (Revista Minería y Geología; Volumen XX; No. 1; 2004)
3. Comportamiento físico del acero Hadfield, en presencia de cargas explosivas. (Revista Minería y Geología; Volumen XX; No. 2; 2004)

ANEXOS

Anexo 1

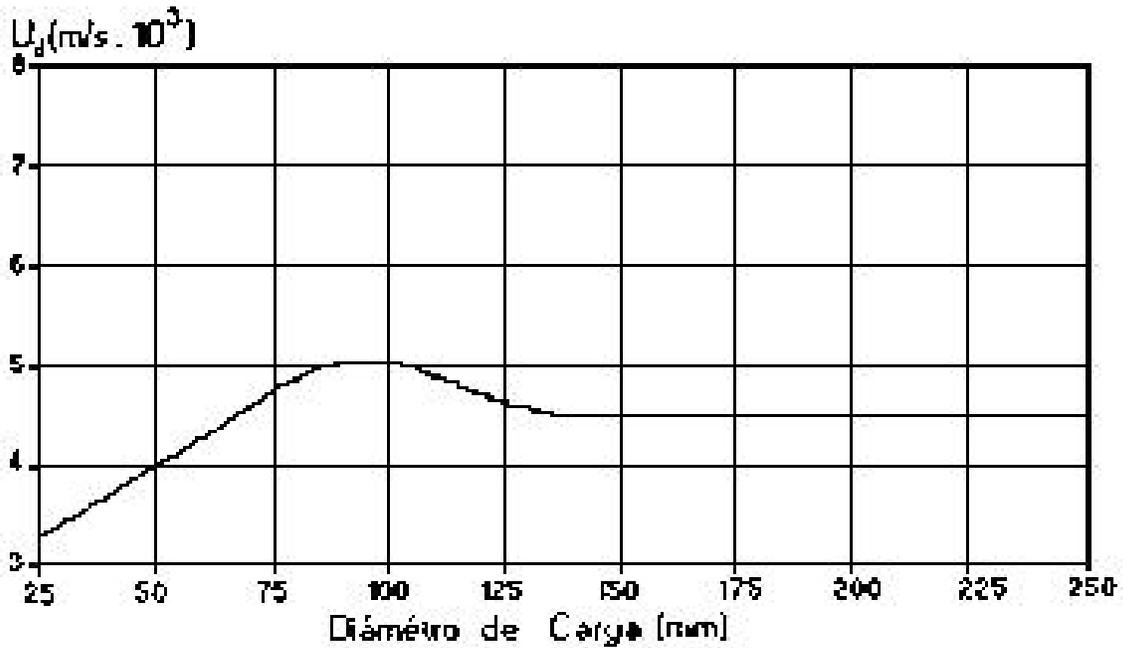


Figura 1. Gráfico del comportamiento de la velocidad de detonación (V_d) vs diámetro (δ), para cargas cilíndricas.

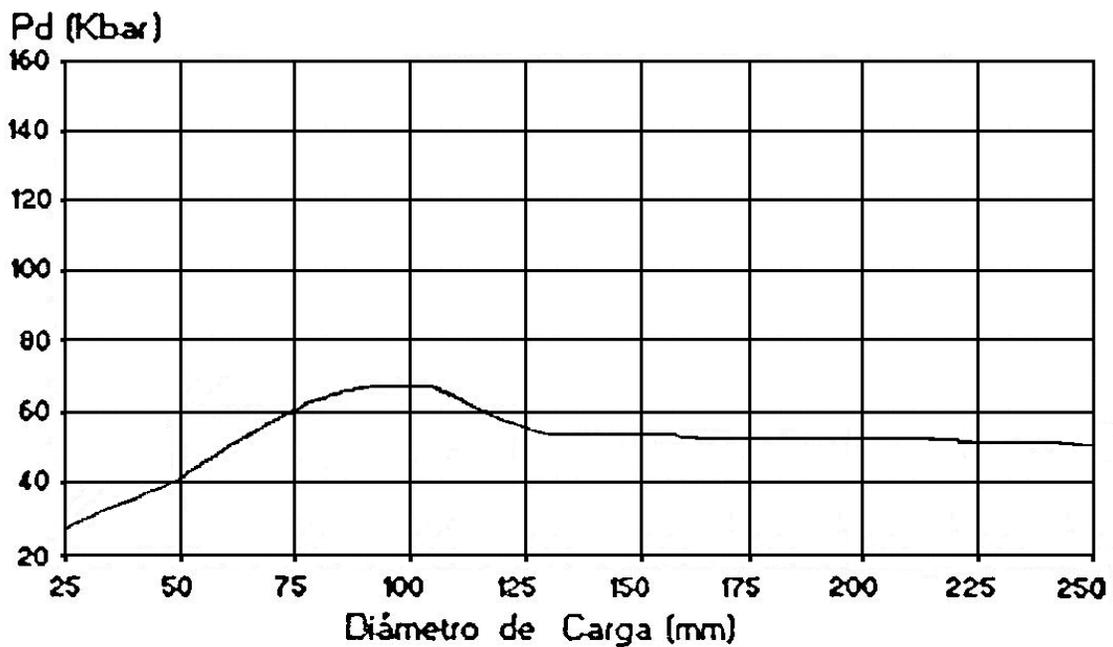


Figura 2. Gráfico del comportamiento de la presión de detonación (P_d) vs diámetro (δ), para cargas cilíndricas.

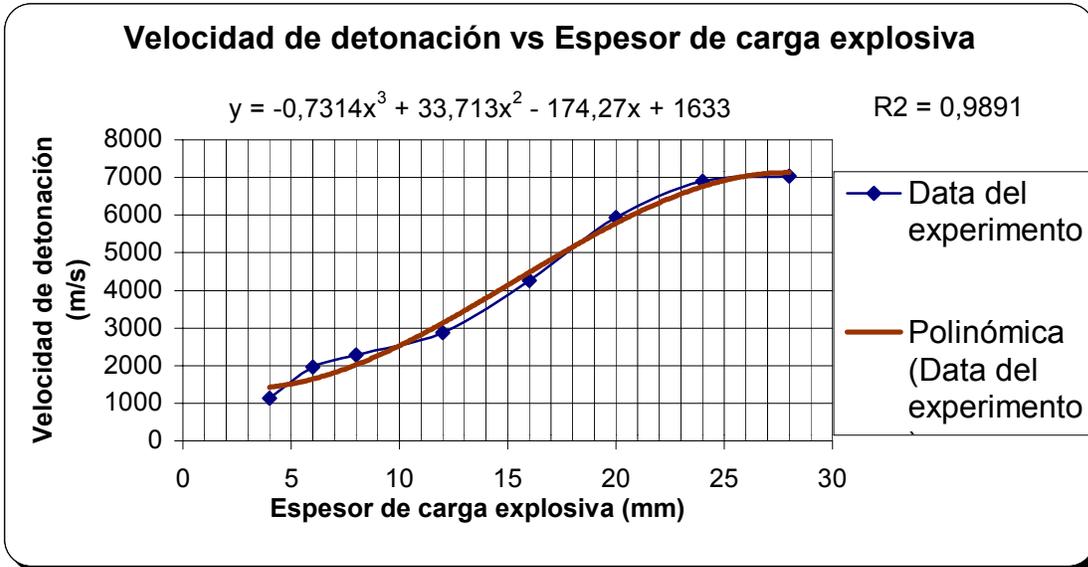


Figura 3. Gráfico del comportamiento de la velocidad de detonación (Vd) vs altura (H), para cargas planas

Anexo 2

Tabla 2.1. Resultados de la determinación (promedio de las 10 mediciones) del Semiancho del pico (220), obtenidos de los difractogramas en cada una de la réplicas de cada experimento.

No. Exp.	δ	k	WI(a)	WI(b)	WI(c)	WIprom
1	100	3	1,1919	1,2477	1,1165	1,1853
2	75	3	1,0535	1,0283	1,0834	1,0550
3	50	3	1,0446	1,0203	0,9317	0,9988
4	100	2	0,8688	1,0094	0,9197	0,9326
5	75	2	0,8665	0,9977	0,9077	0,9239
6	50	2	0,8303	0,9306	0,8983	0,8864
7	100	1	0,8142	0,9227	0,8944	0,8771
8	75	1	0,7713	0,8718	0,8769	0,8400
9	50	1	0,7216	0,8582	0,8403	0,8067

Tabla 2.2. Resultados de la determinación de la suma de las tensiones normales de primer género, y las tensiones tangenciales asociadas a estas; obtenidos en el pico (220) de los difractogramas en cada una de la réplicas de cada experimento

Corrida a

No. Probeta Experimento	2 θ (°)	Distancia Interplanar (Å)	σ_1° gen (MPa)	τ deslizam. (MPa).	τ maclado (MPa)
1	73,85	1,489966435			
1a	74,03	1,486825897	-1334,93	544,98	314,65
2	73,73	1,491976996			
2a	73,90	1,489101955	-1220,43	498,24	287,66
3	73,69	1,492724058			
3a	73,83	1,49020872	-1067,21	435,69	251,54
4	73,77	1,491404318			
4a	73,93	1,488497583	-1234,36	503,93	290,94
5	73,81	1,490693594			
5a	73,95	1,488152511	-1079,60	440,74	254,46
6	73,77	1,491386973			
6a	73,90	1,488998303	-1014,37	414,12	239,09
7	73,80	1,490728244			
7a	73,94	1,488445809	-969,69	395,87	228,56
8	73,76	1,491577797			

8a	73,88	1,489395734	-926,52	378,25	218,38
9	73,96	1,487980052			
9a	74,08	1,486000452	-842,58	343,98	198,60

Corrida b

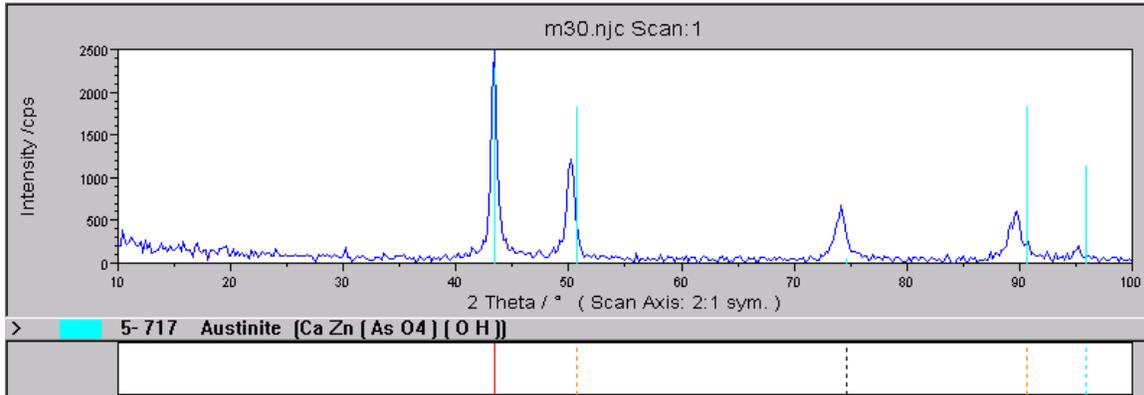
No. Probeta Experimento	20 (°)	Distancia Interplanar (Å)	σ_1° gen (MPa)	τ deslizam. (MPa).	τ maclado (MPa)
1	73,90	1,489101955			
1b	74,07	1,486069194	-1289,87	526,59	304,03
2	74,03	1,486860316			
2b	74,19	1,484044732	-1199,31	489,62	282,68
3	73,90	1,489119232			
3b	74,04	1,486619425	-1063,19	434,04	250,60
4	73,93	1,488497583			
4b	74,10	1,485588171	-1237,91	505,38	291,78
5	73,87	1,489672367			
5b	74,01	1,4871874	-1056,48	431,31	249,02
6	73,90	1,489050127			
6b	74,04	1,486585021	-1048,48	428,04	247,13
7	73,88	1,489395734			
7b	74,01	1,487239061	-917,08	374,40	216,16
8	73,90	1,489136509			
8b	74,02	1,48708409	-872,90	356,36	205,74
9	73,90	1,489015577			
9b	74,02	1,487015227	-850,82	347,35	200,54

Corrida c

No. Probeta Experimento	20 (°)	Distancia Interplanar (Å)	σ_1° gen (MPa)	τ deslizam. (MPa).	τ maclado (MPa)
1	73,85	1,489966435			
1c	74,03	1,486860316	-1320,30	539,01	311,20
2	73,52	1,495617076			
2c	73,69	1,492724058	-1225,08	500,14	288,75
3	73,82	1,490399158			
3c	73,97	1,487945566	-1042,63	425,65	245,75
4	73,78	1,491109522			
4c	73,96	1,488118015	-1270,61	518,73	299,49
5	73,77	1,491404318			
5c	73,91	1,488946485	-1043,73	426,10	246,01
6	73,94	1,488342275			
6c	74,08	1,485897354	-1040,39	424,74	245,22
7	73,89	1,489326596			
7c	74,02	1,487015227	-982,91	401,27	231,67
8	74,01	1,4871874			

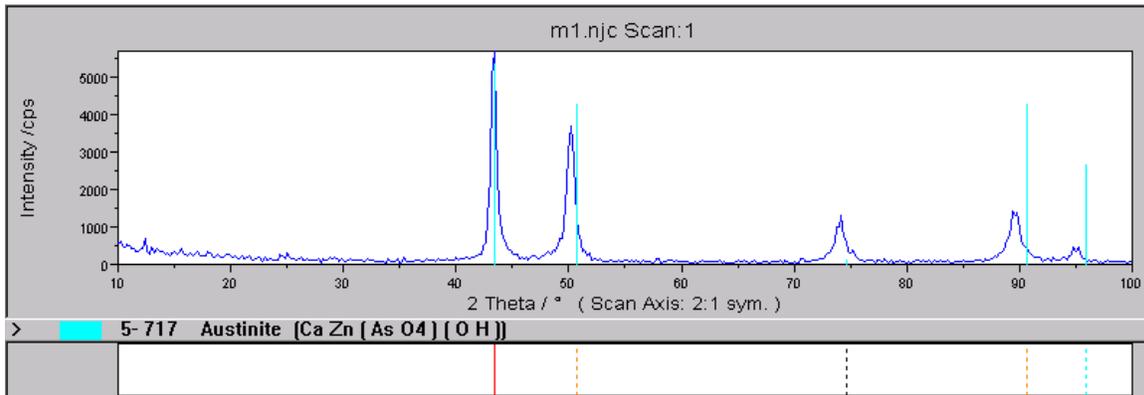
8c	74,14	1,485004609	-929,56	379,49	219,10
9	73,76	1,491577797			
9c	73,88	1,489361164	-941,20	384,24	221,84

Difractogramas del análisis cualitativo



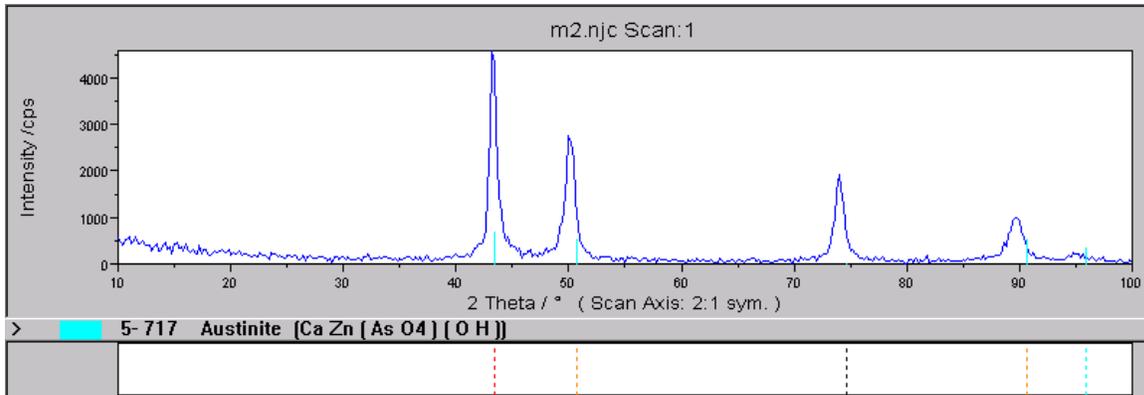
PDF-No 5- 717 Fases con reflejos coincidentes al difractograma experimental
Austenita

Figura 2.1 Muestra de un difractograma de la probeta patrón (probeta 30)



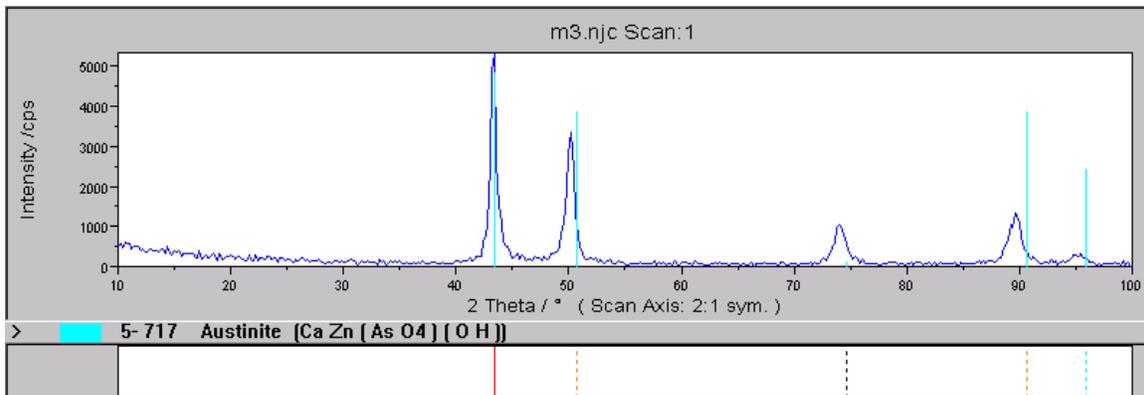
PDF-No 5- 717 Fases con reflejos coincidentes al difractograma experimental
Austenita

Figura 2.2 Muestra de un difractograma de la probeta 1



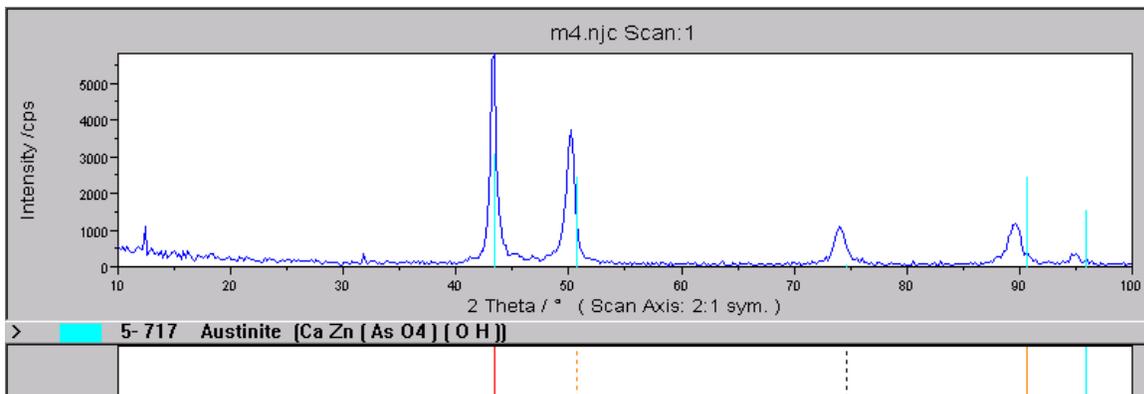
PDF-No 5-717 Fases con reflejos coincidentes al difractograma experimental Austenita

Figura 2.3 Muestra de un difractograma de la probeta 2



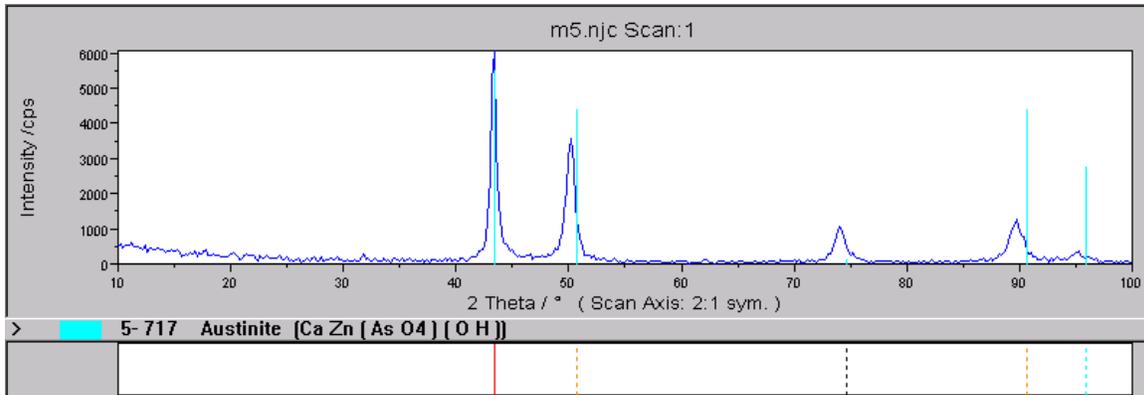
PDF-No 5-717 Fases con reflejos coincidentes al difractograma experimental Austenita

Figura 2.4 Muestra de un difractograma de la probeta 3



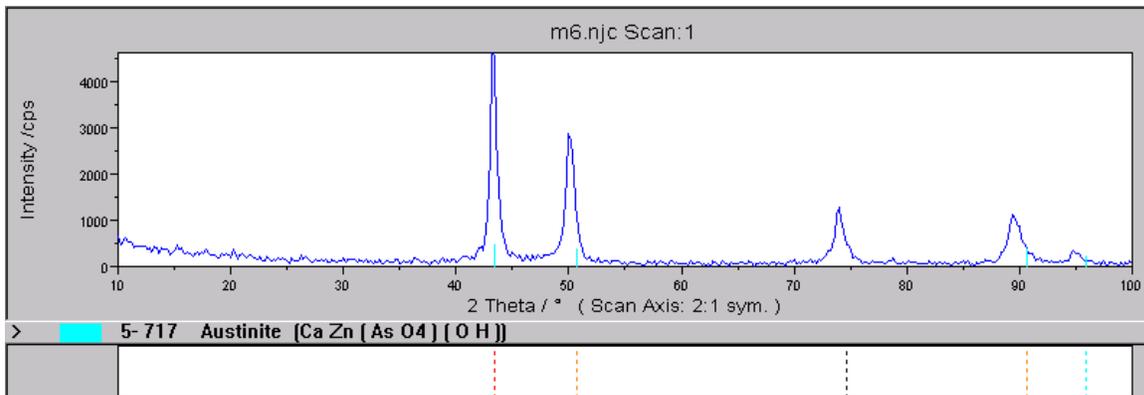
PDF-No 5-717 Fases con reflejos coincidentes al difractograma experimental Austenita

Figura 2.5 Muestra de un difractograma de la probeta 4



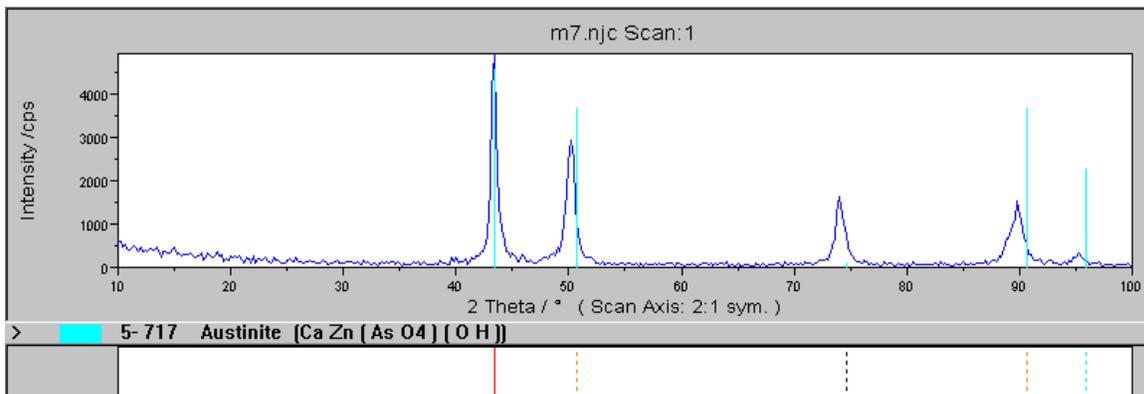
PDF-No 5-717 Fases con reflejos coincidentes al difractograma experimental
Austenita

Figura 2.6 Muestra de un difractograma de la probeta 5



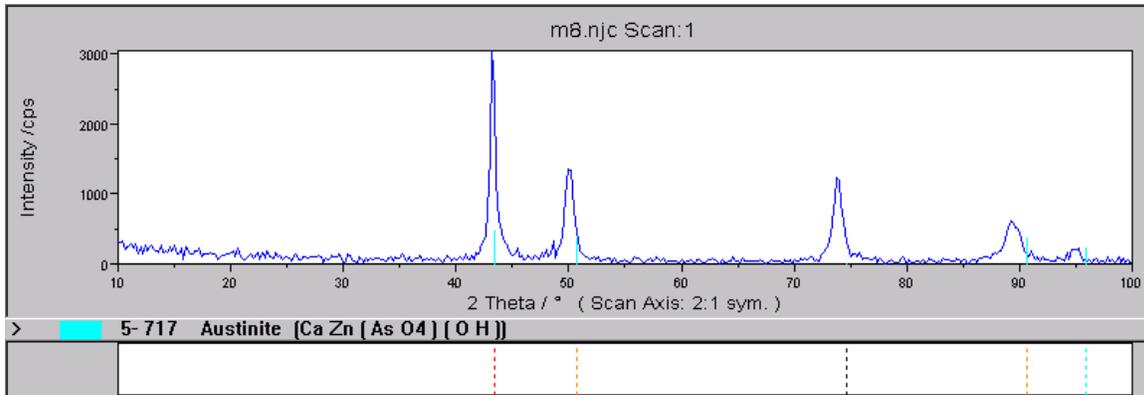
PDF-No 5-717 Fases con reflejos coincidentes al difractograma experimental
Austenita

Figura 2.7 Muestra de un difractograma de la probeta 6



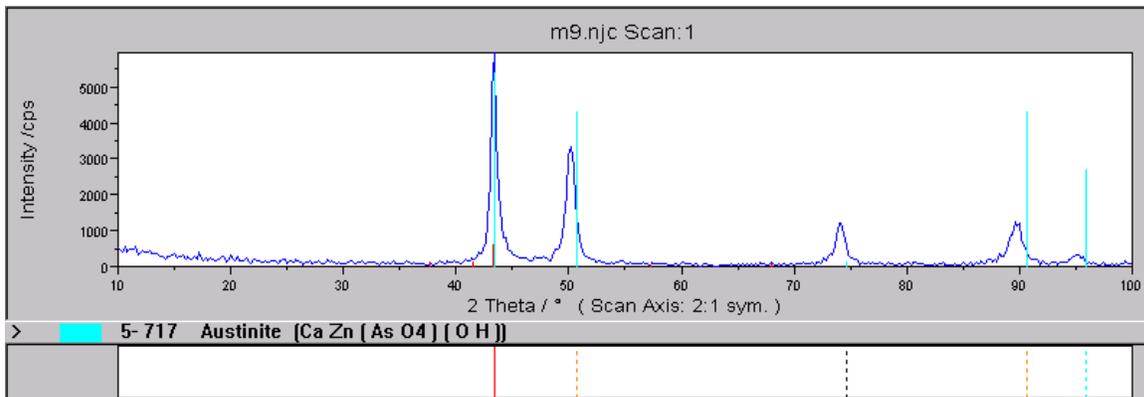
PDF-No 5-717 Fases con reflejos coincidentes al difractograma experimental
Austenita

Figura 2.8 Muestra de un difractograma de la probeta 7



PDF-No 5- 717 Fases con reflejos coincidentes al difractograma experimental Austenita

Figura 2.9 Muestra de un difractograma de la probeta 8



PDF-No 5- 717 Fases con reflejos coincidentes al difractograma experimental Austenita

Figura 2.10 Muestra de un difractograma de la probeta 9

Anexo 3

Tabla 3.1. Resultados de las Mediciones de Macro dureza

Número de Probeta	Número de la Medición	Macro dureza		
		P (kg)	d (mm)	HB
1 (a)	1	62,5	0,460	373
	2	62,5	0,444	402
	3	62,5	0,453	384
	4	62,5	0,436	416
	5	62,5	0,443	404
	6	187,5	0,771	392
	7	187,5	0,757	407
	8	187,5	0,768	395
	9	187,5	0,755	410
	10	187,5	0,756	408
	Promedio			399,1
2 (a)	1	62,5	0,468	360
	2	62,5	0,460	373
	3	62,5	0,465	365
	4	62,5	0,450	390
	5	62,5	0,454	383
	6	187,5	0,798	365
	7	187,5	0,785	378
	8	187,5	0,789	374
	9	187,5	0,771	392
	10	187,5	0,783	380
	Promedio			376,10
3 (a)	1	62,5	0,492	325
	2	62,5	0,480	342
	3	62,5	0,494	323
	4	62,5	0,474	350
	5	62,5	0,483	338
	6	187,5	0,836	332
	7	187,5	0,823	342
	8	187,5	0,819	346
	9	187,5	0,811	353
	10	187,5	0,827	340
	Promedio			339,1
4 (a)	1	62,5	0,448	393
	2	62,5	0,450	390
	3	62,5	0,456	378
	4	62,5	0,454	383
	5	62,5	0,458	377
	6	187,5	0,783	380

	7	187,5	0,771	392
	8	187,5	0,773	390
	9	187,5	0,785	378
	10	187,5	0,783	380
	Promedio			384,10
5 (a)	1	62,5	0,501	314
	2	62,5	0,490	328
	3	62,5	0,495	321
	4	62,5	0,511	301
	5	62,5	0,510	303
	6	187,5	0,851	320
	7	187,5	0,877	300
	8	187,5	0,849	322
	9	187,5	0,844	326
	10	187,5	0,864	310
	Promedio			314,50
6 (a)	1	62,5	0,520	291
	2	62,5	0,517	294
	3	62,5	0,515	297
	4	62,5	0,505	309
	5	62,5	0,500	315
	6	187,5	0,873	304
	7	187,5	0,873	304
	8	187,5	0,853	318
	9	187,5	0,890	292
	10	187,5	0,886	296
	Promedio			302,00
7 (a)	1	62,5	0,502	313
	2	62,5	0,512	300
	3	62,5	0,520	291
	4	62,5	0,506	308
	5	62,5	0,521	290
	6	187,5	0,909	279
	7	187,5	0,904	282
	8	187,5	0,906	281
	9	187,5	0,849	322
	10	187,5	0,853	318
	Promedio			298,40
8 (a)	1	62,5	0,527	283
	2	62,5	0,531	279
	3	62,5	0,533	277
	4	62,5	0,520	291
	5	62,5	0,523	288
	6	187,5	0,916	274

	7	187,5	0,877	300
	8	187,5	0,906	281
	9	187,5	0,880	298
	10	187,5	0,890	292
	Promedio			286,30
9 (a)	1	62,5	0,534	276
	2	62,5	0,547	263
	3	62,5	0,530	280
	4	62,5	0,553	256
	5	62,5	0,542	268
	6	187,5	0,966	246
	7	187,5	0,924	270
	8	187,5	0,901	284
	9	187,5	0,926	269
	10	187,5	0,916	274
	Promedio			268,60
1 (b)	1	62,5	0,454	383
	2	62,5	0,437	415
	3	62,5	0,447	394
	4	62,5	0,444	402
	5	62,5	0,450	390
	6	187,5	0,767	396
	7	187,5	0,755	410
	8	187,5	0,760	404
	9	187,5	0,773	390
	10	187,5	0,775	388
	Promedio			397,20
2 (b)	1	62,5	0,468	360
	2	62,5	0,460	373
	3	62,5	0,453	384
	4	62,5	0,472	354
	5	62,5	0,465	365
	6	187,5	0,789	374
	7	187,5	0,811	353
	8	187,5	0,783	380
	9	187,5	0,793	370
	10	187,5	0,775	388
	Promedio			370,10
3 (b)	1	62,5	0,486	334
	2	62,5	0,490	328
	3	62,5	0,481	340
	4	62,5	0,483	338
	5	62,5	0,485	336
	6	187,5	0,823	342

	7	187,5	0,840	329
	8	187,5	0,819	346
	9	187,5	0,844	326
	10	187,5	0,814	350
	Promedio			336,90
4 (b)	1	62,5	0,453	384
	2	62,5	0,456	378
	3	62,5	0,455	380
	4	62,5	0,461	372
	5	62,5	0,460	373
	6	187,5	0,783	380
	7	187,5	0,789	374
	8	187,5	0,793	370
	9	187,5	0,781	382
	10	187,5	0,787	376
	Promedio			376,90
5 (b)	1	62,5	0,494	323
	2	62,5	0,498	318
	3	62,5	0,483	338
	4	62,5	0,488	332
	5	62,5	0,490	328
	6	187,5	0,844	326
	7	187,5	0,827	340
	8	187,5	0,836	332
	9	187,5	0,831	336
	10	187,5	0,851	320
	Promedio			329,30
6 (b)	1	62,5	0,515	297
	2	62,5	0,501	314
	3	62,5	0,517	294
	4	62,5	0,506	308
	5	62,5	0,502	313
	6	187,5	0,886	296
	7	187,5	0,864	310
	8	187,5	0,877	300
	9	187,5	0,853	318
	10	187,5	0,873	304
	Promedio			305,40
7 (b)	1	62,5	0,517	294
	2	62,5	0,523	288
	3	62,5	0,521	290
	4	62,5	0,510	303
	5	62,5	0,506	308
	6	187,5	0,880	298

	7	187,5	0,886	296
	8	187,5	0,877	300
	9	187,5	0,890	292
	10	187,5	0,861	312
	Promedio			298,10
8 (b)	1	62,5	0,530	280
	2	62,5	0,521	290
	3	62,5	0,527	283
	4	62,5	0,531	279
	5	62,5	0,523	288
	6	187,5	0,906	281
	7	187,5	0,901	284
	8	187,5	0,895	288
	9	187,5	0,886	296
	10	187,5	0,910	278
	Promedio			284,70
9 (b)	1	62,5	0,538	272
	2	62,5	0,531	279
	3	62,5	0,542	268
	4	62,5	0,547	263
	5	62,5	0,540	270
	6	187,5	0,924	270
	7	187,5	0,930	266
	8	187,5	0,926	269
	9	187,5	0,916	274
	10	187,5	0,940	260
	Promedio			269,10
1 (c)	1	62,5	0,432	422
	2	62,5	0,449	392
	3	62,5	0,436	416
	4	62,5	0,439	410
	5	62,5	0,447	396
	6	187,5	0,751	414
	7	187,5	0,765	398
	8	187,5	0,764	400
	9	187,5	0,771	392
	10	187,5	0,749	416
	Promedio			405,60
2 (c)	1	62,5	0,454	383
	2	62,5	0,464	366
	3	62,5	0,468	360
	4	62,5	0,456	378
	5	62,5	0,474	350
	6	187,5	0,808	356

	7	187,5	0,790	373
	8	187,5	0,793	370
	9	187,5	0,780	383
	10	187,5	0,801	362
	Promedio			368,10
3 (c)	1	62,5	0,480	342
	2	62,5	0,486	334
	3	62,5	0,491	326
	4	62,5	0,474	350
	5	62,5	0,479	344
	6	187,5	0,840	329
	7	187,5	0,823	342
	8	187,5	0,844	326
	9	187,5	0,831	336
	10	187,5	0,827	340
	Promedio			336,90
4 (c)	1	62,5	0,460	373
	2	62,5	0,455	380
	3	62,5	0,461	372
	4	62,5	0,453	384
	5	62,5	0,459	376
	6	187,5	0,783	380
	7	187,5	0,779	384
	8	187,5	0,775	388
	9	187,5	0,793	370
	10	187,5	0,787	376
	Promedio			378,30
5 (c)	1	62,5	0,483	338
	2	62,5	0,490	328
	3	62,5	0,481	340
	4	62,5	0,499	316
	5	62,5	0,492	325
	6	187,5	0,849	322
	7	187,5	0,836	332
	8	187,5	0,844	326
	9	187,5	0,836	332
	10	187,5	0,831	336
	Promedio			329,50
6 (c)	1	62,5	0,513	299
	2	62,5	0,510	303
	3	62,5	0,498	318
	4	62,5	0,505	309
	5	62,5	0,501	314
	6	187,5	0,864	310

	7	187,5	0,873	304
	8	187,5	0,853	318
	9	187,5	0,886	296
	10	187,5	0,861	312
	Promedio			308,30
7 (c)	1	62,5	0,517	294
	2	62,5	0,502	313
	3	62,5	0,512	300
	4	62,5	0,515	297
	5	62,5	0,521	290
	6	187,5	0,877	300
	7	187,5	0,873	304
	8	187,5	0,890	292
	9	187,5	0,886	296
	10	187,5	0,895	288
	Promedio			297,40
8 (c)	1	62,5	0,523	288
	2	62,5	0,527	283
	3	62,5	0,517	294
	4	62,5	0,531	279
	5	62,5	0,530	280
	6	187,5	0,890	292
	7	187,5	0,910	278
	8	187,5	0,906	281
	9	187,5	0,895	288
	10	187,5	0,901	284
	Promedio			284,70
9 (c)	1	62,5	0,547	263
	2	62,5	0,538	272
	3	62,5	0,530	280
	4	62,5	0,531	279
	5	62,5	0,540	270
	6	187,5	0,920	272
	7	187,5	0,930	266
	8	187,5	0,940	260
	9	187,5	0,916	274
	10	187,5	0,926	269
	Promedio			270,50
30	1	62,5	0,645	188
	2	62,5	0,641	190
	3	62,5	0,651	184
	4	62,5	0,636	193
	5	62,5	0,629	198
	6	187,5	1,064	200

	7	187,5	1,082	194
	8	187,5	1,088	192
	9	187,5	1,110	184
	10	187,5	1,103	186
	Promedio			190,90
33	1	62,5	0,639	192
	2	62,5	0,641	190
	3	62,5	0,645	188
	4	62,5	0,640	191
	5	62,5	0,635	194
	6	187,5	1,103	186
	7	187,5	1,092	190
	8	187,5	1,080	195
	9	187,5	1,092	190
	10	187,5	1,090	191
	Promedio			190,70
36	1	62,5	0,635	194
	2	62,5	0,641	190
	3	62,5	0,647	187
	4	62,5	0,629	198
	5	62,5	0,636	193
	6	187,5	1,073	197
	7	187,5	1,080	195
	8	187,5	1,108	185
	9	187,5	1,064	200
	10	187,5	1,090	191
	Promedio			193,00

Tabla 3.2. Resultados de la medición de macrodureza (promedio de las 10 mediciones) en cada una de la réplicas de cada experimento. Entre paréntesis se expresa la magnitud de tensión equivalente obtenida indirectamente, utilizando la tabla de conversión proporcionada por la firma Mitsubishi Carbide.

No. Exp.	δ	k	HB(a)	HB(b)	HB(c)	HBprom
1	100	3	399,10 (1378,59)	397,20 (1369,28)	405,60 (1410,44)	400,63 (1386,10)
2	75	3	376,10 (1269,99)	370,10 (1240,59)	368,10 (1230,79)	371,43 (1247,12)
3	50	3	339,10 (1130,09)	336,90 (1121,51)	336,90 (1121,51)	337,63 (1124,37)
4	100	2	384,10 (1295,60)	376,90 (1273,91)	378,30 (1276,77)	379,76 (1282,09)
5	75	2	314,50 (1040,15)	329,30 (1091,87)	329,50 (1092,65)	324,43 (1074,89)
6	50	2	302,00 (1006,00)	305,40 (1016,20)	308,30 (1024,90)	305,23 (1015,70)
7	100	1	298,40 (989,36)	298,10 (988,79)	297,40 (987,46)	297,96 (988,53)
8	75	1	286,30 (951,90)	284,70 (948,53)	284,70 (948,53)	285,23 (949,65)
9	50	1	268,60 (905,04)	269,10 (906,49)	270,50 (910,55)	269,40 (907,36)

Tabla 3.3. Resultados de las Mediciones de Microdureza

Número de Probeta	Número de la Medición	Prof. (µm)	Microdureza								
			P ₁ = 50 gf				P ₂ = 100 gf				
			d ₁ (µm)	d ₂ (µm)	d (µm)	HV ₁	d ₁ (µm)	d ₂ (µm)	d (µm)	HV ₂	
1 (a)	1.1	200	14,8	15	14,9	417,6	22,3	21,9	22,1	379,7	
	1.2		14,3	14,6	14,45	444,5	19,0	20,0	19,5	487,7	
	1.3		14,5	15,1	14,8	423,3	21,8	22,0	21,9	386,6	
				Promedio							426,23
	2.1	1800	15,2	15,6	15,4	391,0	22,7	23,2	22,95	351,5	
	2.2		15,4	14,9	15,15	403,5	23,1	22,9	23	350,5	
	2.3		15,7	15,9	15,8	371,4	22,6	22,8	22,7	359,9	
				Promedio							371,3
	3.1	3400	16,1	15,0	15,55	383,5	24,6	23,8	24,2	316,6	
	3.2		15,4	15,9	15,65	378,5	23,7	23,9	23,8	327,4	
	3.3		15,5	15,2	15,35	393,5	25,5	26,0	25,75	279,3	
				Promedio							346,46
	4.1	5000	16,9	17,1	17,0	320,8	26,6	26,4	26,5	264,1	
	4.2		17,2	17,3	17,25	311,2	26,2	25,9	26,15	271,5	
	4.3		17,0	17,4	17,2	313,4	26,5	26,9	26,7	260,1	
				Promedio							290,18
	5.1	6600	20,7	21,1	20,9	212,3	30,1	30,3	30,2	203,3	
	5.2		21,8	21,6	21,7	196,9	30,6	30,9	30,75	196,2	
5.3	21,8		21,9	21,85	194,1	30,9	31,3	31,1	191,7		
			Promedio							198,91	
2 (a)	1.1	200	15,6	15,9	15,75	373,5	22,1	22,3	22,2	376,3	
	1.2		16,1	16,3	16,2	353,3	22,6	22,5	22,55	364,5	
	1.3		15,8	15,4	15,6	381,0	23,1	22,7	22,9	353,6	
				Promedio							367,03
	2.1	1800	16,5	16,9	16,7	332,5	23,5	23,6	23,55	331,5	
	2.2		16,9	16,8	16,85	326,1	23,9	23,7	23,8	327,4	
	2.3		17,3	17,1	17,2	313,4	24,0	24,2	24,1	319,3	
				Promedio							325,03
	3.1	3400	18,5	18,4	18,45	271,5	26,5	26,8	26,65	261,5	
	3.2		18,9	18,7	18,8	262,3	26,5	26,3	26,4	266,1	
	3.3		19,3	18,9	19,1	254,2	27,0	27,4	27,2	250,6	
				Promedio							261,03
	4.1	5000	20,1	20,3	20,2	227,2	28,8	28,6	28,7	225,1	
	4.2		19,8	19,9	19,85	235,2	29,2	29,4	29,3	216,0	
	4.3		20,2	19,7	19,95	233,1	28,3	28,8	28,55	227,5	

			Promedio							227,35	
	5.1	6600	22,4	22,2	22,3	186,5	31,4	31,6	31,5	186,9	
	5.2		22,7	22,9	22,8	178,4	32,1	32,4	32,25	178,3	
	5.3		22,5	22,8	22,65	180,8	31,6	32,1	31,85	194,9	
			Promedio							184,3	
3 (a)	1.1	200	16,5	16,6	16,55	338,1	24,1	23,9	24,0	321,9	
	1.2		16,9	16,7	16,8	328,5	23,5	23,7	23,6	333,0	
	1.3		17,0	17,1	17,05	319,4	23,7	23,8	23,75	328,7	
				Promedio							328,26
	2.1	1800	18,7	18,2	18,0	286,2	25,3	25,5	25,4	287,4	
	2.2		18,0	17,8	17,9	289,4	25,5	25,8	25,65	281,9	
	2.3		18,2	18,4	18,3	276,9	25,9	25,7	25,8	279,6	
				Promedio							283,56
	3.1	3400	19,2	19,0	19,1	254,2	27,3	27,5	27,4	247,0	
	3.2		19,1	19,6	19,35	247,6	27,0	27,1	27,05	253,9	
	3.3		18,9	19,1	19,0	256,8	27,4	27,2	27,3	248,8	
				Promedio							251,38
	4.1	5000	20,4	20,3	20,35	223,4	28,7	28,9	28,8	223,6	
	4.2		20,2	20,0	20,1	229,5	29,1	29,4	29,25	216,7	
	4.3		20,2	20,4	20,3	225,0	28,5	28,7	28,6	226,7	
				Promedio							224,15
	5.1	6600	22,3	22,5	22,4	184,8	31,2	31,6	31,4	188,1	
	5.2		23,3	23,4	23,35	170,5	32,0	32,4	32,2	178,9	
5.3	22,0		22,2	22,1	189,8	31,0	31,5	31,25	189,9		
			Promedio							183,66	
4 (a)	1.1	200	16,5	16,0	16,25	351,1	22,2	22,4	22,3	372,9	
	1.2		16,5	15,2	16,35	347,4	22,0	22,2	22,1	379,7	
	1.3		15,4	15,6	15,5	385,9	21,6	22,0	21,8	390,2	
				Promedio							371,2
	2.1	1800	16,2	17,2	16,7	332,5	23,9	24,1	24,0	321,9	
	2.2		16,9	17,1	17,0	320,8	23,9	23,7	23,8	327,4	
	2.3		17,0	16,8	16,9	324,6	24,1	24,3	24,2	316,6	
				Promedio							326,96
	3.1	3400	18,4	18,6	18,5	270,9	26,1	26,3	26,2	270,1	
	3.2		18,7	18,8	18,75	263,7	26,4	26,6	26,5	264,1	
	3.3		18,8	19,0	18,9	259,6	26,3	26,4	26,35	267,1	
				Promedio							265,91
	4.1	5000	20,0	20,2	20,1	229,5	28,3	28,2	28,25	232,8	
	4.2		19,8	20,0	19,9	234,9	28,7	28,9	28,8	223,6	
	4.3		20,1	20,0	20,25	226,1	28,6	28,4	28,5	228,3	
			Promedio							229,2	
	5.1		23,0	23,2	23,1	173,8	32,0	32,2	32,1	180,0	

	5.2	6600	22,7	22,4	22,55	182,4	32,8	32,7	32,75	173,0
	5.3		22,1	22,6	22,35	185,6	31,6	32,0	31,8	183,4
	Promedio									179,7
5 (a)	1.1	200	16,7	16,9	16,8	328,5	23,9	23,7	23,8	327,4
	1.2		17,1	16,9	17,0	320,8	23,5	23,7	23,6	333,0
	1.3		16,8	16,9	16,85	326,5	24,0	24,2	24,1	319,3
	Promedio									325,91
	2.1	1800	17,9	18,1	18,0	286,2	26,0	25,8	25,9	276,4
	2.2		18,0	17,8	17,9	289,4	26,1	26,3	26,2	270,1
	2.3		18,0	18,4	18,2	279,9	26,6	26,7	26,65	281,9
	Promedio									280,65
	3.1	3400	19,1	19,5	19,3	248,9	27,3	27,5	27,4	247,0
	3.2		19,5	19,4	19,45	245,1	27,3	27,1	27,2	250,6
	3.3		19,0	19,2	19,1	254,2	27,0	27,6	27,3	248,8
	Promedio									249,1
	4.1	5000	20,4	20,8	20,6	218,5	29,0	29,1	29,05	219,7
	4.2		20,3	20,4	20,35	223,9	28,7	29,1	28,9	222,0
	4.3		20,7	20,9	20,8	214,3	28,7	28,6	28,65	225,9
	Promedio									220,71
	5.1	6600	22,2	22,4	22,3	186,5	31,1	31,3	31,2	190,5
	5.2		22,0	22,1	22,05	190,7	32,1	32,3	32,2	178,9
5.3	22,9		22,5	22,7	179,9	31,6	32,1	31,85	182,8	
Promedio									184,88	
6 (a)	1.1	200	18,0	17,7	17,85	290,9	24,3	24,7	24,5	308,9
	1.2		17,3	17,5	17,4	306,2	24,8	24,9	24,85	300,8
	1.3		17,4	17,6	17,5	302,8	24,8	24,6	24,7	304,0
	Promedio									302,26
	2.1	1800	18,4	18,6	18,5	270,9	26,0	25,8	25,9	276,4
	2.2		18,5	18,3	18,4	273,9	26,1	26,3	26,2	270,1
	2.3		18,5	18,7	18,6	268,0	26,0	6,1	26,05	273,7
	Promedio									272,16
	3.1	3400	19,4	19,5	19,45	245,1	27,2	27,6	27,4	247,0
	3.2		19,5	19,7	19,6	241,4	27,5	27,9	27,7	241,7
	3.3		19,4	19,6	19,5	243,8	27,3	27,8	27,55	244,8
	Promedio									243,96
	4.1	5000	20,2	21,0	20,6	218,5	29,0	29,1	29,05	219,7
	4.2		20,7	20,9	20,8	214,3	29,0	29,4	29,2	217,5
	4.3		20,6	20,9	20,75	215,4	29,3	29,5	29,4	214,5
	Promedio									216,65
	5.1	6600	23,2	23,4	23,3	170,8	32,5	32,2	32,35	177,2
	5.2		23,0	23,1	23,05	174,9	31,9	31,7	31,8	183,4
5.3	22,5		22,7	22,6	181,5	32,0	32,2	32,1	180,0	

			Promedio							177,96
7 (a)	1.1	200	17,6	17,8	17,7	296,0	24,6	25,0	24,8	301,5
	1.2		17,4	17,6	17,5	302,8	24,9	25,1	25,0	296,7
	1.3		17,7	17,9	17,8	292,6	25,0	25,2	25,1	294,3
			Promedio							297,31
	2.1	1800	18,7	18,9	18,8	262,3	26,5	26,3	26,4	266,1
	2.2		18,6	18,7	18,65	266,5	26,2	26,3	26,25	269,1
	2.3		18,4	18,6	18,5	270,9	26,1	26,3	26,2	270,1
			Promedio							267,5
	3.1	3400	19,5	19,6	19,55	242,6	28,0	27,8	27,9	238,2
	3.2		19,6	19,8	19,7	238,9	27,7	27,8	27,75	241,3
	3.3		19,4	19,2	19,3	248,9	27,5	27,7	27,6	243,4
			Promedio							242,21
	4.1	5000	20,7	20,9	20,8	214,3	29,3	29,1	29,2	217,5
	4.2		21,0	21,2	21,1	208,3	29,5	29,7	29,6	211,7
	4.3		21,1	20,8	20,95	211,7	29,4	29,5	29,45	213,8
		Promedio							212,88	
5.1	6600	22,9	22,8	22,85	177,6	31,2	31,6	31,4	188,1	
5.2		22,3	22,5	22,4	184,8	32,0	32,1	32,05	180,5	
5.3		23,0	23,3	23,15	172,9	32,6	32,3	32,45	176,2	
		Promedio							180,01	
8 (a)	1.1	200	18,0	18,2	18,1	283,0	25,4	25,6	25,5	285,2
	1.2		17,8	18,0	17,9	289,4	25,6	25,5	25,65	281,9
	1.3		18,1	18,2	18,15	281,4	25,2	25,4	25,3	289,7
			Promedio							285,1
	2.1	1800	19,1	18,9	19,0	256,8	26,5	26,3	26,4	266,1
	2.2		18,8	18,9	18,85	260,9	26,6	26,8	26,7	260,1
	2.3		18,6	18,8	18,7	265,1	26,8	26,9	26,85	257,4
			Promedio							261,06
	3.1	3400	19,7	19,9	19,8	236,5	28,1	27,9	28,0	236,5
	3.2		20,0	20,2	20,1	229,5	28,1	28,2	28,15	234,0
	3.3		20,2	20,1	20,05	228,8	27,7	27,9	27,8	239,9
			Promedio							234,2
	4.1	5000	21,2	21,1	21,25	205,8	29,8	30,0	29,9	207,4
	4.2		21,3	21,5	21,4	202,5	30,0	30,1	30,15	204,0
	4.3		21,6	21,4	21,5	200,6	29,7	29,9	29,8	208,8
		Promedio							204,85	
5.1	6600	22,4	22,6	22,5	183,2	31,7	31,4	31,55	186,3	
5.2		23,0	22,6	22,8	178,4	31,3	31,1	31,2	190,5	
5.3		22,5	22,0	22,25	186,8	32,2	32,4	32,3	177,7	
		Promedio							183,81	
	1.1		18,6	18,4	18,5	270,9	26,5	26,3	26,4	266,1

9 (a)	1.2	200	18,5	18,9	18,7	265,1	26,5	26,6	26,55	263,1
	1.3		18,9	18,8	18,85	260,9	26,1	26,5	26,3	268,1
	Promedio									265,7
	2.1	1800	19,5	19,8	19,65	240,1	28,0	28,2	28,1	234,9
	2.2		19,6	20,0	19,8	236,5	27,8	28,0	27,9	238,2
	2.3		20,0	20,0	20,0	231,8	28,2	28,3	28,25	232,8
	Promedio									235,71
	3.1	3400	20,5	20,7	20,6	218,5	29,0	29,6	29,3	216,0
	3.2		20,8	21,0	20,9	212,3	29,6	29,8	29,7	210,2
	3.3		20,9	20,8	20,85	213,2	29,4	29,7	29,55	212,9
	Promedio									213,85
	4.1	5000	21,0	21,6	21,3	204,4	30,6	30,4	30,5	199,3
	4.2		21,5	21,7	21,6	198,7	30,6	30,8	30,7	196,8
	4.3		21,5	22,0	21,75	196,0	30,5	30,7	30,6	198,0
	Promedio									198,86
5.1	6600	23,1	22,9	23,0	175,3	32,7	32,5	32,6	174,5	
5.2		22,7	22,3	22,5	183,2	32,0	32,1	32,05	180,5	
5.3		23,1	22,6	22,85	177,6	32,6	33,0	32,8	172,4	
Promedio									177,25	
1 (b)	1.1	200	14,7	14,9	14,8	423,3	20,5	20,7	20,6	437,0
	1.2		14,5	14,7	14,6	435,0	20,3	20,5	20,4	445,6
	1.3		15,1	14,9	15,0	412,1	22,3	21,9	22,1	379,7
	Promedio									422,11
	2.1	1800	15,4	15,6	15,5	385,9	22,7	23,2	22,95	351,5
	2.2		15,5	15,3	15,4	391,0	23,1	22,9	23	350,5
	2.3		15,7	15,9	15,8	371,4	22,1	22,3	22,2	376,3
	Promedio									371,1
	3.1	3400	16,3	16,5	16,4	344,7	23,2	23,5	23,4	338,7
	3.2		15,4	15,9	15,65	378,5	23,6	24,0	23,8	327,4
	3.3		16,5	16,2	16,3	349,0	24,6	23,8	24,2	316,6
	Promedio									342,83
	4.1	5000	17,1	17,4	17,25	311,2	26,1	26,3	26,2	270,1
	4.2		17,9	18,1	18,0	286,2	26,0	25,8	25,9	276,4
	4.3		17,7	17,9	17,8	292,6	26,6	26,7	26,65	281,9
Promedio									286,4	
5.1	6600	21,3	21,5	21,4	202,5	30,7	30,9	30,8	195,5	
5.2		21,8	21,9	21,85	194,1	31,3	31,5	31,4	188,1	
5.3		20,8	21,0	20,9	212,3	30,9	31,3	31,1	191,7	
Promedio									197,36	
	1.1	200	15,6	15,9	15,75	373,5	21,8	21,9	21,85	388,5
	1.2		15,8	15,4	15,6	381,0	22,6	22,5	22,55	364,5
	1.3		15,3	15,5	15,4	391,0	22,1	22,3	22,2	376,3

2 (b)			Promedio							379,13
	2.1	1800	16,7	16,9	16,8	328,5	23,6	23,8	23,7	330,1
	2.2		16,9	16,8	16,85	326,1	23,5	23,6	23,55	331,5
	2.3		16,5	16,9	16,7	332,5	23,9	23,7	23,8	327,4
			Promedio							329,35
	3.1	3400	19,2	19,0	19,1	254,2	26,8	27,0	26,9	256,3
	3.2		19,0	18,6	18,8	262,3	26,4	26,9	26,65	261,5
	3.3		18,5	18,9	18,7	265,1	26,5	26,3	26,4	266,1
			Promedio							260,91
	4.1	5000	19,7	20,0	19,85	235,2	28,3	28,8	28,55	227,5
	4.2		20,3	20,5	20,4	222,8	28,8	28,6	28,7	225,1
	4.3		20,0	20,4	20,2	227,2	28,5	28,3	28,4	229,9
			Promedio							227,95
5.1	6600	21,9	22,1	22,0	191,6	31,6	32,1	31,85	194,9	
5.2		22,5	22,1	22,3	186,5	31,4	31,6	31,5	186,9	
5.3		22,7	22,9	22,8	178,4	31,7	31,9	31,8	183,4	
		Promedio							186,95	
3 (b)	1.1	200	16,5	16,4	16,45	342,6	23,4	23,6	23,5	335,8
	1.2		16,5	16,6	16,55	338,1	23,0	23,2	23,1	347,5
	1.3		16,5	16,7	16,6	336,5	23,5	23,7	23,6	333,0
			Promedio							338,91
	2.1	1800	18,0	17,8	17,9	289,4	25,5	25,7	25,6	283,0
	2.2		18,1	18,0	18,05	284,6	25,3	25,5	25,4	287,4
	2.3		18,7	18,2	18,0	286,2	25,5	25,8	25,65	281,9
			Promedio							285,41
	3.1	3400	19,0	19,7	19,35	247,6	27,0	27,2	27,1	252,5
	3.2		19,1	19,2	19,15	252,8	27,4	27,2	27,3	248,8
	3.3		19,3	19,5	19,4	246,4	27,3	27,5	27,4	247,0
			Promedio							249,18
	4.1	5000	20,1	20,5	20,3	225,0	28,2	28,4	28,3	231,5
	4.2		20,4	20,3	20,35	223,4	28,5	28,7	28,6	226,7
	4.3		20,4	20,6	20,5	220,6	28,7	28,9	28,8	223,6
			Promedio							225,13
	5.1	6600	23,3	23,4	23,35	170,5	32,0	32,4	32,2	178,9
5.2	21,8		22,0	21,9	193,3	31,5	31,7	31,6	185,7	
5.3	22,3		22,5	22,4	184,8	31,2	31,6	31,4	188,1	
		Promedio							183,55	
	1.1	200	15,4	15,6	15,5	385,9	21,5	21,7	21,6	397,5
	1.2		15,2	15,5	15,35	393,5	21,6	22,0	21,8	390,2
	1.3		15,2	15,4	15,3	396,1	21,7	21,8	21,75	391,7
			Promedio							392,48
	2.1		16,5	16,7	16,6	336,5	23,4	23,6	23,5	335,8

4 (b)	2.2	1800	16,2	17,2	16,7	332,5	23,8	23,4	23,6	333,0
	2.3		17,0	16,8	16,9	324,6	23,9	23,7	23,8	327,4
	Promedio									331,63
	3.1	3400	18,7	18,8	18,75	263,7	25,9	26,1	26,0	274,3
	3.2		18,3	18,5	18,4	273,9	26,3	26,4	26,35	267,1
	3.3		18,4	18,6	18,5	270,9	26,1	26,3	26,2	270,1
	Promedio									270,0
	4.1	5000	19,9	20,1	20,0	231,8	28,2	28,4	28,3	231,5
	4.2		20,0	20,2	20,1	229,5	28,6	28,4	28,5	228,3
	4.3		19,7	20,1	19,9	234,9	28,3	28,2	28,25	232,8
	Promedio									231,46
	5.1	6600	22,1	22,6	22,35	185,6	31,9	32,3	32,1	180,0
5.2	22,7		22,4	22,55	182,4	31,6	32,0	31,8	183,4	
5.3	22,6		22,8	22,7	179,9	31,1	31,3	31,2	190,5	
Promedio									183,66	
5 (b)	1.1	200	17,0	16,6	16,8	328,5	23,5	23,7	23,6	333,0
	1.2		16,8	16,9	16,85	326,5	23,3	23,5	23,4	338,7
	1.3		16,5	16,7	16,6	336,5	23,2	23,4	23,3	341,6
	Promedio									334,13
	2.1	1800	18,0	18,2	18,1	283,0	26,6	26,7	26,65	281,9
	2.2		17,9	18,1	18,0	286,2	26,0	25,8	25,9	276,4
	2.3		18,0	17,8	17,9	289,4	25,4	25,6	25,5	285,3
	Promedio									283,7
	3.1	3400	19,1	19,3	19,2	251,5	27,0	27,2	27,1	252,5
	3.2		19,0	19,2	19,1	254,2	27,1	27,2	27,15	251,4
	3.3		19,1	19,5	19,3	248,9	27,3	27,1	27,2	250,6
	Promedio									251,51
	4.1	5000	20,4	20,6	20,5	220,6	28,7	28,6	28,65	225,9
	4.2		20,8	20,4	20,6	218,5	28,9	28,7	28,8	223,6
	4.3		20,3	20,4	20,35	223,9	28,6	29,2	28,9	222,0
	Promedio									222,41
	5.1	6600	22,0	22,1	22,05	190,7	31,5	31,7	31,6	185,7
	5.2		22,9	22,5	22,7	179,9	31,1	31,3	31,2	190,5
5.3	22,2		22,4	22,3	186,5	32,1	32,3	32,2	178,9	
Promedio									185,36	
	1.1	200	17,3	17,5	17,4	306,2	24,0	24,2	24,1	319,3
	1.2		17,4	17,6	17,5	302,8	24,3	24,7	24,5	308,9
	1.3		17,0	17,1	17,05	318,9	24,8	24,9	24,85	300,8
	Promedio									309,48
	2.1	1800	18,1	18,3	18,2	279,9	26,0	26,1	26,05	273,7
	2.2		18,4	18,6	18,5	270,9	25,9	26,0	25,95	275,3
	2.3		18,5	18,3	18,4	273,9	26,1	26,3	26,2	270,1

6 (b)			Promedio							273,96
	3.1	3400	19,4	19,6	19,5	243,8	27,1	27,7	27,4	247,0
	3.2		19,4	19,5	19,45	245,1	27,3	27,8	27,55	244,8
	3.3		19,4	19,6	19,5	243,8	27,4	27,6	27,5	245,2
			Promedio							244,95
	4.1	5000	20,5	20,7	20,6	218,5	29,3	29,5	29,4	214,5
	4.2		20,6	20,9	20,75	215,4	29,1	29,3	29,2	217,5
	4.3		20,8	20,6	20,7	216,4	28,9	29,1	29,0	220,5
			Promedio							217,13
	5.1	6600	22,5	22,7	22,6	181,5	32,0	32,2	32,1	180,0
5.2	22,2		22,4	22,3	186,5	31,9	31,7	31,8	183,4	
5.3	23,0		23,1	23,05	174,9	31,4	31,6	31,5	186,9	
		Promedio							182,20	
7 (b)	1.1	200	17,1	17,3	17,2	313,4	25,0	25,2	25,1	294,3
	1.2		17,4	17,6	17,5	302,8	24,6	25,0	24,8	301,5
	1.3		17,6	17,8	17,7	296,0	24,3	24,5	24,4	311,5
			Promedio							303,25
	2.1	1800	18,4	18,6	18,5	270,9	26,2	26,3	26,25	269,1
	2.2		18,3	18,5	18,4	273,9	26,1	26,3	26,2	270,1
	2.3		18,6	18,7	18,65	266,5	26,0	26,2	26,1	272,1
			Promedio							270,43
	3.1	3400	19,7	19,3	19,5	243,8	27,5	27,7	27,6	243,4
	3.2		19,4	19,2	19,3	248,9	27,6	27,9	27,75	241,3
	3.3		19,5	19,6	19,55	242,6	27,4	27,6	27,5	245,2
			Promedio							244,2
	4.1	5000	21,1	20,8	20,95	211,7	29,5	29,1	29,3	216,0
	4.2		20,7	20,9	20,8	214,3	29,4	29,5	29,45	213,8
	4.3		20,5	20,7	20,6	218,5	29,3	29,1	29,2	217,5
			Promedio							215,3
	5.1	6600	22,5	22,1	22,3	186,5	31,7	31,9	31,8	183,4
	5.2		22,9	22,8	22,85	177,6	31,2	31,6	31,4	188,1
5.3	22,3		22,5	22,4	184,8	32,0	32,1	32,05	180,5	
		Promedio							183,48	
	1.1	200	17,8	17,6	17,7	296,0	25,2	25,4	25,3	289,7
	1.2		18,0	18,2	18,1	283,0	25,4	25,6	25,5	285,2
	1.3		17,8	18,0	17,9	289,4	24,9	25,1	25,0	296,7
			Promedio							290,0
	2.1	1800	18,8	18,9	18,85	260,9	26,3	26,1	26,2	270,1
	2.2		18,6	18,8	18,7	265,1	26,5	26,3	26,4	266,1
	2.3		18,5	18,7	18,6	268,0	26,6	26,8	26,7	260,1
			Promedio							265,05
	3.1		19,8	19,6	19,7	238,9	27,7	27,8	27,75	239,6

8 (b)	3.2	3400	19,7	19,9	19,8	236,5	27,7	27,9	27,8	239,9
	3.3		20,0	20,2	20,1	229,5	28,1	27,9	28,0	236,5
	Promedio									236,81
	4.1	5000	21,2	21,0	21,1	208,3	29,7	29,9	29,8	208,8
	4.2		21,2	21,1	21,25	205,8	29,8	30,0	29,9	207,4
	4.3		21,3	21,5	21,4	202,5	30,2	30,0	30,1	204,7
	Promedio									206,25
	5.1	6600	22,1	21,9	22,0	191,6	31,6	31,4	31,5	186,9
	5.2		22,5	22,0	22,25	186,8	31,7	31,4	31,55	186,3
	5.3		22,4	22,6	22,5	183,2	31,3	31,1	31,2	190,5
	Promedio									187,55
	9 (b)	1.1	200	18,3	18,1	18,2	279,9	25,8	26,2	26,0
1.2		18,6		18,4	18,5	270,9	26,1	26,5	26,3	268,1
1.3		18,5		18,9	18,7	265,1	26,5	26,3	26,4	266,1
Promedio									270,73	
2.1		1800	19,6	19,4	19,5	243,8	27,8	28,0	27,9	238,2
2.2			19,6	19,7	19,65	240,1	28,2	28,3	28,25	232,8
2.3			19,6	20,0	19,8	236,5	27,5	27,7	27,6	243,4
Promedio									239,13	
3.1		3400	20,9	20,8	20,85	213,2	29,0	29,2	29,1	219,0
3.2			20,5	20,7	20,6	218,5	29,4	29,7	29,55	212,9
3.3			20,6	20,4	20,5	220,6	29,0	29,6	29,3	216,0
Promedio									216,7	
4.1		5000	21,2	21,0	21,1	208,3	30,6	30,8	30,7	196,8
4.2			21,5	22,0	21,75	196,0	30,5	30,7	30,6	198,0
4.3			21,0	21,6	21,3	204,4	29,9	29,7	29,8	208,8
Promedio									202,05	
5.1		6600	22,8	22,2	22,5	183,2	31,7	31,9	31,8	183,4
5.2			23,1	22,6	22,85	177,6	32,8	32,4	32,6	174,5
5.3	22,8		22,6	22,7	179,9	31,8	32,3	32,05	180,5	
Promedio									179,85	
1 (c)	1.1	200	14,5	15,1	14,8	423,3	21,4	21,2	21,3	408,7
	1.2		14,9	15,0	14,95	414,9	21,4	21,0	21,2	412,6
	1.3		14,2	14,7	14,45	444,5	20,7	20,5	20,6	437,0
	Promedio									423,5
	2.1	1800	15,8	15,6	15,7	376,2	22,1	22,3	22,2	376,3
	2.2		15,6	15,4	15,5	385,9	22,6	22,8	22,7	359,9
	2.3		15,7	15,8	15,75	373,8	22,5	22,6	22,55	364,6
	Promedio									372,78
	3.1	3400	16,3	16,1	16,2	353,3	23,2	23,0	23,1	347,5
	3.2		16,1	15,9	16,0	362,2	24,6	23,8	24,2	316,6
	3.3		15,4	15,9	15,65	378,5	23,7	23,9	23,8	327,4

			Promedio							347,58	
	4.1	5000	17,1	17,4	17,25	311,2	25,0	25,2	25,1	294,3	
	4.2		17,0	17,4	17,2	313,4	26,7	26,3	26,5	264,1	
	4.3		18,2	18,0	18,1	283,0	26,2	25,9	26,15	271,5	
			Promedio							289,58	
	5.1	6600	21,2	20,8	21,0	210,2	30,2	30,0	30,1	204,7	
	5.2		20,8	21,0	20,9	212,3	30,6	30,9	30,75	196,2	
	5.3		21,8	21,6	21,7	196,9	30,0	30,4	30,2	203,3	
			Promedio							203,93	
2 (c)	1.1	200	15,9	15,3	15,6	381,0	22,0	21,8	21,9	386,6	
	1.2		15,7	15,8	15,75	373,5	22,1	22,3	22,2	376,3	
	1.3		15,6	15,4	15,5	385,9	22,6	22,5	22,55	364,5	
				Promedio							377,96
		2.1	1800	16,9	16,8	16,85	326,1	23,9	23,7	23,8	327,4
		2.2		16,5	16,9	16,7	332,5	23,7	23,5	23,6	333,0
		2.3		16,5	16,7	16,6	336,5	23,5	23,6	23,55	331,5
				Promedio							331,16
		3.1	3400	19,0	18,6	18,8	262,3	26,1	26,3	26,2	270,1
		3.2		18,6	18,8	18,7	265,1	26,6	26,2	26,4	266,1
		3.3		18,5	18,4	18,45	271,5	26,5	26,8	26,65	261,5
				Promedio							266,1
		4.1	5000	20,1	19,8	19,95	233,1	28,1	28,3	28,2	233,2
		4.2		19,9	20,1	20,0	231,8	28,3	28,8	28,55	227,5
		4.3		19,7	20,0	19,85	235,2	28,5	28,3	28,4	229,9
				Promedio							231,78
	5.1	6600	21,5	21,7	21,6	198,7	30,0	30,2	30,1	204,7	
	5.2		22,4	22,2	22,3	186,5	31,6	32,1	31,85	194,9	
	5.3		22,4	22,9	22,65	180,8	31,4	31,6	31,5	186,9	
			Promedio							192,08	
3 (c)	1.1	200	16,5	16,3	16,4	344,7	23,4	23,8	23,6	333,0	
	1.2		16,1	16,3	16,2	353,3	23,3	23,5	23,4	338,7	
	1.3		16,4	16,7	16,55	338,1	23,2	23,0	23,1	347,5	
				Promedio							342,55
		2.1	1800	17,9	17,7	17,8	296,0	25,4	25,9	25,65	281,9
		2.2		18,7	18,2	18,0	286,2	25,1	25,3	25,2	292,0
		2.3		18,0	17,8	17,9	289,4	25,3	25,5	25,4	287,4
				Promedio							288,81
		3.1	3400	19,3	19,5	19,4	246,4	27,4	27,2	27,3	248,8
		3.2		19,3	19,1	19,2	251,5	27,3	27,5	27,4	247,0
		3.3		19,1	19,6	19,35	247,6	27,1	27,2	27,15	251,5
				Promedio							248,8
		4.1		20,5	20,7	20,6	218,5	28,5	28,7	28,6	226,7

	4.2	5000	20,4	20,3	20,35	223,4	28,8	29,0	28,9	222,0
	4.3		20,0	20,6	20,3	225,0	28,7	28,9	28,8	223,6
	Promedio									223,2
	5.1	6600	21,7	21,9	21,8	195,1	31,6	31,8	31,7	184,5
	5.2		22,3	22,5	22,4	184,8	31,0	31,5	31,25	189,9
	5.3		21,9	22,3	22,1	189,8	31,2	31,6	31,4	188,1
	Promedio									188,7
4 (c)	1.1	200	15,6	15,7	15,65	378,6	21,7	21,9	21,8	390,2
	1.2		15,4	15,6	15,5	385,9	22,1	21,9	22,0	383,1
	1.3		15,5	15,3	15,4	391,0	22,0	22,2	22,1	379,7
	Promedio									384,75
	2.1	1800	16,7	16,5	16,6	336,5	23,5	23,7	23,6	333,0
	2.2		16,2	17,2	16,7	332,5	23,4	23,3	23,35	340,2
	2.3		16,6	16,8	16,7	332,5	23,9	23,7	23,8	327,4
	Promedio									333,68
	3.1	3400	18,1	18,3	18,2	279,9	26,3	26,4	26,35	267,1
	3.2		18,3	18,7	18,5	270,9	26,1	26,3	26,2	270,1
	3.3		18,7	18,8	18,75	263,7	25,7	25,9	25,8	279,6
	Promedio									271,88
	4.1	5000	19,8	20,0	19,9	234,9	28,6	28,4	28,5	228,3
	4.2		20,1	20,0	20,25	226,1	28,3	28,2	28,25	232,8
	4.3		19,6	19,8	19,7	238,9	28,0	27,8	27,9	238,2
	Promedio									233,2
	5.1	6600	22,1	22,6	22,35	185,6	30,5	30,7	30,6	198,0
	5.2		20,9	21,1	21,0	210,2	31,6	32,0	31,8	183,4
5.3	21,7		21,5	21,6	198,7	30,0	30,2	30,1	204,7	
Promedio									196,76	
5 (c)	1.1	200	16,8	16,9	16,85	326,5	23,5	23,3	23,4	338,7
	1.2		16,4	16,6	16,5	340,6	23,4	23,8	23,6	333,0
	1.3		16,5	16,7	16,6	336,5	23,9	23,7	23,8	327,4
	Promedio									333,78
	2.1	1800	17,7	17,9	17,8	292,6	25,6	25,7	25,65	281,9
	2.2		17,9	18,1	18,0	286,2	25,3	25,5	25,4	287,4
	2.3		18,0	17,8	17,9	289,4	25,7	25,5	25,6	283,0
	Promedio									286,75
	3.1	3400	19,1	19,3	19,2	251,5	27,0	27,6	27,3	248,8
	3.2		19,1	19,5	19,3	248,9	27,3	27,5	27,4	247,0
	3.3		19,5	19,4	19,45	245,1	27,6	27,8	27,7	241,7
	Promedio									247,16
	4.1	5000	20,3	20,4	20,35	223,9	28,7	29,1	28,9	222,0
	4.2		19,9	20,1	20,0	231,8	28,7	28,6	28,65	225,9
	4.3		20,0	20,2	20,1	229,5	28,9	29,1	29,0	220,5

			Promedio							225,6	
	5.1	6600	21,5	21,7	21,6	198,7	31,6	32,1	31,85	182,8	
	5.2		22,2	22,4	22,3	186,5	31,1	31,3	31,2	190,5	
	5.3		22,0	22,1	22,05	190,7	30,1	30,3	30,2	203,3	
			Promedio							192,08	
6 (c)	1.1	200	17,3	17,5	17,4	306,2	24,0	24,2	24,1	319,3	
	1.2		17,4	17,6	17,5	302,8	24,8	24,9	24,85	300,8	
	1.3		17,2	17,0	17,1	317,1	24,3	24,7	24,5	308,9	
				Promedio							309,18
	2.1	1800	18,5	18,7	18,6	268,0	25,7	25,5	25,6	283,0	
	2.2		18,6	18,2	18,4	273,9	26,0	25,8	25,9	276,4	
	2.3		18,0	18,2	18,1	283,0	26,0	26,1	26,05	273,7	
				Promedio							276,33
	3.1	3400	19,4	19,6	19,5	243,8	27,3	27,8	27,55	244,8	
	3.2		19,4	19,5	19,45	245,1	27,2	27,6	27,4	247,0	
	3.3		19,0	19,4	19,2	251,5	27,3	27,1	27,2	250,6	
				Promedio							247,13
	4.1	5000	20,6	20,9	20,75	215,4	28,7	28,9	28,8	223,6	
	4.2		20,4	20,6	20,5	220,6	28,9	29,2	29,05	219,7	
	4.3		20,2	21,0	20,6	218,5	28,9	29,1	29,0	220,5	
				Promedio							219,71
	5.1	6600	21,5	21,7	21,6	198,7	31,9	31,7	31,8	183,4	
	5.2		22,5	22,7	22,6	181,5	32,0	32,2	32,1	180,0	
5.3	22,3		22,1	22,2	188,1	30,8	30,6	30,7	196,8		
			Promedio							188,08	
7 (c)	1.1	200	17,4	17,6	17,5	302,8	24,7	24,5	24,6	306,4	
	1.2		17,1	17,3	17,2	313,4	24,9	24,7	24,8	301,5	
	1.3		17,3	17,4	17,35	308,1	24,3	24,5	24,4	311,5	
				Promedio							307,28
	2.1	1800	18,4	18,6	18,5	270,9	26,1	26,4	26,25	269,1	
	2.2		18,3	18,1	18,2	279,9	26,1	26,3	26,2	270,1	
	2.3		18,6	18,7	18,65	266,5	25,8	26,0	25,9	276,4	
				Promedio							272,15
	3.1	3400	19,3	19,5	19,4	246,4	27,6	27,9	27,75	241,3	
	3.2		19,4	19,2	19,3	248,9	27,5	27,7	27,6	243,4	
	3.3		19,5	19,6	19,55	242,6	27,6	27,4	27,5	245,2	
				Promedio							244,63
	4.1	5000	20,6	20,8	20,7	216,4	29,4	29,5	29,45	213,8	
	4.2		20,7	20,9	20,8	214,3	29,6	29,4	29,5	213,1	
	4.3		21,0	20,9	20,95	211,7	29,3	29,1	29,2	217,5	
			Promedio							214,46	
	5.1		22,3	22,5	22,4	184,8	31,1	31,3	31,2	190,5	

	5.2	6600	22,2	22,4	22,3	186,5	31,9	32,2	32,05	180,5
	5.3		21,9	22,1	22,0	191,6	31,2	31,6	31,4	188,1
	Promedio									187,0
8 (c)	1.1	200	17,8	17,6	17,7	296,0	25,2	25,4	25,3	289,7
	1.2		18,0	18,2	18,1	283,0	25,4	25,6	25,5	285,2
	1.3		17,8	18,0	17,9	289,4	25,1	25,3	25,2	292,0
	Promedio									289,21
	2.1	1800	18,6	18,8	18,7	265,1	26,2	26,8	26,5	264,1
	2.2		18,7	19,0	18,85	260,9	26,5	26,9	26,7	260,1
	2.3		18,7	18,9	18,8	262,3	26,5	26,3	26,4	266,1
	Promedio									263,1
	3.1	3400	19,7	20,1	19,9	234,1	28,1	28,2	28,15	234,0
	3.2		20,2	20,1	20,05	228,8	28,0	27,8	27,9	238,2
	3.3		19,7	19,9	19,8	236,5	28,1	27,9	28,0	236,5
	Promedio									234,68
	4.1	5000	20,7	20,9	20,8	214,3	30,0	30,1	30,15	204,0
	4.2		21,6	21,4	21,5	200,6	29,2	29,4	29,3	216,0
	4.3		21,2	21,1	21,25	205,8	29,8	30,0	29,9	207,4
	Promedio									208,01
	5.1	6600	22,5	22,0	22,25	186,8	30,6	30,8	30,7	196,8
	5.2		22,4	22,6	22,5	183,2	31,7	31,4	31,55	186,3
	5.3		21,6	21,8	21,7	196,9	31,3	31,1	31,2	190,5
	Promedio									190,08
	9 (c)	1.1	200	18,2	18,4	18,3	276,9	25,9	25,7	25,8
1.2		18,6		18,4	18,5	270,9	26,5	26,3	26,4	266,1
1.3		18,5		18,9	18,7	265,1	26,1	26,5	26,3	268,1
Promedio									270,95	
2.1		1800	19,5	19,3	19,4	246,4	27,6	27,8	27,7	241,7
2.2			19,6	20,0	19,8	236,5	28,0	28,2	28,1	234,9
2.3			19,3	20,0	19,65	240,1	27,8	28,0	27,9	238,2
Promedio									239,63	
3.1		3400	20,4	20,8	20,6	218,5	29,1	29,5	29,3	216,0
3.2			20,9	20,8	20,85	213,2	29,5	29,6	29,55	212,9
3.3			20,3	20,7	20,5	220,6	29,1	28,9	29,0	220,5
Promedio									216,95	
4.1		5000	25,8	21,2	21,5	200,6	30,0	30,2	30,1	204,7
4.2			21,0	21,6	21,3	204,4	30,6	30,4	30,5	199,3
4.3			21,5	21,7	21,6	198,7	30,5	30,7	30,6	198,0
Promedio									200,95	
5.1		6600	22,7	22,3	22,5	183,2	31,4	31,2	31,3	189,3
5.2			23,1	22,6	22,85	177,6	31,4	31,6	31,5	186,9
5.3			22,0	22,4	22,2	188,1	32,0	32,1	32,05	180,5

			Promedio							184,26
30	1.1	200	21,6	21,8	21,7	196,9	29,8	30,0	29,9	207,4
	2.1	1800	20,6	21,0	20,8	214,3	30,4	30,6	30,5	199,3
	3.1	3400	21,0	21,1	21,05	209,2	30,4	30,3	30,35	202,6
	4.1	5000	22,3	21,9	22,1	189,8	30,7	30,9	30,8	195,5
	5.1	6600	21,8	22,0	21,9	193,3	31,3	31,5	31,4	188,1
	6.1	8200	21,8	21,8	21,8	195,1	30,9	31,1	31,0	193,0
	Promedio									198,70
33	1.1	200	22,7	22,9	22,8	178,4	32,0	32,2	32,1	180,0
	2.1	1800	22,5	22,6	22,55	182,3	31,6	31,9	31,75	183,8
	3.1	3400	21,3	21,5	21,4	202,5	31,4	31,2	31,3	189,3
	4.1	5000	22,3	22,1	22,2	188,1	30,3	30,5	30,4	200,7
	5.1	6600	22,0	21,6	21,8	195,1	30,8	30,6	30,7	196,8
	6.1	8200	22,3	22,9	22,6	181,5	30,2	30,1	30,15	204,0
	Promedio									190,20
36	1.1	200	21,3	21,1	21,2	206,3	30,4	30,6	30,5	199,3
	2.1	1800	22,5	22,4	22,45	184,0	30,8	31,0	30,9	194,2
	3.1	3400	22,6	22,8	22,7	179,9	29,6	29,9	29,75	209,8
	4.1	5000	22,0	22,1	22,05	190,7	30,2	30,0	30,1	204,7
	5.1	6600	21,6	21,8	21,7	196,9	31,5	31,9	31,7	184,5
	6.1	8200	21,6	22,2	21,9	193,3	31,3	31,5	31,4	188,1
	Promedio									194,30

Anexo 4

Tabla 4.1. Resultados de las Mediciones de Pérdida de Peso (desgaste abrasivo gravimétrico).

Número de Probeta (Experimento)	Número de la Réplica	Desgaste abrasivo gravimétrico		
		G_i (g)	G_f (g)	PP (g)
1	a	34,09285	34,08290	0,00995
	b	32,43180	32,42243	0,00937
	c	31,25794	31,24743	0,01051
	Promedio			0,00981
2	a	38,93795	38,92614	0,01181
	b	33,63601	33,62418	0,01183
	c	31,75403	31,74158	0,01245
	Promedio			0,01203
3	a	31,15710	31,14320	0,01390
	b	32,32945	32,31633	0,01312
	c	33,78016	33,76629	0,01387
	Promedio			0,01363
4	a	30,81100	30,80108	0,00992
	b	32,46044	32,44927	0,01117
	c	31,34825	31,33664	0,01161
	Promedio			0,01090
5	a	25,18860	25,17286	0,01574
	b	35,59480	35,57947	0,01533
	c	31,81855	31,80354	0,01501
	Promedio			0,01536
6	a	29,65870	29,64036	0,01834
	b	30,42357	30,40444	0,01913
	c	31,16243	31,14365	0,01878
	Promedio			0,01875
7	a	34,19124	34,16964	0,02160
	b	33,36418	33,34327	0,02091
	c	32,53632	32,51445	0,02187
	Promedio			0,02146
8	a	33,16421	33,14101	0,02320
	b	30,14389	30,11988	0,02401
	c	31,34650	31,32357	0,02293
	Promedio			0,02338
9	a	31,18634	31,16165	0,02469
	b	30,45240	30,42622	0,02618
	c	32,20625	32,18140	0,02485
	Promedio			0,02524
30		30,52775	30,49350	0,03425

33	28,63205	28,59737	0,03468
36	33,60520	33,57008	0,03512
Promedio			0,03468

ANEXO 5

Modelos de comportamiento mecánico y funcional del acero al alto manganeso, y criterios de validación.

Modelo σ^1_{gen} vs δ y k :

Ecuaciones y otros resultados del ajuste mínimo cuadrado :

$$\sigma^1_{gen} = (629.138407407412) + (7.319066666666658) * (\delta) + (140.5383333333332) * (k)$$

Determinante de la matriz del sistema: 1366875

Determinante normalizado del sistema: 0.000110729923445343

Error máximo al resolver el sistema: 1.13686837721616E-13

Variación explicada: 506180.488899991 Grados de libertad: 2

Variación residual: 75947.7103518518 Grados de libertad: 24

Variación total: 582128.199251852 Grados de libertad: 26

Error estándar de una estimación: 57.4636786424607

Error probable de una observación: 37.9431756114228

Coefficiente de correlación, $r = 0.932488278987792$

Para una prueba con nivel de confianza 0.95:

Intervalo de confianza de r : [0.85569639, 0.96909554]

Para una prueba F de Fisher con nivel de confianza 0.95:

Valor de F_c para el ajuste : 79.9783

Valor de F_t por la tabla : 3.0282

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

Coefficientes de correlación parcial:

0.81538486

0.90773211

Prueba para los Coeficientes del Modelo (0.95)

Valor teórico (t de Student), $t = 1.9622$

$t_2 = 6.90001837$

El coeficiente 2 es estadísticamente significativo ya que $t <= \text{abs}(t_2)$.

$t_3 = 10.59935235$

El coeficiente 3 es estadísticamente significativo ya que $t <= \text{abs}(t_3)$.

Modelo W_I vs δ y k :

Ecuaciones y otros resultados del ajuste mínimo cuadrado :

$$W_I = (0.615682222222224) + (0.00404177777777775) * (\delta) + 0.119249999999999 * (k)$$

Determinante de la matriz del sistema: 1366875

Determinante normalizado del sistema: 0.000110729923445343

Error máximo al resolver el sistema: 1.11022302462516E-16

Variación explicada: 0.301915034343001 Grados de libertad: 2

Variación residual: 0.0989233327777777 Grados de libertad: 24

Variación total: 0.400838367120782 Grados de libertad: 26

Error estándar de una estimación: 0.0655821200373931

Error probable de una observación: 0.0433037695520855

Coefficiente de correlación, $r = 0.867876098224606$

Para una prueba con nivel de confianza 0.95:

Intervalo de confianza de r : [0.72793716, 0.93840164]

Para una prueba F de Fisher con nivel de confianza 0.95:

Valor de F_c para el ajuste : 36.6241

Valor de F_t por la tabla : 3.0282

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

Coefficientes de correlación parcial:

0.56316039

0.84926973

Prueba para los Coeficientes del Modelo (0.95)

Valor teórico (t de Student), $t = 1.711$

$t_2 = 3.33868118$

El coeficiente 2 es estadísticamente significativo ya que $t \leq \text{abs}(t_2)$.

$t_3 = 7.88044770$

El coeficiente 3 es estadísticamente significativo ya que $t \leq \text{abs}(t_3)$.

Modelo HB vs δ y k:

Ecuaciones y otros resultados del ajuste mínimo cuadrado :

$HB = (194.67) + (2.2146666666666666) * (\delta) + (42.844444444444443) * (k)$

Determinante de la matriz del sistema: 1366875000

Determinante normalizado del sistema: 0.000110729923445343

Error máximo al resolver el sistema: 2.8421709430404E-14

Variación explicada: 468362.405555554 Grados de libertad: 2

Variación residual: 52420.9611111111 Grados de libertad: 267

Variación total: 520783.366666666 Grados de libertad: 269

Error estándar de una estimación: 14.0382079473342

Error probable de una observación: 9.45102284513438

Coefficiente de correlación, $r = 0.948336489833737$

Para una prueba con nivel de confianza 0.95:

Intervalo de confianza de r : [0.93478610, 0.95913080]

Para una prueba F de Fisher con nivel de confianza 0.95:

Valor de F_c para el ajuste : 1192.7744

Valor de F_t por la tabla : 2.6386

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

Coefficientes de correlación parcial:

0.85125326

0.92901695

Prueba para los Coeficientes del Modelo (0.95)

Valor teórico (t de Student), $t = 1.6518833333$

$t_2 = 26.50682896$

El coeficiente 2 es estadísticamente significativo ya que $t \leq \text{abs}(t_2)$.

$t_3 = 41.02361327$

El coeficiente 3 es estadísticamente significativo ya que $t \leq \text{abs}(t_3)$.

Modelo HB vs σ^2 gen:

Ecuaciones y otros resultados del ajuste mínimo cuadrado :

$HB = (23.2518377638786) + (0.285554420879207) * (\text{GAMMA})$
 Determinante de la matriz del sistema: 15717461.3797998
 Determinante normalizado del sistema: 1.70422930062931E-5
 Error máximo al resolver el sistema: 4.61852778244065E-14
 Variación explicada: 47467.5060162425 Grados de libertad: 1
 Variación residual: 2572.53250227796 Grados de libertad: 25
 Variación total: 50040.0385185185 Grados de libertad: 26
 Error estándar de una estimación: 10.3532050236428
 Error probable de una observación: 6.84214675389087
 Coeficiente de correlación, $r = 0.97395611664238$
 Para una prueba con nivel de confianza 0.95:
 Intervalo de confianza de r : [0.94293951, 0.98821516]
 Para una prueba F de Fisher con nivel de confianza 0.95:
 Valor de F_c para el ajuste : 461.2916
 Valor de F_t por la tabla : 3.4029
 El ajuste es estadísticamente significativo ya que $F_c > F_t$.
 Coeficientes de correlación parcial:
 0.97395612
 Prueba para los Coeficientes del Modelo (0.95)
 Valor teórico (t de Student), $t = 1.708$
 $t^2 = 21.47770021$
 El coeficiente 2 es estadísticamente significativo ya que $t \leq \text{abs}(t_2)$.

Modelo HV vs δ y k y el radio:

Ecuaciones y otros resultados del ajuste mínimo cuadrado :
 $HV = (-96.7745493827301) + (1.7144148148149) * (\delta) + (26.9457407407413) * (k) + (0.0227971450617293) * (\text{RADIO})$
 Determinante de la matriz del sistema: 1.53055008E20
 Determinante normalizado del sistema: 3.62395792849535E-14
 Error máximo al resolver el sistema: 3.62395792849535E-14
 Variación explicada: 2795416.4996175 Grados de libertad: 3
 Variación residual: 352639.411604939 Grados de libertad: 806
 Variación total: 3148055.91122223 Grados de libertad: 809
 Error estándar de una estimación: 20.9299159309277
 Error probable de una observación: 14.1084679915604
 Coeficiente de correlación, $r = 0.942327886715834$
 Para una prueba con nivel de confianza 0.95:
 Intervalo de confianza de r : [0.93407573, 0.94957400]
 Para una prueba F de Fisher con nivel de confianza 0.95:
 Valor de F_c para el ajuste : 2129.7541
 Valor de F_t por la tabla : 2.3850
 El ajuste es estadísticamente significativo ya que $F_c > F_t$.
 Coeficientes de correlación parcial:
 0.64256512
 0.72558926
 0.92703455

Prueba para los Coeficientes del Modelo

Valor teórico (t de Student), $t = 1.6479981622$

23.80810892

El coeficiente 2 es estadísticamente significativo ya que $t \leq \text{abs}(t_2)$.

29.93567834

El coeficiente 3 es estadísticamente significativo ya que $t \leq \text{abs}(t_3)$.

70.18754458

El coeficiente 4 es estadísticamente significativo ya que $t \leq \text{abs}(t_4)$.

Modelo n vs δ y k:

Ecuaciones y otros resultados del ajuste mínimo cuadrado :

$n = (2.03472653274445) + (-0.000187189435555618) + (0.00278303588888605) * (k)$

Determinante de la matriz del sistema: 1366875

Determinante normalizado del sistema: 0.000110729923445343

Error máximo al resolver el sistema: 4.44089209850063E-16

Variación explicada: 0.000237965327728274 Grados de libertad: 2

Variación residual: 0.00845334863809338 Grados de libertad: 24

Variación total: 0.00869131396582187 Grados de libertad: 26

Error estándar de una estimación: 0.0191712518451041

Error probable de una observación: 0.0126587471013751

Coefficiente de correlación, $r = 0.165468039938386$

Para una prueba con nivel de confianza 0.95:

Intervalo de confianza de r : [-0.22894879, 0.51321662]

Para una prueba F de Fisher con nivel de confianza 0.95:

Valor de F_c para el ajuste : 0.3378

Valor de F_t por la tabla : 3.0282

El ajuste no es estadísticamente significativo ya que $F_c \leq F_t$.

Coefficientes de correlación parcial:

-0.10734859

0.12737630

Prueba para los Coeficientes del Modelo (0.95)

Valor teórico (t de Student), $t = 1.711$

$t_2 = -0.52895513$

El coeficiente 2 no es estadísticamente significativo ya que $t > \text{abs}(t_2)$.

$t_3 = 0.62913854$

El coeficiente 3 no es estadísticamente significativo ya que $t > \text{abs}(t_3)$.

Modelo c vs δ y k:

Ecuaciones y otros resultados del ajuste mínimo cuadrado :

$c = (158.788517484889) + (1.76317532651086) * (\delta) + (35.0504728286949) * (k)$

Determinante de la matriz del sistema: 1366875

Determinante normalizado del sistema: 0.000110729923445343

Error máximo al resolver el sistema: 2.8421709430404E-14

Variación explicada: 30857.1057093187 Grados de libertad: 2

Variación residual: 2137.3847898606 Grados de libertad: 24

Variación total: 32994.4904991798 Grados de libertad: 26

Error estándar de una estimación: 9.64000899751655

Error probable de una observación:6.36528260859012

Coefficiente de correlación, $r = 0.967067706325655$

Para una prueba con nivel de confianza 0.95:

Intervalo de confianza de r : [0.92814606, 0.98506963]

Para una prueba F de Fisher con nivel de confianza 0.95:

Valor de F_c para el ajuste : 173.2422

Valor de F_t por la tabla : 3.0282

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

Coefficientes de correlación parcial:

0.89641760

0.95491578

Prueba para los Coeficientes del Modelo (0.95)

Valor teórico (t de Student), $t = 1.711$

$t_2 = 9.90845700$

El coeficiente 2 es estadísticamente significativo ya que $t <= \text{abs}(t_2)$.

$t_3 = 15.75775693$

El coeficiente 3 es estadísticamente significativo ya que $t <= \text{abs}(t_3)$.

Modelo n vs δ , k y el radio:

Ecuaciones y otros resultados del ajuste mínimo cuadrado :

$n = (2.19072957051349) + (-0.00160859973262923) * (\delta) + (0.0158046888932451) * (k) + (-2.12163120620971E-5) * (\text{RADIO})$

Determinante de la matriz del sistema:1.18098E17

Determinante normalizado del sistema:3.62395792849535E-14

Error máximo al resolver el sistema:3.62395792849535E-14

Variación explicada:0.370000132720506 Grados de libertad: 3

Variación residual:13.0640928531116 Grados de libertad: 131

Variación total:13.4340929858321 Grados de libertad: 134

Error estándar de una estimación:0.31700634370153

Error probable de una observación:0.213003105549277

Coefficiente de correlación, $r = 0.16595745451638$

Para una prueba con nivel de confianza 0.95:

Intervalo de confianza de r : [-0.00308936, 0.32578263]

Para una prueba F de Fisher con nivel de confianza 0.95:

Valor de F_c para el ajuste : 1.2367

Valor de F_t por la tabla : 2.4414

El ajuste no es estadísticamente significativo ya que $F_c <= F_t$.

Coefficientes de correlación parcial:

-0.05270304

0.04144711

-0.15251804

Prueba para los Coeficientes del Modelo

Valor teórico (t de Student), $t = 1.65783$

-0.60405332

El coeficiente 2 no es estadísticamente significativo ya que $t > \text{abs}(t_2)$.

0.47479182

El coeficiente 3 no es estadísticamente significativo ya que $t > \text{abs}(t_3)$.

-1.76631346

El coeficiente 4 es estadísticamente significativo ya que $t \leq \text{abs}(t_4)$.

Modelo c vs δ , k y el radio:

Ecuaciones y otros resultados del ajuste mínimo cuadrado :

$$c = (-0.0565460763571601) + (0.000928274914378804) * (\delta) + (0.0178159936484032) * (k) + (1.24310910021959E-5) * (\text{RADIO})$$

Determinante de la matriz del sistema: 1.18098E17

Determinante normalizado del sistema: 3.62395792849535E-14

Error máximo al resolver el sistema: 3.62395792849535E-14

Variación explicada: 0.147496977645866 Grados de libertad: 3

Variación residual: 0.0627929528176065 Grados de libertad: 131

Variación total: 0.21028993046347 Grados de libertad: 134

Error estándar de una estimación: 0.0219777777307349

Error probable de una observación: 0.0147673224928454

Coefficiente de correlación, $r = 0.837495191008576$

Para una prueba con nivel de confianza 0.95:

Intervalo de confianza de r : [0.77872756, 0.88169289]

Para una prueba F de Fisher con nivel de confianza 0.95:

Valor de F_c para el ajuste : 102.5704

Valor de F_t por la tabla : 2.4414

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

Coefficientes de correlación parcial:

0.40219480

0.55918265

0.79358082

Prueba para los Coeficientes del Modelo

Valor teórico (t de Student), $t = 1.65783$

5.02791673

El coeficiente 2 es estadísticamente significativo ya que $t \leq \text{abs}(t_2)$.

7.71989687

El coeficiente 3 es estadísticamente significativo ya que $t \leq \text{abs}(t_3)$.

14.92764524

El coeficiente 4 es estadísticamente significativo ya que $t \leq \text{abs}(t_4)$.

Modelo N vs δ y k:

Ecuaciones y otros resultados del ajuste mínimo cuadrado :

$$N = (11.8224201900744) + (1.12383544151111) * (\delta) + (21.0144638711111) * (k)$$

Determinante de la matriz del sistema: 1366875

Determinante normalizado del sistema: 0.000110729923445343

Error máximo al resolver el sistema: 5.32907051820075E-15

Variación explicada: 11501.1431073397 Grados de libertad: 2

Variación residual: 1139.26262989721 Grados de libertad: 24

Variación total: 12640.405737237 Grados de libertad: 26

Error estándar de una estimación: 7.03797966902562

Error probable de una observación: 4.64716678152486

Coefficiente de correlación, $r = 0.953871771207133$

Para una prueba con nivel de confianza 0.95:
Intervalo de confianza de r : [0.90014596, 0.97901008]

Para una prueba F de Fisher con nivel de confianza 0.95:

Valor de Fc para el ajuste : 121.1430

Valor de Ft por la tabla : 3.0282

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

Coefficientes de correlación parcial:

0.87015104

0.93522391

Prueba para los Coeficientes del Modelo (0.95)

Valor teórico (t de Student), $t = 1.711$

$t_2 = 8.65052936$

El coeficiente 2 es estadísticamente significativo ya que $t \leq \text{abs}(t_2)$.

$t_3 = 12.94041672$

El coeficiente 3 es estadísticamente significativo ya que $t \leq \text{abs}(t_3)$.

Modelo PP vs δ y k:

Ecuaciones y otros resultados del ajuste mínimo cuadrado :

$PP = (0.0328309259259259) + (-0.00020422222222222222) * (\delta) + (-0.0057461111111111112) * (k)$

Determinante de la matriz del sistema: 1366875

Determinante normalizado del sistema: 0.000110729923445343

Error máximo al resolver el sistema: 6.93889390390723E-18

Variación explicada: 0.000711620865226517 Grados de libertad: 2

Variación residual: 6.44202185185185E-5 Grados de libertad: 24

Variación total: 0.000776041083745035 Grados de libertad: 26

Error estándar de una estimación: 0.00167358270366975

Error probable de una observación: 0.00110506399739364

Coefficiente de correlación, $r = 0.957595242967469$

Para una prueba con nivel de confianza 0.95:

Intervalo de confianza de r : [0.90800198, 0.98072441]

Para una prueba F de Fisher con nivel de confianza 0.95:

Valor de Fc para el ajuste : 132.5585

Valor de Ft por la tabla : 3.0282

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

Coefficientes de correlación parcial:

-0.80342894

-0.94984577

Prueba para los Coeficientes del Modelo (0.95)

Valor teórico (t de Student), $t = 1.9622$

$t_2 = -6.61064426$

El coeficiente 2 es estadísticamente significativo ya que $t \leq \text{abs}(t_2)$.

$t_3 = -14.88006390$

El coeficiente 3 es estadísticamente significativo ya que $t \leq \text{abs}(t_3)$.

Modelo PP vs HB:

Ecuaciones y otros resultados del ajuste mínimo cuadrado :

$PP = (0.0562930800219052) + (-0.000119776691559521) * (HB)$

Determinante de la matriz del sistema:1351081.04
 Determinante normalizado del sistema:5.06206268280945E-5
 Error máximo al resolver el sistema:6.93889390390723E-18
 Variación explicada:0.000717897297790571 Grados de libertad: 1
 Variación residual:5.81434267445075E-5 Grados de libertad: 25
 Variación total:0.000776040724535106 Grados de libertad: 26
 Error estándar de una estimación:0.00155648410882384
 Error probable de una observación:0.00102863728365776
 Coeficiente de correlación, $r = 0.961809147207859$
 Para una prueba con nivel de confianza 0.95:
 Intervalo de confianza de r : [0.91693502, 0.98266025]
 Para una prueba F de Fisher con nivel de confianza 0.95:
 Valor de F_c para el ajuste : 308.6752
 Valor de F_t por la tabla : 3.4029
 El ajuste es estadísticamente significativo ya que $F_c > F_t$.
 Coeficientes de correlación parcial:
 -0.96180914
 Prueba para los Coeficientes del Modelo (0.95)
 Valor teórico (t de Student), $t = 2.1469$
 $t^2 = -17.56915293$
 El coeficiente 2 es estadísticamente significativo ya que $t \leq \text{abs}(t^2)$.

Modelo PP vs $\sigma 1^{\circ}$ gen:

Ecuaciones y otros resultados del ajuste mínimo cuadrado :
 $PP = (0.0534220600504157) + (-3.41227635646863E-5) * (\sigma 1^{\circ} \text{gen})$
 Determinante de la matriz del sistema:15717461.3797998
 Determinante normalizado del sistema:1.70422930062931E-5
 Error máximo al resolver el sistema:6.93889390390723E-18
 Variación explicada:0.000677808543317294 Grados de libertad: 1
 Variación residual:9.82320970693714E-5 Grados de libertad: 25
 Variación total:0.000776040640386657 Grados de libertad: 26
 Error estándar de una estimación:0.00202311740750683
 Error probable de una observación:0.00133702232022857
 Coeficiente de correlación, $r = 0.934568817853855$
 Para una prueba con nivel de confianza 0.95:
 Intervalo de confianza de r : [0.85997198, 0.97006541]
 Para una prueba F de Fisher con nivel de confianza 0.95:
 Valor de F_c para el ajuste : 172.5018
 Valor de F_t por la tabla : 3.4029
 El ajuste es estadísticamente significativo ya que $F_c > F_t$.
 Coeficientes de correlación parcial:
 -0.93456882
 Prueba para los Coeficientes del Modelo (0.95)
 Valor teórico (t de Student), $t = 1.708$
 $t^2 = -13.13399397$
 El coeficiente 2 es estadísticamente significativo ya que $t \leq \text{abs}(t^2)$.

Modelo Ce vs δ y k:

Ecuaciones y otros resultados del ajuste mínimo cuadrado :

$$Ce = (5.30328321140331)*(1) + (0.0805184389425811)*(\delta) + (1.74580916759755)*(k)$$

Determinante de la matriz del sistema:1366875

Determinante normalizado del sistema:0.000110729923445343

Error máximo al resolver el sistema:8.88178419700125E-16

Variación explicada:73.095347159394 Grados de libertad: 2

Variación residual:5.57320483182584 Grados de libertad: 24

Variación total:78.6685519912196 Grados de libertad: 26

Error estándar de una estimación:0.492253241287089

Error probable de una observación:0.325034032291259

Coefficiente de correlación, $r = 0.963927317652244$

Para una prueba con nivel de confianza 0.95:

Intervalo de confianza de r : [0.92144237, 0.98363161]

Para una prueba F de Fisher con nivel de confianza 0.95:

Valor de F_c para el ajuste : 157.3860

Valor de F_t por la tabla : 3.0282

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

Coefficientes de correlación parcial:

0.87515891

0.95277546

Prueba para los Coeficientes del Modelo (0.95)

Valor teórico (t de Student), $t = 1.9622$

$t_2 = 8.86124471$

El coeficiente 2 es estadísticamente significativo ya que $t <= \text{abs}(t_2)$.

$t_3 = 15.37043436$

El coeficiente 3 es estadísticamente significativo ya que $t <= \text{abs}(t_3)$.

Tabla 5.1 Tabla del Coeficiente de Endurecimiento normalizado entre 0 y 1.

No. EXP	δ	k	$\sigma 1^{\circ}\text{gen (MPa)}$	HB	PP (g)	Ce	Ce(n)
1b	35	3	1289,87	397,2	0,00937	2,53	0,97
1c	35	3	1320,3	405,6	0,01051	2,64	0,99
1a	35	3	1334,93	399,1	0,00995	2,68	1
2a	22,5	3	1220,43	376,1	0,01181	1,72	0,82
2c	22,5	3	1225,08	368,1	0,01245	1,56	0,79
2b	22,5	3	1199,31	370,1	0,01183	1,55	0,79
3b	10	3	1063,19	336,9	0,01312	0,43	0,58
3a	10	3	1067,21	339,1	0,0139	0,39	0,57
3c	10	3	1042,63	336,9	0,01387	0,27	0,55
4b	35	2	1237,91	376,9	0,01117	1,87	0,85
4c	35	2	1270,61	378,3	0,01161	1,98	0,87
4a	35	2	1234,36	384,1	0,00992	2,08	0,89
5b	22,5	2	1056,48	329,3	0,01533	0,06	0,51
5c	22,5	2	1043,73	329,5	0,01501	0,05	0,51
5a	22,5	2	1079,6	314,5	0,01574	-0,08	0,49
6a	10	2	1014,37	302	0,01834	-0,79	0,36
6b	10	2	1048,48	305,4	0,01913	-0,69	0,37
6c	10	2	1040,39	308,3	0,01878	-0,65	0,38
7b	35	1	917,08	298,1	0,02091	-1,50	0,22
7a	35	1	969,69	298,4	0,0216	-1,36	0,25
7c	35	1	982,91	297,4	0,02187	-1,35	0,25
8b	22,5	1	872,9	284,7	0,02401	-2,18	0,098
8a	22,5	1	926,52	286,3	0,0232	-1,86	0,16
8c	22,5	1	929,56	284,7	0,02293	-1,84	0,16
9b	10	1	850,82	269,1	0,02618	-2,72	0
9a	10	1	842,58	268,6	0,02469	-2,59	0,02
9c	10	1	941,2	270,5	0,02485	-2,20	0,09