

Características metalúrgicas de la bola para evaluar el desgaste y optimización de la molienda

Uriel Domínguez¹, Jairo Cibrian¹, Carlos Dávila¹, J. Ángel Delgadillo²

¹ PROESMMA Departamento de Ingeniería Metalúrgica Calle Colegio #6304-505 Chihuahua, Chihuahua

² Instituto de Metalurgia UASLP. Av. Sierra Leona 550, Lomas de San Luis, 78210 San Luis, S.L.P.

[*jdelgadillo@proesmma.com](mailto:jdelgadillo@proesmma.com)

RESUMEN

Los molinos de bolas emplean bola de acero o hierro fundido para moler el mineral alimentado. Estas bolas pueden tener características distintas entre sí, como: dureza, composición química, microestructura, entre otras. Por estas diferencias, el rendimiento de la molienda puede ser aminorado ocasionando variaciones importantes en la granulometría de la descarga del molino, y en la tasa de consumo de bola por tonelada molida. En este documento, se describen las características optimas en el tipo de bola que permitirá eficientar el rendimiento de ésta mejorando la molienda de las partículas de mineral alimentadas al molino y disminuyendo el consumo de acero o hierro por tonelada molida pudiendo alcanzar hasta el 18.75%.

PALABRAS CLAVE: *molienda, acero, microestructura, granulometría*

ANTECEDENTES

Durante los últimos 4 años PROESMMA a través de su departamento de Ingeniería metalúrgica ha desarrollado distintos medios para evaluar el rendimiento de la bola desde nivel laboratorio hasta industrial, así como, valoración y análisis de distintos tipos de acero y hierro fundido con los cuales se producen las bolas. De aquí, surgen los resultados mostrados, a través de una prueba industrial en una unidad minera que contaba con dos circuitos de molienda en paralelo y bajo condiciones de molienda estrechamente similares, obteniendo una eficiente comparativa del rendimiento de los dos tipos de material de bola, el estado de esta y la granulometría obtenida.

Al observar que tipo de bola obtuvo mejor comportamiento y desempeño, se optó por identificar las características de los diferentes tipos de bola y las condiciones microestructurales que permiten obtener el excelente desempeño de las bolas empleadas en los molinos en múltiples unidades mineras de México.

METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Prueba industrial

Durante el 2021, se realizó una prueba industrial con bolas fundidas en una unidad minera en México, con el objetivo de evaluar el rendimiento en el consumo de acero y su comportamiento en comparación con dos tipos de bola. La prueba se ejecutó en dos circuitos de molienda en paralelo, como se muestra en la Figura 1, donde se detalla el diseño del circuito para cada tipo de bola. Ambos molinos utilizados tenían dimensiones y condiciones de operación similares, las cuales se describen en la Tabla 1. Esto permitió garantizar la homogeneidad en las condiciones de prueba y obtener resultados comparables entre los diferentes tipos de bola evaluados.

Al finalizar la prueba industrial, que tuvo una duración de seis meses, se realizó un muestreo del circuito de molienda con el objetivo de realizar un balance de masa y comparar las granulometrías obtenidas por cada molino y sus respectivos medios de molienda. Adicionalmente, se llevó a cabo la evaluación del collar de bolas de cada molino para analizar el comportamiento de las bolas durante su vida útil.

Se observó una disminución en el consumo de medios de molienda, pasando de 380 g/t a 320 g/t, alcanzando el 18.75% de mayor rendimiento. Esta mejora en la resistencia al desgaste por abrasión podría estar relacionada con la composición química del acero o hierro fundido, específicamente por un mayor contenido de cromo (Cr), manganeso (Mn) o carbono (C). También podría deberse a las condiciones del tratamiento térmico, que permiten alcanzar una dureza óptima de entre 50 y 63 HRC sin comprometer la tenacidad, evitando deformaciones y fracturas de las bolas ocasionadas por impactos de alta energía.

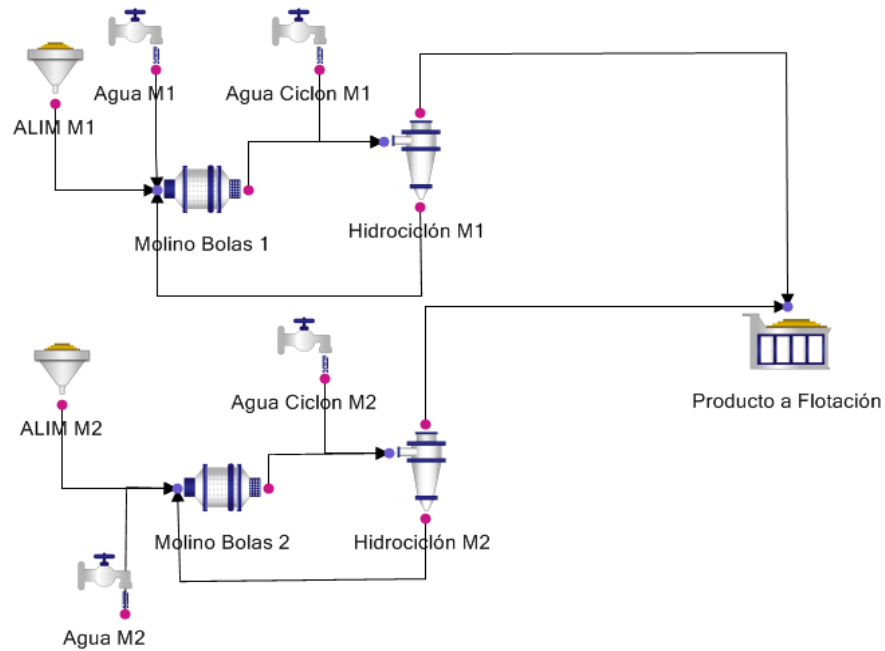


Figura 1. Circuito de disminución de tamaños con sistemas de molienda en paralelo utilizados en el estudio

Tabla 1. Dimensiones y características del molino #1 y #2

Características	Molino #1	Molino #2
Diámetro del Molino (m)	3.06	3.10
Longitud del molino (m)	3.46	3.50
r.p.m	17	17
Potencia instalada (Hp)	600	600
Diámetro de trommel (m)	0.68	0.67

La Figura 2 muestra bolas con deformaciones, generando aristas que pueden actuar como concentradores de esfuerzos. Este fenómeno puede acelerar el desgaste del acero en dichas zonas, ya que un mismo tonelaje pasa sobre una superficie reducida en el mismo intervalo de tiempo, incrementando la presión local.

En la Figura 2, se puede observar una muestra de bolas obtenidas en el molino #1 previo al inicio de cambio de tipo de bola de recarga.



Figura 2. Muestras de bola del molino #1 previo al cambio de tipo de bola de recarga

Al finalizar los 6 meses de prueba, se realizó un levantamiento de muestras de las bolas desde la carga superficial para formar los collares correspondientes a cada molino (Figura 3 y 4). A la muestra de bolas se le realizaron ensayos químicos, metalográficos y de resistencia a la corrosión a través de las pruebas típicas respectivas. Asimismo, se llevó a cabo un muestreo de los circuitos de molienda con el fin de evaluar el efecto de la carga de bolas en la eficiencia del proceso de molienda.

Es importante señalar que, antes y durante la prueba, en el molino #1 se alimentaron exclusivamente bolas de 3.0" de diámetro, mientras que en el molino #2 se utilizó una mezcla compuesta por bolas de 3.0" y 2.5" en proporciones de 85% y 15%, respectivamente.

En las figuras 5 y 6 se pueden observar los collares de bolas correspondientes a cada molino, obtenidos de manera aleatoria desde la carga superficial de bolas. Se aprecia que el collar del molino #1 muestra un mejor comportamiento, manteniendo su esfericidad durante un mayor tiempo a lo largo de la vida útil de las bolas.



Figura 3. Carga superficial del molino #1 con bola tipo A.



Figura 4. Carga superficial de molino #2 con bola tipo B.



Figura 5. Collar de bola obtenido del molino #1.



Figura 6. Collar de bolas obtenido del molino #2.

Muestreo y Balance de masa

El muestreo se realizó durante una hora por intervalos de 15 minutos formando así un compósito a partir de 5 muestras para cada corriente del circuito, las cuales fueron:

- Alimentación al molino.
- Descarga del molino.
- Overflow (Finos) de ciclones.
- Underflow (Gruesos) de ciclones.

Este tiempo es el requerido para caracterizar el circuito debido a que el tiempo de residencia de las partículas del mineral es aproximadamente de 21 minutos. Con este tiempo se asegura que se analiza la misma partícula durante todo el proceso de molienda hasta obtenerla en los finos hacia el circuito de flotación.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El balance de masa permitió observar que ambos molinos se encontraban en condiciones similares de operación durante el muestreo, y el comportamiento de molienda por medio de los análisis granulométricos.

Al analizar las Tablas 2 y 3, se observa que la granulometría del molino #1 presenta un mayor porcentaje de pasante entre los tamaños de abertura de 6.3 mm y 0.25 mm en comparación con el molino #2. En los tamaños de abertura más pequeños, los porcentajes de pasante son muy similares entre ambas granulometrías. Por otro lado, en la Tabla 4 se puede ver que el circuito del molino #2 genera un porcentaje de carga circulante superior al del molino #1, siendo de 173.535% y 403.871% respectivamente.

Esto sugiere que las bolas de 3.0" alimentadas en el molino #1 provocan una mayor velocidad de rompimiento de las partículas gruesas, debido a una mayor cantidad de impactos con mayor energía en comparación con la mezcla de bolas de 3.0" y 2.5" del molino #2. Sin embargo, este efecto también se replica, en cierto modo, en los subtamaños de 0.25 mm a 0.038 mm, donde las bolas más pequeñas realizan la "molienda fina". En este caso, se puede atribuir la buena esfericidad de las bolas de 3.0" del molino #1 como un factor clave en su eficiencia.

Tabla 2. Análisis granulométricos de la descarga del molino #1.

Malla (mm)	Exp	Bal
9.5	100	100
6.3	98.98	98.49
4.714	94.75	94.8
3.333	88.75	89.04
2.357	84.6	85.08
1.666	82.67	83.1
1.18	78.41	79.04
0.833	71.52	72.58
0.6	64.58	66.1
0.425	56.45	58.32
0.25	41.17	43.24
0.147	28.92	30.58
0.097	23.92	25.76
0.074	17.89	19.29
0.052	14.22	15.46
0.045	12.97	14.14
0.038	11.42	12.51
0	0	0

Tabla 3. Análisis granulométricos de la descarga del molino #2

Malla (mm)	Exp	Bal
9.5	100.000	100.000
6.3	97.010	97.140
4.714	90.710	91.570
3.333	82.720	84.160
2.357	78.190	79.820
1.666	76.010	77.700
1.18	72.120	73.630
0.833	66.500	67.510
0.6	60.930	61.460
0.425	54.410	54.300
0.25	41.540	40.520
0.147	30.580	29.270
0.097	26.170	24.560
0.074	20.180	18.880
0.052	16.640	15.430
0.045	15.440	14.250
0.038	14.000	12.800
0	0.000	0.000

Tabla 3. Comparativa de flujos en la descarga de molinos de #1 y #2

	Descarga del Molino #1		Descarga del Molino #2	
	Exp	Bal	Exp	Bal
P80 (mm)	1.345	1.282	2.713	2.392
Sol (t/h)	0	173.535	0	403.871
% Sol.	80.94	80.929	82.14	82.177

Análisis de los tipos de bola

Como ya se abordó anteriormente, existen variables muy importantes en las características del acero o hierro fundido para asegurar un buen desempeño de la bola, las cuales son:

- Composición química
- Defectos
- Microestructura
- Propiedades mecánicas

Microestructura

Esta primera variable es de gran importancia, ya que permitirá obtener la dureza deseada, que oscila entre 50 y 63 HRC, alcanzable mediante la generación de una microestructura de martensita. A partir de este punto, se procedió a evaluar diferentes tipos de bolas, algunas de las cuales presentaron un alto consumo de acero o un desgaste atípico, debido a la incapacidad de mantener su esfericidad de manera adecuada bajo las condiciones operativas de los circuitos de molienda.

La Figura 7 muestra una matriz homogénea de martensita con austenita retenida, propia de una bola de acero forjado que otorgó un buen desempeño durante la molienda. Esto se colaboró la caracterizar el acero de bolas que presentaron fallas, a continuación, se muestran algunas evidencias.

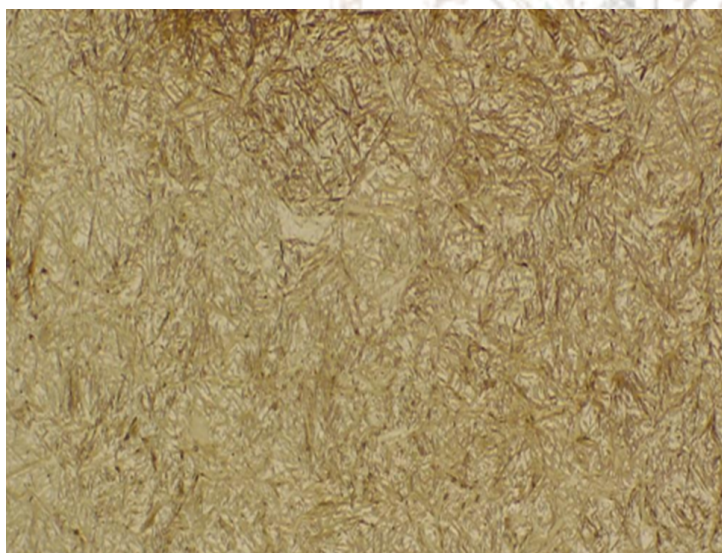


Figura 7. Microestructura con matriz martensítica y austenita retenida. Magnificación a 20X. Atacada con nital al 2 %

En las Figuras 8 y 9 se muestra evidencia de bolas con microestructura de perlita, tanto en acero como en hierro fundido. La presencia de perlita limita la dureza alcanzable dentro del rango necesario, lo que, en consecuencia, llevó a que las bolas que presentaban esta microestructura tuvieran un mayor consumo de acero. Además, en la figura 8 se observa la presencia de límites de grano ferrítico, los cuales pueden facilitar la propagación de grietas.

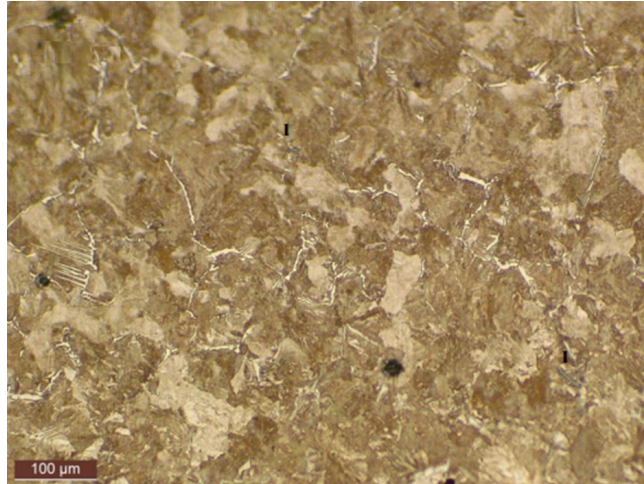


Figura 8. Microestructura perlítica con límite de grano ferrítico. Se observan inclusiones no metálicas (I). Magnificación a 20X. Atacada con nital al 2 %.

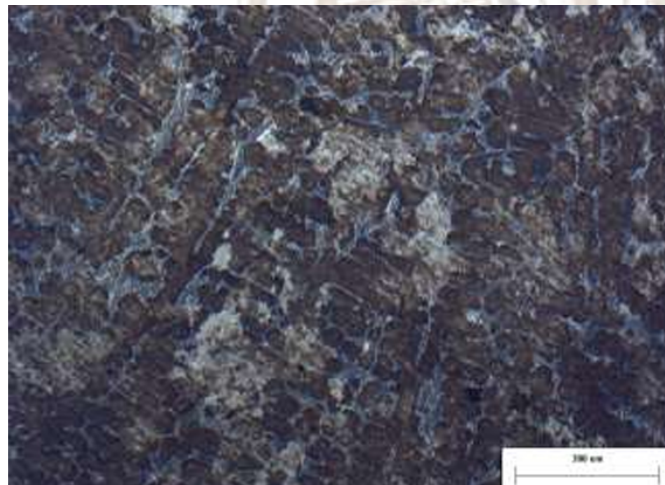


Figura 9. Microestructura tipo dendritas que forman una matriz muy fina de matriz perlita con aparente bainita de apariencia granular y gran presencia de pequeños carburos globulares entre la matriz. Magnificación a 20X. Atacada con nital al 2 %

La Figura 10, pertenece a una micrografía de la microestructura del hierro fundido de una bola con alto contenido de cromo (14% a 17% Cr), de la misma manera que para la bola forjada. Esta microestructura dendrítica compuesta de carburos y martensita revenida es la deseada para un buen desempeño de la bola de hierro fundido.

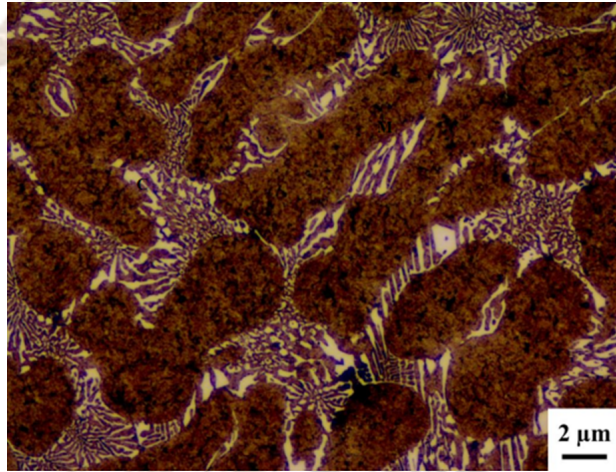


Figura 10. Microestructura dendrítica. Carburos y martensita revenida. Magnificación a 20X. Pieza atacada con nital al 2 %.

Composición química

Es evidente que existe una diferencia entre las microestructuras de los aceros forjados mostradas en las figuras 7 y 11, probablemente debido a la presencia de nódulos de grafito. Una de las principales causas de esta variación fue el contenido de carbono, el cual se desvió del rango recomendado (0.5% a 0.9% C). En este caso, el acero presentó un contenido de 1.02%, como se indica en la Tabla 5

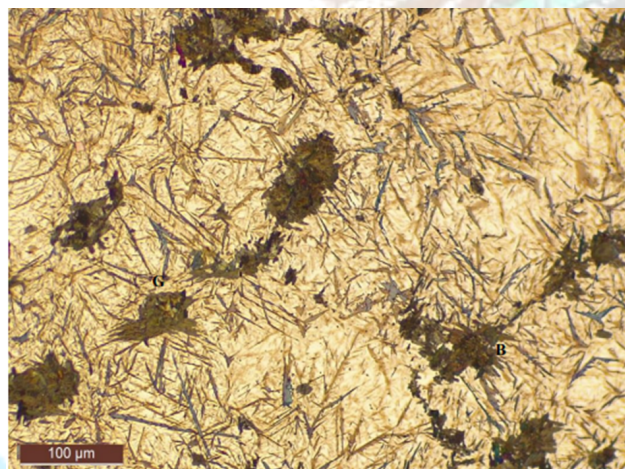


Figura 11. Se observa matriz de martensita y austenita retenida (zona clara). Posibles nódulos de grafito, G. Magnificación a 20X. Atacada con nital al 2 %.

Es evidente que existe una diferencia entre las microestructuras de los aceros forjados mostradas en las figuras 7 y 11, probablemente debido a la presencia de nódulos de grafito. Una de las principales causas de esta variación fue el contenido de carbono, el cual se desvió del rango recomendado (0.5% a 0.9% C). En este caso, el acero presentó un contenido de 1.02%, como se indica en la Tabla 5

Tabla 4. Composición química del acero

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
	%	%	%	%	%	%	%	%
<x>(2)	1.02	0.273	0.855	0.0160	0.0012	0.496	0.0227	0.103
	Al	Co	Cu	Nb	ti	V	W	Fe
	%	%	%	%	%	%	%	%
< x > (2)	0.0233	0.0098	0.232	<0.001	0.0227	0.0013	0.0020	96.9

En el caso de las bolas con alto contenido de cromo, se evaluó la velocidad de corrosión en distintos tipos de bolas de acero fundido, comparando diferentes porcentajes de cromo (16% Cr vs. 18% Cr), obteniendo los siguientes resultados.

Las curvas de polarización potenciodinámicas nos muestra que el proceso de corrosión ocurre en mayor velocidad en la bola de 16% de cromo. El parámetro más importante es la densidad de corriente de corrosión (i_{corr}), obtenido del ajuste del software Echem Analysit 5.56 con la curva experimental en la región del E_{corr} (pico de la curva), de este se obtiene la velocidad de corrosión en milésimas de pulgada por año (mpy), que indica el adelgazamiento que sufren las bolas por efecto del ataque de la pulpa.

Los valores obtenidos de la i_{corr} , de las dos muestras con agitación y una sin agitación, son semejantes, y los promedios señalan que las bolas 18%Cr se corroen a la mitad de la velocidad de corrosión de las bolas 16%Cr, Tabla 6.

Tabla 5. Parámetros electroquímicos calculados de las curvas de polarización

Muestra	I_{corr} ($\mu\text{m}/\text{cm}^2$) promedio	Vel. de corrosión (mpy)*
16% Cr	22.5	10.1
18% Cr	12.0	5.4

*milésimas de pulgada por año. 1 mpy = 0.0254 mm/año = 25.4 $\mu\text{m}/\text{año}$

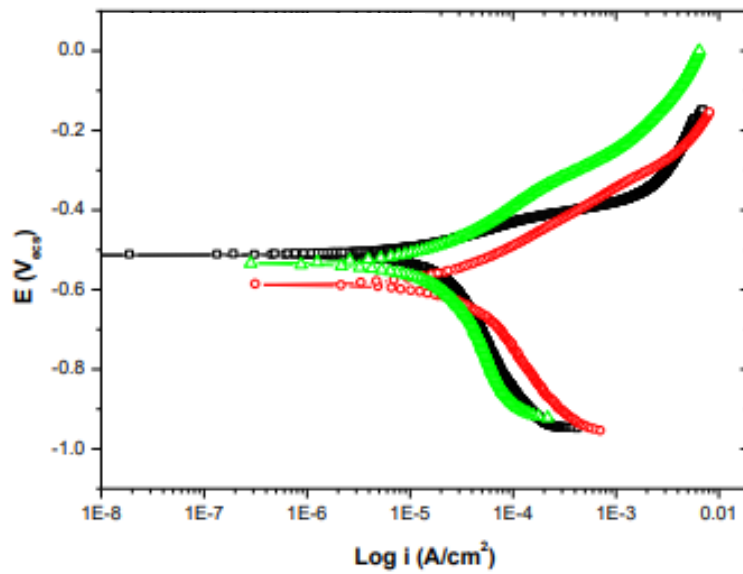


Figura 12. Curvas de polarización potenciodinámica (PPD) de bolas de molino en pulpa a 42° C, con y sin agitación, en bola de 16% Cr.

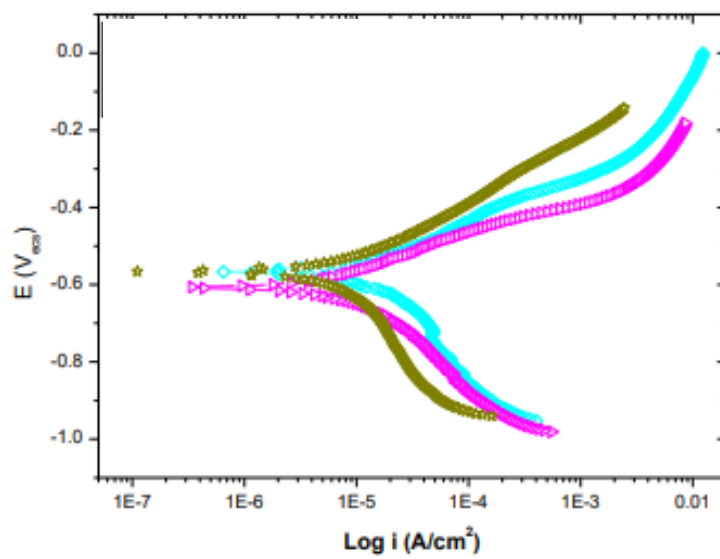


Figura 13. Curvas de polarización potenciodinámica (PPD) de bolas de molino en pulpa a 42° C, con y sin agitación, en bola de 18% Cr

Defectos

Los aceros y hierros fundidos pueden presentar diferentes tipos de defectos, en este documento mostramos los más comunes en el proceso de elaboración de bolas para molienda.

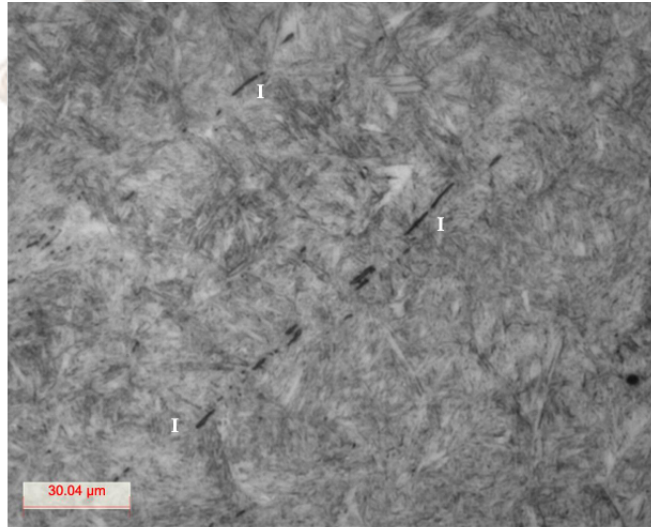


Figura 13. Magnificación a 20x. Inclusiones de sulfuros (I). Pieza atacada con nital al 3 %

Es común observar inclusiones, las cuales pueden provocar problemas como la fragilización del acero. Sin embargo, es necesario evaluarlas según el tipo y la cantidad de inclusiones presentes. En la figura 14, se destaca un patrón en las inclusiones, ya que estas aparecen de manera continua y con una orientación uniforme.

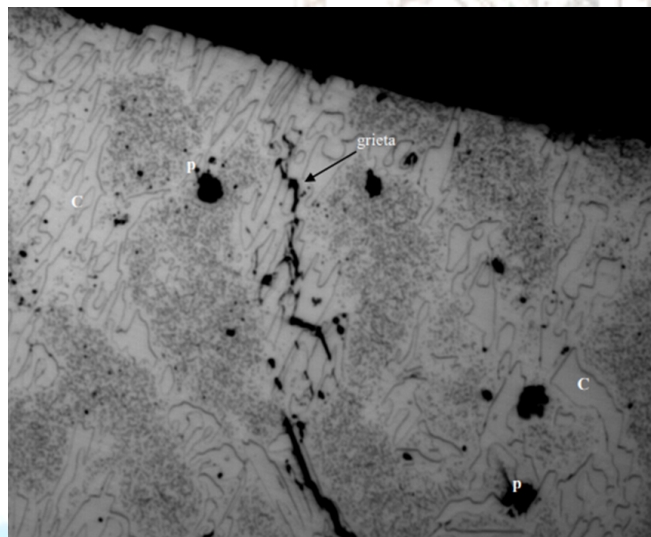


Figura 14. Magnificación a 20X. Microgrietas, carburos C, poros P. Pieza atacada con nital al 2 %

En el caso de las bolas producidas por fundición, además de la presencia de inclusiones, se identificaron otros defectos como microgrietas y poros. Estos defectos contribuyen a la fragilización de la pieza, lo que eventualmente puede provocar la fractura de la bola.

Propiedades mecánicas

Las propiedades mecánicas para destacar son:

- Resistencia a la corrosión
- Resistencia a la abrasión
- Dureza

La resistencia a la corrosión y la dureza ya se abordaron previamente de manera indirecta al discutir la composición química y la microestructura. Para evaluar la resistencia a la abrasión, se utilizó un novedoso ensayo llamado Prueba de Desgaste Acelerado. Esta prueba permite someter cada tipo de bola al desgaste provocado por la abrasión y el impacto, y además determina la velocidad de desgaste en función de la potencia utilizada para cada tipo de mineral.

Este tipo de prueba se realizó a nivel laboratorio con las siguientes especificaciones.

Tabla 6. Características del molino y molienda, usado en pruebas de desgaste acelerado

Molino	
Diámetro, m	0.20
Longitud, m	0.27
llenado bola, %	35
% de velocidad crítica	75
No. Levantadores	8
Angulo de ataque del levantador (°)	90
Tiempo de Molienda (h)	24

Tabla 7. Características del mineral utilizado en prueba de desgaste acelerado

Mineral Utilizado	
Cantidad por ciclo(kg)	2.895
Pulpa (% solidos)	75

Tabla 8. Resultado de prueba de desgaste acelerado utilizando dos tipos de bola ante un mismo mineral

	Bola forjada	Bola de alto cromo
Masa total inicial de acero (gr)	15322.10	15397.10
Masa total final de acero (gr)	15230.60	15331.10
Diferencia en peso de acero (gr)	91.50	66.00
Potencia consumida en el molino (kw)	0.89	0.86
kd [gr de Acero/ kwh]	3.37	2.36
Kacero [$\mu\text{g}/(\text{Kwh}/\text{t})$]	65.99	49.43

Para esta prueba se evaluó la resistencia a la abrasión entre una bola forjada vs bola de alto cromo con contenido de 18-20% Cr. El empleo de la bola de alto cromo significó una reducción en el índice de desgaste del 30.0%.

CONCLUSIONES

1. Existe una importante relación entre el estado de la bola - P80 - consumo, pudiendo obtener un rendimiento extra del 15.78%.
2. Lo más importante es la microestructura para óptimas propiedades mecánicas: homogénea de martensita y austenita revenida para el caso de bola forjada, y para la bola fundida una red de carburos que rodea a la martensita revenida.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco el apoyo, asesoramiento y entusiasmo brindado por el Dr. José Ángel Delgadillo Gómez y el Lic. Carlos Javier Dávila Sánchez, así como a cada unidad minera que facilitó los recursos necesarios para llevar a cabo los estudios realizados en esta investigación.

REFERENCIAS

Matsanga, N., Nheta W., Chimwani, N. (2023). Review of the Grinding Media in Ball Mills for Mineral Processing.

AmanNejad, M., Barani, K. (2020). Effects of ball size distribution and mill speed and their interactions on ball milling using DEM.

Kayaa, S., Yılanb, F., Urtekinb, L. (2022). Influences of Cr on the microstructural, wear and mechanical performance of high-chromium white cast iron grinding balls.

Albertin, E., Sinatora, A., Pitaluga, G., Parada, A. (2007). Relación entre factores micro-estructurales e impacto repetido en aleaciones de alto cromo para bolas de molino.

Heredia J (2012). Estabilidad de la fase austenítica, variación de la dureza en los aceros al manganeso afectados por el calor y sometidos a impactos.

Hernández, E., Leyva, R., Escobar, A. & Ordoñez, S. (2018). Efecto del tratamiento sub-cero sobre la microestructura y dureza de fundiciones blancas alto cromo.

Núñez, A. (2016). Caracterización microestructural de las bolas de los molinos empleadas en la trituración de mineral laterítico.

Rosales, G., Andrade, J., Alvarado, G., Espinosa, E., Nava, D. (2020). Investigación experimental en el consumo de energía específica y reducción de tamaño en la molienda de bolas usando diferentes tipos de levitador.

