

Universidad Nacional de Ingeniería

Programa Académico de Ingeniería Geológica Minera y Metalúrgica



Selección de Materiales Óptimos
Para Forros de Molinos en Acero y
Fierro para la Industria Minera

TESIS PARA OPTAR EL TITULO DE:

INGENIERO DE MINAS

Carlos Francisco Ratto Diminich

Promoción 1969

LIMA - PERU

SELECCION DE MATERIALES OPTIMOS PARA
FORROS DE MOLINOS EN ACERO Y FIERRO
PARA LA INDUSTRIA MINERA.

Carlos F. Ratto

I N D I C E

	<u>Pág.</u>	
1.0	INTRODUCCION	1
2.0	MOLIENDA	4
2.1.	TIPOS USUALES DE MOLINOS	4
2.2.	METODO DE DESCARGA	5
2.3.	MOLIENDA SECA Y HUMEDA	6
2.4.	GRADO DE MOLIENDA	8
2.4.1.	FACTORES QUE DETERMINAN EL GRADO DE MOLIENDA Y ELEMEN TOS DE INFLUENCIA EN EL DES GASTE DE LOS FORROS.	8
3.0	CONSIDERACIONES PARA UNA MEJOR SELECCION DE LOS MATERIALES PARA LA FABRICACION DE LOS FORROS DE MOLINOS.	14
3.1.	GENERALIDADES	14
3.2.	ALTO IMPACTO, MEDIANO IMPACTO Y PULVERIZACION.	14
	ABRASION TIPO "GOUGING"	15-16
	ABRASION TIPO ESMERILADO	17
	ABRASION TIPO ARAÑADO	17
3.3.	EVALUACION DEL DESGASTE ABRASIVO	19
4.0	PRINCIPALES MATERIALES DISPONIBLES DE ACERO Y FIERRO FUNDIDO PARA LA FABRICA CION DE FORROS DE MOLINO.	23
4.1.	ACEROS AL MANGANESO	24
4.1.1	ACEROS AL MANGANESO	24

4.1.2	CARACTERÍSTICAS	24
4.1.3	ESPECIFICACIONES	25
4.1.4	EFEECTO DE LOS ALEANTES	26
4.1.5	PROPIEDADES	27
4.1.6	ELEMENTOS ADICIONALES	28
4.1.7	CONSTANTES FISICAS	29
4.1.8	TAMAÑO DEL GRANO	29
4.1.9	SOLDADURA Y SOBRECALENTAMIENTO	29
4.1.10	MECANIZADO	30
4.1.11	APLICACIONES	30
4.2.	VARIACIONES DEL ANALISIS ORIGINAL	
	HADFIELD.	32
4.2.1	ALEACION 6 - 2 - 1	32
4.2.2	COMPOSICION QUIMICA	32
4.2.3	PROPIEDADES MECANICAS	32
4.2.4	APLICACION	33
4.3.	ACERO AL CROMO-MOLIBDENO PERLITICO	
4.3.1	INTRODUCCION	34
4.3.2	CARACTERISTICAS	34
4.3.3	ESPECIFICACIONES	35
4.3.4	COMPOSICION QUIMICA	35
4.3.5	PROPIEDADES MECANICAS DESPUES DEL TRATAMIENTO TERMICO.	35
4.3.6	APLICACION	36
4.4.	ACERO CROMO - MOLIBDENO DE ALTO SILICIO.	

	Pág.	
4.4.1	INTRODUCCION	37
4.4.2	CARACTERISTICAS	37
4.4.3	ESPECIFICACIONES	38
4.4.4	EFECTO DE LOS ALEANTES	38
4.4.5	PROPIEDADES FISICAS	40
4.4.6	APLICACION	40
4.5.	HIERRO BLANCO AL NIQUEL. CROMO	
4.5.1	INTRODUCCION	45
4.5.2	CARACTERISTICAS	45
4.5.3	COMPOSICION QUIMICA	46
4.5.4	EFECTO DE LOS ALEANTES	46
4.5.5	PROPIEDADES	50
4.5.6	APLICACIONES	51
4.6.	FIERRO BLANCO MARTENSITICO AL Cr - Mo	52
4.6.1	INTRODUCCION	52
4.6.2	CARACTERISTICAS	52
4.6.3	ESPECIFICACIONES	53
4.6.4	EFECTO DE LOS ALEANTES	55
4.6.5	PROPIEDADES	57
4.6.6	APLICACIONES	58
5.	COSTO DE ADQUISICION	59
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	60
7.	BIBLIOGRAFIA	64

1.0. INTRODUCCION

A lo largo de los doce años que llevo trabajando en la industria fabricando productos fundidos utilizados básicamente por el sector minero considero oportuno resumir las experiencias recogidas en el ámbito nacional y en los Estados Unidos de Norteamérica en un tema que tiene por finalidad servir de referencia al minero para una mejor selección de los materiales de acero y fierro fundido empleados en la fabricación de los forros de molino.

Los factores que afectan el desgaste de los forros de molino son múltiples; existe en la actualidad una amplia selección de equipo de molienda, cada uno con diseño y características propias, integrando diagramas de flujo de variadas concepciones técnicas y operativas, moliendo materiales de distintas durezas en condiciones propias para cada localidad.

La combinación de todas estas consideraciones, la amplia selección de materiales existentes y la poca literatura disponible hacen que este sea un tópico complejo y en donde las recomendaciones para seleccionar el material adecuado corresponderá a un concienzudo análisis

sis, producto de las variables de cada condición particular.

Los fabricantes de forros para molinos somos concientes de lo que representa al minero el cambio de estos re - puestos en función del costo que ello representa y del volúmen de mineral que por esta causa deja de procesarse, constituyendo un permanente reto tecnológico en el desarrollo de mejores materiales.

Estos componentes dependiendo del trabajo a que están sometidos deberán ser resistentes a la abrasión sopor - tar impacto y tolerar la corrosión.

Se considera, actualmente, utópico diseñar un material que reúna la combinación de ser altamente resistente al impacto y a la abrasión. Los materiales conocidos que poseen una superlativa resistencia a la abrasión detectan gran dureza superficial y resultan muy frágiles, no siendo por esta causa indicados para trabajar en un medio que desarrolla un alto impacto por cuanto se rajarían y luego terminarían quebrándose. En la misma forma los forros de molinos fabricados con materiales resistentes al impacto ofrecen una pobre per - formance cuando son sometidos a trabajos específicos de resistencia a la abrasión, desgastándose prematuramente.

Tradicionalmente el Acero al Manganeso Hadfield constituyó el material de uso más difundido en la construcción de forros para molienda de minerales, por tratarse conservadamente de un producto de abastecimiento asegurado, costo relativamente bajo y durabilidad satisfactoria, teniendo en cuenta las condiciones operativas existentes.

Ultimamente se ha concretado un avance tecnológico muy positivo en este terreno, habiéndose desarrollado nuevos materiales que combinan una elevada dureza y resistencia a la abrasión que han desplazado al acero al manganeso en aplicaciones en donde no se transmite un severo impacto.

Ello en buena parte ha sido posible debido a que las fundiciones hoy en día están equipadas con modernos y eficientes equipos de control para determinación de los elementos químicos, durante la preparación de la colada como es el caso del espectógrafo, Rayos X y ultrasonido, para verificar la solidez de las piezas, el microscopio metalográfico para la determinación de la estructura metalográfica, tintes penetrantes y magnaflux para explorar posibles rajaduras, durómetros para precisar dureza, Máquina Universal y Charpy para ensayos físicos, máquinas para pruebas al impacto etc. Complementando con personal técnico para asistir al minero y recomendarle las soluciones adecuadas para conseguir el mejor rendimiento de sus productos fundidos.

2.0. MOLIENDA

El término "Moler" esta referido a la reducción en tamaño que experimentan las partículas de mineral haciéndolas rotar en una máquina (molino) horizontal y cilíndrica conjuntamente con elementos triturados que pueden ser barras o bolas.

2.1. TIPOS USUALES DE MOLINOS

La molienda de minerales se realiza básicamente en molinos de barras o molinos de bolas. En los molinos de barras los elementos triturados del mineral lo constituyen las barras de molino usualmente fabricadas de acero aleado o de alto carbón rolado en caliente que deberán poseer la dureza suficiente para maximizar su resistencia al desgaste sin llegar a romperse excesivamente.

El largo de las barras usadas serán de 6 a 9 pulgadas más cortas que la distancia entre los forros cabezales medidos cuando están nuevos entre los puntos de empalme con los forros del cilindro. El diámetro de las barras varían desde 1/2 hasta 5 pulgadas.

Los molinos de barras se utilizan para triturar materiales de un tamaño máximo de 2" a un tamaño reducido desde malla 4 hasta malla 35.

El uso más común de los molinos de barras es para reducir los productos provenientes de la Planta de chancado hasta un tamaño adecuado para alimentar los molinos de bolas.

Los molinos de bolas se utilizan preferentemente para triturar y pulverizar minerales desde malla 35 hasta ± 50 micrones aproximadamente. Las Bolas varían en su diámetro desde 3/4" hasta 5" dependiendo del grado de finura del material que se desea moler.

En la industria minera el flujograma más común está constituido por chancadoras, molinos de barras y molinos de bolas. En la industria del cemento y algunas operaciones mineras especiales los molinos de bolsas se utilizan para realizar la molienda primaria y secundaria.

2.2. METODO DE DESCARGA.

El método de descarga del material molido en los molinos de barras pueden ser:

- 1.- Descarga libre (overflow)
- 2.- Descarga periférica central
- 3.- Descarga periférica en la salida.

En los molinos de bolas el método de descarga puede ser:

- 1.- Descarga libre (overflow)
- 2.- A través de forros de molino perforados (forros de rejilla) de nivel intermedio y de bajo nivel.

2.3. MOLIENDA SECA Y HUMEDA

Se considera molienda por vía húmeda cuando la trituración de los materiales se realiza en presencia de agua o de otros líquidos en cantidad suficiente para producir una pulpa fluida constituida generalmente por 60% a 80% de sólidos.

La molienda seca se efectúa cuando el grado de humedad está restringido usualmente por debajo del 5%.

La mayoría de los materiales pueden molerse en cualquiera de los dos métodos, utilizando molinos de bolas o de barras. Su selección es determinada por la condición de la alimentación a los molinos y los requerimientos del producto molido para los tratamientos posteriores.

En la industria minera la molienda húmeda se utiliza preferentemente debido a que los procesos posteriores de flotación, separación magnética y lixiviación se realizan en medio húmedo.

En la industria del cemento y otros minerales no metálicos, debido a la naturaleza de esos materiales se utiliza el tipo de molienda seca.

Algunas referencias de estos dos tipos de molienda:

- 1.- Molienda húmeda requiere menos potencia por ton. de material molido que la molienda seca.
- 2.- Molienda húmeda requiere menos espacio que la molienda seca cuando se utilizan clasificadores.
- 3.- Molienda húmeda no requiere de sistemas elaborados y costosos colectores de polvo.
- 4.- Molienda seca está limitada a moler material con bajo contenido de humedad, de lo contrario un pre-secado será requerido.
- 5.- Molienda seca emplea menos cantidad de elementos trituradores y forros de molino por tonelada de mineral molido.
- 6.- Molienda seca en circuito abierto elimina la necesidad de filtrado y secado del producto molido.

2.4. GRADO DE MOLIENDA

El grado de molienda en su forma más simple puede ser de:

- 1) Alto impacto
- 2) Moderado impacto
- 3) Abrasión

Los elementos que determinan el grado de molienda son múltiples y en la mayoría de los casos no es posible aislarlos individualmente ya que se presentan en forma combinada, el conocimiento de estas variables y los ensayos que se puedan efectuar con forros de molino de diferentes materiales permitirá al operador efectuar la selección óptima del material para su aplicación particular.

2.4.1. FACTORES QUE DETERMINAN EL GRADO DE MOLIENDA Y ELEMENTOS DE INFLUENCIA EN EL DESGASTE DE LOS FORROS.

VELOCIDAD CRITICA (V.C.)

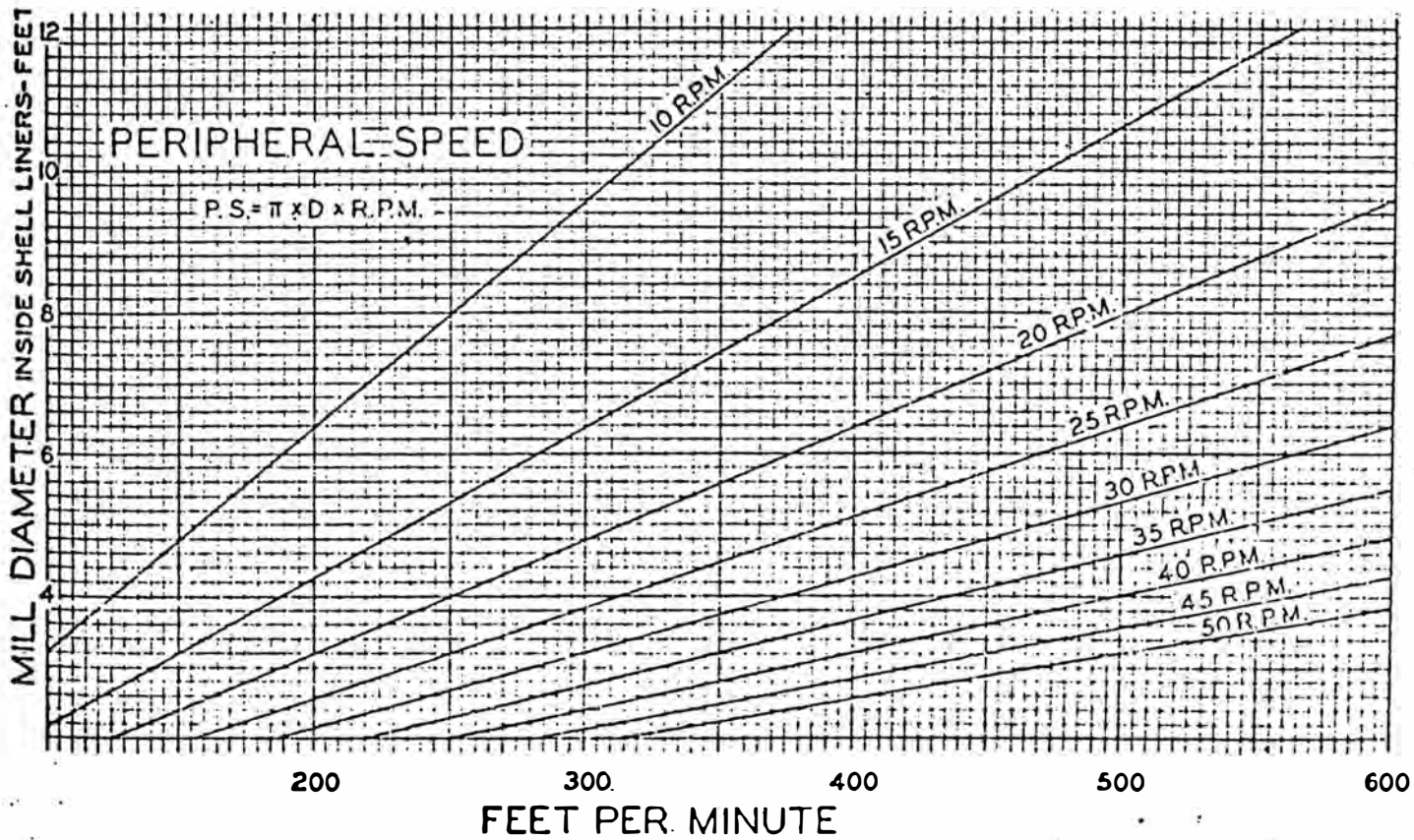
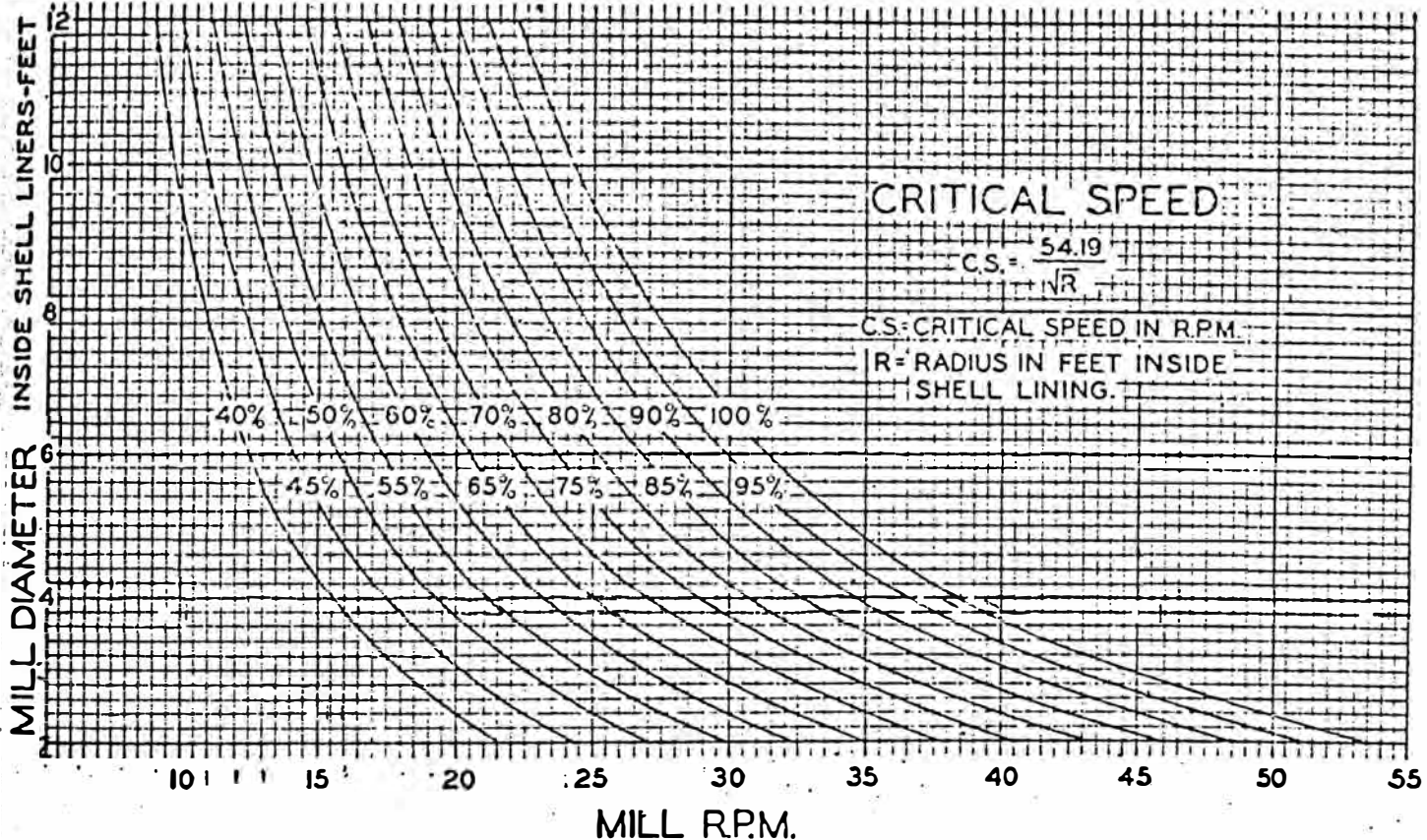
Es la velocidad teórica expresada en r.p.m. a la cual una partícula infinita centrifugará como si fuera parte del cilindro del molino.

Se expresa mediante la siguiente fórmula:

$$\text{Velocidad crítica (en r.p.m.)} = 76.6 \sqrt{\frac{1}{D}}$$

Diámetro interno de la parte cilíndrica del molino medido entre los forros del molino y expresado en piés.

Theoretically critical speed is the point at which centrifugal and gravity forces acting on an infinite particle traveling on the shell liner offset each other or become equal. The formula used in calculating critical speed is shown on the graph below.



The above graph provides peripheral speeds for various mill diameters. Such speeds are measured on the inside diameter of shell liners.

La velocidad crítica sirve para determinar el grado de impacto existente en un molino bajo las siguientes condiciones:

1.- Solamente es aplicable a los molinos de bolas que son elementos que pueden tener caída libre en cambio las barras son elementos rígidos que siempre poseen cierta caída combinada del tipo catarata de rodamiento, y de "latigazo" especialmente en los forros extremos, por lo que no semejan la acción que se consigue en el caso de las bolas de trayectoria proyectada y libre.

2.- La velocidad crítica presupone que los forros de molino posean la misma configuración que el cilindro del molino. La presencia de pronunciadas ondas y de barras de cuña que tienen por objeto elevar el material establecen condiciones operativas específicas de distinta naturaleza al grado de impacto calculado como porcentaje de la velocidad crítica.

Cálculo del grado de impacto de un molino de bolas que opera a una velocidad periférica de 17.3 r.p.m. y que mide 11" 0" de diámetro interno entre los forros de la pared cilíndrica.

Velocidad crítica

$$V.C = 76.6 \sqrt{\frac{1}{11}}$$

$$V.C = 23.1 \text{ r.p.m.}$$

La velocidad del molino expresada en porcentaje de la velocidad crítica será:

$$\frac{17.3 \times 100}{23.1} = \underline{74.9\%}$$

El molino esta sometido a alto impacto

La siguiente tabla ilustra la acción ejercida por una carga normal de bolas operando a diversos porcentajes de velocidad crítica..

TABLA Nº 1

Velocidad	10	20	30	40	50	60	70	80	90
Crítica									
Rodando	3	3	3	2	2	2	2	2	-
Catarata			1	1	1	2	3	3	2
Centrifugando					1	1	2	2	3

1 Indica poca cantidad

2 Indica apreciable cantidad

3 Indica gran cantidad.

Como se aprecia en la Tabla Nº 1 los forros de los molinos de bolas que no poseen pronunciadas ondas ni tienen barras levantadoras de material estarán sometidos a un

desgaste por abrasión cuanto más bajo es el porcentaje de la velocidad crítica (hasta 30% aprox.) a un desgaste por acción combinada de impacto y abrasión con preponderancia del desgaste abrasivo cuando el porcentaje de la velocidad crítica está entre 30 y 60%; cuando el porcentaje de la velocidad crítica fluctúa entre 70 y 80% se obtiene desgaste por alto impacto con ligera combinación del efecto abrasivo. Por encima de 80% la mayoría de las bolas estarán centrifugando.

TAMAÑO DE LAS BOLAS

El tamaño de las bolas tiene un efecto directo en el grado de impacto tanto en las bolas mismas como en los forros de molino. Cuando más grande es el diámetro mayor será el impacto.

TIPO DE DESCARGA

Molinos de descarga del tipo "overflow", tendrán menos impacto que los molinos de descarga a través de forros de rejilla debido a que tienen mayor cantidad de pulpa que absorbe parte del impacto.

FORMA DE LOS FORROS DE MOLINO.

El diseño de los forros de molino tiene una relación directa en el grado de impacto, pudiendo conseguirse el efecto de alto impacto a velocidades bajas expresadas co

mo porcentaje de la velocidad crítica, utilizando forros de molino con ondas o combinados con barras para levantar el material.

CONDICIONES OPERATIVAS

La dosificación del volumen de mineral y de los elementos trituradores dentro del molino tienen un efecto directo en la duración de los forros. Una disminución en la alimentación del mineral significará que los elementos trituradores y los forros de molino absorberán mayor impacto.

NATURALEZA DEL MINERAL

La dureza del mineral y de las rocas que lo acompañan influyen en la duración de los forros de molino.

Así se tiene que el cuarzo es aproximadamente de la misma dureza que los aceros martensíticos (450-700 Brinell) y definitivamente más duro que los aceros perlíticos (250-450 Brinell) y que los aceros austeníticos.

Los feldespatos son más blandos que los aceros martensíticos pero más duros que los aceros perlíticos y austeníticos. La calcita es más blanda que todos los aceros aleados.

3.0. CONSIDERACIONES PARA UNA MEJOR SELECCION DE LOS MATERIALES
PARA LA FABRICACION DE LOS FORROS DE MOLINOS.

3.1. GENERALIDADES

Los Forros para Molinos utilizados en la molienda de minerales deberán estar diseñados para el tipo de desgaste a que estarán sometidos.

El mejor material será aquel que provea la máxima economía de molienda por tonelada de mineral molido, generalmente será necesario llevar a cabo pruebas con diferentes materiales hasta determinar el de mejor rendimiento.

Para efectuar una selección de mayor sustento técnico debemos, estudiar los tipos de desgaste característicos en las diversas operaciones de molienda.

3.2. ALTO IMPACTO, MEDIANO IMPACTO Y PULVERIZACION

Se utiliza el tipo de molienda de Alto Impacto cuando se desea triturar el mineral en la fase primaria de la reducción de tamaño de los materiales después del chancado. En el caso de los molinos de bolas, estas deberán tener como diámetro

mínimo 3", y estarán sometidas a una caída del tipo catarata ó cascada golpeando fuertemente las partículas de mineral y los forros de Molino.

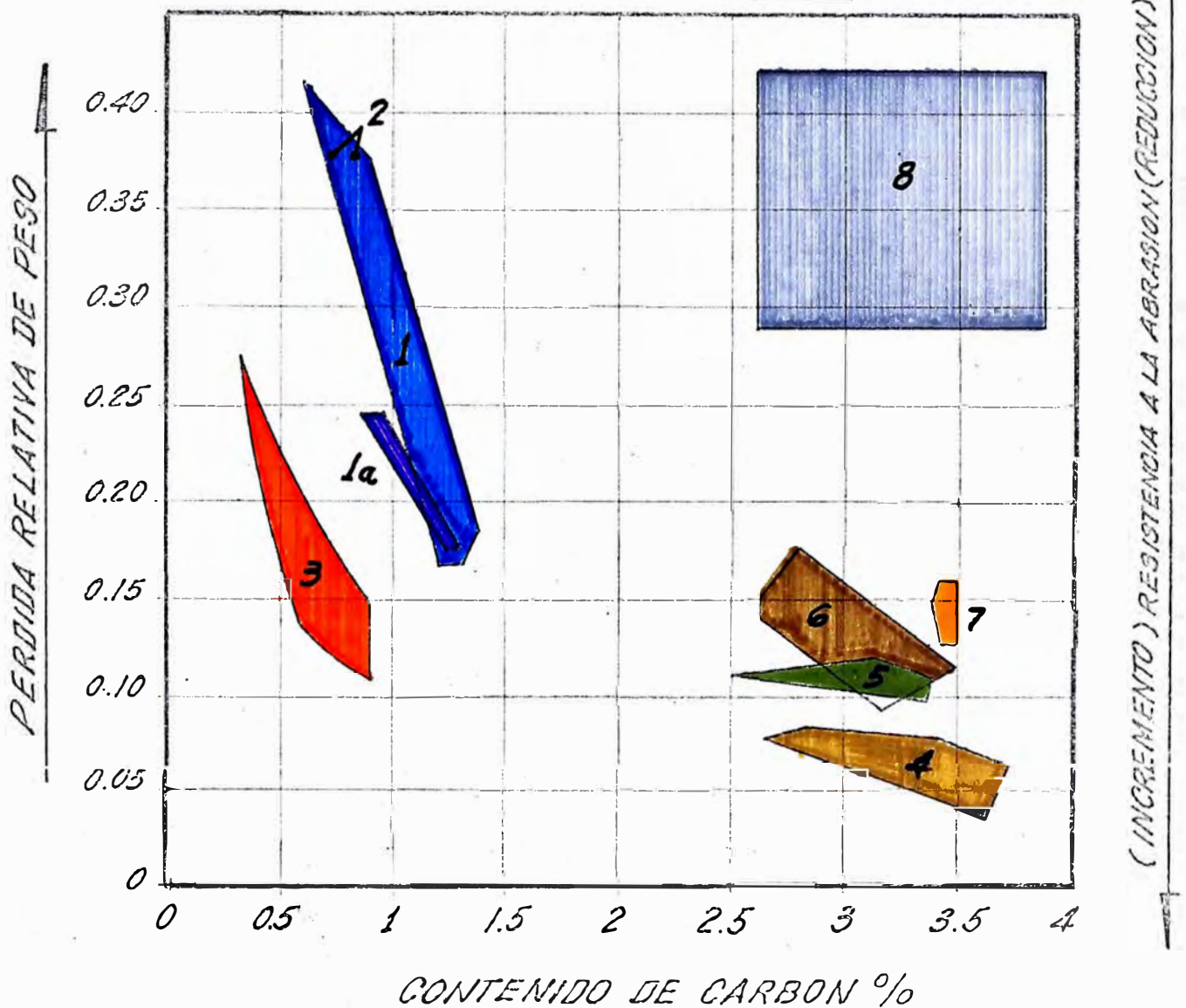
Generalmente, el alto impacto se presenta combinado con el tipo de abrasión denominado "Gouging" cuya traducción literal sería rayar ó estriar. Este tipo de abrasión ocurre cuando un pedazo de roca mineral ú otro material abrasivo grueso penetra cortando ó rayando la superficie del forro de molino con suficiente fuerza para desprender una partícula del mismo.

El principio para que ocurra esta remoción de metal de la superficie del forro de molino es similar al desgaste que se observa en las operaciones efectuadas en los talleres de maquinado por las máquinas-herramientas ó de esmerillado.

Se adjunta al cuadro N^o 1 elaborado por Climax Molybdenum Company Research Laboratories, que muestra el desgaste abrasivo tipo "Gouging!" experimentando por quijadas fabricada de diferentes materiales, instalada cada una frente a otra quijada correspondiente a un material normalizado referencial. Se procesa un volúmen conocido de un prototipo de roca, chancándola y comparando la pérdida en peso sufrida entre las dos piezas.

ABRASION TIPO: GOUGING

(RAYADO O ESTRIADO)



- 1.- Acero Austenítico al Mn 12%
- 1a- Acero Austenítico Mn 6% - Mo 1%
- 2.- Acero fundido perlítico (bajo Carbón)
- 3.- Acero Cr-Mo perlítico (templado y revenido)
- 4.- Fierro Blanco Martensítico 15% Cr - Mo
- 5.- Fierro Blanco 12 - 20% Cr - Mo (Sin trat.)
- 6.- Fierro Blanco 26% Cr (templado)
- 7.- Fierro Blanco 6% Ni - 9% Cr.
- 8.- Fierro Blanco perlítico.

El grafico nos muestra la resistencia abrasiva tipo "Gouging" de diversas clases de fierros blancos y aceros. La resistencia a la abrasión de los hierros blancos depende primariamente de su contenido de Carbón y de la matriz de su microestructura. Los materiales martensíticos tienden a ofrecer la mejor resistencia a la abrasión a un contenido de carbón determinado. Los materiales con matrices perlíticas resultaron los menos resistentes a la abrasión (aceros de bajo carbón), é inclusive pequeñas cantidades de perlita en una matriz predominante martensítica o austenítica puede reducir significativamente la resistencia a la abrasión. Los niveles más altos de resistencia a la abrasión se obtuvieron con los fierros blancos de alto contenido de Cromo con Molibdeno.

ESMERILADO

Este tipo de abrasión sucede cuando dos superficies de desgaste son refregados entre sí con suficiente fuerza para producir la pulverización del material atrapado entre ellas.

ARAÑADO O RASPADO (Scratching)

Este tipo de abrasión se produce como resultado del contacto entre las partículas abrasivas de mineral de relativo mo

vimiento libre y las superficies de desgaste. La fuerza generada no es capaz de producir un elevado porcentaje de chancado ó trituración de las partículas de mineral que generalmente son de tamaño pequeño de manera que su fuerza de impacto es muy reducida.

El tipo de abrasión de esmerilado y en menor escala el arañado ó raspado tiene lugar en los Molinos de moderado impacto y en aquellos de desgaste por fricción con ausencia de impacto utilizados en las etapas de pulverizado ó remolienda.

3.3 EVALUACION DEL DESGASTE ABRASIVO

La Climax Molybdenum Co., de Denver, Colorado, Estados Unidos de Norteamérica que es el principal productor del mundo de Molibdeno, de un depósito a tajo abierto de mineral, de baja ley de Molibdenita (Mo S₂) diseminado en una roca dura consistiendo básicamente, de cuarzo y feldespato, asociado con cantidades menores de otros materiales recuperados como sub-productos de donde se extrae tungsteno de Wolframita - Hubnerita, Zinc de casiterita, azufre de la piritita y tierras raras de la Monazita.

La Climax Molibdenum Co., es líder en el terreno metalúrgico de desarrollo de aleaciones especialmente compuestos de Molibdeno, y a ellos se deben las aleaciones de Fierro - blanco al Cr Mo.

Entre los numerosos ensayos realizados con diferentes materiales encontramos de acuerdo a la experiencia acumulada, uno que guarda particular relación con el comportamiento de estos materiales en la molienda de desgaste abrasivo.

El experimento consistió en producir bolas de 5 pulgadas de diámetro de diferentes aleaciones, colocarlas separa-

damente dentro del molino junto con el mineral y la carga nominal de bolas durante un determinado tiempo midiendo luego su desgaste sufrido a lo que se le denominó como "Factor abrasivo".

La tabla adjunta muestra los resultados obtenidos.

Desgaste relativo de materiales para fabricación de forros de
Molino experimentados en bolas de 5 pulg. en Climax Molibdenum Co.

Item Nº	Descripción y Tratamiento Térmico.	Composición Típica pct.						Dureza (a)		Factor Abrasión
		C	Mn	Si	Cr	Mo	Ni	Rc1	Rc2	
1	Fierro blanco martensítico E.A. y R. (b)	2.8	1.0	0.6	15.0	3.0	...	54	66	89
2	Fierro blanco martensítico con alto Cr. E.A. y R (b)	2.7	1.0	0.9	26.0	0.5	...	53	64	98
3	Acero Cr - Mo Martensítico E.A. y R. (b)	1.0	0.8	0.6	6.0	1.0	...	49	55	100 (Standard)
4	Fierro blanco al Ni - Cr Mo achilado.	3.2	0.7	0.5	2.0	1.0	3.0	..	59	107
5	Fierro blanco al Ni - Cr (Ni - Hard)	3.2	0.6	0.5	2.0	...	4.0	53	60	109
6	Acero Cr - Mo Martensítico T. en sal y R. (c)	0.7	1.0	0.6	1.5	0.5	...	55	58	111
7	Acero al Manganeso Austenítico 6 - 1 T.A. (e)	1.2	6.0	0.5	...	1.0	...	10	49	115
8	Fierro blanco Ni - Cr achilado	3.0	0.5	0.4	2.1	...	4.5	..	55	116
9	Acero Cr - Mo Martensítico T. A. y R (d)	0.4	1.5	0.4	0.8	0.5	...	48	55	120
10	Acero Cr. Mo Perlítico E.A. y R. (b)	0.8	0.8	0.6	2.3	0.4	...	38	39	127
11	Acero al Manganeso Austenítico Hadfield T.A. (e)	1.2	12.0	0.5	10	49	140

a, b, c, d, e, ver en la página siguiente.

(a) Dureza RC1 representa la dureza promedio a $\frac{1}{8}$ " debajo de la superficie original de las bolas antes del experimento.

Dureza RC2, igual a RC1 pero tomada después del experimento .

(b) E. A. y R. = Enfriado al Aire y Revenido.

(c) T. en sal y R = Templado en sal y Revenido

(d) T. A. y R. = Templado en agua y revenido

(e) T. A. = Templado en agua.

1.0. . PRINCIPALES MATERIALES DISPONIBLES DE ACERO Y FIERRO
FUNDIDO PARA LA FABRICACION DE FORROS DE MOLINOS.

Los materiales que describiré son los más representati-
vos extraídos de una clasificación de orden más genéri-
ca que comprende a los aceros blandos, aceros duros y
fierro fundido blanco utilizados en la fabricación de
rros de molino para la industria minera.

El enfoque principal está centrado en tres importantes
propiedades:

- 1.- Dureza
- 2.- Resistencia a la abrasión
- 3.- Resistencia a la corrosión

Que deberán conjugarse en la medida de su rendimiento
más eficiente expresado en términos del más bajo costo
de los forros de molino por tonelada de producto molido.

Quisiera resaltar que no es el objeto de éste trabajo
profundizar en el estudio de cada uno de los materiales
considerados, que estimo individualmente podrían consti-
tuir tema suficiente para el desarrollo de otra tesis
de propósito más específico.

4.1.

ACEROS AL MANGANESO

4.1.1. INTRODUCCION

Existe en la actualidad una amplia variedad comercial de aceros al manganeso de diversas composiciones químicas y tratamientos térmicos, consiguiéndose en cada caso propiedades específicas, para su mejor rendimiento en condiciones particulares.

El acero al manganeso fué primeramente desarrollado en 1882 por el Sir Robert Abbott Hadfield en Inglaterra. La composición nominal de este acero cuando fué primeramente introducido fué de 1.2% Carbón y 12.5% Manganeso y se le conocía con el nombre de su inventor "Acero al Manganeso Hadfield" que es como se le denomina en los tiempos actuales.

4.1.2. CARACTERÍSTICAS

El Acero al Manganeso fué el primer producto ferroso maleable no magnético en descubrirse, su característica principal (después de tratamiento térmico templando en agua) es su excepcional resistencia al impacto, capacidad de endurecer por acritud una delgada capa de su superficie hasta 500 Brinell (45-55 R.C.) y la particularidad de ser No - Magnético.

Presenta a temperatura ambiente después del tratamiento térmico una estructura estable austenítica.

Es uno de los pocos materiales que sufren una extensiva deformación plástica en servicio.

En ausencia de severo impacto el acero al manganeso que tiene una dureza de 185 - 210 Brinell posee serias limitaciones como material resistente al mediano impacto y abrasión.

El endurecimiento de su superficie provee adecuada resistencia al desgaste por abrasión del tipo "Gouging" pero en ciertos casos bajo condiciones muy adversas de alto impacto, pueden sufrir alteraciones en su forma debido a la alta deformación plástica de este material, que en algunos casos puede dificultar el cambio de los forros o problemas de rotura de los pernos de fijación. Por estas razones su uso especialmente en los Estados Unidos de Norteamérica y Canadá está decreciendo en forma notoria.

4.1.3 ESPECIFICACIONES

ASTM A-128 para la composición química siguiente:

Composición Química - Porcentaje

C	Mn.	Si.	P.	S.
1.00-1.40	10.0 Min.	1.00 Max.	0.10 max.	0.05 max.

4.1.4. EFEECTO DE LOS ALEANTES

Carbón y Manganeso

El rango de Carbón de 1.0 a 1.4 pct. resulta en la práctica muy amplio. Como regla general el Carbón en porcentajes bajos (de 1.0 - 1.10) se desgasta más rápidamente, posee poca tendencia a rajarse durante el tratamiento térmico o en servicio. Se emplea en secciones gruesas (4 a 5 pulg.), diseños complicados y para trabajos de alto impacto. El carbón de 1.05 - 1.20 tiene mayor resistencia a la abrasión (tipo Gouging), es ligeramente más frágil. Se emplea en piezas de forma uniforme en condiciones de impacto menos severas.

La proporción Manganeso - Carbón deberá ser siempre por lo menos 10 : 1 a fin de asegurar la formación de la estructura austenítica y no favorecer la precipitación de carburos.

El rango del manganeso fluctua de 12 - 13 pct.

Silicio

La mayoría de las fundiciones tratan de mantener el Silicio por debajo de 1.0 pct. como una ayuda en el control de la formación de rajaduras.

Su empleo es particularmente beneficioso en secciones gruesas.

Aluminio

Su uso en la fundición en proporciones de 2.5 Kg. por Tonelada está referido a eliminar la formación de pequeños huecos internos en Secciones delgadas y favorecer la solidez de todo tipo de piezas.

Niquel

En porcentajes hasta de 3.5 combinado con contenidos bajos de carbón reduce la fragilidad durante el recalentamiento. Se utiliza en secciones muy gruesas, acompañadas de extensa soldadura.

4.1.5. PROPIEDADES

Propiedades mecánicas después del Tratamiento térmico (1850 Fº Templado en agua).

Limite elástico	en miles (lbs/pulg ²)	50	57
Resistencia a la tracción "	(Lbs/pulg ²)	100	145
Elongación en 2"	(pct.)	30	65
Dureza	Brinell	185	210
Reducción de Area	(pct.)	30	40
Impacto	(pies - lbs)		
	Izod.	100	
	Charpy	90	220

Fósforo

Se considera que por encima de 0.06 influye en la formación de rajaduras en caliente dentro del molde fundido (Hot cracking). En porcentajes mayores de 0.12 reduce la ductilidad promoviendo fragilidad.

Azufre

El contenido de azufre es invariablemente bajo debido a que se combina con el manganeso durante la fusión formando sulfuro de manganeso que forma parte de la escoria.

4.1.6. ELEMENTOS ADICIONALES

Cromo

Es un aditivo común del acero al manganeso. Aumenta el límite elástico (Yield Strenght), pero reduce la ductilidad, mejora la resistencia a la abrasión incrementando ligeramente la fragilidad. Usualmente se agrega de 1.0 - 3.0 pct. consiguiéndose gradualmente una dureza inicial más alta (hasta 280 Brinell) en proporción al cromo adicionado.

Molibdeno

Adiciones de 1.0 pct. de Molibdeno a un Acero al Manganeso incrementa el Límite elástico sin pérdida de ductilidad.

4.1.7. CONSTANTES FISICAS

Capacidad de endurecimiento (Brinell)	185-210 a 450-550
Gravedad específica	2450 °F = 1343°C
Calor específico	0.145 Cal/g
Conductividad térmica	Baja (2.31 vs. Cu 100)
Coeficiente de expansión térmica lineal	Alta
Permeabilidad magnética	1.003 a 1.03 (H = 24)
Perm. Magnética (sin preparación superf.)	1.30 más

4.1.8. TAMAÑO DEL GRANO

Tiene una influencia directa en el comportamiento del acero del Manganeso. El grano fino y compactado favorece la ductilidad y la resistencia a la fractura. El grano dendrítico o grueso está relacionado con oxidación intergranular y reducida ductilidad.

4.1.9. SOLDADURA Y SOBRECALENTAMIENTO

Piezas sin tratamiento térmico no deberán nunca soldarse ni calentarse a expensas de producir rajaduras.

Las piezas tratadas termicamente podrán soldarse utilizando electrodos especiales y procurando no recalentar la pieza por encima de 500 °F = 260 °C. El sobre calentamiento imparte fragilidad

debido a la transformación parcial de la austenita produce numerosas rajaduras, endurece las piezas y transforma el acero en magnético.

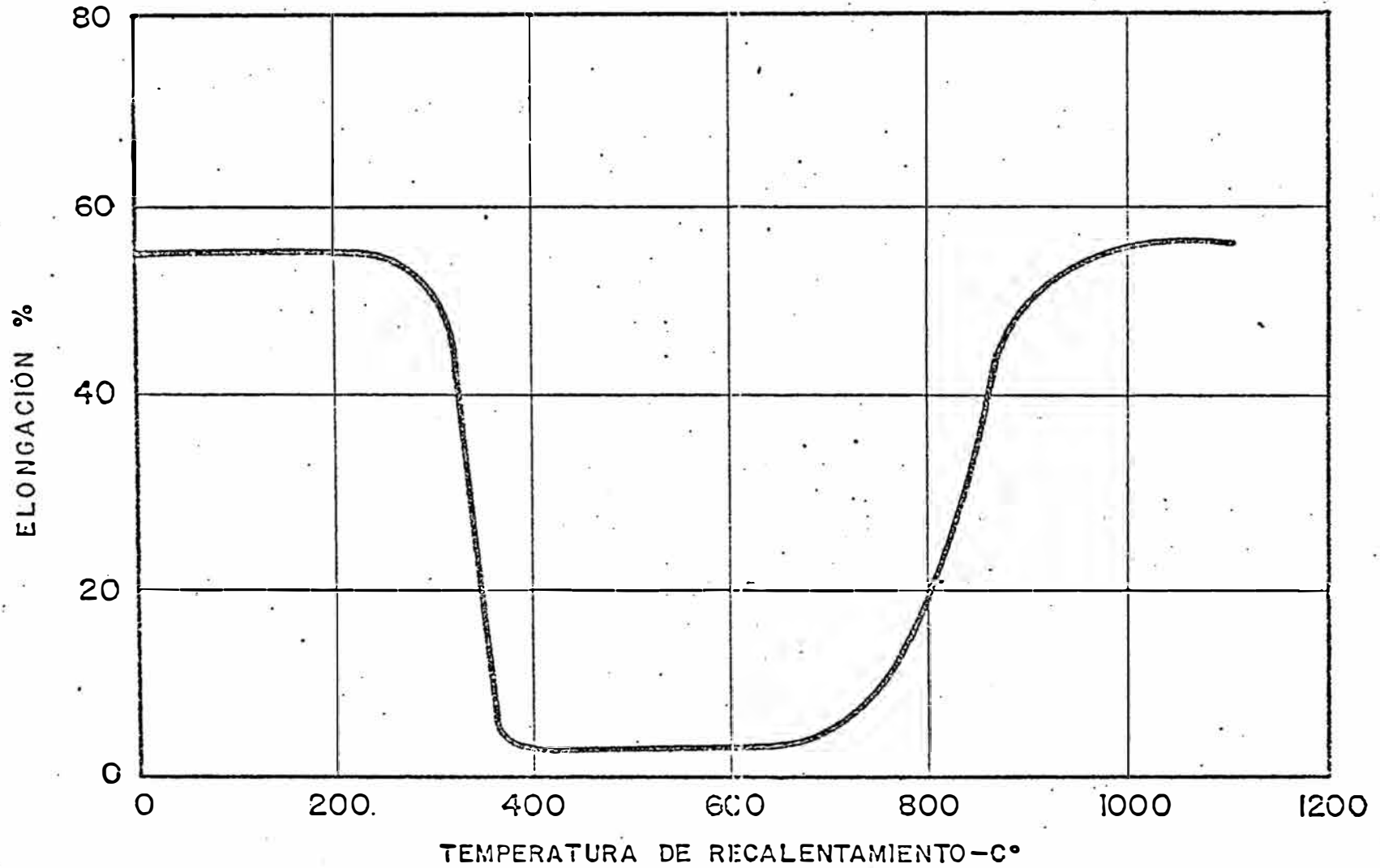
4.1.10. MECANIZADO

El acero al manganeso es maquinable, en condiciones especiales de cortes profundos a muy baja velocidad.

4.1.11. APLICACIONES

Los forros de molino fabricados con este material exhiben un comportamiento muy satisfactorio en molienda de alto impacto en donde desarrollan una óptima resistencia al desgaste abrasivo del tipo "Gouging" (rayado o estriado) después del endurecimiento por acritud de su superficie.

ACERO AL MANGANESO



EFEECTO DE RECALENTAMIENTO EN LA ELONGACION ACERO INICIALMENTE
TRATADO 1050°C AGUA - PRUEBAS REALIZADAS A TEMPERATURA AMBIENTAL

4.2. VARIACIONES DEL ANALISIS ORIGINAL HADFIELD

4.2.1. Aleación 6 - 2 - 1

Es un acero austenítico que desarrolla su estructura y propiedades cuando es templado en un medio apacible como aire en movimiento, aceite o sal en solución. Es menos susceptible a alabearse. Incrementa su dureza superficial por acritud con la diferencia que para ello requiere de un moderado impacto, resistente a la abrasión del tipo GOUGING, (rayado o estriado) y del tipo de esmerilado en mayor grado que el Acero al Manganeso Hadfield.

4.2.2. Composición Química pct.

Carbono	1.05 - 1.20
Manganeso	5.25 - 6.50
Silicio	0.30 - 0.70
Cromo	1.50 - 2.00
Molibdeno	0.90 - 1.10
Fósforo	0.05 - max.

4.2.3. PROPIEDADES MECANICAS

Límite elástico	lbs/pulg ²	55,000
Resistencia a la tracción	lbs/pulg ²	85,000
Elongación en 2"	pct.	12

Dureza	Brinell	200 - 220
Impacto charpy	pies-lbs.	10 - 80

4.2.4. APLICACION

El acero al Manganeso 6 - 2 - 1 tiene su campo de aplicación en la molienda de moderado - alto impacto con marcada acción abrasiva. Este material rinde magníficos resultados en el medio indicado ya que endurece su superficie desde su dureza inicial 220 Brinell hasta 550 Brinell cuando está sometido a un moderado impacto, con el agregado que es más resistente a la abrasión que el acero Hadfield.

Se le utiliza con resultados muy positivos en aquellos molinos de moderado impacto en donde los forros han sido diseñados de poco espesor y sería muy riesgoso por temor a que se quiebren utilizar materiales más duros pero a la vez más frágiles.

4.3

ACERO AL CROMO MOLIBDENO PERLITICO

4.3.1. INTRODUCCION

Esencialmente constituido por un alto contenido de Carbono, aleado con suficiente Cromo y Molibdeno para producir una estructura "Perlítica dura" después del tratamiento térmico de normalizado a 925°C - 950°C enfriamiento al aire y revenido a 540°C . Las adiciones de Níquel y vanadio son opcionales y su adición usualmente depende de los fabricantes. En el caso de forros para la industria minera no se justifica por el alto precio del Vanadio y Níquel.

Se produce en dos tipos: Grados B. C. (Bajo contenido de Carbón) y grado A. C. (Alto Contenido de Carbón).

4.3.2. CARACTERISTICAS

El acero Cromo Molibdeno perlítico es el producto de menor costo de adquisición entre todos los materiales considerados.

No posee la dureza ni la resistencia al desgaste abrasivo de los fierros blancos al Cr - Mo ó Cr - Ni, ni tampoco la resistencia al impacto de los forros al manganeso; en cambio su dureza (300 - 350 Brinell) lo ubica en un terreno intermedio de tolerancia al impacto y la abrasión.

Su relativo alto límite elástico (90,000 - 125,000 lbs/pulgadas) le permite resistir la deformación plástica que ocasionan las bolas o barras que pueden producir deformaciones en los forros y rotura de los pernos de fijación.

4.3.3. ESPECIFICACIONES

Los aceros al Cromo-Molibdeno se producen bajo las normas A. S. T. M. 148, 150/125.

4.3.4. COMPOSICION QUIMICA pct.

	B.C.	A. C.
Carbono	0.50 - 0.70	0.70 - 1.10
Manganeso	0.60 - 0.90	0.60 - 0.90
Silicio	0.30 - 0.80	0.30 - 0.80
Cromo	1.00 - 2.50	1.50 - 3.00
Molibdeno	0.30 - 0.50	0.30 0.50
Azufre	0.05 max.	0.05 max.
Fósforo	0.05 max.	0.05 max.

La composición de alto contenido de Carbón se utiliza cuando el objetivo principal constituye el desgaste abrasivo. La composición B. C. no posee la misma resistencia al desgaste abrasivo pero en cambio soporta mejor el impacto.

4.3.5. Propiedades mecánicas después del tratamiento térmico (calentar 1800 °F = 980 °C aprox. enfriar, revenido a 1000 °F = 538 °C.

Límite elástico	(lbs/pulg ²)	125,000
Resistencia a la tracc.	(lbs/pulg ²)	150,000
		<u>Dureza Brinell</u>
Revenido a 850 - 950 ^o F		325 - 400.
Revenido a 1100-1200 ^o F		250 325

Las durezas de los aceros de A. C. estarán en el lado alto en cambio las durezas de los aceros B. C. tienden a estar en el límite inferior de los rangos.

4.3.6. APLICACION

Su campo de aplicación es en la molienda de moderado - alto impacto especialmente en la construcción de forros de molino constituidos por secciones delgadas y gruesas como son los forros de "doble onda" y de los forros de rejilla en donde existe una condición especial debido a la tendencia de las bolas desgastadas de bloquear las ranuras, acuñándose fuertemente e impidiendo el flujo de la pulpa a través de ellas. Este efecto es contrarrestado por el acero cromo-Molibdeno mediante tratamiento térmico y composición química adecuada para conseguir una dureza de 250 - 300 Brinell aprox. de manera de que las bolas provocan lo que se conoce como "peening" que consiste en redondear los extremos de las ranuras de los forros de rejilla formando "hombros" evitando de esta manera el acuñado de las bolas y permitiendo que fluya normalmente la pulpa.

4.4. ACERO CROMO - MOLIBDENO DE ALTO SILICIO

4.4.1. INTRODUCCION

Este material todavía se encuentra en su etapa experimental pero por los resultados obtenidos en laboratorio y las primeras experiencias recogidas en la minería de los Estados Unidos de Norteamérica, considero de interés incluirlo por cuanto sus posibilidades de aplicación son muy amplias. Su composición básica lo clasifica como un acero al Cromo - Molibdeno de alto silicio, muy versátil, que mediante un tratamiento térmico adecuado es posible obtener una variedad de características mecánicas.

4.4.2. CARACTERISTICAS

El acero Cromo - Molibdeno de alto Silicio tiene la particularidad de desarrollar después del tratamiento térmico una estructura martensítica de una dureza, en el rango 500 - 600 Brinell de gran resistencia al desgaste abrasivo con la particularidad que mediante un revenido a alta temperatura se consigue perlitizar el acero bajando la dureza a 300 - 380 Brinell haciéndolo inclusive maquinable y, con la posibilidad de volverlo a endurecer por cuanto la transformación es de naturaleza reversible.

Constituye una característica importante su menor precio de adquisición en comparación con los otros materiales utiliza-

dos en la fabricación de forros de molino.

4.4.3. ESPECIFICACIONES

Composición Química pct.

Carbono	0.40 - 0.55
Manganeso	1.30 1.70
Silicio	0.95 1.50
Fósforo	0.06 Max.
Azufre	0.06 Max.
Cromo	0.80 - 0.95
Molibdeno	0.45 - 0.70
Níquel	0. 1.50 Opcional.

4.4.4. EFEECTO DE LOS ALEANTES

Para producir una estructura martensítica en secciones gruesas, el acero debe tener una alta templabilidad lo que requiere el uso de elementos de aleación. El porcentaje de los elementos de aleación depende principalmente de la temperatura de austenizado, de la velocidad de templado durante el tratamiento térmico y del espesor de las piezas.

Carbón

Promueve la formación de Carburos y martensita, compuestos duros resistentes a la abrasión; influye directamente

en las características físicas y mecánicas.

Silicio

En porcentajes hasta de 2% tiene un efecto endurecedor de la ferrita. Su presencia ocasiona una ligera susceptibilidad al agrietamiento durante el temple.

Cromo

Promotor y estabilizador de los carburos. Es el principal endurecedor de la matriz.

Molibdeno

Aumenta la dureza, la resistencia al impacto y al choque térmico. Su empleo en secciones gruesas especialmente es muy efectivo.

Manganeso

Incrementa la templabilidad cuando se emplea en porcentajes hasta del 2%, su uso es muy difundido por su bajo costo. En porcentajes mayores tiende a retener Austenita.

Fósforo y Azufre

Constituyen impurezas que deben mantenerse por debajo del 0.06% por sus efecto fragilizantes.

4.4.5. PROPIEDADES FISICAS (MARTENSITICO)

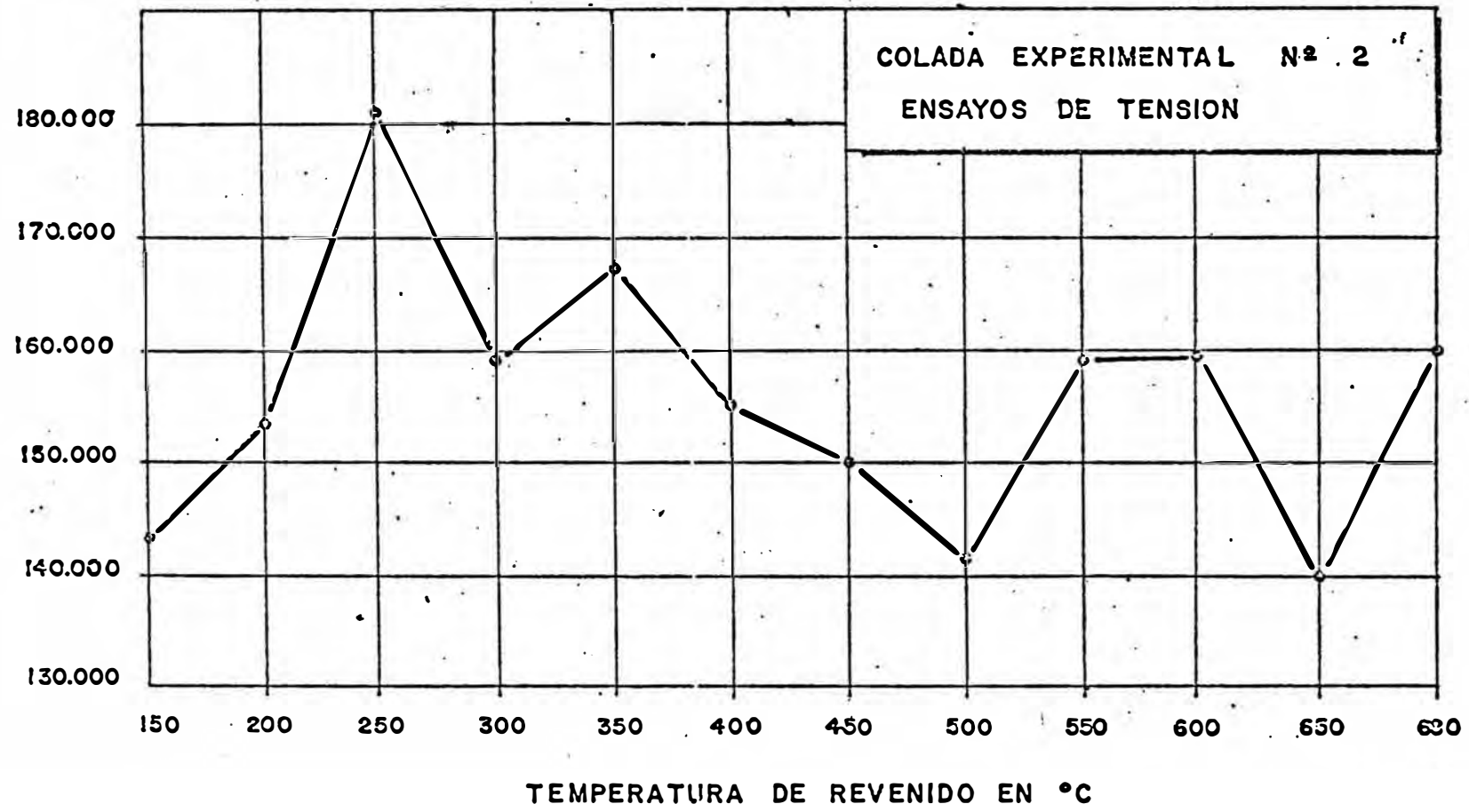
Resistencia a la tracción	$\frac{\text{lbs}}{\text{pulg.}}^2$	150,000
Elongación	pct.	2
Dureza Brinell		550 - 600

4.4.6. APLICACIONES

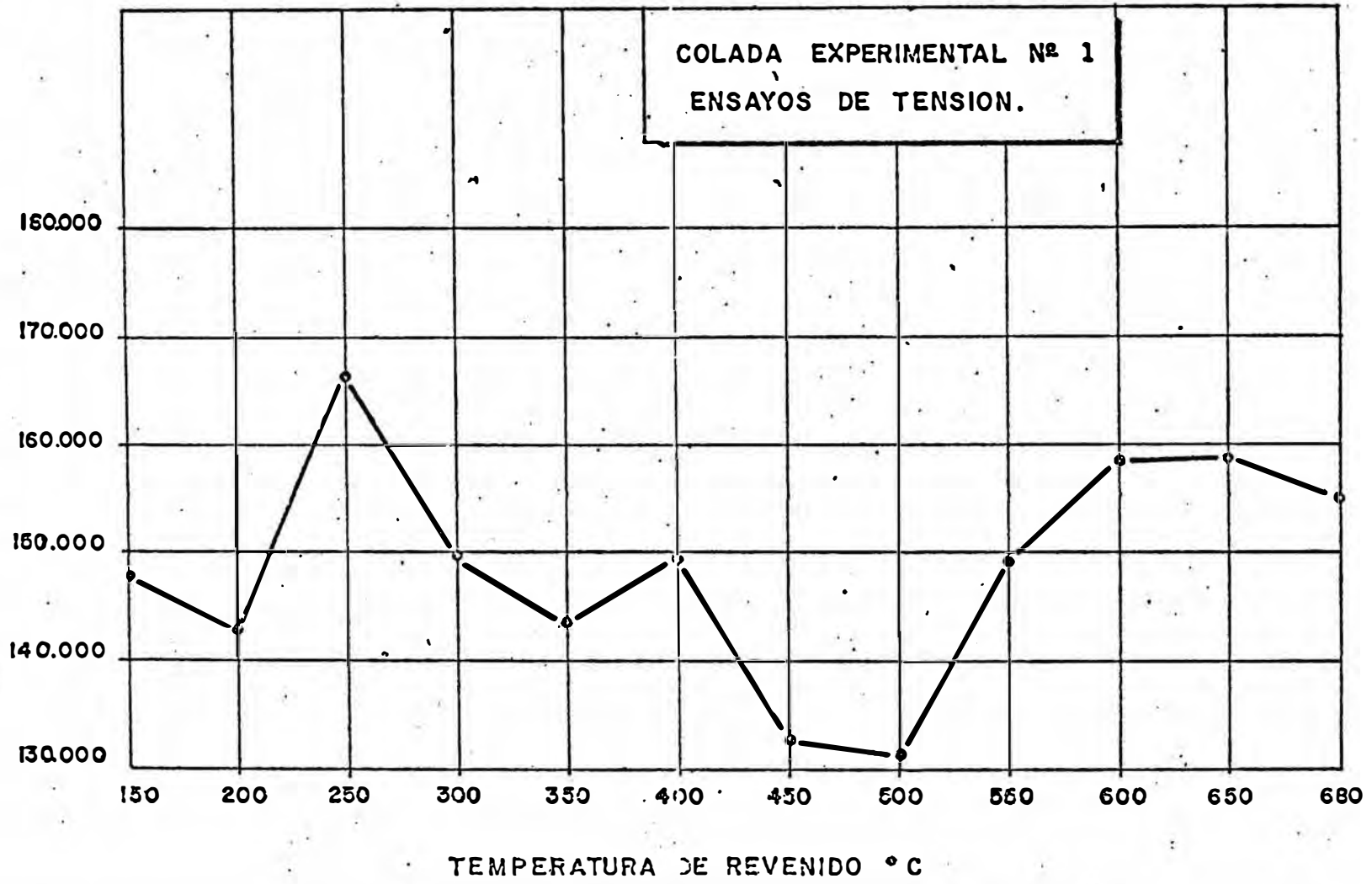
Este material tiene un amplio campo de aplicación, se le utiliza en la construcción de forros para molienda de moderado - alto impacto, cuando su dureza está en el rango de 300 - 420 Brinell, constituido por una estructura perlítica.

Cuando adquiere una estructura martensítica alcanza valores de dureza de 500 - 600 Brinell y se le emplea en molienda de bajo - mediano impacto, como material resistente al desgaste abrasivo.

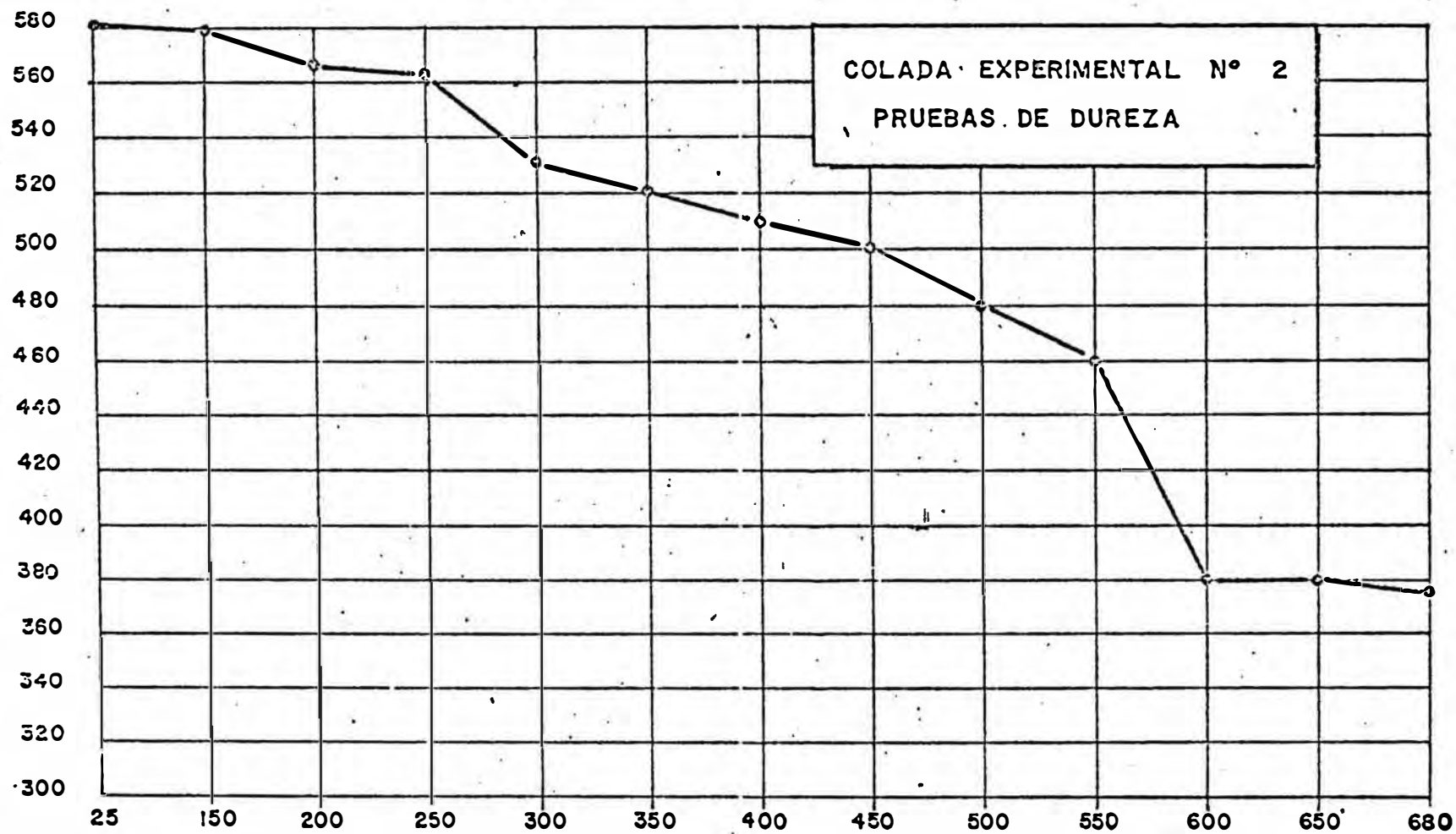
RESISTENCIA A LA TRACCION EN LBS./PULG.²



RESISTENCIA A LA TRACCION EN LBS/PULG.²

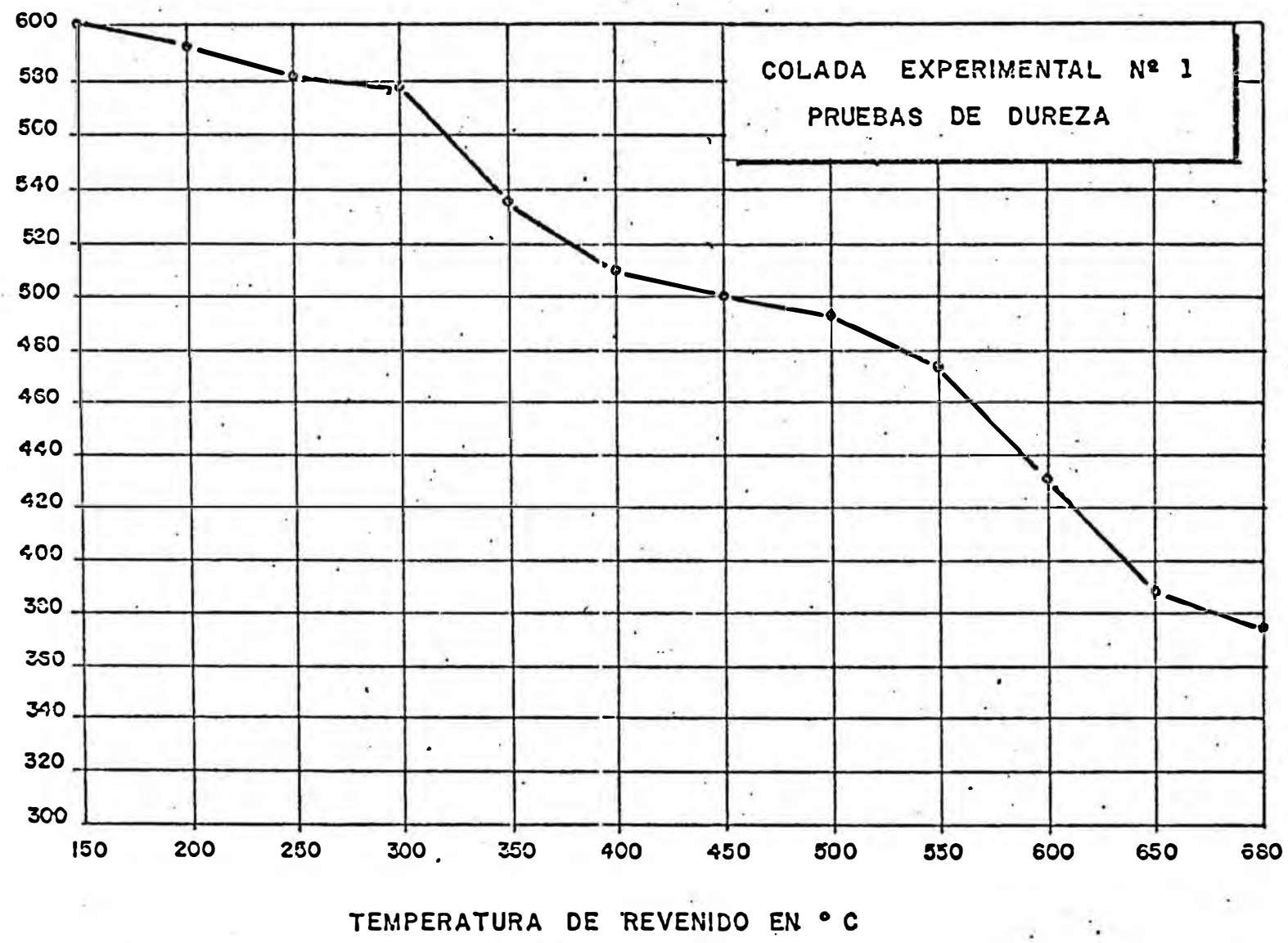


DUREZA BRINELL



TEMPERATURA DE REVENIDO EN °C

DUREZA BRINELL



HIERRO BLANCO AL NIQUEL CROMO (NI - HARD)

4.5.1. INTRODUCCION

NI - HARD es el nombre comercial de un grupo de fundiciones blancas aleadas al Cromo Níquel que poseen una extraordinaria resistencia a la abrasión.

Existen varios tipos de fundición NI HARD de acuerdo a su aplicación particular aunque el denominador común de todas ellas es su fragilidad, elevada dureza; alta resistencia a la abrasión y a la corrosión.

4.5.2 CARACTERISTICAS

Las fundiciones NI - HARD están conformadas por una estructura de martensita y austenita residual en una matriz de carburos mixtos de cromo y hierro que le confiere su alta dureza y resistencia a la abrasión, teniendo presente su naturaleza No-Dúctil.

La estructura correcta se obtiene mediante el balance adecuado de los elementos metálicos y un escrupuloso control de la velocidad de enfriamiento complementado con un revenido para relevar las tensiones internas.

El procedimiento de fabricación es de naturaleza compleja y compactible con fundiciones de reconocida capacitación técnica.

La fundición NI-HARD por su elevada dureza deberá considerarse como NO-MAQUINABLE, é inclusive en las etapas de Acabado dentro de su proceso de fabricación, deberá observarse especial cuidado de no sobrecalentar las piezas porque ello pudiera ser la causa de la formación de rajaduras.

Con el fin de lograr un aumento de dureza y de resistencia a la abrasión pueden aplicarse durante el proceso de fundición enfriadores a las superficies de trabajo, especialmente en la piezas de gran espesor.

4.5.3 COMPOSICION QUIMICA (MEDIA) PORCENTAJE

Carbono	2.8	3.5
Silicio	0.3	0.70
Manganeso	0.3	- 0.7
Azufre	0.15	max.
Fósforo	0.3	max.
Niquel	3.5	- 4.5
Cromo	1.5	2.5

4.5.4 EFFECTOS DE LOS ALEANTES

Carbono Total

Como se indica más adelante con relación a la micro-estructura, el contenido total de carbono de las fundiciones NI-HARD, normalmente presente en las piezas moldeadas, se encuentra en su totalidad en forma de carbono combinado o cementita. La proporción de carburo en la microestructura varía en relación directa con el contenido total de carbono, siempre que se evite la presencia de grafito libre. El carburo es el microconstituyente más duro de las fundiciones NI-HARD, pero es también más débil y más frágil que la matriz metálica con la que está asociado. Por esta razón las composiciones con contenidos elevados de carbono, incluso hasta 3,8%, se especifican para aplicaciones donde se precise una dureza máxima y se pueda tolerar una ligera reducción de la resistencia mecánica y de la tenacidad siempre que se evite la presencia de láminas de grafito. Por el contrario, para la fabricación de piezas en las que la resistencia mecánica y la tenacidad son importantes, se seleccionan composiciones con menor contenido de carbono pero sacrificando ligeramente el nivel de dureza. En casos especiales, pueden elegirse composiciones que se salgan de los límites medios, pero debe tenerse en cuenta que los contenidos de carbono menores de 2,8% pueden ser causa de dificultades para producir piezas sanas, así como que con contenidos elevados de carbono aumenta el riesgo de formación de grafito.

La fundición NI-HARD Tipo 2 tiene un contenido de carbono de 2.8% - 3.2%

Silicio

El contenido de silicio en la fundición NI-HARD es normalmente bajo, lo que es esencial a fin de retener todo el carbono en forma combinada, como carburo, y evitar la formación de grafito libre. En general, la presencia de grafito en la estructura es perjudicial para la dureza y la resistencia a la abrasión de las piezas. Al igual que en el caso de otras piezas de fundición, en las de gran espesor es preciso que el contenido de silicio sea más bajo, pero en casos especiales, por ejemplo, piezas de poco espesor, puede ser conveniente elevar el contenido de silicio incluso hasta un 0.75%, siempre que no se forme grafito libre.

Manganeso

Generalmente, el contenido de manganeso se mantiene a un nivel relativamente bajo, puesto que su presencia sería causa de formación de una austenita extraordinariamente estable, difícil de transformar en martensita y bainita o en uno de estos dos constituyentes, aún con un tratamiento térmico prolongado. A consecuencia de ello, la dureza de la pieza colada será menor de la que se obtiene normalmente. Otra razón que justifica el bajo contenido de manganeso es que este ele

mento se combina con el azufre que es un enérgico estabilizador de carburos.

Azufre

El contenido de azufre está determinado generalmente por las materias primas y por el método de fusión utilizados en la fabricación de la fundición NI-HARD. Para algunas aplicaciones, por ejemplo, determinados tipos de cilindros es conveniente un contenido de azufre relativamente alto a fin de estabilizar los carburos, pero en estas circunstancias, las piezas tienden a ser relativamente más débiles por lo que en aplicaciones en las que las resistencias mecánicas y al choque sean importantes, deben utilizarse composiciones con bajos contenidos de azufre.

Fósforo

El fósforo eleva sustancialmente y de forma eficaz la resistencia máxima de la matriz metálica y, como ocurre con otras fundiciones, su presencia, en pequeñas proporciones es a veces conveniente a fin de mejorar la fluidez. Un contenido de fósforo superior al 0,25% tiende a fragilizar las piezas moldeadas y, en general su presencia debe mantenerse lo más baja posible.

Níquel

El contenido de níquel de las fundiciones NI-HARD eleva eficaz y sustancialmente la dureza y la resistencia mecánica de la matriz metálica, lo que está de acuerdo con el efecto usual de

este elemento sobre las aleaciones hierro-carbono, es decir, proporcionar características de templabilidad. La cantidad de níquel precisa para conseguir la máxima dureza varía en relación a la sección de la pieza. Por consiguiente, el contenido de níquel elegido estará determinado por el tipo y tamaño de la pieza a fabricar así como por las propiedades exigidas.

Cromo

La presencia del cromo tiene una triple finalidad. La primera de ellas es estabilizar los carburos é impedir cualquier tendencia a la grafitización. En relación con esto debe recordarse que el níquel es un elemento grafitizante y, por lo tanto, la fundición NI-HARD requiere una adición proporcionada de níquel-cromo en relación aproximada de 3 : 1. La segunda es aumentar más aún la dureza del carburo, puesto que la mayor parte de cromo está localizada en la fase carburo. La tercera es actuar como suave estabilizador de la austenita. Por consiguiente, el cromo desempeña un triple papel en la fabricación de piezas moldeadas que posean la máxima dureza y resistencia a la abrasión.

PROPIEDADES

Límite elástico	(lbs/pulg ²)	39,800 - 66,800
Resistencia a la tracción	(lbs/pulg ²)	45,000 - 70,000

Dureza	Brinell	550	690
Peso específico		7.6	7.8
Propiedades magnéticas		Magnética	

4.5.6. APLICACIONES

Los forros de molino fabricados con este material tienen un rendimiento muy satisfactorio en molienda de bajo a mediano impacto por su alta resistencia al desgaste de origen abrasivo y a la corrosión por lo que se le emplea con gran éxito en molienda húmeda que utiliza agua de mar, debido a su naturaleza No dúctil será preciso utilizar como base entre el forro y el casco del molino algún material, elástico a fin de evitar la formación de tensiones perjudiciales que pueden conducir a la roturas por ejemplo de los orificios de asiento del perno de fijación.

4.6

FIERRO BLANCO MARTENSITICO AL Cr Mo

4.6.1. INTRODUCCION

Los fierros blancos Martensíticos de alto contenido de Cromo se utilizan extensamente en una amplia variedad de aplicaciones. Existen numerosas variables en su composición elemental control de producción, Tratamientos térmicos y estructura metalográfica que pueden influenciar en su resistencia al desgaste y propiedades mecánicas.

4.6.2. CARACTERISTICAS

Técnicamente el término de fierro blanco martensítico debería estar referido a aquellos fierros cuya estructura consiste esencialmente de martensita y fierro o carburos aleados. En la práctica los fierros blancos que nos ocupan en este trabajo contienen austenita retenida en su estructura, carburos y martensita.

La Austenita retenida se transforma en martensita. Específicamente los fierros blancos martensíticos que, corresponden a este tema estarán constituidos por carburos duros en una matriz de martensita y austenita retenida.

Los fierros blancos martensíticos con contenidos de Cromo por

encima del 10% producen Carburos del tipo C2 en su estructura. Estos carburos son más duros que los del tipo C1, se encuentran dispersos en forma discontinua y tienden a tener un tamaño de partícula muy fina. Esta característica les confiere una excepcional resistencia a los tres tipos de abrasión en molienda de bajo impacto. Haworth "The abrasion resistance of metals" y Avery "Hard facing alloys of the Chromium carbide type" encontraron que estos carburos son más duros que el cuarzo.

4.6.3 ESPECIFICACIONES

(Ver cuadro adjunto en la página siguiente).

Composiciones Comerciales (pct.)

	15-3 HC	MC	LC	15-2-1	20-2-1
Carbono	3.20-3.60	2.30-3.20	2.40-2.80	2.80-3.50	2.60-2.90
Manganeso	0.70-1.00	0.50-0.90	0.50-0.80	0.60-0.90	0.60-0.90
Silicio	0.30-0.80	0.30-0.80	0.30-0.80	0.40-0.80	0.40-0.90
Cromo	14.00-16.00	14.30-16.00	14.00-16.00	14.00-16.00	18.00-21.00
Molibdeno	2.50-3.00	2.50-3.00	2.40-2.80	1.90-2.20	1.40-2.00
Cobre	-	-	-	0.50-1.20	0.50-1.20
Azufre	0.05 max.	0.05 max.	0.05 max.	0.05 max.	0.05 max.
Fósforo	0.10 max.	0.10 max.	0.10 max.	0.06 max.	0.06 max.
Sección máxima fectible a fundirse libre de perlita enfriando en Aire (mms.)	70	90	120	200*+	200
<u>Dureza (Rc. y Brinell)</u>					
Fundida	51-56 495-578	50-54 495-544	44-48 413-477	50-55 495-555	50-54 495-544
Endurecida Trat. Ter.	62-67 652-744	60-65 627-713	58-63 600-683	60-67 627-fe	60-67 627-fe
Ablandada revenido	40-44 381-430	37-42 351-402	35-40 326-381	40-44 381-430	38-43 364-418

*Dependiendo del contenido de carbono

+Más gruesas puede ocurrir bainita.

4.6.4. EFECTO DE LOS ALEANTES

Carbono

La proporción Cromo: Carbono tiene efectos determinantes en evitar la formación de perlita durante el enfriamiento.

Combinarse con el Cromo para formar los Carburos secundarios c₂.

Incide directamente en la dureza; manteniendo porcentajes constantes de Carbón se puede incrementar la dureza añadiendo mayor cantidad de Cromo y reducir la dureza añadiendo Carbón conservando constante el contenido de Cromo.

Contenidos bajos de Carbón se utilizan cuando se desea incrementar la resistencia al impacto posibilidad de mecanizado o piezas de considerable espesor.

Manganeso

Contribuye a retardar o suprimir la formación de perlita en la estructura.

Silicio

Se mantiene por debajo de 1 pct. para reducir la tendencia de formarse grafito libre y/o perlita.

Cromo

Suprimir la transformación de austenita en perlita durante el enfriamiento primario del molde fundido (hasta que la pieza empieza a solidificarse con su forma exterior ya conformada). Continuando el enfriamiento a la temperatura ambiente la austenita puede transformarse en bainita de baja temperatura y en martensita con Austenita retenida.

Producir Carburos duros del tipo C2. Contribuye a la supresión de grafito libre.

Molibdeno

Coadyuvar en la supresión de la formación de perlita e impartir efectos favorables en las propiedades de los carburos y en la matriz. La efectividad del molibdeno es mayor en niveles de Carbón bajos. La presencia de Molibdeno es de particular importancia en secciones gruesas. Mejora las propiedades de resistencia al impacto.

Cobre

Efectivo en retardar la formación de perlita

Azufre

Constituye impureza que pueden provocar rajaduras en caliente.

Su contenido no debe pasar de 0.12 pct.

Fósforo

Su contenido no debe exceder 0.05 pct. puede ocasionar rajaduras y micro-rechupes.

4.6.5. PROPIEDADES

Los hierros blancos martensíticos se recomiendan para aplicaciones en donde altos esfuerzos de tensión y de impacto son innecesarios. Las propiedades mecánicas con excepción de la dureza no se especifican de rutina. Debido a la elevada dureza de este material es particularmente dificultoso el mecanizado de su probeta por lo que existe escasa información confiable especialmente de ensayos de tensión en barras de prueba. Una excepción se encuentra en el artículo "Ductility and elasticity of white irons" de R. A. Flinn y H.J. Chapin y la "American Brake Shoe Co". Sus observaciones están referidos a experimentos efectuados con muestras fundidas en arena de forma de "Y" con un porcentaje de Carbón de 3.4.

1.- Los hierros blancos al Niquel - Cromo con carburos del tipo C1 mostraron una resistencia a la tracción de 32,000 lbs/pulg² sin tratamiento térmico y de 50,000 lbs/pulg² con un revenido a 500^oF = 260^oC. Su elonga-

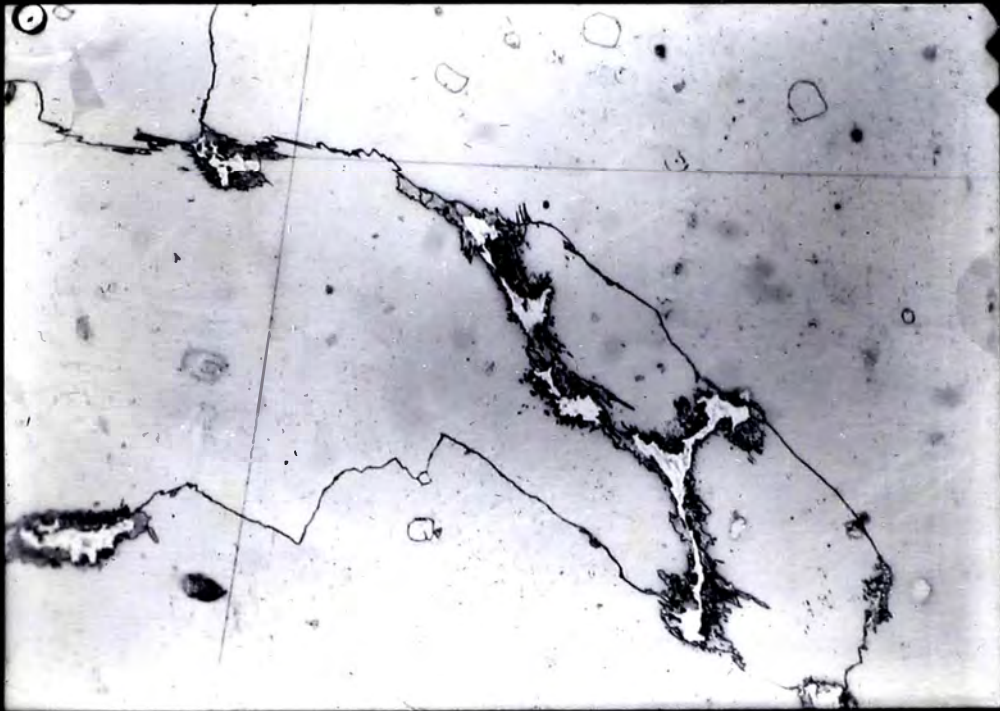
gación plástica fluctúa entre 0.0080 pct. sin trat. térmico hasta 0.044 pct. con trat. térmico.

2.- Los hierros blancos al Niquel - Cromo con carburos del tipo C2 con un porcentaje de Carbón de 2.6 y 26 pct de Cr. sin tratamiento térmico registraron las siguientes propiedades.

Resistencia a la tracción	lbs/pulg ²	85,000
Límite elástico	lbs/pulg ²	80,000
Elongación total (plástica + elástica)	pct.	0.20 - 0.40
Módulo de elasticidad	$\frac{\text{lbs}}{\text{pulg}^2} \times 10^6$	31.5
Dureza Brinell	pulg ²	450 - 650

4.6.6. APLICACIONES

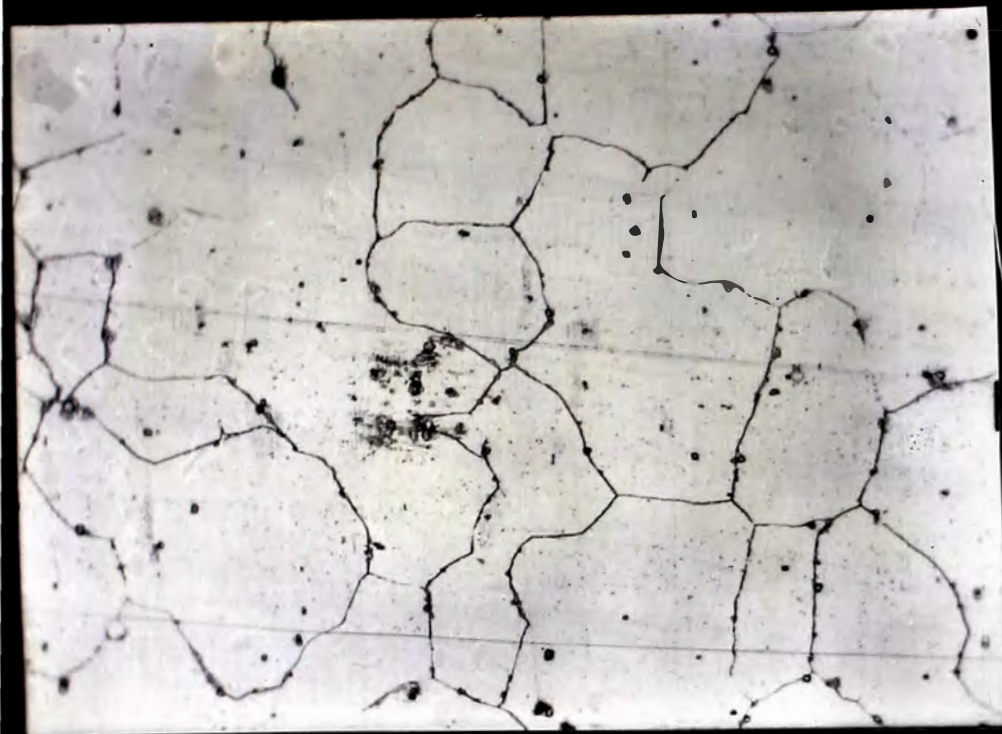
Los forros de molino fabricados con este material se recomiendan muy especialmente en molienda de bajo a mediano impacto. Poseen una excelente resistencia a la corrosión y al desgaste abrasivo, del tipo erosivo, esmerilado y arañado o raspado (scratching). El tipo 15-3 (15% Cr - 3% Mo), posee mayor resistencia al impacto que cualquiera de los otros hierros - blancos.



Material

Acero al Manganeso Hadfield

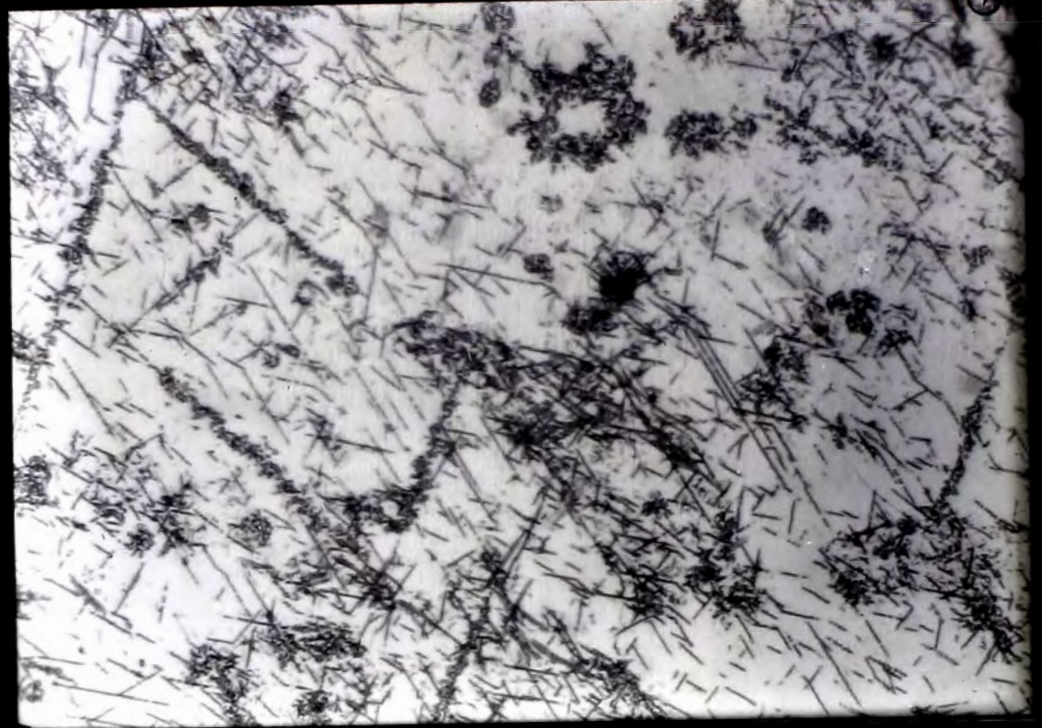
Estructura Austenítica con precipitación de carburos en el borde de grano debido a calentamiento superior a los 300°C después del tratamiento térmico.



Material

Acero al Manganeso Hadfield

Estructura: 100% Austenítico
No magnético se destaca el
borde de grano. Tratamiento
térmico correcto.



Material

Acero al Manganeso Hadfield

Estructura compuesta de
carburos frágiles debi-
do a un defectuoso tra-
tamiento térmico.



MATERIAL

Acero Cr - Mo Perlítico

Normalizado a 950°C y
revenido a 400°C estruc
tura perlítica 100%



Fierro blanco Cr - Ni

Ni - Hard

Bruto colado presenta un exceso de Austenita retenida debido a un alto porcentaje de Manganeso



Material

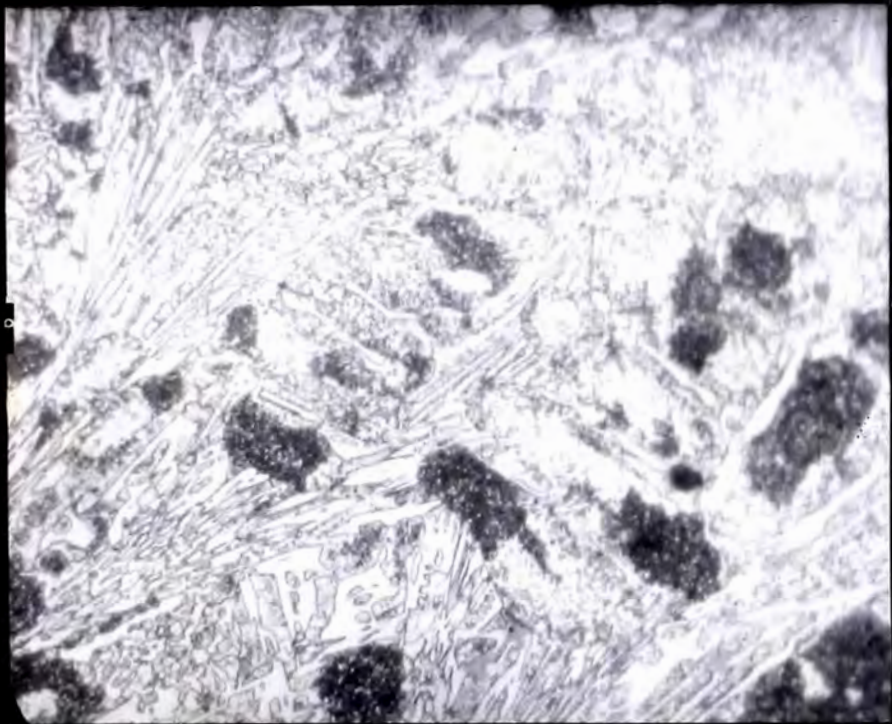
Fierro blanco Cr - Mo

Bruto colado, presenta matriz de cementita con carburos ledeburitos en formación y austenita retenida.



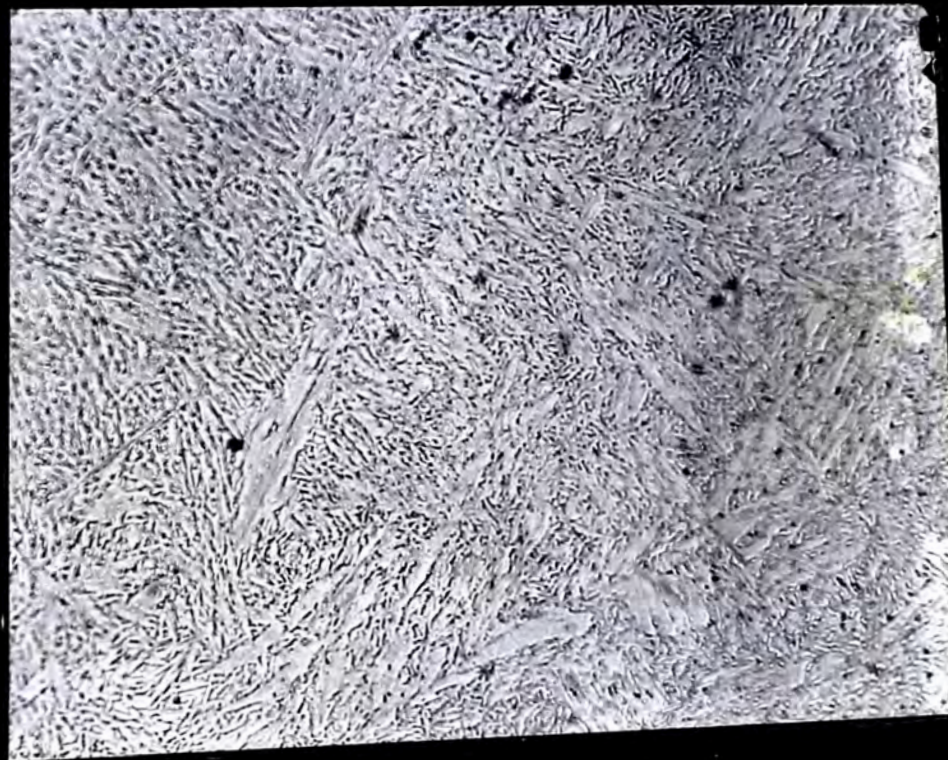
Fierro blanco Cr - Ni

Bruto de colado.
Estructura correcta
compuesta de Marten-
sita y Carburos



Material

Fierro blanco Cr - Mo con tratamiento térmico. Estructura carburos ledeburíticos y menor porcentaje de martensita.



Material

Acero Cr - Mo Martensítico Normalizado y revenido a baja temperatura. Estructura martensítica.

5.0.

COSTO DE ADQUISICION

Los precios de venta índices referenciados al acero al manganeso que se ha considerado igual a 100, para cada uno de los materiales estudiados a ser utilizados en la fabricación de forros para molino son los siguientes:

1.- Acero al Manganeso Hadfield	100
2.- Acero al Manganeso 6 - 2 - 1	100
3.- Acero al Cromo-Molibdeno perlítico	95
4.- Acero al Cromo-Molibdeno Martensítico	95
5.- Hierro blanco al Niquel-Cromo (Ni-hard)	155
6.- Hierro blanco Martensítico al Cr-Mo	145

- 1.- Resultados óptimos en la selección de aleaciones específicas empleadas en la fabricación de forros para molinos implican una larga vida de los forros medidos por el costo más bajo por tonelada de producto procesado. Este efecto se consigue solamente cuando se ha llegado a comprender con toda claridad, los factores que influyen en el rendimiento de los materiales para una condición particular de molienda.

La severidad del grado de molienda es determinante para seleccionar un material dúctil resistente al impacto, a fin de prevenir rajaduras y roturas de los forros en servicio. Si las condiciones de impacto fueran moderadas, materiales menos dúctiles, pero más resistentes al desgaste abrasivo se recomiendan por su mayor economía de servicio.

- 3.- Es el espesor de los forros de molino es un elemento muy importante que debe tenerse en cuenta cuando se selecciona el material más apropiado para su fabricación.

- 4.- Los materiales disponibles en el mercado para la fabricación de forros de molino en forma genérica se recomiendan para las siguientes condiciones de servicio.

ALTO IMPACTO

Acero al Manganeso Hadfield endurece su superficie desde 200 hasta 550 Brinell por acción del severo impacto, haciéndolo resistente al desgaste abrasivo del tipo "Gouging".

MODERADO - ALTO IMPACTO

Acero al Manganeso 6 - 2 - 1. La diferencia con el acero al Manganeso Hadfield es que para endurecer su superficie requiere de impacto moderado.

Acero Cromo - Molibdeno Perlítico

Posee una dureza intermedia (250 - 325 Brinell), adecuado para forros de rejilla porque evita el acuñado de las bolas y forros de doble onda.

Es el material de más bajo precio de adquisición.

Acero Cromo - Molibdeno de Alto Silicio (Estructura
Perlitica)

Posee una dureza en el rango de 300 - 380 Brinell, es más resistente a la abrasión que el acero Cr - Mo perlítico y de precio de venta similar.

BAJO - MODERADO IMPACTO, usualmente con alto desgaste abrasivo. Existen tres materiales indicados.

Acero Cromo - Molibdeno de alto silicio (estructura martensítica).

Dureza aprox. 550 600

Fierro blanco al Cromo-Níquel (Ni - Hard)

Dureza aprox. 550 - 690

Fierro blanco al Cromo Molibdeno Martensítico

Dureza aprox. 600 - 744 (+) Brinell

Aunque existen variaciones en el comportamiento de cada uno, debido a las diferentes combinaciones de sus contenidos de aleantes y tratamientos térmicos, en líneas generales se puede establecer que el Acero Cr - Mo martensítico es el más resistente al impacto,

el fierro blanco martensítico al Cr - Mo el de mejor comportamiento para contrarrestar el desgaste abrasi a expensas de una mayor fragilidad y el Ni - Hard se sitúa en un nivel de rendimiento intermedio.

Por último quisiera mencionar que conseguir un rendimiento óptimo de los forros de molino, es un objetivo mutuo de parte del proveedor y del usuario, y tanto como coexista la comunicación y una estrecha cooperación entre minero y fundidor, será posible analizar cada condición de molienda en particular, programar pruebas experimentales con diferentes materiales y, llegar establecer el componente ideal, en función de su rendimiento económico y no de su precio de adquisición.

7.0.

B I B L I O G R A F I A

APPLICATION OF DRY GRINDING ROD MILLS.

C. A Rowland y R. C. Nealey

NORBERG GRINDING MILLS

Norberg Manufacturing Company

MARCY GRINDING MILLS

Marcy Brochure

AN APPROACH TO MILL LINER MATERIALS FOR CRITICAL
GRINDING SERVICE

J. R. Dougall

OPTIMIZING ABRASION RESISTANCE AND TOUGHNESS IN STEELS
AND IRONS FOR THE MINING INDUSTRY.

D. E. Diesburg y F. Borik

FACTORS INFLUENCING THE RESISTANCE OF STEEL CASTINGS
TO HIGH STRESS ABRASION

T. E. Norman

ABRASIVE WEAR OF FERROUS MATERIALS IN CLIMAX OPERATIONS

SELECTION AND PERFORMANCE OF ABRASION-RESISTANT
MATERIALS IN THE MINING AND QUARRING INDUSTRIES.

J. Lampman

HARDENABILITY OF CAST STEELS FOR THE MINING INDUSTRY

Laurence J. Venne.

MARTENSITIC WHITE IRONS FOR ABRASION - RESISTANT CASTINGS

T. E. Norman, A. Solomon y D. V. Doane

ABRASION RESISTANT HIGH CHROMIUM WHITE CAST IRONS

W. Fairhurst y K. Röhrig

PEARLITIC CHROMIUM - MOLYBDENUM STEEL FOR HEAVY SECTION

ABRASION RESISTANT CASTINGS

Climax Molybdenum Company

HOW TO SELECT CHROME - MOLY STEELS FOR BALL AND ROD

MILL LINERS.

T. E. Norman.

Cr. 13 Mo. MARTENSITIC CHROMIUM MOLYBDENUM STEEL FOR
HEAVY SECTION RESISTANT CASTINGS.

Climax Molybdenum Company.

CLIMAX 12-2 ALLOY AUSTENITIC MANGANESE STEEL DISPERSION
HARDENED.

Climax Molybdenum Company

MANGANESE STEELS IN CRUSHING AND GRINDING SERVICE

Herman A, Fabert

NATURE OF THE WORK HARDENING BEHAVIOUR IN HADFIELD'S
MANGANESE STEEL

A. Raghavan, A. S. Sastri y M. J. Marcinkowsky

CONTRIBUTION TO THE STUDY OF THE IMPROVEMENT OF THE
ABRASION RESISTANCE OF MANGANESE AUSTENITIC STEELS

F. J. Maratray y T. E. Norman.

MODIFIED AUSTENITIC MANGANESE STEELS

F. R. Hall

MELTING PRACTICE, HEAT - TREATMENT AND PROPERTIES OF
HADFIELD MANGANESE STEEL

C. A. Farrar

MANGANESE STEEL

Oliver y Boyd

METALS HAND - BOOK

FUNDICIONES NI-HARD PROPIEDADES Y APLICACIONES.

International Nickel

CHROMOSIL DEVELOPMENT PROJECT

G. A. Fisher, C. Samanez

THE ABRASION RESISTANCE OF METALS

Haworth.

HARD FACING ALLOYS OF THE CHROMIUM CARBIDE TYPE

Avery.