

Comportamiento de cuerpos molidores en condiciones de abrasión y corrosión para lechada de piedra caliza

Performance of the wear in conditions abrasion and corrosion of grinding pieces for limestone bedrock

Manuel Vega ¹

Recibido: Mayo 2010

Aceptado: Septiembre 2010

Resumen.- En procesos de molienda de materiales abrasivos, cuya dureza sea mayor que la de los carburos cementíticos, es frecuente utilizar fundiciones aleadas de alto cromo. Estas, además del buen comportamiento a la abrasión, añaden buena resistencia a la corrosión. Las condiciones de comportamiento en servicio dependen de las microestructuras. Estas, vienen dadas por la composición, y por la modo de solidificación y tratamientos térmicos. En este trabajo, se busca, de modo experimental, observar el comportamiento de cuerpos molidores con variantes en la cantidad de Cromo, en el tratamiento térmico, y bajo condiciones variable: solo corrosión, y abrasión mas corrosión. Se observa el papel preponderante del porcentaje de Cromo, así como la dureza de los elementos molidores. Los ensayos se realizaron en un tambor giratorio simulando los molinos industriales. Estos ensayos permitieron establecer algunos parámetros de comportamiento frente a los niveles de desgaste en la molienda de piedra caliza húmeda para la fabricación de cemento Portland.

Palabras-clave: resistencia a la corrosión, abrasión, aleaciones de hierro y alto cromo

Summary.- In crushing of abrasive materials, whose hardness is greater than that of cementite carbides, often using high chromium alloyed casting. These, in addition to good behavior, abrasion and good corrosion resistance. The conditions of service performance depends on the microstructures. These are given by the composition, and the type of solidification and heat treatments. In this paper, we seek, on an experimental basis, observe the behavior of grinding with variations in the amount of chromium, in the heat treatment, and under variable conditions: only corrosion, and corrosion-abrasion. Note the role of the percentage of chromium and hardness of the grinding elements. The trials were conducted in a rotating drum simulating the industrial mills. These tests allowed to establish some parameters of performance against the wear in wet grinding of limestone for the manufacture of Portland cement

Keywords: corrosion resistance, abrasion, iron Chrome alloys,

1. Introducción.- El criterio de selección de aleaciones tipo Fe-Cr-C para aplicaciones de molienda húmeda en la industria de fabricación de cemento, considera la utilización de aleaciones ferrosas que posean una buena combinación de resistencia a la abrasión junto con una adecuada resistencia a la corrosión. El resultado de ambos agentes resultará en un mayor o menor consumo de molidores por tonelada de caliza procesada, que a menudo es el factor industrial determinante.

La norma ASTM A532 especifica una variedad de aleaciones resistentes al desgaste, con amplia gama de composiciones, en especial su contenido de Cromo.

¹ Ing. Ind.; Docente de Materiales y Metalurgia, Universidad de Montevideo, Uruguay; mvega@um.edu.uy

En este trabajo se expone un análisis del comportamiento de materiales que puedan tener una mejor combinación de propiedades frente a corrosión y abrasión, es decir, en que forma intervienen el porcentaje de Cromo y el estado de dureza debido al tratamiento térmico con respecto a los niveles de desgaste del proceso en esas condiciones.

2. Fundiciones aleadas de alto Cromo.- Los materiales fabricados para molienda húmeda de piedra caliza para la fabricación posterior del clinker, son los llamados: Cuerpos molidores, tanto esféricos como cilíndricos o *cylpebs*. Estos trabajan bajo condiciones de desgaste por corrosión y abrasión en forma conjunta. En la molienda en seco se obtienen buenos resultados con las aleaciones del tipo 12 – 15% Cr (Clase II, tipos A o B, ASTM A532). Sin embargo, para condiciones de molienda húmeda es habitual el uso de aleaciones del tipo 25% Cr (Clase III, tipo A, ASTM A532) [1]. Se han considerado aquí las condiciones habituales de este tipo de molienda y las experiencias han sido realizadas con lechada de caliza obtenida de una industria local que trabaja en esas condiciones. Hay otros casos estudiados, como el de Zumelzu y otros, aplicado a la industria del azúcar [2].

Clase	Tipo	Designación	Carbón	Silicio	Cromo	Molibdeno	Niquel
I	A	Ni-Cr-Hc	2.8 – 3.6	0.8 max	1.4 - 4.0	1.0 max	3.3 -5.0
	B	Ni-Cr-Lc	2.4 – 3.0	0.8 max	1.4 - 4.0	1.0 max	3.3 -5.0
	C	Ni-Cr-GB	2.5 -3.7	0.8 max	1.0 - 2.5	1.0 max	4.0 max
	D	Ni-HiCr	2.5 – 3.6	2.0 max	7.0 - 11.0	1.0 max	3.0 - 4.0
II	A	12% Cr	2.0 -3.3	1.5 max	11.0 – 14.0	3.0 max	2.5 max
	B	15%Cr-Mo	2.0 -3.3	1.5 max	14.0 – 18.0	3.0 max	2.5 max
	C	20%Cr-Mo	2.0 -3.3	1.0 -2.2	18.0 – 23.0	3.0 max	2.5 max
III	A	25%Cr	2.0 -3.3	1.5 max	23.0 – 30.0	3.0 max	2.5 max

Tabla I.- Composición de las Fundiciones aleadas resistentes al desgaste ASTM A 532

La concurrencia simultánea de estas dos acciones: abrasión y corrosión, tiene características peculiares, ya que el fenómeno de desgaste resulta incrementado por las dos acciones simultáneas. El efecto inhibitorio o pasivante del Cromo en cuanto a la corrosión, producido por la capa de óxido de cromo, se ve continuamente removido por la acción del desgaste abrasivo. Según Breyer y Walmag, se mejora la resistencia a la abrasión en este tipo de materiales a medida que hay una mayor presencia en la microestructura de carburos de cromo. El carburo de cromo tiene un rango de dureza de HV 1500-1800 que es significativamente superior al que presenta la cementita que es de 1200-1300. A mayor presencia de Carburos de cromo habrá un menor desgaste en material para molienda. Por otra parte, se deberá mantener un alto tenor de Cr en la matriz para permitir un aceptable comportamiento a la corrosión.

El efecto de desgaste abrasivo sobre la capa protectora de pasivación generada por el Cr va restando efectividad a la resistencia a corrosión, provocando que se genere una nueva capa de óxido de cromo. Parecería adecuado considerar que en una estructura heterogénea como es la que resulta en estas aleaciones, con diferencias de composición fuertes entre la matriz y los precipitados de Carburos, darían origen a una mayor sensibilidad a la corrosión por esas diferencias de composición. A esto, se debe añadir la conveniencia de que estos elementos molidores tengan la mayor dureza, no solo en los carburos, sino en la propia matriz. Es por ello, que se utilizan normalmente en estado de temple y revenido. Este tratamiento generará tensiones en la matriz que pueden ser fuente de nuevas acciones de corrosión debido a las tensiones internas provocadas en el tratamiento.

¿Cuál de estos dos fenómenos será el preponderante en el desgaste?: La mayor presencia de Cr en la matriz (resistencia corrosión) o bien la mayor presencia de carburos dispersos (resistencia a abrasión). [Referencia bibliográfica en aleaciones del Sistema Fe-C.Cr [1]]

3. Ensayos realizados.- Analizamos mediante una serie de ensayos el desgaste producido en estos materiales bajo condiciones de molienda húmeda de piedra caliza. Se busca medir experimentalmente las diferencias de comportamiento de estos mismos molidores según fueran las condiciones de suministro: bruto de fundición (as cast), o templado y revenido (bonificado). Y buscar un criterio para alcanzar óptimas condiciones para mayor rendimiento de molidores.

En aleaciones ensayadas (C 2,8-3% y 25% de Cr) del tipo ASTM A 532 clase III tipo A, el porcentaje de carburos crece con los valores en carbono y en cromo, según la fórmula de Maratray [5]

$$\%Carburos = 2,33 \%C + 1,55(\%Cr) - 5,2$$

En las muestras ensayadas se tiene aproximadamente un 34% de carburos, y algo más del 14% de Cromo disuelto en la matriz.

Las características de estos carburos de Cromo serían del tipo K2 (Fe,Cr)₇C₃ ya que esas composiciones en la solidificación forman cristales de austenita primaria embebidos en una eutéctica de (γ + K2) [6] La matriz presentará un tenor de Cr (%Cr_m) que aumenta cuando lo hace la relación Cr/C y puede estimarse por la ecuación:

$$\%Cr_m = ,95Cr/C - ,47.$$

Al ser en este caso la relación Cr/C del orden de 8, tendremos en estado bruto de colada una matriz predominantemente austenítica. Se plantea por ello si será más conveniente utilizar estos cuerpos molidores bajo la condición de temple y revenido o simplemente en estado bruto de colada.

3.1. Materiales ensayados.- Se tomaron dos grupos de cuerpos molidores², tipo Cylpebs (cilindros de 25 mm de diámetro por un largo de 25 mm). Cada grupo formado de cuatro unidades.

Grupo I: Composición química: C 2,8-3,0%; Cr 25% en estado bruto de fundición, colados en molde de arena aglutinada.

Grupo II: Igual métodos de fabricación y composición, habiendo sido tratados térmicamente mediante templado a 950°C y enfriamiento al aire.

Grupos Muestras	Promedio Durezas HRc	Promedio Area c/muestra cm ²	Peso total g
I	47,6	30	328,67
II	61,4	30	332,32

4. Resultados experimentales.-

² Muestras obtenidas de la empresa TUBACERO S.A. (Uruguay). Fundición de piezas de hierro y aceros especiales. Ensayos realizados con la colaboración de Quim. N. Meneses.

4.1 Ensayo 1. Desgaste por corrosión: Procedimiento: se sometieron las muestras a la acción de una lechada de piedra caliza con un contenido de 32% de agua³, a una temperatura de 65 – 70°C y en régimen estacionario durante 68 horas. Se pesaron cada una de las muestras limpias y secas en periodos de tiempo de 20, 44 y 68 horas. Los resultados fueron los siguientes:

Muestras	Durezas HRc	Promedio inicial g	Prom. Dif peso 44 h mg/g	Prom. Dif peso 68 h mg/g
Grupo I	47,6	82,2	0,026	0,028
Grupo II	61,4	83,1	0,062	0,072

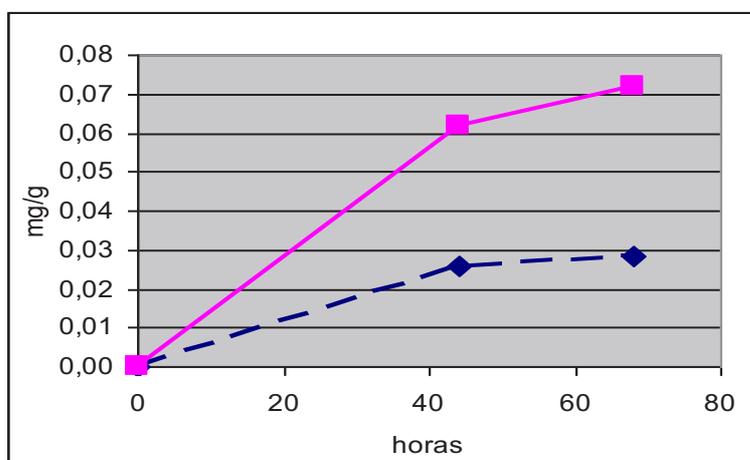


Figura 1.- Ensayo 1 Corrosión. Desgaste en mg/g en función de las horas de ensayo

Se aprecia un mayor desgaste por corrosión (~ 80%) en las muestras templadas en las primeras 43 horas. Para tiempos mayores se atenúa la pérdida por desgaste por corrosión en ambos casos. Parece confirmar que las tensiones del temple aumentan la sensibilidad a la corrosión.

4.2 Ensayo 2. Desgaste por Corrosión-Abrasión: Procedimiento: se sometieron las muestras a la acción de una lechada de piedra caliza molida con un contenido de 32% de agua⁴. Las muestras y el lodo se ensayaron a temperatura ambiente, introduciéndolos en un tambor cilíndrico sometido a un movimiento de rotación de 6 rpm⁵. Tiempo de ensayo 67 horas. Se pesaron cada una de las muestras limpias y secas después de 43 y 67 horas. Los resultados fueron los siguientes:

³ Suministrado por la Compañía Uruguaya de Cemento Portland. El material procede de Mina Verdún (Dpto. Minas, Uruguay)

⁴ Ídem anterior

⁵ Simula en forma aproximada las condiciones de la molienda de piedra en molinos giratorios.

Muestras	HRC	Promedio inicial	Prom. Dif a 43 h mg/g	Prom. Dif a 68 ⁶ h mg/g
Grupo I	47,6	82,17	0,38	0,46
Grupo II	61,4	83,07	0,68	0,77

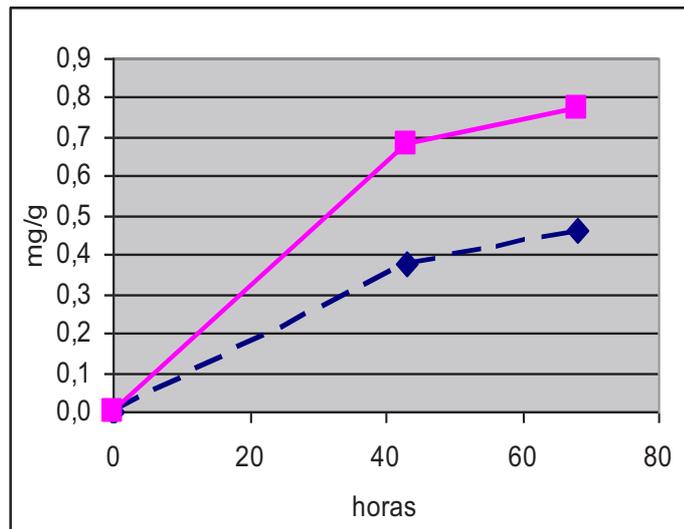


Figura 2.- Ensayo 2 Abrasión-Corrosión. Desgaste en mg/g en función de las horas de ensayo

Se mantiene un comportamiento parecido al del ensayo 1, si bien los valores de desgaste son mucho mayores –diez a quince veces mayor- y la pasivación es menor por el desgaste debido al propio rozamiento abrasivo. Los materiales en condiciones simplemente fundidos, sin tratamiento posterior, con predominancia austenítica en la matriz, siguen teniendo mejor comportamiento. Este experimento nos acerca mas a las condiciones de uso y sobre las que se busca una orientación en el comportamiento.

4.3 Ensayo 3. Desgaste por Corrosión-Abrasión: En este ensayo se repitieron las condiciones operativas pero se procedió a una limpieza y pulido de las muestras. El tambor cilíndrico se mantuvo con un movimiento de rotación de 6 rpm. Tiempo de ensayo 47 horas. Se pesaron cada una de las muestras limpias y secas después de 23 y 47 horas. Los resultados fueron los siguientes:

Muestras	HRC	Promedio Area muestra	Promedio inicial	Promedio desgaste a 23 h mg/g	Promedio desgaste a 47 h mg/g	Promedio desgaste a 68 h ⁷ mg/g
Grupo I	47,6	30	78,58	0,116	0,214	0,299
Grupo II	61,4	30	79,23	0,089	0,199	0,295

⁶ Se extrapolaron los resultados a 68 horas para facilitar la comparación

⁷ Se extrapolaron los resultados a 68 horas como en el caso anterior para facilitar la comparación

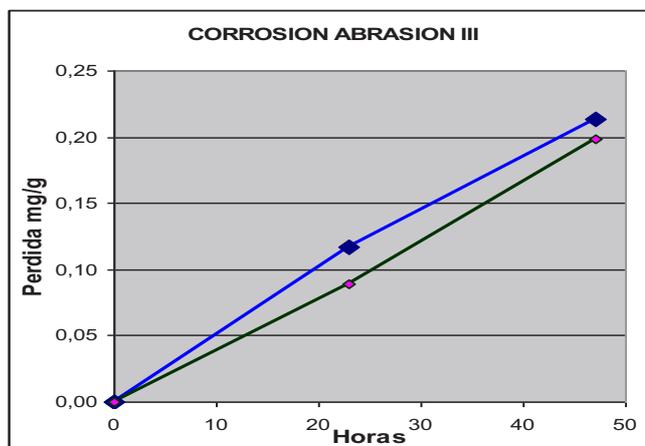


Figura 3.- Ensayo 3 Abrasión-Corrosión. Desgaste en mg/g respecto horas de ensayo

La consecuencia de haber pulido las piezas antes del ensayo ha mostrado que los resultados no difieren entre las muestras de ambos grupos, tampoco en cuanto a la variación de dureza de unas a otras. Parecería que en la resistencia al desgaste por abrasión y corrosión unidas tiene preponderancia el porcentaje de Cromo de la aleación con respecto a otros parámetros de tratamiento que influyen en menor medida.

4.4 Ensayo 4. Desgaste por Corrosión-Abrasión.- Se repitió esta experiencia con las mismas muestras limpias y los resultados fueron muy similares a los del ensayo 3.

Muestras	HRC	Promedio Área muestra	Promedio inicial g	Promedio perdida peso 33 h mg/g	Promedio perdida peso 57 h mg/g	Prom. Dif peso a 68 ⁸ h mg/g	Promedio pérdida peso 47 h mg/g
Grupo I	47,6	30	78,56	0,171	0,265	0,308	0,214
Grupo II	61,4	30	79,22	0,199	0,269	0,302	0,199

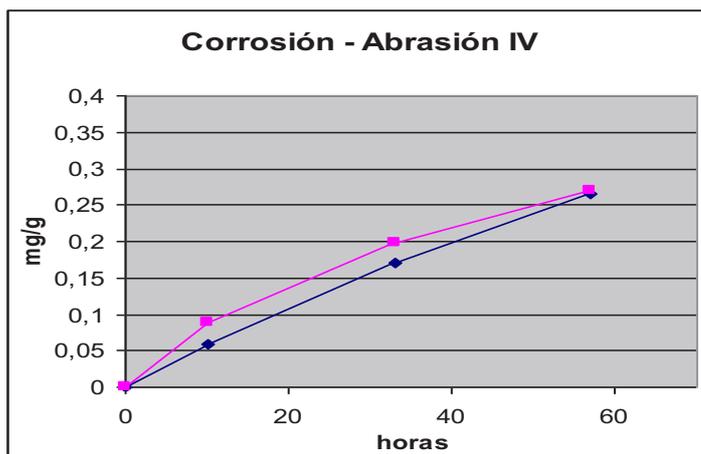


Figura 4.- Ensayo 4 Abrasión-Corrosión. Desgaste en mg/g respecto horas de ensayo

⁸ Se extrapolaron los resultados a 68 horas como en el caso anterior para facilitar la comparación

4.5 Ensayo 5. Desgaste por Corrosión-Abrasión (influencia de la velocidad de giro del tambor): Se sometieron las mismas muestras de los ensayos anteriores, -previamente pulidas, limpias y secas- bajo la acción de una lechada de piedra caliza molida con un contenido de 32% de agua (idem al anterior). El tambor cilíndrico se hizo girar a una velocidad mayor: 20 rpm, es decir, tres veces mas. Tiempo de ensayo 33,5 horas. Se pesaron cada una de las muestras limpias y secas después de 33,5 horas. Los resultados fueron los siguientes:

Muestras	HRc	Promedio Area muestra	Promedio inicial	Promedio pérdida peso 33,5 h mg/g	Promedio pérdida peso estimado a 68 h mg/g
Grupo I	47,6	30	78,581	0,282	0,58
Grupo II	61,4	30	79,232	0,282	0,57

El aumento significativo en el giro del tambor hace crecer los niveles de desgaste de los cuerpos molidores. Un incremento por cuatro en la velocidad, resulta en un desgaste 50% superior. Al crecer el número de impactos y rozamientos también va unido a un incremento de la producción de material molido, por lo que debe haber una cierta compensación.

El análisis de los ensayos realizados parece indicar que no hay una significativa diferencia entre utilizar estos cuerpos molidores de 25% de Cr en la forma bruto de fundición o bien templados, es decir, que bajo condiciones de molienda con abrasión y corrosión el efecto de la dureza de la matriz no es un hecho de relevancia. Por tanto, podrían utilizarse en cualquiera de los dos estados.

4.6 Ensayo 6. Desgaste por Corrosión-Abrasión comparación entre varios tipos de molidores y variación del % de Cr: Las muestras fueron sometidas al proceso de corrosión abrasión en lechada de piedra caliza, a una velocidad de giro de 6 rpm y durante 56,5 horas. En el cuadro adjunto se indican las características:

Caracterización de los grupos de cuerpos molidores del ensayo 6									
Grupo	Nº	forma	Composiciones		estado	horas	HRc	g	mg/g
I	4	cylpebs	2,8-3%C	25% Cr	as cast	56,5	47,7	314	0,59
II	4	cylpebs	2,8-3%C	25% Cr	bonif	56,5	61,5	315	0,37
III	2	cylpebs	2,3% C	12% Cr	as cast	56,5	50,5	156	1,04
IV	2	cylpebs	2,3% C	12% Cr	bonif 935°C	56,5	59,5	156	0,47
VI	2	bolas	2,3% C	12% Cr	as cast	56,5	47	410	1,28
VII	2	bolas	2,3% C	12% Cr	bonif 935°C	56,5	60,5	382	0,91

5. Conclusiones.- Este ensayo permitió establecer comparaciones entre diversas condiciones de materiales y tratamiento térmico para cuerpos molidores y, a la vez, establecer tendencias generales que pueden servir de orientación en cuanto a las decisiones que se plantearon al principio de la concurrencia de dos factores que afectan al desgaste en molienda húmeda: el fenómeno de corrosión unido simultáneamente al fenómeno de abrasión. La conjunción de ambos multiplica ambas acciones en cuanto al resultado final que se busca, que es el consumo de materiales de molienda por tonelada molida. Los resultados obtenidos permiten estimar algunas conclusiones:

- El Incremento del porcentaje de Cr en la aleación mejora la resistencia al desgaste abrasión-corrosión en forma significativa.
- En los cuerpos molidores del tipo 25% de Cromo no tiene especial relevancia el estado de tratamiento ya que predomina el alto porcentaje de cromo respecto a la máxima dureza que pueda obtenerse en la matriz. Si bien al incrementar la dureza de estos materiales se reduce el desgaste en molienda húmeda.
- Parece insinuarse en las experiencias que el desgaste se incrementa también en cuanto a la forma de los cuerpos molidores, teniendo un mejor desgaste en los denominados cylpebs respecto de los cuerpos esféricos

Toda variación en cuanto al material que sea objeto de la molienda, así como las características químicas de la solución en la cual tiene lugar la molienda serán determinantes en cuanto a la elección del material para los cuerpos molidores, como es el caso del trabajo mencionado de Zumelzu [2] y otros en situaciones de desgaste con corrosión para la industria del azúcar.

Las conclusiones obtenidas en este trabajo deben ser refrendadas mediante adecuados registros en fábrica donde los volúmenes de cuerpos molidores y de material molido son considerables y además se focaliza mas concretamente el objetivo de fondo de todo este tema como ser el consumo global de molidores respecto de las toneladas de material molido, que sería el indicador adecuado de resultados en uno y otro caso.

6. Referencias:

1. ASTM.- Annual Book of ASTM Standards. ASTM A532 / A532M - 10 Standard Specification for Abrasion-Resistant Cast Iron |*Book of Standards Volume: 01.02 2010*
2. Zumelzu, E. I.; Goyos, C.; Cabezas, O.; Opitz y Parada, A.; *Wear and corrosion behaviour of high-chromium (14–30% Cr) cast iron alloys*; Journal of Materials Processing Technology; 2002, Vol. 128, Issues 1-3, Pags. 250-255
3. Breyer, JP; Walmag, G.; *Metallurgy of High Chromium-Molibdenum White Iron and Steel Rolls*;
4. Pero-Sanz, J.A.; *Fundiciones Férricas* cap. VIII-IX; Editorial Dossat, S.A. Madrid 1994
5. Maratray, F.; Uglesio-Nanot, R.; *Factores que afectan las fundiciones blancas al Cr y al Cr-Mo*, Climax Molibdenum S.A., año 1971, Paris, Francia
6. Asensio, J.; Pero-Sanz, J. A. y Verdeja, J. I.; *Microstructure selection criteria for cast irons with more than 10 wt.% chromium for wear applications*; Materials Characterization September 2002, Vol. 49, Issue 2, , Pag. 83-93