

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

*Facultad de Ingeniería Geológica, Minera y
Metalúrgica*



***"FABRICACIÓN DE BOLAS PARA MOLIENDA EN LA
INDUSTRIA DEL CEMENTO"***

TESIS

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO METALURGISTA

PRESENTADO POR:

Rumaldo Rudecindo Olivera Garay

Lima - Perú

1999

INDICE DE TESIS

PROLOGO

INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO 1. INDUSTRIA DEL CEMENTO EN EL PAIS.

- 1.1 DESARROLLO DE LA INDUSTRIA DEL CEMENTO EN EL PAIS.
- 1.2 ESPECIFICACIONES DEL CEMENTO.
- 1.3 PROPIEDADES DEL CEMENTO.
- 1.4 FABRICACION DEL CEMENTO.
- 1.5 COMPARACION DE LOS ELEMENTOS MOLTURANTES EN LA INDUSTRIA DEL BENEFICIO DE MINERALES E INDUSTRIA DE MOLIENDA DEL CEMENTO.

CAPÍTULO 2. EVALUACION DE LOS ELEMENTOS MOLTURANTES USADOS EN EL BENEFICIO DE MINERALES Y LA INDUSTRIA DEL CEMENTO.

- 2.1 ELEMENTOS MOLTURANTES DE FUNDICION BLANCA Y GRIS .
- 2.2 CARACTERISTICAS METALURGICAS DE BOLAS DE ACERO FUNDIDAS USADAS EN EL MERCADO NACIONAL.
- 2.3 CARACTERISTICAS METALURGICAS DE LAS BOLAS FORJADAS USADAS EN EL MERCADO NACIONAL.
- 2.4 CARACTERISTICAS METALURGICAS DE LAS BOLAS DE FIERRO FUNDIDO BLANCO ALEADO Y SIN ALEAR.
- 2.5 RESULTADOS DE EVALUACION DE LAS BOLAS ESTUDIADAS.

CAPÍTULO 3. PRUEBAS EXPERIMENTALES CON BOLAS DE FIERRO FUNDIDO BLANCO ALEADO.

- 3.1 ESPECIFICACION ESTANDAR INTERNACIONAL PARA FIERROS FUNDIDOS BLANCOS RESISTENTES A LA ABRASION.**
 - 3.1.1. ALCANCE.**
 - 3.1.2. CLASIFICACION POR COMPOSICION QUIMICA.**
 - 3.1.3. METODOS DE FABRICACION.**
 - 3.1.4. TRATAMIENTOS TERMICOS.**
- 3.2 COMPOSICION QUIMICA.**
- 3.3 PRACTICA DE FUSION DE ALEACION PARA BOLAS EN FIERRO BLANCO ALEADO.**
 - 3.3.1 CARACTERISTICAS ELECTRICAS DE LOS HORNOS DE FUSION.**
 - 3.3.2 CARGA METALICA.**
 - 3.3.3 PRÁCTICA TÍPICA DE FUSIÓN EN HORNOS DE ARCO ELÉCTRICO ACIDO O BÁSICO.**
 - 3.3.4 TEMPERATURA DE SANGRADO.**
 - 3.3.5 TEMPERATURA DE VACIADO.**
 - 3.3.6 TEMPERATURA DE DESMOLDEO.**
- 3.4 EQUIPOS DE CONTROL DE CALIDAD.**
- 3.5 PRUEBAS DE TRATAMIENTOS TERMICOS EN LABORATORIO CON PROBETAS Y BOLAS KROMOX.**
 - 3.5.1 VARIABLES ANALIZADAS.**
 - 3.5.2 TEMPERATURA DE AUSTENIZADO.**
 - 3.5.3 VELOCIDAD DE CALENTAMIENTO.**
 - 3.5.4 MEDIOS DE TEMPLE.**
 - 3.5.5 REVENIDO.**
- 3.6 PRUEBAS DE TRATAMIENTOS TERMICOS EN PLANTA CON BOLAS.**

- 3.6.1. CARGA DE BOLAS AL HORNO PARA TEMPLE Y REVENIDO.
- 3.6.2. VELOCIDAD DE CALENTAMIENTO.
- 3.6.3. MEDIO DE ENFRIAMIENTO.
- 3.6.4. REVENIDO.
- 3.6.5. CONTROL DE DUREZA Y PORCENTAJE DE AUSTENITA RETENIDA.

CAPÍTULO 4. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.

- 4.1 ANALISIS Y DISCUSION SOBRE COMPOSICION QUIMICA.
- 4.2 ANALISIS Y DISCUSION SOBRE FUSION.
- 4.3 ANALISIS Y DISCUSION DE TRATAMIENTOS TERMICOS EN LABORATORIO Y PLANTA. MICROESTRUCTURAS Y PROPIEDADES.
- 4.4 COSTOS Y ASPECTOS ECONOMICOS DE LA PRODUCCION.
- 4.5 RECOMENDACIONES PARA EVALUAR RENDIMIENTO DE BOLAS EN LA INDUSTRIA DEL CEMENTO.
 - 4.5.1 MARCO TEÓRICO DE REFERENCIA.
 - 4.5.2 COSTO EFECTIVO.
 - 4.5.3 TASAS ESPECÍFICAS DE CONSUMO.
 - 4.5.4 PLAN DE CONTROL DE CALIDAD.
 - 4.5.5 METODOS PRACTICOS DE EVALUACION.

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES.

BIBLIOGRAFIA.

A la memoria de mi hija Vanesita

*A mi esposa Rosa María, y a mis hijos
Rosalie y Rudy Hans.*

PRÓLOGO

La tesis presenta una secuencia ordenada para la fabricación nacional de bolas para molienda en la industria del cemento, que está orientado en obtener por pruebas de tratamiento térmico la microestructura óptima capaz de soportar el menor desgaste por abrasión en molienda y ser resistente al fracturamiento, despostillamiento en servicio.

En el Capítulo 1, se describe el desarrollo de la industria del cemento en el Perú, sus especificaciones, tipos de cemento, su fabricación, uso de los molinos de bolas y una relación comparativa de los molturantes en la industria del beneficio de minerales e industria de molienda de cemento.

En el Capítulo 2, se describe el método de evaluación a nivel de laboratorio de los elementos molturantes usados en la industria del cemento y en la industria del beneficio de minerales y las características metalúrgicas de los elementos molturantes, bolas de acero fundido, forjados, bolas de fierro fundido blanco usadas en el mercado nacional.

El Capítulo 3, está referido a las pruebas experimentales con bolas de fierro fundido blanco aleado (Kromox), desde su fusión, tratamientos térmicos a nivel de laboratorio y a nivel de planta.

El Capítulo 4, está referido al análisis y discusión de los resultados de las pruebas experimentales centrados en las microestructuras, propiedades, costos de manufactura, aspectos económicos de la fabricación y recomendaciones para evaluar el rendimiento de bolas en la industria del cemento.

El Capítulo 5, está referido a las conclusiones de las investigaciones.

Debo reconocer la ayuda invaluable de mis compañeros de trabajo, Ing. Juan Leguía, Ing. Víctor Torres por las facilidades proporcionadas en Mepsa y mi agradecimiento al Ing. Ulises Quintana por el uso del laboratorio de Fumasa.

INTRODUCCIÓN

El costo elevado de importar bolas kromox para molienda en la industria del cemento y existiendo en el Perú fundiciones ferrosas que abastecen de piezas para equipos de beneficio de minerales e industria del cemento en aleaciones similares a las bolas kromox e inclusive las fundiciones nacionales como Mepsa, Fundición Callao, Comesa, Fundición Central, Hidrostal, etc. exportan piezas en metal Kromox a los mercados de Estados Unidos de Norteamérica, Europa y Africa, investigué el desarrollo de su fabricación.

Realicé evaluaciones metalúrgicas preliminares basadas en el índice de desgaste por abrasión con probetas vaciadas en fierros fundidos blancos aleados (kromox) de diferente composición química usados en el mercado nacional, observando una marcada diferencia en los índices relativos de desgaste según los tratamientos térmicos aplicados, en tal sentido la variable de mayor desarrollo en esta tesis se basa en la investigación de los diferentes tratamientos térmicos con el objeto de obtener la microestructura adecuada que cumplan con mayor resistencia al desgaste por abrasión en molienda, resistencia al fracturamiento y despostillamiento.

Las investigaciones para la fabricación de bolas para molienda en la industria del cemento se llevaron a cabo en los laboratorios de Metalúrgica Peruana, Fundición Maleable y Laboratorio Omni Corp. S.A..

Se encontró dificultades de evaluar las bolas kromox microestructuralmente por microscopio óptico: la martensita se presenta en forma masiva y no acicular; la austenita y los diferentes tipos de carburos fueron las mayores dificultades encontradas en cuantificar y reconocer, esto hizo necesario disponer de otros equipos como el microscopio electrónico de barrido y el austenitoscopio. Una vez elegida la composición química, los tratamientos térmicos adecuados de temple, revenido y el medio de temple, se obtiene la aleación con mayor resistencia al desgaste por abrasión en molienda, y al disponer de la infraestructura y tecnología para la fabricación de piezas fundidas en hierro blanco aleado, estamos en condiciones de fabricar bolas kromox para la industria del cemento.

CAPÍTULO 1

INDUSTRIA DEL CEMENTO EN EL PAIS

1.1 DESARROLLO DE LA INDUSTRIA DEL CEMENTO EN EL PAIS

La Industria peruana de cemento inicia su actividad productiva en 1924 con la puesta en marcha de la planta Maravillas propiedad de la Compañía Peruana de Cemento Portland, que explotaba los yacimientos de Atocongo. En esta década se inicia el uso extensivo del concreto en la ciudad de Lima, en pavimentos y edificaciones.

Posteriormente se incorporan al mercado otras empresas descentralizadas: Cementos Pacasmayo S.A. en 1957 y Cemento Andino S.A., ubicado en la provincia de Tarma en 1958, posteriormente Cemento Sur S.A., en la localidad de Juliaca en 1963 y Cementos Yura S.A. en Arequipa en 1966.

El consumo per cápita por habitante es de 159 Kg., ocupando en Latinoamérica el onceavo lugar.

La capacidad instalada de la industria del cemento al término del año 1998 se distribuye de la siguiente manera en toneladas anuales:

Cemento Andino S.A. (Tarma)	760,000
Cemento Lima S.A. (Lima)	2'500,000
Cementos Norte Pacasmayo S.A. (Planta Pacasmayo y Rioja)	1'184,000
Cementos Sur S.A. (Juliaca)	216,000
Cementos Yura S.A. (Arequipa)	600,000
TOTAL	5'270,000

En el año 2,000 se prevé que la capacidad instalada de la industria excederá los siete millones de toneladas.

La industria del cemento ha incorporado de manera oportuna los nuevos avances tecnológicos. En el periodo 1960 - 1970 se adoptó la tecnología de silos de homogeneización continua, llevando a todas las plantas al denominado proceso seco. También se incorporó el sistema de precalentamiento del crudo previo a su ingreso al horno aprovechando sus gases residuales.

En la década siguiente (1970 - 1980), se agregó la precalcación del crudo, que con las mejoras introducidas anteriormente colocaron a la industria en buena posición frente a la crisis del petróleo de 1974. En este mismo período se introducen los equipos de gran capacidad, como el horno de 1'000,000 de toneladas anuales y molinos de 200 toneladas anuales. En los años ochenta se inicia la sustitución del petróleo por el carbón como combustible.

En la actualidad, las ampliaciones en curso han tomado nuevas capacidades, como hornos de 2'000,000 de toneladas anuales. Nuevos sistemas de molturación de reciente tecnología, como los molinos verticales y de rodillos y además los clasificadores de partículas de alta eficiencia.

1.2 ESPECIFICACIONES DEL CEMENTO

De acuerdo a norma el cemento es un material pulverizado que por adición de una cantidad conveniente de agua forma una pasta conglomerante capaz de endurecer, tanto bajo el agua como en el aire. La matriz del cemento lo constituye el clínter que es un producto constituido en su mayor parte por silicatos de calcio, obtenido por la cocción hasta fusión parcial (clinkerización) de una mezcla conveniente proporcionada y homogeneizada de materiales debidamente seleccionados.

Tabla de compuestos químicos que forman el cemento Portland

ELEMENTO	FORMULA	SÍMBOLO
Silicato Tricálcico	3CaO SiO ₂	C ₃ S
Silicato Bicálcico	2CaO SiO ₂	C ₂ S
Aluminato Tricálcico	3CaO Al ₂ O ₃	C ₃ A
Ferroaluminato Tetracálcico	4CaO Al ₂ O ₃ Fe ₂ O ₃	C ₄ AF

El símbolo de abreviación es una forma sencilla de representar la fórmula donde:

C = CaO	S = SiO ₂
A = Al ₂ O ₃	F = Fe ₂ O ₃

Los silicatos enunciados no se encuentran como compuestos puros, contienen pequeñas cantidades de óxidos en solución sólida, que tienen considerable efecto en el ordenamiento atómico y las formas cristalinas, incidiendo en las propiedades hidráulicas.

Cada uno de los cuatro compuestos principales del cemento portland contribuyen en el comportamiento del cemento, cuando pasa del estado plástico al endurecido después de la hidratación. Por ejemplo:

El silicato tricálcico (C_3S). Es el que produce la alta resistencia inicial del cemento Portland hidratado. La reacción del (C_3S) con agua desprende gran cantidad de calor (calor de hidratación). La rapidez de endurecimiento de la pasta de cemento es directamente proporcional con el calor de hidratación.

El silicato dicálcico (C_2S). Es el causante principal de la resistencia posterior de la pasta de cemento.

El aluminato tricálcico (C_3A). El yeso agregado al cemento Portland durante la trituración o molienda en el proceso de fabricación se combina con el (C_3A) para controlar el tiempo de fraguado.

La aluminoferrita tricálcica (C_4AF). Es semejante al (C_3A), porque se hidrata con rapidez y sólo desarrolla baja resistencia.

Los principales compuestos denominados menores son principalmente el MgO , K_2O , Na_2O y además Mn_2O_3 , TiO_2 , P_2O_5 .

Las cantidades de los diferentes tipos de silicatos y aluminatos cálcicos varían apreciablemente de un tipo de cementos a otro. La producción de los diferentes tipos se efectúa por el control proporcional de los materiales correspondientes.

La composición de los cementos Portland de producción nacional se encuentra dentro de los siguientes porcentajes:

CaO	62.5 ~ 64.5 %
SiO ₂	19.0~ 22.0 %
Al ₂ O ₃	4.0~ 6.0 %
Fe ₂ O ₃	3.0~ 3.5 %
MgO	0.9~ 2.9 %
SO ₃	2.3~ 2.6 %

La constitución calculada de los cementos Portland de producción nacional se encuentra dentro del siguiente orden:

C ₃ S	48 ~ 52 %
C ₂ S	17 ~ 27 %
C ₃ A	6 ~ 10 %
C ₄ AF	9 ~ 11 %

En el Perú los cementos Portland se fabrica en cinco tipos cuyas propiedades se han normalizado sobre la base de la especificación ASTM de normas para el cemento Portland (C 150):

Cemento Portland Tipo I: Es el cemento destinado a obras de concreto en general, cuando en las mismas no se especifica la utilización de los otros 4 tipos de cemento.

Cemento Portland Tipo II : Es el cemento destinado a obras de concreto en general y obras expuestas a la acción moderada de sulfatos o donde se requiere moderado calor de hidratación.

Cemento Portland Tipo III: Es el cemento de alta resistencia inicial. El concreto hecho con el cemento tipo III desarrolla una resistencia en tres días igual a la desarrollada en 28 días por concretos hechos con cemento tipo I o tipo II.

Cemento Portland Tipo IV: Es el cemento de cual se requiere bajo calor de hidratación.

Cemento Portland Tipo V: Es el cemento del cual se requiere alta resistencia a la acción de los sulfatos. Las aplicaciones típicas comprenden las estructuras hidráulicas expuestas a aguas con alto contenido de álcalisis y estructuras expuestas al agua de mar.

1.3 PROPIEDADES DEL CEMENTO

El clinker posee un aspecto de polvo color gris verdoso cuyo peso específico oscila entre 3,05 y 3,15. Al ser amasado con agua se solidifica. Se dice entonces que el cemento fragua. El fraguado dura alrededor de una hora, y una vez terminado dura alrededor de una hora, y una vez terminado la resistencia del cemento aumenta en forma lenta y progresiva. El proceso de endurecimiento dura meses y años pero al cabo de los 28 días de terminado el fraguado, el material alcanza un 70 por ciento de la máxima resistencia que adquiere durante su vida útil.

Durante el tiempo que dura el fraguado se protege el material del viento y del sol para evitar un desecamiento excesivamente rápido. Con este fin se lo moja periódicamente. Si una vez iniciado el fraguado se agrega agua a la masa se hace difícil el endurecimiento. Por ello, nunca se prepara mayor cantidad de pasta que la utilizable inmediatamente. La temperatura a que se realiza el fraguado influye en la resistencia y esta disminuye si sufre los efectos de una helada.

De acuerdo con el tiempo de fraguado, dos son los tipos de cemento más usuales. Son los cementos de fraguado lento y los de fraguado rápido. Los de fragua lento son los empleados normalmente por su resistencia mayor y su mejor maniabilidad. El yeso retarda el proceso de fraguado. Los cementos de fraguado rápido son utilizados en obras hidráulicas.

El frío y el calor hacen variar muy poco el volumen del cemento portland pero existe un excedente en las proporciones de contenido de cal o yeso o, si la mezcla es defectuosa, se produce una variación de

volumen fuera de lo normal que se manifiesta mediante grietas de expansión.

Un factor que incide preponderantemente sobre la resistencia es el tamaño de las partículas que lo constituyen. Al disminuir el tamaño de las partículas crece la resistencia. Cuando las partículas son excesivamente pequeñas el efecto se invierte, disminuyendo la resistencia. Por estas razones se determina la composición granulométrica de los cementos mediante tamices que responden a normas establecidas por institutos y sociedades especializadas en investigación sobre cemento.

MÓDULO O ÍNDICE HIDRÁULICO (H)

Los principales constituyentes del cemento portland son: cal (CaO), sílice (SiO₂), alúmina (Al₂O₃) y óxido férrico (Fe₂O₃).

La cal actúa como base, mientras que los óxidos restantes actúan como radicales ácidos. La relación entre ambos es una característica fundamental en un cemento y fue llamada índice o módulo hidráulico por Michaelis.

$$H = \frac{\text{CaO}}{\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3}$$

Si un cemento tiene un índice hidráulico inferior a 1.7 no pertenece al tipo portland. Si el índice es superior a 2.5 existirá un exceso de cal y aparecerán grietas de expansión.

La presencia de cal en la composición de un cemento le da aptitud para el fraguado. La sílice hace más fácil el endurecimiento pero al

mismo tiempo un exceso en las proporciones de sílice retarda el fraguado. El principal responsable del endurecimiento es el silicato tricálcico. Al disminuir la proporción de cal se forma silicato bicálcico cuya capacidad de endurecimiento es menor. La alúmina también contribuye al endurecimiento pero al crecer la proporción en alúmina disminuye el tiempo de fraguado. Esta sustancia da al material resistencia a la acción del agua, y por ello los cementos con alta proporción de alúmina son aptos en perforaciones de campos petrolíferos.

1.4 FABRICACION DEL CEMENTO

La fabricación del cemento comprende tres etapas:

- 1° Explotación de Yacimientos y beneficio de Materia Prima
- 2° Procesos de cocción hasta temperaturas mayores de 1450°C, que constituyen la fase medular del proceso.
- 3° Enfriamiento y molienda del clinker con una adición de aproximadamente 3% de yeso.

El tratamiento de la materia prima comprende la trituración y molienda (en húmedo o seco), la dosificación y homogeneización de los crudos para asegurar la uniformidad y finura necesaria antes de que el material ingrese al horno.

La molienda de crudos utiliza molinos con 3 o más cámaras usando bolas de un mismo ϕ en cada cámara empezando del mayor ($4''\phi$) y última cámara (7 mm de ϕ).

El proceso de cocción moderno se realiza mediante una etapa previa de precalcinación, que se efectúa en una torre de diferentes niveles en la que se encuentran instalados de 4 a 6 ciclones, que constituyen el sistema de intercambio del calor. En ellos se efectúa una transferencia térmica entre la materia que desciende y los gases ascendentes de salida del horno, que llegan a temperaturas superiores a los 1000°C. Generalmente se instalan quemadores, para la precalcinación. El material descarbonatado ingresa a hornos rotatorios de grandes dimensiones, que efectúan el tratamiento de los crudos a temperaturas de 1450°C a 1500°C.

En la tercera etapa el clinker que sale a temperaturas superiores a 1200°C accede a un enfriados, de manera de facilitar su manipulación y transporte.

Luego del enfriamiento el clínker debe ser molido (en seco y en circuito cerrado o abierto).

La molienda del clínker utiliza molinos con 3 ó más cámaras (compartimentos) usando bolas de un mismo ϕ para cada cámara, empezando del mayor 4" ϕ , siguiente cámara 3" ϕ , siguiente cámara 2" ϕ , siguiente cámara 1" ϕ , últimas cámaras 1/2" ϕ . En las moliendas del clínker se asocia la finura de molienda a una propiedad importante. La importancia del tamaño de la partícula reside en el grado de actividad de Reacción con el Agua y la formación de compuestos de Hidratación, es decir, según sea la granulometría del cemento varía su comportamiento resistente.

La finura del clínker es realizado por el granulómetro láser, que consiste en hacer atravesar el polvo de cemento por un haz de luz monocromático emitido por un láser, el reparto de la Luz Difractada permite determinar la curva granulometría analizando partículas de 0.1 μ A 315 μ .

La medición adecuada de la finura del cemento es:

$$1.1 \times 10^{12} \text{ partículas por kilogramo.}$$

Para cumplir con la finura adecuada se usa:

Bolas de acero forjado de 4" a 1" de diámetro

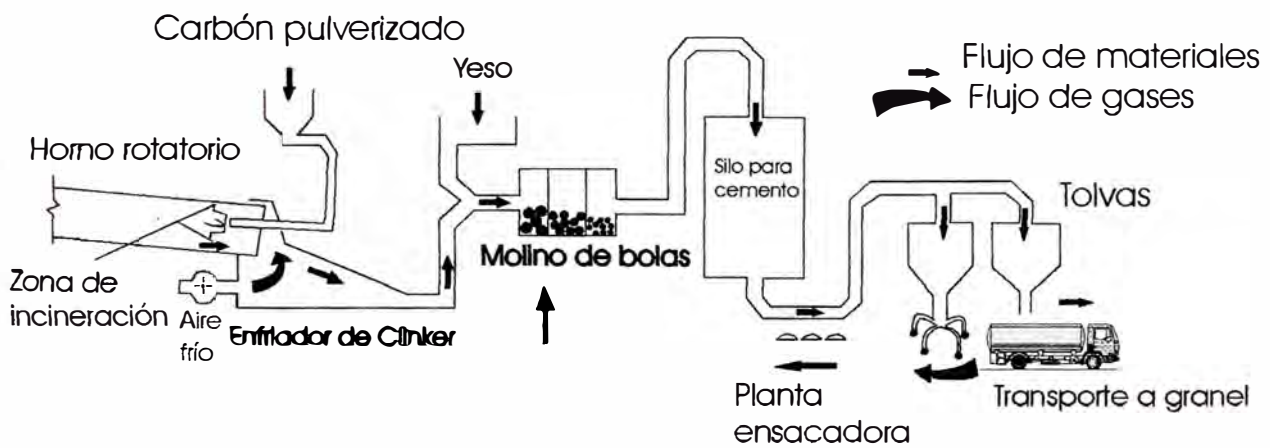
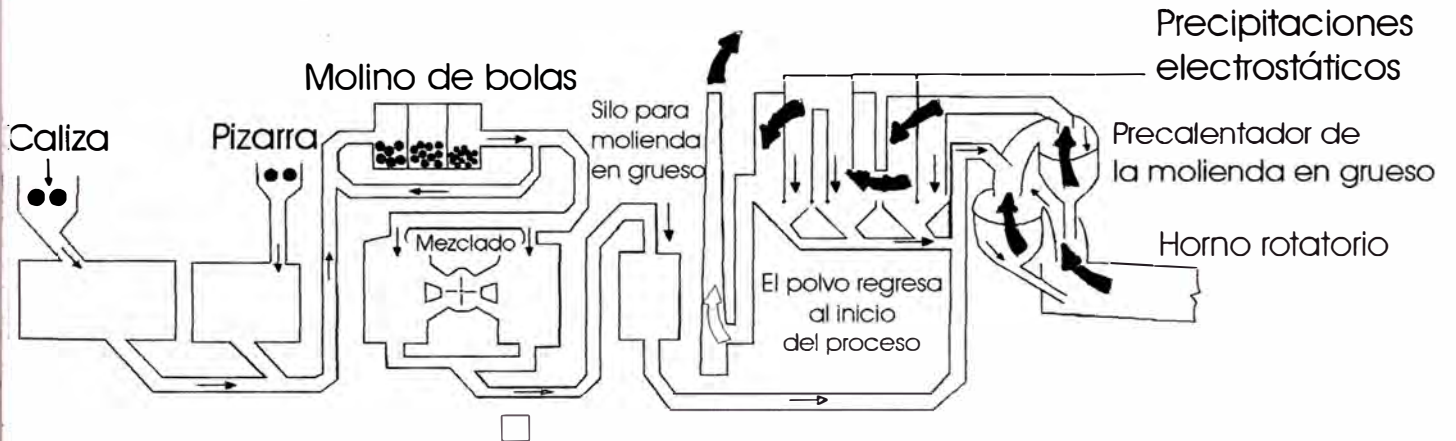
Bolas de acero fundido de 4" a 1" de diámetro

Bolas de fierro blanco aleado y sin alear de 4" a 1" de diámetro

Cilpebs de 1" y 1/2" de diámetro de fierro blanco aleado y sin alear.

El mejor rendimiento se consigue con bolas en fierro blanco al cromo martensítico denominado Kromox.

Planta de Cemento



1.5 COMPARACIÓN DE LOS ELEMENTOS MOLTURANTES EN LA INDUSTRIA DEL BENEFICIO DE MINERALES E INDUSTRIA DE MOLIENDA DEL CEMENTO

Industria del Beneficio de Minerales:

Molienda (primaria, secundaria, terciaria y remolienda), en húmedo en circuito abierto o cerrado, el objetivo es el grado de liberación de la parte valiosa del mineral se usa:

Bolas de fundición gris, blanca, nodular con o sin tratamiento térmico.

Bolas de aceros sin alear con o sin Tratamientos Térmicos

Bolas de acero aleado con Tratamientos Térmicos

Bolas de Aceros Forjado con Tratamientos Térmicos

Bolas de fierro blanco aleado con o sin Tratamientos Térmicos

CilPebs, Koni Pebs de fierro gris, blanco, atruchado.

Desgaste aparente (promedio general gr./Ton, lb/ Ton.)):

400 -800	gr./Ton	ó
1 - 2.5	lb/ Ton	

Ejemplo de casos típicos de desgaste:

Bola fundida MEPSA : 1.16 lb/Ton.

Bola forjada BORDERSTEEL : 1.07 lb/Ton.

Bola forjada ADESUR : 1.10 lb/Ton.

Deformación: Desgaste poliédrico

Porcentaje de rotura: 2 %.

El precio promedio de bolas de acero en el mercado nacional es: 540\$/Ton.

El Consumo promedio anual de bolas es de 30,000 Ton., que representa un costo por consumo anual de \$15'200,000.

La molienda en la Industria del Cemento:

A. Molienda de Crudos puede ser en seco o húmedo y en circuito abierto o cerrado. El objetivo es la finura.

Desgaste aparente (promedio general gr./Ton, lb/ Ton.):

120.0 -180.0	gr./Ton	ó
0.264 - 0.396	lb/ Ton	

B. Molienda del clínker en seco cuyo objetivo es la finura.

Desgaste aparente (promedio general gr./Ton, lb/ Ton.)):

0.6 lb/ Ton.

Deformación: Desgaste esférico

Porcentaje de rotura: 0 %

El precio promedio de bolas de fiero fundido blanco aliado (Kromox) en el mercado Nacional es: 1,500 \$/Ton.

La producción de cemento fue en 1998 de 5'260,000 toneladas anuales por su relación de consumo 0.6 libras de bola/tonelada nos da un consumo de 1430 Ton de bolas anuales y para el año 2000 se proyecta producir 7 millones de cemento, que requerirá 1,900 Ton de bolas anuales con un costo anual de \$2'850,000 por consumo de bolas Kromox.

Después de concluir satisfactoriamente las pruebas de laboratorio, es posible su fabricación en el país. Sé determinó las variables que definen su calidad: desgaste prematuro (microestructura); desgaste poliedrico (microestructura y defectos internos); y, fracturamiento, despostillamiento (tratamiento térmico por alto porcentaje de austenita retenida). La variable determinante es el medio de temple: polímero al 15%.

CAPÍTULO 2

EVALUACION DE LOS ELEMENTOS MOLTURANTES USADOS EN EL BENEFICIO DE MINERALES Y LA INDUSTRIA DEL CEMENTO

El método adecuado de evaluar los cuerpos moledores de la industria del cemento a nivel de laboratorio en forma representativa y confiable es cuantificando sus parámetros de calidad: diámetro real del cuerpo moledor, peso, análisis químico, dureza volumétrica (másica), microestructura.

DIAMETRO REAL DEL CUERPO MOLEDOR: permite detectar diferencias significativas en la densidad (gr/cm^3) del cuerpo moledor. Bolas con defectos internos de porosidad, rechupe puede tener una densidad hasta un 4% menor que bolas sólidas. De mayor relevancia aún dado que la densidad de la carga afecta proporcionalmente la potencia demandada por los molinos, es de esperar entonces que, para un mismo nivel de llenado y además condiciones operacionales, la potencia y por ende, la capacidad de tratamiento de un molino cargado con bolas con defectos internos sea hasta un 4% menor que la de un molino similar recargado con bolas sólidas.

PESO DEL CUERPO MOLEDOR: permite detectar el porcentaje superior o inferior al peso nominal, que está directamente relacionado al diámetro real de la bola y su solidez. Es frecuente encontrar bolas de peso 10-15% superior al nominal, cuyo diámetro es en consecuencia 3-5% mayor que el indicado.

ANALISIS QUIMICO DEL CUERPO MOLEDOR: permite identificar el tipo de aleación, determinar el tiempo de inicio de transformación perlítica.

MICROESTRUCTURA DEL CUERPO MOLEDOR: permite evaluar la matriz, los tipos de carburos, el porcentaje de austenita retenida, las inclusiones, defectos internos de superficie al centro y tratamientos térmicos.

DUREZA VOLUMETRICA (MASICA): permite evaluar la dureza de superficie al centro, el cual es un indicativo de la resistencia al desgaste durante el servicio de molienda.

2.1 ELEMENTOS MOLTURANTES DE FUNDICION BLANCA Y GRIS (KONI PEBS).

Son cuerpos moledores utilizados en la industria del beneficio de minerales y en molienda de la industria del cemento. Son de geometría variable destacando los tronco cónicos, cilíndricos, con pesos inferiores a 1,500 gramos y que reemplazan a bolas de molienda de 1/2 a 2 1/2" pulgadas de diámetro.

Estos elementos morturantes son llamados Koni Pebs

Koni Pebs 2 1/2" en fierro fundido Blanco: sin alealer y sin tratamiento térmico (As Cast) usados en remolienda de la industria minera.

Fabricante: CHILE

Usuario: PETROMIN

Aspecto Generales: Forma semi ovoide con acabado superficial de molde metálico, los cuales son llenados en posición horizontal, ϕ mayor = 2 1/2", altura = 2 11/16 cuya vista frontal y vista de planta se muestra en el diseño adjunto.

Peso: 1230.3 gramos (similar a peso de bola de 2 1/2" de diámetro)

- Análisis Químico:

C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	Sn
3.37	0.53	0.64	0.037	0.049	0.10	0.40	0.003	0.12	0.006

Dureza: 50 Rc = 500 Brinell

Microestructura:

Matriz de perlita fina hipoeutectica en disposición dendrítica rodeada de carburos de fierro (cementita) en red interdendrítica. Estructura general fina corresponde a una estructura normal para un fierro fundido blanco sin alealer y sin tratamiento térmico. La estructura fina es producto de enfriamiento rápido en moldes metálicos (foto a 200x).

MICRO ESTRUCTURA DE KONI PEBS 2 1/2” EN FIERRO FUNDIDO BLANCO

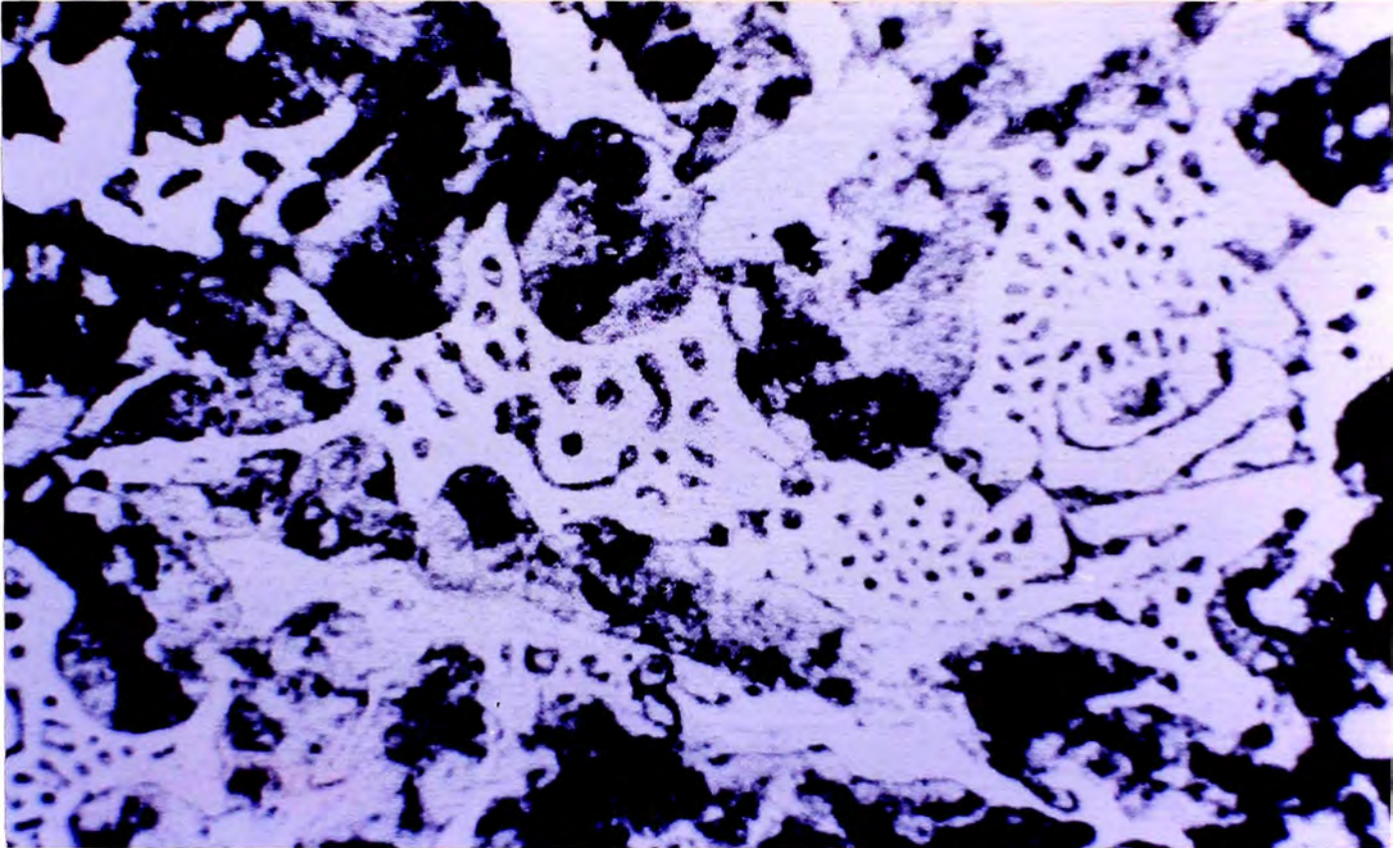
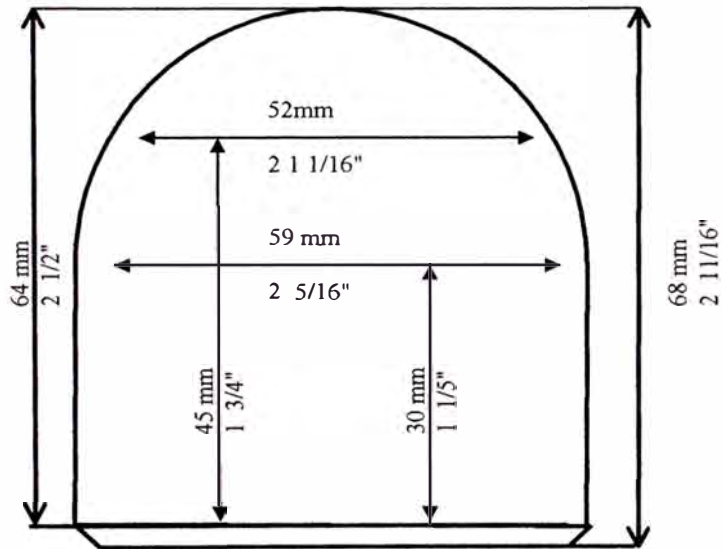


FOTO A 200 X

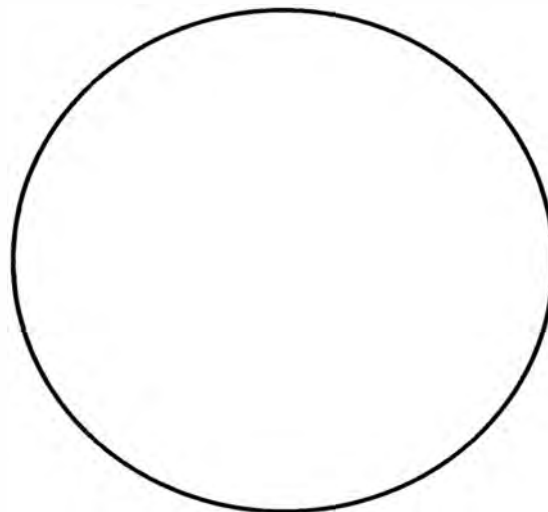
Matriz de perlita fina hipoeutectica en disposición dendrítica rodeada de carburos de hierro (cementita) en red interdendrítica. Estructura general fina corresponde a una estructura normal para un hierro fundido blanco sin alear y sin tratamiento térmico. La estructura fina es producto de enfriamiento rápido en moldes metálicos (foto a 200x).

KONYPEBS PETROMIN

VISTA FRONTAL



VISTA DE PLANTA



$\phi = 64 \text{ mm}$
(2 1/2")

KONI PEBS 1" en Fierro fundido Blanco: sin alear y sin tratamiento térmico (As Cast) usados en remoliendo en la industria minera.

Fabricante: CHILE

Usuario: SPCC - Toquepala en lugar de bolas de 1"φ. (Peso bola 1"φ = 69.8 grs).

Aspectos Generales: Forma Tronco - cónica, con acabado superficial de molde metálico, los cuales son llenados en posición horizontal con diámetro menor en la base y el mayor a nivel de la superficie.

TABLA N° 1
PESOS, DIMENSIONES Y DUREZA

PESO (Grs.)	DIMENSIONES Pulg.			DUREZA SUPERFICIAL "Rc"
	X	Y	Z	
1. 93.4	0.891	1.031	1.094	51.98
2. 8435	0.883	1.035	1.023	51.90
3. 93.2	0.922	1.039	1.039	48.90
4. 107.8	0.937	1.062	1.156	50.48
5. 97.0	0.891	1.062	1.078	<u>50.98</u> X=50.58 Rc

TABLA N° 2
ANÁLISIS QUÍMICO

C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	C.E.
2.75	0.26	2.31	0.054	0.338	0.1	0.15	0.01	0.246	3.54
3.07	0.26	2.27	0.038	0.545	0.09	0.19	0.01	0.182	3.84
3.06	0.21	1.21	0.028	0.252	0.09	0.15	0.01	0.189	3.47
3.22	0.20	1.17	0.039	0.254	0.08	0.14	0.01	0.222	3.62
<u>3.30</u>	0.22	<u>1.30</u>	0.035	<u>0.242</u>	0.1	0.18	0.01	0.180	3.75
3.08		1.70		0.318					

MICROESTRUCTURA

Matriz perlítica, cementita libre acicular y eutectico ledeburita (correspondiente a un fierro blanco sin alear).

Se observa inclusiones globulares de sulfuro de manganeso tipo A serie fina # 3 a # 5 ASTM.

Los Koni Pebs no han sido tratados térmicamente , el promedio de dureza: 50.58 Rc es baja considerada en comparación con elementos molturantes tratados térmicamente que por lo general están sobre los 60.00 Rc.

A la fecha este tipo de elementos molturantes han sido descartado su uso en SPCC (Toquepala), por su bajo rendimiento en remolienda.

KONI PEBS 1" en Fierro fundido Atruchada (mixta): sin alear y sin tratamiento térmico (AS CAST) usados en remolienda en la industria minera.

Fabricante: CHILE

Usuario: SPCC - Toquepala en lugar de bolas de 1"φ. (Peso bola 1"φ = 69.8 gr).

Aspectos Generales: Igual a los del fierro fundido blanco.

TABLA N° 3
PESO, DIMENSIONES Y DUREZA

PESO (Grs.)	DIMENSIONES Pulg.			DUREZA SUPERFICIAL "Rc"
	X	Y	Z	
1. 86.5	0.922	1.047	0.984	44.13
2. 88.4	0.852	1.023	1.034	<u>45.65</u> X=44.89

TABLA N° 4
ANÁLISIS QUÍMICO

C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	B	C.E.
2.96	0.26	2.29	0.032	0.372	0.095	0.18	0.010	0.192	0.052	3.73
3.06	0.22	1.20	0.034	0.261	0.095	0.15	0.011	0.182	0.031	3.47

MICROESTRUCTURA

Microestructura de los dos tipos blanca y gris en forma entremezclada. Matriz Perlítica con presencia de grafito tipo D, cementita y eutéctico ledeburita. Foto a 100x

Sin algún que se observa inclusiones globulares de sulfuro de manganeso tipo A serie fina #3 a #5 ASTM.

MICRO ESTRUCTURA DE KONI PEBS 1” EN FIERRO FUNDIDO ATRUCHADO

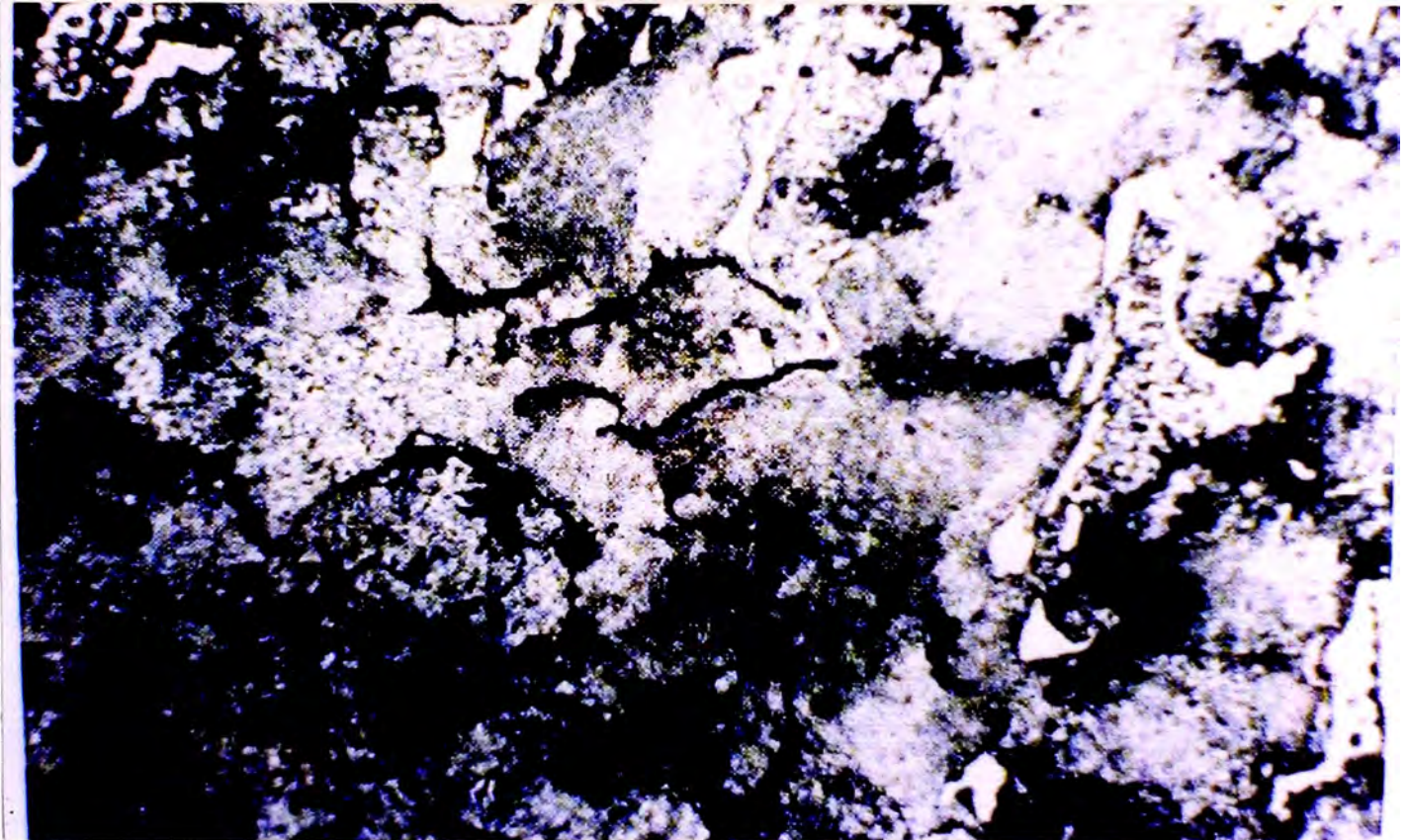


FOTO A 100 X

Microestructura de los dos tipos de fundición blanca y gris en forma entremezclada.

Matriz perlítica con presencia de grafito tipo D, cementita y auténtico ledeburita

KONI PEBS 1" en Fierro fundido Gris: sin alear y sin tratamiento térmico (As Cast) usados en remoliendo en la industria minera.

Fabricante: CHILE

Usuario: SPCC - Toquepala en lugar de bolas de 1"φ. (Peso bola 1"φ = 69.8 gr.).

Aspectos Generales: Igual a los de fierro fundido blanco.

TABLA N° 5
PESO, DIMENSIONES Y DUREZA

PESO (Grs.)	DIMENSIONES Pulg.			DUREZA SUPERFICIAL "Rc"
	X	Y	Z	
1. 81.4	0.906	1.031	0.984	35.66
2. 98.7	0.875	1.086	1.180	33.66
3. 91.9	0.898	1.083	1.023	<u>36.98</u>
				X = 35.43

TABLA N° 6
ANÁLISIS QUÍMICO

C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	B	C.E.
2.76	0.26	2.94	0.050	0.334	0.113	0.21	0.13	0.208	0.41	3.76
2.74	0.28	2.97	0.036	0.359	0.113	0.21	0.12	0.201	0.52	3.74
<u>2.81</u>	0.26	3.03	0.49	0.272	0.116	0.21	0.14	.218	0.32	3.84
2.77										

MICROESTRUCTURA

Matriz perlítica con grafito fino tipo D (interdendrítica) segregado sin orientación definida. El grafito es propio de fundiciones grises enfriadas rápidamente (utilizan Coquilla - moldes metálicos) se observa inclusiones globulares de sulfuro de manganeso tipo A serie #3 a #5 ASTM.

RESUMEN DE KONI PEBS

1. Básicamente se utilizan en Remolienda de minerales.
2. Son fabricadas por procesos de fusión en hornos eléctricos de arco, inducción, cubilote (el mas común) y vaciadas en moldes metálicas con el objeto de obtener fundición blanca y se suministran en bruto de colada (As Cast) o sea sin tratamiento térmico.
3. Existe relación entre la composición química, microestructura y dureza. Al final de la tabla N° 7 se muestra las características de una bola de acero fundido de 1" de diámetro con tratamiento térmico de temple para efectos de comparación.

TABLA N° 7

TIPO DE KONI PEBS	Dureza Rc	Microestructura
Koni Pebs de fundición blanca 2 1/2" ϕ C = 3.37 1" ϕ Si = 0.67 S = 0.049	 50.00 Rc 50.85 Rc	Matriz Perlítica rodeado de cementita y eutéctico ledeburita
Koni Pebs de fundición atruchada (El Azufre alto se opone a la grafitización) C = 3.01 Si = 1.75 S = 0.317	44.89 Rc	Matriz Perlítica con presencia de grafito tipo D, cementita y eutéctico ledeburita
Koni Peb de fundición gris de 1" ϕ C = 2.77 Si = 2.98 S = 0.322	35.43 Rc	Matriz Perlita con grafito tipo D
Bola fundida de acero de 1" ϕ C = 0.85 Cr = 0.18 Mo = 0.25	63.64 Rc	Matriz martensítica 100%

Por lo tanto el rendimiento de bolas de acero de 1" de diámetro serán mayor que los Koni Peb de fundición blanca, atruchada y gris.

2.2 CARACTERÍSTICAS METALÚRGICAS DE BOLAS DE ACERO FUNDIDAS USADAS EN EL MERCADO NACIONAL

BOLAS DE ACERO FUNDIDO DE FABRICACION NACIONAL:

En este campo la de mayor importancia por su volumen de producción es MEPSA (capacidad = 40,000 toneladas año) y de producción en pequeña escala es fundición ventanilla (capacidad = 2,000 toneladas año).

MEPSA: Cuenta con 1 horno eléctrico de arco, de 20 Ton de capacidad, con paneles refrigerados y operación ácida.

Tiempo de fusión: 1h 45 minutos

La marcha de colada en el horno es:

1. Parchado del horno
2. Cargas de cesta de chatarra y carbón
3. Cierre del horno
4. Encendido en TAP 2 por 5 minutos y luego a TAP 1
5. Recargar
6. TAP 2 por 5 minutos y luego a TAP 1
7. Cuando metal esté totalmente fundido soplar 4 minutos de oxígeno para afinar.
8. Toma de temperatura
9. Envío de muestra al laboratorio
10. Retirar la escoria
11. Adición de aleantes
12. Tomar temperatura y sangrar a temperatura adecuada con adición de 1 Kg. de aluminio por Ton y 1/2 Kg. de Fe-Si/Ton a la cuchara dirigiéndose al horno de mantenimiento (holding) de 40 Ton de capacidad y de allí vaciar en tornamesa en moldes de semicoquilla (mitad arena en resina y mitad en coquilla de acero).

TRATAMIENTO TÉRMICO DE BOLAS DE ACERO FUNDIDO

Las bolas son sometidas a un tratamiento térmico de endurecimiento que consiste en su calentamiento en hornos continuos hasta temperatura de austenización óptima, templándose luego en agua con control de severidad de temple por medio de polímeros en concentración adecuada.

Los tiempos de calentamiento y templado están en función del diámetro de bola y composición química.

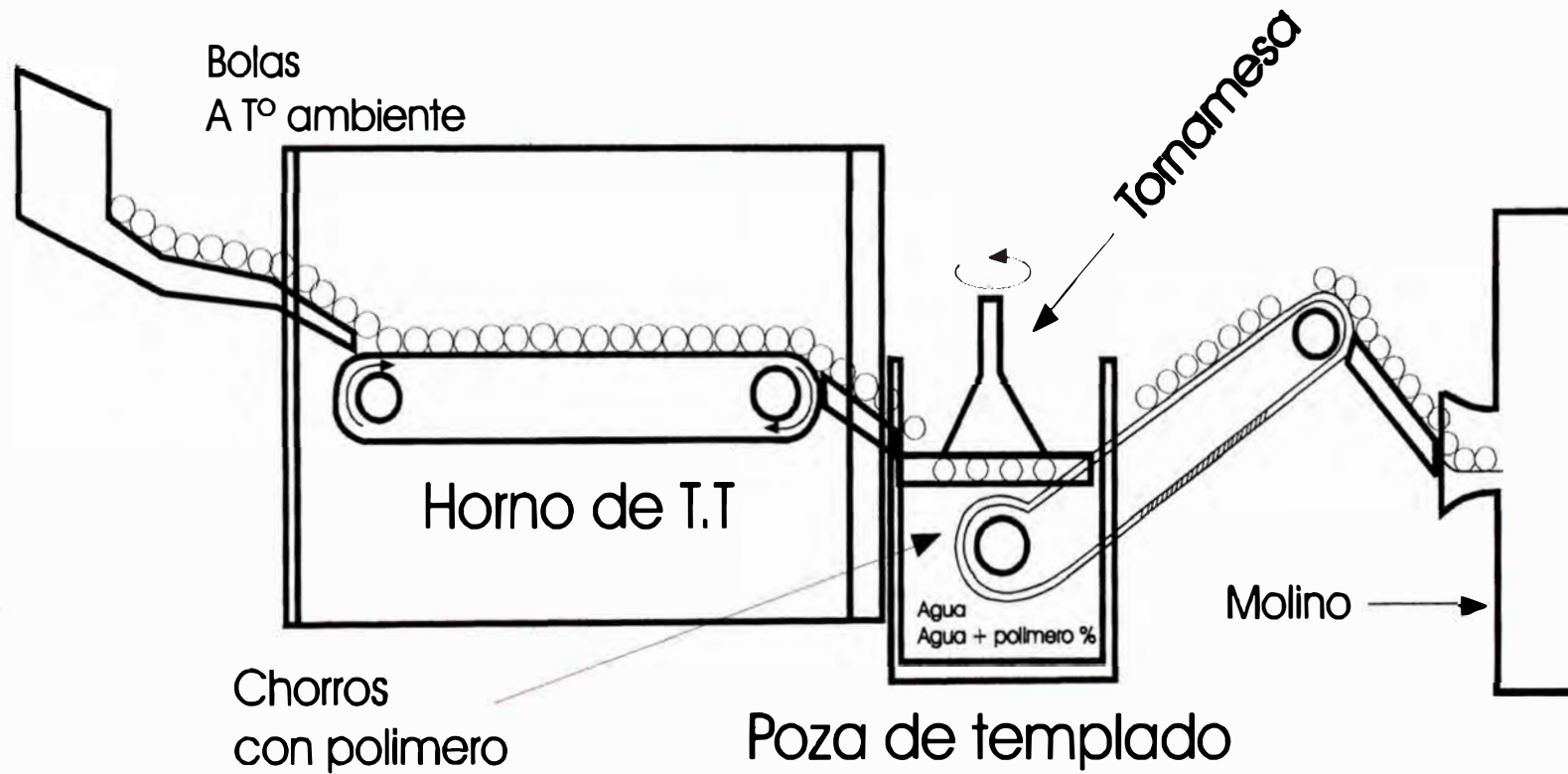
A continuación las bolas son sometidas a un proceso de distensionado y pulido, quedando entonces listas para su control de calidad y posterior despacho.

TABLA N° 8

RESUMEN DE T.T. DE BOLAS DE ACERO PARA LA INDUSTRIA MINERA

TIPO DE BOLA (ϕ ")	1"	1.1/2"	2"	2.1/2"	3"	3.1/2"	4"
ZONA AUSTENIZADO:							
TEMP	800°C	840°C	840°C	840°C	840°C	840°C	840°C
TIEMPO BOLAS EN HORNO	0h.42'	0h.53'	1h.05'	1h.20'	1h.30'	2h.00'	2h.30'
TEMPERATURA DEL AGUA °C	35-40	34-40	34-40	34-40	34-40	34-40	34-40
% CONCENTRAC. POLIMERO	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
TEMP/SALIDA BOLAS (°F)	375 400	350 400	350 400	350 400	350 400	350 400	350 400
PRESIÓN DE CHORROS(PSI)	-	-	12	14	18	20-22	20-22
DUREZA MASA (mínima) Rc	63.0	63.0	62.5	61.0	61.0	60.0	59.0
REVENIDO 4" ϕ	TEMP. HORNO (°C)						204.0

DIAGRAMA TIPICO DE TRATAMIENTO TERMICO DE BOLAS FUNDIDAS DE ACERO



RESISTENCIA AL IMPACTO

En concordancia con la norma ASTM A 370-92 en la parte que corresponde a la prueba de IMPACTO CHARPY, efectuada a temperatura ambiente en probetas estándar tratadas térmicamente en forma similar al de bolas para obtener una estructura MARTENSITICA equivalente.

Resistencia al impacto: mínimos 2 Joules.

TABLA N° 9
ANÁLISIS QUÍMICO Y DI PARA BOLAS DE ACERO FUNDIDO
PARA TEMPLAR EN POLIMERO

Diámetro	C	Mn	Si	Cr	Mo	Cu +Ni	S y P	Al	DI
1 1/2',2'	<u>0.85</u>	<u>0.70</u>	<u>0.35</u>	<u>0.35</u>	0.02	0.30	0.04	<u>0.04</u>	<u>2.65</u>
	0.95	0.80	0.45	0.45	Res.	Res.	Máx	0.08	3.69
Óptimo	0.90	0.75	0.40	0.40	0.06	—	—	0.06	3.17
2 1/2',3'	<u>0.75</u>	<u>0.70</u>	<u>0.35</u>	<u>0.40</u>	0.04	0.30	0.04	<u>0.04</u>	<u>2.81</u>
	0.85	0.80	0.45	0.50	—	Res.	Máx	0.08	3.91
Óptimo	0.80	0.75	0.40	0.45	0.04	—	—	0.06	3.36
3 1/2',4"	<u>0.70</u>	<u>0.75</u>	<u>0.35</u>	<u>0.50</u>	0.05	0.30	0.04	<u>0.04</u>	<u>3.17</u>
	0.80	0.85	0.45	0.60	—	Res.	Máx	0.08	4.38
Óptimo	0.75	0.80	0.40	0.55	0.05	—	—	0.06	3.85

El Diámetro Crítico Ideal (DI) es la expresión numérica de la templabilidad de los aceros; se expresa en pulgadas.

Consideremos óptimo el análisis químico y DI a la media aritmética que permite agrupar diámetros de bolas para el proceso de fusión y vaciado y obtener en los tratamientos térmicos de temple menor riesgo de fracturamiento.

% Concentración de polímero = 3.0 - 3.5%

Presión de chorros de agua en el temple = 12-14 PSI.

VARIACIÓN DE LA COMPOSICIÓN QUÍMICA SEGÚN MEDIOS DE TEMPLE

BOLAS FUNDIDAS DE ACERO

TABLA N° 10

TIPO	C		Mn		Si		Cr		Mo	
	Agua	Polim.	Agua	Polim.	Agua	Polim.	Agua	Polim.	Agua	Polim.
1"	.75	.85	.45	.45	.36	.30	.17	.18	.025	.025
1 1/2"	.75	.85	.50	.64	.40	.30	.18	.30	.025	.025
2"	.80	.85	.53	.85	.40	.30	.30	.32	.025	.040
2 1/2"	.75	.85	.70	.75	.40	.40	.30	.50	.070	.070
3"	.75	.85	.70	.80	.40	.40	.30	.40	.070	.080
3 1/2"	.75	.85	.70	.85	.40	.40	.35	.50	.080	.080
4"	.75	.85	.75	.85	.40	.40	.35	.63	.080	.100

AGUA = 100%

POLIMERO = 3-3.5%

VARIACIÓN DEL DI SEGÚN MEDIO DE TEMPLE

BOLAS FUNDIDAS DE ACERO

TABLA N°11

	<u>1"</u>	<u>1 1/2"</u>	<u>2"</u>	<u>2 1/2"</u>	<u>3"</u>	<u>3 1/2"</u>	<u>4"</u>
AGUA 100%	1.55	1.71	2.14	2.71	2.83	3.04	3.20
CON POLIMERO	1.55	2.03	3.03	3.61	4.07	4.42	4.96
VARIACIÓN	-	0.32	0.89	0.90	1.59	1.03	1.76

**DUREZA DE BOLAS DE ACERO FUNDIDOS TRATADAS TÉRMICAMENTE
PARA LA INDUSTRIA MINERA**

TABLA N° 12

ϕ (Pulg)	SUPERFICIE		1/2"		CENTRO		VOLUMÉTRICA (MASA)	
	Máx.	Min.	Máx.	Min.	Máx.	Min.	Máx.	Min.
1 ½	65.0	62.0	63.8	60.8	62.5	60.0	64.5	62.0
2	65.0	62.0	63.3	60.8	62.0	58.5	64.0	61.5
2 ½	64.0	61.5	62.7	60.0	60.0	57.0	63.5	61.0
3	64.0	61.5	62.7	60.0	57.0	54.0	63.0	60.5
3 ½	63.5	61.0	62.0	60.0	53.0	49.0	62.5	60.0
4	63.0	60.0	62.0	59.0	51.0	48.0	62.0	59.0

GRÁFICO N° 1 PERFIL DE DUREZA - BOLA DE 1.5"

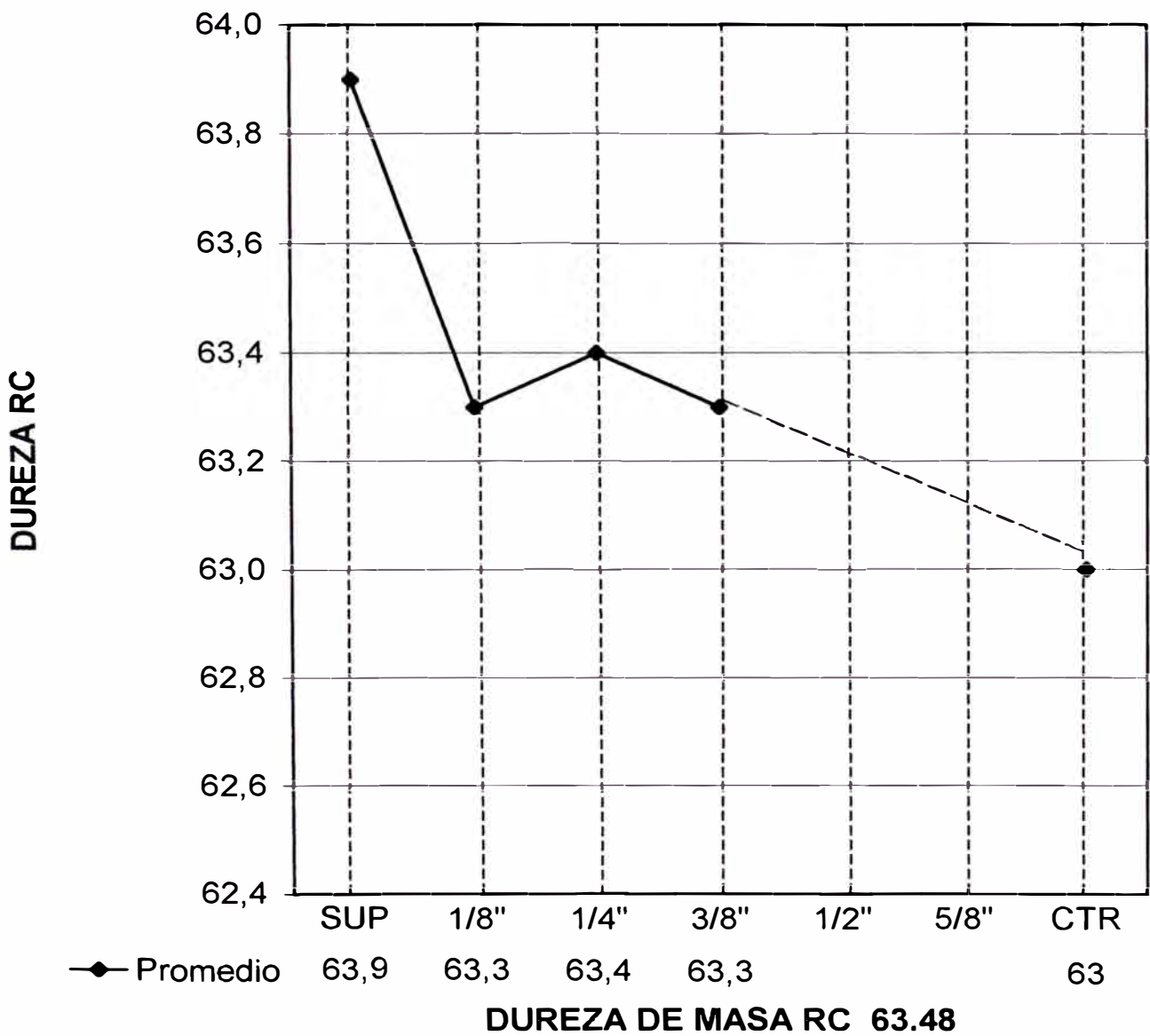


GRÁFICO N° 2 PERFIL DE DUREZA - BOLA DE 2"

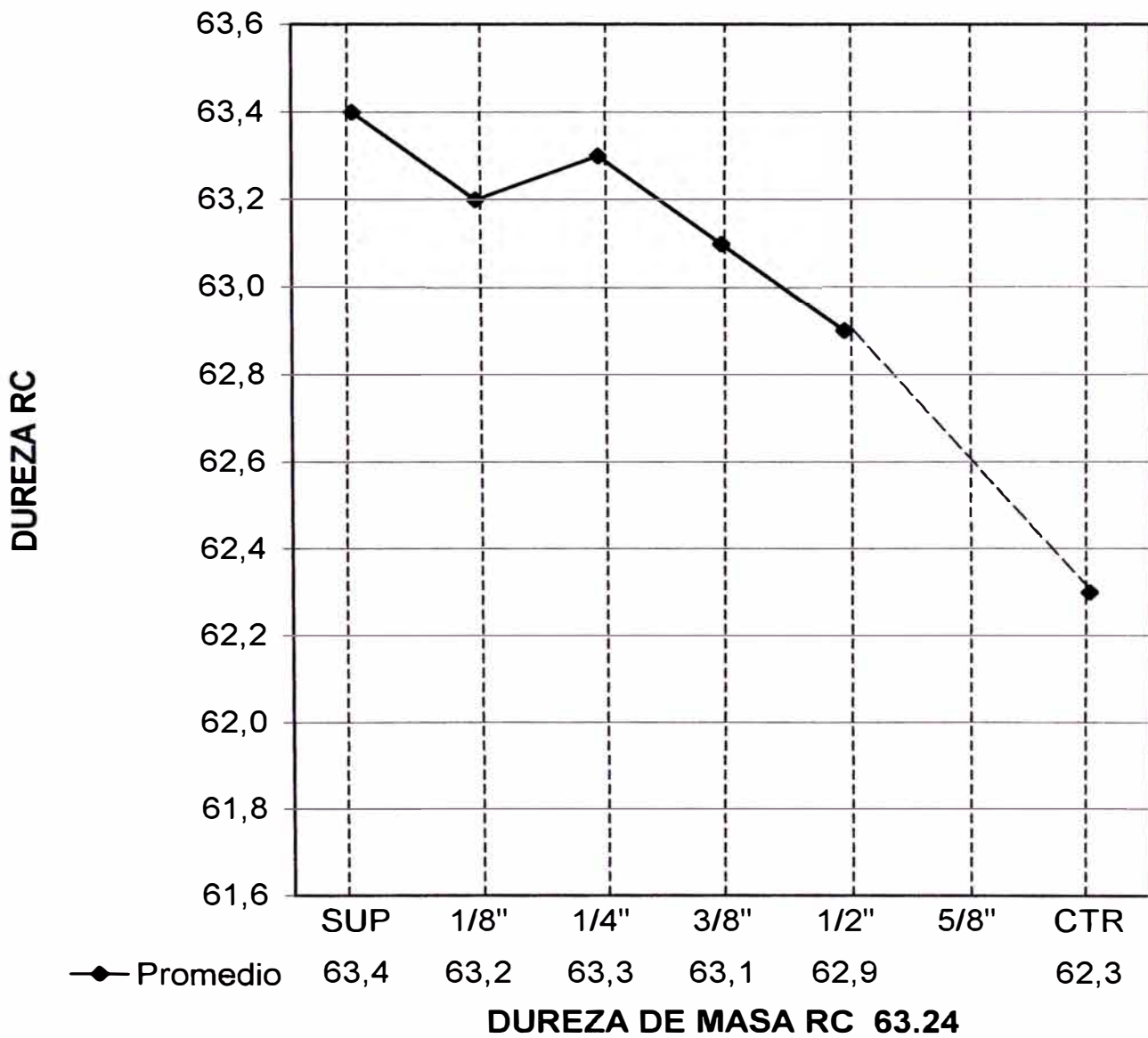


GRÁFICO N° 3 PERFIL DE DUREZA - BOLA DE 2,5"

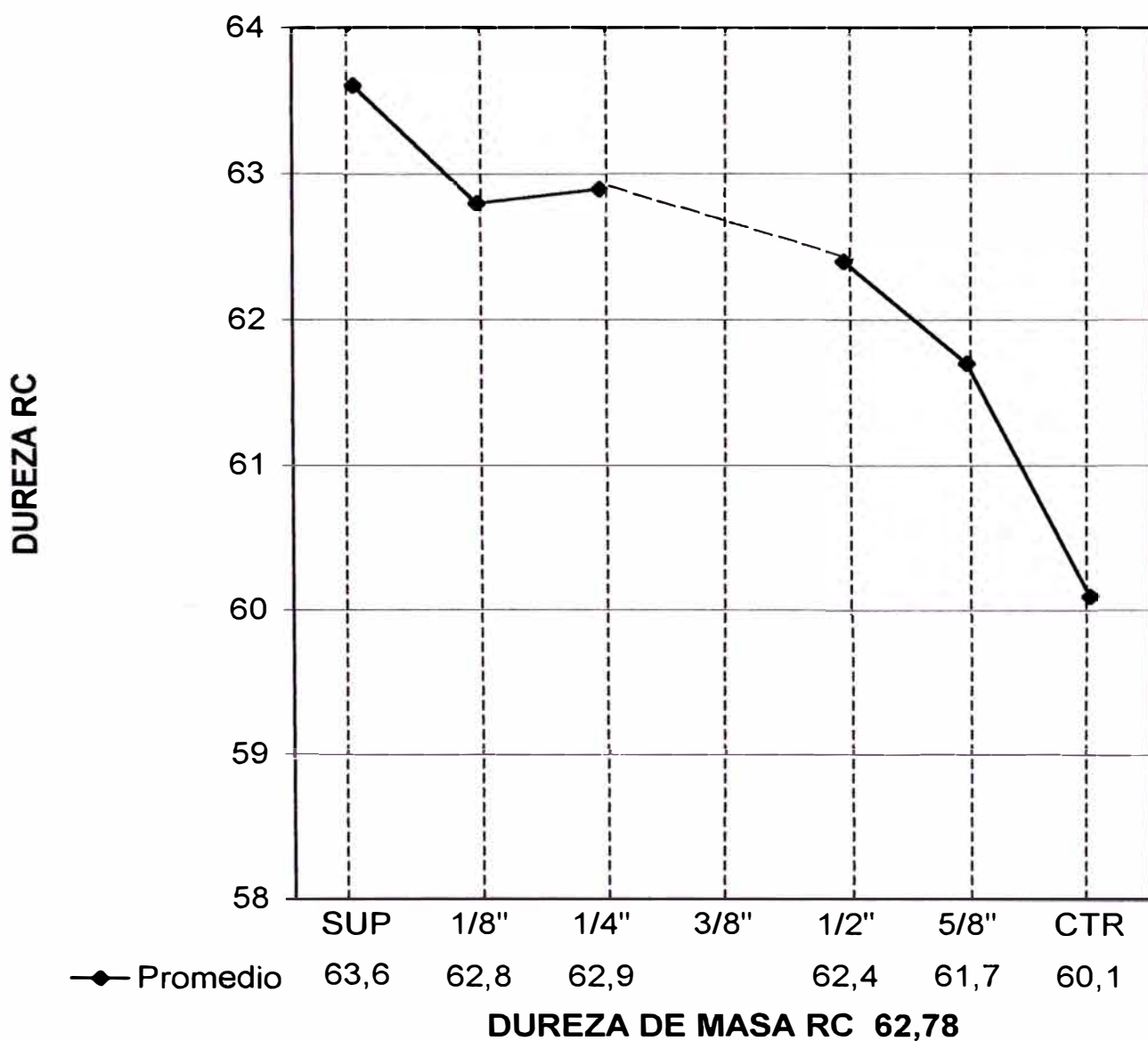


GRÁFICO N° 4 PERFIL DE DUREZA - BOLA DE 3"

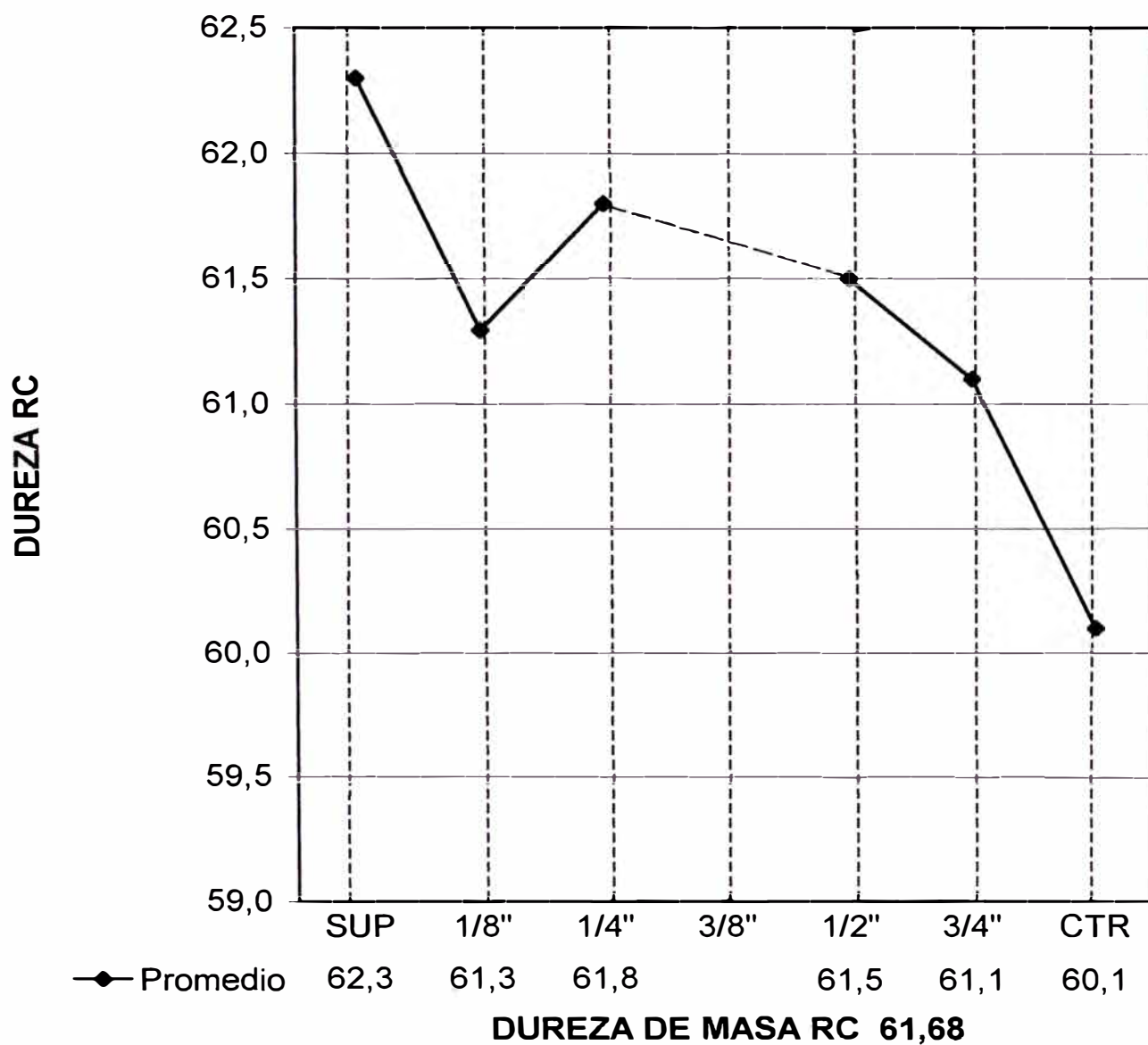


GRÁFICO N° 5 PERFIL DE DUREZA - BOLA DE 3,5"

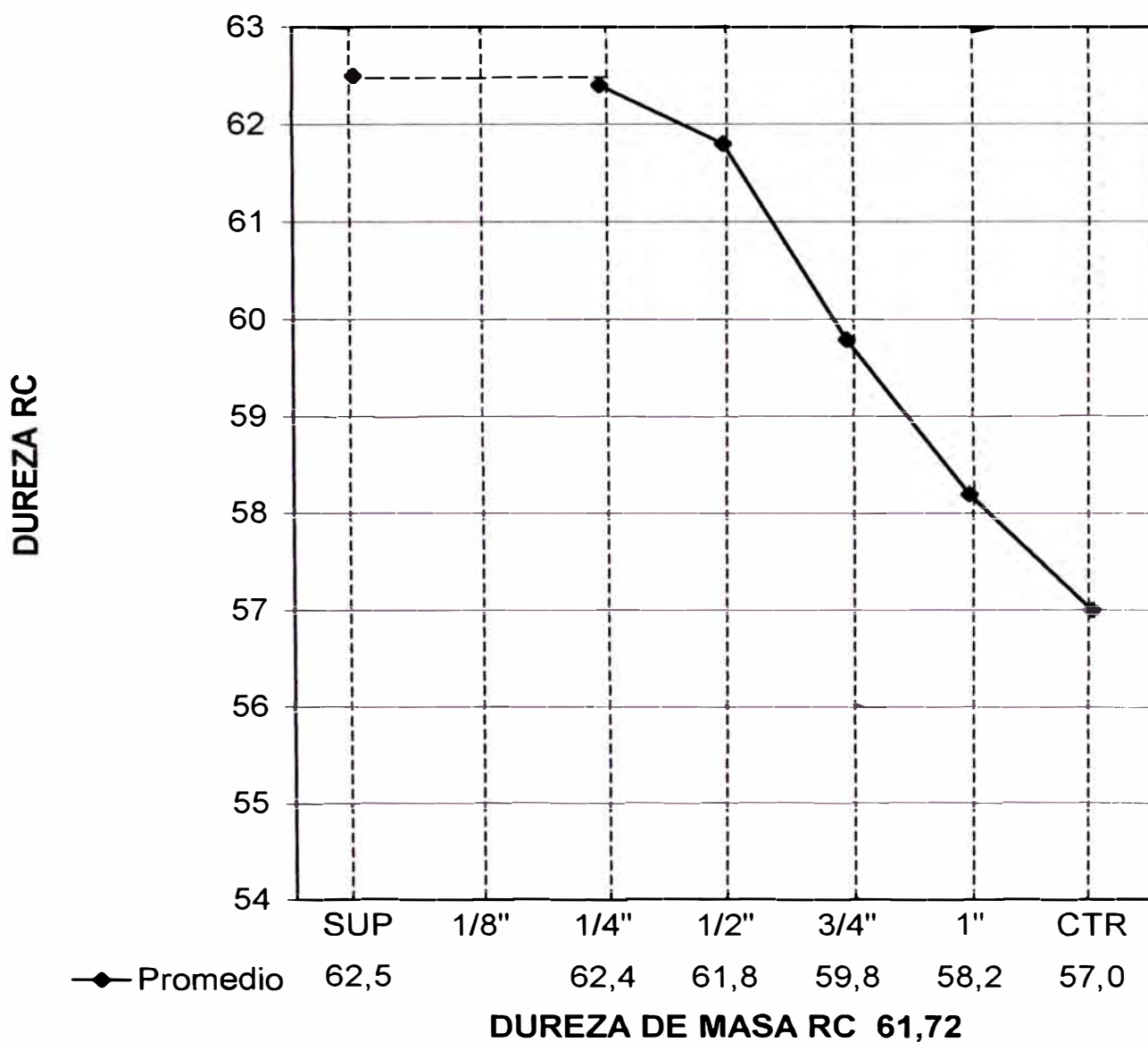


GRÁFICO N° 6 PERFIL DE DUREZA - BOLA DE 4,0"

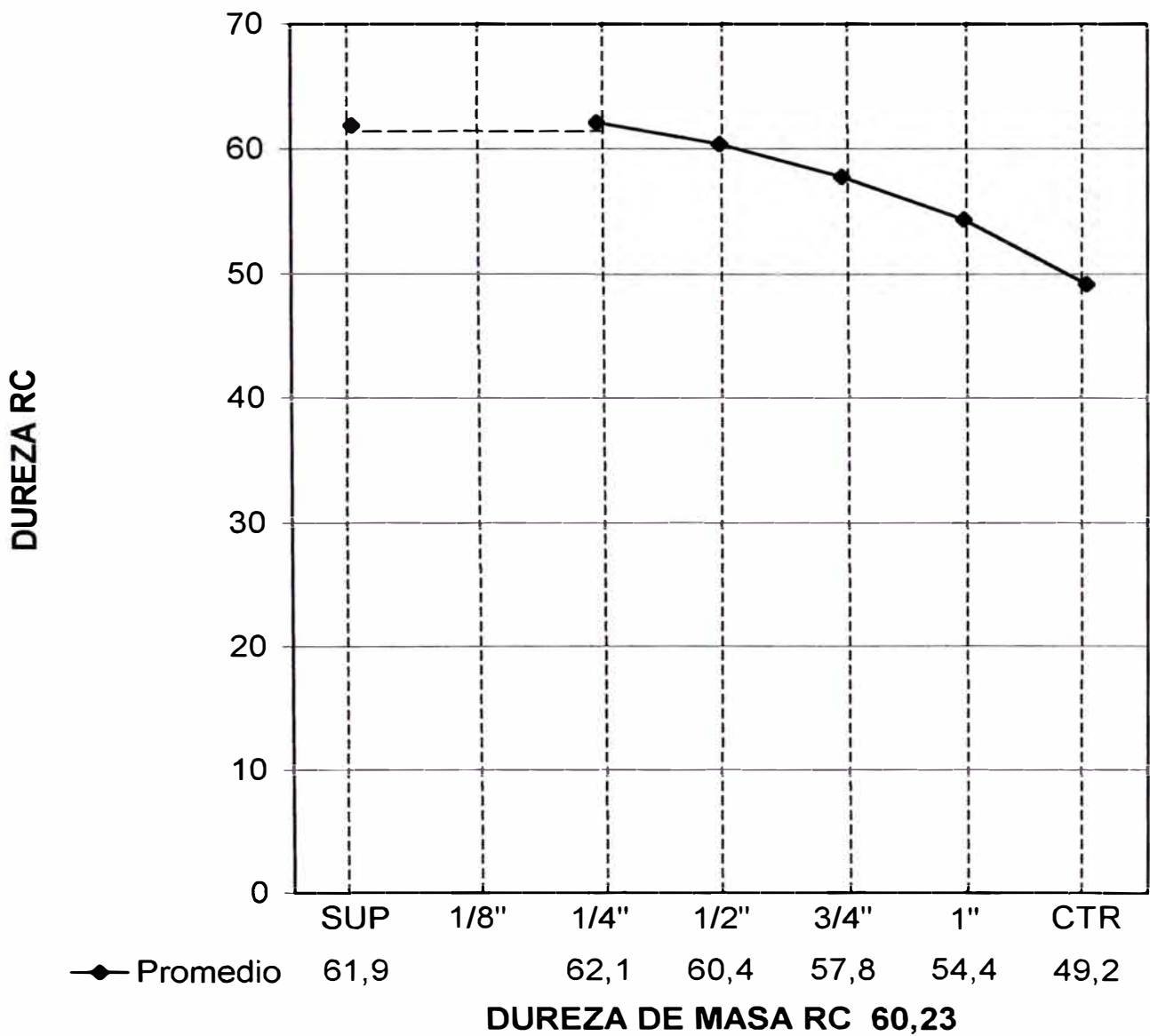


TABLA N° 13
PESOS Y DIAMETROS DE BOLAS
(Bolas de Acero Fundido)

BOLAS φ	PESO PROM. (GRS)	DIAM. X PROM.(pulg)	DIAM. Y PROM. (pulg)
1"	70	1 1/32	31/32
1 1/2"	272	1 43/64	1 35/64
2"	595	2 7/64	2 1/16
2 1/2"	1122	2 37/64	2 17/32
3"	1965	3 5/64	3 5/64
3 1/2"	3259	3 11/16	3 19/32
4"	4591	4 9/64	4 9/128

Nota: Bolas fundidos en semicoquilla (mitad en arena con resina y la otra mitad en coquilla de acero).

TABLA N° 14
ESTRUCTURA METALOGRAFICA
DE BOLAS DE ACERO FUNDIDO

SUPERFICIE	CENTRO	50%M
1" → Martensita 100%	Martensita 100% - Perlita 0%	→ >1/2"
1 1/2" → Martensita 100%	Martensita 100% - Perlita 0%	→ >3/4"
2" → Martensita 100%	Martensita 100% - Perlita 0%	→ >1"
2 1/2" → Martensita 100%	Martensita 90% - Perlita 5%	→ >1 1/4"
3" → Martensita 100%	Martensita 80% - Perlita 20%	→ >1 1/2"
3 1/2" → Martensita 100%	Martensita 60% - Perlita 40%	→ >1 3/4"
4" → Martensita 100%	Martensita 65% - Perlita 35%	→ >2"

M = MARTENSITA

VARIACIÓN DE TRANSFORMACIÓN ESTRUCTURAL EN CENTRO DE LA BOLA

De acuerdo al Medio de Temple

TABLA N° 15

ϕ	<u>(Sin Polímero)</u>		<u>(Con Polímero)</u>		<u>(Optm.c/Polim) Concent.3-3.5%</u>	
1"	M	100%	M	100%	M	100%
	P	0	P	0	P	0
1 1/2"	M	100%	M	100%	M	100%
	P	0	P	0	P	0
2"	M	90%	M	100%	M	100%
	P	10%	P	0	P	0
2 1/2"	M	40%	M	80%	M	90%
	P	60%	P	20%	P	10%
3"	M	30%	M	70%	M	80%
	P	70%	P	30%	P	20%
3 1/2"	M	15%	M	50%	M	70%
	P	85%	P	50%	P	30%
4"	M	0	M	50%	M	65%
	P	100%	P	50%	P	35%

Centro : El porcentaje de Martensita decrece, formándose perlita fina, dependiendo del diámetro de la bola.

M : Martensita

P : Perlita

MICROESTRUCTURA TÍPICAS DE BOLA DE ACERO FUNDIDO MEPSA:

MICROGRAFÍA SIN ATAQUE QUÍMICO:

A 749X Zona de 1" a 1.5": SMn y Microrechupe

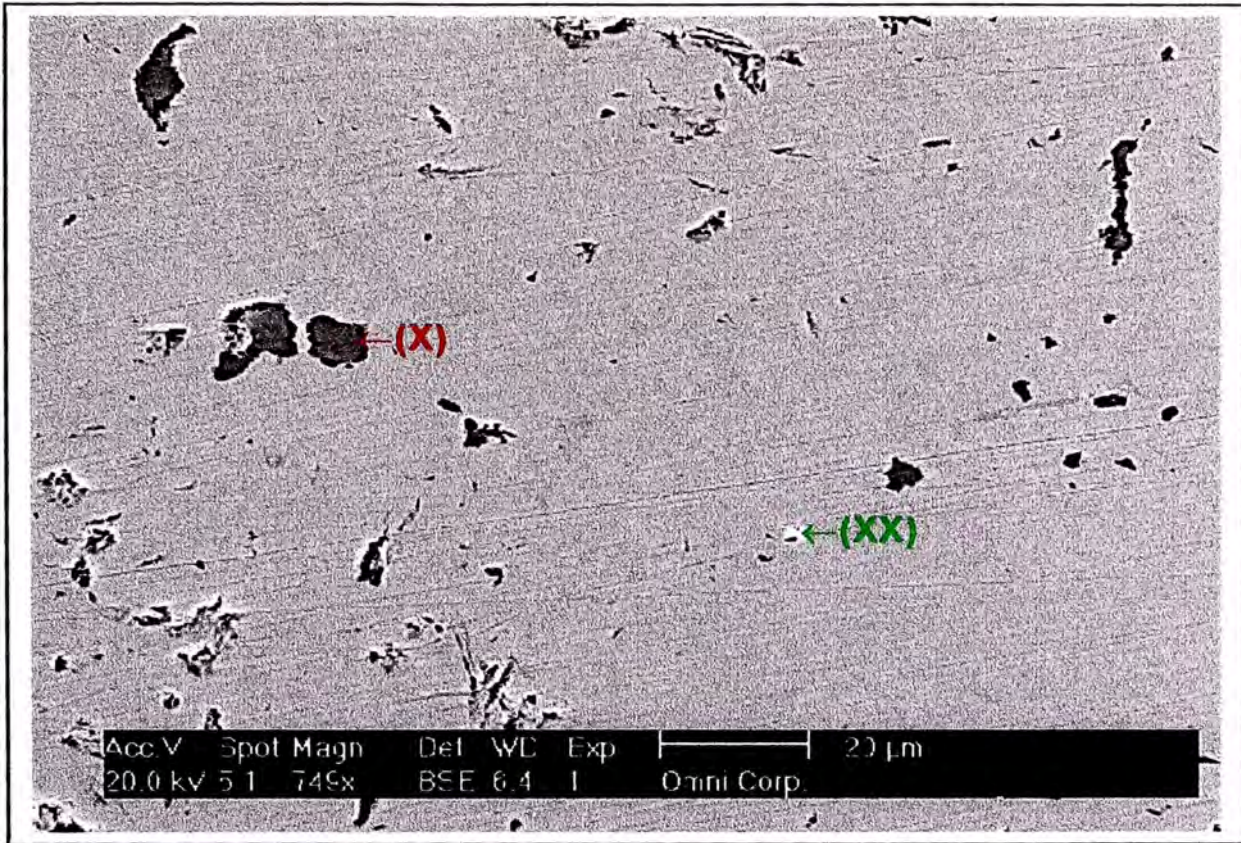
A 504X Del centro de la bola: FeO y Microrechupe y

A 295X Foto 3: Micro pin holes y presencia de C y Ca disperso

MICROGRAFÍA CON ATAQUE QUÍMICO:

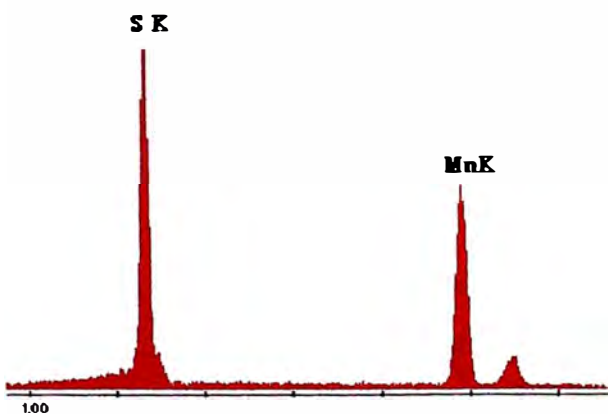
A 411X Y 2094X : Zona 3/4" a 1/2": M 100%.

A 411X Y 2094X: Zona 3/4" a 1": M 100%



Zona de 1" a 1.5": Inclusiones de SMn y microrechupes.

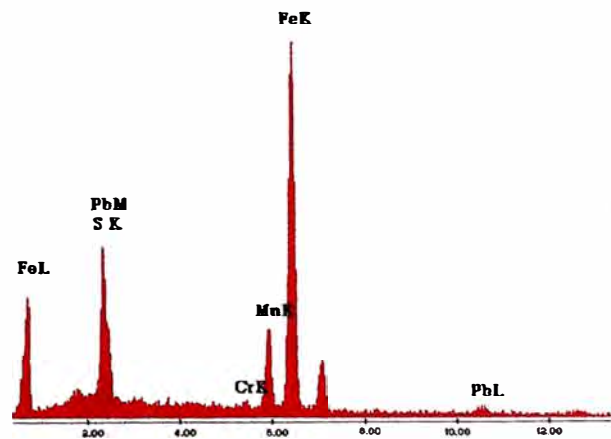
(X)



ZAF Quantification Method, Standardless
PEI Default Set : 2, Elements

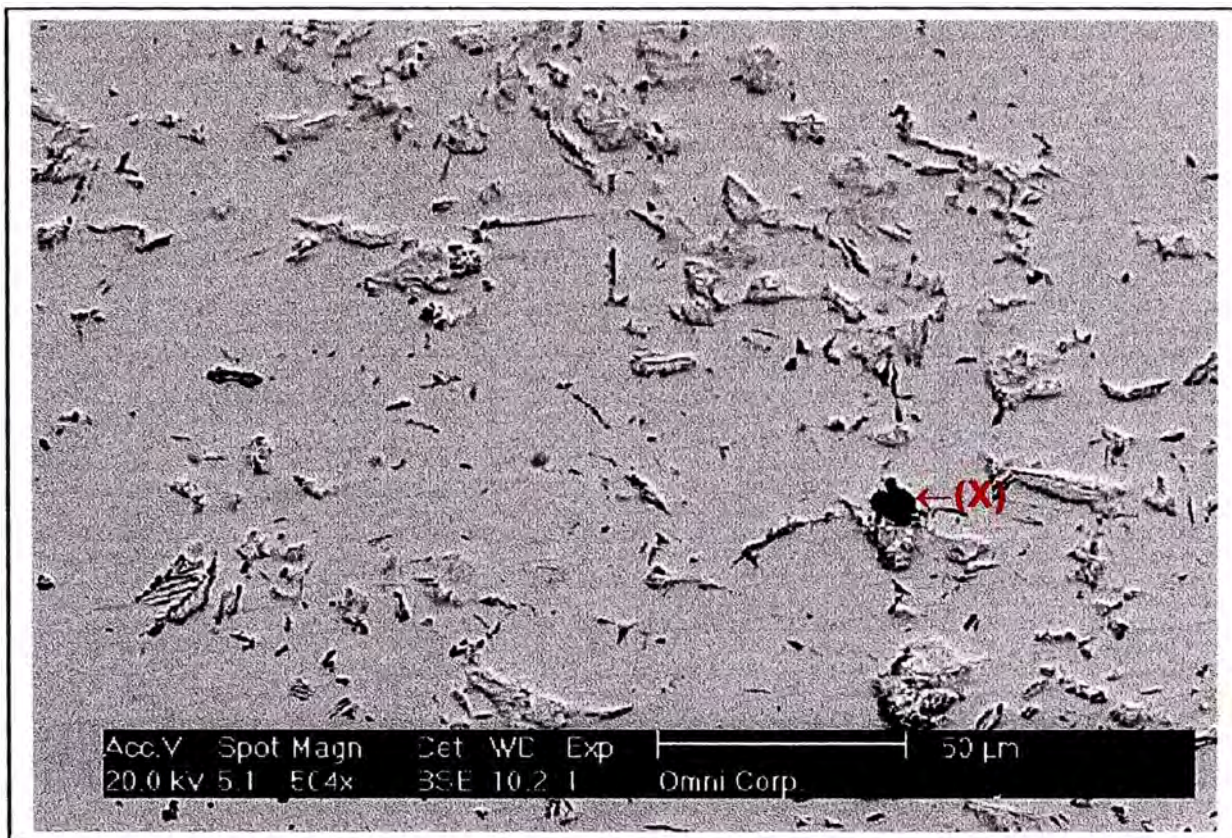
Elem	Wt %	At %	K-Ratio
S K	39.46	52.76	0.3271
MnK	60.54	47.24	0.5551
Total	100.00	100.00	

(XX)



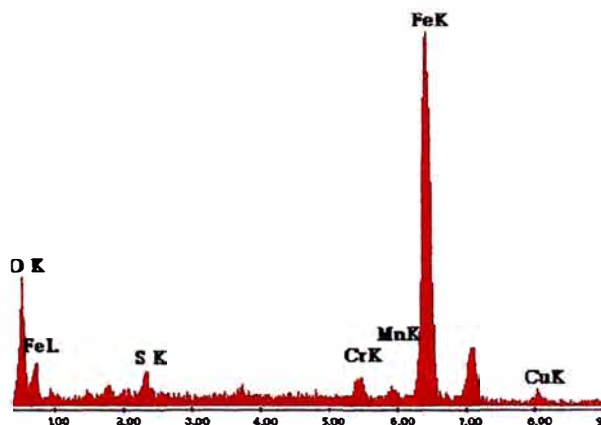
ZAF Quantification Method, Standardless
PEI Default Set : 2, Elements

Elem	Wt %	At %	K-Ratio
S K	7.11	13.46	0.0533
CrK	0.72	0.84	0.0075
MnK	11.42	12.63	0.1092
FeK	62.17	67.62	0.6156
PbL	18.58	5.45	0.1388
Total	100.00	100.00	



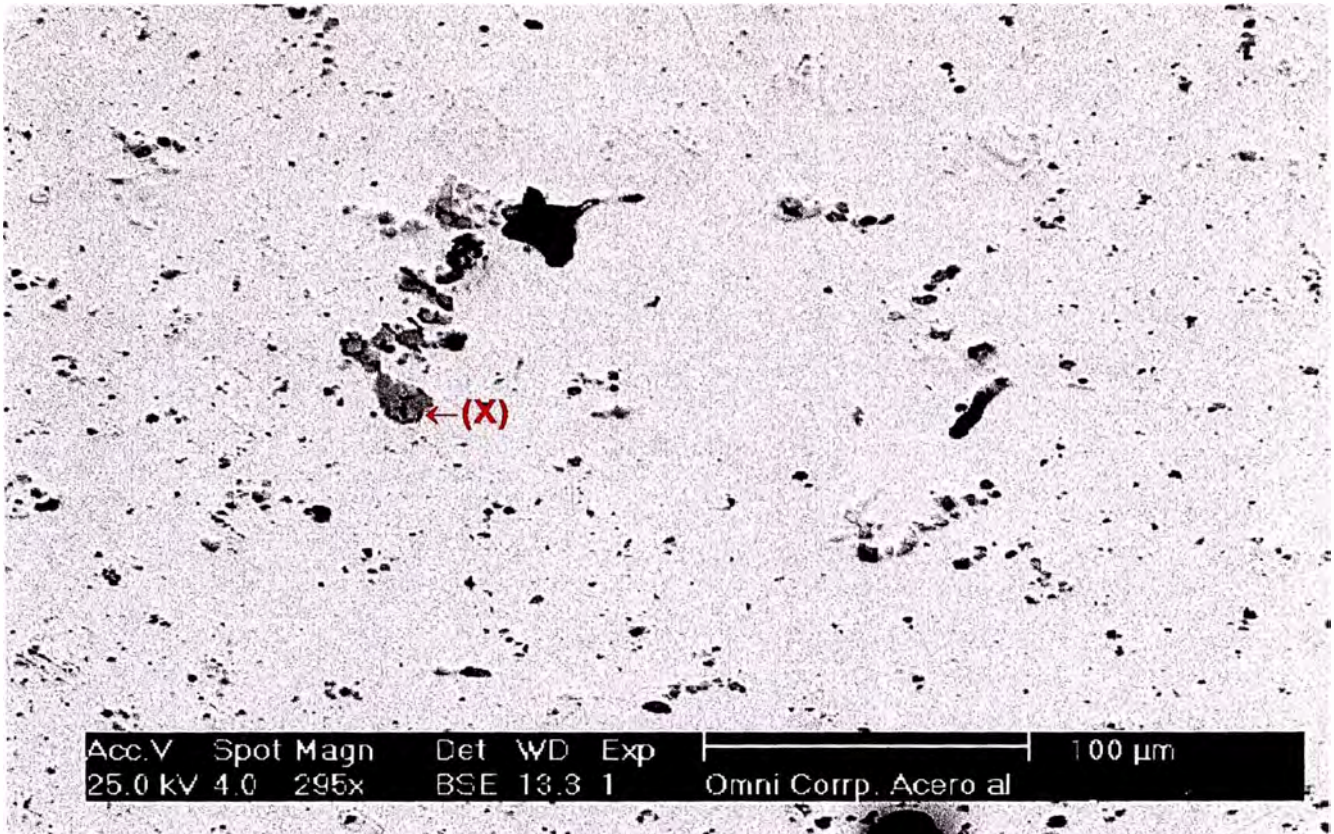
Centro: Microrechupes y óxido de fierro dentro de ellos.

(X)

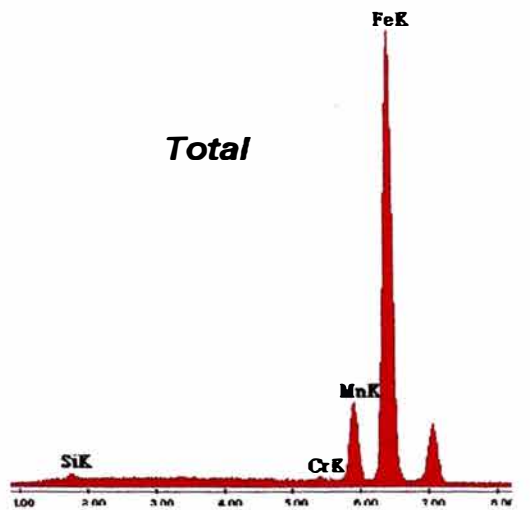


ZAF Quantification Method, Standardless
PEI Default Set : 2, Elements

Elem	Wt %	At %	K-Ratio
O K	18.91	44.46	0.0881
S K	2.03	2.39	0.0144
CrK	2.97	2.15	0.0344
MnK	1.14	0.78	0.0108
FeK	71.75	48.33	0.6908
CuK	3.19	1.89	0.0273
Total	100.00	100.00	

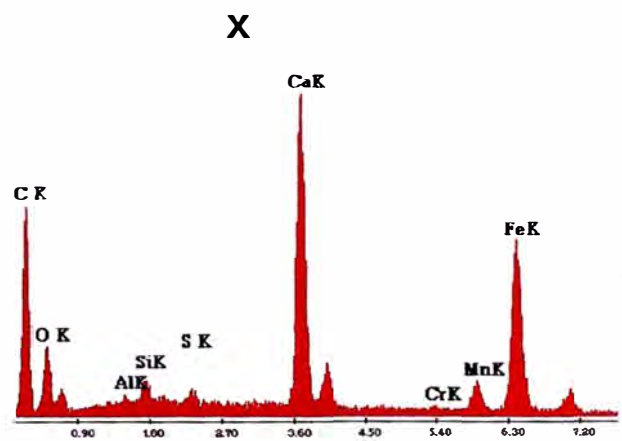


Micrografía N°3: Sin ataque químico se observa micro pin holes en toda la sección de la pieza y presencia de carbón y calcio disperso en la muestra.



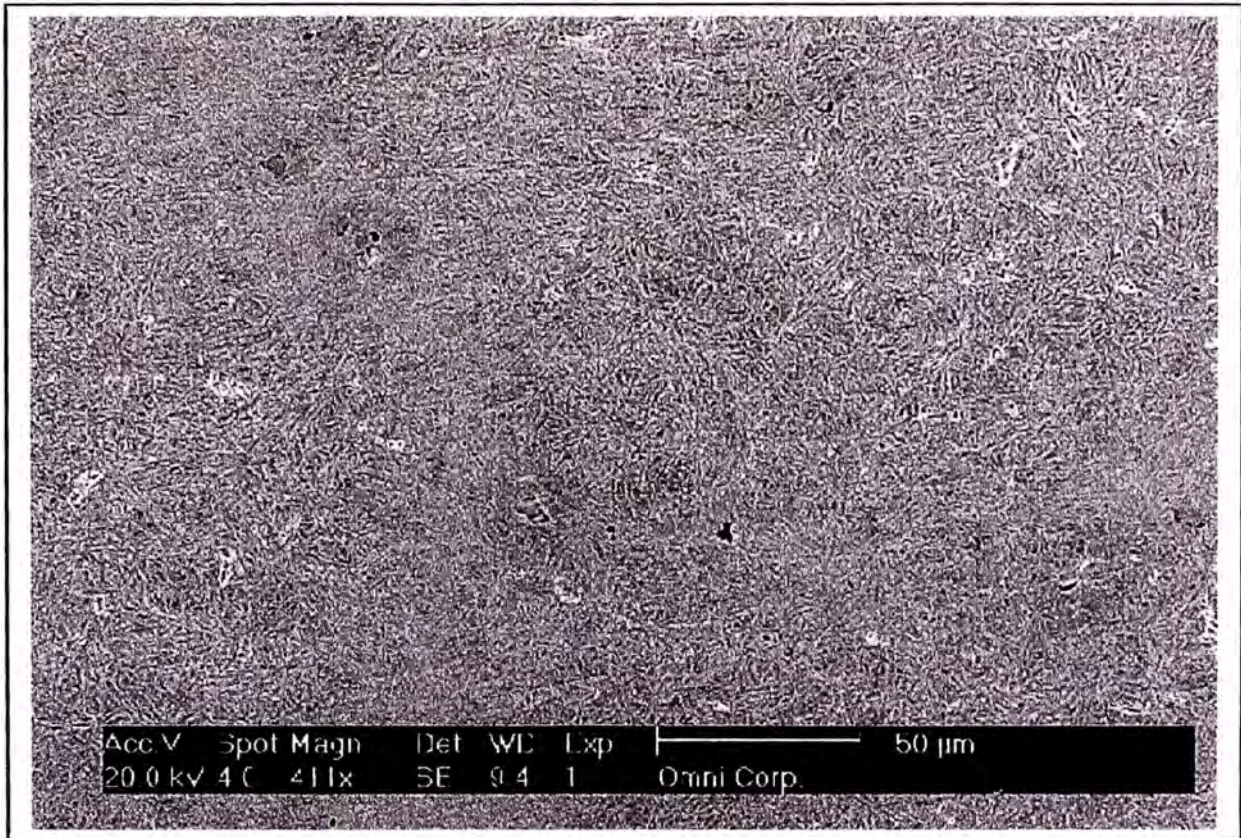
ZAF Quantification Method, Standardless
PEI Default Set : 2, Elements

Elem	Wt %	At %	K-Ratio
C K	100.00	100.00	1.0000
Total	100.00	100.00	

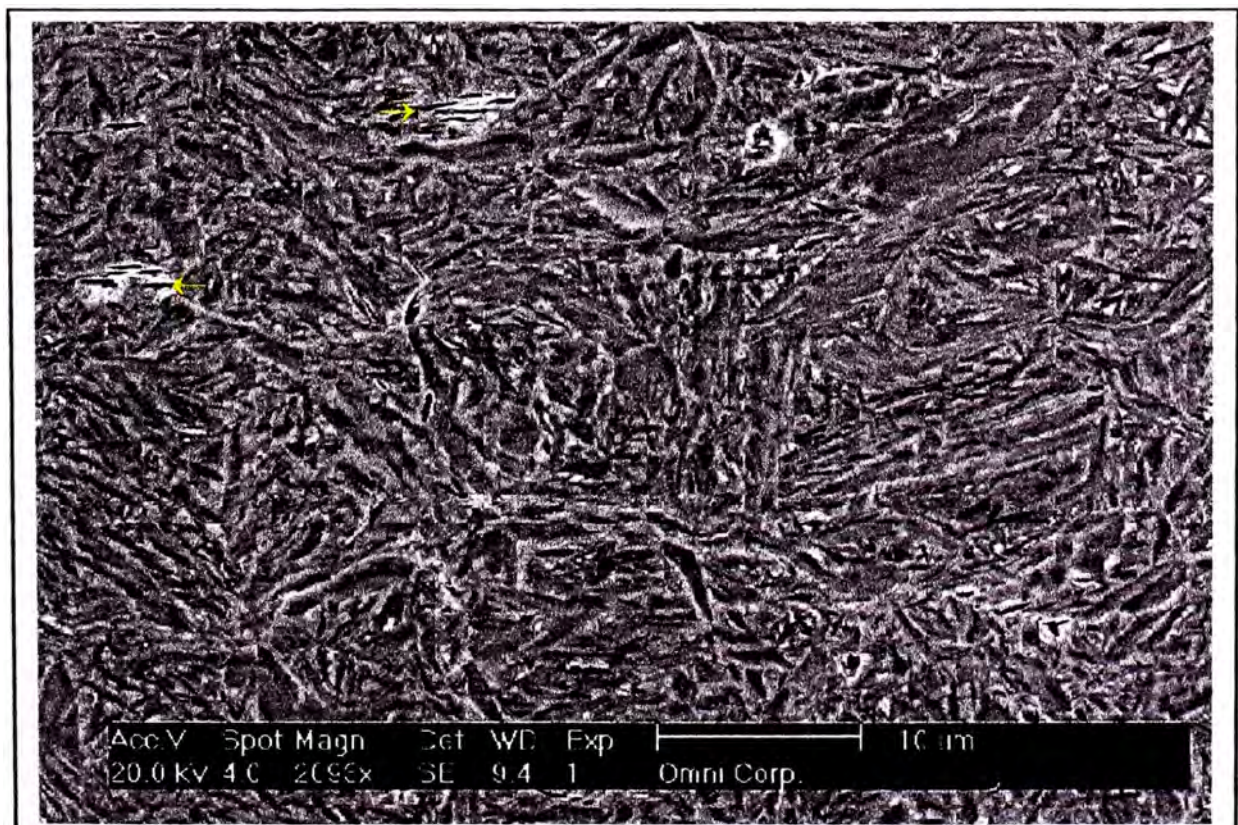


ZAF Quantification Method, Standardless
PEI Default Set : 2, Elements

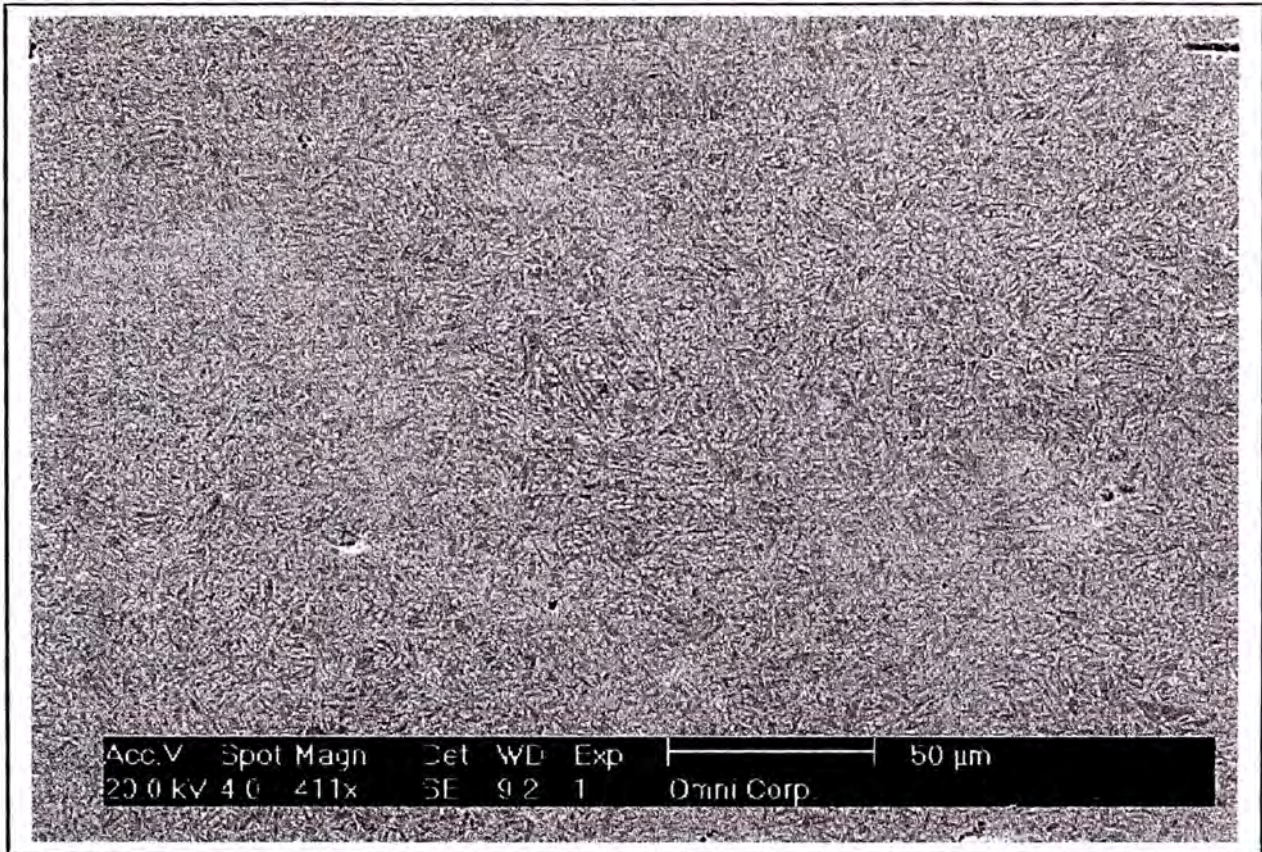
Elem	Wt %	At %	K-Ratio
C K	61.49	76.72	0.2818
O K	17.69	16.57	0.0243
AlK	0.20	0.11	0.0010
SiK	0.61	0.32	0.0040
S K	0.29	0.14	0.0025
CaK	7.92	2.96	0.0780
CrK	0.15	0.04	0.0013
MnK	1.44	0.39	0.0124
FeK	10.21	2.74	0.0900
Total	100.00	100.00	



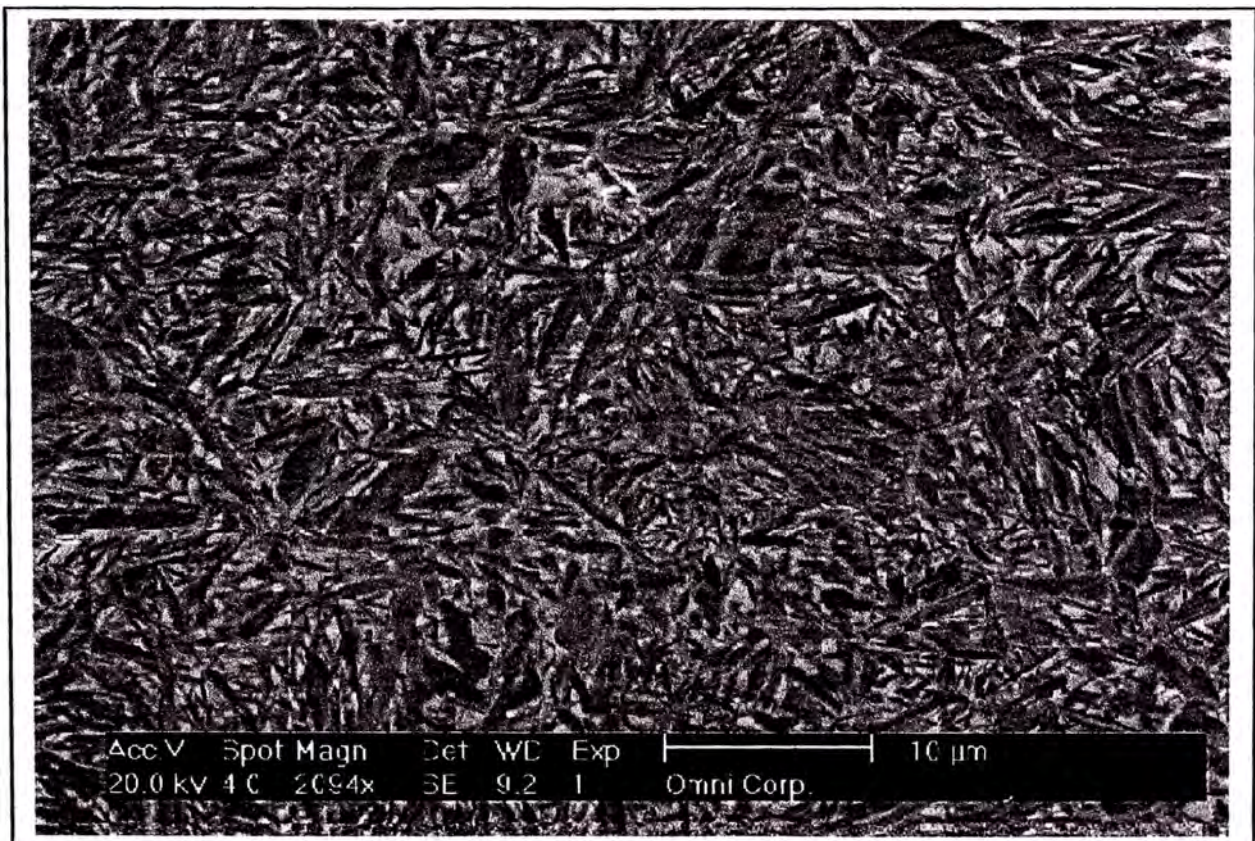
Zona de 3/4" a 1": Muestra atacada, se observa la microestructura completamente homogénea a excepción de las inclusiones.



Zona de 3/4" a 1": Muestra atacada Matriz martensítica y algunas pequeñas apariciones de perlita (flechas).



Zona de 3/4" a 1/2": Muestra atacada, matriz martensítica completamente homogénea.



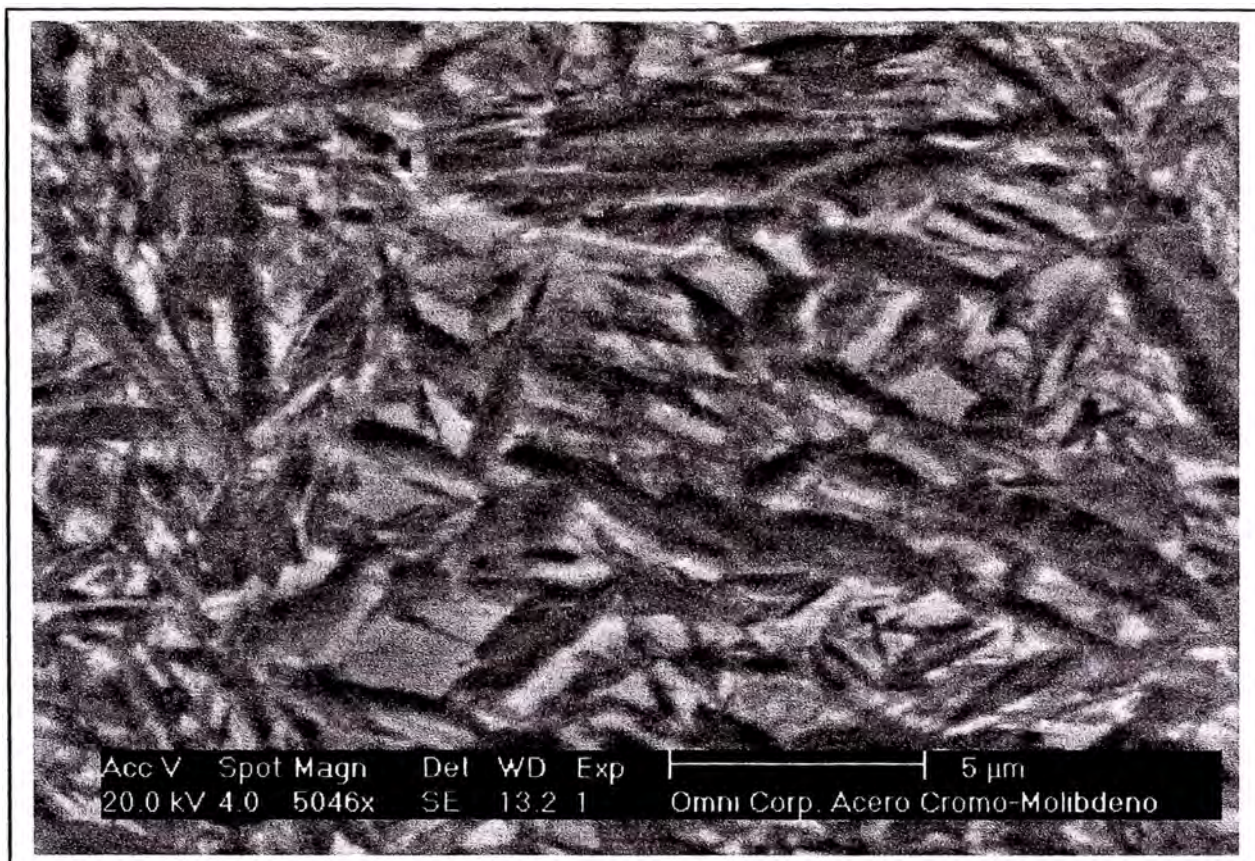
Zona de 3/4" a 1/2": Matriz completamente martensítica.

MICROESTRUCTURA DE BOLA DE 3 1/2" ϕ DE SUPERFICIE A CENTRO.

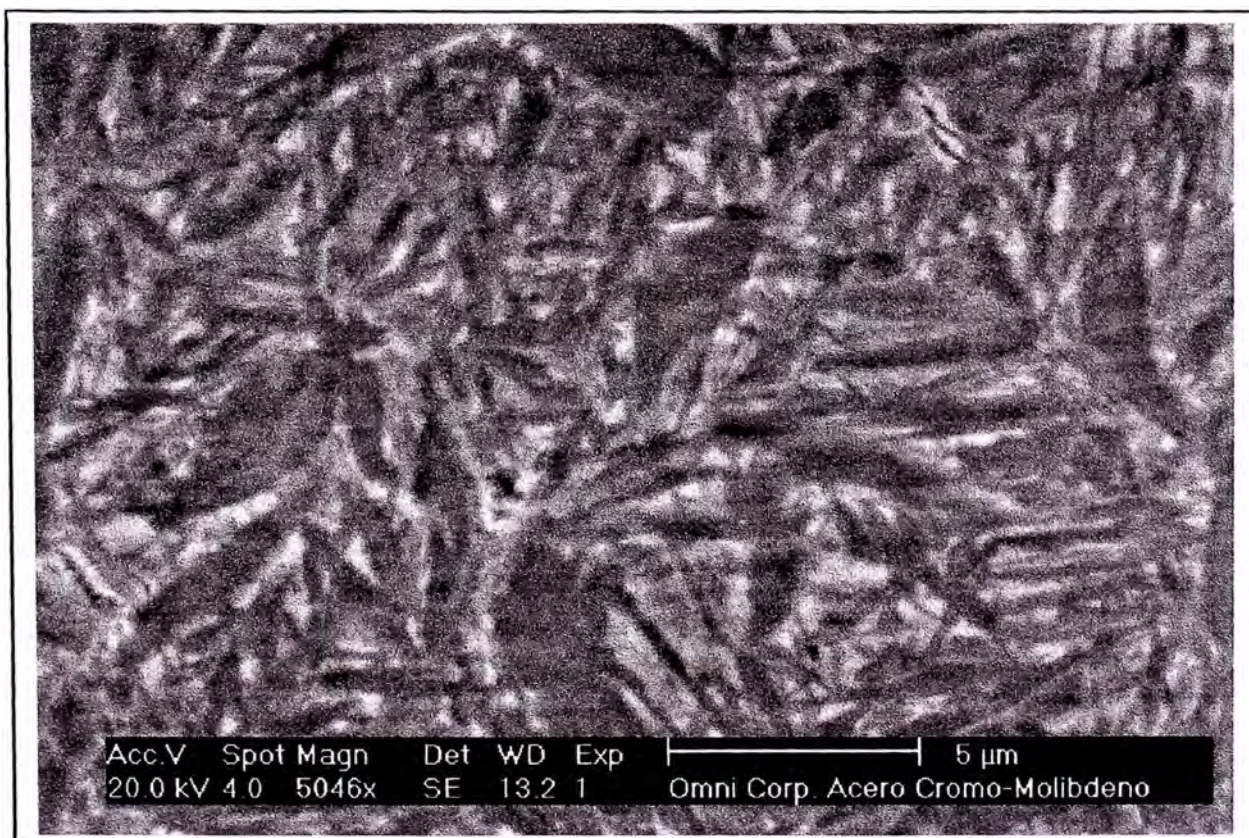
A 5046X de Superficie a 1/8:	Martensita 100%
A 5046X de 1/8 a 1/4:	Martensita 100%
A 5012X de 1/4 a 1/2:	Martensita 100%
A 5002X de 1/2 a 3/4:	Martensita 100%
A 5003X de 3/4 a 1":	Martensita + 2% Bainita
A 5003X de a al centro:	Martensita, 20% de Perlita y trazas de Bainita

Tal como se observan en las microfotografías siguientes:

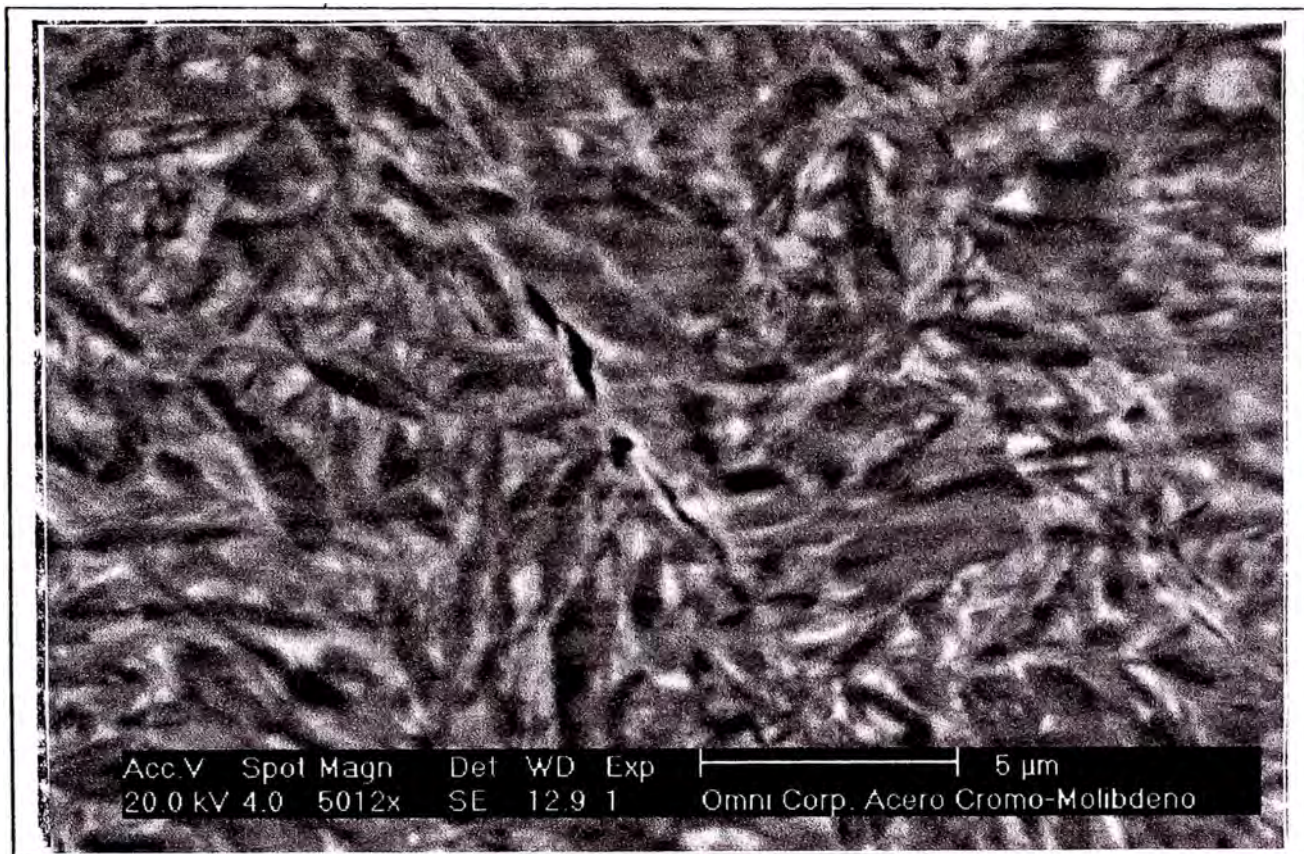
MICROESTRUCTURA DE SUPERFICIE AL CENTRO DE UNA BOLA DE 3 1/2" ϕ



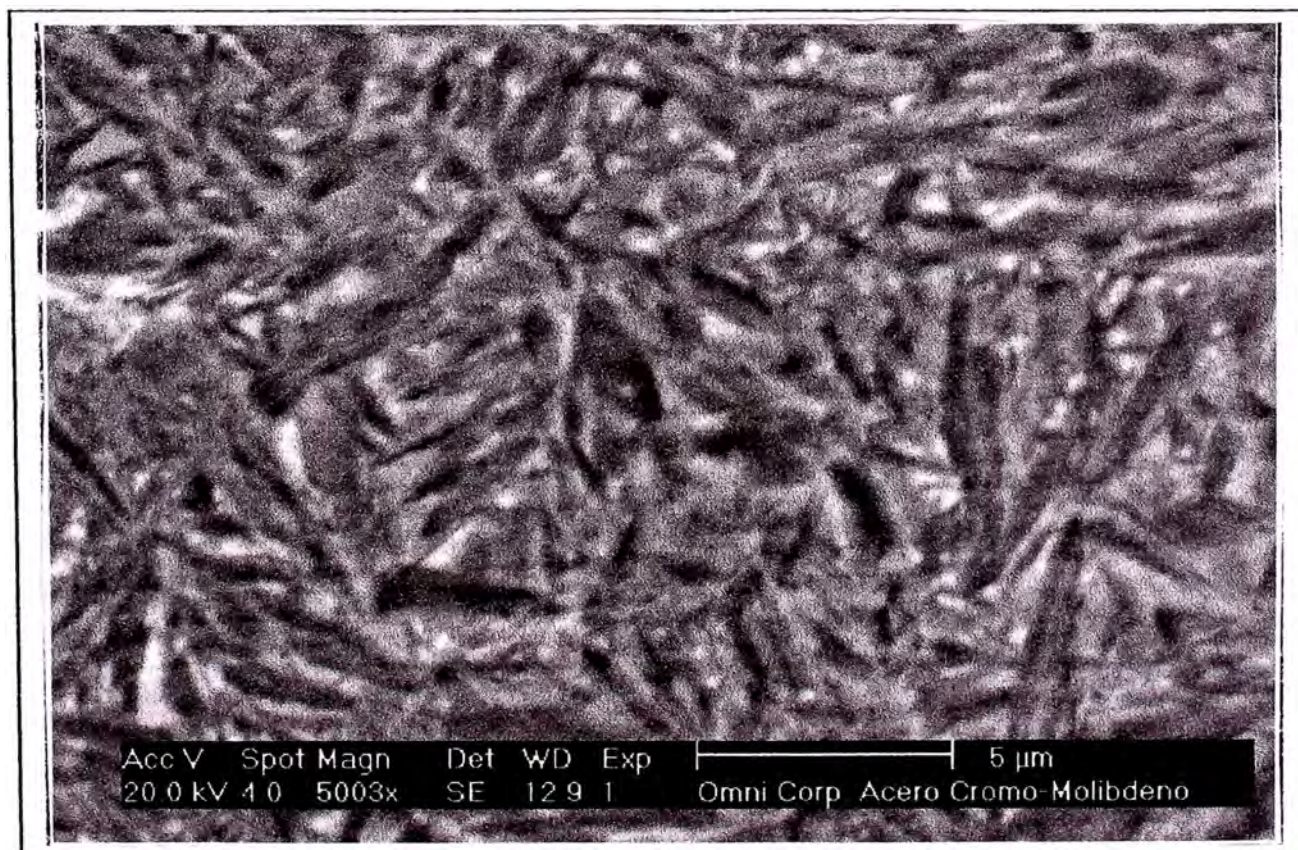
Micrografía de la superficie a 1/8": Martensita 100%.



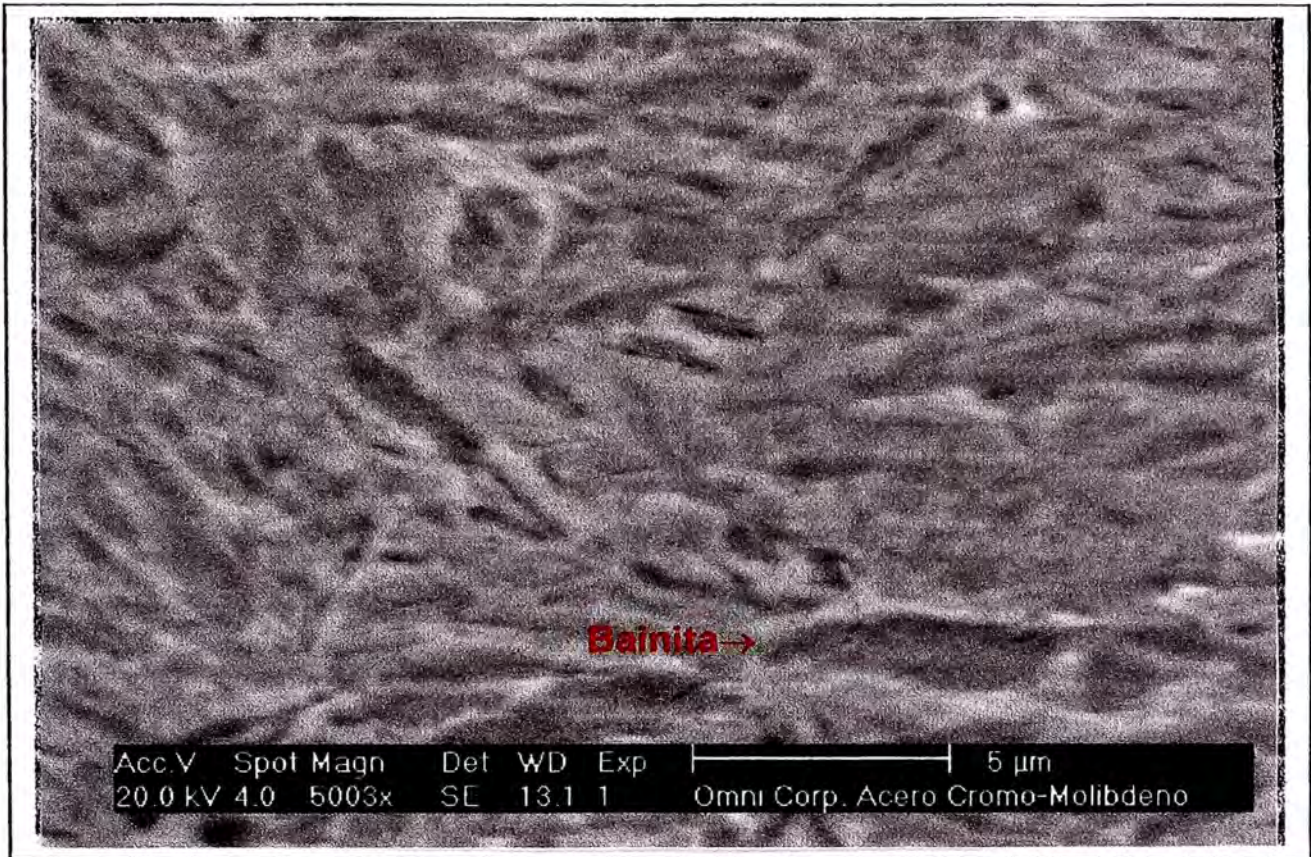
Micrografía de 1/8" a 1/4": Martensita 100%.



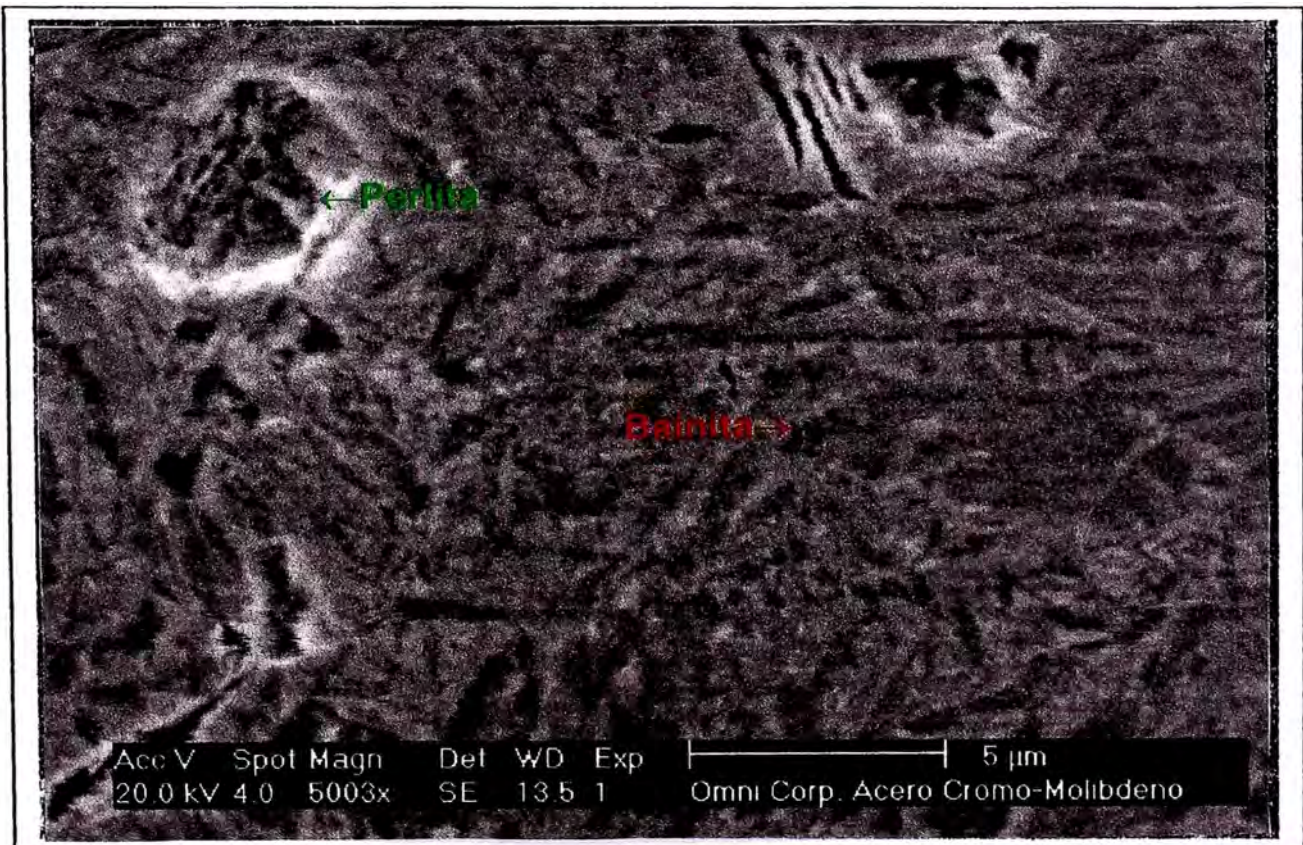
Micrografía de 1/4" a 1/2": Martensita 100%.



Micrografía de 1/2 a 3/4": Martensita 100%.



Micrografia de 3/4" a 1": Martensita 98%, bainita 2%.



Micrografia de 1" al centro: Martensita 80%, perlita 20%, trazas de bainita.

Comparación de análisis químico semi – cuantitativo de cada nivel de la superficie al centro:

Sup. a 1/8" (vol.19.93%)

1/8" a 1/4" (vol.17.09%)

1/4" a 1/2" (vol.26.53%)

Elem	Wt %	At %	K-Ratio
SiK	0.72	1.42	0.0030
CrK	0.80	0.85	0.0101
MnK	1.26	1.27	0.0123
FeK	97.22	96.46	0.9698
Total	100.00	100.00	

Elem	Wt %	At %	K-Ratio
SiK	0.54	1.08	0.0023
CrK	0.50	0.54	0.0064
MnK	1.12	1.13	0.0109
FeK	97.83	97.26	0.9767
Total	100.00	100.00	

Elem	Wt %	At %	K-Ratio
SiK	0.65	1.28	0.0027
CrK	0.40	0.43	0.0051
MnK	1.06	1.07	0.0103
FeK	97.89	97.22	0.9773
Total	100.00	100.00	

1/2" a 3/4" (vol.17.78%)

3/4" a 1" (vol.10.79%)

Centro (vol.7.88%)

Elem	Wt %	At %	K-Ratio
SiK	0.94	1.85	0.0040
CrK	0.57	0.61	0.0072
MnK	1.03	1.04	0.0101
FeK	97.46	96.51	0.9722
Total	100.00	100.00	

Elem	Wt %	At %	K-Ratio
SiK	0.79	1.57	0.0034
CrK	0.37	0.39	0.0047
MnK	0.72	0.72	0.0070
FeK	98.12	97.32	0.9793
Total	100.00	100.00	

Elem	Wt %	At %	K-Ratio
SiK	0.70	1.39	0.0030
CrK	0.57	0.60	0.0072
MnK	1.04	1.05	0.0102
FeK	97.69	96.95	0.9748
Total	100.00	100.00	

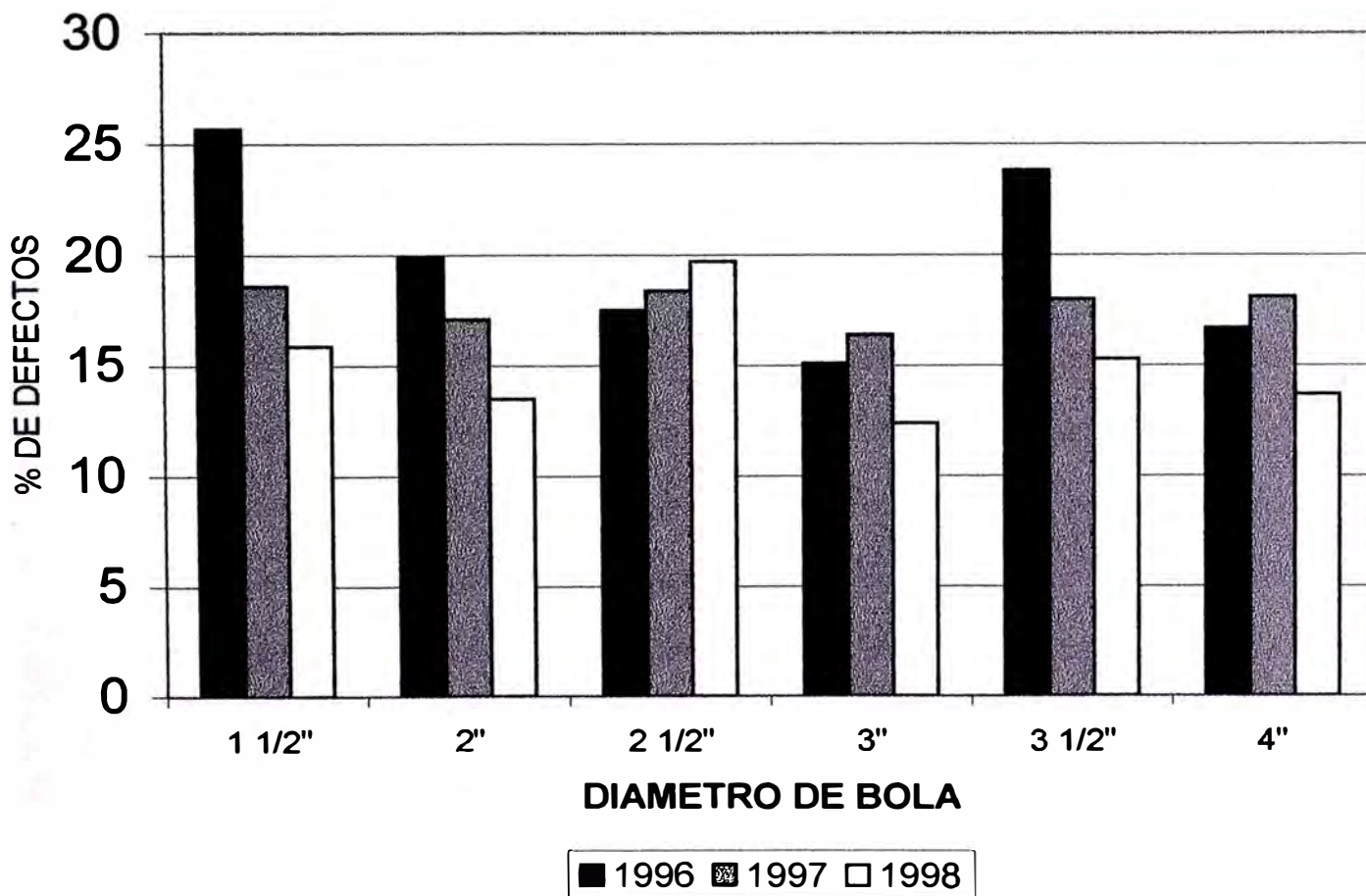
% DEFECTOS INTERNOS PROMEDIOS EN BOLAS FUNDIDAS DE ACERO

TABLA N° 16

DIAMETRO BOLA	PORCENTAJE % 1996	PORCENTAJE % 1997	PORCENTAJE % 1998
1 1/2"	25.7	18.6	15.9
2"	19.9	17.1	13.5
2 1/2"	17.5	18.4	19.7
3"	15.1	16.4	12.4
3 1/2"	23.8	18.0	15.3
4	16.7	18.1	13.7

GRÁFICO N° 7

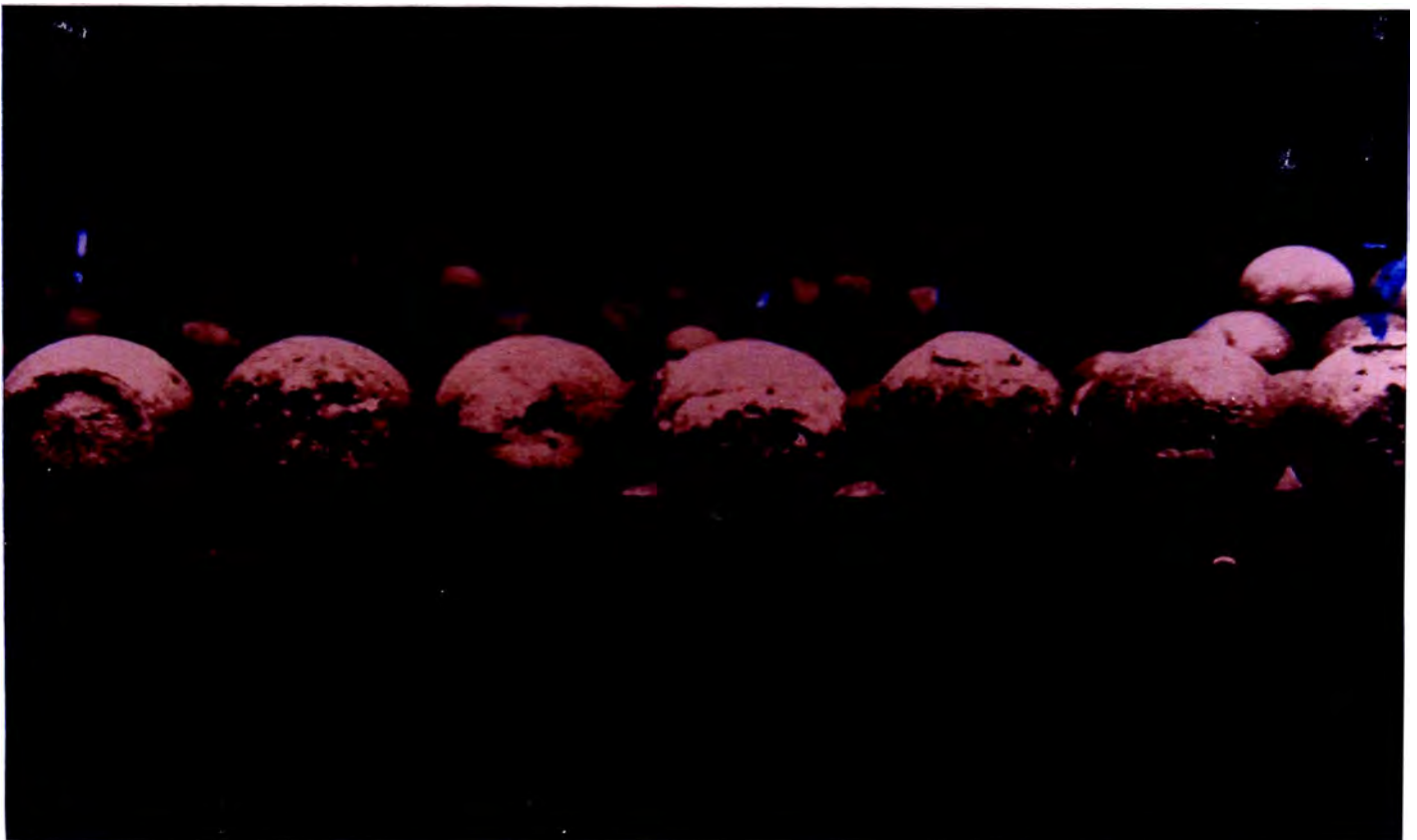
% DEFECTOS INTERNOS - BOLAS FUNDIDAS



DEFECTOS INTERNOS EN BOLAS FUNDIDAS DE ACERO DE FABRICACIÓN MEPSA

En la fotografía se observa algunos defectos internos de izquierda a derecha:

1. Descascaramiento: Exceso de agua en tornamesa
2. Inclusiones de arena: Falta de friabilidad en arenas
3. Escoria: Temperatura de vaciado alto
4. Gota fría: Temperatura de vaciado bajo
5. Arena: Porcentajes de resina en la mezcla de arena mayor al 1.5% del peso de arena.
6. Rajadura: Alta severidad de temple
7. Gas/porosidad: Falta de desoxidación, humedad de moldes metálicos.



BOLAS DE ACERO FUNDIDO: FUNDICIÓN VENTANILLA

TABLA N° 17
ANÁLISIS QUÍMICO (%)

ϕ	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	Al	Sn	B	V
3"	1.65	1.32	.49	.070	.044	.084	1.05	.011	.138	.075	.008	.001	-
4"	.70	1.39	.45	.052	.036	.33	.85	.060	.17	.000	.019	.007	.022

TABLA N° 18
DUREZA DE MASA Rockwell "C"

ϕ	Sup.	1/8"	1/4"	1/2"	3/4"	1"	Centro	Masa
3"	25.6	33.9	32.9	33.3	32.2	-	30.9	31.39
4"	26.4	-	27.9	27.6	25.8	26.4	25.4	27.02

ANÁLISIS METALOGRAFICO

Bola $\phi = 3''$ - De matriz perlítica tiene además carburos de fierro (cementita) delineando un grano grueso > 00 y del tipo eutectico masivo en pequeñas islas ubicadas en la matriz.

Bola $\phi = 4''$ - De matriz 100% Perlítica con un 30% aproximadamente resoluble a 500 X (foto N°1) y Perlita con 100% resoluble a 1000 X (foto N°2)

OBSERVACIONES

Las bolas presentan análisis químico irregulares y no han sufrido tratamiento térmico alguno. Su dureza es demasiado baja.

**BOLA DE ACERO FUNDIDO DE 4" ϕ
FUNDICIÓN VENTANILLA**



N°1 (500X) MATRIZ 100% PERLITICA RESOLUBLE EN 30%



N°2 (1000 X) MATRIZ 100% PERLITA RESOLUBLE A 1000X

2.3 CARACTERÍSTICAS METALÚRGICAS DE LAS BOLAS FORJADAS USADAS EN EL MERCADO NACIONAL

En el beneficio de minerales y la industria del cemento se usan:

- BOLAS FORJADA DE FABRICACION NACIONAL:

FUNDICIÓN CALLAO (Lima)

ADESUR (Arequipa)

INVENTOS PERUANOS (Lima)

- BOLAS FORJADAS DE FABRICACION EXTRANJERA:

- USA

Nucord

Border Steel

Armco

- CHINA

- AUSTRALIA (Comsteel)

ALEMANIA

ESPAÑOLA (Bolvera)

- BRASILEÑA

- CHILENA (Armco)

BOLAS DE ACERO FORJADO: FUNCAL

MUESTRA ANALIZADA: 2 Bolas Forjadas de 2"

Fabricación: FUNDICIÓN CALLAO (FUNCAL)

Usuario: SHOUGAN HIERRO PERÚ

CARACTERÍSTICAS GENERALES

Las bolas forjadas son de forma esférica y presentan exfoliaciones (defectos superficiales de forja).

TABLA N° 19
PESO Y DIMENSIONES
(DIAMETRO NOMINAL: 2")

CODIGO	PESO (gr.)	DIMENSIONES (pulg.)			ACHATAMIENTO (pulg.)
		X	Y	Z	
1	575.1	2.063	2.006	2.063	-----
2	576.4	2.063	2.063	2.063	-----

TABLA N° 20
ANÁLISIS QUÍMICO (%)

	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	Al	Sn	V	B	D.I.
1	0.80	1.27	.35	.023	.030	.10	.31	.033	.15	.017	.017	.008	4.08	.0008
2	1.04	0.87	.42	.021	.018	.26	.32	.092	.21	.009	.022	.009	.0005	4.63

TABLA N° 21
DUREZA DE MASA

	SUP.	1/8"	1/4"	3/8"	1/2"	CTR.	MASA
1	62.1	62.4	63.3	62.9	62.8	60.8	62.56
2	57.7	59.0	58.8	59.2	57.3	56.3	58.34

ANÁLISIS METALOGRAFICO

CODIGO	SUPERFICIE	CENTRO	50 % M
1	MARTENSITA	MARTENSITA	>> 1"
2	MARTENSITA	MARTENSITA	>> 1"

OBSERVACIONES

- En esta muestra de dos bolas se observa en la composición química un elemento fuera de los rangos normales comparada con las bolas MEPSA y otras bolas analizadas anteriormente del mismo fabricante; así tenemos que en la bola # 1 el elemento Manganeso está elevado con 1.27% y la bola # 2 tiene el porcentaje de Carbono alto con 1.04%.

En la dureza y microestructura la bola # 1 presenta valores normales similares a la bola MEPSA, en cambio la bola # 2 tiene una dureza inferior producto de una Martensita gruesa. FUNCAL utiliza en la fabricación de bolas el método de laminación.

METODO DE LAMINACIÓN

La barra caliente sale del horno y es conducida por un Transportador hacia la entrada de los rodillos de laminación, los cuales al rotar convierten esta barra en bolas que caen al otro extremo de los rodillos.

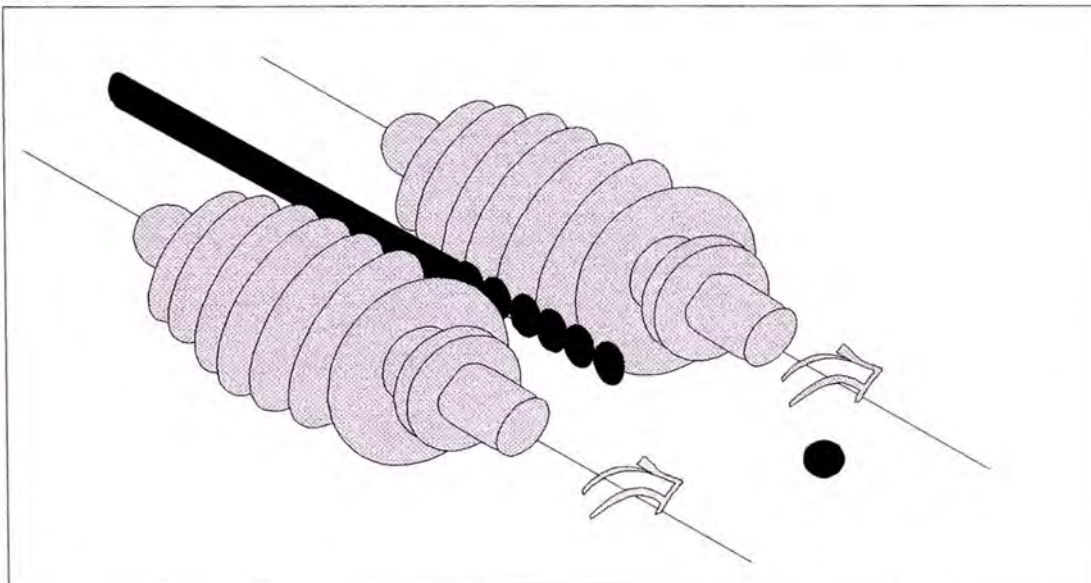
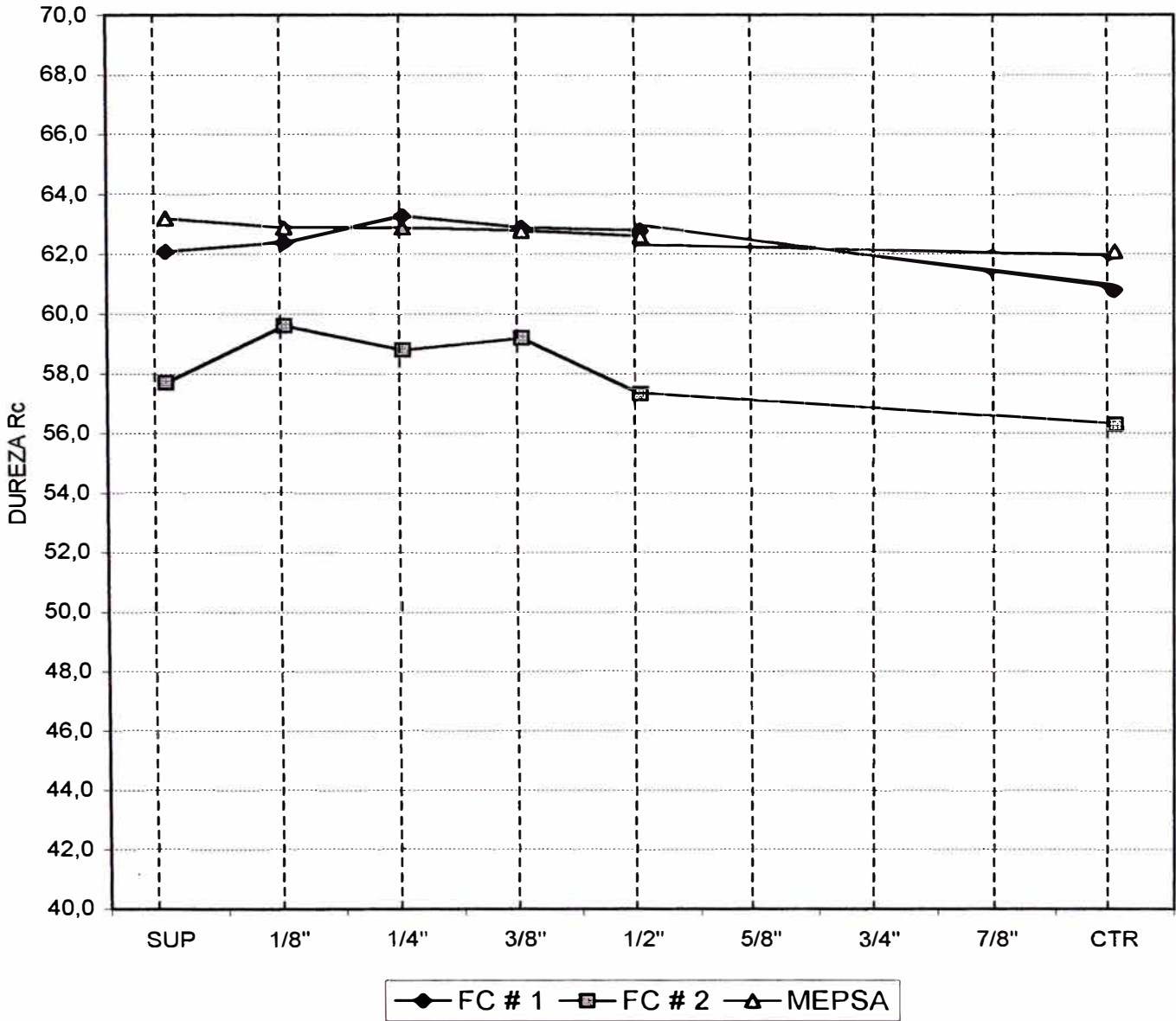


FIGURA N° 1

GRÁFICO N° 8
PERFIL DE DUREZA BOLAS 2"
FUNCAL (FC) VS MEPSA



FC # 1	62,1	62,4	63,3	62,9	62,8				60,8
FC # 2	57,7	59,6	58,8	59,2	57,3				56,3
MEPSA	63,2	62,9	62,9	62,8	62,6				62,1
DUREZA DE MASA	FC#1 62.56 FC#2 58.34 MEPSA 62.95								

MUESTRA ANALIZADA: 2 Bolas Forjadas de 2" de diámetro

Fabricación: FUNDICIÓN CALLAO (FUNCAL)

Usuario: SHOUGAN HIERRO PERÚ

CARACTERÍSTICAS GENERALES

Las bolas forjadas son de forma esférica y presentan exfoliaciones (defectos superficiales de forja).

TABLA N° 22
PESO Y DIMENSIONES
(DIAMETRO NOMINAL: 2")

CODIGO	PESO (gr.)	DIMENSIONES (pulg.)			ACHATAMIENTO (pulg.)
		X	Y	Z	
1	550.1	2.024	2.024	2.024	-----
2	579.4	2.063	2.063	2.063	-----

TABLA N° 23
ANÁLISIS QUÍMICO (%)

	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	Al	Sn	V	B	D.I.
1	0.90	.76	.41	.036	.035	.12	.29	.045	.19	.012	.019	.006	.0007	3.07
2	0.85	.78	.42	.035	.041	.14	.31	.037	.21	.014	.018	.007	.0009	3.08

TABLA N° 24
DUREZA DE MASA

	SUP.	1/8"	1/4"	3/8"	1/2"	CTR.	MASA
1	60.7	62.2	62.1	61.7	60.7	60.2	61.43
2	60.7	62.6	63.6	63.4	63.1	62.9	62.30

ANÁLISIS METALOGRAFICO

CODIGO	SUPERFICIE	CENTRO	50 % M
1	MARTENSITA	MARTENSITA	>> 1"
2	MARTENSITA	MARTENSITA	>> 1"

OBSERVACIONES

- Las bolas forjadas de FUNCAL presentan características metalúrgicas bastante similares a las Bolas MEPSA (composición química, dureza, microestructura, etc.), salvo con un menor valor de dureza en la superficie que en mayor o menor grado es una característica que se presenta en las bolas forjadas por descarburización superficial.

MUESTRA ANALIZADA: Bolas Forjadas de 2" de diámetro de FUNDICIÓN CALLAO

Fabricante: FUNDICIÓN CALLAO

Usuario: HIERRO PERÚ

CARACTERÍSTICAS GENERALES

Bolas de forma esférica con acabado superficial de forja. Se observan exfoliaciones en la superficie de las bolas.

TABLA N° 25
PESO Y DIMENSIONES

CODIGO	φ Nominal (pulg)	PESO (gr.)	DIMENSIONES (pulg.)		
			X	Y	Z
1	2"	524.8	2"	1 63/64"	2"
2	2"	525.2	2"	1 63/64"	2"

TABLA N° 26
ANÁLISIS QUÍMICO (%)

	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	Al	Sn	V	B	D.I.
1	.58	.60	.47	.038	.038	.40	.43	.082	.17	.010	.020	.006	.0008	2.85
2	.49	.52	.46	.033	.028	.09	.20	.025	.12	.009	.029	.006	.0006	1.36

TABLA N° 27
DUREZA DE MASA

	SUP.	φ	1/8"	1/4"	3/8"	1/2"	CTR.	MASA
1	60.4	2"	60.8	60.4	60.4	59.7	58.5	60.41
2	57.3	2"	56.5	56.1	52.2	50.1	52.4	55.38

ANÁLISIS METALOGRAFICO

CODIGO	MATRIZ	OTRAS FASES	INCLUSIONES
1	MARTENSITA 100%	----	Oxidos Sf N° 2
2	MARTENSITA 100%	----	Oxidos Sf N° 2

OBSERVACIONES

El nivel de dureza de las dos bolas analizadas está por debajo de los niveles estándar de las Bolas MEPSA para el mismo diámetro, por utilizar acero con carbón más bajo de su promedio.

MUESTRA ANALIZADA: Bolas forjadas de 2" φ de FUNCAL

Fabricante: FUNCAL

Usuario: HIERRO PERU

ASPECTO SUPERFICIAL Y FORMA

Bolas de forma aproximadamente esférica con superficie oxidada y defectos de forja (pliegues y exfoliaciones).

TABLA N° 28
PESO Y DIMENSIONES

<u>CODIGO</u> <u>BOLA</u>	<u>PESO</u> <u>(qr.)</u>	<u>DIMENSIONES EN PULGADAS</u>			
		<u>Nominal</u>	<u>X</u>	<u>Y</u>	<u>Z</u>
1	535	2" ϕ	2 1/64"	2 3/64"	2 15/128"
2	524	2" ϕ	1 123/128"	2 1/64"	2 3/64"
3	503	2" ϕ	1 63/64"	1 63/64"	1 123/128"
4	481	2" ϕ	1 59/64"	1 15/16"	1 15/16"
5	506	2" ϕ	1 31/32"	1 123/128"	1 31/32"

TABLA N° 29
ANALISIS QUÍMICO (%)

<u>COD</u>	<u>C</u>	<u>Mn</u>	<u>Si</u>	<u>P</u>	<u>S</u>	<u>Ni</u>	<u>Cr</u>	<u>Mo</u>	<u>Cu</u>	<u>Al</u>	<u>Sn</u>	<u>V</u>	<u>Di</u>
1	.61	.52	.39	.029	.035	.15	.21	.020	.37	.001	.047	-	1.70
2	.75	.87	.26	.030	.008	-	.48	.001	.01	.036	-	-	2.73
3	.77	.92	.23	.036	.004	.01	.45	-	.01	.037	-	-	2.75
4	.75	.85	.28	.025	.006	-	.42	-	-	.042	-	-	2.53
5	.76	.88	.25	.024	.005	-	.47	-	-	.044	-	-	2.72
MEPSA (Std)	.85	.80	.40	.06*	.06*	Res	.30	.02	Res	.08*	Res	Res	2.92

- Valores máximos.

TABLA N° 30
DUREZA (ROCKWELL "C")

<u>COD.</u>	ϕ	<u>SUP.</u>	<u>1/8"</u>	<u>1/4"</u>	<u>3/8"</u>	<u>1/2"</u>	<u>CTR</u>	<u>MASA</u>
1	2"	58.5	60.8	60.5	60.6	60.6	59.7	59.95
2	2"	54.5	60.4	60.2	60.0	59.6	60.2	58.27
3	2"	59.0	61.5	61.8	62.5	62.4	60.7	60.96
4	2"	54.0	57.9	58.9	57.5	57.8	56.7	56.74
5	2"	53.4	58.5	59.1	59.4	58.5	59.5	57.03
PROMEDIO		55.9	59.8	60.1	60.0	59.8	59.4	58.59
MEPSA		62.9	62.8	62.6	62.4	61.8	60.9	62.60

ANALISIS METALOGRAFICO

Las cinco bolas presentan estructura martensítica de superficie a centro. En cuatro de las cinco bolas analizadas la Martensita es gruesa lo mismo que el tamaño de grano austenítico que es igual a mayor a 00 ASTM, lo cual indica que las bolas han sido templadas desde una temperatura muy alta de austenización. La bola 1 tiene granos más finos (Nº 6 ASTM) y una Martensita más fina que el resto de bolas.

OBSERVACIONES

Dureza de superficie más baja que otros niveles por descarburización superficial.

Con respecto a bolas MEPSA las durezas en todos los niveles así como la de masa son inferiores.

COMPARACIÓN DE BOLAS FUNCAL Y FUNDIDAS CAPITOL

MUESTRA ANALIZADA: 6 Bolas de 2" de diámetro.

Usuario: SHOUGAN HIERRO PERU

FABRICANTE	PAIS	CANTIDAD	PROCESO
CAPITOL (C)	USA	1 BOLA	FUNDIDA
CAPITOL (C)	USA	1 BOLA	FUNDIDA
FUNCAL (F)	PERU	1 BOLA	FORJADA
FUNCAL (F)	PERU	1 BOLA	FORJADA
FUNCAL (F)	PERU	1 BOLA	FORJADA
FUNCAL (F)	PERU	1 BOLA	FORJADA

CARACTERÍSTICAS GENERALES

Las bolas forjadas de FUNCAL presentan forma esférica y defectos superficiales de exfoliaciones, grietas y ligeras porosidades, producto del proceso de forja. Las bolas fundidas de Capitol Castings presentan forma esférica, con un buen acabado superficial en una de ellas, tanto en el lado de alma como en el molde metálico. La otra presenta ligeras porosidades superficiales en la zona del molde.

TABLA N° 31

PESO Y DIMENSIONES

(DIAMETRO NOMINAL: 2")

<u>CODIGO</u>	<u>PESO</u> (gr.)	<u>DIMENSIONES (pulg.)</u>			<u>ACHATAMIENTO</u> (pulg.)	
		<u>X</u>	<u>Y</u>	<u>Z</u>		
(C) 1	598.5	2.051	2.078	2.117	---	---
(C) 2	599.5	2.070	2.078	2.117	---	---
(F) 3	576.9	2.055	2.055	2.059	---	---
(F) 4	606.9	2.086	2.094	2.098	---	---
(F) 5	578.6	2.051	2.055	2.051	---	---
(F) 6	591.0	2.070	2.070	2.074	---	---

TABLA N° 32
ANALISIS QUÍMICO (%)

<u>COD</u>	<u>C</u>	<u>Mn</u>	<u>Si</u>	<u>P</u>	<u>S</u>	<u>Ni</u>	<u>Cr</u>	<u>Mo</u>	<u>Cu</u>	<u>Al</u>	<u>Sn</u>	<u>V</u>	<u>B</u>	<u>Di</u>
1	.64	.62	.33	.021	.056	.09	.25	.037	.21	.028	.012	.011	.005	2.00
2	.99	.65	.34	.023	.046	.10	.26	.028	.19	.025	.011	.009	.004	2.52
3	.82	.72	.29	.023	.030	.12	.21	.040	.17	.006	.014	.006	.004	2.35
4	.73	.71	.43	.025	.031	.10	.15	.029	.19	.016	.017	.003	.006	2.09
5	.92	.76	.38	.030	.039	.12	.20	.037	.22	.007	.018	.006	.008	2.70
6	.87	.72	.43	.032	.037	.12	.53	.080	.16	.012	.016	.005	.008	4.07

TABLA N° 33
DUREZA DE MASA

	<u>SUP</u>	<u>1/8"</u>	<u>1/4"</u>	<u>3/8"</u>	<u>1/2"</u>	<u>5/8"</u>	<u>3/4"</u>	<u>7/8"</u>	<u>CTR.</u>	<u>MASA</u>
1(C)	58.4	56.7	55.0	50.4	47.4	45.9	44.6	44.0	43.8	54.94
2(C)	61.5	61.3	55.9	52.7	51.0	49.7	49.0	48.4	47.8	58.01
3(C)	55.5	60.3	61.0	61.8	62.5	62.7	62.7	62.7	62.1	59.31
4(C)	59.2	62.5	63.1	63.0	63.0	62.8	63.0	62.9	60.9	61.62
5(C)	57.6	58.3	57.3	57.7	57.3	57.4	57.1	57.1	57.0	57.62
6(C)	59.5	60.2	61.5	61.7	61.9	61.7	61.2	61.6	60.3	60.58

TABLA N° 34
ANALISIS METALOGRAFICO

<u>COD.</u>	<u>SUPERFICIE</u>	<u>CENTRO</u>	<u>50 % M</u>
1	M (95%), P (5%)	M (30%), P (70%)	3/4"
2	M (95%), P (5%)	M (20%), P (80%)	1/2"
3	MARTENSITA	M (90%), B (10%)	>> 1"
4	MARTENSITA	MARTENSITA	>> 1"
5	MARTENSITA	M (85%), B (15%)	>> 1"
6	MARTENSITA	M (95%), B (5%)	>> 1"

OBSERVACIONES

Las bolas de Capitol Casting (USA), tienen análisis químico similar al de MEPSA, el porcentaje de carbono se encuentra en un rango más amplio (0.60-1.00). El porcentaje de Cromo es inferior y los tenores de Fósforo y azufre están cercanos a los de MEPSA.

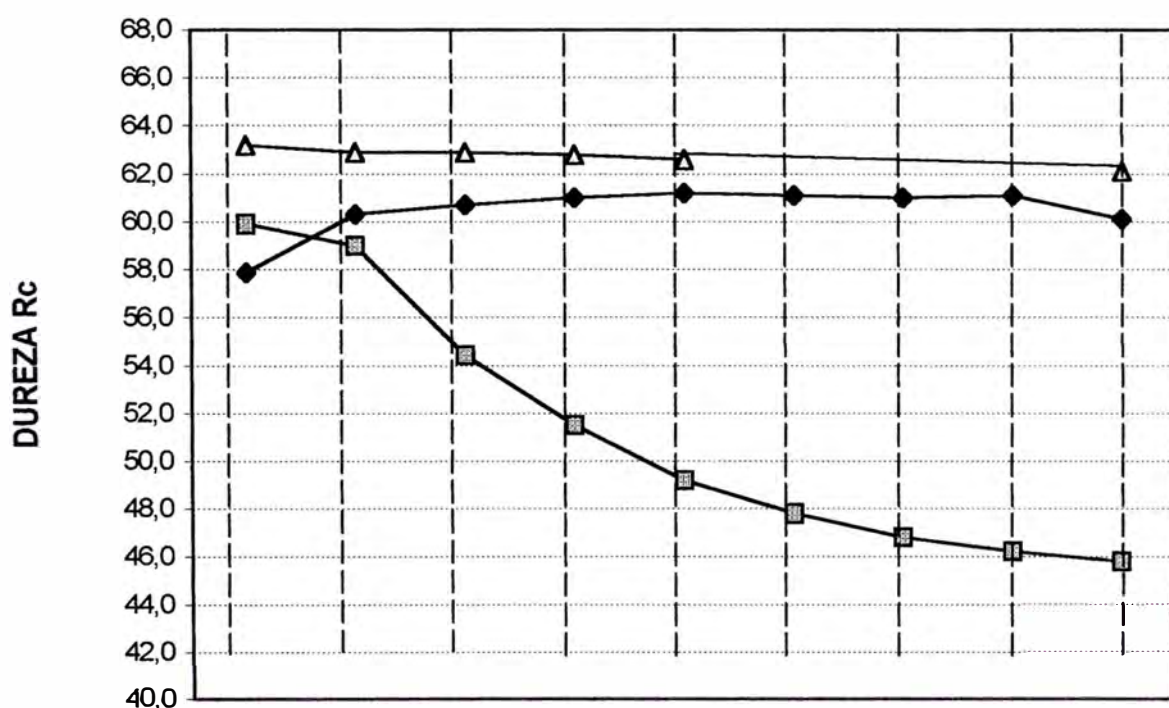
La composición química de las bolas FUNCAL presentan análisis de acero de alto carbono similares al acero MEPSA de bolas de acero pero con un contenido inferior en cromo, salvo la que además presenta un tenor de molibdeno elevado, lo que ocasiona que su DI esté por encima del rango. Los porcentajes de las impurezas fósforo y azufre están por debajo de 0.040%.

La dureza que presentan las bolas de Capitol es regular sólo en la superficie, siendo en el resto de la bola muy baja, esto debido a proceso de temple insuficiente. Las bolas de FUNCAL presentan durezas mayores en forma irregular de superficie a centro, siendo la dureza mucho más baja en la superficie, debido a efectos de descarburización superficial. La dureza de masa de la bola de Capitol es muy baja y la bola de FUNCAL tiene dureza por debajo del promedio de las bolas fundidas de acero MEPSA.

La microestructura de la bola Capitol presenta una mezcla de Martensita y Perlita, aumentando la Perlita de superficie a centro, lo que ocasiona las durezas obtenidas.

La microestructura de la bola Funcal es irregular y está compuesta de Martensita y un agregado Martensita (M) - Bainita (B), el que aumenta de superficie a centro (excepto en 4).

GRÁFICO N° 9
PERFIL DE DUREZA BOLAS 2" φ
COMPARATIVO: FUNCAL, CAPITOL (USA)
Y MEPSA



	SUP	1/8"	1/4"	3/8"	1/2"	5/8"	3/4"	7/8"	CTR
FUNCAL	57,9	60,3	60,7	61	61,2	61,1	61	61,1	60,1
CAPITOL	59,9	59	54,4	51,5	49,2	47,8	46,8	46,2	45,8
MEPSA	63,2	62,9	62,9	62,8	62,6				62,1

DUREZA DE MASA

◆ FUNCAL □ CAPITOL ▲ MEPSA

59.80

56.50

62.95

BOLAS DE ACERO FORJADO: ADESUR 2" DE DIÁMETRO

MUESTRA ANALIZADA: Bola Forjada de ADESUR

Procedencia: HIERRO PERÚ

Fabricante: ADESUR

CARACTERÍSTICAS GENERALES

Bola forjada de forma ovoide con achatamiento en los extremos.

**TABLA N° 35
PESO Y DIMENSIONES**

ϕ Nominal (pulg.)	PESO (gr.)	DIMENSIONES (pulg.)		
		X	Y	Z
2"	634	2 1/16	29/128	25/32

**TABLA N° 36
ANÁLISIS QUÍMICO (%)**

<u>COD</u>	<u>C</u>	<u>Mn</u>	<u>Si</u>	<u>P</u>	<u>S</u>	<u>Ni</u>	<u>Cr</u>	<u>Mo</u>	<u>Cu</u>	<u>Al</u>	<u>Sn</u>	<u>V</u>	<u>B</u>	<u>Di</u>
1	.88	.70	.32	.017	.020	.08	.29	.012	.30	.009	.015	.003	.006	239

**TABLA N° 37
DUREZA DE MASA**

ϕ	<u>SUP</u>	<u>1/8"</u>	<u>1/4"</u>	<u>3/8"</u>	<u>1/2"</u>	<u>CTR.</u>	<u>MASA</u>
2"	60.3	62.2	62.2	62.1	61.5	58.6	61.47

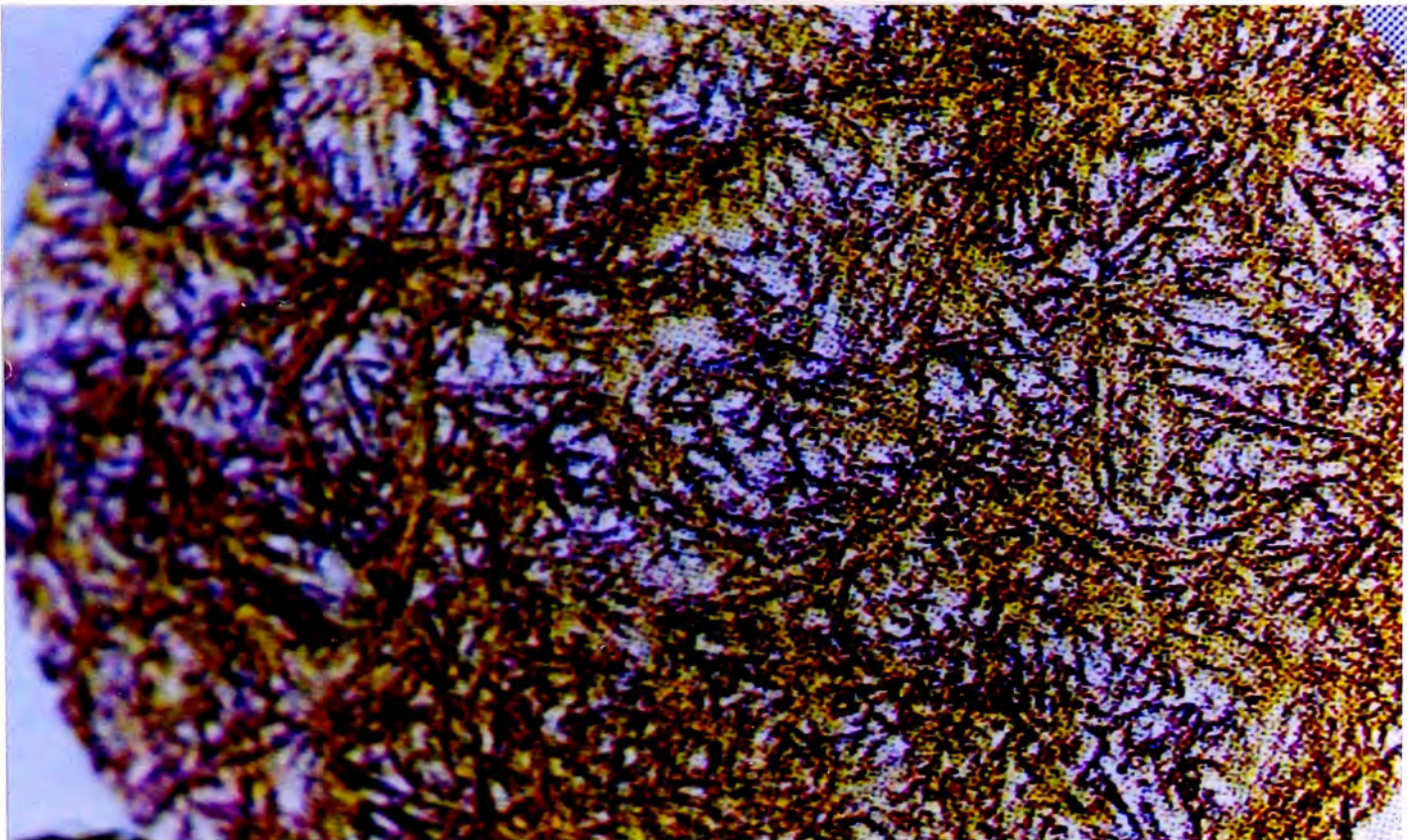
ANÁLISIS METALOGRAFICO

MATRIZ	OTRAS FASES	INCLUSIONES
Martensita	Perlita (15%) (en el centro de la bola)	Oxidos finos Tp 1

OBSERVACIONES

- La bola presenta descarburización superficial.

**FOTOMICROGRAFÍA TÍPICA DE UNA BOLA
DE 2" ADESUR A 500X**



MATRIZ 100% MARTENSÍTICA DESDE LA SUPERFICIE HASTA 1/2"

BOLAS DE ACERO FORJADO: ADESUR DE 2, 2 1/2, 3" DE DIÁMETRO

Usuario: SPCC (CUAJONE, TOQUEPALA)

Fabricación: ADESUR

ASPECTO SUPERFICIAL Y FORMA: Superficie limpia no oxidada pero deformadas con forma ovoide y achatada en los extremos.

En el achatamiento se observa cierta concavidad, y el diámetro del círculo que genera varía con el diámetro de bola; para 2" es 12 mm, para 2 1/2": 28mm, 3": 30mm, y para 3 1/2" es 35mm.

**TABLA N° 38
PESO Y DIMENSIONES**

CÓDIGO BOLA	PESO (gr.)	DIMENSIONES (pulg.)		
		X	Y	Z
2" ϕ C.	635	2 1/16	2 5/32	2 9/128
3" ϕ C.	1902	2 31/32	3 9/128	3 1/16
3 1/2" ϕ C.	3294	3 31/64	3 35/64	3 37/64
2 1/2" ϕ T.	1207	2 35/64	2 41/64	2 33/64
2 1/2" ϕ T.	1207	2 67/128	2 19/32	2 33/64
2" ϕ T.	629	2 3/64	2 5/8	2 11/128
2" ϕ T.	634	2 3/64	2 3/32	2 11/128

**TABLA N° 39
ANÁLISIS QUÍMICO (%)**

COD	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	Al	Sn	V	Di
2C	.78	.90	.24	.037	.002	-	.24	-	-	.037	-	-	2.19
3C	.73	.86	.25	.019	.003	-	.45	-	-	.047	-	-	3.00
3 1/2C	.77	.92	.46	.016	.001	-	.50	-	-	.041	-	.002	3.29
2 1/2T	.78	.97	.29	.030	.010	-	.49	.001	.01	.055	-	.001	3.17
2 1/2T	.78	.85	.25	.018	.014	.01	.46	.001	.01	.048	-	-	2.71
2T	.77	.86	.23	.028	.013	-	.26	-	.01	.041	-	-	2.13
2T	.79	.87	.24	.017	.008	-	.25	-	.01	.046	-	-	2.17

TABLA N° 40
DUREZA (ROCKWELL "C")

<u>CO</u> <u>D</u>	<u>φ</u>	<u>SUP</u>	<u>1/8"</u>	<u>1/4"</u>	<u>3/8"</u>	<u>1/2"</u>	<u>5/8"</u>	<u>3/4"</u>	<u>1"</u>	<u>CTR.</u>	<u>MAS</u> <u>A</u>
2C	2"	63.3	61.4	61.6	61.7	62.0	-	-	-	54.7	62.18
3C	3"	55.1	61.4	61.8	-	61.5	-	60.1	-	55.6	59.92
3½C	3½"	58.0	-	60.4	-	61.4	-	60.8	56.8	42.0	59.45
2½T	2½"	61.6	61.4	62.2	-	62.4	61.8	-	-	60.3	61.90
2½T	2½"	61.5	62.0	61.6	-	62.6	62.7	-	-	62.0	61.99
2T	2"	61.9	64.1	63.5	62.4	61.7	-	-	-	50.3	62.76
2T	2"	62.5	63.4	63.0	61.6	60.5	-	-	-	49.1	62.45

TABLA N° 41
ANALISIS METALOGRAFICO

<u>CODIGO</u>	<u>SUPERFICIE</u>	<u>CENTRO</u>	<u>50% M</u>
2"C	100% M	60%M + 40% P	> 1"
3"C	100% M	70%M + 30% P	> 1½"
3½"C	100% M	30%M + 70% P	1 1/8"
2½"T	100% M	95%M + 5% P	>>1 1/4"
2½"T	100% M	90%M + 10% P	>> 1 1/4"
2"T	100% M	50%M + 50% P	1"
2"T	100% M	10%M + 90% P	3/4"

M = MARTENSITA

P = PERLITA

OBSERVACIONES

Bolas 3"C y 3½"C presentan descarburización superficial con dureza baja.

En bolas de 2, 3 y 3½" la dureza de centro es baja.

Durezas de masa con valores aceptables con excepción de bola de 3"y 3½" de diámetro que tienen valores más bajas por descarburización superficial.

BOLA DE ACERO FORJADO: 3" ϕ DE ADESUR

Usuario: Minera ORCOPAMPA

Fabricante: ADESUR

CARACTERÍSTICAS GENERALES

Bola forjada de forma ovoide irregular con achatamiento pronunciados en los extremos de 1 1/4" de diámetro respectivamente. Tiene defectos superficiales de exfoliaciones y pliegues en nivel no crítico. Bola libre de defectos internos.

TABLA N° 42
PESO Y DIMENSIONES

ϕ Nominal (pulg.)	PESO (gr.)	DIMENSIONES (pulg.)		
		X	Y	Z
3"	2036.8	2 31/32"	3 5/128"	3 1/16"

TABLA N° 43
ANALISIS QUÍMICO (%)

C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	Al	Sn	V	B	Di
.90	.83	.30	.031	.018	.02	.51	.007	.00	.029	.000	.029	.002	3.39

TABLA N° 44
DUREZA DE MASA

ϕ	SUP	1/4"	1/2"	3/4"	1"	CTR.	MASA
3"	60.7	62.0	62.8	62.8	62.8	61.0	62.16

ANALISIS METALOGRAFICO

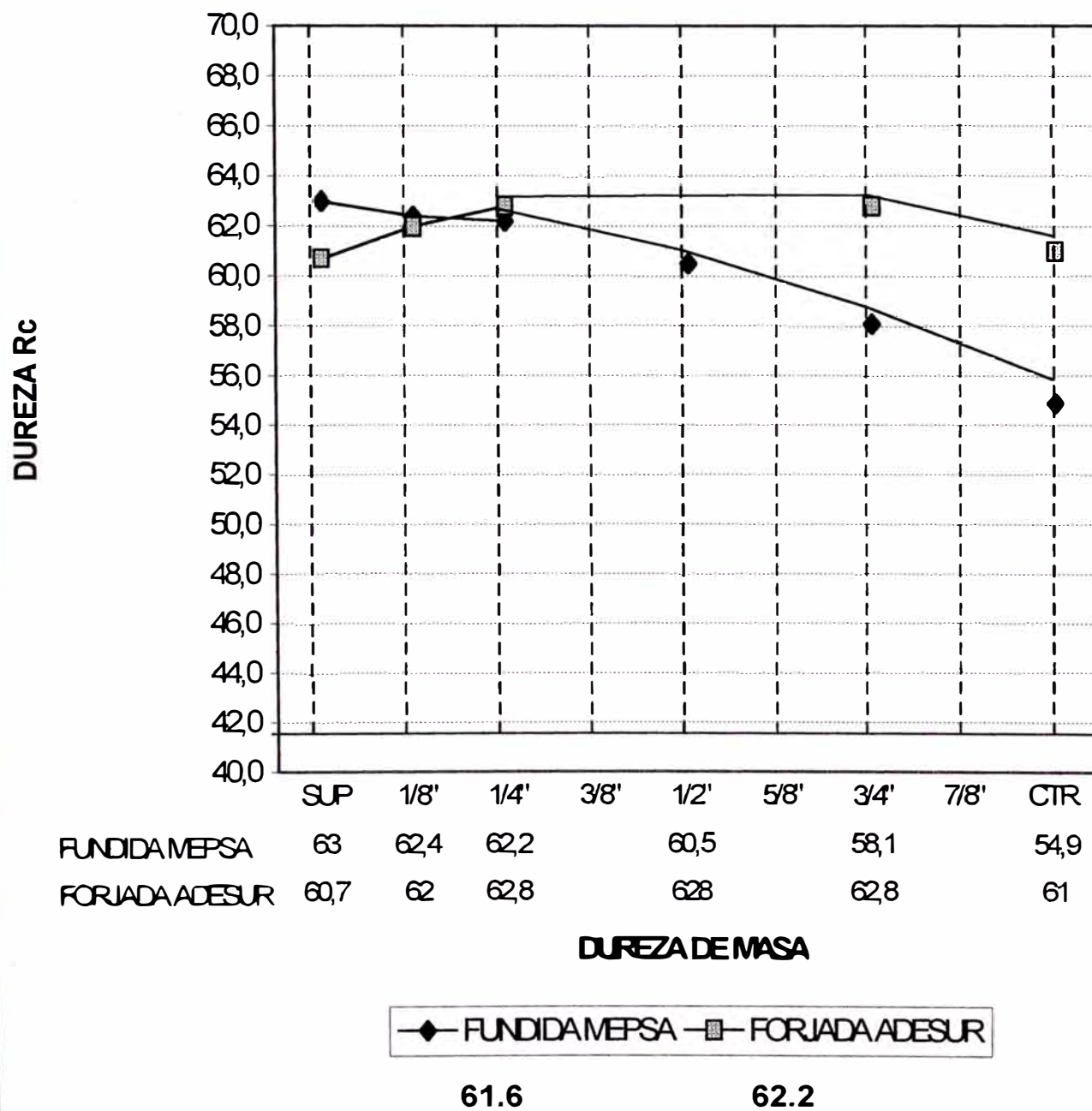
SUPERFICIE	CENTRO	50% M
Martensita	Martensita	> 1 1/2"

OBSERVACIONES

La bola en apariencia externa tiene forma ovoide con deformidad y franjas definidas de forja.

En composición química es similar a MEPSA con diferencia en el contenido de Molibdeno que es mínimo en la bola ADESUR.

GRÁFICO N° 10
DUREZA DE BOLAS ADESUR VS. MEPSA



COMPARACIÓN DE BOLAS DE ACERO FORJADO ADESUR (PERÚ) Y EXTRANJERAS 3 1/2" ϕ

MUESTRA ANALIZADA: Bolas forjadas de 3 1/2" de diámetro.

Usuario: S.P.C.C.

FABRICANTE	CANTIDAD	PROCESO
BORDER STEEL (BS) USA	3 BOLAS	FORJA
NUCORD (N) USA	3 BOLAS	FORJA
ADESUR (A) PERU	3 BOLAS	FORJA

CARACTERÍSTICAS GENERALES

Las bolas forjadas presentan defectos superficiales de exfoliaciones en nivel no crítico. Las 3 bolas de Nucord y Adesur y una bola de Border Steel tienen los extremos achatados. El resto de bolas son de forma esférica.

TABLA N° 45
PESO Y DIMENSIONES
(DIAMETRO NOMINAL: 3 1/2")

<u>CODIGO</u>	<u>PESO</u> (gr.)	<u>DIMENSIONES (pulg.)</u>			<u>ACHATAMIENTO</u> (pulg.)	
		<u>X</u>	<u>Y</u>	<u>Z</u>		
B.STEEL						
1	3110.6	3.596	3.520	3.492	1.102	1.154
2	3136.9	3.596	3.577	3.563	---	---
3	3043.5	3.553	3.518	3.459	---	---
NUCORD						
4	3124.0	3.642	3.553	3.492	0.776	0.776
5	3119.3	3.630	3.533	3.480	0.896	0.738
6	3121.4	3.632	3.577	3.459	1.087	1.055
ADESUR						
7	2705.3	3.445	3.364	3.303	1.181	1.264
8	2708.4	3.459	3.348	3.270	1.388	1.386
9	2668.4	3.435	3.370	3.268	13400	1.378

TABLA N° 46
ANALISIS QUÍMICO (%)

<u>COD</u>	<u>C</u>	<u>Mn</u>	<u>Si</u>	<u>P</u>	<u>S</u>	<u>Ni</u>	<u>Cr</u>	<u>Mo</u>	<u>Cu</u>	<u>Al</u>	<u>Sn</u>	<u>V</u>	<u>B</u>	<u>Di</u>
BS														
1	.82	.80	.19	.021	.030	.10	.53	.029	.24	.009	.016	.029	.007	3.24
2	.80	.74	.18	.022	.026	.13	.52	.053	.27	.009	.005	.025	.006	3.20
3	.82	.76	.16	.01	.029	.10	.52	.033	.22	.008	.011	.026	.005	3.10
N														
4	.68	.71	.24	.013	.029	.11	.46	.045	.26	.009	.017	.005	.005	2.65
5	.72	.71	.22	.016	.06	.11	.42	.026	.29	.009	.008	.005	.004	2.47
6	.72	.71	.22	.017	.026	.11	.42	.025	.28	.008	.008	.004	.005	2.46
A														
7	.94	.84	.31	.028	.016	.02	.54	.005	.00	.044	.000	.034	.001	3.63
8	.94	.84	.34	.034	.014	.02	.53	.006	.00	.063	.000	.028	.002	3.67
9	.91	.79	.31	.022	.019	.02	.51	.006	.00	.048	.000	.025	.002	3.30

TABLA N° 47
DUREZA DE MASA

<u>CODIGO</u>	<u>SUP</u>	<u>1/4"</u>	<u>1/2"</u>	<u>3/4"</u>	<u>1"</u>	<u>CTR.</u>	<u>MASA</u>
BORDER STEEL							
(BS)	61.9	62.6	61.8	60.7	58.3	61.7	61.66
(BS)	54.8	62.0	62.1	60.8	58.0	48.8	58.91
(BS)	57.5	60.6	61.6	60.4	57.1	49.6	59.33
Prom.	57.5	60.6	61.6	60.4	57.1	49.6	59.33
NUCORD							
(N)	60.8	59.7	61.1	62.0	59.6	55.6	60.60
(N)	61.2	61.2	60.7	60.9	57.8	55.1	60.81
(N)	59.4	63.4	62.6	60.5	59.4	54.6	61.15
Prom.	60.5	61.4	61.5	61.1	58.9	55.1	60.86
ADESUR							
(A)	56.1	56.7	56.6	55.8	55.6	52.8	56.28
(A)	57.5	61.2	59.3	59.5	60.2	57.9	59.23
(A)	60.9	59.0	59.0	60.2	60.3	58.1	59.94
Prom.	58.2	59.0	58.3	58.5	58.7	56.3	58.61

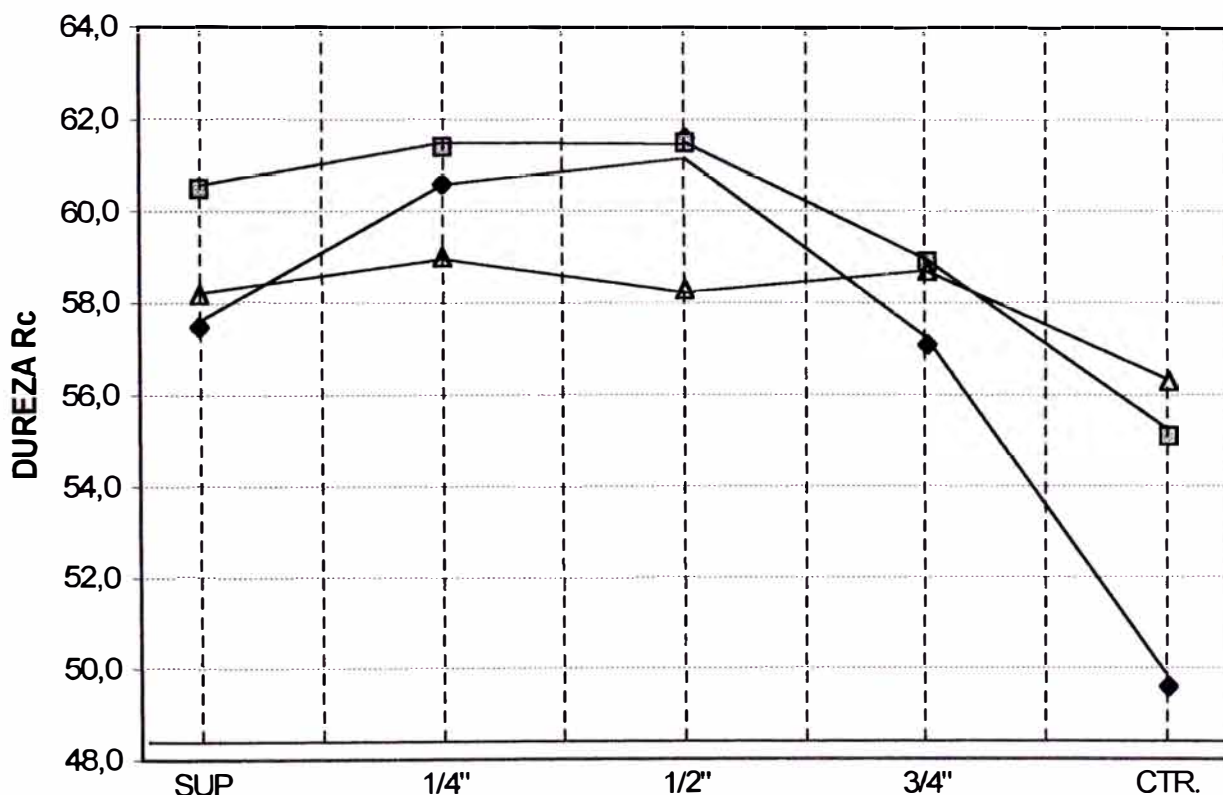
TABLA N° 48
ANALISIS METALOGRAFICO

<u>COD.</u>	<u>SUPERFICIE</u>	<u>CENTRO</u>	<u>50 % M</u>
BORDER STEEL			
1	MARTENSITA	M (45%), P (55%)	1 1/2"
2	MARTENSITA	M (50%), P (50%)	1 3/4"
3	MARTENSITA	M (40%), B (60%)	1 1/2"
NUCORD			
4	MARTENSITA	M (55%), P (45%)	>> 1 3/4"
5	MARTENSITA	M (60%), B (40%)	>> 1 3/4"
6	MARTENSITA	M (55%), B (45%)	>> 1 3/4"
ADESUR			
7	MARTENSITA	M (95%), P (5%)	>> 1 3/4"
8	MARTENSITA	M (75%), B (25%)	>> 1 3/4"
9	MARTENSITA	M (70%), B (30%)	>> 1 3/4"

OBSERVACIONES

En composición química todos los análisis corresponden al acero de alto carbono con ligeras variaciones en los porcentajes de los elementos carbono, molibdeno y vanadio.

GRÁFICO N° 11
GRAFICO COMPARATIVO DE DUREZAS
Perfil de Dureza - Bola de 3.5"



	SUP	1/4"	1/2"	3/4"	CTR.
BS	57,5	60,6	61,6	57,1	49,6
NUC	60,5	61,4	61,5	58,9	55,1
ADE	58,2	59,0	58,3	58,7	56,3

DUREZA DE MASA

—◆— BS —□— NUC —▲— ADE

59.33 60.86 58.61

OBSERVACIONES

Las bolas forjadas ADESUR:

- Presentan forma ovoide con aplastamiento en los extremos. En la superficie, algunas bolas presentan defecto de forja como pliegues y exfoliaciones en nivel no crítico.

Dimensionalmente, los diámetros varían entre 2 1/16" y 2 1/8" para 2" y entre 25/8" y 2 3/4" para 2 1/2".

En promedio, las bolas Adesur pesan 12% más en 2" y en 2 1/2".

Los análisis químicos muestran una composición constante, pero un índice de templabilidad (DI), inferior a los promedios MEPSA; 2.13 Adesur Vs. 2.92 Mepsa para 2"; y 2.62 Adesur Vs. 3.53 Mepsa para 2 1/2".

Las bolas de 2" y 2 1/2" analizadas, presentan buen nivel de dureza, similar al promedio Mepsa hasta 1/4" de profundidad, a partir del cual, la bola Mepsa es más dura.

La metalografía muestra en la superficie, un estructura martensítica para ambos diámetros de bolas, pero en el centro se observa un alto contenido de perlita, que en un caso llega al 85%.

BOLA DE ACERO FORJADO SAE 1545 DE INVENTOS PERUANOS

MUESTRA ANALIZADA: 3 Bolas forjadas de 1 1/2" de diámetro.

Usuario: MINERA RETAMAS

Fabricante: INVENTOS PERUANOS

TIPO DE ALEACIÓN: SAE 1545

CARACTERÍSTICAS GENERALES

Las bolas forjadas son de forma esférica y presentan exfoliaciones pronunciadas en su superficie.

TABLA N° 49
PESO Y DIMENSIONES
(DIAMETRO NOMINAL: 1 1/2")

CODIGO	PESO (gr.)	DIMENSIONES (pulg.)			ACHATAMIENTO (pulg.)	
		X	Y	Z		
1	268.7	1.562	1.594	1.594	---	---
2	240.0	1.531	1.531	1.484	0.50	---
3	260.0	1.594	1.594	1.500	---	---

TABLA N° 50
ANALISIS QUÍMICO (%)

cod	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	Al	Sn	V	B	Di
1	0.47	1.17	.14	.019	.010	.00	.01	.005	.03	.006	.010	.008	.000	1.29
2	0.45	1.14	.14	.027	.013	.00	.01	.002	.02	.006	.009	.008	.001	1.26
3	0.50	1.19	.16	.022	.010	.00	.01	.003	.03	.007	.010	.008	.000	1.36

TABLA N° 51
DUREZA DE MASA

CODIGO	SUP	1/8"	1/4"	3/8"	CTR.	MASA
1	53.8	59.3	57.3	56.8	58.5	56.33
2	58.2	58.6	57.4	55.4	52.1	57.83
3	41.3	55.3	54.7	51.8	51.8	48.86

ANALISIS METALOGRAFICO

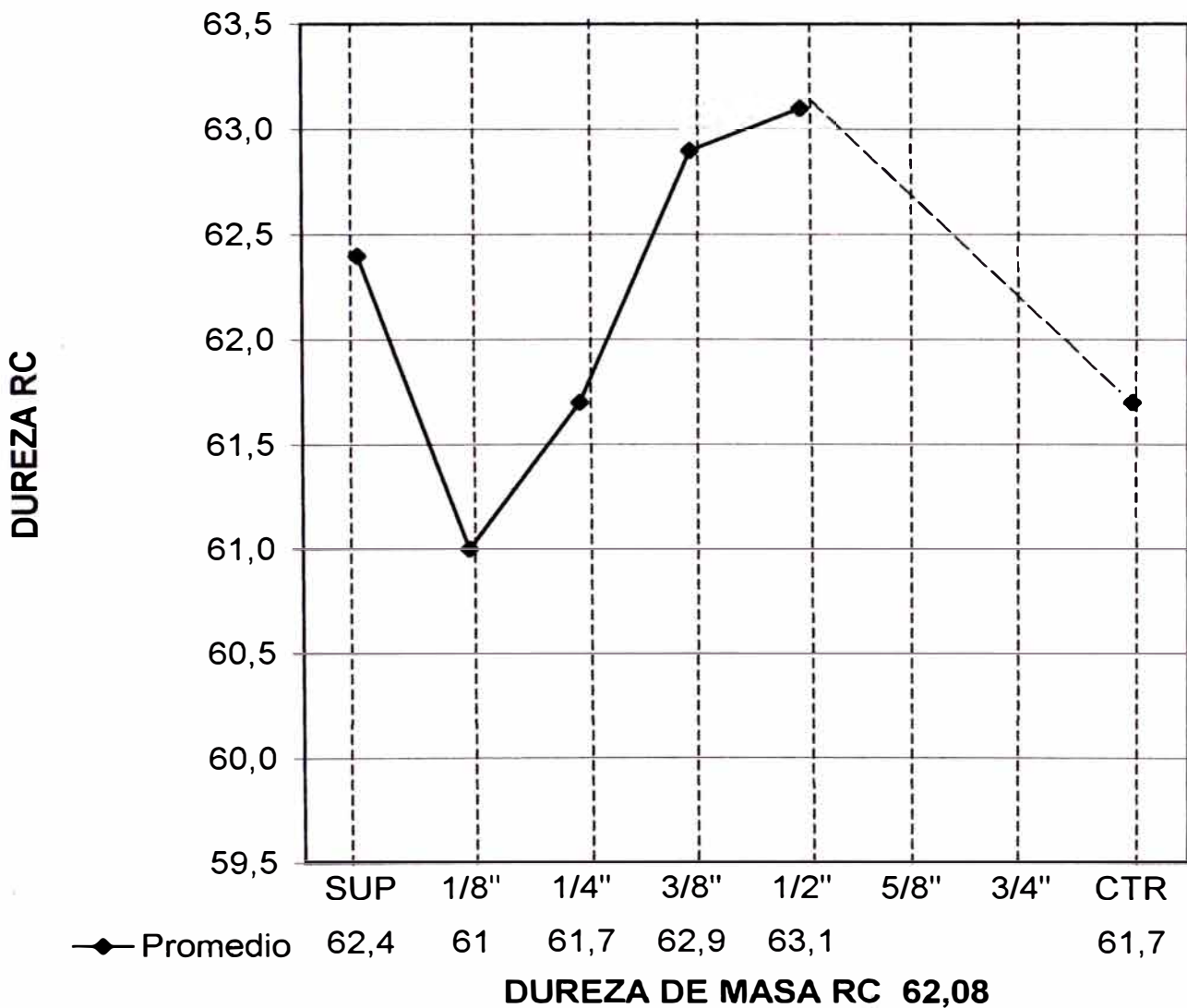
<u>COD.</u>	<u>SUPERFICIE</u>	<u>CENTRO</u>	<u>50 % M</u>
1	MARTENSITA	MARTENSITA + PERLITA (10%)	> 3/4"
2	MARTENSITA	MARTENSITA + PERLITA (30%)	> 3/4"
3	MARTENSITA	MARTENSITA + PERLITA (35%)	> 3/4"

OBSERVACIONES

La composición química corresponde en promedio a un acero SAE 1545 simple al medio carbono con elemento manganeso en baja aleación.

Por el bajo porcentaje de carbono y bajo DI, las durezas obtenidas son inferiores a las que se obtienen en Bolas forjadas ADESUR, F. Callao y por lo tanto su resistencia al desgaste y rendimiento también son inferiores.

GRÁFICO N° 12 PERFIL DE DUREZA - BOLA DE 2,0" BOLA LAMINADA



BOLA DE ACERO FORJADO DE FABRICACIÓN EXTRANJERA

Fabricante: BRASIL

CARACTERÍSTICAS GENERALES: Bola de 2" de diámetro ovaladas con achatamiento de 5/8" (0.625 pulg.) en los extremos.

TABLA N° 52
PESO Y DIMENSIONES

PESO (grs)	DIMENSIONES (pulg.)		
	X	Y	Z
539.3	2.031	1.969	1.969

TABLA N° 53
ANÁLISIS QUÍMICO (%)

<u>C</u>	<u>Mn</u>	<u>Si</u>	<u>P</u>	<u>S</u>	<u>Ni</u>	<u>Cr</u>	<u>Mo</u>	<u>Cu</u>	<u>Al</u>	<u>Sn</u>	<u>V</u>	<u>B</u>	<u>Di</u>
0.84	0.74	.26	.021	.030	.07	0.50	.14	.01	.031	.010	-	-	4.02

TABLA N° 54
DUREZA DE MASA

<u>SUP</u>	<u>1/8"</u>	<u>1/4"</u>	<u>3/8"</u>	<u>1/2"</u>	<u>CTR.</u>	<u>MASA</u>
61.3	61.7	62.5	62.5	63.0	59.0	61.97

MICROESTRUCTURA

MATRIZ	OTRAS FASES	INCLUSIONES
MARTENSITICA	PERLITA (10%) (en el centro de la bola)	OXIDOS FINOS N° 1

BOLA DE ACERO FORJADO: BRASIL

Fabricante: BRASIL

CARACTERÍSTICAS GENERALES: Bola de 3 1/2" de diámetro ovalada con achatamiento de 1 5/16 (1.312 pulg.) en los extremos.

TABLA N° 55
PESO Y DIMENSIONES

PESO (grs)	DIMENSIONES (pulg.)		
	X	Y	Z
3011.6(grs)	3.500	3.500	3.500

TABLA N° 56
ANÁLISIS QUÍMICO (%)

<u>C</u>	<u>Mn</u>	<u>Si</u>	<u>P</u>	<u>S</u>	<u>Ni</u>	<u>Cr</u>	<u>Mo</u>	<u>Cu</u>	<u>Al</u>	<u>Sn</u>	<u>V</u>	<u>B</u>	<u>Di</u>
0.85	.74	.22	.039	.026	.09	0.41	.02	.10	.000	.019	.017	.001	264

TABLA N° 57
DUREZA DE MASA

<u>SUP</u>	<u>1/4"</u>	<u>1/2"</u>	<u>3/4"</u>	<u>1"</u>	<u>CTR.</u>	<u>MASA</u>
58.5	61.5	61.0	58.0	51.7	52.0	59.15

MICROESTRUCTURA

MATRIZ	OTRAS FASES	INCLUSIONES
MARTENSITICA	PERLITA (35%) (en el centro de la bola)	OXIDOS FINOS N° 1

BOLA FORJADA 2" ϕ

Fabricante: ARMCO DE CHILE

Usuario: S.P.C.C

FORMA Y ASPECTO SUPERFICIAL DE LA BOLA FORJADA: Bola de forma con achatamiento en dos extremos opuestos que forman círculos de 10mm de diámetro aproximadamente pequeña depresión en ellos. Superficie lisa y libre de defectos de forja (exfoliaciones, escamas, etc.)

Diámetro variable de 52.6mm (25/64") a 53.6mm (2 7/64") siendo el diámetro de la parte achatada de 53.3 mm (2 6/64").

PESO DE BOLA: 615.2 gramos.

TABLA N° 58
ANÁLISIS QUÍMICO (%)

<u>COD</u>	<u>C</u>	<u>Mn</u>	<u>Si</u>	<u>P</u>	<u>S</u>	<u>Ni</u>	<u>Cr</u>	<u>Mo</u>	<u>Cu</u>	<u>Al</u>	<u>V</u>	<u>Di</u>
ARMCO CHILE	.75	.81	.27	.021	.014	.02	.26	-	.01	.022	.018	2.06
MEPSA (STD)	.85	.80	.40			Res	.30	.02	Res		Res	2.92

TABLA N° 59
DUREZA DE MASA
ROCKWELL "C"

<u>CODIGO</u>	<u>SUP</u>	<u>1/8"</u>	<u>1/4"</u>	<u>3/8"</u>	<u>1/2"</u>	<u>CTR.</u>	<u>MASA</u>
ARMCO (CHILE)	63.8	61.7	58.8	56.1	54.5	53.7	60.3
MEPSA (STD)	62.9	62.8	62.6	62.4	61.8	60.9	62.6

ANALISIS METALOGRAFICO

ARMCO (CHILE) Superficie: Martensita (100%); Centro: Martensita 80%, Perlita 20%.

MEPSA (STD) Martensita 100% de superficie a centro.

BOLA DE ACERO FORJADO: SAG DE 5" ϕ

Fabricante: ARMCO (CHILE)

TABLA N° 60
ANÁLISIS QUÍMICO (%)

<u>C</u>	<u>Mn</u>	<u>Si</u>	<u>P</u>	<u>S</u>	<u>Ni</u>	<u>Cr</u>	<u>Mo</u>	<u>Cu</u>	<u>Al</u>	<u>Sn</u>	<u>V</u>	<u>Di</u>
.83	.79	.55	.015	.017	.01	.53	.061	.00	.013	.007	.021	4.09

TABLA N° 61
DUREZA DE MASA
ROCKWELL "C"

Prof	1/2"	3/4"	1"	1 1/4"	1 1/2"	1 3/4"	2"	2 1/4"	2 1/2"		MASA
Rc	622	602	60.1	58.6	57.4	56.8	56.2	55.6	52.5	(CTR)	60.31

ANÁLISIS METALOGRAFICO

MATRIZ	OTRAS FASES
MARTENSITA (REVENIDA)	PERLITA FINA (A PARTIR DE 1 1/4" DE PROFUNDIDAD)

OBSERVACIONES

- La muestra corresponde a un bola de 5" de diámetro fracturada, usada que presenta las siguientes dimensiones:

EJE X	EJE Y	EJE Z	PESO
4.0"	3 3/4"	2 11/16"	2860 gramos

El análisis químico es similar al acero MEPSA de 4" de diámetro.

El análisis microestructural revela una matriz 100% martensítica en la superficie. A partir de 1 1/4" de profundidad la perlita aparece y va incrementándose hasta aproximadamente 50% en el centro de la bola.

La dureza es elevada para una bola de 5" de diámetro y en el corte se observó que ésta se encontraba altamente tensionada.

BOLAS DE ACERO FORJADO: NUCOR DE 3" ϕ

Usuario: VOLCAN CIA. MINERA S.A.

Fabricante: NUCOR (USA)

CARACTERÍSTICAS GENERALES

Las dos bolas son forjadas y presentan achatamiento en los extremos, siendo su forma aproximadamente esférica.

TABLA N° 62
PESO Y DIMENSIONES

<u>CODIGO</u>	<u>PESO</u> (gr.)	<u>DIMENSIONES (pulg.)</u>			<u>ACHATAMIENTO</u> (pulg.)
		<u>X</u>	<u>Y</u>	<u>Z</u>	
1	2037	2 31/32	3 3/128	3 1/32	----
2	3036.6	3 31/32	3 5/128	3 1/16	----

TABLA N° 63
ANÁLISIS QUÍMICO (%)

<u>COD</u>	<u>C</u>	<u>Mn</u>	<u>Si</u>	<u>P</u>	<u>S</u>	<u>Ni</u>	<u>Cr</u>	<u>Mo</u>	<u>Cu</u>	<u>Al</u>	<u>Sn</u>	<u>V</u>	<u>B</u>	<u>Di</u>
1	.83	.69	.23	.021	.020	.07	.50	.015	.13	.008	.021	.018	.004	2.78
2	.80	.75	.25	.022	.019	.09	.50	.032	.25	.009	.026	.020	.004	3.08

TABLA N° 64
DUREZA DE MASA

<u>COD</u>	<u>ϕ</u>	<u>SUP</u>	<u>1/8"</u>	<u>1/4"</u>	<u>1/2"</u>	<u>3/4"</u>	<u>CTR.</u>	<u>MASA</u>
1	3"	64.3	55.6	39.2	36.2	34.8	35.6	47.04
2	3"	64.1	57.9	52.6	42.2	38.6	37.7	52.73

ANÁLISIS METALOGRAFICO

<u>COD.</u>	<u>SUPERFICIE</u>	<u>CENTRO</u>	<u>50 % M</u>
1	MARTENSITA	PERLITA (100%)	3/16"
2	MARTENSITA	PERLITA (100%)	3/8"

OBSERVACIONES

Las bolas presentan dureza alta en la superficie pero decae rápidamente hacia el centro de la bola. La dureza de masa comparada con la bola MEPSA promedio es muy inferior.

BOLAS DE ACERO FORJADO: BORDER STEEL

3 bolas forjadas de 1 1/2", 2" y 2 1/2" de diámetro.

Usuario: S.P.C.C. (Toquepala)

Fabricante: BORDER STEEL (USA)

CARACTERÍSTICAS GENERALES

Las tres bolas son forjadas de forma esférica con defectos superficiales de exfoliaciones. La bola de 2 1/2" de diámetro tiene además un achatamiento en los extremos de 5/8" de diámetro.

TABLA N° 65
PESO Y DIMENSIONES

<u>CODIGO</u>	<u>φ Nominal</u> (pulg.)	<u>PESO</u> (gr.)	<u>DIMENSIONES (pulg.)</u>		
			<u>X</u>	<u>Y</u>	<u>Z</u>
1	1 1/2"	242.6	1 17/32"	1 17/32"	1 35/64"
2	2"	582.3	2 1/16"	2 1/16"	2 1/16"
3	"2 1/2"	1130.4	2 9/16"	2 19/32"	2 15/32"

TABLA N° 66
ANÁLISIS QUÍMICO (%)

<u>COD</u>	<u>C</u>	<u>Mn</u>	<u>Si</u>	<u>P</u>	<u>S</u>	<u>Ni</u>	<u>Cr</u>	<u>Mo</u>	<u>Cu</u>	<u>Al</u>	<u>Sn</u>	<u>V</u>	<u>B</u>	<u>Di</u>
1	.96	.72	.20	.025	.031	.10	.23	.019	.26	.009	.023	.003	.0007	2.28
2	.95	.73	.20	.025	.028	.08	.45	.010	.22	.009	.025	.006	.0006	2.92
3	.80	.79	.21	.026	.022	.12	.41	.020	.30	.009	.025	.026	.0005	2.76

TABLA N° 67
DUREZA DE MASA

<u>COD</u>	<u>φ</u>	<u>SUP</u>	<u>1/8"</u>	<u>1/4"</u>	<u>3/8"</u>	<u>1/2"</u>	<u>5/8"</u>	<u>CTR.</u>	<u>MASA</u>
1	1 1/2"	63.0	63.7	63.3	63.7			63.0	63.34
2	2"	63.4	62.4	62.0	61.6	61.6		60.4	62.46
3	2 1/2"	62.1	63.8	63.2		61.4	59.4	57.8	62.39

TABLA N° 68
ANALISIS METALOGRAFICO

<u>COD.</u>	<u>SUPERFICIE</u>	<u>CENTRO</u>	<u>50 % M</u>
1	MARTENSITA	MARTENSITA (100%)	>>3/4"
2	MARTENSITA	MARTENSITA (100%)	>>1"
3	MARTENSITA	MARTENSITA (85%), PERLITA(15%)	>1 1/4"

OBSERVACIONES

Las bolas presentan características similares a Bolas Forjadas analizadas anteriormente del mismo fabricante BORDER STEEL (USA).

BOLAS DE ACERO FORJADO: BORDER STEEL

Fabricante: BORDER STEEL (USA)

Usuario: S.P.C.C.

CARACTERÍSTICAS GENERALES

Bola de 2" de diámetro forjadas de forma aproximadamente esférica con defecto superficial de exfoliaciones.

Bola de 3 1/2" de diámetro forjada de forma ovoide con achatamiento en los extremos.

TABLA N° 69
PESO Y DIMENSIONES

CODIGO	φ Nominal (pulg.)	PESO (gr.)	DIMENSIONES (pulg.)		
			X	Y	Z
1	2"	594.2	2 1/16"	2 1/16"	2 1/16"
2	3 1/2"	2802.6	3 33/64"	3 1/2"	3 9/32"

TABLA N° 70
ANALISIS QUÍMICO (%)

COD	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	Al	Sn	V	B	Di
1	.97	.74	.19	.025	.024	.07	.45	.010	.23	.009	.023	.003	.006	2.96
2	.82	.81	.21	.027	.021	.30	.53	.026	.33	.009	.024	.026	.006	3.52

TABLA N° 71
DUREZA DE MASA

COD	φ	SUP	1/8"	1/4"	3/8"	1/2"	CTR.	MASA
1	2"	62.9	62.9	62.9	62.6	62.3	63.5	62.78
COD	φ	SUP	1/4"	1/2"	3/4"	1"	CTR.	MASA
2	3 1/2"	60.6	63.9	63.3	61.8	59.8	58.4	62.02

ANALISIS METALOGRAFICO

<u>COD.</u>	<u>SUPERFICIE</u>	<u>CENTRO</u>	<u>50 % M</u>
1	MARTENSITA	MARTENSITA (100%)	>>1"
2	MARTENSITA	MARTENSITA (90%), PERLITA(10%)	>1 3/4"

OBSERVACIONES

La Bola presenta características similares a Bolas analizadas del mismo fabricante.

BOLA DE ACERO FORJADO: BORDER STEEL

Fabricación: BORDER STEEL - USA de 3 1/2" ϕ .

Usuario: S.P.C.C.

CARACTERÍSTICAS GENERALES

Bola forjada de forma ovoide con achatamiento en los extremos formando un área plana circular de 1 3/8 de diámetro. Se observan defectos de forja como estrías.

TABLA N° 72
PESO Y DIMENSIONES

ϕ Nominal (pulg.)	PESO (gr.)	DIMENSIONES (pulg.)		
		X	Y	Z
3 1/2"	3037.5	3 9/16"	3 9/16"	3 13/32"

TABLA N° 73
ANÁLISIS QUÍMICO (%)

<u>C</u>	<u>Mn</u>	<u>Si</u>	<u>P</u>	<u>S</u>	<u>Ni</u>	<u>Cr</u>	<u>Mo</u>	<u>Cu</u>	<u>Al</u>	<u>Sn</u>	<u>V</u>	<u>B</u>	<u>Di</u>
.82	.91	.51	.030	.026	.01	.46	.000	.00	.010	.005	.020	.0006	3.54

TABLA N° 74
DUREZA DE MASA

ϕ	<u>SUP</u>	<u>1/4"</u>	<u>1/2"</u>	<u>3/4"</u>	<u>1"</u>	<u>CTR.</u>	<u>MASA</u>
3 1/2"	59.6	62.6	63.9	63.5	62.6	55.7	61.82

ANÁLISIS METALOGRAFICO

MATRIZ	OTRAS FASES	INCLUSIONES
Martensita	Perlita (30%) (en el centro de la bola)	Oxidos finos Tp 1

OBSERVACIONES

La dureza de superficie es inferior que en los niveles subsiguientes con excepción de la dureza de centro que tiene dureza más baja por la presencia de 30% de Perlita en su estructura.

El DI es similar a la bola de acero MEPSA pero logrado en base a los elementos Carbono, Manganeso y Cromo principalmente, sin el empleo de Molibdeno en su composición química.

COMPARACIÓN ADESUR VS BORDER STEEL

MUESTRA ANALIZADA: 1 Bola Forjada 3 1/2" de diámetro de ADESUR; 1 Bola Forjada 3 1/2" de diámetro de BORDER STEEL.

Usuario: S.P.C.C. (Cuajone)

CARACTERÍSTICAS GENERALES

La bola (ADESUR) tiene forma ovoide con achatamiento pronunciado en los extremos de 1 1/2" de diámetro. Tiene defectos superficiales de exfoliaciones y pliegues en nivel no crítico. Bola libre de defectos internos.

La bola (BORDER STEEL) tiene forma esférica con ligero achatamiento en los extremos de 7/8" de diámetro y no presenta defectos externos superficiales. Bola libre de defectos internos.

TABLA N° 75
PESO Y DIMENSIONES

<u>CODIGO</u>	<u>φ Nominal</u> (pulg.)	<u>PESO</u> (gr.)	<u>DIMENSIONES (pulg.)</u>		
			<u>X</u>	<u>Y</u>	<u>Z</u>
ADESUR	3 1/2"	2964	3 1/2"	3 1/2"	3 7/16"
BS	3 1/2"	2865	3 1/2"	3 1/2"	3 3/8"

TABLA N° 76
ANÁLISIS QUÍMICO (%)

<u>COD</u>	<u>C</u>	<u>Mn</u>	<u>Si</u>	<u>P</u>	<u>S</u>	<u>Ni</u>	<u>Cr</u>	<u>Mo</u>	<u>Cu</u>	<u>Al</u>	<u>Sn</u>	<u>V</u>	<u>B</u>	<u>Di</u>
A	.77	.85	.47	.020	.032	.01	.50	.002	.00	.028	.011	.006	.005	3.32
BS	.78	.79	.24	.022	.021	.12	.46	.021	.31	.009	.029	.025	.003	2.94

TABLA N° 77
DUREZA DE MASA

<u>COD</u>	<u>φ</u>	<u>SUP</u>	<u>1/4"</u>	<u>1/2"</u>	<u>3/4"</u>	<u>1"</u>	<u>CTR.</u>	<u>MASA</u>
A	3 1/2"	62.4	62.4	61.4	61.1	59.4	57.4	61.85
BS	3 1/2"	59.8	63.2	61.9	60.3	57.4	49.3	61.94

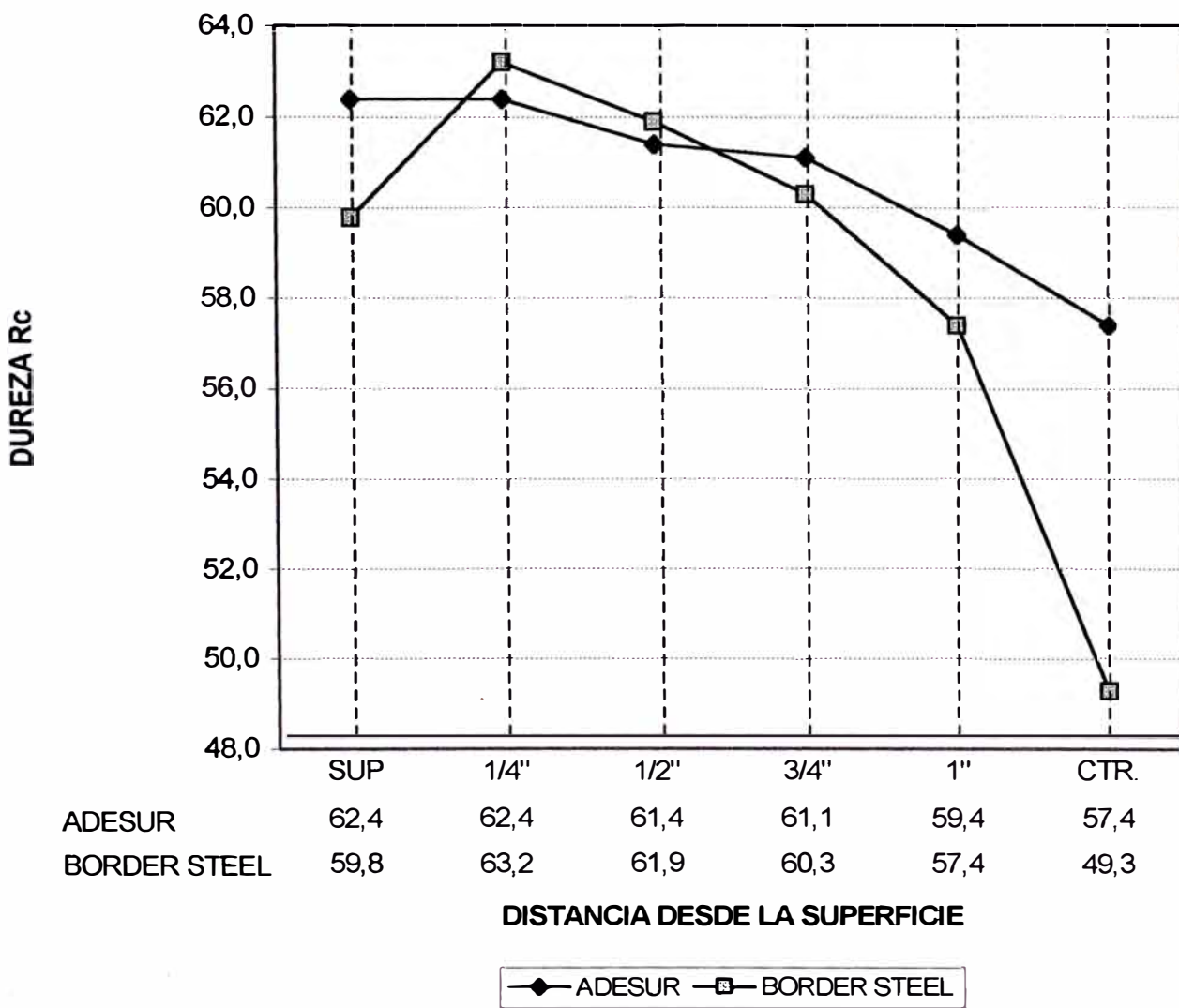
ANALISIS METALOGRAFICO

<u>COD.</u>	<u>SUPERFICIE</u>	<u>CENTRO</u>	<u>50 % M</u>
A	MARTENSITA	MARTENSITA (75%), PERLITA(25%)	> 1 3/4"
BS	MARTENSITA	MARTENSITA (50%), PERLITA(50%)	> 1 3/4"

OBSERVACIONES

En composición química se diferencian con la bola MEPSA en el Molibdeno que es mayor en la bola MEPSA lo que eleva el DI y en vanadio que es mayor en la bola de Border Steel.

GRÁFICO N° 13
DUREZA DE MASA
ADESUR VS BORDER STEEL 3 1/2"



61.8 60.9

COMPARACIÓN DE BOLAS FORJADAS EXTRANJERAS

MUESTRA ANALIZADA: Bolas forjadas de 3 1/2" de diámetro.

Usuario: SHOUGAN HIERRO PERU

FABRICANTE	PAIS	CANTIDAD	PROCESO
NUCORD (N)	USA	1 BOLA	FORJA
BOLVERA (B)	ESPAÑA	1 BOLA	FORJA
COME STEEL (C)	AUSTRALIA	1 BOLA	FORJA

CARACTERÍSTICAS GENERALES

Las bolas forjadas de Nucord y Come Steel presentan defectos superficiales de exfoliaciones en nivel no crítico. La bola de Nucord tiene los extremos achatados y las otras dos bolas son de forma esférica.

TABLA N° 78
PESO Y DIMENSIONES
 (DIAMETRO NOMINAL: 3 1/2")

CODIGO	PESO (gr.)	DIMENSIONES (pulg.)			ACHATAMIENTO (pulg.)	
		X	Y	Z		
(N)	618.8	2.109	2.109	2.008	0.750	0.750
(B)	517.7	1.977	1.977	1.977	---	---
(C)	592.6	2.062	2.039	2.039	---	---

TABLA N° 79
ANALISIS QUÍMICO (%)

COD	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	Al	Sn	V	B	Di
N	.69	.68	.28	.018	.036	.13	.38	.031	.41	.009	.022	.003	.006	2.62
B	.70	.66	.24	.016	.023	.10	.34	.032	.14	.009	.003	.003	.004	2.20
C	.84	.70	.26	.035	.032	.12	.18	.036	.24	.008	.011	.001	.006	2.23

TABLA N° 80
DUREZA DE MASA

<u>CODIGO</u>	<u>SUP</u>	<u>1/8"</u>	<u>1/4"</u>	<u>3/8"</u>	<u>1/2"</u>	<u>CTR.</u>	<u>MASA</u>
(N)	59.0	62.9	63.0	62.9	62.7	62.2	61.60
(B)	58.2	61.8	62.1	61.9	61.5	60.9	60.63
(C)	62.1	63.2	63.8	63.0	62.4	60.8	63.81

ANALISIS METALOGRAFICO

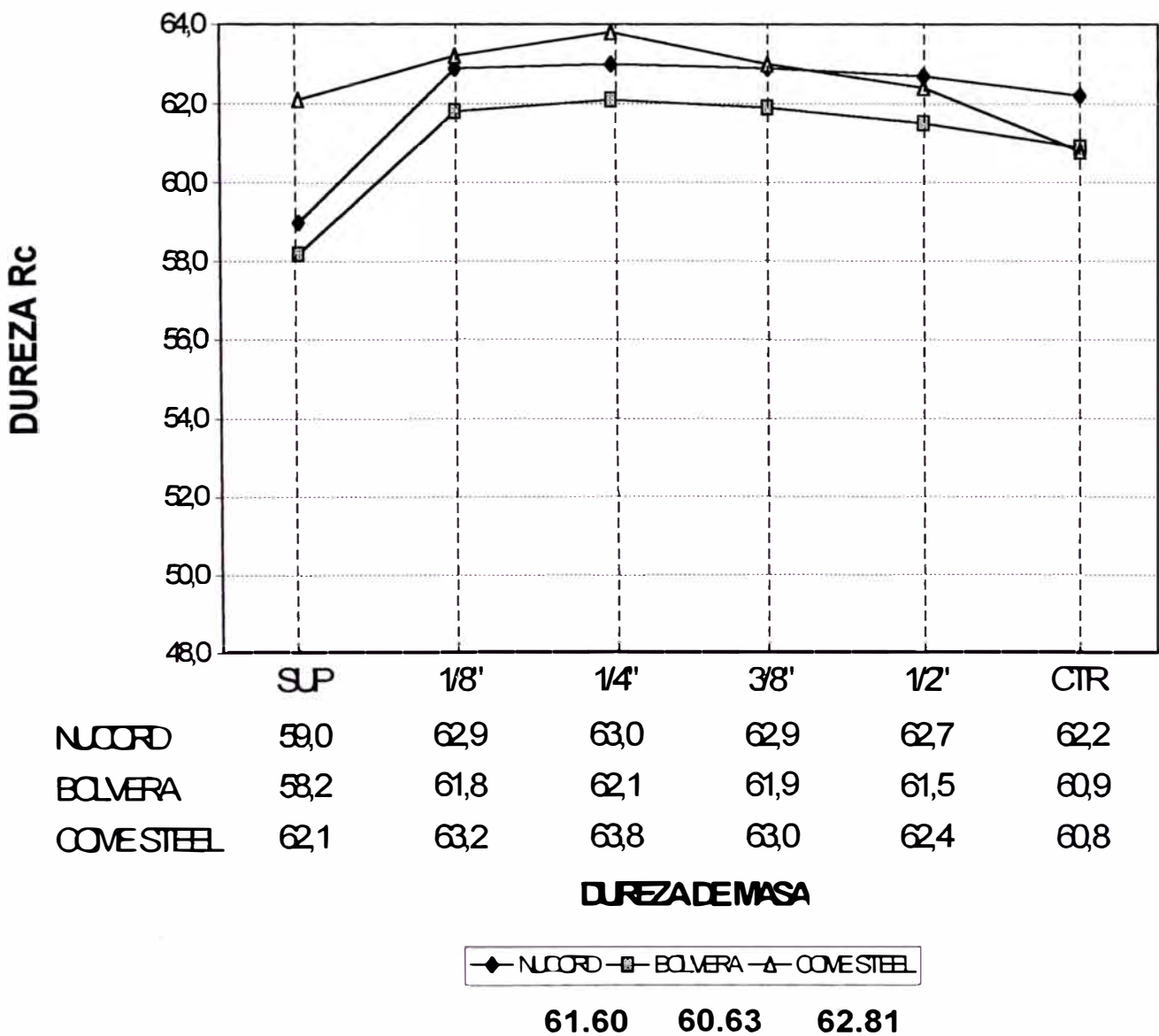
<u>COD.</u>	<u>SUPERFICIE</u>	<u>CENTRO</u>	<u>50 % M</u>
(N)	MARTENSITA	M (100%) P (55%)	> 1"
(B)	MARTENSITA	M (95%) P (5%)	> 1"
(C)	MARTENSITA	M (90%) P (10%)	> 1"

OBSERVACIONES

Las durezas de superficies en bolas de Nucord y Bolvera son bajas por descarburización superficial.

En composición química todos los análisis corresponden al acero de alto carbono similares a acero MEPSA de bolas. Los porcentajes de las impurezas fósforo y azufre están por debajo de 0.040%.

GRÁFICO N° 14
PERFIL DE DUREZA BOLAS FORJADA
NUCOR(N), BOLVERA (B) Y COME STEEL (C)



BOLAS DE ACERO FORJADAS CHINA: PARA CEMENTO

MUESTRA ANALIZADA: 1 Bola Forjada de 4" de diámetro.

Usuario: CEMENTOS LIMA

Fabricante: CHINA

CARACTERÍSTICAS GENERALES

La Bola ha sido fabricada por proceso de forja, de forma esférica con exfoliaciones superficiales leves.

TABLA N° 81
PESO Y DIMENSIONES
(DIAMETRO NOMINAL: 4")

PESO (gr.)	DIMENSIONES (pulg.)			ACHATAMIENTO (pulg.)	
	X	Y	Z		
4412.4	4.039	4.039	4.000	---	---

TABLA N° 82
ANÁLISIS QUÍMICO (%)

C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	Al	Sn	V	B	Di
0.59	2.40	.95	.033	.015	.04	.10	.014	.25	.020	.029	.009	.023	5.10

TABLA N° 83
DUREZA DE MASA

SUP	1/4"	1/2"	3/4"	1"	CTR.	MASA
44.8	45.4	46.8	45.6	47.2	44.7	45.70

ANÁLISIS METALOGRAFICO

La bola presenta microestructura uniforme de superficie a centro y consiste de una matriz Perlítica con agregado de Bainita y Martensita en franjas que muestran zonas de segregación química.

OBSERVACIONES

La composición química corresponde a un acero de alto carbono de baja aleación con un porcentaje de Manganeso alto (2.40%) y no común para fabricantes conocidos de bolas forjadas.

Sin embargo la dureza es baja y uniforme en toda la sección de la bola.

BOLA DE ACERO FORJADO CHINA DE 2 3/8" ϕ

Fabricante: CHINA

CARACTERÍSTICAS GENERALES

Las bolas presentan forma esférica con buen acabado superficial de forja y libre de defectos superficiales.

**TABLA N° 84
PESO Y DIMENSIONES**

<u>CODIG</u> <u>Q</u>	<u>ϕ Nominal</u> <u>(pulg.)</u>	<u>PESO</u> <u>(gr.)</u>	<u>DIMENSIONES (pulg.)</u>		
			<u>X</u>	<u>Y</u>	<u>Z</u>
1	2 1/2"	891.6	2 3/8"	2 3/8"	2 13/32"
2	2 1/2"	904.2	2 3/8"	2 3/8"	2 3/8"

**TABLA N° 85
ANALISIS QUÍMICO (%)**

<u>QD</u>	<u>C</u>	<u>Mn</u>	<u>Si</u>	<u>P</u>	<u>S</u>	<u>Ni</u>	<u>Cr</u>	<u>Mo</u>	<u>Cu</u>	<u>Al</u>	<u>Sn</u>	<u>V</u>	<u>B</u>	<u>Di</u>
1	.49	225	.90	.027	.020	.03	.10	.001	.09	.049	.017	.006	.0015	4.09
2	.43	223	.88	.027	.020	.03	.10	.002	.09	.049	.017	.005	.0010	3.77

**TABLA N° 86
DUREZA DE MASA**

<u>CODIGO</u>	<u>SUP</u>	<u>1/8"</u>	<u>1/4"</u>	<u>1/2"</u>	<u>5/8"</u>	<u>CTR.</u>	<u>MASA</u>
1	56.8	56.8	57.7	57.8	58.2	56.1	57.33
2	55.7	53.0	52.8	52.6	52.1	51.9	53.52

ANALISIS METALOGRAFICO

Las dos bolas presentan estructura de Martensita revenida uniforme de superficie a centro de la bola.

OBSERVACIONES

Las bolas presentan un nivel de dureza propios de porcentajes relativamente bajos en carbono.

En su composición química, los porcentajes de manganeso son demasiado elevados para este tipo de aplicación, y como resultado se obtiene una templabilidad más elevada lo que hace que sus durezas sean aproximadamente uniformes de superficie a centro.

BOLA DE ACERO FORJADO CHINA DE 3" ϕ

CARACTERÍSTICAS GENERALES

Las bolas de 2 3/8" de diámetro presentan forma completamente esférica con buen acabado superficial de forja y libre de defectos superficiales.
La bola de 2 3/4" presenta cierta deformidad con respecto a la forma esférica.

**TABLA N° 87
PESO Y DIMENSIONES**

<u>COD.</u>	<u>ϕ Nominal (pulg.)</u>	<u>PESO (gr.)</u>	<u>DIMENSIONES (pulg.)</u>		
			<u>X</u>	<u>Y</u>	<u>Z</u>
1	2 3/8"	928.4	2 13/32	3 13/32	2 25/64
2	2 3/8"	950.4	2 27/64	3 27/64	2 27/64
3	2 3/4"	1481.6	2 53/64	2 53/64	2 13/16

**TABLA N° 88
ANÁLISIS QUÍMICO (%)**

<u>cod</u>	<u>C</u>	<u>Mn</u>	<u>Si</u>	<u>P</u>	<u>S</u>	<u>Ni</u>	<u>Cr</u>	<u>Mo</u>	<u>Cu</u>	<u>Al</u>	<u>Sn</u>	<u>V</u>	<u>B</u>	<u>Di</u>
1	.56	2.04	.71	.023	.024	.06	.18	.005	.17	.015	.047	.005	.0014	4.33
2	.55	2.41	1.01	.026	.016	.05	.08	.003	.28	.019	.047	.009	.0013	4.74
3	.58	2.39	1.11	.025	.021	.08	.08	.011	.23	.029	.050	.004	.0013	5.23

**TABLA N° 89
DUREZA DE MASA**

<u>CODIGO</u>	<u>SUP</u>	<u>1/8"</u>	<u>1/4"</u>	<u>1/2"</u>	<u>5/8"</u>	<u>3/4"</u>	<u>CTR.</u>	<u>MASA</u>
1	55.8	56.7	57.0	57.2	56.2		55.2	56.53
2	55.7	53.0	52.8	52.6	52.1		51.9	53.52
3	56.0	56.6	56.8	56.9		56.8	56.8	56.60

ANALISIS METALOGRAFICO

Las tres bolas presentan estructura de Martensita revenida uniforme de superficie a centro de la bola.

OBSERVACIONES

Las bolas presentan un nivel de dureza propios de % relativamente bajo en carbono.

En su composición química, las bolas poseen contenidos de carbono inferiores a los habituales; en cambio los porcentajes de manganeso son demasiado elevados para este tipo de aplicación.

BOLA DE ACERO FORJADO: AUSTRALIANA DE 2" ϕ

Usuario: Bola proporcionada por FREEPORT (INDONESIA)

abricante: COMSTEEL (AUSTRALIA)

ARACTERÍSTICAS GENERALES

Bola de 2" de diámetro forjada de forma esférica con defecto superficial de exfoliación que abarca casi una circunferencia de la bola.

**TABLA N° 90
PESO Y DIMENSIONES**

<u>ϕ Nominal</u> (pulg.)	<u>PESO</u> (gr.)	<u>DIMENSIONES</u> (pulg.)		
		<u>X</u>	<u>Y</u>	<u>Z</u>
2"	581.0	2 1/16"	2 1/16"	2 1/16"

**TABLA N° 91
ANALISIS QUÍMICO (%)**

<u>C</u>	<u>Mn</u>	<u>Si</u>	<u>P</u>	<u>S</u>	<u>Ni</u>	<u>Cr</u>	<u>Mo</u>	<u>Cu</u>	<u>Al</u>	<u>Sn</u>	<u>V</u>	<u>B</u>	<u>Di</u>
.76	.72	.20	.034	.038	.15	.25	.010	.38	.009	.026	.006	.009	1.99

**TABLA N° 92
DUREZA DE MASA**

<u>ϕ</u>	<u>SUP</u>	<u>1/8"</u>	<u>1/4"</u>	<u>3/8"</u>	<u>1/2"</u>	<u>CTR.</u>	<u>MASA</u>
2"	62.4	62.1	61.8	61.4	60.8	61.0	61.89

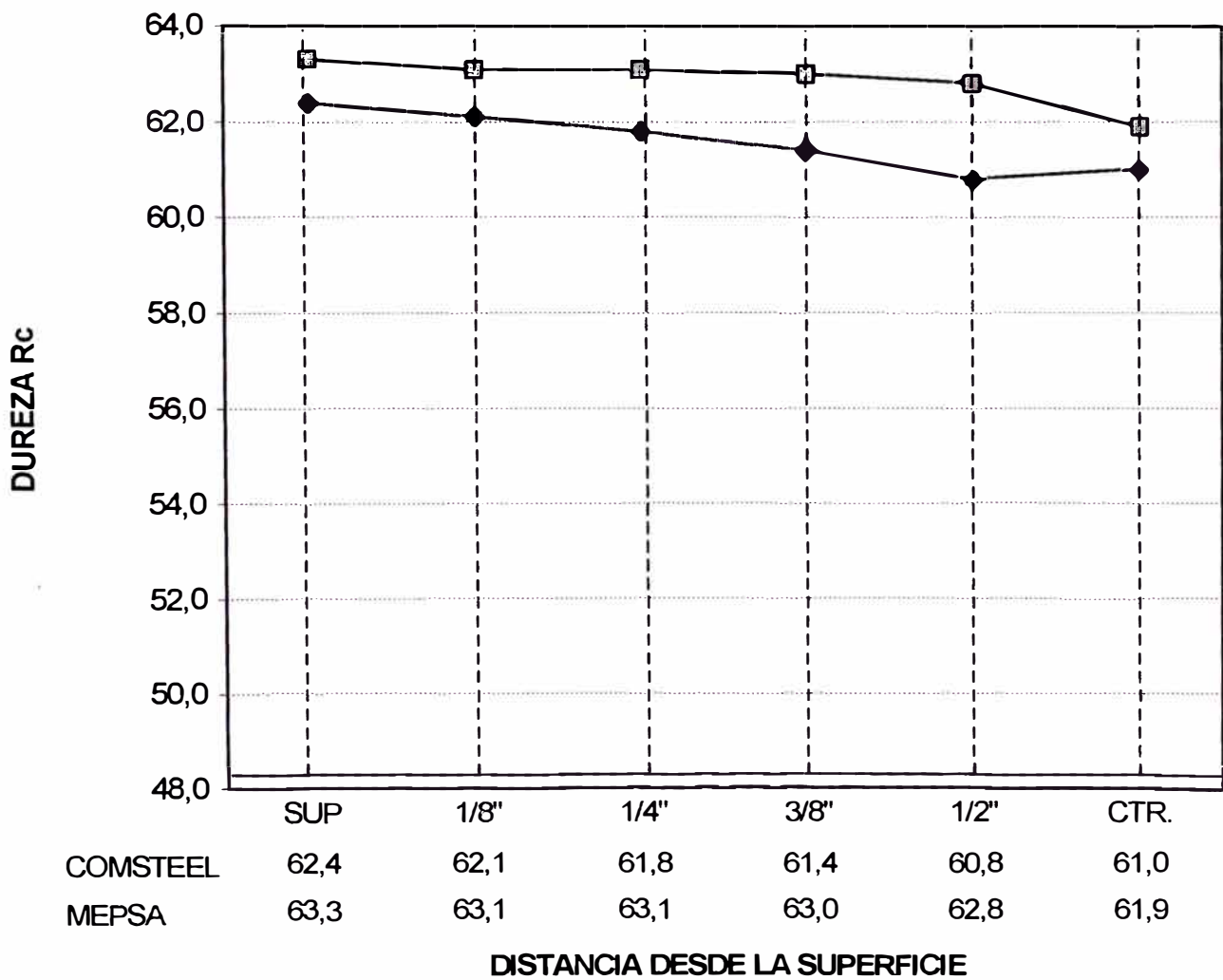
ANALISIS METALOGRAFICO

<u>SUPERFICIE</u>	<u>CENTRO</u>	<u>50% M</u>
MARTENSITA	MARTENSITA (100%)	>> 1"

OBSERVACIONES

La Bola presenta características similares a Bolas Forjadas del fabricante BORDER STEEL (USA).

GRÁFICO N° 15
COMSTEEL VS. MEPSA 2" ϕ



—◆— COMSTEEL —□— MEPSA

62.95 Rc 61.89 Rc

BOLA DE ACERO FORJADA: ALEMANA

MUESTRA ANALIZADA: 1 Bola Forjada de 2"

Usuario: MINAS ARCATA

Fabricación: ALEMANA

Metal: SAE 1080

CARACTERÍSTICAS GENERALES

La Bola forjada presenta forma esférica y está libre de defectos superficiales de forja (exfoliaciones, grietas, etc.)

TABLA N° 93
PESO Y DIMENSIONES
(DIAMETRO NOMINAL: 2")

<u>CODIGO</u>	<u>PESO</u> (gr.)	<u>DIMENSIONES (pulg.)</u>			<u>ACHATAMIENTO</u> (pulg.)	
		<u>X</u>	<u>Y</u>	<u>Z</u>		
1	453.2	1.891	1.922	1.906	---	---

TABLA N° 94
ANALISIS QUÍMICO (%)

<u>COD</u>	<u>C</u>	<u>Mn</u>	<u>Si</u>	<u>P</u>	<u>S</u>	<u>Ni</u>	<u>Cr</u>	<u>Mo</u>	<u>Cu</u>	<u>Al</u>	<u>Sn</u>	<u>V</u>	<u>B</u>	<u>Di</u>
1	.82	.47	.16	.015	.006	.01	.01	.000	.00	.004	.006	.001	.000	1.02

TABLA N° 95
DUREZA DE MASA

<u>CODIGO</u>	<u>SUP</u>	<u>1/8"</u>	<u>1/4"</u>	<u>3/8"</u>	<u>1/2"</u>	<u>CTR.</u>	<u>MASA</u>
1	51.6	61.9	60.9	51.2	43.8	42.0	54.78

ANALISIS METALOGRAFICO

<u>SUPERFICIE</u>	<u>CENTRO</u>	<u>50% M</u>
MARTENSITA	PERLITA(80%), MARTENSITA(20%)	3/8"

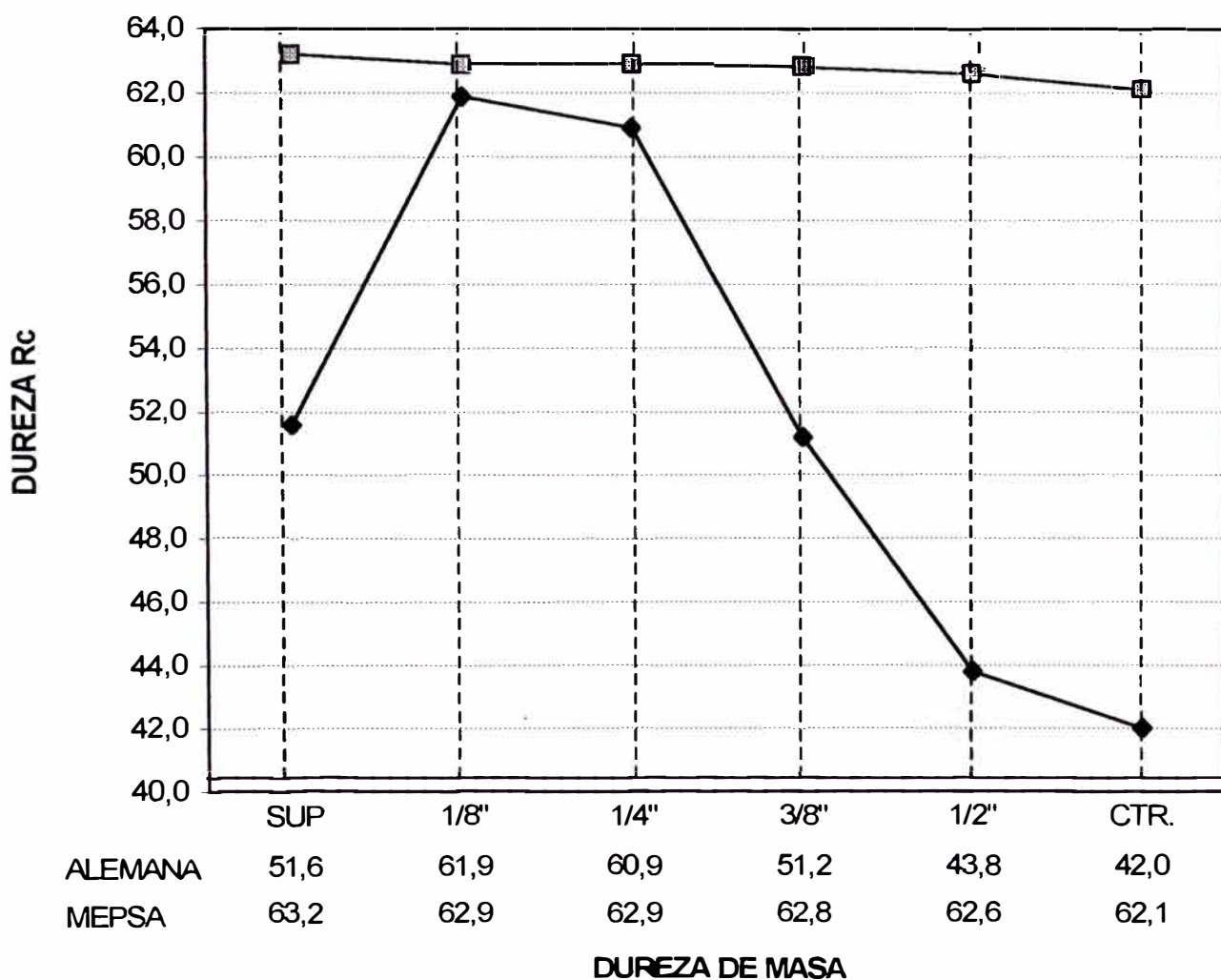
OBSERVACIONES

La composición química de la Bola alemana corresponde a un acero básico de alto carbono tipo SAE 1080, sin elementos de aleación y con elementos residuales bastante bajos, por lo cual se obtiene un DI químico de solamente 1.02.

Como consecuencia del punto anterior, la dureza de la bola decae rápidamente y a 3/8" se ubica el punto de transición de estructura Martensítica a Perlítica (50% de transformación) con una dureza de aproximadamente 50 Rockwell C.

La dureza superficial es baja por encontrarse descarburización superficial como consecuencia de las altas temperaturas involucradas en el proceso de Forja.

GRÁFICO Nº 16
PERFIL DE DUREZA BOLA 2" ϕ
FORJADA SAE 1080 ALEMANA



—◆— ALEMANA —■— MEPSA

54.78 62.95

2.4 CARACTERÍSTICAS METALÚRGICAS DE LAS BOLAS DE FIERRO FUNDIDO BLANCO ALEADO Y SIN ALEAR

Se usan para minería y de mayor importancia para la industria del cemento (Molienda de Clínger) conocidos como Bolas KROMOX.

BOLA EN FIERRO FUNDIDO SIN ALEAR

MUESTRA ANALIZADA: Bola fundida de 3"

Usuario: Minera UYUSCASSA (Ayacucho)

CARACTERÍSTICAS GENERALES

La bola tiene forma esférica y ha sido fabricada por proceso de fundición. Se observan defectos de porosidad.

TABLA N° 96
ANÁLISIS QUÍMICO (%)

<u>C</u>	<u>Mn</u>	<u>Si</u>	<u>P</u>	<u>S</u>	<u>Ni</u>	<u>Cr</u>	<u>Mo</u>	<u>Cu</u>	<u>Sn</u>
3.71	0.35	0.29	0.046	0.159	0.164	0.84	0.019	0.24	0.008

TABLA N° 97
DUREZA DE MASA

<u>SUP.</u>	<u>1/8"</u>	<u>1/4"</u>	<u>1/2"</u>	<u>3/4"</u>	<u>CTR.</u>	<u>MASA</u>
51.2	49.4	49.7	49.7	49.9	50.1	50.02

ANÁLISIS METALOGRAFICO

Microestructura uniforme de superficie a centro y consiste de una matriz de Ledeburita (fase eutéctica compuesta de Cementita y Perlita) y Perlita proeutectica en 25 %.

La perlita es resoluble a 500 X en aproximadamente 80%.

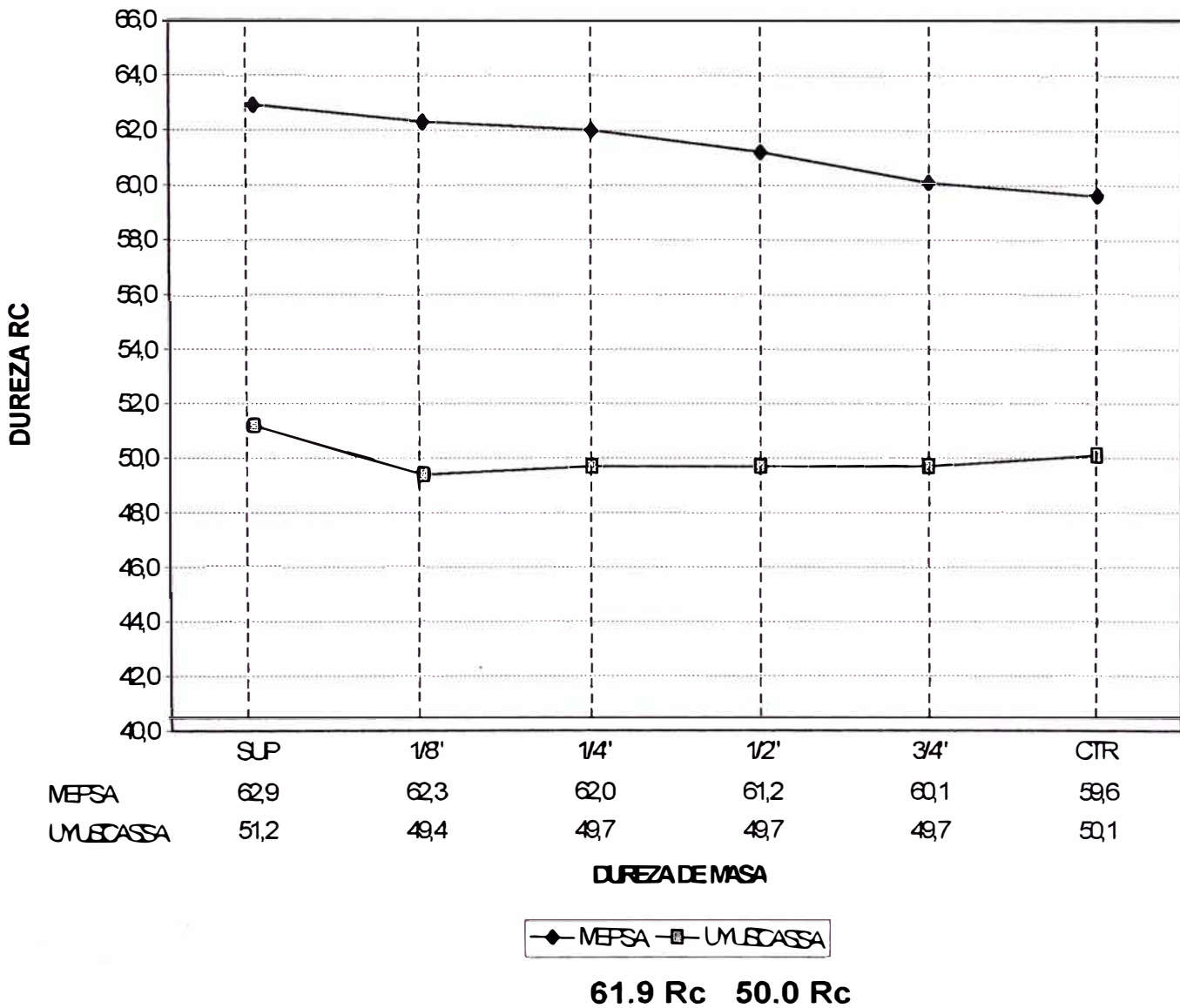
Además, se observan inclusiones de sulfuro de manganeso.

OBSERVACIONES

El metal de la bola corresponde a una fundición blanca hipoeutéctica sin tratamiento térmico.

En comparación con la bola de acero fundido MEPSA, la dureza es baja y uniforme en toda la sección de la bola; por lo tanto su rendimiento debe ser también menor.

GRÁFICO N° 17
PERFIL DE DUREZA 3"
BOLA UYUSCASSA VS MEPSA



BOLA KROMOX PARA LA INDUSTRIA DEL CEMENTO

Usuario: CEMENTO CALDAS (COLOMBIA)

BOLA KROMOX DE 1.5" DE DIÁMETRO

TABLA N° 98
ANÁLISIS QUÍMICO

<u>C</u>	<u>Mn</u>	<u>Si</u>	<u>P</u>	<u>S</u>	<u>Ni</u>	<u>Cr</u>	<u>Mo</u>	<u>Cu</u>	<u>Sn</u>
2.90	1.14	0.61	.03	.02	.07	17.0	.01	.02	.07

DUREZA RC

SUPERFICIE = 60 RC

CENTRO = 60 RC

MICROESTRUCTURA

MATRIZ: Martensítica con carburo secundarios esferoidales precipitados en la Matriz y 3% de Austenita Retenida (Medido con el Austenitescopio), con soporte de una RED de carburos primarios de cromo y fierro en disposición interdendrítica.

**BOLA KROMOX PARA LA INDUSTRIA
DEL CEMENTO
(Fierro Fundido Blanco Aleado)**

Usuario: CEMENTO LIMA

CARACTERÍSTICAS GENERALES: Bola 2" de diámetro nominal

**TABLA N° 99
PESO Y DIMENSIONES**

<u>PESO (GRS)</u>	<u>DIMENSIONES (pulg)</u>		
	<u>X</u>	<u>Y</u>	<u>Z</u>
540	2030	2028	2033

**TABLA N° 100
ANÁLISIS QUÍMICO (%)**

<u>C</u>	<u>Mn</u>	<u>Si</u>	<u>P</u>	<u>S</u>	<u>Ni</u>	<u>Cr</u>	<u>Mo</u>	<u>Cu</u>	<u>Al</u>	<u>Sn</u>
3.26	0.99	0.19	.01	.057	.187	17.00	.08	.046	.11	0.011

**TABLA N° 111
DUREZA DE MASA**

<u>SUP.</u>	<u>1/8"</u>	<u>1/4"</u>	<u>3/8"</u>	<u>1/2"</u>	<u>CTR.</u>	<u>MASA</u>
62.0	61.4	61.8	62.0	61.5	61.0	61.80

MICROESTRUCTURA

Red de carburos interdendriticos primario de los tipos intergranular y eutectico sobre una matriz de Martensita revenida.

BOLA KROMOX PARA LA INDUSTRIA MINERA (Fierro Fundido Blanco Aleado)

Fabricante: BRASIL

CARACTERÍSTICAS GENERALES: Bola 2" de diámetro bola fundida esférica con 2 alimentadores de 3/4" ubicadas sobre línea de partición.

**TABLA N° 102
PESO Y DIMENSIONES**

<u>C</u>	<u>PESO (grs)</u>	<u>DIMENSIONES (Pulg)</u>			<u>ACHATAM. (pulg)</u>
		<u>X</u>	<u>Y</u>	<u>Z</u>	
1	549.4	2.125	1.937	2.03	---
2	552.0	2.130	2.018	2.015	---

**TABLA N° 103
ANÁLISIS QUÍMICO (%)**

<u>C</u>	<u>Mn</u>	<u>Si</u>	<u>P</u>	<u>S</u>	<u>Ni</u>	<u>Cr</u>	<u>Mo</u>	<u>Cu</u>	<u>Al</u>	<u>Sn</u>
2.98	1.56	.65	.068	.011	.34	15.53	.35	.30	-	.013
3.07	.90	.19	.054	.010	.30	20.86	.08	.08	-	01.3

**TABLA N° 104
DUREZA DE MASA**

<u>SUP.</u>	<u>1/8"</u>	<u>1/4"</u>	<u>3/8"</u>	<u>1/2"</u>	<u>CTR.</u>	<u>MASA</u>
63.2	63.	63.3	63	62.5	62.3	63.06
62.5	61.3	61.5	62.5	61.5	61	61.90

MICROESTRUCTURA

Red de carburos interdendriticos primario de los tipos intergranular y eutectico sobre una matriz de Martensita revenida, con presencia de carburos secundarios esferoidales dispersos uniformemente.

2.5 RESULTADOS DE EVALUACION DE LAS BOLAS ESTUDIADAS

En molienda en el beneficio de minerales y molienda en la industria del Cemento se observan diferentes elementos de molienda.

Desde aleaciones en fierros grises, fierros blancos aleados, sin alear, fierro nodular, aceros forjados aleados, sin alear, aceros forjados aleados, sin alear. Diferentes métodos de diseño de colada en arena verde, en arena estufada, en resina, en semicoquilla, coquilla, forjada y laminada.

Diferentes hornos de fusión: cubilote, arco eléctrico, eléctrico de inducción, rotativo. Con tratamientos térmicos, sin tratamientos térmicos.

La diferencia fundamental del sector de fabricación de bolas de aceros forjados Vs. fundición son: forjados menor nivel de inclusiones, aluminio, fósforo y azufre, defectos internos, casi nulos, tamaño de grano fino (7, 8, 9, ASTM). Fundido: Defectos internos altos (mayor a 10%), tamaño de grano mayor (4,5 ASTM), mayor fracturación a medida que aumenta el diámetro, tenor alto de azufre, fósforo, aluminio.

El tamaño de grano de estructuras martensíticas en fundiciones nacionales no se determina en forma rutinaria por su tratamiento especial de ataque según el método:

MARTENSITIC ETCH METHOD:

Preparar la muestra hasta papel esmeril N° 2/0, luego se hace un revenido a 600°F (315.6°C) por 30 minutos, luego enfriar y continuar el pulido con papel 3/0 hasta el pulido final. Atacar la muestra pulida por inmersión en una solución disolviendo un gramo de ácido pícrico y 5 c.c. de HCL concentrado en 100 c.c. de alcohol etílico, el ataque varía con el tipo de acero pero generalmente es suficiente un tiempo de 5-20 segundos.

Ocasionalmente algunas muestras no dan buen contraste con el primer ataque, repulir sobre el paño final y efectuar otro ataque hasta conseguir el contraste de grano deseado.

Las bolas de acero fundido y forjado se usan en la industria del Cemento en condición de temple y revenido a temperatura superior de 400°C según los siguientes variables:

SE APLICA T.T. DE REVENIDO DESPUÉS DEL TEMPLE A BOLAS DE ACERO FUNDIDO

TABLA N° 105

<u>DIAMETRO (pulg)</u>	<u>1 1/2'</u>	<u>2'</u>	<u>2 1/2'</u>	<u>3'</u>	<u>3 1/2'</u>	<u>4'</u>
T° de Revenido(°C)	460	460	460	480	480	480
Permanencia bolas en el horno	4hrs.	4hrs.	4hrs.	4 hrs a 4.15'	4hrs a 4.15'	4hrs a 4.15'
Dureza Centro	52.0	46.0	43.0	43.0	38.0	39.0
Dureza Masa	53.0	48.0	47.0	45.0	43.0	43.0

SE APLICA T.T. DE REVENIDO DESPUÉS DEL TEMPLE A BOLAS DE ACERO FORJADO

TABLA N° 106

<u>ϕ</u>	<u>TEMPERATURA</u>	<u>TIEMPO A TEMPERATURA</u>
1 1/2"	420°C	3 Hrs.
2"	420°C	3 Hrs.
2 1/2"	420°C	3 Hrs.
3"	450°C	4 Hrs.
3 1/2"	480°C	4 Hrs.
4"	480°C	4 Hrs.

CAPÍTULO 3

PRUEBAS EXPERIMENTALES CON BOLAS DE FIERRO

FUNDIDO BLANCO ALEADO

PRINCIPALES NORMAS INTERNACIONALES :

Be - Bélgica	: ESTÁNDAR NBN
Br - Brasil	: ESTÁNDAR Br-200/400/800
Ca - Canadá	: ESTÁNDAR CESA-150/180/290
Al - Alemania	: ESTÁNDAR DIN/TGL
Fr - Francia	: ESTÁNDAR AFNOR (Fr-010/935)
Gb - Gran Bretaña	: ESTÁNDAR BS (GB-010/960) y SCRAT
It - Italia	: ESTÁNDAR UNI (It-050/430)
Ja - Japón	: ESTÁNDAR JIS (Ja-240/Ja600)
Oe - Austria	: ESTÁNDAR ONRM (Oe-300/350)
So - Rusia	: ESTÁNDAR GOST
Sp - España	: ESTÁNDAR UNE (Sp-005/300)

US - USA:

ASTM (American Society for testing and Materiales)

ACI (Alloy Casting Institute)

API (American Petroleum Institute)

AISI (American Iron and Steel Institute)

ANSI (American National Standards Institute)

SAE (Society for Automotive Engineers)

ASME (American Society of Mechanical Engineers)

AAR (Association of American Rail Roads)

AMS (Aerospace Material Specification)

FED (Federal Standard)

MIL (Military Standard)

UNS (Unified Numbering System)

MSS (Manufacturers Standardization Society)

3.1 ESPECIFICACION ESTANDAR INTERNACIONAL PARA FIERROS FUNDIDOS BLANCOS RESISTENTES A LA ABRASION

NORMA ASTM (USA)

La aleación para bolas de molienda en la industria del cemento está dentro del grupo Piezas Aleadas (Alloy Castings), correspondiente a la especificación:

Piezas de hierro resistentes a la abrasión (abrasión - resistant Cast Iron) con designación:

A532		
Clase II	Tipo C	Designación 15% Cr - Mo H C

- **NORMA AFNOR** (Francesa) : Z270CD 15-1,1
- **NORMA DIN** (Alemana) : X270Cr Mo 15-1,1
- **NORMA BS** (Inglesa) : Bs 4844 (1995/97)3A

3.1.1 ALCANCE

- La especificación ASTM: A532 cubre a un grupo de aleaciones, resistentes a la abrasión, fierros blancos fundidos teniendo en su microestructura: carburos, Martensita y austenita, libre de perlita, libre de grafito.
- Las aleaciones de hierro blanco de baja aleación o simples consisten esencialmente de carburos y perlita.
- Los diferentes tipos de fierros blancos aleados son de alta resistencia al desgaste asociada a exigida tenacidad en molienda.

3.1.2 CLASIFICACION POR COMPOSICION QUIMICA

Los fierros blancos cubren 3 clases:

- Clase I : Fierros blancos Martensitico al: Níquel, cromo, conocidos como Ni - HARD.
 Clase II : Fierros blancos al: Cromo - Moly, conocidos como KROMOX
 Clase III : Fierro blanco al Alto Cromo.

TABLA N° 107
COMPOSICIÓN QUÍMICA

Clase	Tipo	Designación	C	Mn	Si	Ni	Cr	Mo	Cu	P	S
I	A	Ni-Cr-HC	30 a36	1.3max	0.8max	33a50	1.4a40	1.0max		0.30max	0.15max
I	B	Ni-Cr-LC	25a30	1.3max	0.8max	33a50	1.4a40	1.0max	...	0.30max	0.15max
I	C	Ni-Cr-GB	29a37	1.3max	0.8max	27a40	1.1a15	1.0max	...	0.30max	0.15max
I	D	Ni-Hi Cr	25a36	0.5a1.5	1.0a2.2	4.5a7.0	7.0a11.0	1.0max	...	0.30max	0.15max
II	A	12% Cr	24a28	0.5a1.5	1.0max	0.5max	11.0a14.0	0.5a1.0	1.2max	0.30max	0.06max
II	B	15% Cr-Mo-LC	24a28	0.5a1.5	1.0max	0.5max	14.0a18.0	1.0a3.0	1.2max	0.30max	0.06max
II	C	15% Cr-Mo-HC	28a36	0.5a1.5	1.0max	0.5max	14.0a18.0	2.3a3.5	1.2max	0.30max	0.06max
II	D	20% Cr-Mo-LC	20a26	0.5a1.5	1.0max	1.5max	18.0a23.0	1.5max	1.2max	0.30max	0.06max
II	E	20% Cr-Mo-HC	26a32	0.5a1.5	1.0max	1.5max	18.0a23.0	1.0a2.0	1.2max	0.30max	0.06max
III	A	25% Cr	23a30	0.5a1.5	1.0max	1.5max	23.0a28.0	1.5max	1.2max	0.30max	0.06max

Para bolas de cemento la norma es:

ASTM (USA) A-532 Clase II tipo C designación 15% Cr-Mo-Hc.

3.1.3 METODOS DE FABRICACIÓN

Estas aleaciones se pueden realizar por procesos de fusión ácida o básica.

Se pueden utilizar los siguientes tipos de hornos:

Horno cubilote

Horno eléctrico de arco (ácido o básico)

Hornos eléctricos de inducción.

Hornos rotativos.

Para la producción utilizamos hornos eléctricos ácidos o básicos de 6 Ton de capacidad.

3.1.4 TRATAMIENTOS TÉRMICOS

Bolas de diámetro pequeño usados en impacto moderado pueden usarse en condición As Cast (bruto de colada), si tienen matriz 100% perlítica.

La estructura As Cast es de carburo primario tipo $(Fe, Cr)_7 C_3$ en austenita y perlita con dureza de 42.6 HRC. Para óptima resistencia a la abrasión y buena tenacidad se aplican los tratamientos térmicos:

Temple: a 1000°C, mantener a esta temperatura mínimo 1/2 hora por pulgada de espesor y máximo 6 horas.

Templar en aceite o polímero a 15% hasta la temperatura de 500°C.
luego enfriar al ambiente.

Revenido: a 500°C por 6 horas luego enfriar al ambiente

Alivio de tensiones 250°C(opcional).

Durezas obtenidas después de los tratamientostérmicos: 60-67 HRC

Microestructura: Carbono primario y secundario tipo Cr_7C_3 en matriz de Martensita revenida y austenita retenida.

3.2 COMPOSICION QUIMICA **(A OBTENER EN PROCESO DE FUSIÓN)**

La Aleación para Bolas de Cemento

Si se desea alto grado de resistencia a la abrasión es necesario temprar en polímero al 15%, por obtener buenos resultados en pruebas de laboratorio.

Es aplicable para bolas 1 a 4" de diámetro obteniendo alta resistencia a la abrasión buena resistencia al quebrantamiento o despostillado en servicio.

COMPOSICIÓN QUÍMICA OBTENIDAS EN LAS INVESTIGACIONES

TABLA N° 108
HIERRO BLANCO KROMOX

<u>ELEMENTO</u>	<u>ASTM A-532 IIC</u>	<u>OBTENIDAS</u>	
C	2.8 - 3.6	3.16	3.16
Mn	0.5 - 1.5	1.99	2.14
Si	1.00 max.	1.19	0.64
P	0.10 max.	0.010	0.028
S	0.06 max.	0.057	0.01
Ni	0.50 max.	0.187	0.08
Mo	1.0 - 3.00	0.08	0.03
Cu	1.20 max.	0.46	0.014
Cr	14.0 – 18.0	17.37	14.67

TABLA N° 109
BALANCE PARA KROMOX BAJO CARBÓN DE Cu, Mn
(Ni residual)

MANGANESO	0.60	0.65	0.70	0.75	0.80	0.85	0.90
NIQUEL	COBRE						
0.15	1.00	0.94	0.87	0.81	0.75	0.68	0.62
0.20	0.91	0.85	0.78	0.72	0.66	0.59	0.53
0.25	0.82	0.75	0.69	0.63	0.57	0.50	0.44
0.30	0.73	0.66	0.60	0.54	0.47	0.41	0.35
0.35	0.63	0.57	0.51	0.45	0.38	0.32	0.26
0.40	0.54	0.48	0.42	0.35	0.29	0.23	0.17
0.45	0.45	0.39	0.33	0.26	0.20	0.14	0.07
0.50	0.36	0.30	0.23	0.02	0.11	0.05	-
0.55	0.27	0.21	0.14	0.08	0.02	-	-
0.60	0.18	0.12	0.05	-	-	-	-
0.65	0.09	0.02	-	-	-	-	-

Se ha tomado como base los elementos C, Si, Mo y Cr haciendo variar el Cu, Ni y Mn de acuerdo a la fórmula de regresión de análisis térmico, de manera que el tiempo de transformación, sea como mínimo 100 minutos. En la curva CCC de transformación Perlítica, en todos los casos, el níquel será residual.

TABLA N° 110
BALANCE PARA KROMOX ALTO CARBÓN DE COBRE, MANGANESO
(NIQUEL RESIDUAL)

MANGANESO	.60	.65	.70	.75	.80	.85	.90
NIQUEL	COBRE						
.15	1.35	1.29	1.23	1.17	1.11	1.05	.99
.20	1.26	1.20	1.18	1.08	1.02	.96	.90
.25	1.17	1.11	1.05	.99	.93	.87	.81
.30	1.08	1.02	.96	.90	.84	.78	.72
.35	.99	.93	.87	.81	.75	.69	.63
.40	.90	.84	.78	.72	.66	.60	.54
.45	.81	.75	.69	.63	.57	.51	.45
.50	.72	.66	.60	.54	.48	.42	.36
.60	.54	.48	.42	.36	.30	.24	.18
.65	.45	.39	.33	.27	.21	.15	.09

Y luego el balance Cu, Mn y Ni mantener residual para obtener el tiempo de transformación Perlítica (TITP) en la curva de enfriamiento continuo (CCC) sea 100 minutos como mínimo de acuerdo a la fórmula:

$$\frac{\text{ANTILOG}}{60} [(2.90 - 0.5\%C) + 0.58\%Mn + 0.84\%Ni + 0.05\%Cr + 0.38\%Mo + 0.46\%Cu]$$

$$\text{TITP} = \frac{\text{ANTILOG [X] MIN UO S}}{60}$$

El balance de Cu, Mn y Ni está de acuerdo al carbón bajo (2.0 - 2.5) y al carbón alto (2.6 a 3.5), según tablas N° 109 y 110.

TABLA N° 111
ALEACIONES TÍPICAS DE BOLAS KROMOX USADOS EN EL MERCADO
NACIONAL

	<u>C</u>	<u>Si</u>	<u>Mn</u>	<u>Cr</u>	<u>Mo</u>	<u>Cu</u>	<u>P y S</u>
A	2.40/2.60	0.40/60	0.60/0.80	13.5/14.5	0.40/0.45	0.40/0.45	0.06
B	2.80/3.00	0.40/60	0.60/0.90	15/19	0.60/0.80	0.80/1.0	0.06
C	2.73	.93	.20	14.43	-	.04	.026 y .01
D	2.08	.38	.82	16.50	.37	.10	.027 y .011
15-3LC	2.50/2.80	0.35/55	.50/0.80	14/16	2.5/2.8	0.7	.06 max
U.S.A.	2.60/2.90	.50/1.0	.50/0.80	15.2/16.8	1/1.20	0.8	0.05
Climax	3/3.5	.5/8	.5/8	11/14	.5/1.0	1 max	.10 max

Durezas de superficie a centro de la bola uniforme de 64.0-65.0 Rc

Microestructura de matriz martensítica con carburos secundarios precipitados.

Austenita retenida en todos los casos de 0%.

COMPOSICION QUIMICA OBTENIDAS EN LAS INVESTIGACIONES

Tesis	3.16	1.19	1.99	17.37	.08	.046	.01 y 0.57
Tesis	3.16	.61	2.14	14.67	.03	.05	.02

3.3 PRÁCTICA DE FUSIÓN DE ALEACION **PARA BOLAS EN FIERRO BLANCO** **ALEADO**

3.3.1 CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS DE LOS HORNOS DE FUSION

Toda planta de fundición cuenta con un contrato con el generador de energía en términos de: "Potencia contratada", que está en función de la capacidad de producción del horno (dado por el diámetro de la olla). En promedio de las fundiciones en Lima están en 2000 a 13000 Kw de potencia.

Las pruebas se llevaron a cabo en la compañía MEPSA, la cual tiene una potencia contratada de 13,000 Kw. La energía llega al patio de llaves de MEPSA:

(V) Alta tensión: 60,000 voltios

(I) Intensidad de corriente: 70 amperios

Se dispone de este circuito primario de potencia con un transformador de 4.2 MVA.

La potencia (P) = $\sqrt{3}$ (VxI) cos ϕ

Cos ϕ = factor de potencia del transformador.

SE USÓ UN HORNO DE 6 TONELADAS MARCA LECTRO MELT:

Cuyas características son:

TIPO	DIAMETRO DE LA OLLA	CAPACIDAD NOMINAL POR COLADA	VOLUMEN PIES CÚBICOS	POTENCIA DEL TRANSFORMADOR
CQT	8 pies	6-7(Ton)	129	3.5-4.5MVA

A la sub estación de hornos la corriente llega:

(V) Alta tensión: 10,000 voltios (verdadero 10,200 a 10300)

(I) Intensidad de corriente: 150 a 200 amperios

El transformador del horno entrega:

Al horno de 6 Ton:

(V) Baja tensión = 235 voltios

(I) Intensidad de corriente = 8,000-9,000 amperios.

TRABAJO DE CADA HORNO:

ARCO LARGO	(TAP # 1)	= 225 voltios
ARCO MEDIO	(TAP # 2)	= 195 voltios
ARCO CORTO	(TAP # 3)	= 165 voltios
ARCO MUY CORTO	(TAP # 4)	= 135 voltios.

TAP es el cambiador de voltaje del transformador y tienen 4 reguladores (transformer TAP CHANGER).

RELACIÓN DE EQUIPOS UTILIZADOS EN LA PLANTA PARA LA INVESTIGACIÓN:

- 2 Grúas eléctricas de 15 ton de capacidad (con magnetos eléctricos)
- 2 cucharas de 7 ton de capacidad para recepcionar la colada (uno con revestimiento de ladrillos ácidos y uno con revestimiento de fibra cerámica)
- 1 Tambler (desgranador)
- 1 Lavador de piezas de 1.5 ton de capacidad.
- 1 Grúa trinche de 15 ton de capacidad para el traslado de las cargas de bolas desde su preparación al horno y del horno a la zona de templado.
- 1 Horno de tratamiento térmico de 10 ton de capacidad y temperatura máxima de 1,300°C y con revestimiento de fibra cerámica
- 1 Horno de tratamiento térmico de revenido de 10 ton de capacidad y temperatura máxima de 650°C, con dos ventiladores para homogeneizar la temperatura en la cámara.

3.3.2 CARGA METÁLICA

La chatarra, ferro aleantes y desoxidantes deben ser cuidadosamente pesados y previamente a su selección, realizar un cuidadoso control de calidad.

CHATARRA PARA BOLAS KROMOX

Está conformada por:

Regresos de Kromox (conformado por risuellos, desfuegos, canales de distribución, piezas declaradas chatarra, etc.)

Chatarra de bolas Kromox (proveniente de las cementeras de: 3,2,1,1/2" de diámetro).

Chatarras de Kromox (conformado por: forros a impulsores, etc.)

Chatarra de acero inoxidable ferrítico (utensilios, cucharas, material sobrante para fabricar utensilios).

En todos los casos para el cálculo de carga es necesario realizar el análisis químico para ver el aporte de C, Cr, Ni y Mo básicamente.

TABLA N° 112

ANALISIS QUÍMICO DE CHATARRA DEL MERCADO PERUANO

Chatarra de	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	Sn
Chatarra de Bolas Kromox	2.97	.48	.56	.020	.030	.14	20.18	.03	.09	.009
"	3.00	.44	.66	.021	.029	.16	20.16	.04	.05	.010
"	2.85	.49	.52	.019	.028	.13	20.50	.03	.08	.008
"	3.26	.48	.51	.017	.026	.09	12.18	.03	.06	.004
Chatarra Kromox										
Plato columbia USA	3.17	.80	.72	.037	.023	.33	16.6	1.30	1.0	.030
Forro de Molino de Cem	1.20	.64	.31	.018	.010	.12	11.82	-	.07	-
Grizzly bar (CHILE)	2.74	.86	.61	.040	.034	.38	17.3	1.07	.64	.020
Impulsor Magoteaux	2.80	1.08	.32	.027	.04	.13	23.15	-	.04	.03
Caja de bomba	2.89	.77	.55	.04	.04	.28	16.85	.91	.87	.02
Levantador enfriador de cemento.	1.81	.45	1.26	.04	.01	.93	25.7	.65	.26	.01
Forro cabezal molino	2.97	1.51	.55	.032	.012	.49	24.5	.5	.10	.02
Placa de desgaste cem	2.75	.67	.43	.04	.028	.34	16.3	1.4	.77	.02
Chatarra de acero inoxidable ferrítico:										
Utensilios	.58	.42	.47	.02	.008	.36	12.4	.05	.08	-
Forro cabezal molino cemento .	.17	1.03	.54	.05	.006	.17	11.3	-	.21	-

TABLA N° 113

**BALANCE DE CARGA PARA HORNO ELÉCTRICO DE ARCO PARA BOLAS
KROMOX (6TN)**

<u>CARGA METALICA</u>	<u>CARGA VIRGEN</u> Kg.	<u>CARGA AL DISPONER DE CHATARRA DE ALTO CROMO</u>		
		(Kg.)		
REGRESO DE KROMOX	-	3000	2019	3983
CHAT. BOLAS KROMOX	-	-	-	1000
CHAT. DE KROMOX	-	-	2000	-
CHATARRA DE ACERO INOXIDABLE FERRÍTICO	-	-	1487	-
CHAT. DE ACERO	4208	2330	-	500
CHAT. DE COBRE	60	20	-	-
SUB TOTAL (Kg.)	4268	5350	5506	5483

FERRO ALEANTES

Fe Si	30	13	24	15
Fe Mn St	40	13	16	-
Fe Mn B.C.	-	-	-	-
Fe Cr St	1500	500	402	400
Fe Cr BC	-	12	-	-
Fe Mo	-	-	-	50
Oxido de Mo	70	50	40	-
Carbón	-	50	-	-
Electrodo molido	80	-	-	40
SUB TOTAL (Kg.)	1720	638	482	505

**DESOXIDANTES
(A LA CUCHARA)**

Ca si	6	6	6	6
Al	6	6	6	6

TOTAL KILOS	6000	6000	6000	600
--------------------	-------------	-------------	-------------	------------

CARGA DE FUSIÓN PARA BOLAS KROMOX EN HORNO DE 6TN.

Si no disponemos de chatarra de Kromox:

Chatarra de acero	=	4208 Kg.
Fe Cr St	=	1500 Kg.
Fe Mn St	=	40 Kg.
Fe Si	=	30 Kg.
Oxido Mo	=	70 Kg.
Cobre	=	60 Kg.
Aluminio	=	6 Kg.
Ca Si	=	6 Kg.
Electrodo Molido	=	80 Kg.
TOTAL	=	6000 Kg.

Si se dispone de chatarra de Kromox (forros Kromox, impulsores kromox, bolas kromox) en promedio bajo:

Chatarra de acero	-	2439 Kg.
Chatarra de Kromox o regresos	=	2752 Kg.
Fe Cr Bc	=	82 Kg.
Fe Cr Std	=	598 Kg.
Fe Mn BC	=	5 Kg.
Fe Mn Std	=	8 Kg.
Fe Si	=	14 Kg.
Oxido Mo	=	58 Kg.
Aluminio	=	6 Kg.
Ca Si	=	6 Kg.
TOTAL	-	6000 Kg.

TABLA N° 114
EFICIENCIA DE LOS FERRO ALEANTES SOLO DE ELEMENTOS
SIGNIFICATIVOS

	<u>C</u>	<u>Mn</u>	<u>Si</u>	<u>Cr</u>	<u>Mo</u>	<u>Cu</u>
Fe Mn St	7	60				
Fe Mn M/C	1.2	80				
Fe Cr St	7		60			
Fe Cr BC	0.025		65			
Fe Si			75			
Oxido de Mo					60	
Fe Mo					60	
Electrodo molido	50					
Carbón	30					
Cobre						90

Cálculo de aporte de C, Mn, Si, Cr, Mo, Cu de los ferro aleantes:

%C, Mn, Si, Cr, Mo, Cu =

$$\frac{\text{Kilos de ferro Aleantes} \times \text{eficiencia de C,Mn,Si,Cr,Mo,Cu}}{\text{Carga total}}$$

En la carga virgen el % C = $\frac{1500 \times 7\%C}{6000} = 1.75\% C$
 (aporte del Fe Cr)

En la carga virgen el % Cr = $\frac{1500 \times 60\% Cr}{6000} = 15\% Cr$
 (Aporte del Fe Cr)

CÁLCULO DEL PESO DE FERRO ALEANTES CON ANÁLISIS QUÍMICO DESPUÉS DE ESCORIADO (ANTES DEL SANGRADO)

Para el balance final de afino de ferro aleantes se realiza el calculo de aleación según la formula:

$\left[\begin{array}{c} \% \text{ del elemento} \\ \text{químico deseado del St} \\ \text{A532} \\ \text{de la Tabla N}^\circ \text{ 108} \\ \text{para bolas Kromox} \end{array} \right]$	-	$\left[\begin{array}{c} \% \text{ del mismo} \\ \text{elemento químico} \\ \text{obtenido después de} \\ \text{escoriado por el} \\ \text{laboratorio} \end{array} \right]$	$\times \text{ Peso total de carga} \\ \text{(Kg.) en horno}$
Eficiencia del ferro aleante			

Y luego el balance Cu, Mn y Ni mantener residual para obtener el tiempo de transformación perlítica (TITP) en la curva de enfriamiento continuo (CCC) sea 100 minutos como mínimo de acuerdo a la fórmula:

$$\frac{\text{ANTILOG}}{60} \quad [(2.90-0.5\%C) + 0.58\%Mn + 0.84\%Ni + 0.05\% Cr + 0.38\%Mo + 0.46\%Cu]$$

$$\text{TITP} = \frac{\text{ANTILOG}}{60} [X] \text{ MINUTOS}$$

El balance de Cu, Mn y Ni está de acuerdo al carbón bajo (2.0 - 2.5) y al carbón alto (2.6 a 3.5), según tablas N° 109 y 110.

3.3.3 PRÁCTICA TÍPICA DE FUSIÓN EN HORNOS DE ARCO ELÉCTRICO ACIDO O BASICO

COLADAS DE BOLAS KROMOX (6Ton)

HORNO ACIDO:

1. Parchar el horno con arena.
2. Cargar el horno.
3. Encendido en TAP 2 por 5 minutos luego TAP 1 y llevar a 145°C en TAP 2.
4. Después de la fusión se toma la temperatura.
5. Sacar muestra y matar el baño con cinco (05) Kg. de Fe - Si y cinco (05) Kg. de Fe - Mn.
6. Escoriar.
7. Esperar el resultado de laboratorio con el horno encendido en TAP 3.
8. Agregar aleantes.
9. Tomar temperatura y sangrar a la temperatura apropiada según la medida de bola Kromox y tipo de cuchara con refractario (1415 - 1471°C), cuchara con fibra cerámica (1386 - 1442°C).
10. Agregar seis (06) Kg. de aluminio y seis (06) Kg. de Ca Si gradualmente a la cuchara.

COLADAS DE BOLAS KROMOX (6Ton)

HORNO BÁSICO:

1. Parchar el horno con magnamix o dolomita u olivino o carbón.
2. Agregar diez (10) lampas de caliza o dos (02) bolsas de cal.
3. Agregar carbón.
4. Cargar el horno luego encendido en TAP2 por 5 minutos luego TAP1 y llevar a 1450°C en TAP2.
5. Después de la fusión tomar temperatura.

6. Sacar muestra y matar el baño con cinco (05) Kg. de Fe - Si y cinco (05) Kg. de Fe - Mn.
7. Escoriar.
8. Esperar el resultado de laboratorio con el horno encendido en TAP 3.
9. Agregar aleantes.
10. Tomar la temperatura y sangrar a la temperatura apropiada según la medida de bola Kromox y tipo de cuchara con refractario (1415 - 1471°C), cuchara con fibra cerámica (1386 - 1442°C).
11. Agregar seis (06) Kg. de aluminio y seis (06) Kg. de Ca Si gradualmente a la cuchara.

Al termino de las coladas de investigación se resume de un total 7 coladas, 3 coladas corresponden al proceso ácido designados como tesis parte A y 4 coladas designados como Tesis parte B :

COMPOSICION QUIMICA OBTENIDAS EN LAS INVESTIGACIONES

3 COLADAS EN EL HORNO ACIDO:

C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	Tesis
3.16	1.99	1.19	.01	.057	.187	17.37	.08	.046	A

4 COLADAS EN EL HORNO BASICO:

C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	Tesis
3.16	2.14	0.61	.028	.01	.08	14.67	.03	.05	B

3.3.4 TEMPERATURA DE SANGRADO

En el sistema C - Cr - Fe para 17% de Cromo se observa que el punto de fusión desciende a medida que se acerca al punto EUTECTICO.

- **Caso de cuchara con refractario**, se considera adecuado sangrar 185°C sobre el punto de fusión correspondiente al Nivel del % C de la Bola Kromox, recayendo la temperatura de sangrado en el rango:

2580°F - 2680°F

1415°C - 1471°C

Existe una pérdida de temperatura de: 80°F (45°C).

Esto es si la cuchara se mantuvo en calentamiento a temperatura superior o igual a los 1000°C.

- **Caso de cuchara con fibra cerámica**, se considera adecuado sangrar 156°C sobre el punto de fusión correspondiente al nivel del %C de la bola Kromox, recayendo la temperatura de sangrado:

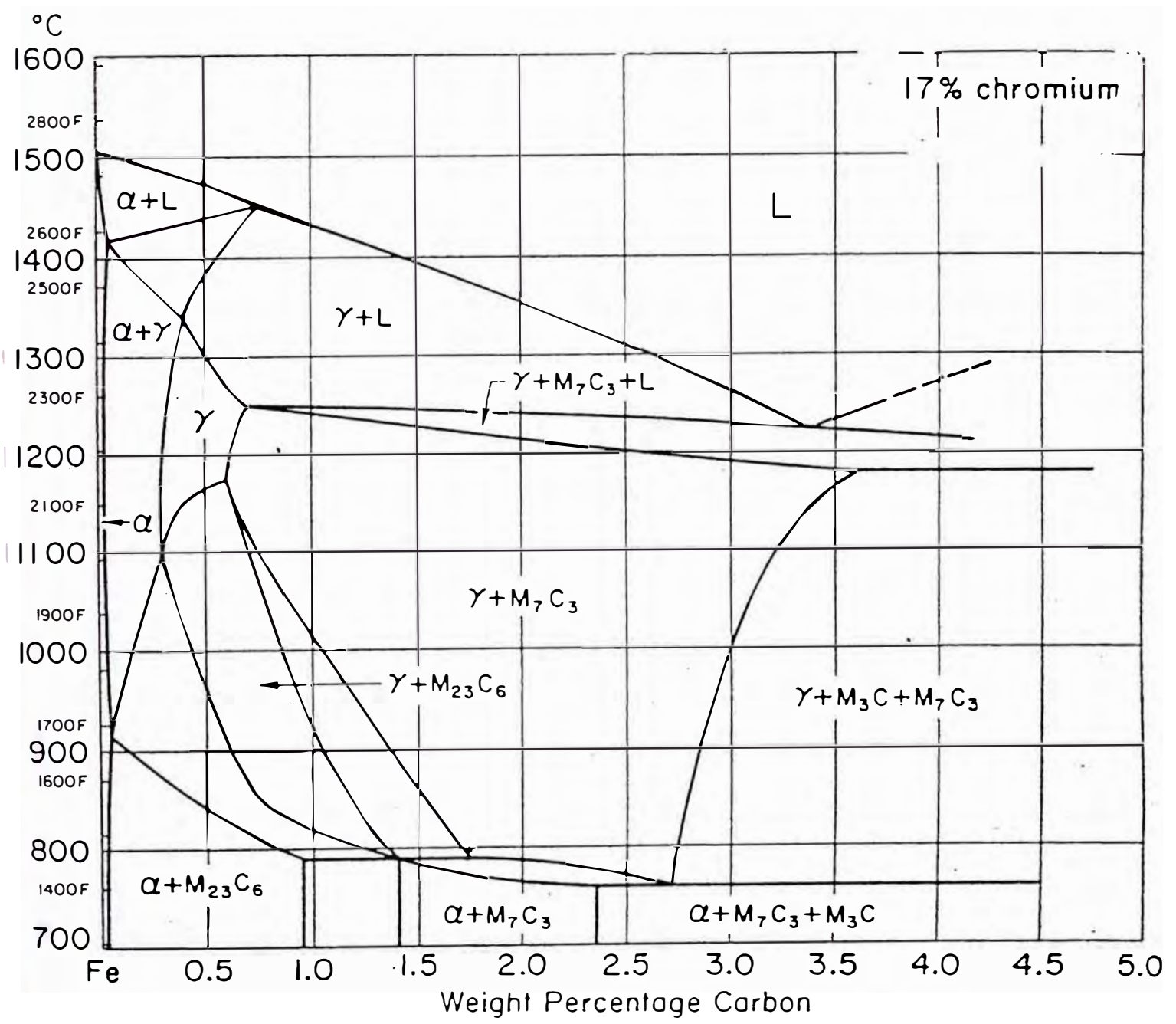
1386°C - 1442°C.

Existe una pérdida de temperatura de: 5°C

Esto es si la cuchara con fibra cerámica se mantiene en calentamiento a temperatura mayor o igual a 1000°C.

En las investigaciones se utilizaron para el vaciado 4 coladas en cuchara con refractario y 3 coladas en cuchara con fibra cerámica vaciado por el fondo.

DIAGRAMA Fe- Cr- C PARA BOLAS KROMOX



3.3.5 TEMPERATURA DE VACIADO

El material Kromox tiene Alta Fluidez, de allí la recomendación de vaciar a baja temperatura y variando de acuerdo al diámetro de bola a vaciar y la práctica indica:

Temperatura de inicio de vaciado:

TABLA N° 115

ϕ_s 3, 3 1/2 y 4"	ϕ_s 2, 2 1/2"	ϕ_s 1/2, 1"
2500°F (1371°C)	2550°F (1399°C)	2600°F (1427°C)

Estas temperaturas evitarán la formación de defectos como pliegues, gota fría, las cuales son motivo de rechazos.

El diagrama Fe - Cr - C (17% de Cr) ayuda a determinar la temperatura de sangrado y temperatura de vaciado.

Las coladas se vaciaron en almas con resina que fueron fabricadas utilizando la maquina de soplar almas, siguiendo el siguiente procedimiento:

1. La materia prima para la fabricación de almas es la arena sílice, la misma que cumple los siguientes requerimientos.

Demanda ácida	=	0.2 %
Arcillas	=	0.2 %
Finos	=	1 %
# AFS	=	55
PH	=	6.7
Humedad	=	0.08 %
Temperatura	=	21°
LOI	=	0.3 %

2. Resinas utilizadas:

Resina fenólica	parte I	(Isocure 354 Formaldehida)
Resina fenólica	parte II	(Isocure 657 Polímero Isocianato)
Catalizador DMEA		(Isocure 702) (DIMETILETILAMINA)

3. Proporciones de la mesa:

Parte I + Parte II	:	1.2 % del peso de la arena
Parte I	:	60 %
Parte II	:	40 %
Catalizador DMEA	:	1.3 %
Presión de trabajo	:	80 psi
Tiempo de gaseado	:	2 sg
Tiempo de mezclado	:	25 sg

El consumo de catalizador por almas depende del diámetro de la bola:

Se usó modelo en aluminio.

<u>φ de bola</u>	<u>Catalizador (cc)</u>	<u>Peso del alma (Kg)</u>
1.5"	11cc	4,300
2"	12 cc	4,400
3"	14 cc	6,670
3.5"	16 cc	7,110

Para el cálculo se obtuvo los siguientes resultados:

Peso de arena	:	36 Kg.		
Diámetro de bola	:	2"		
Proporción	:	60/40		
Porcentaje	:	1.2		
36 Kg x 1.2 %	=	0.432 Kg	=	432 grms
Parte I	=	0.432 (60%)	=	259 grms
Parte II	=	0.432 (40%)	=	173 gms

Contracción para modelo: 1/4 de pulgada por Pie.

3.3.6 TEMPERATURA DE DESMOLDEO

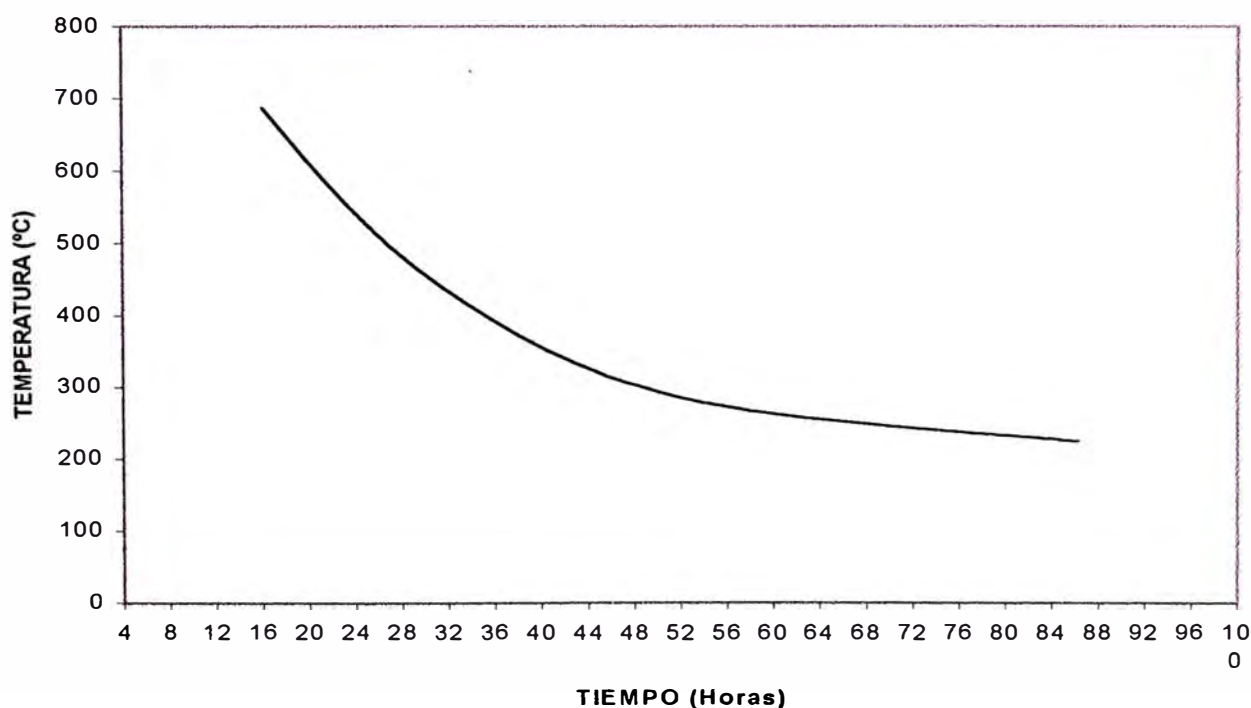
Luego del vaciado mantener las bolas kromox dentro del molde un mínimo de 52 horas sin moverlas. Es necesario que las bolas kromox se enfríen lentamente para obtener una microestructura de matriz, Perlítica en más del 90%, con un mínimo de austenita retenida. Desmoldear a 200°C. O a temperatura ambiente.

Eliminar los desfuegos, canales de alimentación y distribución, por golpe (comba a mano).

CURVA DE ENFRIAMIENTO DESDE LA TEMPERATURA DE VACIADO A TEMPERATURA DE DESMOLDEO

Las bolas kromox desde la temperatura de vaciado hasta 200°C, deben permanecer sin mover los moldes. Los moldes de bolas kromox de 2" y 3" de diámetro y pesos de 552 y 480 kg. Presentan la siguiente tendencia de enfriamiento.

GRÁFICO N° 18



3.4 EQUIPOS DE CONTROL DE CALIDAD

EQUIPOS

- Se dispuso de una Mufla marca Lucifer con 2 cámaras: una para temperatura alta hasta 1300°C y la otra para temperatura baja con ventilador para uniformizar temperatura hasta 650°C, con control de calentamiento.
- Se dispuso de equipos de control de temperatura, digital y lápiz de temperatura para control de temperatura medio de temple y temperatura de bola, al sacar de las cámaras las bolas durante el temple y revenido.
- Durómetro Wilson (HRC).
- Durómetro de máquina universal con bolilla de carburo.
- Espectrógrafo de emisión.
- Equipo de gammagrafía (Co 60 de 30 curies).
- Microscopio óptico de luz transmitida hasta 2000x (con aceite de inmersión)
- Microscopio electrónico de barrido (MEB), el cual detallamos por su importancia
- Equipo de medición de viscosidad utilizados en resinas, polímero, aceite industrial, pinturas de moldeo.
- Equipo de corte con disco de corte para obtener las probetas de control de durezas, metalografía y control de porcentaje austenita retenida.
- Equipo de medición del porcentaje austenita retenida (Austeniscopio), que trabaja por inducción magnética.
- Equipo de ensayo de impacto Charpy.
- Equipo de ensayo de desgaste por abrasión.
- Equipo de impacto por fatiga.
- Equipo de ensayos por partículas magnéticas.
- Equipo de ultra sonido.
- Equipo de evaluación de densidades radiográficas .

CONTROL MICROESTRUCTURAL DE MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO Y ENERGÍA DISPERSIVA DE RAYOS X

TÉCNICAS DE ANALISIS POR MICROSCOPIA

En las Técnicas de Microscopía, podemos citar básicamente la Microscopía Óptica en luz reflejada y transmitida y la Microscopía Electrónica de Barrido (MEB).

EL MICROSCOPIO ELECTRÓNICO DE BARRIDO (MEB)

CARACTERÍSTICAS:

El microscopio electrónico de Barrido de última generación, está equipado con un sistema de Energía Dispersiva de Rayos X (EDS) marca EDAX, destinado a efectuar microanálisis químicos aplicables en diferentes campos (mineralogía, geología, metalurgia, metal - mecánica, petroquímica, etc.)

Para identificar los elementos químicos en una muestra, esta técnica se basa en la emisión de los rayos X característicos de cada elemento. Para lograr esto, un haz de electrones acelerados, del orden de algunos nanómetros (nm) de diámetro, es dirigido hacia una zona particular sobre la superficie de la fase en la cual se desea determinar la composición química. Un volumen muy pequeño de materia, de sólo algunos micrómetros cúbicos (μm^3) emite Rayos X, cuyo análisis espectral nos permitirá determinar los elementos químicos que están presentes en la fase excitada, así como sus concentraciones.

Con el sistema EDAX se puede detectar todos los elementos de número atómico superior a 5 (del Boro al Uranio). El límite de detección está en función del elemento analizado. Este varía generalmente alrededor de algunos centenas de partes por millón (ppm), con un error aproximado de 1%.

EL MEB Y SUS DETECTORES DE ÚLTIMA GENERACIÓN

Los detectores con que está equipado el MEB son:

- a. Detector de electrones retrodispersados
- b. Detector de electrones secundarios.
- c. Detector de rayos X de energía Dispersiva: permite hacer análisis químico locales (puntuales), dándonos la composición semicuantitativa de los elementos, nos permite obtener rápidamente el nombre de Fase, tipo de inclusión, tipo de carburo, etc.

Para un análisis cuantitativo es necesario efectuar una excelente preparación de la superficie a analizar.

Procedimiento de análisis:

Existen en general, tres métodos de análisis:

Análisis Puntual

Análisis Lineal

Análisis de Superficie.

Análisis Puntual

En este caso, el haz de electrones es inmóvil, permaneciendo en un punto de la superficie de la muestra de la cual deseamos determinar la composición química. El resultado es dado bajo la forma de un espectro el cual contiene todos los elementos químicos que existen en el punto analizado, así como la concentración de cada uno de estos elementos.

Análisis Lineal

En este método, el haz de electrones se desplaza automáticamente punto por punto a lo largo de una línea rectilínea, lográndose obtener perfiles de concentraciones del elemento dado a lo largo de esta misma línea. Este tipo de análisis nos permite estudiar los diferentes grados de concentración de un elemento.

Análisis de Superficie

En este tipo de análisis el haz de electrones barre toda una cierta superficie de la muestra. La señal es recogida bajo forma electrones secundarios, electrones retrodispersados e imágenes obtenidas con los Rayos X.

- a. Los electrones secundarios provienen de un nivel poco profundo respecto a la superficie de la muestra. Estos electrones no indican la composición química, sin embargo, permiten visualizar la morfología y topografía.
- b. Los electrones retrodispersados son aquellos que provienen de un nivel de mayor profundidad respecto a la superficie barrida. Estos electrones son poco sensibles a la morfología de la muestra, pero sin embargo son muy sensibles para establecer diferencias entre las fases químicas pesadas y livianas presentes, debido a que las primeras aparecen más claras mientras más constituidas de elementos químicos pesados estén.
- c. Las imágenes obtenidas con los rayos X son otro tipo de imágenes, también logradas por el Microscopio Electrónico de Barrido, junto al sistema EDS para la Dispersión de la Energía de Rayos X. Estas son muy ricas en información sobre la naturaleza de las fases examinadas debido a que son verdaderas fotografías de los elementos químicos, tal como éstos se encuentran distribuidos en las diferentes fases de la superficie analizada.

Análisis de imágenes

El MEB está equipado también de un sofisticado programa de análisis de imágenes que permite, entre otras, determinar las siguientes informaciones:

La distribución de las principales fases en la superficie analizada.

La distribución de las impurezas, microinclusiones, fases finas, etc.

El tamaño y el porcentaje de las principales fases.

El tamaño y el porcentaje de las impurezas, microinclusiones, etc.

El MEB y sus Detectores de Ultima Generación

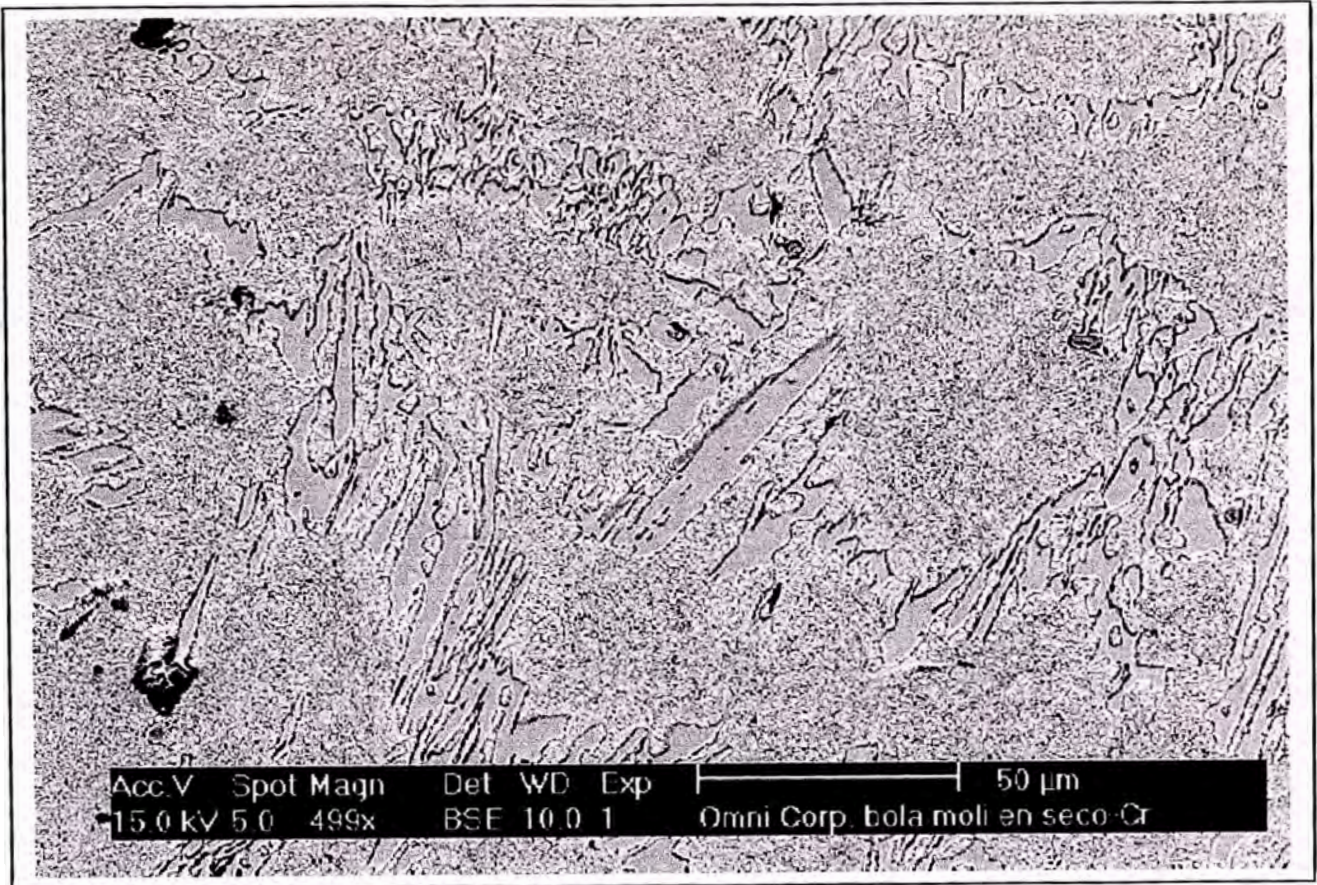


Moderno Microscopio electrónico de barrido (MEB) indicado para la investigación del Au en el campo de la geología (partículas de Au de hasta 20 nm han sido detectadas, pudiendo llegar hasta los 5nm).

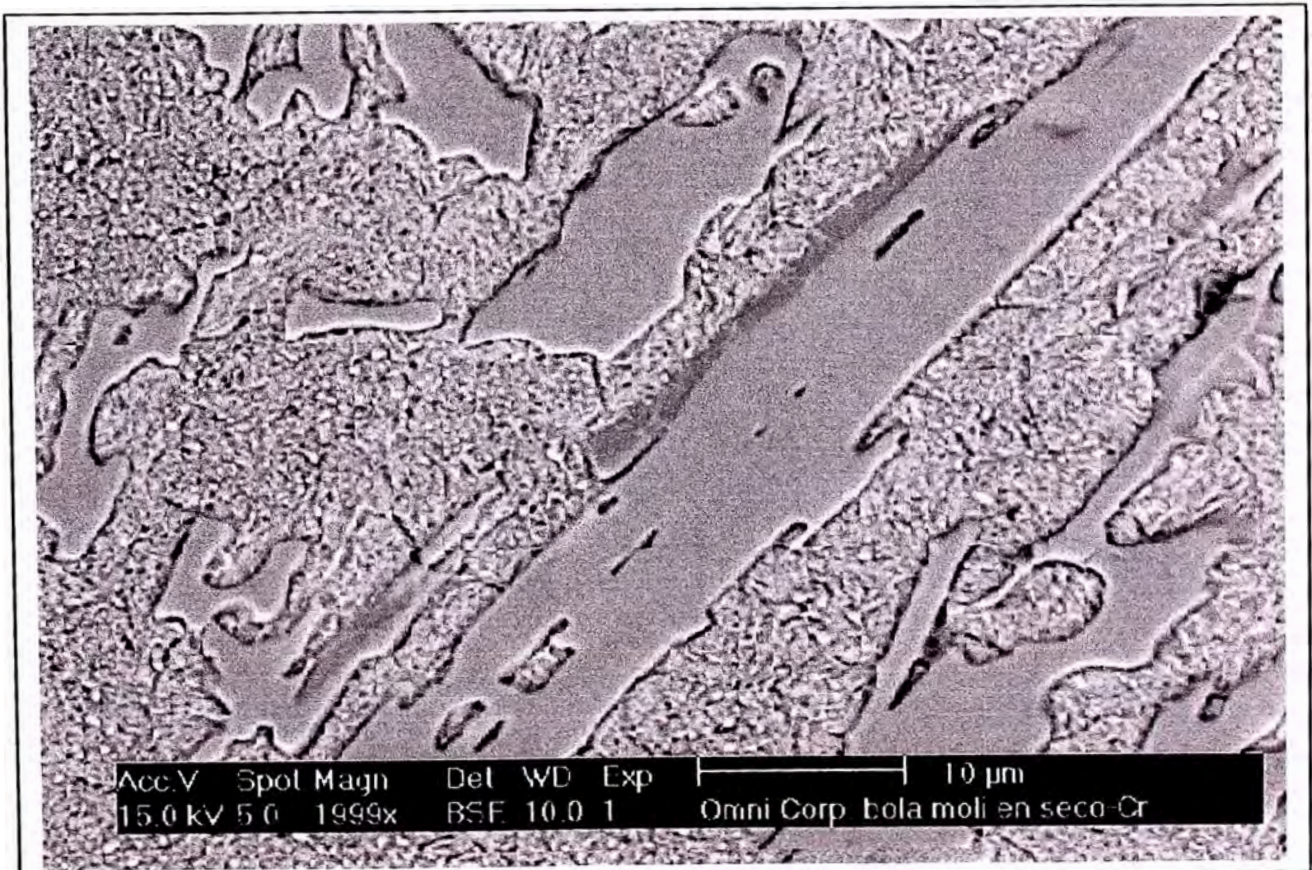
Los detectores con que está equipado el MEB están señalados en la fotografía:

- a) **Detector de electrones retrodispersados: ideal para distinguir los minerales de oro del resto de minerales (ganga).**
- b) **Detector de electrones secundarios: permite ver la morfología con que se esta presentando el oro y los minerales que lo acompañan. Por ejemplo: si el oro se encuentra en fracturas, en los bordes de los granos, en cavidades etc.**
- c) **Detector de rayos X de energía Dispersiva : permite hacer análisis químico locales (puntuales), dándonos la composición semicuantitativa de los elementos, nos permite obtener rápidamente el nombre del mineral analizado.**

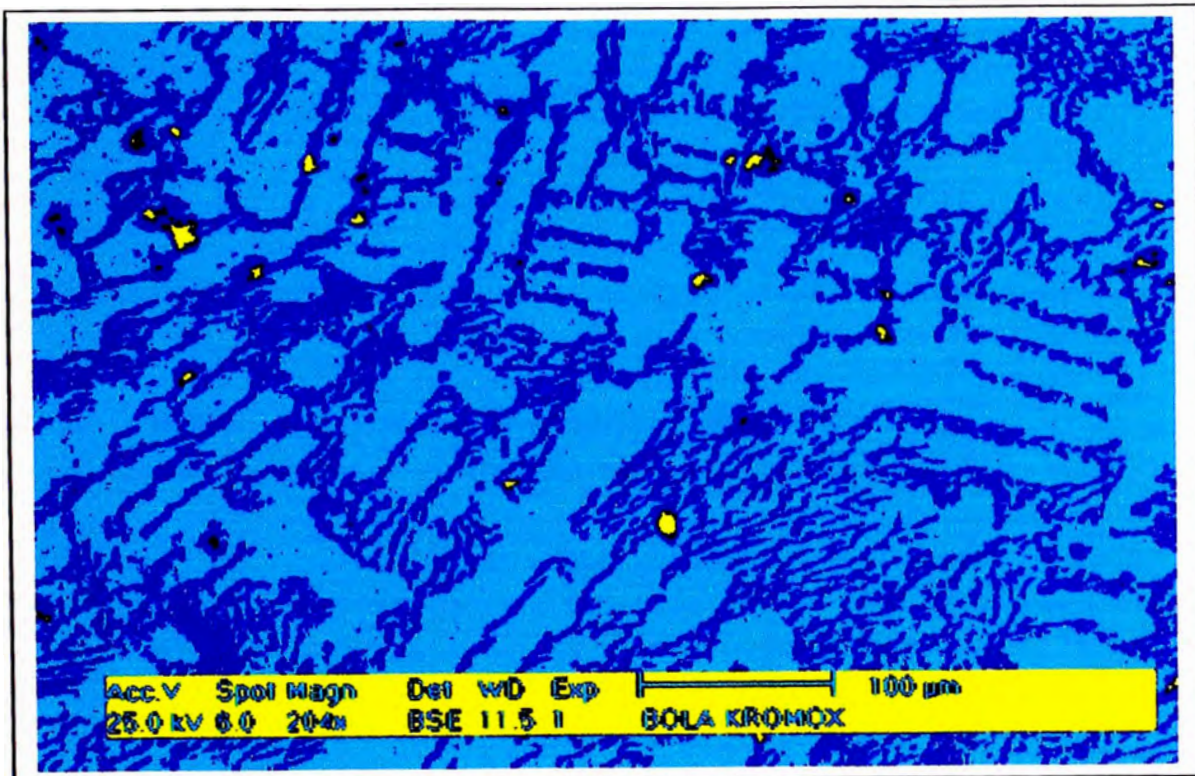
USO DEL MEB



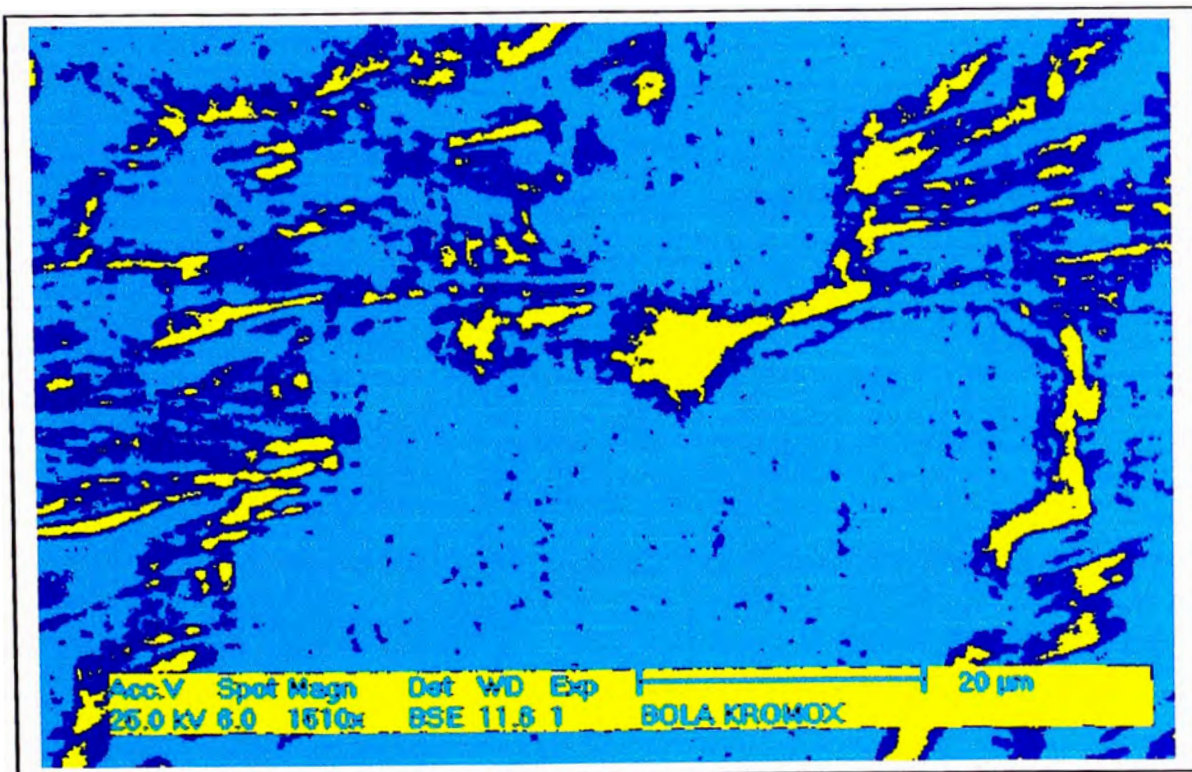
TOPOGRAFIA DE LOS CARBUROS



CARBURO PRIMARIO EUTÉCTICO Y MATRIZ



ANÁLISIS DE IMAGEN: PINTADO DE FASES



ANÁLISIS DE IMAGEN: PINTADO DE INCLUSIONES

3.5 PRUEBAS DE TRATAMIENTOS TERMICOS EN LABORATORIO CON PROBETAS Y BOLAS KROMOX

3.5.1 VARIABLES ANALIZADAS

Resistencia al desgaste por abrasión.

Tratamientos térmicos convencional aplicado similar a piezas kromox.

Tratamientos térmicos con pre austenizado.

Efecto de masa en bolas Kromox según el diámetro.

Composición química.

Temperatura de austenizado (1050°C, 1000°, 990°, 980°, 950°, 900°C)

Velocidad de calentamiento:

112°C/hora

100°C/hora

80°C/hora

50°C/hora

Medios de temple:

Dentro de la Mufla

Ventilación regular del medio ambiente.

Ventilación moderada con ventilador de mesa.

Ventilación rápida con aire comprimido.

Ambiente.

Recipiente con arena caliente a 150°C

Recipiente con arena fría temperatura ambiente.

Entre bolas calientes a 100°C.

Ventilación rápida con aire comprimido por 5 minutos.

Polímero al 15%.

Revenido:

450°C

500°C

EJECUCION DE LAS INVESTIGACIONES

Los métodos de las investigaciones metalúrgicas se basan en ensayos de laboratorios y pruebas experimentales de planta cuyos resultados presentados en el proyecto son promedios estadísticos de cada nivel de ensayo.

Para el caso de pruebas con probetas los resultados son de 10 probetas como mínimo descartado aquellas probetas con fallas o defectos de fundición.

Para el caso de pruebas con bolas los resultados son de 10 bolas como mínimo descartando aquellas bolas con fallas o defectos de fundición. La preparación de probetas y corte de bolas es muy dificultoso requiriendo un mínimo de 3 horas por cada bola cortada.

Los ensayos preliminares consistieron en evaluar el índice del desgaste de aleaciones de fierro fundido blanco aleado consiguiendo que tipo de carburo es el que determina la mayor resistencia al desgaste por abrasión correspondiendo al $(Cr, Fe)_7C_3$ contenido en aleaciones que corresponden a la norma ASTM A 532. Estos resultados nos sirvieron de guía para elegir la composición química final para la fabricación de bolas de fierro fundido blanco aleado (Kromox). Los mejores resultados se obtuvieron con % C = 3.6 a 3.2 y % Cr =15.0. Los ensayos se refieren al desgaste por abrasión tipo Molienda (Grinding) correspondiendo al desgaste tipo B.

TIPOS DE DESGASTE POR ABRASION

- A - Desgaste por abrasión tipo escarpado (Gou Ging)
- B - Desgaste por abrasión tipo Molienda (Grinding)
- C - Desgaste por abrasión tipo Erosión (Scratching)

Las aleaciones fundidas en KROMOX son de mayor resistencia a la abrasión a todos los tipos de aceros, como aceros al manganeso austeníticos, aceros cromo Moly.

**ELECCIÓN DEL KROMOX POR SU
INDICE RELATIVO DE DESGASTE
(PRUEBAS DE LABORATORIO)**

TABLA N° 116

<u>TIPO DE KROMOX</u>	<u>%C</u>	<u>CONDICIÓN</u>	<u>BHN DE INGRESO</u>	<u>BHN DE SALIDA</u>	<u>INDICE DE DESGASTE</u>
1 15CR-3MO(HC)	3.6	1650°F, O.Q, 400°F (899°C) (204°C)	870	870	0.048
2 15CR-2MO-1Cu	3.2	1750°F, A.C, 400°F (954°C) (204°C)	726	726	0.072
3 12 CR-0.7MO	3.25	1750°F, O.Q, 400°F (954°C) (204°C)	712	712	0.073
4 15CR-3MO(LC)	2.5	1850°F, A.C. 450°F (1010°C) (223°C)	716	716	0.076
5 20CR-2MO-1Cu	2.89	1750°F, A.C, 400°F (954°C) (204°C)	706	706	0.081
6 15CR-2MO-1Cu	3.26	As Cast	477	551	0.096
7 20CR-2MO-1Cu	2.87	As Cast	503	547	0.109
8 27CR	2.68	As Cast	481	557	0.135
9 27CR-0.5MO	2.58	1850°F, A.C, 450°F (1010°C) (223°C)	665	700	0.140
10 27 CR	2.58	1850°F, A.C, 450°F (1010°C) (223°C)	662	719	0.144

O.Q. = Oil Quench (temple en aceite)

HC = Alto Carbón

A.C. = Air Cooled (temple en aire forzado)

LC = Bajo Carbón

Indice de desgaste = $\frac{\text{peso perdido del material en prueba}}{\text{peso del estándar T-IA (ASTM)}}$

Peso del estándar T-IA = 150 gr.

SELECCIÓN DEL MATERIAL PARA BOLAS DE CEMENTO BASADOS EN EL DESGASTE POR ABRASIÓN EN MOLIENDA

TABLA N° 117

TIPO DE ALEACIÓN	DUREZ A RC	INDICE RELATIVO DE DESGASTE	ORDEN DE TENACIDAD
N° 1 Fierro Blanco KROMOX (15-3)	66	88-90	6
N° 2 Fierro Blanco KROMOX alto Cr	64	96-100	7
N° 3 Acero Martensítico Cr-Mo (Tipo 2) C .90/1.1% Cr 5.5/7% Mo 0.9/1.05	55	100	5
N° 4 Fierro Blanco Ni-Hard(3-2-1) (Chill Cast) Ni-Cr-Mo 3.3/3.6 C 2.75/3.25 Ni	59	107-108	8
N° 5 Fierro Blanco Ni-Hard (Duil Cast) sin Mo	55	108-119	9
N° 6 Acero Martensítico Cr-Mo (Tipo 1) C .60/0.80% Cr 1.25-7% Mo .40/.60	58	110-112	4
N° 7 Acero Hadfield (6-1)	48	111-118	2
N° 8 Acero Perlítico Cr-Mo(0.8%) C .40-1.30% Cr 1.0-3% Mo 0.2/0.50%	39	126-128	3
N° 9 Acero Hadfield (C=1, Cr 13, Mo 1)	49	138-141	1

Se uso bola de 5" de diámetro en molino de 9 x 9 pies.

Tabla tomada del autor D.J. DUAN "DESING OF GRINDING BALLS".

3.5.2 TEMPERATURA DE AUSTENIZADO

Pruebas con bolas de 3" ϕ

TABLA N° 118

C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	Tesis
3.16	1.99	1.19	.01	.057	.187	17.37	.08	.046	A

La temperatura de austenizado influye sobre la dureza y cantidad de carburos secundarios, con los siguientes resultados.

TABLA N° 119

T.AUST.	DUREZAS BHN			
	1/4	1/2	1"	
1000°C	713	713	713	Durezas más altas (61.0Rc) y mayor % de carburos precipitados en la matriz
1000°C	713	713	713	
1000°C	713	713	713	
1000°C	713	713	713	
990°C	696			(60.2Rc)
980°C	692			(60.0Rc)
950°C	652	652	652	(58.1Rc)
950°C	652	652	652	(58.1Rc)
950°C	600	600	600	(55.4Rc)
950°C	600	600	600	(55.4Rc)
900°C	600	600	600	Durezas más bajas (55.4Rc) y menor % a nulo de carburo secundario precipitado en la matriz
900°C	600	600	600	
900°C	600	600	600	
900°C	600	600	600	

El objetivo es analizar el efecto de la Solubilidad de carburos primarios intergranulares y eutécticos, los cuales están en relación directa a la cantidad de precipitación de carburos secundarios dentro de la matriz y por lo tanto la matriz se enriquecerá de C, Cr y Mo.

Al producir la desestabilización de la austenita se consigue también la solubilización parcial de los carburos, especialmente en las zonas más débiles, ocasionando el rompimiento de la estructura de la cadena interdendrítica de carburos intergranulares.

3.5.3 VELOCIDAD DE CALENTAMIENTO

Se aplicó el tratamiento térmico de temple convencional a grupos de 10 bolas de 3"φ por cada ciclo de calentamiento:

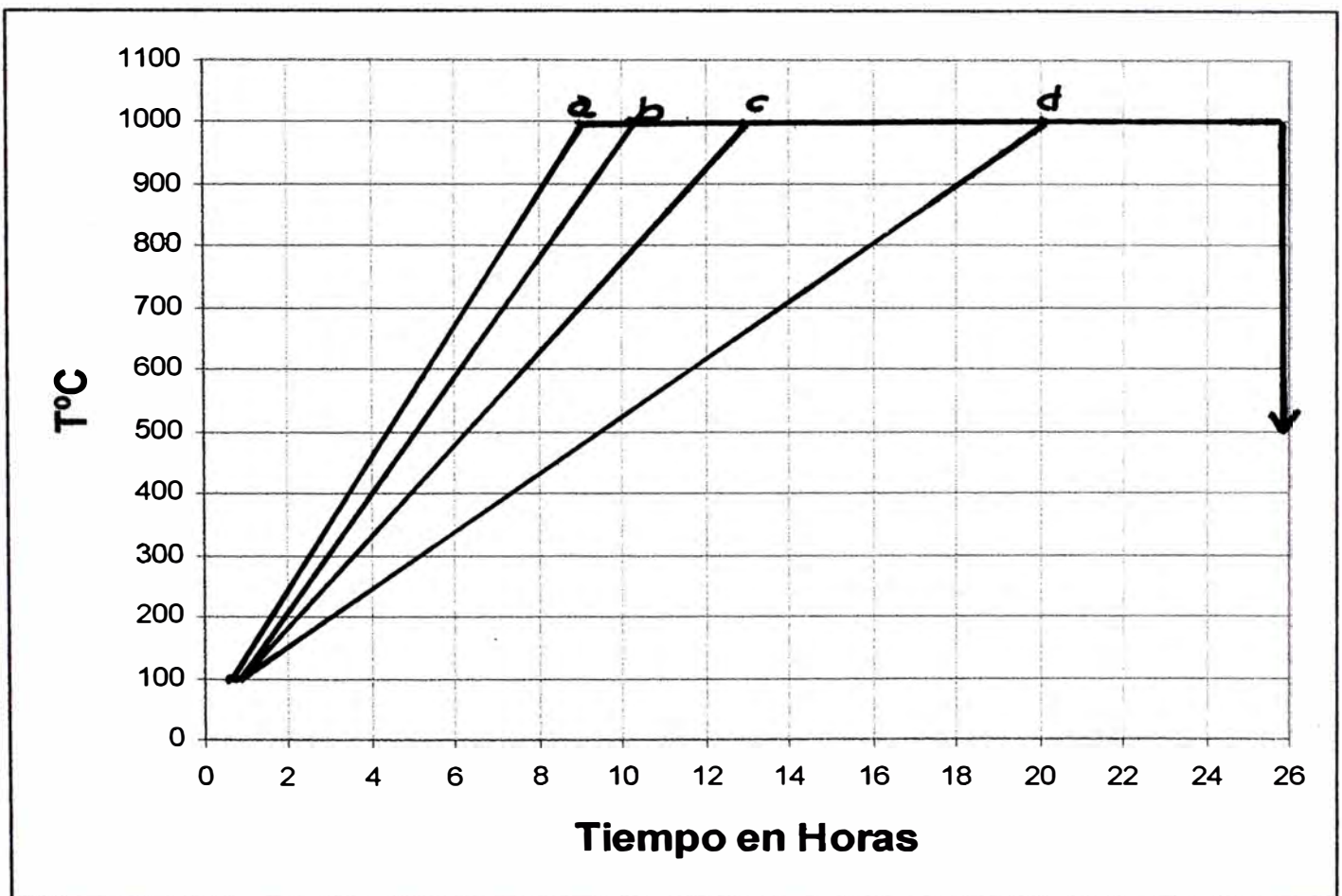
a = 112°C/hora

c = 80°C/hora

b = 100°C/hora

d = 50°C/hora

GRÁFICO N° 19



Temperatura inicial de la mufla en todas las pruebas fue de 25°C.

MICROESTRUCTURAS AS CAST (BRUTO DE COLADA)

El objetivo es obtener la matriz de 100% perlítica, conseguido por tiempo de inicio de transformación perlítica mayor a 100 minutos.

La matriz de la bola Kromox en As Cast (bruto de colada) obtenidas como promedio son: 85 % austenítica y 15 % perlítica, (foto a color a 750 aumentos color rojo y amarillo corresponde a la austenita y el color negro corresponde a la perlita, y 100% perlítica a foto a 150 X , la perlita se muestra de color negro).

La presencia de Austenita retenida en As Cast (bruto de colada) se ve favorecida por, enfriamiento rápido después de la solidificación por desmoldeo prematuro (a las 2 horas después del vaciado) y por diámetro de bolas, a menor diámetro mayor porcentaje de austenita retenida. Presencia de elementos estabilizantes de la austenita como el: Ni, Mn y Cu.

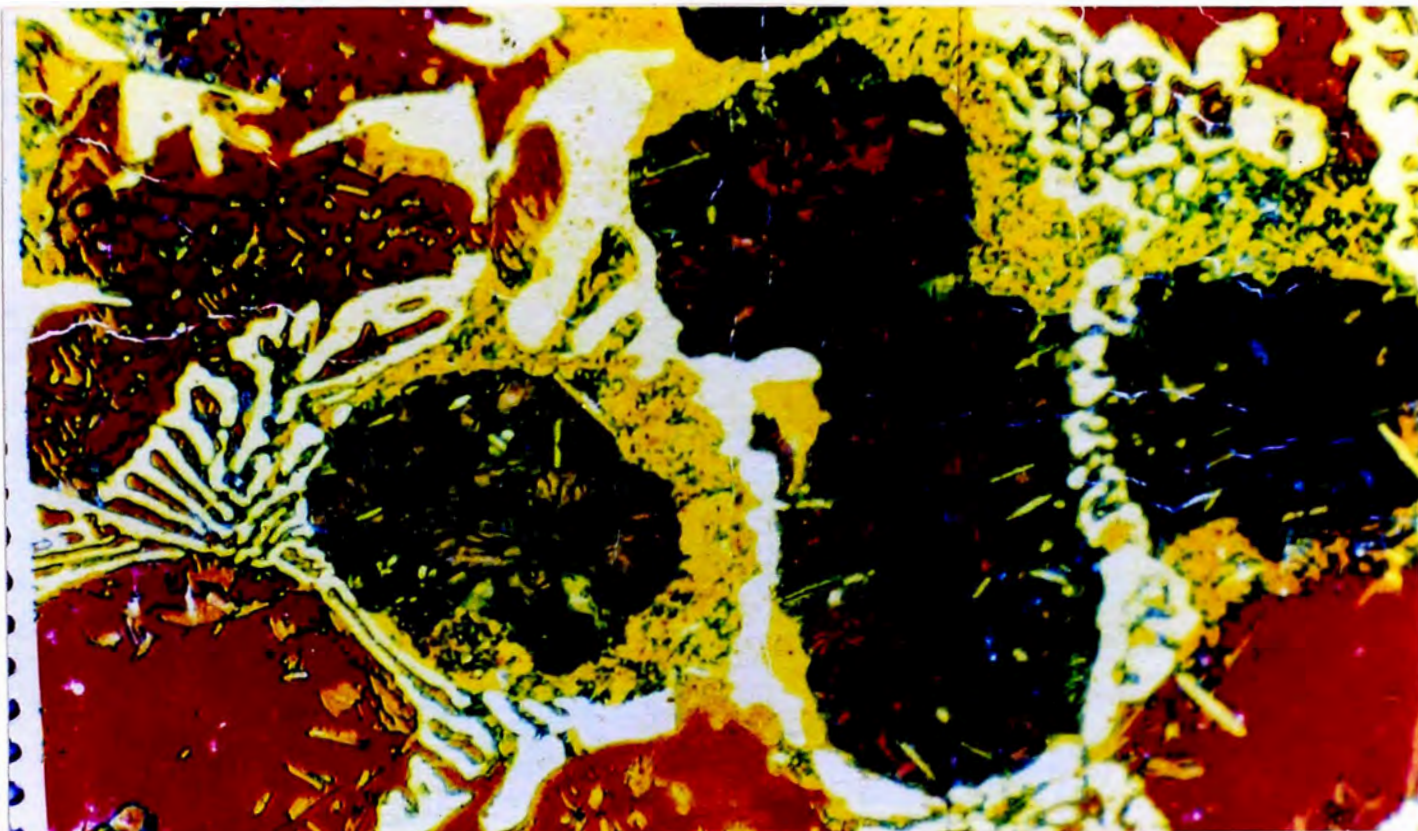
Resultados de dureza y porcentaje de austenita retenidas en bolas de 3" ϕ y 1" ϕ :

- A = Desmoldeo prematuro, a las 2 horas después del vaciado.
 B = Enfriamiento lento en el molde hasta 52 horas.

TABLA N° 120

ϕ Bola	3"		1"	
	A	B	A	B
DESMOLDEO	A	B	A	B
Rc	43.6	50	42.6	54
Bhn	424	515	410	577
% A.R	85 %	0	85 %	0
% Perlítica	15	100	15	100
% Carburos secundarios	0	0	0	0

FOTOS TÍPICAS DE BOLAS KROMOX As Cast



**FOTO A 750 X. MATRIZ AUSTENÍTICA
(ROJO Y AMARILLO) + PERLITA (NEGRO)**

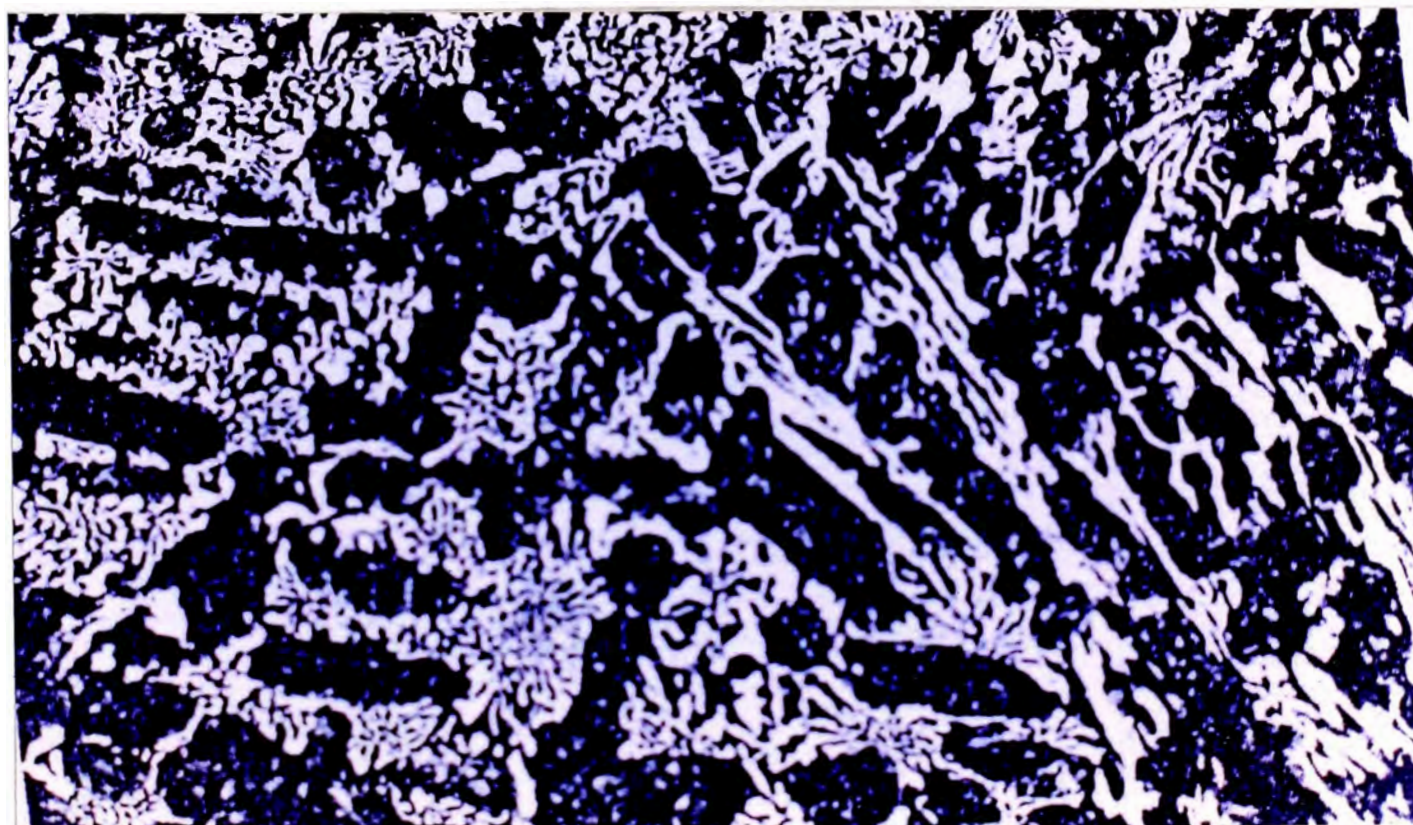


FOTO A 150 X. MATRIZ 100% PERLÍTICA (NEGRO)

3.5.4 MEDIOS DE TEMPLE

El objetivo es obtener matriz 100% martensítica con presencia de máxima precipitación de carburos secundarios globulares en la matriz y un porcentaje controlable de austenita retenida (10-15% A.R.)

Se realizó prueba de laboratorio con bolas vaciadas en arenas en resina. En semicoquilla (1/2 arena, 1/2 coquilla de acero).

MEDIOS DE TEMPLE DE BOLAS KROMOX

Curvas de Enfriamiento del Centro en Barras Redondas de 70 mm de diámetro x 150 mm (2 3/4" de diámetro x 5 3/4") Templadas.

GRÁFICO N° 20

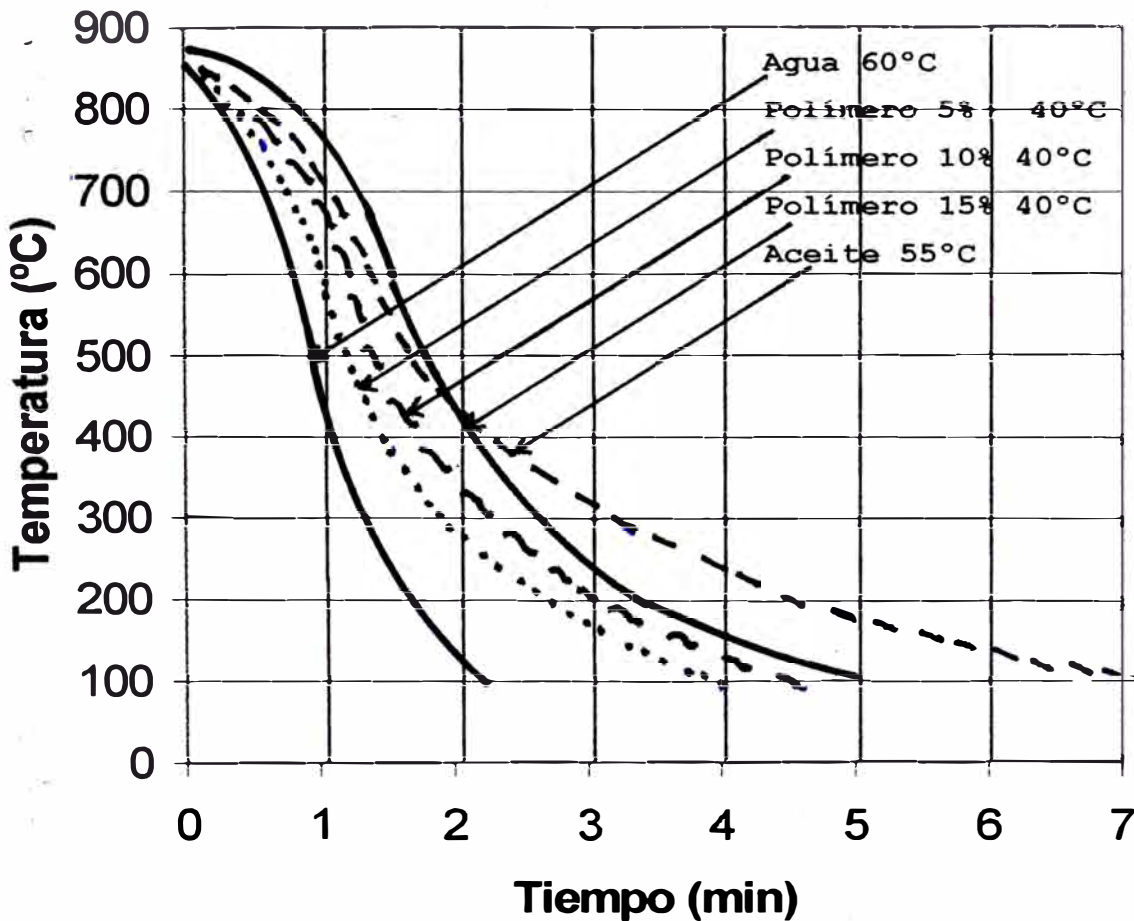


TABLA N° 121

PRIMERA PRUEBA

T.T.	DENTRO DE LA MUFLA		VENTILACIÓN REGULAR AL MEDIO AMBIENTE		VENTILACIÓN MODERADA (VENT. DE MESA)		VENTILACIÓN RÁPIDA AIRE COMPRIMIDO		
	3" φ	1" φ	3" φ	1" φ	3" φ	1" φ	3" φ	1" φ	
Convencional	RC	43.5	31.7	61.0	63.8	60.5	62	62.4	64.1
	BHN	422	308	696	760	684	718	726	767
P.A.	Rc	36.3	42.7	60.8	63.7	61.8	63.1	59.5	63.7
	BHN	344	412	692	757	714	742	662	757
Convenc.	% Aus. Retenida (%AR)	0	0	12	22	13	20	9	9
P.A.	% Aust. Retenida (%AR)	0	0	7	12	8	11	5	8
Convenc.	% Carburos secundarios	60	50	30	40	20	11	15	8
P.A.	% Carburos Secundarios	100	65	30	55	70	45	60	25

P.A. = Preaustenizado T.T.= Tratamientos Térmicos

RESUMEN PRIMERA PRUEBA DE MEDIOS DE TEMPLE

Las durezas: en bolas Kromox de 3" de diámetro se tomó a 1/8, 1/4, 1/2, 3/4 y 1 1/2 y de 1" de diámetro se tomó a 1/8, 1/4 y 1/2 en ambos casos no muestran diferencias significativas entre los diferentes niveles o distancias desde la superficie por lo que se reportó el promedio de ellos y ambos tratamientos térmicos según tabla N° 121 se encuentran según rango aceptable.

Metalografía:

Bolas enfriadas dentro del horno la matriz es 100 % perlita.

Bolas enfriadas en otros medios es martensítica con presencia de carburos secundarios y porcentaje de austenita retenida.

Los porcentajes de austenita retenida: en ambos tratamientos térmicos más alto en sistema convencional pero en ambos es necesario revenido a alta temperatura (450, 500°C).

La precipitación de carburos secundarios: es mayor en tratamientos térmicos de pre austenizado que el convencional (se consideró un aproximado de 5% máximo de precipitación del total de carburos primarios como el 100% para efectos comparativos).

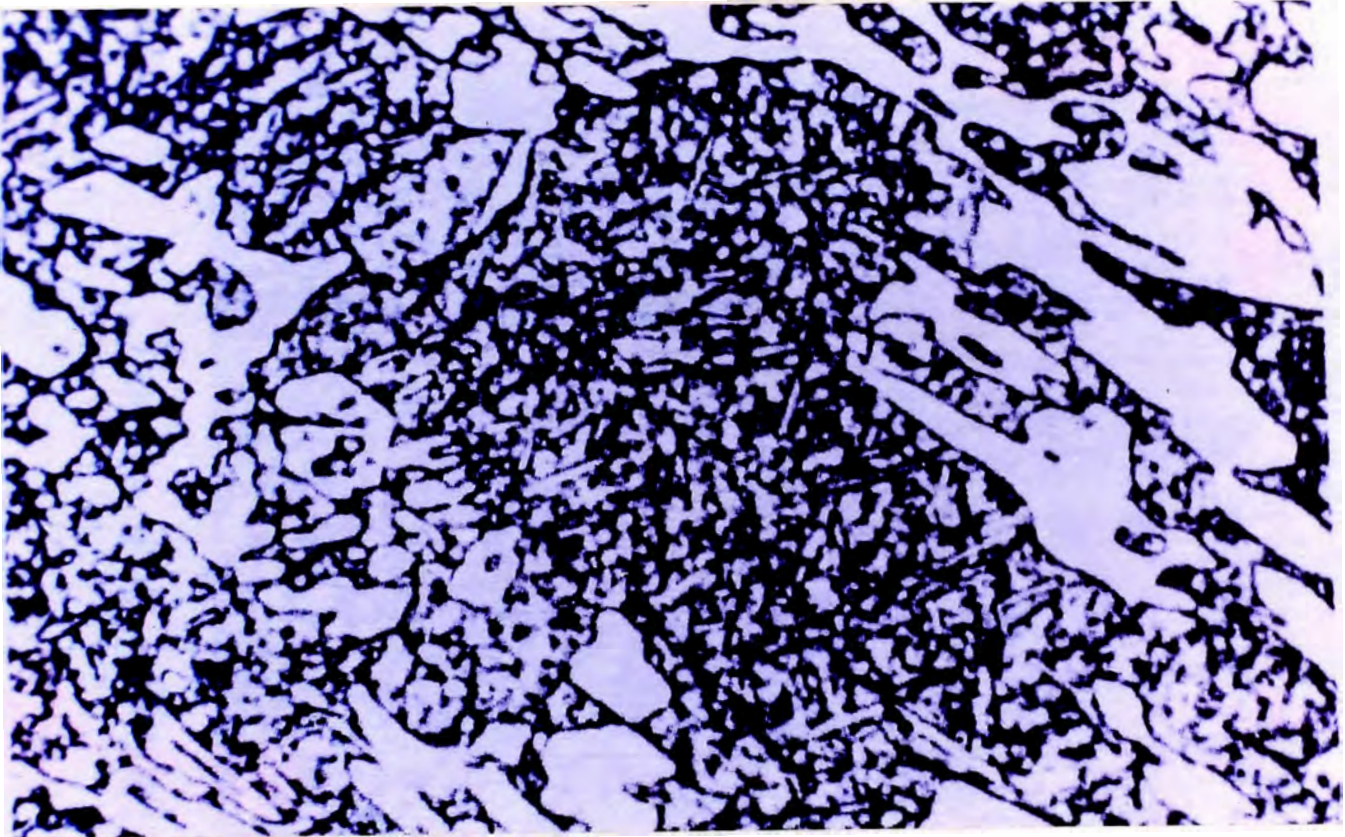
El mejor medio de temple: ventilación rápida con aire comprimido, observándose matriz 100% martensítica foto a 750 X.

SEGUNDA PRUEBA DE MEDIOS DE TEMPLE

MEDIO DE TEMPLE A BOLAS KROMOX DE 3" ϕ VACIADOS EN SEMICOQUILLA (ARENA/CHILL):

1. Ambiente.
2. Recipiente con arena caliente a 150°C.
3. Recipiente con arena fría temperatura ambiente.
4. Enfriar con aire soplado a menor de 150°C.
5. Entre bolas calientes a 100°C.
6. Enfriar 5' con aire soplado dejar luego al ambiente.

**PRIMERA PRUEBA
MICROGRAFÍA CON VENTILACIÓN RÁPIDA
CON AIRE COMPRIMIDO A 750X**



MATRIZ 100% MARTENSÍTICA

TABLA N° 122
BOLAS DE 3"φ VACIADOS EN SEMICOQUILLA

DUREZA DE SUPERFICIE ZONA (ARENA = A; CHILL = C)

SEGUNDA PRUEBA DE MEDIO DE TEMPLE

<u>DUREZA RC</u>	<u>MEDIO DE TEMPLE</u>
1. A: 58.5 - 58.5 - 59.5 = 59.0 C: 62.4 - 63.2 - 63.8 = 63.5	Ambiente
2. A: 53.0 - 51.0 - 53.6 = 53.3 C: 62.9 - 57.5 - 58.0 = 60.4	Arena a 150°C
3. A: 42.8 - 43.8 - 41.2 = 43.3 C: 44.5 - 45.5 - 45.6 = 45.5	Arena a T° ambiente
4. A: 66.8 - 66.5 - 67.5 = 67.1 C: 67.2 - 66.8 - 66.8 = 67.0	Aire comprimido < 150°C Rajada: Soplado
5. A: 61.8 - 61.4 - 60.5 = 61.6 C: 61.8 - 62.2 - 62.0 = 62.1	Entre bolas a 100°C
6. A: 64.8 - 65.2 - 65.4 = 65.3 C: 64.0 - 65.0 - 64.8 = 64.9	5' soplado, luego al Ambiente

Resumen de la 2da prueba de medios de temple con bolas de 3"φ vaciadas en semicoquilla. El mejor medio de temple fue, enfriar 5 minutos con aire forzado (soplado), luego enfriar al ambiente, esto corresponde al ensayo N° 6.

Se observa marcada diferencia de durezas en zona de Chill y zona de arena (5 Rc de diferencia). Tendencia al fracturamiento quedando descartada fundir bolas en semicoquilla (mitad alma en resina y mitad molde metálico conocido como Chill).

TERCERA PRUEBA DE MEDIOS DE TEMPLE**TABLA N° 123****PRUEBAS MEDIO DE TEMPLE: bolas kromox de 2", 3" Y 4" de diámetro**

GRUPO DE BOLAS	TEMPERATURA °C	MEDIO DE TEMPLE AIRE A PRESIÓN (MINUTOS)	MEDIO DE TEMPLE AIRE CALMO (MINUTOS)
2 BOLAS DE 2" DE ϕ	950°C(T°AUST)	-	-
	842	2'	7'
	550	5'	12'
	371	7'30"	15'
5 BOLAS DE 2" DE ϕ	980(T°AUST)	-	-
	843	1'30"	5'
	804	4'	-
	593	5'30"	-
	550	-	10'
371	7'30"	14'	
5 BOLAS DE 3" DE ϕ	980°C(T°AUST)	-	-
	871	2'	3'30"
	804	2'45"	4'
	550	6'	12'
	371	12'	20'
5 BOLAS DE 4" DE ϕ	980°C(T°AUST)	-	-
	871	2'45"	5'
	804	4'	6'30"
	550	10'	20'
	371	14'30"	26'
GRUPO DE 15 BOLAS DE 3" DE ϕ	980°C(T°AUST)	-	-
	550	11'	-
	427	12'	-
	218	24'	-

Resumen de la 3ra prueba de medios de temple: Las durezas en todos los casos son similares, y con promedio: 60RC a 62RC. Se observa el efecto de masa en el temple no es eficiente por formarse perlita tal como se muestra en la foto a 750 X con medio de temple en aire a presión por 14 minutos 30 segundos.

**MICROESTRUCTURA DE LA TERCERA PRUEBA CON AIRE A PRESION
EN BOLA DE 4" DE DIÁMETRO**

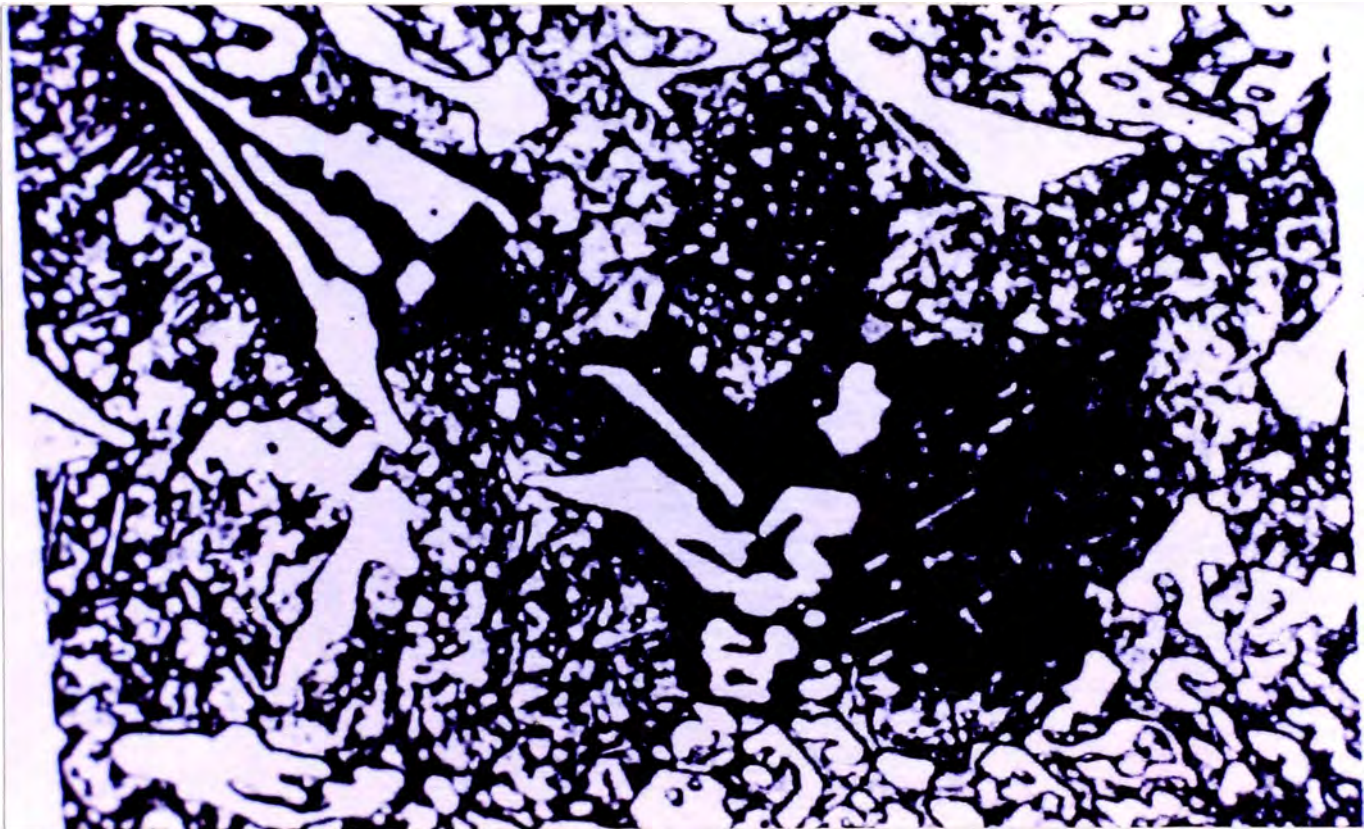


FOTO A 750X. MATRIZ 5% DE PERLITA Y 95% DE MARTENSITA

3.5.5 REVENIDO

El objetivo del revenido es transformar el porcentaje de austenita retenida obtenida al final del temple y reducirlos a niveles menores del 2%. La austenita retenida influye negativamente en el trabajo de las bolas Kromox produce despostillamiento.

Se realizó pruebas de laboratorio a bolas de 3" de diámetro, con temperatura de revenido: a 450°C, 500°C a tratamientos térmicos convencionales, templados a 1000°, 950°, 900°C en A = ambiente y S = soplado con aire comprimido.

TABLA N° 124

COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LAS COLADAS PARA BOLAS KROMOX DE 3" DE DIÁMETROS CON TRATAMIENTOS TÉRMICOS CONVENCIONALES.

Tesis A: ensayos del 1 al 13

Tesis B: ensayos 13 y 14

T.T.	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	Sn
1-12	3.16	1.99	1.99	0.01	0.057	0.70	17.37	0.08	.046	0.017
13 –	3.16	2.14	.61	.018	.01	.08	14.67	.03	.05	.44
14		2.48	.79				15.31			

Según resultados de laboratorios presentes en la Tabla N° 125. Las pruebas del 1 al 12 corresponden a tratamientos térmicos con la composición química según tabla N° 124 de bolas Kromox de 3" de diámetro y las pruebas 13, 14 corresponden a tratamientos térmicos con composición química según la tabla N° 124 de bolas Kromox de 3" de diámetro, templado a 900°C y revenido a 500°C con análisis metalográfico: FIERRO BLANCO AL KROMOX, norma ASTM A532 de alto carbón (3.16) analizado por absorción atómica y por MBE, observándose las microfografías 1, 2, 3 y 4. No se aprecia carburos secundarios precipitados, tal como se muestra en los espectros adjuntos.

FIERRO BLANCO AL KROMOX

Tipo de aleación: Fierro blanco al cromo

Norma ASTM A 532

Composición química

	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	Sn
A.A	3.16	2.14	0.61	0.028	0.01	0.08	14.67	0.03	0.05	0.044
EDS		2.48	0.79				15.31			

Microestructura: Matriz martensítica 100%.

Otras fases: Carburos primarios de cromo y fierro en disposición interdendrítica, en mayor % en red discontinua.

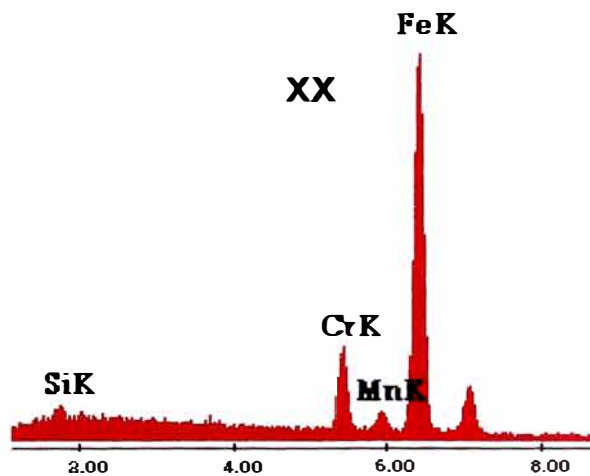
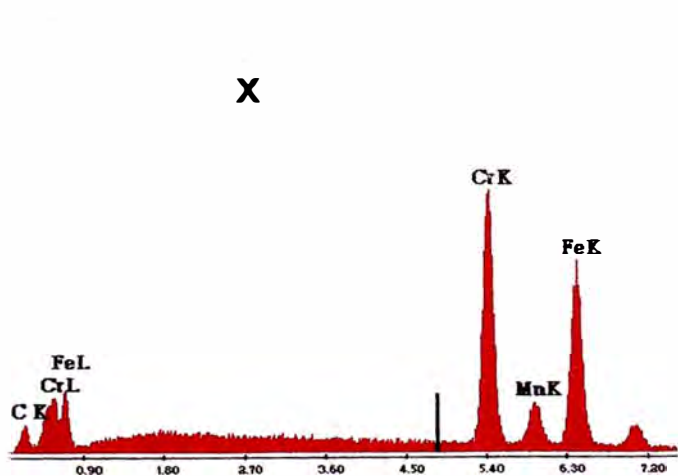
Observaciones: Sin carburos secundarios precipitados en la matriz.



Micrografía N°1: Morfología general de las fases.



Micrografia N°2: Matriz martensítica 100%.

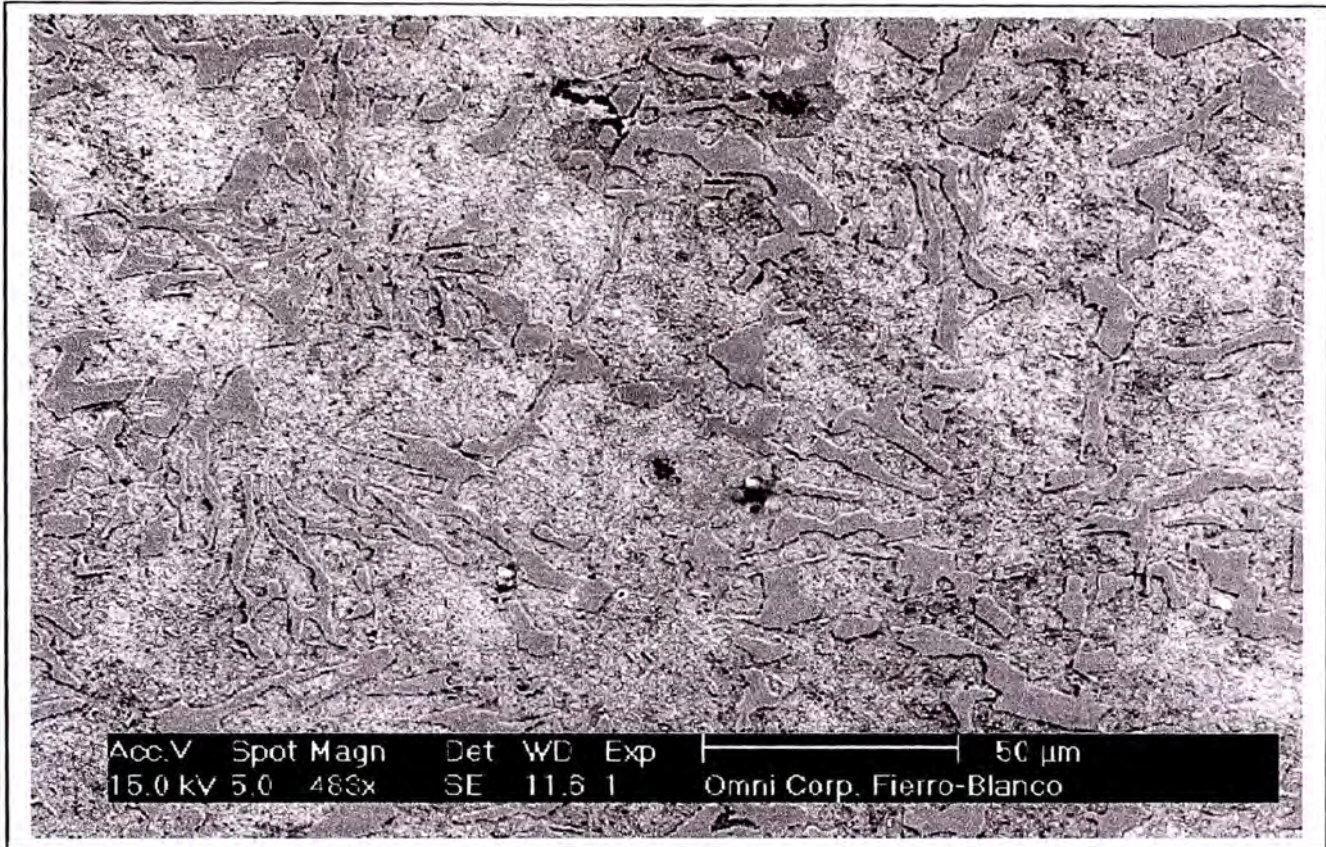


ZAF Quantification Method, Standardless
PEI Default Set : 2, Elements

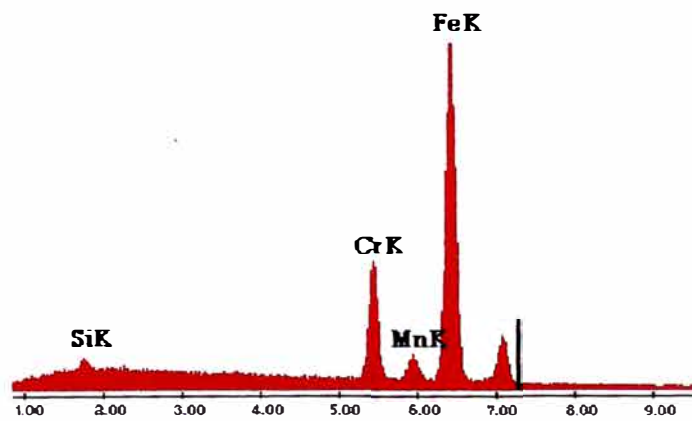
Elem	Wt %	At %	K-Ratio
C K	13.87	42.02	0.0385
CrK	38.17	26.71	0.3944
MnK	2.43	1.61	0.0231
FeK	45.53	29.66	0.4235
Total	100.00	100.00	

ZAF Quantification Method, Standardless
PEI Default Set : 2, Elements

Elem	Wt %	At %	K-Ratio
SiK	0.78	1.52	0.0048
CrK	10.16	10.75	0.1194
MnK	2.37	2.37	0.0232
FeK	86.70	85.37	0.8569
Total	100.00	100.00	

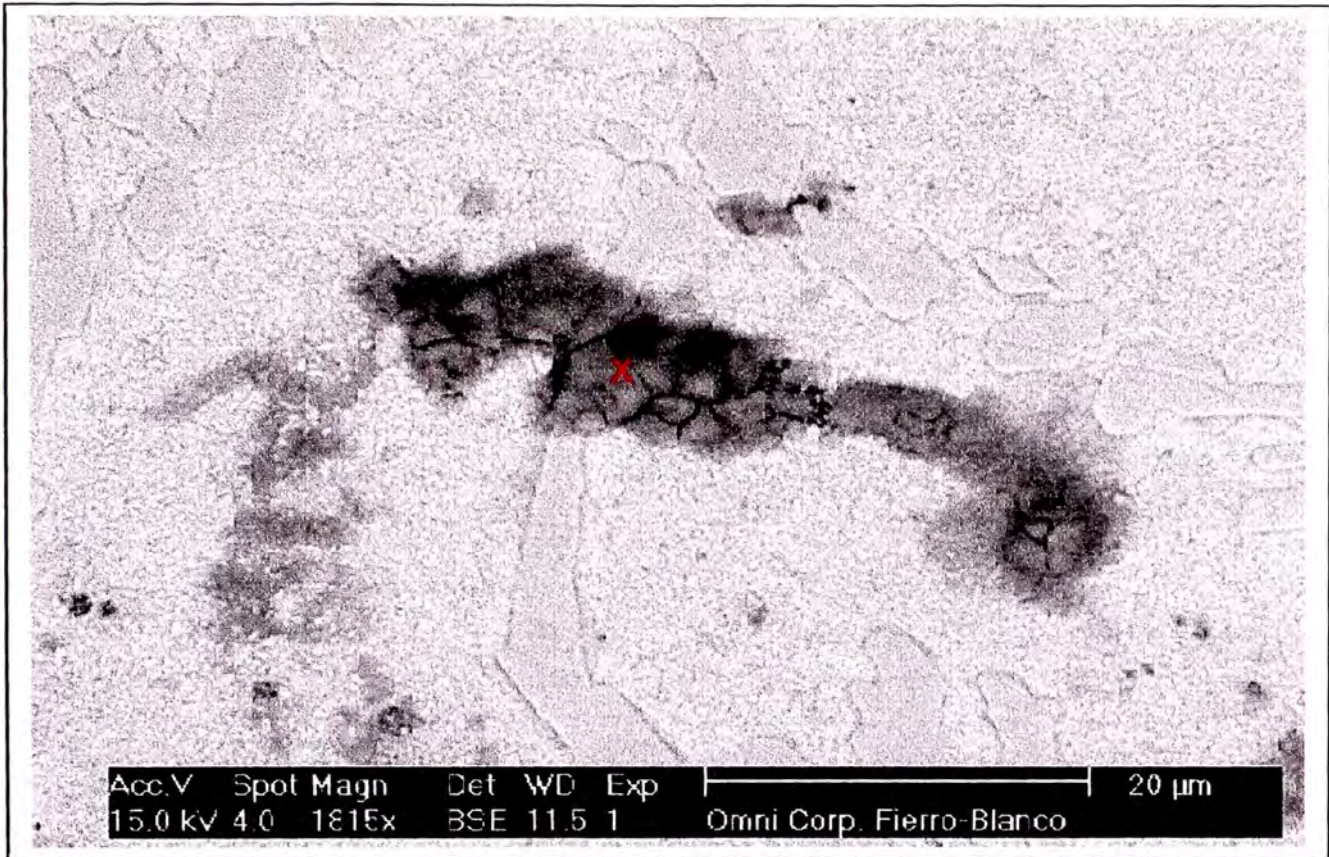


Micrografía N°3: Martensita y carburos primarios.

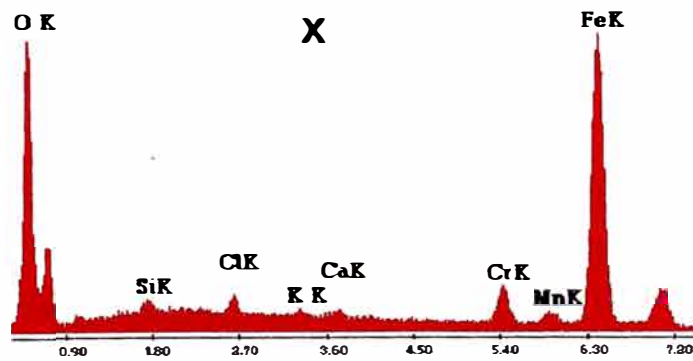


ZAF Quantification Method, Standardless
PEI Default Set : 2, Elements

Elem	Wt %	At %	K-Ratio
SiK	0.79	1.55	0.0049
CrK	15.31	16.13	0.1761
MnK	2.48	2.47	0.0242
FeK	81.42	79.85	0.8003
Total	100.00	100.00	



Micrografía N°4: Inclusiones de óxido de fierro.



ZAF Quantification Method, Standardless

PEI Default Set : 2, Elements

Elem	Wt %	At %	K-Ratio
O K	22.68	49.95	0.1319
SiK	0.68	0.85	0.0043
ClK	0.93	0.93	0.0082
K K	0.48	0.43	0.0046
CaK	0.63	0.56	0.0065
CrK	4.57	3.10	0.0509
MnK	1.61	1.03	0.0150
FeK	68.42	43.16	0.6474
Total	100.00	100.00	

TABLA N° 125

**RESULTADOS DE PRUEBAS DE LABORATORIO: DUREZA BRINELL Y
ANÁLISIS METALOGRAFICO DE BOLAS KROMOX DE 3"**

#	TEMPE. AUST°C	MED. TEMP.	AR %	DUR BHN	REV °C	DUREZA BRINELL			ANALISIS METAGRAFICO		
						¼"	1/2"	1"	AR(%)	MATRIZ	OTR FASES
1	1000	A	24	713	450	713	713	713	13.7	MARTENSITA	CIE.CS+
2	1000	S	34	713	450	713	713	713	14.7	MARTENSITA	CIE.CS+
3	950	A	14	652	450	652	652	652	6.5	MARTENSITA	CIE.CS-
4	950	S	12	652	450	652	652	652	3.5	MARTENSITA	CIE.CS-
5	900	A	16	600	450	600	600	600	7.7	MARTENSITA	CIE
6	900	S	11	600	450	600	600	600	2.9	MARTENSITA	CIE
7	1000	A	24	713	500	713	713	713	1.4	MARTENSITA	CIE.CS+
8	1000	S	34	713	500	713	713	713	1.7	MARTENSITA	CIE.CS+
9	950	A	14	652	500	600	600	600	0.5	MARTENSITA	CIE.CS-
10	950	S	12	652	500	600	600	600	0.2	MARTENSITA	CIE.CS-
11	900	A	16	600	500	555	555	555	0.3	MARTENSITA	CIE
12	900	S	11	600	500	555	555	555	0.0	MARTENSITA	CIE
13	900	A	10	600	500	600	600	600	0.0	MARTENSITA	CIE
14	900	S	8	600	500	600	600	600	0.0	MARTENSITA	CIE

CIE = Carburo Intergranular y eutéctico.
 CS = Carburo secundario.
 CS+ = Carburo secundario en mayor cantidad.
 CS- = Carburo secundario en menor cantidad.
 MED. TEMP = Medio de temple
 A = Ambiente
 S = Aire forzado
 AR = Austenita retenida
 REV = Revenido
 OTR FASES = Otras fases

IDENTIFICACIÓN DE CARBUROS

Los carburos se identifican por su promedio relativo de resistencia a los reactivos.

TABLA N° 126

REACTIVO	COMPOSICIÓN		M ₃ C	M ₇ C ₃	M ₂₃ C ₆	M ₆ C	M ₂ C
Picrato Alcalino	Acido Pírico	2g	A	NA *	NA*	NA *	A
	hidróxido de sodio	25g					
	Agua	100cm ³					
Murakami	Ferrocianuro de K	10g	NA	A	A	A	A
	Hidroxido de Na	10g					
	Agua	100cm ³					
Ataque electrolítico con ácido crómico	Acido crómico	1g	NA	A	NA	NA	A
	Agua	100cm ³					
Hidróxido de Sodio saturado con permanganato de potasio	4% Hidróxido de Sodio saturado con permanganato de potasio		NA	A	NA	A	A

A = Ataca

NA = No ataca

* Son atacados los carburos de cromo bajo

M₃C = Cementita contiene hasta 15% Cr en peso

M₇C₃ = Carburo de cromo trigonal (contiene hasta 35% de Fe en peso)

M₂₃C₆ = Carburo de cromo cúbico (contiene hasta 30% de Fe en peso)

M₂C = Carburo de cromo ortorombico (contiene hasta 20% de Fe en peso)

M = (Fe, Cr, Mn, Mo)

Para identificar la matriz se usó: El reactivo de la siguiente composición:

- Acido Hidroclorídrico = 5cm³
- Acido Pírico = 1gr.
- Alcohol metílico = 100cm³.

La identificación de carburos por microscopía óptica requiere de mayor tiempo, los resultados de la investigación son usando el microscopia electrónico de barrido

CUARTA PRUEBA Y FINAL DE MEDIOS DE TEMPLE PROPUESTO POR LA TESIS

DE BOLAS KROMOX DE 3" DE DIÁMETRO

Destaca el medio de temple: polímero al 15%.

Composición Química:

TABLA N° 127

C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Cu	P	S
3.16	1.19	1.99	17.37	.187	.08	.046	.01	.057

Tratamiento térmico:

Calentamiento ciclo convencional a 1000°C.

Permanencia a 1000°C, 4hrs.

Temple: en polímero con concentración 14-15% temperatura de salida de la bola del polímero 500°C (tiempo de permanencia de la bola en el polímero es aproximado a 30 segundos), luego enfriamiento al ambiente (25°C).

Revenido: a 500°C por 6 horas.

A esta prueba se calificó como:

"Bola de Fierro Blanco Aleado al Cromo Molibdeno para la Industrial del Cemento"

Análisis microestructural con MEB de la Cuarta Prueba y Final

Micrografía N° 1 a 500x

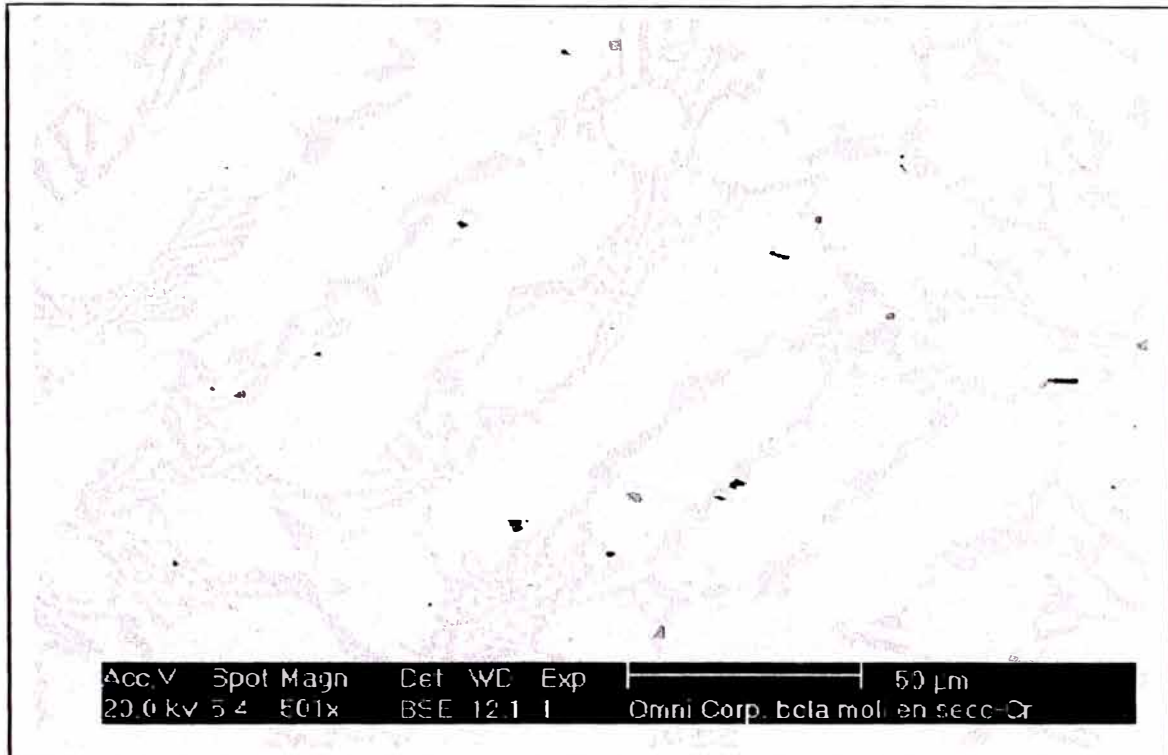
Micrografía N° 2 a 2004x se presenta el análisis del Carburo Eutectico.

Micrografía N° 3 a 2004x se presenta el análisis del carburo primario.

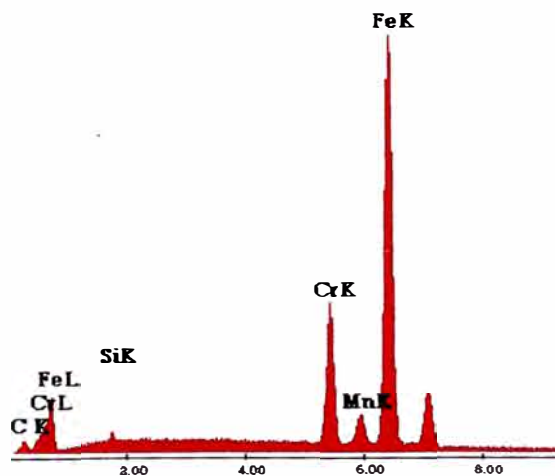
Micrografía N° 4 y 5 1999x se presenta la topografía con uso del detector de electrones secundarios.

Micrografía N° 6 y 7 a 499x se presenta el análisis de la matriz, observando carburos secundarios precipitados del tipo $(Fe, Cr)_7C_3$. Tal como muestran los espectros adjuntos. Existe una marcada diferencia con el tratamiento térmico a 900°C, evaluados en la tesis denominado parte A.

Bola de Fierro Blanco Aleado al Cromo Molibdeno para la Industria del Cemento

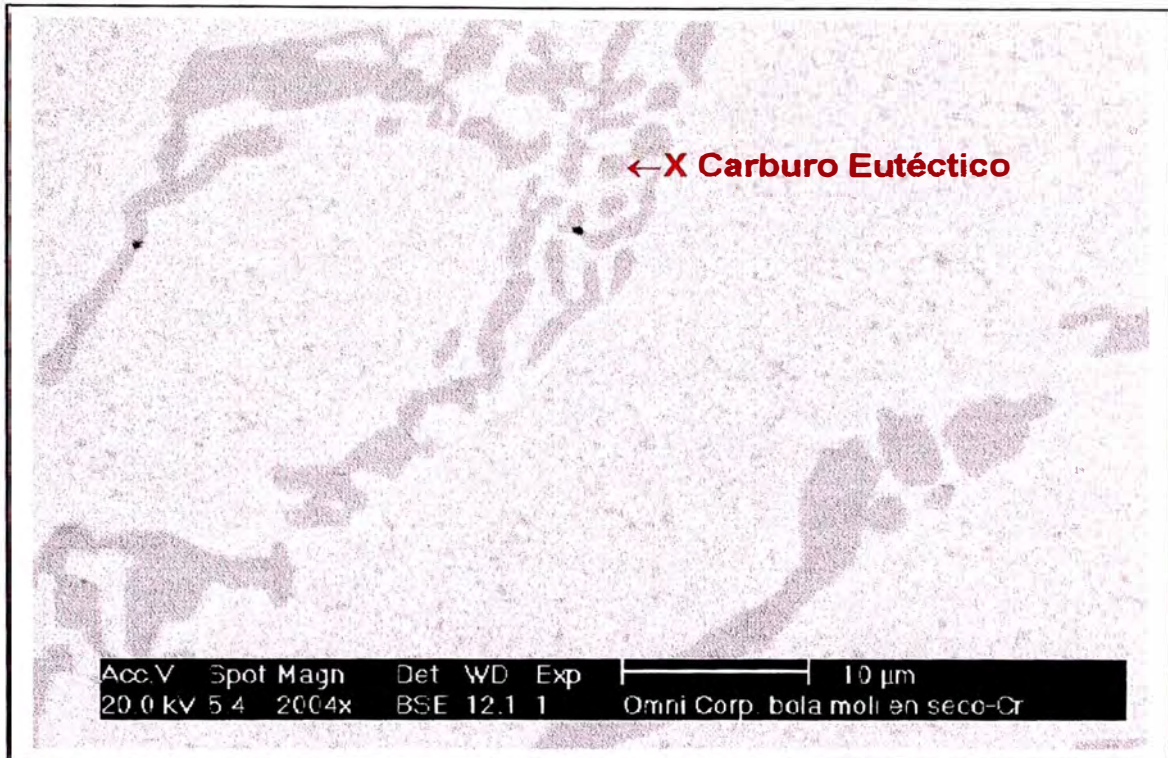


Micrografía N°1: Carburo eutéctico y primario en disposición interdendrítica y matriz de martensita con carburos secundarios esferoidales dispersos.



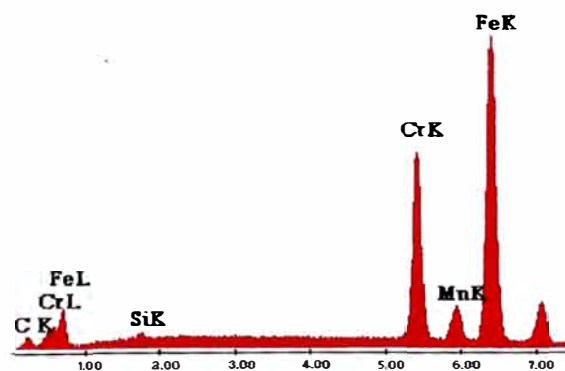
ZAF Quantification Method, Standardless
PEI Default Set : 2, Elements

Elem	Wt %	At %	K-Ratio
C K	12.96	40.45	0.0288
SiK	0.58	0.78	0.0027
CrK	13.89	10.02	0.1570
MnK	2.11	1.44	0.0201
FeK	70.46	47.31	0.6677
Total	100.00	100.00	



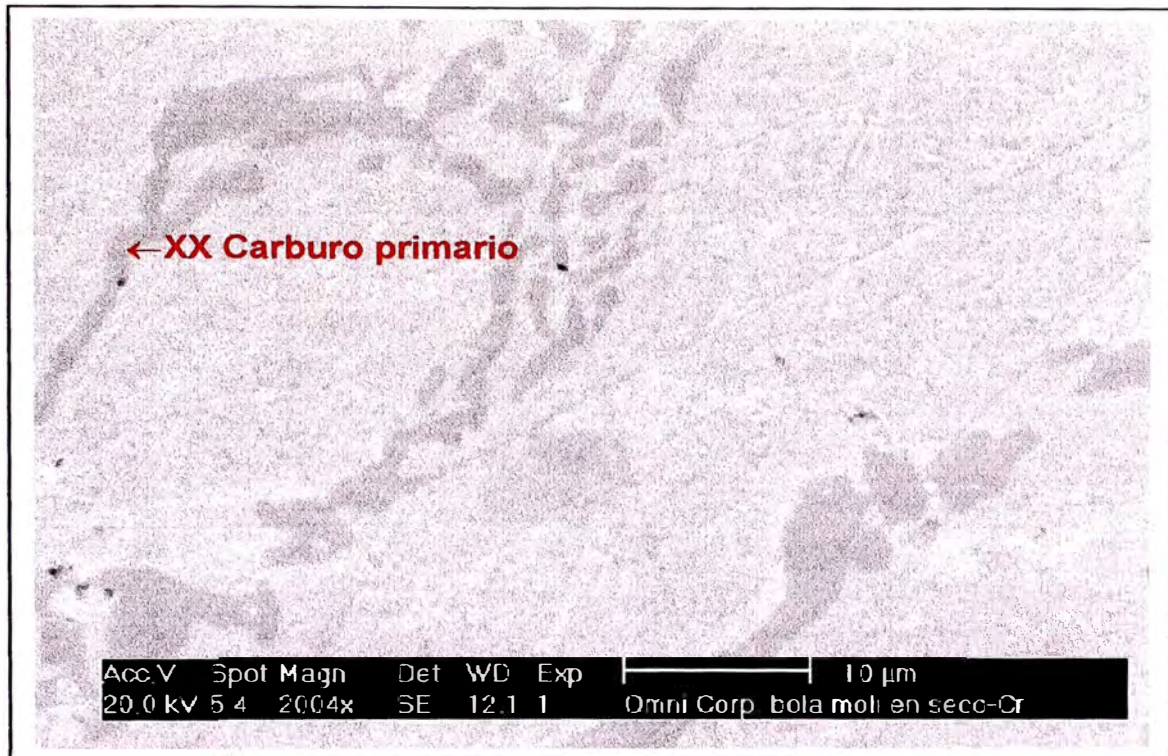
Micrografía N°2

X

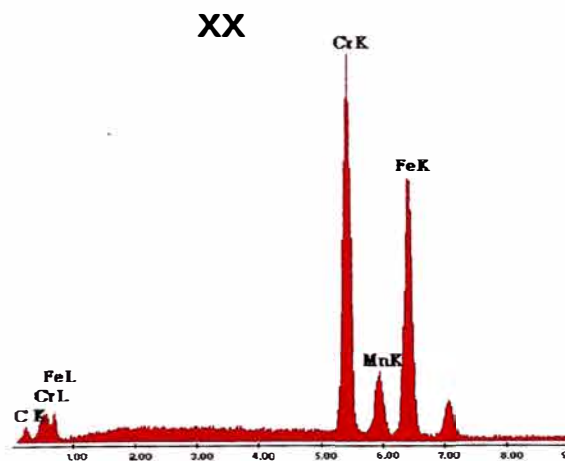


ZAF Quantification Method, Standardless
PEI Default Set : 2, Elements

Elem	Wt %	At %	K-Ratio
C K	13.14	40.67	0.0299
SiK	0.53	0.70	0.0025
CrK	23.28	16.64	0.2538
MnK	1.94	1.32	0.0186
FeK	61.10	40.67	0.5678
Total	100.00	100.00	

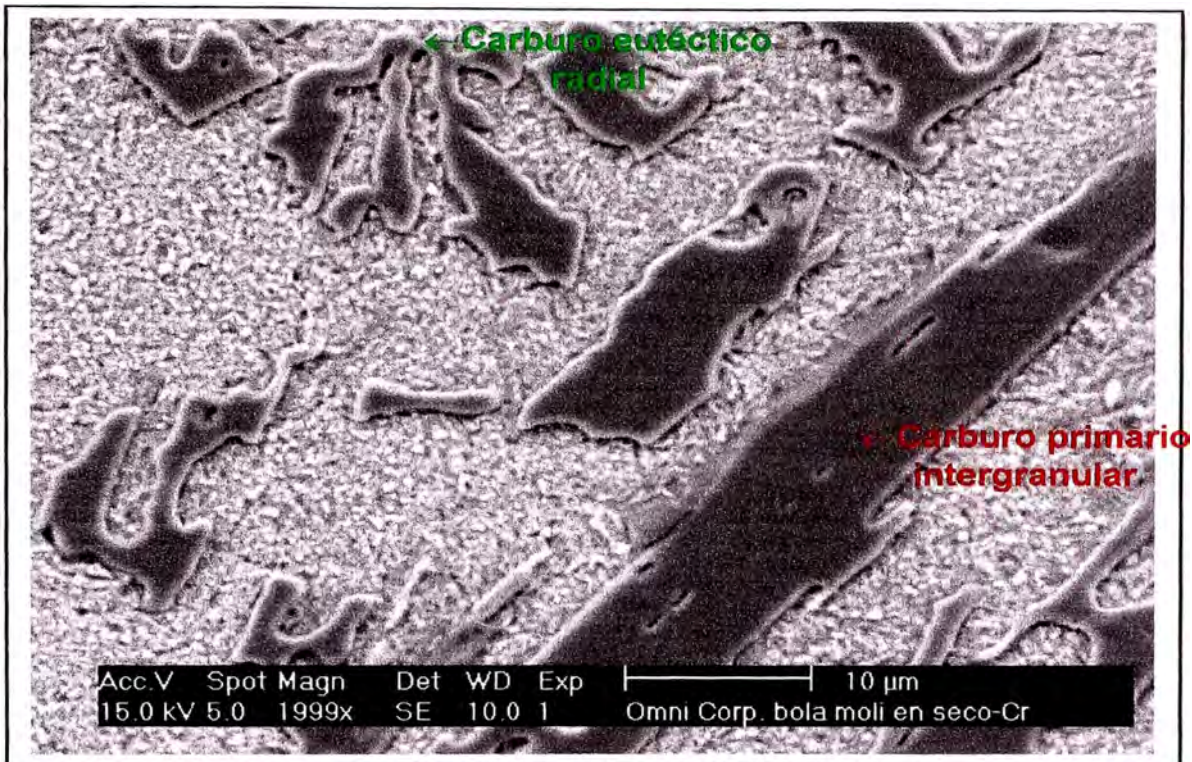


Micrografía N°3

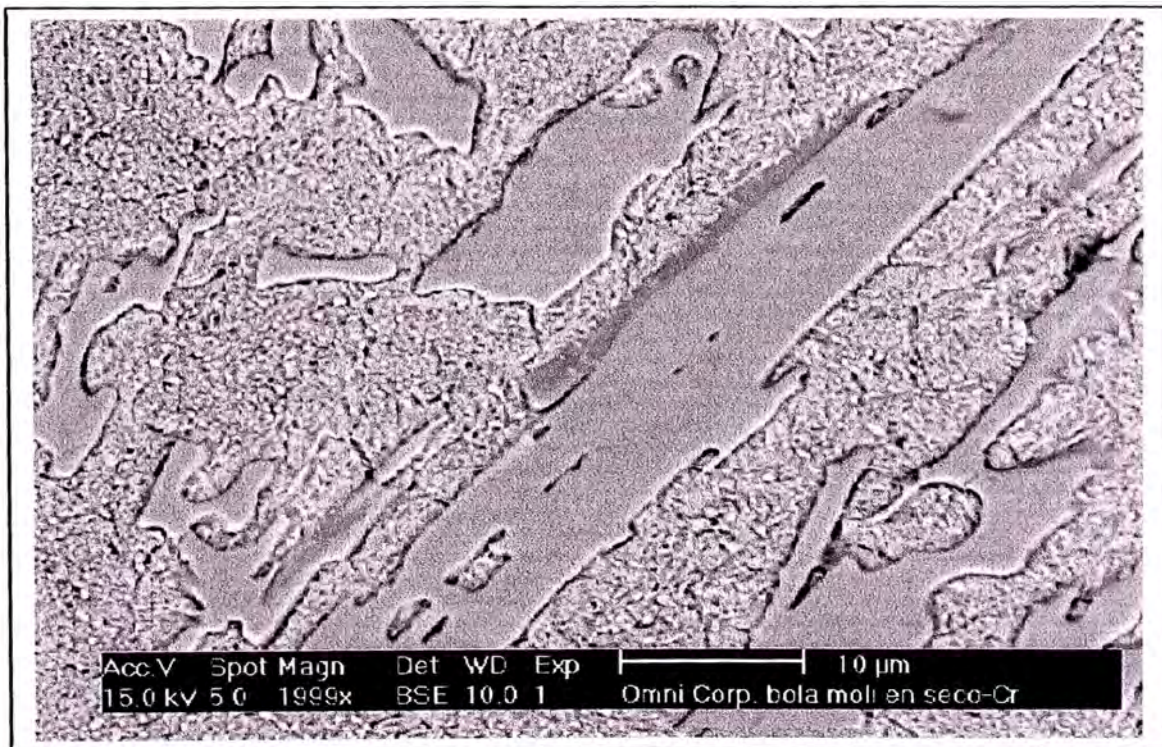


ZAF Quantification Method, Standardless
PEI Default Set : 2, Elements

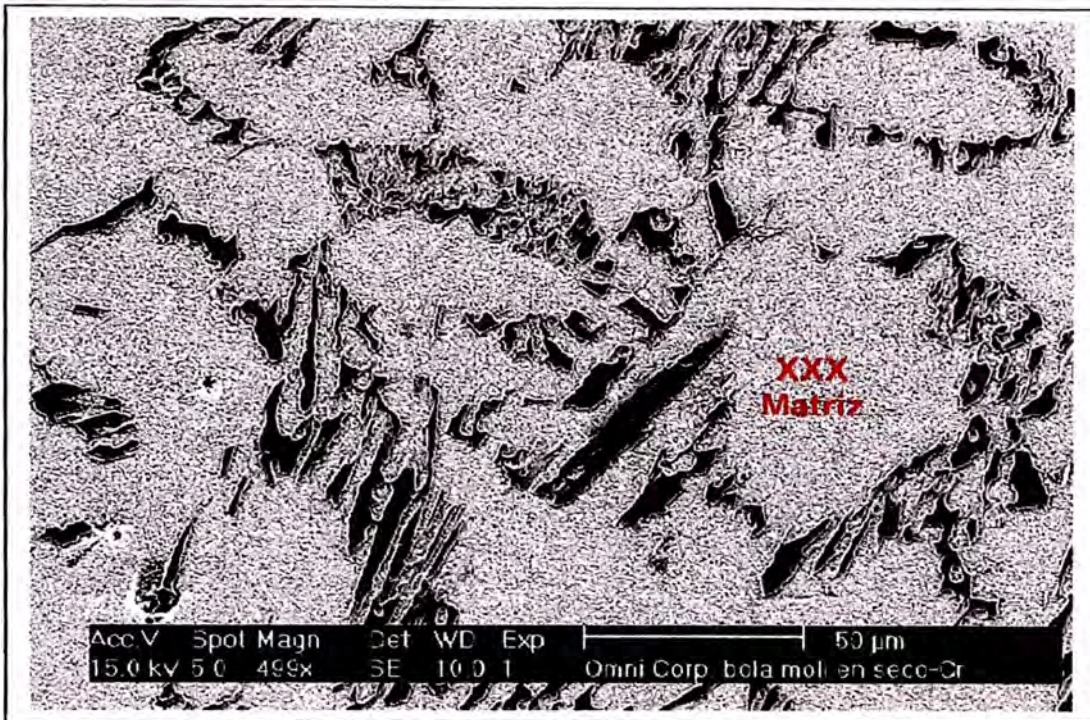
Elem	Wt %	At %	K-Ratio
C K	13.68	41.60	0.0329
CrK	39.52	27.77	0.4124
MnK	2.05	1.36	0.0196
FeK	44.76	29.28	0.4024
Total	100.00	100.00	



Micrografía Nº4: Se observa la topografía de la muestra, se utilizó el detector de electrones secundarios.

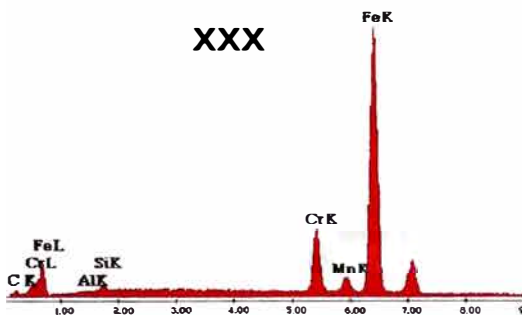


Micrografía Nº5

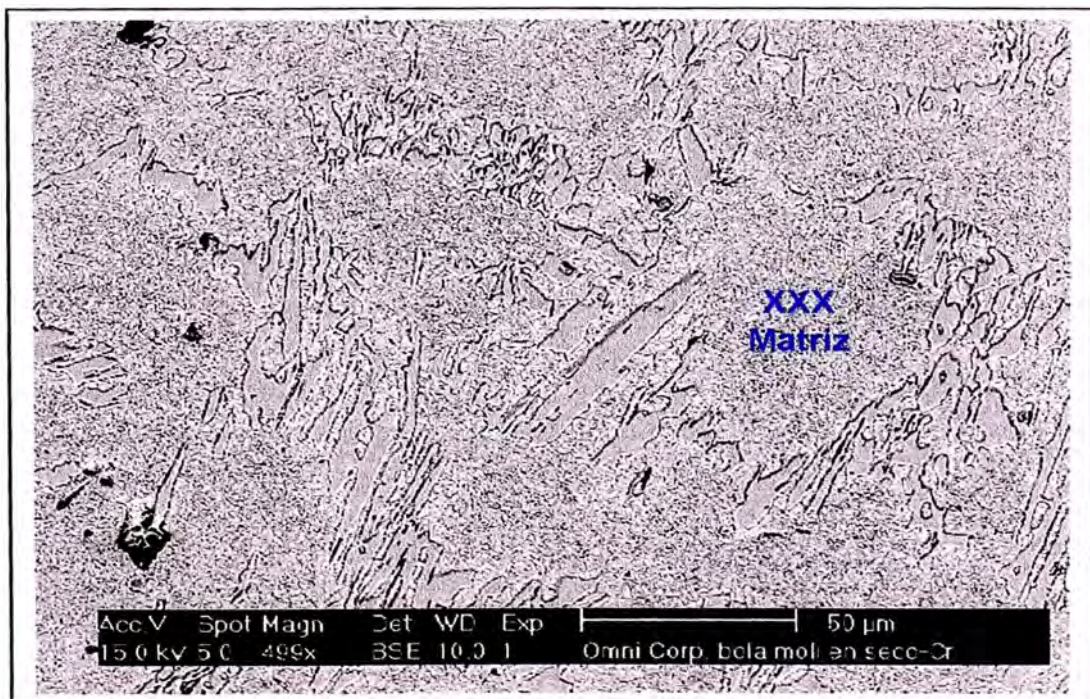


Micrografia N°6

ZAF Quantification Method, Standardless
PEI Default Set : 2, Elements



Elem	Wt %	At %	K-Ratio
C K	11.80	37.88	0.0257
AlK	0.24	0.34	0.0008
SiK	0.69	0.94	0.0031
CrK	10.38	7.70	0.1196
MnK	2.02	1.42	0.0193
FeK	74.88	51.71	0.7159
Total	100.00	100.00	



Micrografia N°7

CARACTERÍSTICAS DEL POLÍMERO PARA TEMPLAR BOLAS EN ACEROS Y FIERROS BLANCOS

Son soluciones acuosas de un polímero orgánico líquido y un anticorrosivo (RL = nitrito inorgánico; RL-NN = sin nitrito).

El polímero orgánico es completamente soluble en agua y produce una solución transparente, homogénea y son polímeros no flameables.

A temperatura superior a los 74°C (165°F) el polímero se separa del agua como una fase insoluble. Durante el temple el enfriamiento es gobernado por la película de polímero controlado por su concentración, temperatura del baño del polímero y la agitación del baño. En el mercado existen:

Polímeros Quenchant RL (sin nitroaminas)

Polímeros Quenchant RL-NN (sin nitrito)

Cuyo fabricante es la Unión Carbide Corporation (UCON) de su línea fluidos y lubricantes para temple suministrados por TENAXOL INC.

PROPIEDADES TÍPICAS DE LOS POLÍMEROS

Gravedad específica a 20/20°C	= 1.078
Punto de inflamación	= ninguno
Punto de vaciado mínimo	= 0°C (32°F)
Punto de solidificación por debajo de 0°C (32°F)	
Rango de PH	= 10.8
Viscosidad a 100°F (37.8°C)	= 1,100 SUS = 237CSTK

Son resistentes al crecimiento de bacterias, tienen bajo el nivel de demanda de oxígeno bioquímico (BOD) y esencialmente no tóxico al sistema de branquias de los peces.

Demanda de Oxígeno Químico (COD) MgO₂/mg cpd	Demanda de Oxígeno Bioquímico (BOD) (BOD/COD x 100) % Bio Oxidación			
	5 días	10 días	15 días	20 días
0.73	1	12	24	24

Figura 2

Effect of Concentration on Cooling Rate

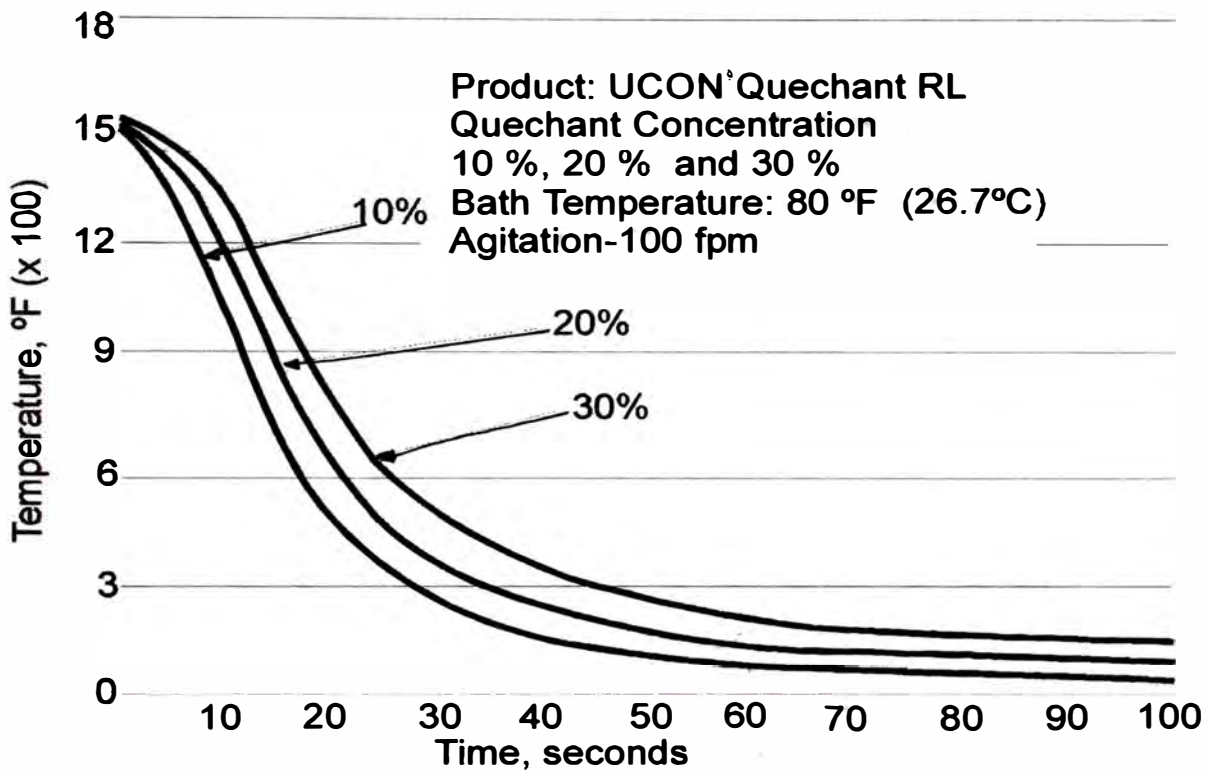
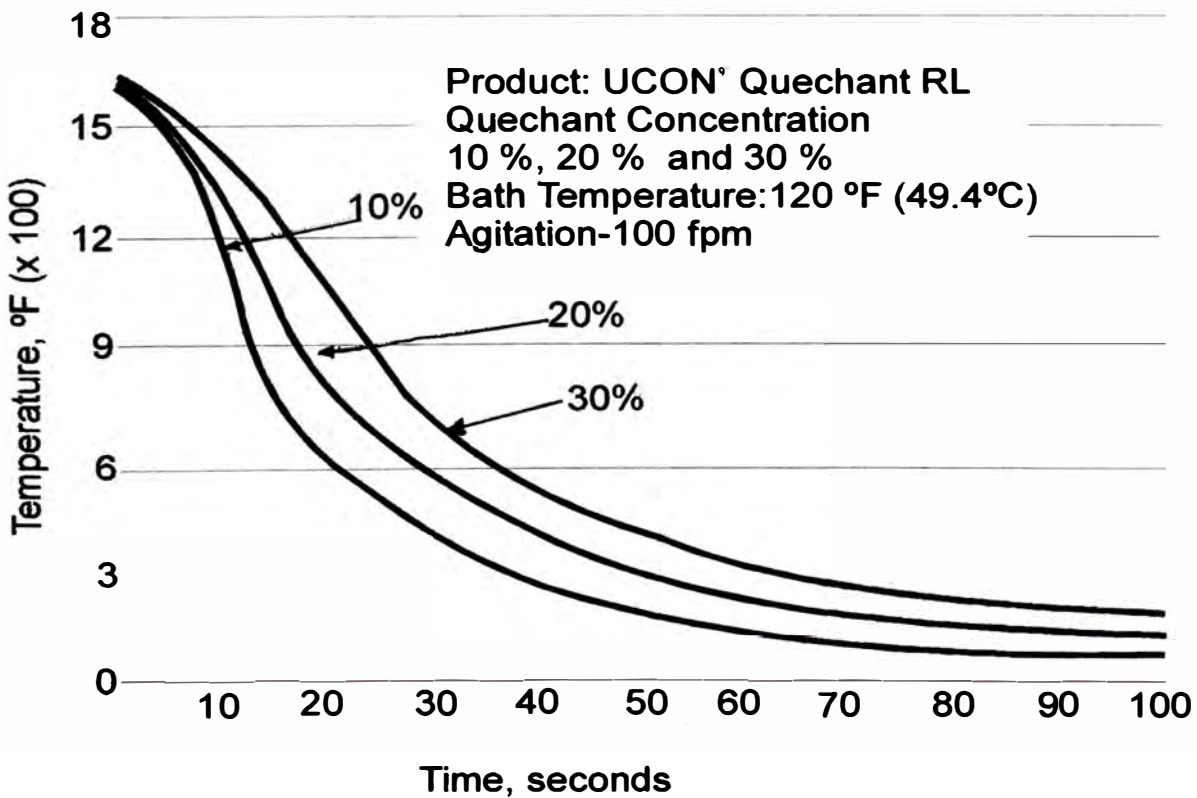
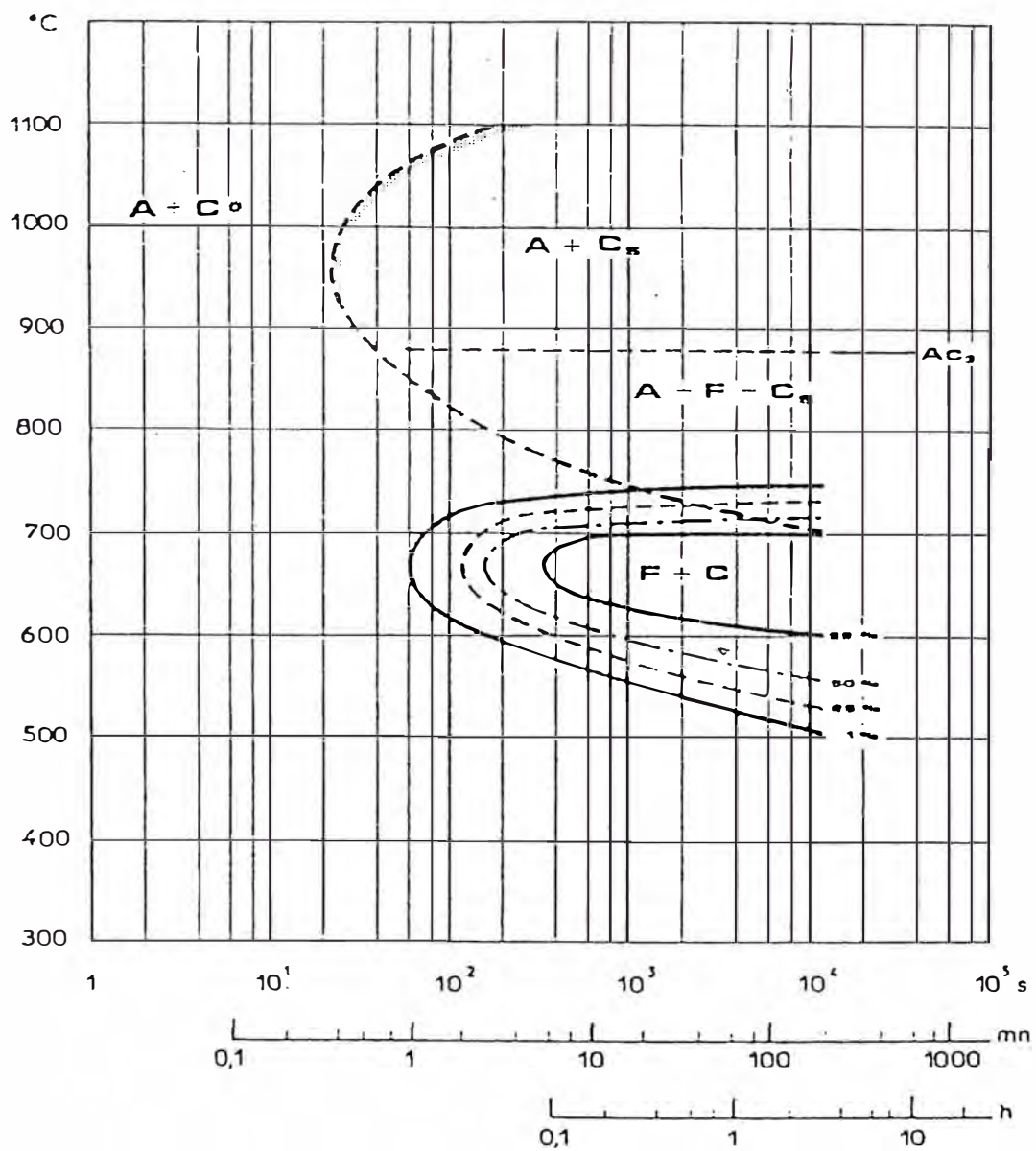


Figura 3

Effect of Elevated Bath Temperature on Cooling Rate

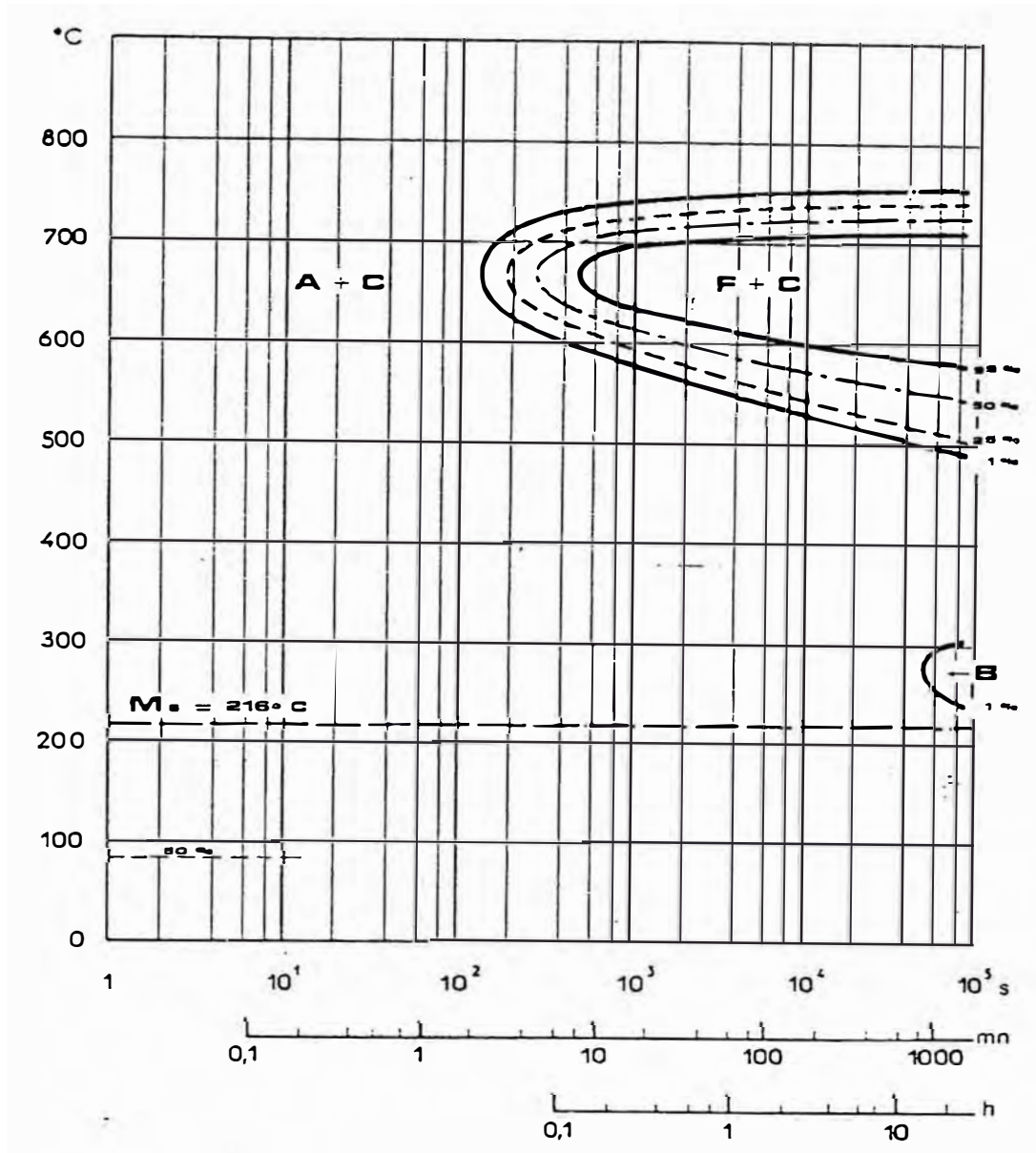


CURVA TTT BOLAS KROMOX

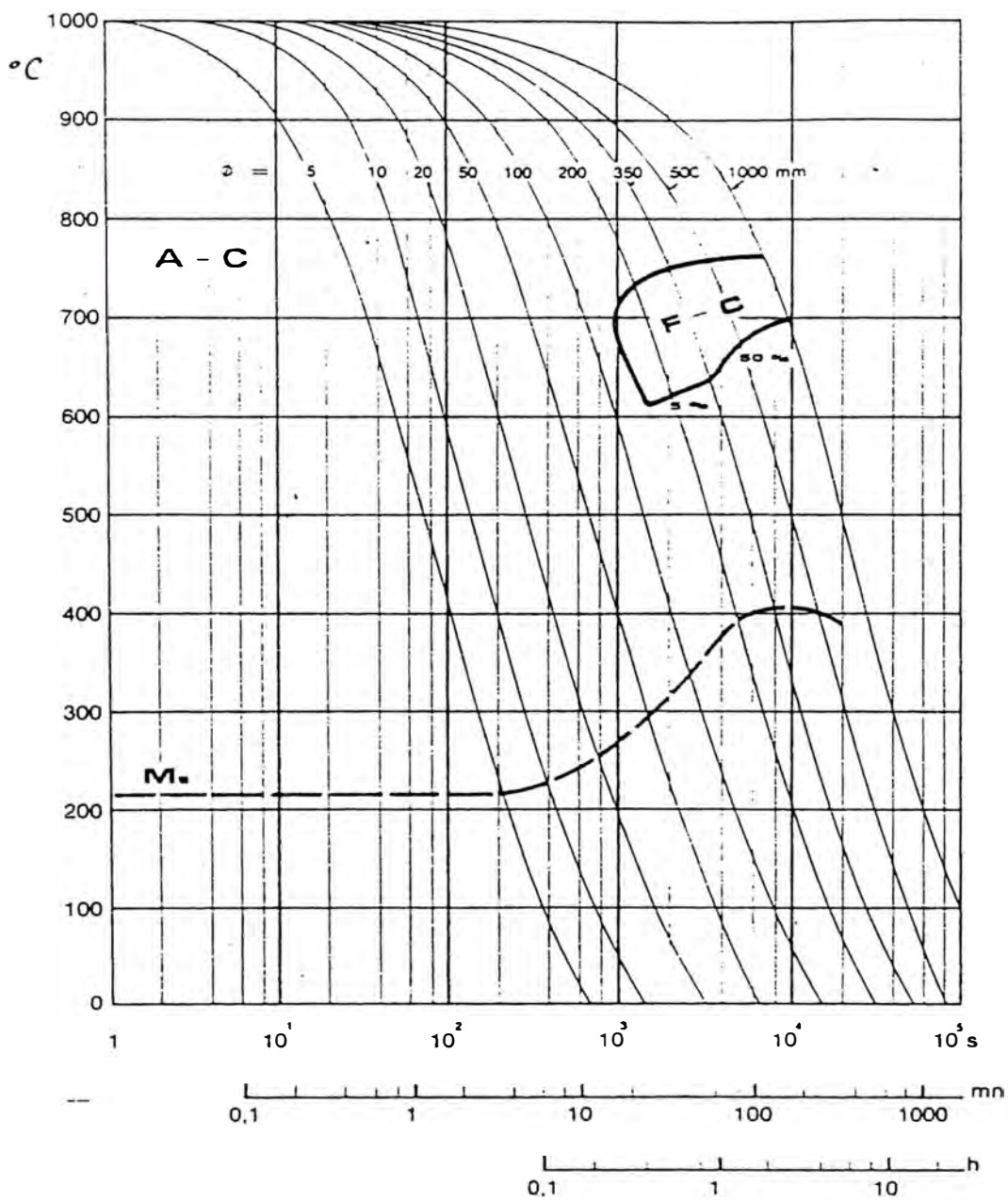


C* = CARBUROS SIN SOLUBILIZAR

CURVAS TTT BOLAS KROMOX



CURVAS CCC BOLAS KROMOX



3.6 PRUEBAS DE TRATAMIENTOS TÉRMICOS DE EN PLANTA CON BOLAS

Completado el ciclo de enfriamiento de las bolas en los moldes (Temperatura menor o igual a 200°C), estas se desgranaron en forma manual, luego con el fin de eliminar las REBABAS y arena se usó el molino desgranador y al término del tratamiento térmico se realizó limpieza en el TAMBLER (lavador de metales).

En planta se adoptó como mejor medio de temple aire a presión (soplado en campana).

3.6.1 CARGA DE BOLAS AL HORNO PARA TEMPLE Y REVENIDO

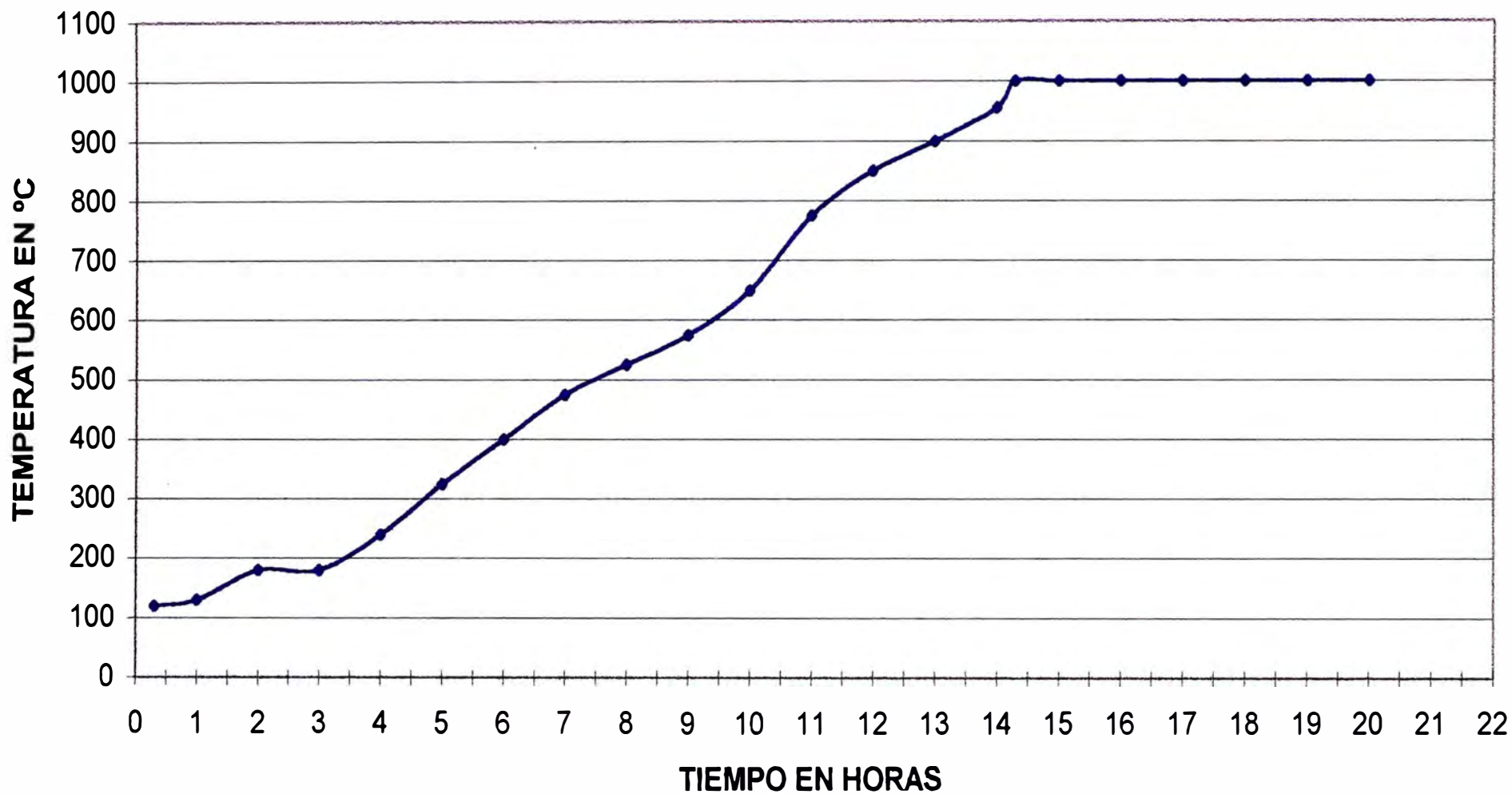
Se preparó (carga) las bolas en bandejas confeccionados en planchas y eslabones de acero inoxidable austenítico, con las dimensiones siguientes:

Tolva Cuadrada (eslabones) de 10' x 10' y 10" de altura: para bolas de 2" de diámetro con dos ó tres capas de bolas.

Tolva rectangular de 8' x 10' y 10" de altura para bolas de 3" de diámetro en dos capas y una sola capa.

Se trataron cargas de bolas de 2.8Ton.

GRÁFICO N° 21
T.T. DE TEMPLE DE BOLAS KROMOX
HORNO DE PLANTA



3.6.2 VELOCIDAD DE CALENTAMIENTO

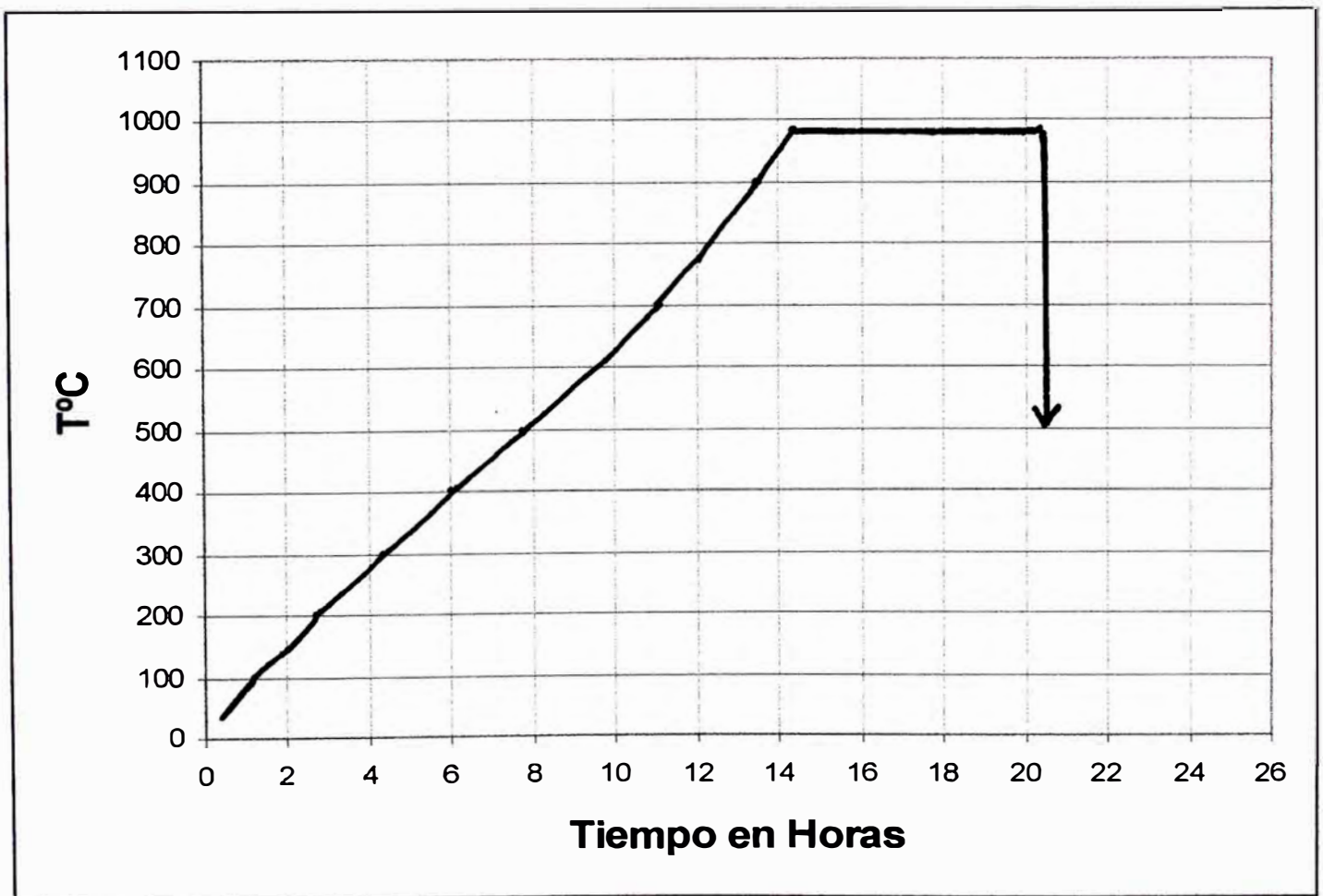
Horno de Tratamiento Térmico de planta

Tratamientos térmicos de temple de Bolas Kromox de 2" ϕ y 3" ϕ

El tratamiento térmico de las bolas kromox, se realizó bajo las siguientes pautas:

1. Cargar en horno frío (100°C máx.) con bolas de 2" ϕ y 3" ϕ
2. Calentar hasta 650°C, 25°C cada 1/2 hora.
3. Mantener la temperatura a 650°C por 2 horas.
4. Elevar la temperatura 25°C cada 15 minutos, hasta los 990°C.
5. Mantener la temperatura, 6 horas.

GRÁFICO N° 22



3.6.3 MEDIO DE ENFRIAMIENTO

Temple con ventilación forzada (campana) por 1 hora.

El tiempo máximo de trasladar las bandejas del horno a campana = 2 minutos como máximo.

3.6.4 REVENIDO

1. Cargar en Horno frío (50° a 100°C). Calentar 25°C cada 1/2 hora, hasta 480°C.
2. Mantener la temperatura, 8 horas (ocho horas).
3. Enfriar al ambiente.

NOTA: Para los calentamientos a baja temperatura, se usó solamente quemadores a gas.

TRATAMIENTOS TÉRMICOS DE BOLAS KROMOX DE 80 mm - 90 mm ϕ

En horno con recubrimiento de fibra cerámica de 10 Ton de capacidad.

Los tratamientos térmicos de las bolas se realizó de acuerdo a las siguientes pautas:

TEMPLADO

Velocidad de calentamiento 112°C/hora hasta 990°C.

Mantener la temperatura a 990°C, por 6 horas.

Temple con ventilación forzada (campana) por 1 hora.

REVENIDO

Velocidad de calentamiento 112°C/hora hasta 480°C.

Mantener la temperatura a 480°C por 8 horas.

Enfriamiento al ambiente.

Las bolas se trataron térmicamente en 2 capas, tanto en temple como en el revenido.

El tiempo transcurrido entre el inicio de apertura de la puerta del horno y la colocación de las bandejas de 10' x 10 pies en la campana de soplado fue inferior a 2 minutos.

Se toma una muestra de la superficie y una del fondo por cada bandeja para los respectivos controles. Para que el lote sea OK, la dureza de superficie y/o masa será mínimo 60 Rc. y la austenita retenida 5% máximo.

TRATAMIENTO TÉRMICO BOLAS KROMOX 2" ϕ Y 3" ϕ

1. Preparar (cargar) las bolas en las bandejas.

Se usó tolva cuadrada (eslabones): Bolas de 2" (nueva producción) en dos o tres capas de bolas.

Se usó tolva rectangular: Bolas de 3" (producción anterior) una sola capa.

2. Calentamiento rápido hasta 1000°C.
3. Retención a 1000°C durante 6 horas.
4. Sacar las dos tolvas a la vez y enfriar en simultáneo en el ventilador forzado de flujo vertical (campana), soplando por 60 minutos.
5. Revenido, se efectuó después de 16 horas a 480°C, permaneciendo 6 horas a esta temperatura, luego enfriamiento al medio ambiente.
6. Se efectuó el muestreo para el control de dureza.

NOTA:

- a. Habiendo dos bandejas (tolvas) en tratamiento simultáneo, éstas deberán acomodarse de acuerdo al área que cubre la campana.
- b. Antes de efectuar el revenido, se tomaron datos de dureza.

CONTROLES A BOLAS KROMOX DE 2" ϕ Y 3" ϕ

Se realizaron los siguientes controles a las bolas Kromox por cada bandeja tratada térmicamente.

Control de dureza a una bola de la superficie y a una bola del fondo. Para que sea aprobada, la dureza en ambos casos, será mínimo 53Rc (550 Brinell).

A la misma muestra se tomó control de austenita retenida. Aceptando un máximo de 5% de austenita retenida.

Se tomó una muestra de la superficie y una muestra del fondo para hacer pruebas de impacto, lo cual consistió en un mínimo de 500 golpes por bola. Cualquier rotura inhabilitó definitivamente el lote, se adjunta la descripción del ensayo.

Se tomó una muestra radiográfica, de acuerdo a los tipos de defectos que se encuentren en las bolas.

NOTA: Se modifica la temperatura de revenido de 480°C a 510°C. La velocidad de calentamiento del tiempo a temperatura se mantiene.

Se indica que el lote solicitado para las pruebas en Cementos Pacasmayo son 11 Ton, de 2" ϕ y 9 Ton de 3" ϕ (total 20 Ton).

Las bolas mostraron desgaste poliédrico por despostillamiento al tener 1 A 5 % de austenita retenida y dureza no uniforme de superficie a centro. La evaluación por parte de Cementos Pacasmayo se limitó a informar que el rendimiento es inferior a bolas que usan proveídas por el fabricante Magateaux.

El medio de temple en planta (aire forzado) no cumple con un temple adecuado produciéndose el efecto de masa, por este motivo las investigaciones se centraron en encontrar un medio de temple eficiente para planta, de tal forma que exista correlación en los ensayos de laboratorio y ensayos de planta.

PRUEBA DE IMPACTO A BOLAS KROMOX DE 3"φ

Se dispone de un sistema de cangilón vertical de 15 metros de altura, que gira a 15 revoluciones por minuto. En el capacho del cangilón se deposita la bola kromox a evaluar previamente pesada; el cangilón en su movimiento deja caer la bola en la parte superior, impactando la bola sobre un forro fijo de acero al manganeso austenítico, ubicado 14 metros y en ángulo de 45° debajo del punto superior del cangilón. Al término de 500 golpes, las bolas se pesan y observan el despostillamiento calificándose el lote como pasa o rechazado.

TABLA N° 128

Resultados de impacto a bolas de 3"φ

% A.R.	Peso de la bola en gramos				Pérdida de peso
	Inicial	A 500 Impactos	A 1000 Impactos	A 2000 Impactos	
5 % A.R.	1950	1948	1946	1942	8 Gr.
0 % A.R.	1950	1950	1950	1950	0

A.R.=Austenita retenida.

Esta prueba, también se realiza con las bolas recogidas por el magneto y se dejan caer sobre las bolas desde una altura mínima de 20 metros y si se observa rajaduras, despostillamiento, se rechaza el lote.

Con 5% de austenita retenida dejando caer una tonelada de bolas de 3" φ en un impacto se observó 10 bolas despostilladas.

Con 1% de austenita retenida dejando caer una tonelada de bolas de 3" φ en un impacto no observó bola despostillada.

Esta prueba indicó que se debe limitar el porcentaje de austenita retenida al nivel de cero, importante para evitar el despostillamiento.

CONTROL TEMPERATURA BOLAS KROMOX 2" ϕ DESPUÉS DEL TEMPLE CON SOPLADORES

El control respectivo con el potenciómetro registran las siguientes temperaturas:

Hora salida de carga 22⁰⁶ horas

Inicio de soplado 22⁰⁸ horas

Temp. Salida bolas: 1000°C

TABLA N° 129

HORA: min	TEMP. °C	HORA: min	TEMP. °C	HORA: min	TEMP. °C
22:12	680	22:33	328	22:52	167
22:15	648	22:34	316	22:53	162
22:16	638	22:35	304	22:54	157
22:17	618	22:36	292	22:55	152
22:18	596	22:37	282	22:56	174
22:19	575	22:38	272	22:57	173
22:20	553	22:39	262	22:58	139
22:21	531	22:40	253	22:59	135
22:22	510	22:41	244	23:00	130
22:23'30"	480	22:42	236	23:01	126
22:24	469	22:43	227	23:02	122
22:25	450	22:44	219	23:03	118
22:26	432	22:45	212	23:04	114
22:27	415	22:46	205	23:05	111
22:28	399	22:47	197	23:06	107
22:29	383	22:48	191	23:07	104
22:30	368	22:49	185	23:08	101
22:31	355	22:50	179	23:09	98
22:32	341	22:51	173	23:10	94

GRÁFICO N° 23

CURVA DE ENFRIAMIENTO DE BOLAS KROMOX DE 2" SOPLADAS EN LAS BANDEJAS

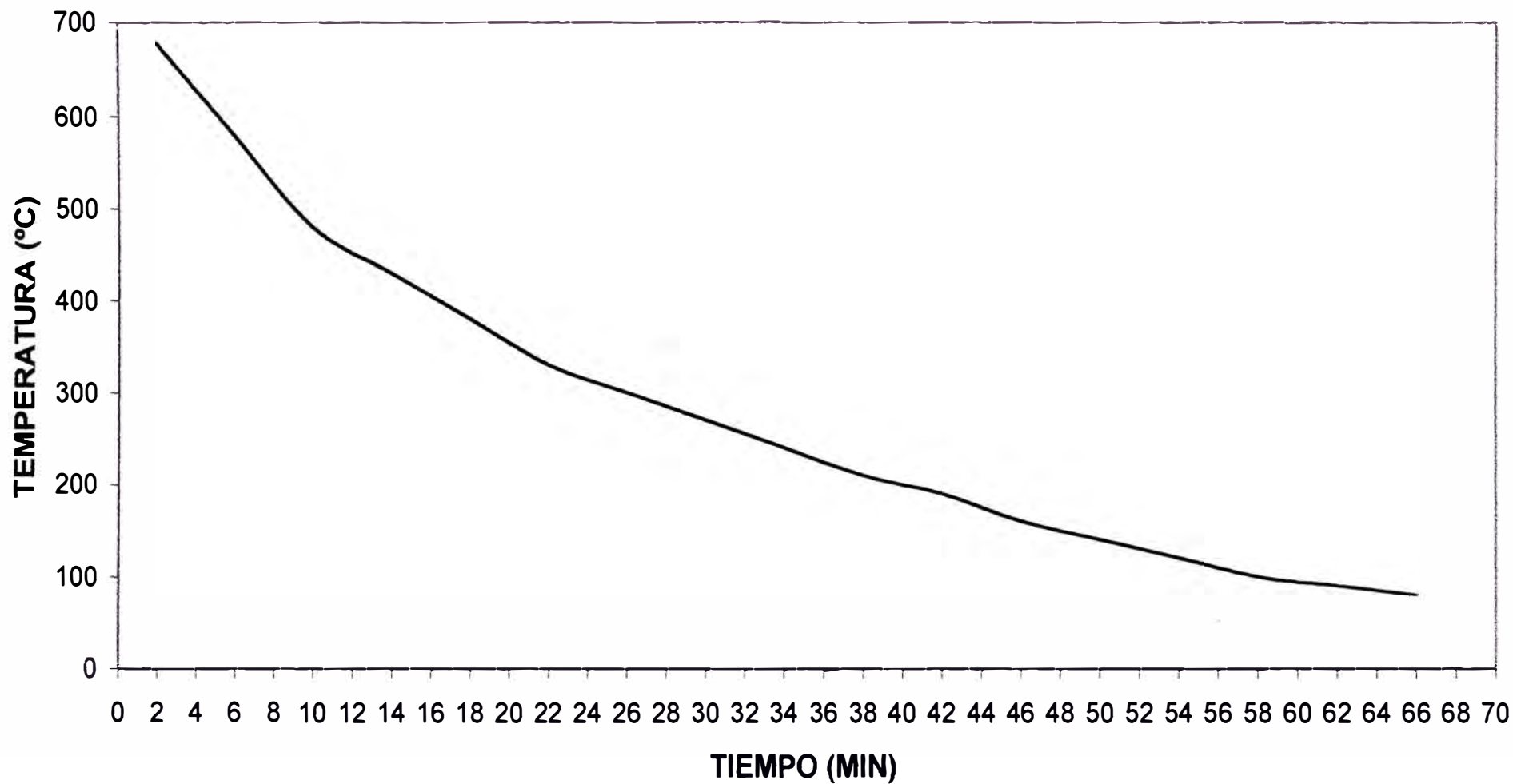


TABLA DE EQUIVALENCIA: DUREZA Rc VS. BRINELL**EXCLUSIVO PARA KROMOX Y NI - HARD**

Rc	HB	Rc	HB	Rc	HB	Rc	HB	Rc	HB
40.0	410	45.0	453	50.0	515	55.0	594	60.0	692
40.1	411	45.1	453	50.1	516	55.1	596	60.1	694
40.2	411	45.2	454	50.2	517	55.2	598	60.2	696
40.3	412	45.3	455	50.3	519	55.3	599	60.3	698
40.4	413	45.4	456	50.4	520	55.4	601	60.4	700
40.5	414	45.5	457	50.5	522	55.5	603	60.5	702
40.6	414	45.6	459	50.6	523	55.6	605	60.6	705
40.7	415	45.7	460	50.7	525	55.7	607	60.7	707
40.8	416	45.8	461	50.8	526	55.8	608	60.8	709
40.9	416	45.9	462	50.9	528	55.9	610	60.9	711
41.0	417	46.0	463	51.0	529	56.0	612	61.0	713
41.1	418	46.1	464	51.1	530	56.1	614	61.1	716
41.2	419	46.2	465	51.2	532	56.2	616	61.2	718
41.3	419	46.3	466	51.3	533	56.3	618	61.3	720
41.4	420	46.4	467	51.4	535	56.4	620	61.4	722
41.5	421	46.5	469	51.5	536	56.5	621	61.5	725
41.6	422	46.6	471	51.6	538	56.6	623	61.6	727
41.7	423	46.7	472	51.7	540	56.7	625	61.7	729
41.8	423	46.8	473	51.8	541	56.8	627	61.8	731
41.9	424	46.9	474	51.9	543	56.9	629	61.9	734
42.0	425	47.0	476	52.0	544	57.0	631	62.0	736
42.1	426	47.1	477	52.1	546	57.1	633	62.1	738
42.2	427	47.2	478	52.2	547	57.2	635	62.2	740
42.3	428	47.3	479	52.3	549	57.3	637	62.3	743
42.4	428	47.4	480	52.4	550	57.4	639	62.4	745
42.5	429	47.5	482	52.5	552	57.5	641	62.5	747
42.6	430	47.6	483	52.6	554	57.6	643	62.6	750
42.7	431	47.7	484	52.7	555	57.7	645	62.7	752
42.8	432	47.8	485	52.8	557	57.8	646	62.8	754
42.9	433	47.9	487	52.9	558	57.9	648	62.9	757
43.0	434	48.0	488	53.0	560	58.0	650	63.0	759
43.1	435	48.1	489	53.1	562	58.1	652	63.1	761
43.2	436	48.2	490	53.2	563	58.2	654	63.2	764
43.3	436	48.3	492	53.3	565	58.3	656	63.3	766
43.4	437	48.4	493	53.4	567	58.4	658	63.4	768
43.5	438	48.5	494	53.5	568	58.5	660	63.5	771
43.6	439	48.6	496	53.6	570	58.6	663	63.6	773
43.7	440	48.7	497	53.7	572	58.7	665	63.7	776
43.8	441	48.8	498	53.8	573	58.8	667	63.8	778
43.9	442	48.9	499	53.9	575	58.9	669	63.9	780
44.0	443	49.0	501	54.0	577	59.0	671	64.0	783
44.1	444	49.1	502	54.1	578	59.1	673	64.1	785
44.2	445	49.2	504	54.2	580	59.2	675	64.2	788
44.3	446	49.3	505	54.3	582	59.3	677	64.3	790
44.4	447	49.4	506	54.4	584	59.4	679	64.4	793
44.5	448	49.5	508	54.5	585	59.5	681	64.5	795
44.6	449	49.6	509	54.6	587	59.6	683	64.6	798
44.7	450	49.7	510	54.7	589	59.7	685	64.7	800
44.8	451	49.8	512	54.8	591	59.8	687	64.8	803
44.9	452	49.9	513	54.9	592	59.9	690	64.9	805
45.0	453	50.0	515	55.0	594	60.0	692	65.0	808

3.6.5 CONTROL DE DUREZA Y PORCENTAJE DE AUSTENITA RETENIDA
(BOLAS KROMOX DE 2" ϕ)

TABLA N° 130

	<u>SUP.</u>	<u>1/8"</u>	<u>1/4"</u>	<u>3/8"</u>	<u>1/2"</u>	<u>CTR</u>	<u>MASA</u>	<u>% AR</u>
S	62.3	62.3	62.6	62.5	62.7	62.9	62.41	
S	61.9	62.0	62.0	61.8	60.5	61.0	61.7	0.0
F	62.8	62.0	61.8	62.0	62.0	62.2	62.21	2.0
F	60.6	60.0	60.7	60.8	61.0	60.3	60.40	1.2
F	62.4	61.0	61.6	61.9	61.7	61.9	61.78	0.0
F	62.5	61.6	61.3	61.5	61.6	61.2	61.7	1.5
F	61.8	59.4	58.5	59.2	58.5	59.8	59.6	1.0
F	61.8	60.7	60.4	61.0	60.6	60.6	60.9	1.0
S	61.0	60.8	61.0	60.7	60.5	60.5	60.8	0.0
S	62.1	61.2	60.6	60.5	60.9	60.5	61.1	0.0
S	61.9	61.4	61.4	60.4	61.8	60.8	61.4	0.5
S	62.5	61.6	61.3	61.5	61.6	61.2	61.7	0.0
S	60.1	60.6	60.5	61.5	61.1	61.1	60.6	-
F	60.9	60.1	61.1	60.1	60.7	60.5	60.6	-
S	60.9	62.8	62.1	61.3	61.9	61.4	61.7	0.5
S	61.6	61.2	60.9	60.8	60.3	60.7	60.9	0.0
F	60.6	60.6	60.6	60.5	60.5	60.5	60.6	0.0
F	61.3	62.0	61.5	62.3	62.7	61.9	61.8	1.2
F	61.3	61.4	61.2	61.6	60.7	61.9	61.28	
S	60.0	60.0	60.0	60.0	60.0	59.8	60.0	1.0
S	62.3	62.0	61.7	62.0	60.7	62.0	61.87	0.8
F	60.1	60.6	61.1	60.0	60.5	60.0	60.4	1.5
F	61.6	60.9	61.0	60.5	60.5	60.0	61.04	0.8
X	61.5	61.1	61.1	61.1	61.0	61.0	61.1	
σ_{11}	0.8	0.8	0.8	0.8	0.9	0.8	0.7	

S = Superficial	}	Muestreo por	}	<u>CONTROL POR CARGA DE</u>
F = Fondo				

IRREGULARIDADES EN LOS TRATAMIENTOS TÉRMICOS DE LAS BOLAS

KROMOX 2" ϕ

De las 8 carga de tratamientos térmicos las últimas 3 cargas de tratamientos térmicos de las bolas se han obtenido valores de dureza en el rango bajo de lo establecido 59.0 Rc; mínimo 60.0 Rc. requerido 62.0 Rc.

Según el reporte de los controles que se están realizando, se han observado algunas irregularidades en la parte operativa, las mismas que deberán evitarse o corregirse.

1. Durante el soplado, no bajan la Campana hasta cubrir totalmente las bandejas. Bolas del fondo, no enfrían a la velocidad requerida, si esta no funciona bien, no deberá realizarse el tratamiento térmico por el riesgo de rechazar la carga.
2. Demora en el traslado de las bandejas con bolas de horno a la campana de soplado, el tiempo utilizado debe ser máximo 2 minutos.
3. Se han realizado 2 revenidos, en la que se han cargado 3 bandejas de bolas, práctica no recomendable que debe evitarse por sobrecalentarse la tercera bandeja de bolas.
4. En algunos casos se han recargado las bandejas, debe ser máximo 3 capas de bolas, aproximadamente al ras de las bandejas disponibles, a fin de tener una libre circulación del flujo de aire para todas las bolas.
5. No se realizaron:
 - a) Instalación de termocuplas – potenciómetro
 - b) Coordinación de la regulación de llama de los quemadores sobre la base de la correlación Chart de Control - Chart referencia - Potenciómetro.
 - c) Control del ciclo de calentamiento cada 30 minutos.
 - d) Tratamiento en el horno con revestimiento de fibra cerámica.

CAPITULO 4

ANALISIS Y DISCUSION DE RESULTADOS

4.1 ANALISIS Y DISCUSION SOBRE COMPOSICION QUIMICA

- El porcentaje del elemento carbono puede ser mayor o menor según se trate de bolas que serán sometidas a condiciones más exigentes de abrasión o impacto respectivamente.
- La aleación elegida para producir bolas en fierro blanco por sus propiedades óptimas de resistencia a la abrasión es el KROMOX, templando en polímero al 15%, por su geometría simple durante el templado no tiene tendencia a fracturarse.
- El temple en polímero al 15% evita la formación de Bainita y Perlita fases negativas para desgaste por abrasión en molienda y tienen menor dureza que la martensita y carburos.

Una vez elegido el análisis químico para bolas kromox, la investigación se centra en los tratamientos térmicos de temple y revenido.

COMPOSICION QUIMICA OBTENIDAS EN LAS INVESTIGACIONES

3 COLADAS EN EL HORNO ACIDO:

C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	Tesis
3.16	1.99	1.19	.01	.057	.187	17.37	.08	.046	A

4 COLADAS EN EL HORNO BASICO:

C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	Tesis
3.16	2.14	0.61	.028	.01	.08	14.67	.03	.05	B

4.2 ANALISIS Y DISCUSION SOBRE FUSION

La fusión de hierro blanco aleado (kromox) es similar a los kromox para piezas (impulsores, forros, cajas de bomba, placas de desgaste, etc.), cuyo proceso es ampliamente conocido tanto en hornos eléctrico de arco e inducción.

La fusión económica se consigue no excediendo la temperatura de 1471°C en el sangrado, el tiempo de fusión fue menor a 2 horas, se logro 1.5 horas (TAP TO TAP), como promedio en las 7 coladas el uso correcto de la carga metálica es disponer de chatarra de Kromox cuyo costo por tonelada es de \$55 frente a \$600 por Ton del Fr Cr estándar.

El consumo promedio de Kw-h en las 7 coladas fue de 502 Kw/Ton.

No existe diferencia en el proceso de fusión ácida y el proceso de fusión básica en la obtención de la calidad de la composición química.

4.3 ANALISIS Y DISCUSION TRATAMIENTOS TERMICOS EN LABORATORIO Y PLANTA - MICROESTRUCTURAS Y PROPIEDADES

Los resultados de las investigaciones en planta no guardan relación con los obtenidos en el laboratorio.

Se tomó durezas en tres puntos diferentes por bola (1/4, 1/2 y 1" desde la superficie) obteniéndose valores iguales en los tres puntos de cada bola.

Los medios de temple utilizados (A = Al ambiente y S = Soplado) no fueron significativos en la dureza, en ambos casos dieron valores iguales.

Para la obtención de la máxima dureza. La temperatura de austenizado fue la variable determinante. Con temperaturas más altas se obtuvieron durezas más altas, alcanzando niveles similares a los obtenidos con el kromox alto carbón.

Estructuralmente difieren en la cantidad de carburos secundarios precipitados. Siendo mayor a la temperatura de 1000°C, menor a la temperatura de 950°C y casi nula a la temperatura de 900°C.

El revenido a 450°C no afectó la dureza inicial. En cambio el revenido a 500°C disminuyó en aproximadamente 50 unidades Brinell (Martensita revenida) los niveles de 950 y 900°C.

1. Los resultados de dureza dan valores dentro de los rangos requeridos, cuyos promedios de ocho tratamientos completos son los siguientes:

TABLA N° 131

<u>Dureza</u>	<u>Superf</u>	<u>1/8"</u>	<u>1/4"</u>	<u>3/8"</u>	<u>1/2"</u>	<u>CTR</u>	<u>MASA</u>
Rockwell C	61.5	61.1	61.1	61.0	61.0	61.0	61.7
Brinell	708	698	698	695	695	695	712

2. Del total procesado se resume:

Total Procesado inspectado 22.654Ton (64.9Cil)

Total OK 19.740Ton. (21Cil)

Bolas declaradas chatarra 2.914Ton (3.1Cil) = (12.87%), es considerado muy alto (repetición de tratamientos térmicos).

Lote entregado anteriormente 2.8 Ton. con lo cual se dispuso las 20 Ton para ser evaluados por Cemento Pacasmayo (informaron bajo rendimiento)

3. No se tiene un templado eficiente porque el medio de temple no es el más indicado en planta, observado por dureza no uniforme de superficie al centro de la bola, a pesar que en el Laboratorio se tuvo éxito (dureza, uniforme de superficie al centro).

4. Es importante templar en planta: con polímero al 15% tal como dio los resultados óptimos en laboratorio (dureza, uniforme de superficie a centro), para este propósito las fundiciones utilizarán la poza de templado para tratamiento térmico de piezas de acero al manganeso tipo HADFIELD (C = 1%, Mn = 13%).

Los Resultado de las investigaciones en el laboratorio son óptimos con polímero al 15%

La microestructura revela bola con tratamiento térmico correcto de: temple y revenido.

Por lo tanto el desgaste de la bola será uniforme (esférica).

Tratamiento térmico de temple a 1000°C y en polímero al 15%.

Revenido a 500°C por 6 horas garantiza 0% de austenita retenida, medido con austenitoscopio, ya que es difícil observarlo en el microscopio óptico, aún utilizando el reactivo de Villela.

La dispersión y abundancia de carburos secundarios en la matriz es sinónimo de calidad, confirmado por los espectros en las microestructuras

Este tratamiento térmico de temple en polímero falta poner en marcha en planta.

4.4 COSTOS Y ASPECTOS ECONOMICOS

Durante el proceso de fabricación se usó la calidad de concordancia, que relaciona el menor costo de fabricación y la pérdida por dar mayor calidad (la calidad óptima no justifica una mayor calidad).

En base a los parámetros de producción bolas kromox

de las bolas kromox de 2" y 3" se estructuraron los costos de producción.

Parámetros de producción:

ϕ Bola	<u>2" ϕ</u>	<u>3" ϕ</u>
Peso x bola (Kg.)	0.58	1.95
# Bolas/molde	36	14
# Moldes/Estante	16	12
Peso Bolas/Estante (Kg.)	334.1	327.6
Peso Vaciado/Estante (Kg.)	552.2	480.3
Eficiencia de Vaciado (%)	60.5	68.2
Eficiencia de Hornos	94.2%	94.2
Chatarra	5.0%	5.0

Se ha estimado una chatarra total de 5%.

Eficiencia de producción en 2":

$$100 \times .942 \times .605 \times .95 = 54.1\%$$

Eficiencia de producción en 3":

$$100 \times .942 \times .682 \times .95 = 61.0\%$$

COSTOS DE MATERIALES

CHATARRA DE ACERO			55 \$/Ton
CHATARRA DE ACERO INOXIDABLE			
FERRITICO			200 \$/Ton
<u>Fe-Cr:</u>			
7 %C	60%Cr	1.5%Si	600 \$/Ton
5% C	60%Cr	1.5%Si	615 \$/Ton
2%C	70%Cr		940 \$/Ton
1%C	70%Cr		965 \$/Ton
0.06%C	70%Cr		929 \$/Ton
0.03%C	70%Cr		1013 \$/Ton
0.015%C	70%Cr		1135\$/Ton
 <u>Fe-Cr-Si:</u>			
0.05%C	40%Cr	40%Si	535 \$/Ton
 <u>Fe-Mn:</u>			
7 %C	78%Mn		292 \$/Ton
2% C	78%Mn		551 \$/Ton
1%C	78 %Mn		567 \$/Ton
0.01%C	78% Mn		729 \$/Ton
 <u>Ni:</u>			
Ni pellets			3808 \$/Ton
Fluorita			24 \$/Ton
Cal			12 \$/Ton
Oxígeno			0.65 \$/m ³ .
Argon			0.19 \$/m ³ .
Tiempo de fusión en horno de arco eléctrico			2.10 \$/Ton/hora

TABLA N° 132

CONSUMO DE PETRÓLEO EN TRATAMIENTO TÉRMICO DE BOLAS
KROMOX

PESO TRATADO	CONSUMO GALONES PETRÓLEO	TOTAL HORAS	G/H	G/Ton
2396 Kgs.	153	12h50'	11.9	63.9
2880 Kgs.	224	17H45'	12.6	77.8
4076 Kgs.	224	21H57'	10.2	55.0
2152 Kgs.	262	17H08'	15.3	121.7

G= Galones H= Horas.

CONSUMO DE MATERIALES PARA LA PRODUCCION DE UNA TONELADA

Fe-Si	= 5Kg/Ton
Fe-Mn	= 7Kg/Ton
Fe-Cr Ac	= 99 Kg/Ton
Fe-Cr BC	= 14 Kg/Ton
Moly	= 11 Kg/Ton
Ca-Si	= 1 Kg/Ton
Aluminio	= 1 Kg/Ton
Cobre	= 10Kg/Ton
Chatarra de acero	= 584 Kg/Ton
Meltzona	= 4.88 Kg/Ton
Electrodos	= 5.39 Kg/Ton
Electrodo molido	= 13 Kg/Ton
Kw-h	= 502 Kw/Ton
Regresos Kromox	= 334 Kg/Ton
Ladrillo alúmina	= 1.24 Kg/Ton
Ladrillo básico	= 0.87 Kg/Ton
Magnamix	= 16.42 Kg/Ton

Oxígeno	= 2.8 m ³ /ton
Petroleo	= 5 galones/Ton
Eficiencia	= 50.27

**DESCOMPOSICION DEL COSTO DE MANUFACTURA DEL METAL PARA
BOLAS KROMOX (EN PORCENTAJE) PARA UNA TONELADA**

1. FERROALEACIONES	:	35 % =	\$ 297.5
2. CHATARRA	:	18 % =	\$ 153
3. SUELDOS Y JORNALES(C.F.)	:	10 % =	\$ 85
4. ENERGIA	:	8 % =	\$ 68
5. ENERGIA (C.F.)	:	8 % =	\$ 68
6. REFRACTARIOS	:	8 % =	\$ 68
7. OTROS MATERIALES	:	6 % =	\$ 51
8. ELECTRODOS	:	5 % =	\$42.5
9. OTROS GASTOS (C.F.)	:	1 % =	\$8.5
10. VARIOS	:	1% =	\$8.5
TOTAL		100 % =	\$ 850

Dentro del rubro 7 OTROS MATERIALES se consideran: oxígeno, carbón, arenas, resinas, gasolina, petróleo, polímero, mantenimiento (eléctrico, mecánico, talleres).

Dentro del rubro 9 OTROS GASTOS (C.F) se consideran: seguridad e higiene industrial, varios.

Dentro del rubro 10 VARIOS se consideran: costos de diseño, costos de producto final, costo de realimentación (conocer proceso tecnológico, proyectos, visitas técnicas de los usuarios de bolas Kromox).

Costo Fijo (C.F.) = 19 %

Costo Variable (C.V.) = 81 %

El Costo Fijo no es función de la producción permanece constante con o sin producción.

El Costo Variable es función de la producción

Se tomaron decisiones técnicas más que económicas para el cálculo de los costos de manufactura.

Para la producción de bolas en el país no se requiere de mayor inversión económica ya que se utilizarían la infraestructura para tratamientos térmicos de aceros al manganeso austeníticos los cuales tienen hornos de tratamientos térmicos que llegan a 1300 °C y 1 poza para templar las piezas en agua. Para el caso de bolas la temperatura de temple es de 1000°C, y la poza se llenará con polímero a 15 %.

La justificación del proyecto se basa en razones de índole económico, desarrollo tecnológico los cuales justifican la fabricación de bolas por fundiciones nacionales como las siguientes empresas que tienen la infraestructura para tratamientos térmicos de aceros al manganeso austeníticos:

Fundición Callao S.A.

Consorcio Metalúrgico S.A.

Metalúrgica Peruana S.A.

Hidrostal S.A.

Fundición Central S.A.

Fundición Maleable S.A.

4.5 RECOMENDACIONES PARA EVALUAR RENDIMIENTO DE BOLAS EN LA INDUSTRIA DEL CEMENTO

Es muy importante el consumo de bolas Kromox, en los costos operacionales en molienda. El costo asociado a las bolas depende de dos factores principales:

1. Precio
2. Calidad de las bolas (durabilidad o consumo).

4.5.1 MARCO TEÓRICO DE REFERENCIA

CINÉTICA DE DESGASTE

La teoría más ampliamente aceptada para caracterizar la cinética de consumo de cuerpos moledores en molinos rotatorios es la denominada Teoría Lineal del Desgaste; según la tasa o velocidad de consumo del cuerpo molidor es directamente proporcional al área superficial expuesta por éste a los diversos mecanismos de desgaste (abrasión y/o corrosión):

$$\Omega_1 = d(m)d(t) = K_m A_b \quad (1)$$

donde:

Ω_1 = velocidad de desgaste, Kg./hr

m = peso de la bola, Kg.; Transcurridas t horas su ingreso al molino.

A_b = área del cuerpo molidor expuesta al desgaste, m^2

K_m = constante cinética de desgaste, Kg/hr/ m^2 (másica).

Equivalentemente, tomando en consideración la geometría del cuerpo molidor (estera o cilindro), se obtiene:

$$\frac{d(d)}{d(t)} = -2K_m/P_b = -K_d \quad (2)$$

donde:

d = tamaño (diámetro) del cuerpo molidor, transcurridas t horas desde su ingreso al molino, mm.

P_b = densidad del cuerpo molidor, gr./cm³

K_d = constante cinética de desgaste, mm/hr (lineal)

La expresión anterior es fácilmente integrable para el caso más frecuente de recarga con sólo un tamaño de cuerpos molidores d^R (modalidad denominada monorecarga); obteniéndose:

$$d = d^R - K_d t \quad (3)$$

Lo que indica que la reducción del tamaño del cuerpo molidor es uniforme en el tiempo (cinética lineal).

4.5.2 COSTO EFECTIVO

Un producto es considerado costo efectivo cuando garantiza el menor costo de aplicación expresado típicamente en \$/Ton. de clínker molido

$$\text{CE} = \text{Precio} * \text{Consumo}$$

(\$/Ton. de clínker molido) = (\$/Ton. Producto) * (Kg. de bolas Kromox consumido/Ton clínker molido)

Así un producto de mayor precio puede ser costo efectivo si su tasa de desgaste es suficientemente baja.

Ejemplo de costo efectivo de bolas Kromox utilizados en el mercado nacional:

MAXI KROM (bolas Belga) : 1,500 \$/Ton x 227.27 Kg/Ton = 340.90 \$/Ton

KRUDOR (bola Brasileira) : $1,360 \text{ \$/Ton} \times 272.72 \text{ Kg/Ton} = 370.90 \text{ \$/Ton}$

El mejor costo efectivo es el de MAXI KROM a pesar que su precio es mayor.

4.5.3 TASAS ESPECÍFICAS DE CONSUMO

En la práctica industrial, es habitual medir la calidad de las bolas, kromox sobre la base de las distintas TASAS ESPECÍFICAS de consumo, como:

- Consumo de bolas kromox por unidad de clinker procesado = gr./Ton.
- Consumo de bolas kromox por unidad de energía demandada = gr./Kwh.
- Consumo de bolas kromox por unidad de tiempo de operación = Kg/hora.

Cada uno de estos indicadores de consumo puede estar afecto a distorsiones propias de las condiciones operacionales de la evaluación y las características de las bolas kromox.

En cambio, parece más apropiado evaluar las bolas kromox en función de sus respectivas constantes cinéticas de desgaste, lo cual permite identificar los riesgos de obtener conclusiones finales equivocadas. Esta cinética de desgaste está caracterizada por la calidad de la microestructura de la bola kromox, responsable de que las velocidades de consumo sean directamente proporcionales al área superficial expuesta a los diversos mecanismo de desgaste como:

1. Impacto o golpe en molienda.
2. Abrasión o fricción en molienda.

Las condiciones microestructurales óptimas la reducción del tamaño de la bola kromox debe ser uniforme en el tiempo (cinética lineal), estas condiciones indican tener en la matriz: 100% de Martensita, 5% del total de carburos como carburos secundarios precipitados y un máximo de 1% de austenita retenida.

No es permitido las fases BAINITA ni PERLITA.

4.5.4 PLAN DE CONTROL DE CALIDAD

Las condiciones de fabricación requieren de un plan de control de calidad muy amplio que indique si el proceso es eficientemente desarrollado en lo concerniente a:

Calidad del diseño (D)

Calidad de Insumos (I)

Calidad del proceso (P)

Calidad del Producto (T) = D + I + P.

Por lo general, estos controles se realizan parcialmente.

PRINCIPALES VARIABLES

- Nivel de inclusiones no metálicas (óxidos, sulfuros, silicato, aluminatos, etc.)
- Temperatura de inicio y fin de transformación martensítica en el polímero al 15%.
- Temperatura y tiempo de austenización.
- Composición química, básicamente C, Cr, Mo, Cu.
- Medio de temple: polímero 15%, Aceite.
- Severidad de temple.
- Coeficiente de película.
- Velocidad crítica de temple.
- Temperatura de salida de la bola del medio de temple (polímero al 15%)
- Porcentaje de austenita retenida.
- Revenido: tiempo y temperatura.
- Elementos residuales (Ni, P, S)
- Microestructura (tipo de carburos)
- Dureza: Frecuentemente controlada en forma deficiente porque el paralelismo de la sección a controlar se realiza manualmente con corte de

disco ya que la mayoría de fabricantes no cuenta con el sistema de corte por electro erosión.

DISEÑO ADECUADO DEL CONTROL DE CALIDAD

Para determinar la calidad de las bolas kromox el sistema de muestreo se basa en la curva operativa de la distribución de Poisson.

Es necesario determinar:

AQL = Acceptable quality level (lote bueno).

LTPD = Lot tolerance percen defective (nivel de calidad lote malo).

n = Tamaño de muestra.

c = Cantidad de defectos.

Las Curva Operacional son cálculos de la distribución Poisson, n grande y probabilidad pequeña o binomial, n pequeño y probabilidad grande.

Nos permite evaluar por muestreo:

Calidad superficial.

Calidad microestructural.

% austenita retenida.

PLAN ANUAL DE CONTROL DE CALIDAD

El Plan Anual de Control de la Calidad MICROESTRUCTURAL DE BOLAS KROMOX se realizaría en base a Muestras Testigos de Dureza. Se consideraría representativo 1(un) Testigo por cada 5 (cinco) Ton. de bolas.

TABLA N° 133
CANTIDAD DE BOLAS KROMOX EN UNA TONELADA

ϕ	Cantidad de Bolas	Matriz y Tipos de Carburos	N° de bolas c/25TN a analizar con MEB y EDS	% Aust. Retenida.
1"	13889		8	
1 1/2"	3704		6	
2"	1739		5	
2 1/2"	864		5	
3"	508		5	
3 1/2"	312		5	
4"	211		4	

MODELO DEL REPORTE POR CADA MUESTRA: POR MEB**ANALISIS MICROESTRUCTURAL DE BOLAS KROMOX DE 3 1/2"**

Muestra: N° ...

TABLA N° 134

Cliente:

Fabricante:

Lote:

Tipo de Aleación:

Norma: **ASTM****DIN****BS**

Nombre Común o comercial: BOLA KROMOX

Microestructura en los niveles de sección característica:

Nivel	Microestructura	Inclusiones	Estándar Fabricante	Observaciones
Sup. a 1/8"				
1/4"				
1/2"				
3/4"				
1"				
Centro				

Análisis químico semicuantitativo:

TABLA N° 135

Sup. a 1/8"	1/4"	1/2"
3/4"	1"	Centro

Conclusiones:

INSPECCIÓN DE DEFECTOS INTERNOS EN BOLAS KROMOX

Evaluar el Nivel de defectos internos en bolas Kromox.

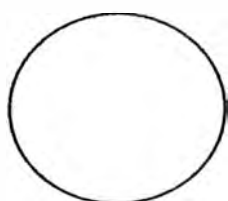
Se tomará una placa de Rayos Gamma por medida de bola Kromox por cada 25 Ton de producción por muestreo aleatorio según el siguiente cuadro que es la capacidad de una placa de 14" x 17".

TABLA N° 136

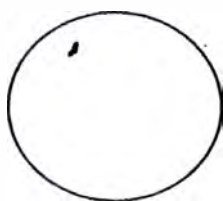
ϕ Bolas	N° Bolas	Clasificación Aceptada 1,2,3 Máximo del Nivel 3
1 1/2"	126	4 bolas con nivel 3
2"	84	3 bolas con nivel 3
2 1/2"	40	2 bolas con nivel 3
3"	32	1 bola con nivel 3
3 1/2"	18	1 bola con nivel 3
4"	12	1 bola con nivel 3

La calificación 1 y 2 son excelentes para bolas Kromox, el resto se debe declarar CHATARRA.

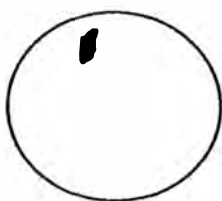
GRÁFICO DE DEFECTOS INTERNOS



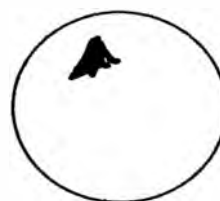
1



2



3



4



5



6



7



8



9



10

INSPECCIÓN DE CALIDAD SUPERFICIAL DE BOLAS KROMOX

Separar la producción que no cumpla con el nivel de calidad aceptado.

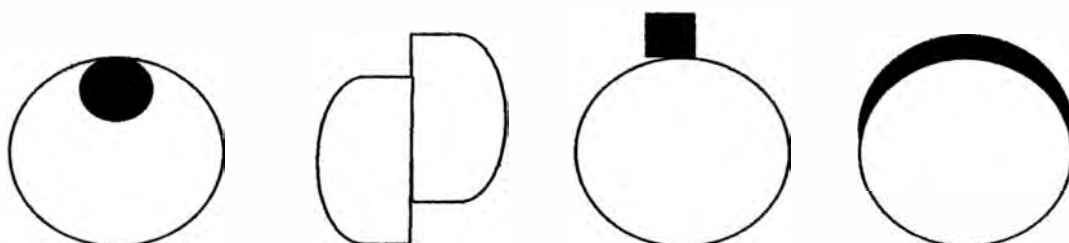
La inspección será hecha bola por bola en forma visual, al final de la línea de producción.

La separación de las bolas Kromox que no cumplan con el Nivel de Calidad se realizará de acuerdo a la tabla siguiente:

TABLA N° 137

ϕ Bola	Inclusión Arena Escoria, Gas (L ³)	Desplazamiento	Muñones	Rebabas
1 1/2	1 mm	1 mm	1 mm	1 mm
2	1 mm	1 mm	1 mm	1 mm
2 1/2	1 mm	1 mm	1 mm	1 mm
3	1 mm	1 mm	1 mm	1 mm
3 1/2	2 mm	2 mm	2 mm	2 mm
4	2 mm	2 mm	2 mm	2 mm

Bolas con rajaduras, fuga de metal y gota fría son declarados CHATARRA.



4.5.5 METODOS PRACTICOS DE EVALUACION

Las bolas kromox pueden ser evaluadas de varias maneras. Bolas individualizadas (marcadas) pueden ser pesadas, colocadas dentro de un molino durante un tiempo determinado, y luego ser repesadas para calcular su pérdida de peso.

La prueba siguiente puede ser más informativa: una serie de tests a escala industrial, en varios molinos, durante un periodo extendido de tiempo. Este tipo de prueba elimina el efecto de las muestras pequeñas y refleja velocidades de desgaste y economía de costo de cantidades comerciales de medios de molienda. Se considera necesario un tiempo de purga de 9 meses y un periodo de prueba de 9 meses adicionales, para desarrollar datos precisos. Naturalmente, debe registrarse información precisa del peso de bolas, tiempo de operación y tonelaje molido, durante el periodo en cuestión. Un simple cálculo de velocidad de desgaste multiplicado por costo unitario del medio de molienda determina la verdadera efectividad o economía de costo del lote particular de bolas kromox.

Se aconseja efectuar observaciones periódicas durante el periodo de pruebas, y también durante la operación de rutina, para monitorear la carga. Se puede realizar el muestreo fácilmente la carga, examinando y registrando 25 bolas en cada uno de las 4 esquinas del molino. Las bolas deben ser seleccionadas ciegamente ya que el ojo humano es instintivamente atraído por las bolas defectuosas. No son permitidas bolas fracturadas en la carga. Esta es la razón primordial para controlar periódicamente la carga de bolas, ya que roturas de bolas aumenta el consumo total y afectando la finura del clinker.

CAPITULO 5

CONCLUSIONES

1. Es posible fabricar bolas de calidad para la industria del cemento siguiendo la misma tecnología de fabricación de piezas en metal kromox de la norma ASTM A532, eligiendo como medio de temple adecuado el polímero al 15%, con temperatura del baño entre 35 - 40°C.
T° de salida de las bolas del temple: entre 480-500°C.
Tiempo de permanencia de las bolas en el polímero de acuerdo al módulo de enfriamiento del diámetro de bola (30 a 55 segundos).
Para este fin utilizar el horno de tratamientos térmicos y poza para templar aceros al manganeso austeníticos tipo Haldfield.
2. La microestructura de la matriz de las bolas kromox debe ser 100% martensítica conteniendo no menos del 5% del total de carburos como carburo secundario precipitado y un máximo de 1% de austenita retenida.
No es permitido la presencia de Bainita ni perlita.
Para la determinación del porcentaje de austenita retenida, es necesario contar con el austenitoscopio, porque la observación de la austenita en el microscopio óptico es difícil de identificar (aun utilizando el reactivo de Villela). El precio del equipo austenitoscopio se encuentra en el mercado entre \$ 1200 a \$ 2000.
3. Para evaluar la dureza de masa Rc de las bolas, es importante realizarlo en zona de fractura (no afectada por corte) y mantener el paralelismo entre zona de fractura y zona de apoyo o para mayor seguridad realizar el corte por electroerosión.
4. La composición química centra sus variables en porcentaje de C, Cr, Mo, Cu, Cr/C, de la norma ASTM A532

A mayor diámetro de bola menor será el % de C y mayor % de Mo, Cu
A menor diámetro de bola mayor será el % de C y menor % de Mo, Cu

En todos los casos, el tiempo de inicio de transformación Perlítica (TITP) debe ser mínimo 100 minutos, de tal forma que en bruto de colada (As Cast) se obtenga matriz Perlítica en más del 80% y facilite su traslado en el desmoldeo utilizando electroimán; si la matriz es austenítica, las bolas kromox no serán magnéticas dificultando la operación de traslado con el electroimán y requerirá el tratamiento de pre austenizado a 600°C.

5. La microestructura destaca al final del tratamiento térmico completo:

Carburo Primario: %Cr = 39.52, %Fe = 44.76

Carburo Eutéctico: %Cr = 23.28, %Fe = 61.10

Matriz: %Cr = 10.38, %Fe = 74.88

Punto s críticos de
desestabilización de la austenita:

$AC_1 = 796^\circ C$ $AC_3 = 882^\circ C$ $MS = 215^\circ C$

Puntos crítico de transformación durante la desestabilización completa de la austenita:

$AC_1 = 816^\circ C$ $AC_3 = 892^\circ C$

Los cuales se consiguieron templando las bolas en polímero al 15%.

BIBLIOGRAFÍA

1. Beraha, E. & Shpigler, B. - "Collor Metallography" - ASM 1977, pag. 47.
2. Cias, W. W. - "Austenite Transformation Kinectics of Ferrous Alloys" - Climax Molibdenum Co.
3. D.J. Duan "Design of Grinding Balls".
4. F. Martray/R. Usseglio - Nanot. Atlas "Trnasformation Characteristics of Chromiun and Chromium - Molibdenum.
5. Jackson, R.S. - "The Austenite Liquidus Surface and Constitutional Diagram for the Metaestable System" - Joumal of the Iron and Steel Institute, vol. 208, 1970, pag 163.
6. Maratray, F. & Poulation, A. - "Austenite Retention in High-Chromiun White Irons" - AFS Transactions, vol 27, 1982 pag. 795.
7. Maratray, F. & Poulation, A. - "Contribution a l'etude de la dureté des structures martensitiques et de la retection d'austenite, de son controle et de sa transformation dans les alliages fereux a haute teneurs en carbone et en chrome"- Cercle d'etudes de metaux - 1997.
8. Morton, P. A.; Gundlach, R. B. & Dodd, J. - "Factors Affecting Austenite Measurements in High - Chromiun White Cast Irons" - AFS Transactions, vol. 140, pag. 879, 1985.
9. Parks, J. L. - "Characteristic of As-Cast and Subcritically Heat-Treated High-Chromiun-Molibdenum white Irons for Thick-Section Castings" - AFS Transactions.
10. 1998 Anual Book of ASTM Standads Ferros Casting; Ferro Alloys Parte 2.