

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA**



**“OPTIMIZACIÓN DEL CICLO DE VIDA DE LOS FORROS
DEL CILINDRO EN UN MOLINO DE BOLAS 8' X 10 DE
2000 TMSD”**

INFORME DE SUFICIENCIA

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:
INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA**

**ELABORADO POR:
CÉSAR OMAR GUERRERO URQUIZO**

PROMOCIÓN 2005 - II

LIMA - PERÚ

2014

DEDICATORIA

A mi señora Madre por sus enseñanzas y su apoyo incondicional.

A mis hijas Julieta y María José por ser la motivación y el eje principal de mi vida.

A mi esposa por su comprensión, paciencia y apoyo.

INDICE GENERAL

DEDICATORIA.....	2
INDICE DE FIGURAS.....	6
INDICE DE TABLAS.....	8
PROLOGO	9
CAPITULO I: INTRODUCCIÓN	10
1.1 ANTECEDENTES.....	10
1.2 OBJETIVO.....	11
1.2.1 OBJETIVO GENERAL.....	11
1.2.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS	11
1.3 ALCANCES	11
1.4 LIMITACIONES	12
CAPITULO II: MARCO TEÓRICO	13
2.1 MOLIENDA.....	13
2.1.1 Eficiencia del Proceso de Molienda.....	15
2.1.2 Influencia del chancado sobre la Molienda	16
2.1.3 Influencia de la Molienda sobre la Flotación	17
2.2 MOLINOS.....	17
2.2.1 Partes principales de un Molino.....	18
2.2.2 Molino de Bolas.....	22
2.2.3 Molino de barras.....	23
2.2.4 Molinos AG.....	24
2.2.5 Molinos SAG	24
2.3 VARIABLES OPERATIVAS DE LOS MOLINOS.....	25
2.3.1 Carga de Mineral.....	25

2.3.2	Suministro de Agua	26
2.3.3	Volumen de Carga	27
2.3.4	Condición de los Revestimientos.....	27
2.3.5	Tiempo de Molienda	28
2.3.6	Velocidad de Giro del Molino.....	28
2.3.7	Carga circulante	28
2.4	MECANISMOS DE CONMINUCION EN LOS PROCESOS DE MOLIENDA ...	29
2.4.1	Tipos de Mecanismos de Conminución.....	29
2.5	MOVIMIENTO DE CARGA EN UN MOLINO	31
2.5.1	Velocidad crítica en un molino.....	33
2.5.2	Efecto de la velocidad de giro del molino en el movimiento de carga de un molino.....	35
2.6	TIPOS FUNDAMENTALES DE DESGASTE	39
2.7	FACTORES QUE INFLUENCIAN EN LA VELOCIDAD DE DESGASTE DE LOS FORROS DE UN MOLINO	40
2.8	ENSAYOS DE RESISTENCIA AL DESGASTE.....	42
2.8.1	Ensayos de abrasión severa o por arranque de material.....	43
2.8.2	Ensayo de abrasión en arena húmeda.....	45
2.8.3	Ensayo abrasivo a dos cuerpos.....	48
2.8.4	Ensayos de rueda de caucho.....	49
2.8.5	Correlación de los ensayos de laboratorio con aplicaciones reales.....	51
2.8.6	Aplicación práctica de los principios de resistencia desgaste.....	55
CAPÍTULO III: COMPORTAMIENTO ACTUAL DE DESGASTE EN LOS FORROS DEL CILINDRO		
3.1	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	56
3.1.1	Metodología de mejoramiento	56
3.1.2	Condiciones de operación del molino primario 8'x10'	60

3.1.3	Uso del ultrasonido para medición de espesores	60
3.1.4	Consideraciones para las mediciones por ultrasonido	62
3.1.5	Descripción del equipo de ultrasonido	65
3.1.6	Calibración del Equipo de Ultrasonido	66
3.2	PERFIL DE DESGASTE DE FORROS CON ALEACION INICIAL (ASTM A 148)	70
3.2.1	Aleación convencional ASTM A 148 Gr 130 - 115	71
3.2.2	Determinación de la zona de mayor desgaste	72
CAPITULO IV: OPTIMIZACIÓN DEL CICLO DE VIDA DE LOS FORROS		
(SOLUCION DEL PROBLEMA, ALEACIÓN CON MEJOR RESISTENCIA A LA		
ABRASIÓN).....		
		77
4.1	PLANTEAMIENTO DE LA SOLUCIÓN	77
4.1.1	Selección de la aleación con mejor resistencia a la abrasión	77
4.1.2	Aleación ASTM A 532 II B	80
4.2	PERFIL DE DESGASTE DE FORROS CON ALEACIÓN DE MEJOR	
	RESISTENCIA A LA ABRASIÓN (ASTM A 542 IIB)	81
CAPITULO V: COSTOS		
		84
5.1	DETERMINACIÓN DE LOS COSTOS	84
CONCLUSIONES.....		
		877
RECOMENDACIONES.....		
		888
BIBLIOGRAFIA.....		
		889
APENDICE		
		90

INDICE DE FIGURAS

Fig.1	Procmin Perú, Proceso extractivo de Sulfuros.....	14
Fig.2	Procmin Perú, Proceso extractivo de Oxidos	14
Fig.3	Metso Peru, Costos promedios por etapas de tratamiento	15
Fig.4:	Procmin Perú, Costos promedios por etapas de tratamiento.....	15
Fig.5:	Procmin Perú,Influencia del Chancado sobre la molienda.....	17
Fig.6	Consorcio Minero Horizonte, Cilindro de un molino 9' x 12'	18
Fig.7	Consorcio Minero Horizonte, Tapa – Trunion de un Molino 9'x12'	19
Fig.8	Consorcio Minero Horizonte, Tapa – Trunion de un Molino 9'x12'.....	19
Fig.9	Consorcio Minero Horizonte, Forros de molinos	20
Fig.10	Consorcio Minero Horizonte, Forros de molinos.....	20
Fig.11	Consorcio Minero Horizonte, Chumacera de un Molino 9'x12'	20
Fig.12	Consorcio Minero Horizonte,Tromel de un Molino 8'x10'.....	21
Fig.13	Consorcio Minero Horizonte, Spout Feeder de un Molino 8'x10'	21
Fig.14	Consorcio Minero Horizonte, Sistema de Transmision de un Molino 9'x12'.22	
Fig.15:	Efecto de la Velocidad de Giro de un Molino, fuente: Universidad de Santiago de Chile, I.magne y W. Valderrama	35
Fig.16	Trayectoria de medios de molienda por efecto de la velocidad de giro del molino,fuente: Univers. de Santiago de Chile, I.magne y W. Valderrama	36
Fig.17	Simulacion de trayectoria de medios de molienda 40% Vel critica, fuente: Universidad de Concepción, Gabriel Barrientos – Luis Espejo.	37

Fig.18 Simulación de trayectoria de medios de molienda 60% Vel critica.....Fuente: Universidad de Concepción, Gabriel Barrientos – Luis Espejo.	37
Fig.19 Simulación de trayectoria de medios de molienda 80% Vel critica.....Fuente: Universidad de Concepción, Gabriel Barrientos – Luis Espejo.	38
Fig.20 Simulación de trayectoria de medios de molienda 100% Vel critica Fuente: Universidad de Concepción, Gabriel Barrientos – Luis Espejo.	38
Fig.21 Fuente: Molycop Chile, 9no Congreso Nacional de Minería Trujillo - Peru ..	39
Fig. 22 Ilustración de un molino de mandíbulas para ensayos de desgaste.....	44
Fig. 23 Efecto de la dureza y el carbono sobre el desgaste por arranque de material	45
Fig. 24 Diagrama de la máquina para ensayos de abrasión en arena húmeda.....	47
Fig. 25. Equipo para ensayos ASTM G132	48
Fig. 26. Aparato para la realización de ensayos ASTM G105.....	49
Fig. 27. Resultados del ensayo ASTM G105 para algunas familias de aceros	50
Fig. 28 Correlación entre desgaste de bolas de molino y factor de abrasión [2].....	52
Fig. 29. Comparativa de desgaste de revestimientos de molinos y ensayo de abrasión a dos cuerpos [3].	53
Fig. 30. Resultados del ensayo ASTM G132 en alúmina de grano 180 para algunas aleaciones férricas [3]......	54
Fig. 31 Correlación entre desgaste de arados y desgaste en rueda de caucho [4].	55
Fig. 32 Calibración de un espesor delgado usando un transductor de haz recto	68
Fig. 33 Calibración de un espesor grueso usando un transductor de haz recto	69
Fig. N°34 Perfil del forro, zonas típicas Cresta y Valle	70
Fig. N°35, desarrollo de los forros	72

INDICE DE TABLAS

TABLA N°1 Principales Aleaciones y sus propiedades.....	46
TABLA N° 2 Perfiles de desgaste de forros en aleacion de acero Cromo – Moly, según la ASTM A 148	74
TABLA N°3: Tendencias de desgaste del espesor del forro en la zona del valle vs Tonelaje con los forros convencionales ASTM A148.....	76
TABLA N°4: Tendencias de desgaste del espesor del forro en la zona del valle vs Dias con los forros convencionales ASTM A148.....	77
TAB LA N°5 Grados ASTM A532 de fundiciones aleadas al cromo.....	78
TABLA N° 6 Resistencia a la abrasión y ratio de desgaste de fundiciones blancas bajo la norma ASTM A 532, pag 97 ASM Alloy Cast Iron	79
TABLA N° 7 Perfiles de desgaste de forros en aleación ASTM A 532 IIB.....	82
TABLA N°8 Tendencias de desgaste del espesor del forro en la zona del valle vs Tonelaje con la aleacion ASTM A 532 IIB	82
TABLA N°9 Tendencias de desgaste del espesor del forro en la zona del valle vs Dias con la aleacion ASTM A 532 IIB.....	824
TABLA N°10 Precio promedio del Oro.....	84
TABLA N°11 Calculo del costo \$ / hora del mineral tratado.....	85
TABLA N°12 Calculo del ahorro \$/año por mineral tratado	85
TABLA N°13 Calculo del ahorro \$ / año por costo del set de forros	86

PROLOGO

En los últimos años en el Perú la industria minera ha ido con un crecimiento sostenido, sin embargo dentro del panorama mundial y después de la crisis del 2010 los inversionistas mineros han visto la gran necesidad de reducir sus costos, lo que ha conllevado a la exigencia en la mejora de sus procesos, tratando siempre de disminuir los costos operativos en el procesamiento de los minerales.

La molienda dentro del procesamiento de minerales juega un rol determinante por la complejidad de las variables que intervienen y los costos operativos de esta etapa dentro del global.

En el presente trabajo se pretende demostrar como trabajando sobre la aleación de los revestimientos del cilindro de un molino de bolas se puede obtener ventajas significativas, tanto desde el punto de vista de la disminución de los costos operativos como de la seguridad de los trabajadores.

CAPITULO I

INTRODUCCION

1.1 ANTECEDENTES

Generalmente en el Perú para los revestimientos de los molinos se usa los forros de Acero Cromo-Molibdeno conocidos como acero Cromo-moly (Cr-Mo), sin embargo estudios realizados por diversas instituciones internacionales como la ASM International (American Society for Materials) y la Asociación de Fundidores Americanos han demostrado que para ciertas aplicaciones y luego de una evaluación de costo-beneficio se puede utilizar las fundiciones de hierro con aleaciones de alto Cromo.

La introducción de esta aleación en el mercado nacional no ha sido muy difundida por las fundiciones nacionales debido al alto costo (aproximadamente el doble de un acero Cr-Mo) y al alto riesgo a la fractura en estos forros, que al ser una aleación con una alta dureza presenta por ende una alta fragilidad, sin embargo algunas mineras han ido probando en sus molinos esta aleación mejorada en donde las condiciones (previamente determinadas) lo permitan y esta aleación ha obteniendo buenos resultados al incrementar la vida útil de los forros respecto a otros aceros y otras aleaciones.

El presente trabajo demuestra como al realizar el cambio de aleación y composición química en los forros; de un acero con contenidos de cromo y molibdeno a una fundición de hierro con contenidos de alto cromo, en un molino primario de 8' x 10', se logra incrementar su vida útil y por ende se optimiza la frecuencia de cambio de los forros en el molino primario, de la empresa Consorcio Minero Horizonte S.A.

1.2 OBJETIVO

1.2.1 OBJETIVO GENERAL

Optimizar el ciclo de vida de los forros del cilindro de un molino primario de 8 pies x 10 pies, utilizando una aleación con mejores características de resistencia a la abrasión en los forros de la primera y segunda fila lado alimentación.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Identificar las zonas de mayor desgaste de los forros del cilindro del molino y sus respectivas tendencias, mediante el uso de ensayos no destructivos (END) – Ultrasonido.
- Determinar el tipo de aleación para los forros del cilindro del molino con mayor resistencia a la abrasión.
- Determinar los costos.

1.3 ALCANCES

El presente trabajo solo comprende el estudio del desgaste de los forros (revestimientos) del cilindro de un molino primario, no incluye estudios de esfuerzos mecánicos sobre los forros ni algún otro componente del molino.

1.4 LIMITACIONES

Por la complejidad del proceso de Fundición solo se repasara superficialmente el proceso de fabricación de la pieza, no estando autorizados a revelar la composición exacta de la fundición de alto cromo; sin embargo sí se proporciona la referencia de la norma y el tipo a la que pertenece, en donde se indica el rango de la composición química, pudiendo ser materia de estudio posterior del autor sobre otras variables tales como el proceso de fundición y el proceso del tratamiento térmico de la pieza.

Solo se está cambiando la aleación de los forros por lo que no se incluye en el presente trabajo el estudio para una posible modificación del perfil.

Se han tomado como referencia los datos proporcionados por el área de Laboratorio metalúrgico de la empresa Consorcio Minero Horizonte.

CAPITULO II

MARCO TEORICO

2.1 MOLIENDA

La molienda es la operación final de reducción de tamaño o la liberación de las partículas valiosas del mineral, para proceder a su concentración.

En esta etapa es necesario reducir su tamaño de 1", $\frac{3}{4}$ ", $\frac{1}{2}$ ", $\frac{3}{8}$ ", $\frac{1}{4}$ ", hasta un producto de 40 a 80 % de malla -200.

La molienda se produce normalmente en tambores rotativos, los mismos que pueden utilizar los siguientes medios de molienda: El propio mineral (molienda autógena y semi - autógena) y medios metálicos (barra o bolas de acero). Los medios de molienda o elementos triturantes deben golpearse entre sí, en esto diferencia estas máquinas de las de chancado, en los cuales las superficies triturantes por el mecanismo que las mueve nunca llegan a tocarse. El producto del chancado del mineral, se almacena en la tolva de finos de donde cae por un chute a la faja transportadora que alimenta al molino de barras o bolas. Entre el chute y la faja hay una compuerta para medir la cantidad de mineral que se va a tratar en la planta.

En esta etapa debe liberarse completamente las partes valiosas del mineral, antes de proceder a la concentración

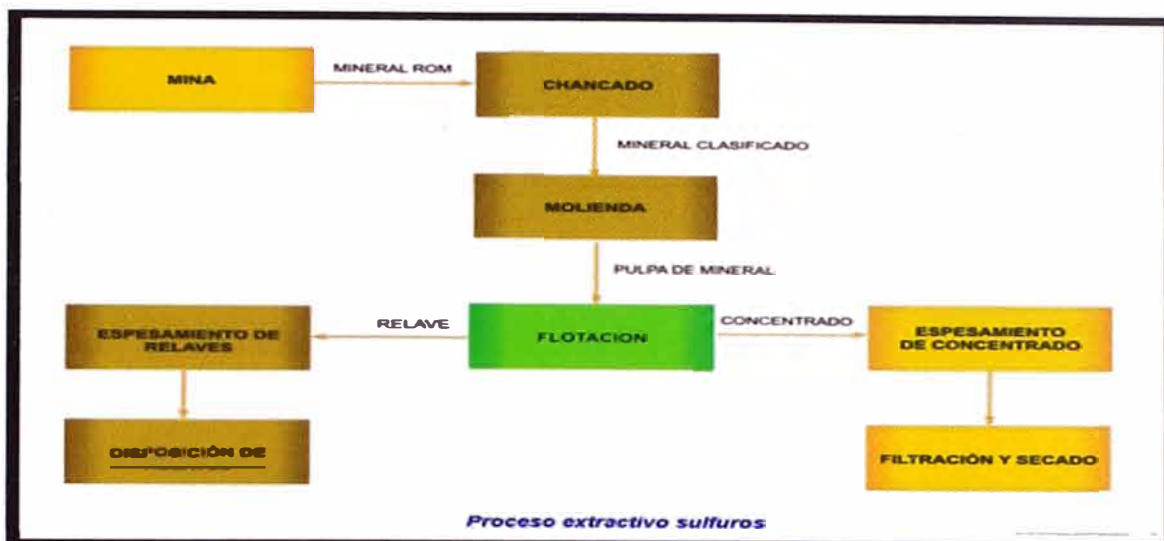


Fig.1 Procmín Perú, Proceso extractivo de Sulfuros

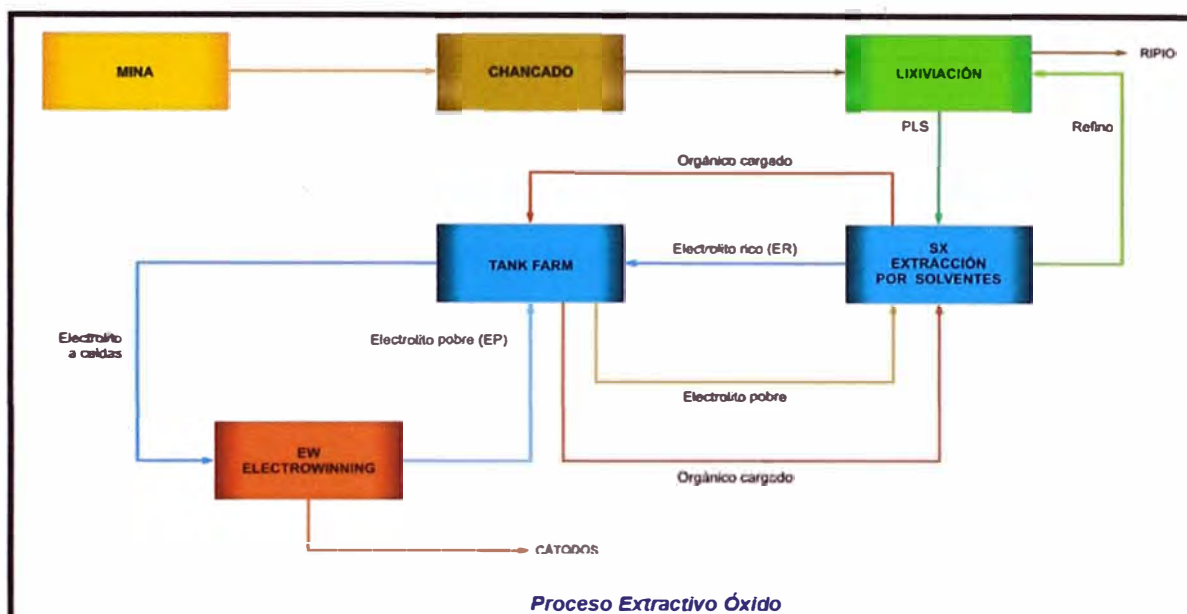


Fig.2 Procmín Perú, Proceso extractivo de Óxidos

Esta operación se logra con alta eficiencia cuando los molinos son operados en condiciones normales en cuanto a uniformidad del tamaño de alimentación, dilución, velocidad de operación, nivel de bolas y de potencia de motor aceptables. Cuanto más fino se muele el mineral, mayor es el costo de molienda y hasta cierto grado, una molienda más fina conlleva a una mejora en la recuperación de valores. De acuerdo a esto, la molienda será óptima con aquella malla de molienda en la cuál los beneficios son máximos.

En las figuras n°3 y n°4 se indican los consumos de energía y costos aproximados por cada etapa característica del procesamiento de los minerales.

	Energía (kWh/t)	Costo (\$/t)
Voladura	0,2	0.15
Chancado	2,0	1.75
Molienda	20,0	3.75

Fig.3 Metso Peru, Costos promedios por etapas de tratamiento













Etapa	Sub etapa	Rango de tamaño	Consumo de energía (Kwh/t)
Chancado	Primario 	100 a 10 cm. 	0,3 a 0,4
	Secundario 	10 a 1 cm 	0,3 a 2
	Terciario 	1 a 0,5 cm 	0,4 a 3
Molienda	Primaria 	0,5 a 1 mm 	3 a 6
	Secundaria 	1 a 0,1 mm 	4 a 10
	Terciaria 	100 a 10 μm 	10 a 30

Fig.4: Procmín Perú, Costos promedios por etapas de tratamiento

2.1.1 Eficiencia del Proceso de Molienda

La eficiencia de la molienda está determinada principalmente por dos parámetros: la energía consumida por tonelada procesada (Kwh/ton) y por la malla o granulometría deseada, que a su vez depende en gran medida de una serie de parámetros como:

- Distribución de tamaños del mineral en la alimentación
- Velocidad y tamaño del molino
- Tamaño del cuerpo moledor
- Diseño de los revestimientos del molino
- Cambios en las características del mineral
- Distribución de tamaños del producto del molino
- Volumen de carga moledora y su distribución de tamaño
- Eficiencia de la clasificación, etc.

Las interrelaciones entre estos factores son complejas y para poder estudiar su influencia es imprescindible fijar algunas variables.

2.1.2 Influencia del chancado sobre la Molienda

La importancia del chancado para el procesamiento de minerales, radica en que mediante ella, es posible liberar los minerales valiosos de los estériles y preparar las superficies y el tamaño de las partículas para procesos posteriores de molienda y concentración.

El tamaño del producto de la operación de chancado a nivel industrial es del orden de $\frac{3}{4}$ ", $\frac{1}{2}$ ", $\frac{3}{8}$ " y $\frac{1}{4}$ ", dependiendo fundamentalmente de la capacidad de la planta y de las características del mineral.

La molienda está considerada como una de las secciones de mayor importancia y responsabilidad en la planta, ya que de ella depende el tonelaje y la liberación para los fines de la flotación.



Fig.5: Procmín Perú, Influencia del Chancado sobre la molienda

2.1.3 Influencia de la Molienda sobre la Flotación

En la sección molienda se realiza la liberación de los sulfuros

- Si el mineral es muy grueso o muy fino, la flotación es deficiente. Se incrementa la pérdida del mineral valioso en el relave (baja recuperación)
- Cuando el mineral es muy grueso falta liberación y los sulfuros valiosos no flotan, perdiéndose en el relave final. Si la molienda es demasiado fina, se producen excesiva cantidad de lamas, y el mineral valioso también se pierde en el relave final.

2.2 MOLINOS

Los molinos son conformados principalmente como cilindros rotatorios horizontales forrados interiormente con materiales resistentes a la abrasión, cargados en un 30-45% de su volumen con barras o bolas de acero. Dentro de esta masa rotatoria de ejes y bolas, se alimenta continuamente el mineral fresco proveniente de la etapa de chancado, la carga de retorno o carga circulante del hidrociclón (U/F) y agua suficiente para formar la masa de mineral

con una densidad adecuada, de manera que la mezcla fluya bajo una ligera cabeza hidráulica, hacia el extremo de descarga del molino.

2.2.1 Partes principales de un Molino

El Casco o cuerpo: Es de forma cilíndrica y desempeña su trabajo en forma horizontal, dicha posición permite la carga y descarga en forma continua, en su interior se encuentran las chaquetas o blindajes, que van empernados en el cuerpo o casco del molino, las cuales a su vez dan protección a dicho cuerpo



Fig.6 Consorcio Minero Horizonte, Cilindro de un molino 9' x 12'

Las tapas: El casco tiene en sus extremos dos tapas del mismo material, una a la entrada y otra a la salida, soportan los cascos y están unidos al trunión, pudiendo formar una sola pieza, en donde se le denomina tapa-trunión.

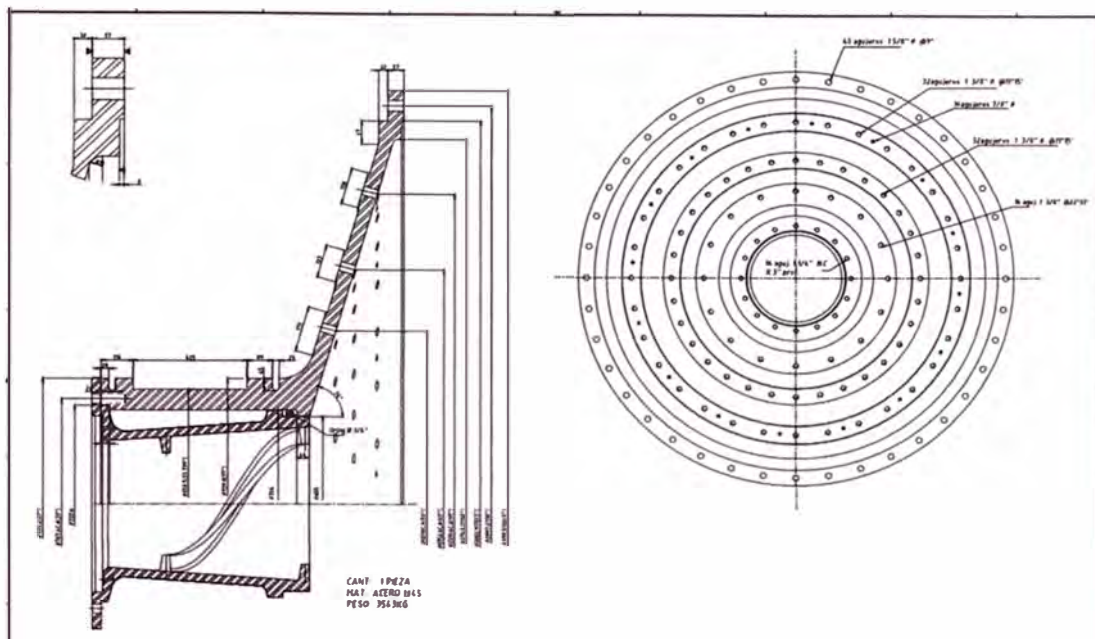


Fig.7 Consorcio Minero Horizonte, Tapa-Trunion de un molino 9'x12'



Fig.8 Consorcio Minero Horizonte, Tapa-Trunion de un molino 9'x12'

- **Los muñones (Trunion):** Del centro de las tapas salen unos tubos (conducto) grandes llamados muñones. Por donde entra la carga se llama muñón de entrada y por donde sale la carga se llama muñón de salida. Estos muñones sirven como puntos de apoyo al molino para girar.

Las chaquetas o forros: El interior del casco y las tapas del molino están protegidos por un revestimiento de planchas con ondulaciones y parrillas, en algunos molinos, de acero o de jebe. Estos le sirven para resguardar al casco de los golpes de los ejes o bolas.

Las chaquetas van aseguradas al cuerpo y a las tapas del molino por medio de pernos. Es más económico cambiar los forros que cambiar el casco y las tapas



Fig.9 Consorcio Minero Horizonte



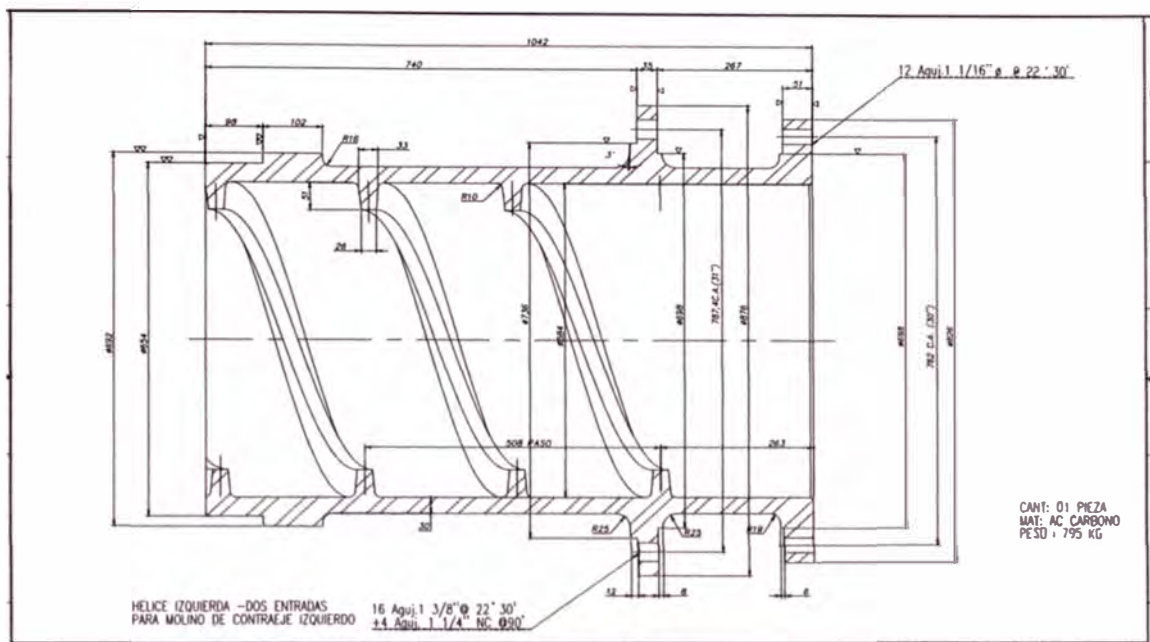
Fig.10 Consorcio Minero Horizonte

Las chumaceras: Se comporta como soporte del molino y a la vez es la base sobre la que gira el molino.

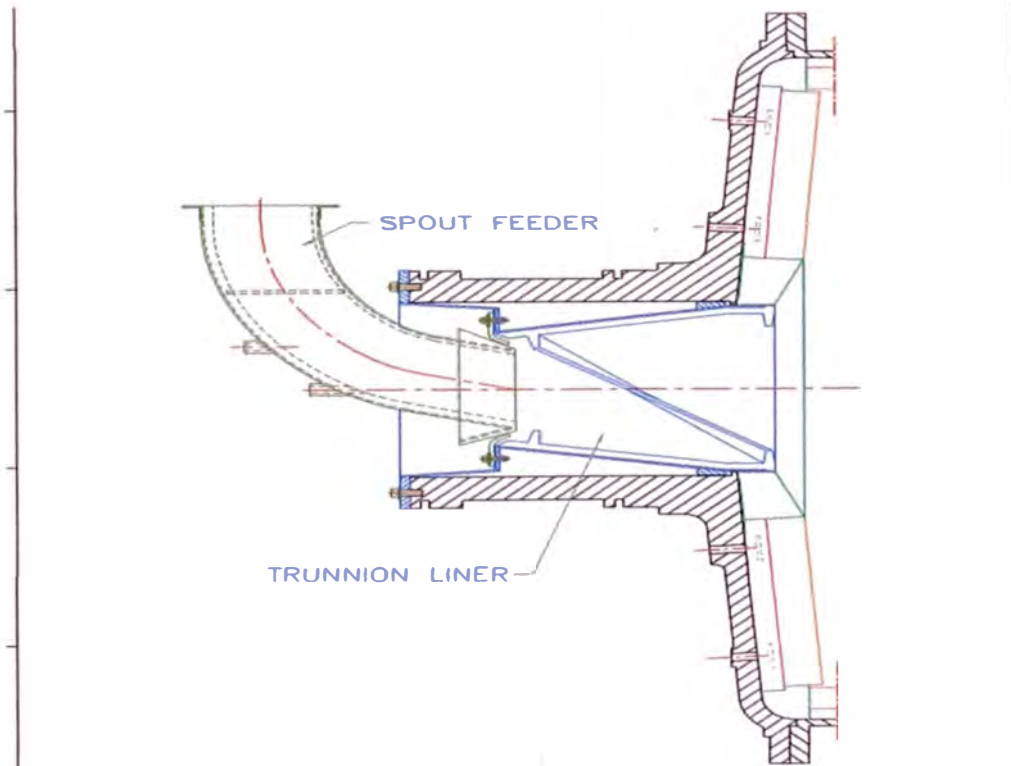


Fig.11 Consorcio Minero Horizonte, Chumacera de un Molino 9'x12'

Trommel. Desempeña un trabajo de retención de las bolas especialmente de aquellos que por el trabajo han sufrido un desgaste excesivo, con la finalidad de que no entren a las bombas.



- **El alimentador (Spout Feeder):** Sirve para dar acceso a la carga o pulpa al molino. Se encuentra entre el chute de alimentación y el muñón de entrada.



La carga moledora: Constituyen parte importante en la molienda del mineral. Están formados por las bolas o barras.

El sistema de transmisión: Es el que da movimiento al molino, está formado por las siguientes partes:

- El coupling, une los ejes de transmisión
- El piñón, está montado sobre un eje y sirve para transmitir el movimiento del motor a la catalina.
- El reductor de transmisión, equipo que proporciona una primera reducción de la velocidad del motor.
- La catalina, es una rueda dentada que rodea la parte exterior del casco.
- El motor eléctrico da la fuerza necesaria para mover el molino, que mediante el contraeje conecta el movimiento al piñón, que a su vez da movimiento a la catalina.



Fig.14 Consorcio Minero Horizonte, Sistema de Transmisión de un Molino 9'x12

2.2.2 Molino de Bolas

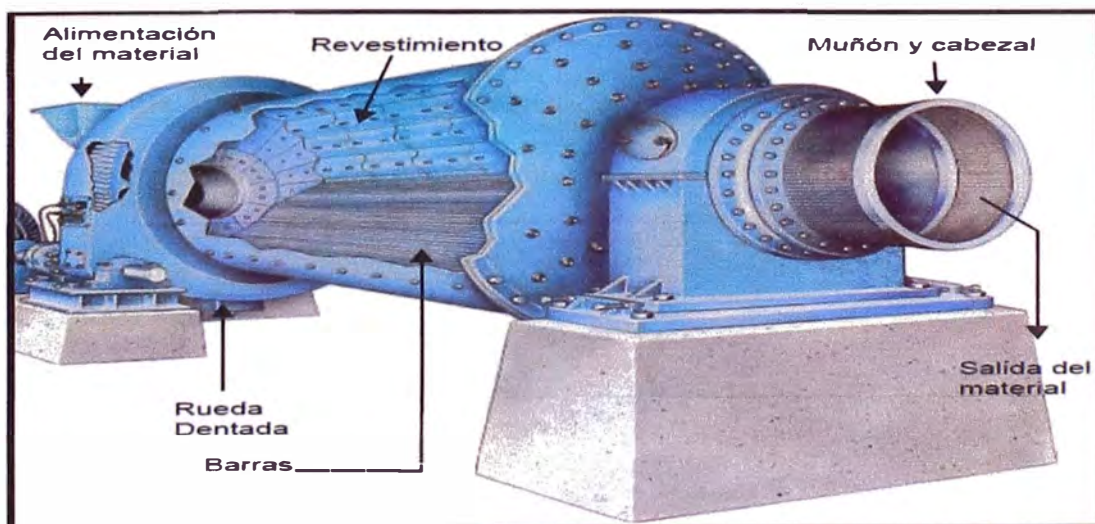
Se llama así porque en su interior tienen bolas como medios moledores. El tamaño del alimento que pueden recibir es variable y depende de la dureza del mineral. Los productos igualmente dependerán de las condiciones de

operación y pueden ser tan gruesos como la malla 35 o tan finos que se encuentren en un 100% por debajo de la malla 150 con radios de reducción de 5 o mayores (velocidad de operación del molino 8'x 10' es de 20 rpm)



2.2.3 Molino de barras

Se le llama así porque en su interior tienen ejes o barras. Se utiliza generalmente para molienda primaria. Aceptan alimentos tan gruesos como de 1½" y producen descargas constituidas por arenas que pasan generalmente la malla 6 o 10. La molienda es producida por barras que originan frotamiento e impacto sobre el mineral, el cual por su mayor tamaño en la alimentación respecto a la carga, origina que las barras ejerzan una acción de tijeras, produciendo molienda por impacto en las zonas cercanas a la entrada y por fricción en las cercanías de la descarga.



2.2.4 Molinos AG

Es un método de reducción de tamaño en el cual los medios moledores, están formados principalmente por el propio mineral que se procesa, obtenidas y seleccionadas de una etapa de reducción de tamaño anterior. El uso de material como medio de molienda en molinos autógenos hace que la selección y operación de estos molinos sea más complicada y dependa fuertemente de las características del mineral.

2.2.5 Molinos SAG

Es un método de reducción de tamaño en el cual los medios moledores, están formados tanto por el mismo mineral que se procesa, como por un porcentaje del volumen total del molino correspondiente a bolas de acero. Este porcentaje puede variar entre un 4 a 18%. La carga máxima de bolas corresponde a valores de 12 a 14%, límite impuesto por el desgaste excesivo de las bolas y liners, y además por los problemas mecánicos que surgen al usar cargas de bolas mayores.

La molienda autógena y semiautógena se caracteriza por emplear una parrilla de descarga, a fin de evitar que el material grueso escape del molino. La descarga se produce una vez que el material alimentado al molino ha sido reducido a un tamaño menor o igual que las aberturas de la parrilla (de ½" hasta 3"). La parrilla actúa como un clasificador del material saliente del molino. Operacionalmente, la clasificación no es perfecta, quedando siempre retenida en el molino una fracción de mineral más pequeña que el tamaño de la abertura.



2.3 VARIABLES OPERATIVAS DE LOS MOLINOS

2.3.1 Carga de Mineral

Teniendo presente que una de las bases de la productividad en la concentradora, es el tonelaje que se trata, por esta razón, es necesario controlar en forma cuidadosa y continua el tonelaje de la molienda; es decir, controlar a menudo la lectura de la balanza a fin de que no exista ningún desperfecto; esto traería como consecuencia la variación del tonelaje, error en el control del mismo y en los cálculos metalúrgicos. Esta carga de mineral debe reunir ciertos requisitos, tales como:

Cantidad y Peso constante. Se debe controlar continuamente procurando que la carga sea lo máximo posible y uniforme. Si se alimenta poca carga se pierde capacidad de molienda y se gasta inútilmente bolas y chaquetas. Si se alimenta demasiada carga se sobrecarga el molino y al descargarlo se pierde tiempo y capacidad de molienda (tonelaje)

La cantidad de carga alimentada se controla directamente por medio de las balanzas automáticas, o indirectamente por medio del sonido que

produce el molino, densidad de pulpa o por medio del amperaje del motor del molino.

Debe tener un tamaño apropiado y debe ser tan uniforme en calidad como sea posible; esto es, del tamaño ideal para maximizar el tonelaje.

2.3.2 Suministro de Agua

La alimentación de agua a los molinos se controla mediante la densidad de pulpa en la descarga del mismo.

Cuando el mineral y el agua ingresan al molino, en su interior, forman un barro liviano que tiene tendencia de pegarse a las bolas, por otro lado el agua ayuda a avanzar a la carga en el interior del molino, para su posterior salida

Cuando la cantidad de agua suministrada es excesiva, esta lava la superficie de las bolas haciendo que estas se golpeen entre sí y no muelen al mineral, ya que la molienda se produce cuando el barro adherido a su superficie es atrapado entre las bolas.

El exceso de agua disminuye el tiempo de permanencia del mineral en el interior del molino, haciendo que la carga salga rápidamente y con granulometría gruesa.

Cuando la cantidad de agua es deficiente, la carga avanza lentamente y el barro se vuelve muy espeso, amortigua el golpe entre las bolas y no produce buena molienda; La forma de solucionar este problema es controlando la densidad hasta que se regularice; de lo contrario esto daría lugar a una sobrecarga y una carga circulante anormal.

2.3.3 Volumen de Carga

La carga del medio de molienda, depende del volumen que ocupara en el molino (30 – 45%), principalmente depende del tamaño y diseño del molino.

Es necesario que el molino siempre tenga su carga normal de medios moledores. El consumo de bolas se debe a la dureza del mineral, índice de abrasión, tamaño del mineral alimentado y la finura que se desea obtener en la molienda. Diariamente se debe reponer el peso de acero consumido del día anterior. Cuando el molino tiene exceso de bolas se disminuye la capacidad del molino, ya que estas ocupan el espacio para la carga. Cuando la carga de bolas está por debajo de lo normal, se pierde capacidad moledora porque habrá dificultad para llevar el mineral a la granulometría deseada.

2.3.4 Condición de los Revestimientos

Es conveniente revisar periódicamente la condición en que se encuentran los forros tanto del cilindro como de las tapas, si se encuentran con excesivo desgaste ya no podrán elevar las barras o las bolas a la altura suficiente para que puedan trozar el mineral grueso

La carga de bolas y condición de los blindajes se puede controlar directamente por observaciones o indirectamente por la disminución de la capacidad de molienda y por análisis de mallas del producto de la molienda.

2.3.5 Tiempo de Molienda

La permanencia del mineral dentro del molino determina el grado de finura de las partículas liberadas. El grado de finura está en relación directa con el tiempo de permanencia en el interior del molino, pero el tonelaje de mineral tratado disminuirá si es demasiado prolongado. El tiempo de permanencia se regula por medio de la cantidad de agua añadida al molino; el tiempo será mayor cuando ingresa al molino menor cantidad de agua y será menor cuando ingresa al molino mayor cantidad de agua.

2.3.6 Velocidad de Giro del Molino

Es importante conocer la velocidad de giro, la cual en conjunto con el perfil de los forros del molino generan la trayectoria de la carga de bolas. La velocidad de giro del molino es un porcentaje definido de la velocidad crítica del molino.

2.3.7 Carga circulante

Muchos de los procesos de concentración de minerales requieren un rango adecuado de tamaño de partículas, por lo que este producto deberá ser clasificado para que el material grueso retorne al molino. El tonelaje de material grueso que retorna al molino es definido como carga circulante, mientras que la relación de carga circulante, tonelaje de alimentación original al molino, se define como el porcentaje de carga circulante.

2.4 MECANISMOS DE CONMINUCION EN LOS PROCESOS DE MOLIENDA

Se usa el término de conminución para identificar los procesos que tienen que ver con la acción de reducción de tamaño.

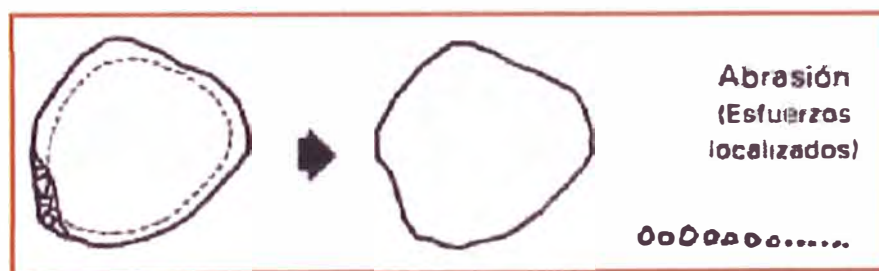
Los objetivos de la conminución principalmente son:

- Producir partículas de tamaño y forma adecuadas para su utilización directa.
- Liberar los materiales valiosos de modo que ellos puedan ser concentrados.

2.4.1 Tipos de Mecanismos de Conminución

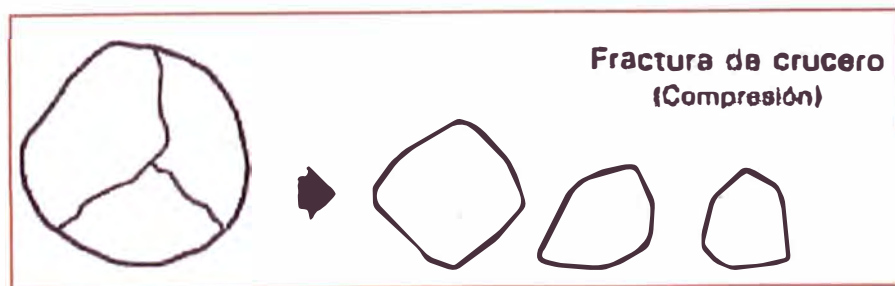
- **Abrasión**

La energía aplicada es insuficiente para causar fractura generalizada en la partícula, resultando una distribución de partículas de tamaño casi igual al original y partículas finas



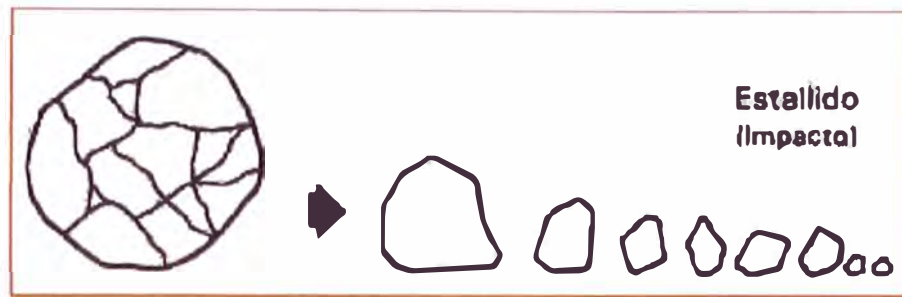
- **Compresión**

La energía es aplicada lentamente y es la necesaria para llevar a la partícula justo a su punto de fractura, rompiéndola en unos pocos pedazos.



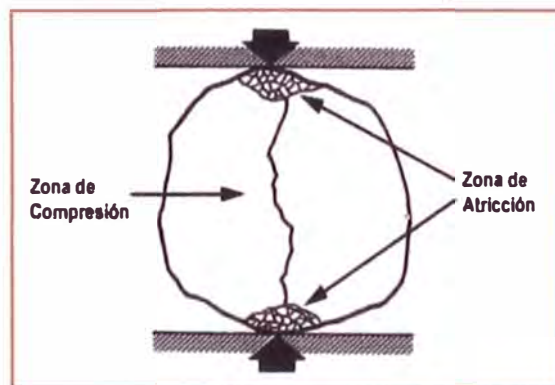
- **Impacto**

Ocurre cuando la energía es aplicada rápidamente y es mayor que la que se necesita para romper la partícula, entonces la partícula se fractura con un amplio espectro de tamaños.



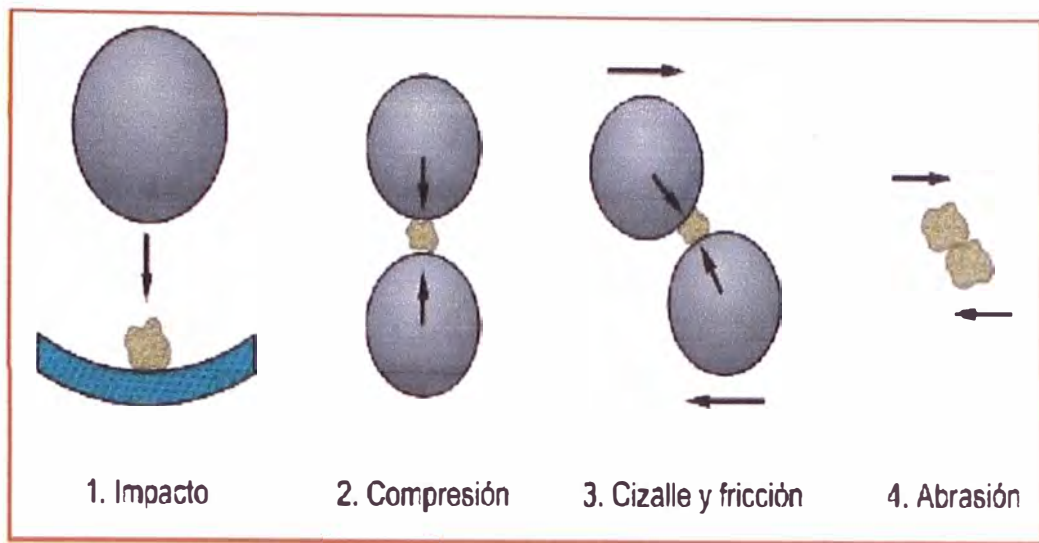
- **Astillamiento**

Consiste en el desprendimiento de todas las esquinas y cantos de las partículas esto se debe a la aplicación de esfuerzos tangenciales que no son suficientes para fracturar la partícula completa.



- **Atrición**

Abrasión y astillamiento suelen agruparse como un solo mecanismo llamado atrición; En la trituración por atrición las partículas se desmenuzan debido a fuerzas de fricción que se generan entre dos superficies duras o entre partículas y como resultado se producen partículas bastante pequeñas y también grandes



FUENTE: METSO

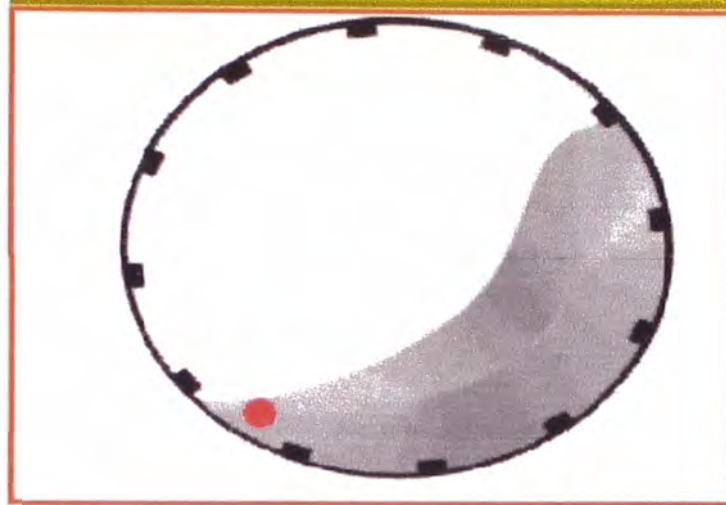
2.5 MOVIMIENTO DE CARGA EN UN MOLINO

La acción moledora de este tipo de molinos, es ejercida por contacto entre las bolas y el mineral mediante acción de impacto y atricción principalmente, efectuado por los movimientos tipo cascadas y cataratas de los medios moledores.

Debido a la rotación y a la forma de los revestimientos del molino los medios de molienda son elevados a lo largo del lado ascendente del molino hasta una posición de equilibrio, una vez que llegan a la posición superior, los medios de molienda caen hacia abajo en forma de cascada y catarata, alrededor de una zona donde ocurre poco movimiento

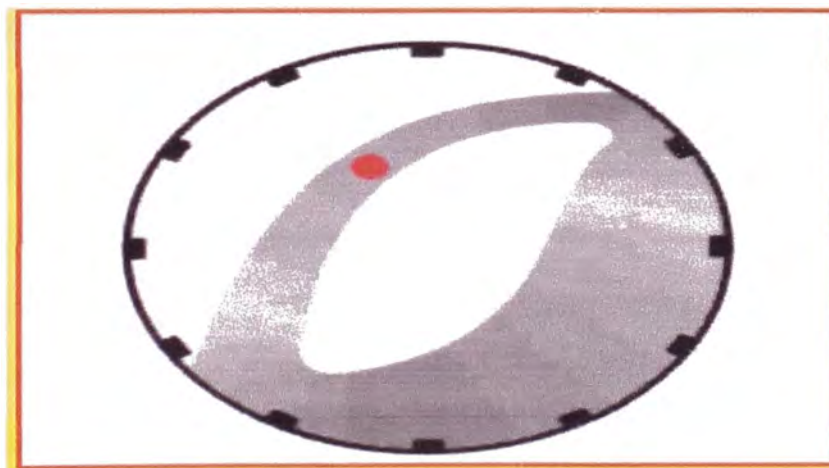
Se dice que es tipo cascada cuando los medios de molienda (bolas) ruedan de la parte alta de la carga hasta el pie de ella, El movimiento de cascada generalmente produce fragmentación por fricción lo que da lugar a un producto de molienda fino.

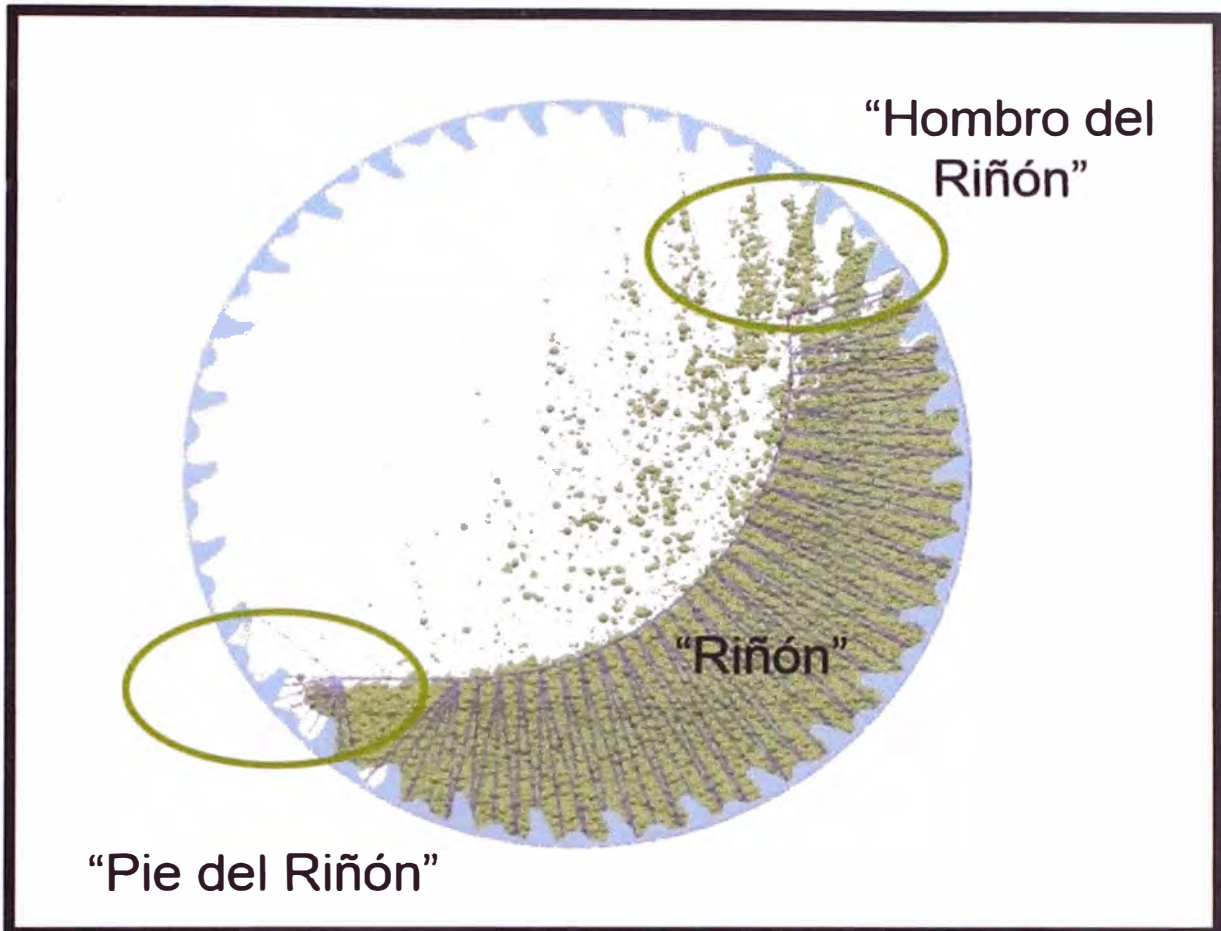
movimiento de cascada



Se dice que es de tipo catarata cuando los medios de molienda (bolas) son arrojados desde la parte alta de la carga hasta el pie de ella. El movimiento de catarata generalmente produce fragmentación por impacto, lo que da lugar a un producto de molienda grueso.

movimiento de catarata



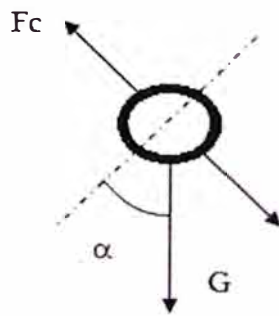


FUENTE: REVEMOL PERU 2014-MELECMETAL Capacidades de Diseño de Revestimientos de Molinos

2.5.1 Velocidad crítica en un molino

La velocidad crítica para un molino y sus elementos moledores es aquella que hace que la fuerza centrífuga que actúa sobre los elementos moledores, equilibre el peso de los mismos en cada instante. Cuando esto ocurre, los elementos moledores quedan “pegados” a las paredes internas del molino y no ejercen la fuerza de rozamiento necesaria sobre el material para producir la molienda. El molino, entonces, deberá trabajar a velocidades inferiores a la crítica.

A continuación se expone un ejemplo de cálculo de velocidad crítica con elementos esféricos (bolas). Utilizando un sistema de referencia no inercial se tiene:



$$F_{centrifuga} = m.a_c = m.\frac{v^2}{R}$$

a = aceleración centrífuga

Planteando ahora el equilibrio de fuerzas antes mencionado y siendo $G.\text{sen}\alpha$ la componente centrípeta del peso G se llega a:

$$F_{centrifuga} = \frac{m.v^2}{R} = G.\text{sen}\alpha$$

$$\alpha \rightarrow 90^\circ \Rightarrow \text{sen}\alpha \rightarrow 1, \text{ reemplazando: } G = m.\frac{v^2}{R}$$

$$\text{Si } G = m.g \text{ y } v = 2.\pi.r.n = D.n.\pi, \text{ reemplazando: } m.g = \frac{m.D^2.n^2.\pi^2}{R}$$

$$\Rightarrow g = \frac{D^2.n^2.\pi^2}{R} \Rightarrow g = 2.D.n^2.\pi^2 \Rightarrow n^2 = \frac{g}{2.D.\pi^2}$$

$$\Rightarrow n = \sqrt{\left(\frac{9,8}{2.\pi^2}\right) \cdot \frac{1}{D}} \Rightarrow n(\text{rps}) = \frac{0,705}{\sqrt{D(m)}}$$

$$\Rightarrow \boxed{n_c(\text{rpm}) = \frac{42,3}{\sqrt{D(m)}}} \Leftrightarrow \boxed{n_c(\text{rpm}) = \frac{76,63}{\sqrt{D(\text{ft})}}}$$

“La velocidad crítica es función de la inversa de la raíz cuadrada del diámetro del molino”.

2.5.2 Efecto de la velocidad de giro del molino en el movimiento de carga de un molino

Diversos estudios realizados han logrado demostrar la influencia de la variación en el % de la velocidad crítica sobre la trayectoria de los medios de molienda, lo cual determina si la molienda es eficiente o no., a continuación se exponen dos estudios realizados por dos métodos diferentes, en donde se logra apreciar que al incrementar demasiado la velocidad crítica los medios de molienda pueden impactar contra los revestimientos lo que ocasionaría un desgaste prematuro de estos.

El primero realizado en la Universidad de Santiago de Chile en el año 1992 por los investigadores Luis Magne y Walter Valderrama, utilizaron un molino de laboratorio de tapa transparente y variaron el % de velocidad crítica pudiendo observar como variaban las trayectorias de los medios de molienda.

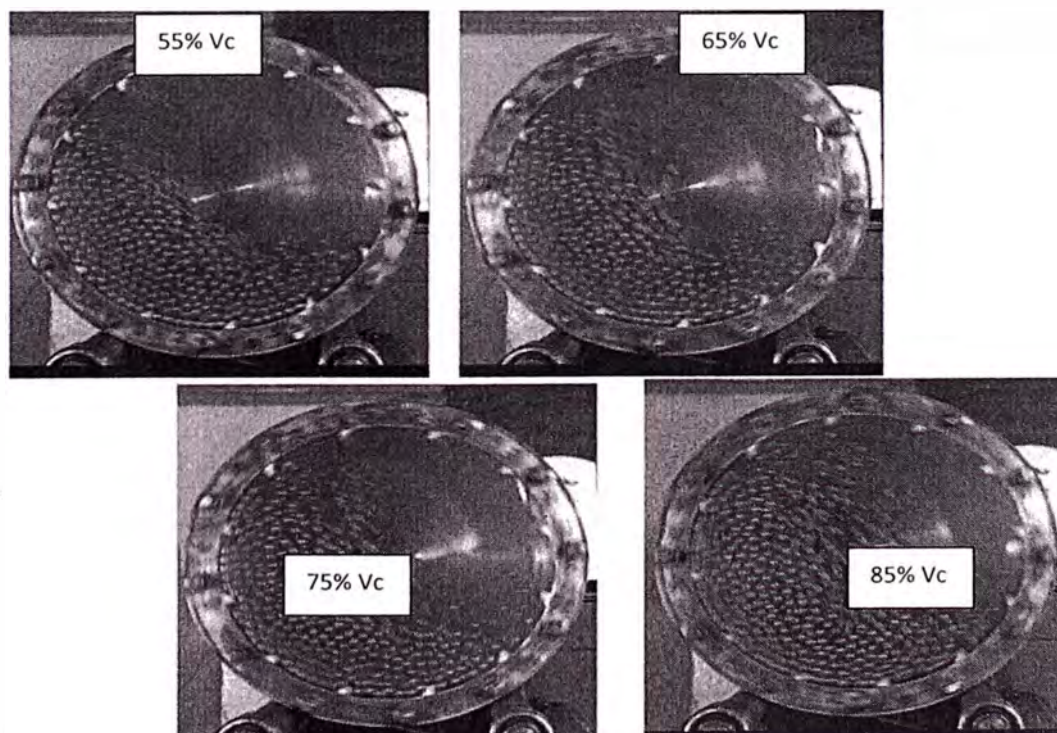


Fig.15: Efecto de la Velocidad de Giro de un Molino, fuente: Universidad de Santiago de Chile, L.Magne y W. Valderrama

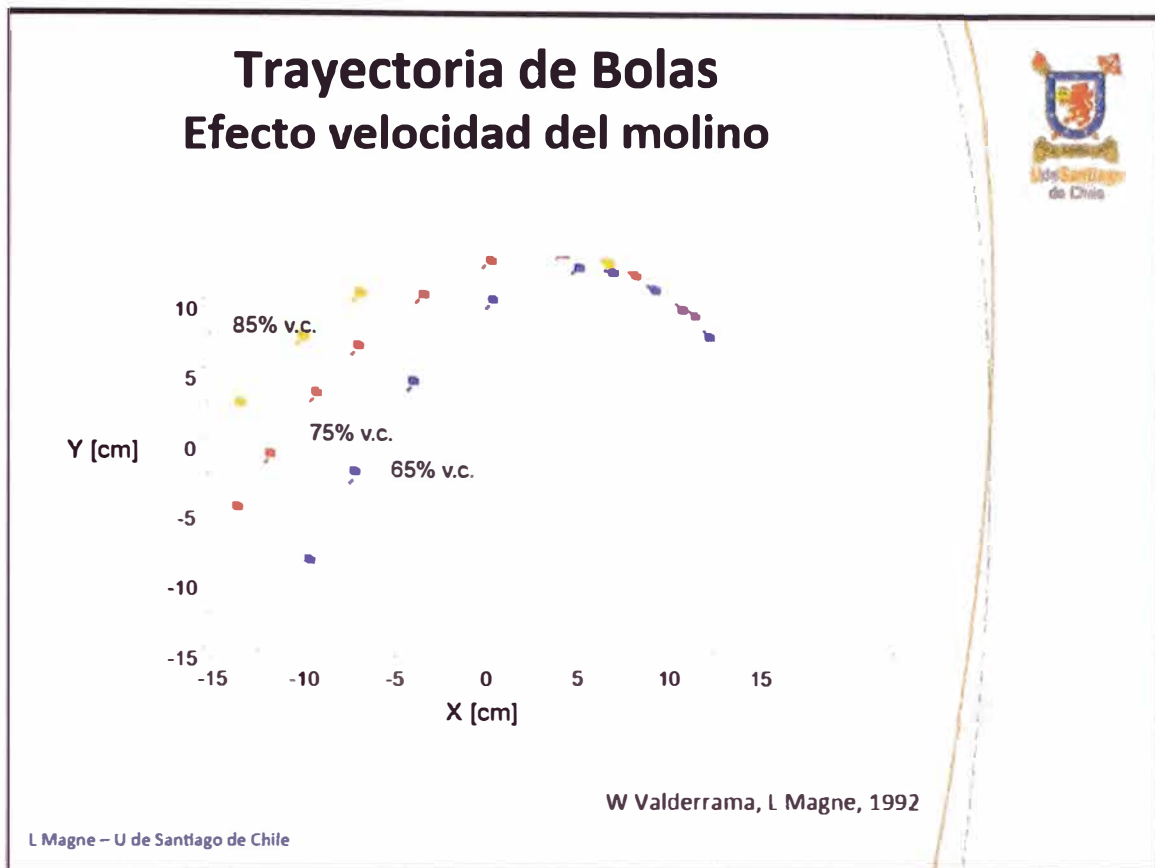


Fig.16 Trayectoria de medios de molienda por efecto de la velocidad de giro del molino, fuente: Universidad de Santiago de Chile, L.Magne y W. Valderrama

El segundo estudio se basa en el método de análisis matemático y computacional mediante los elementos discretos, Discrete Element Method (DEM), el cual ha sido desarrollado desde el año 2001 en instituciones como : Massachusetts Institute of Technology (MIT), Harvard University Institute of Northern Engineering, University of Alaska, University of Pittsburgh, etc y aplicadas en mineras de primer nivel como Antamina (Perú), Codelco (Chile), Antapaccay (Perú), Chinalco (Perú), Constancia(Perú),etc.

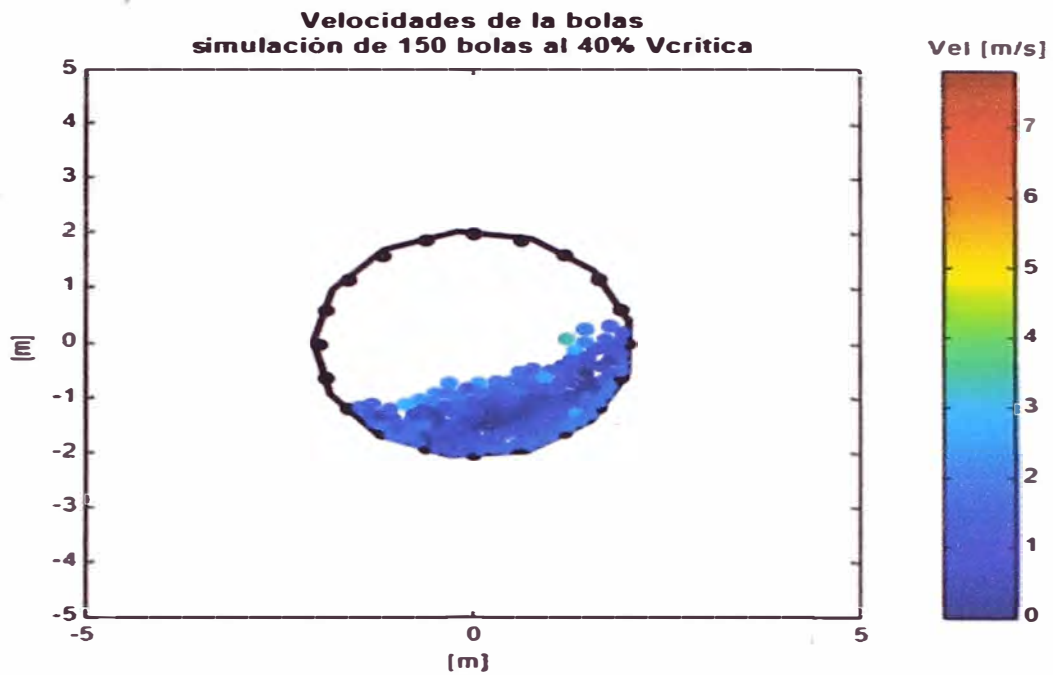


Fig.17 Evaluación de las cargas de impacto en el interior de un molino, Fuente: Universidad de Concepción, Gabriel Barrientos – Luis Espejo.

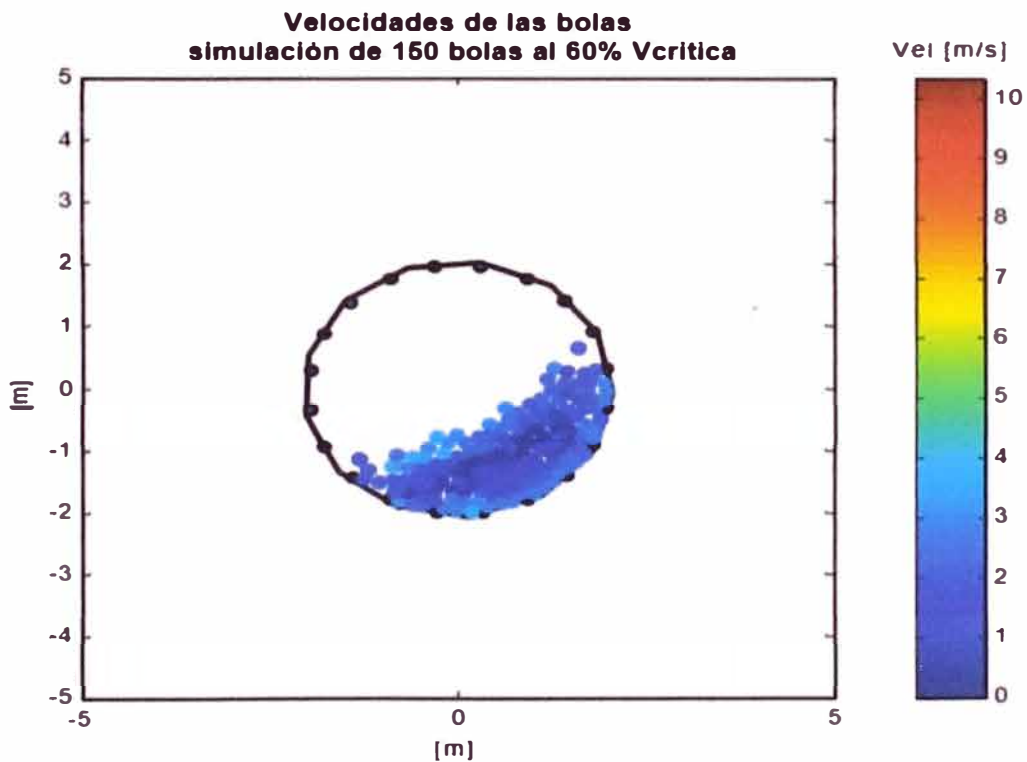


Fig.18 Evaluación de las cargas de impacto en el interior de un molino, Fuente: Universidad de Concepción, Gabriel Barrientos – Luis Espejo.

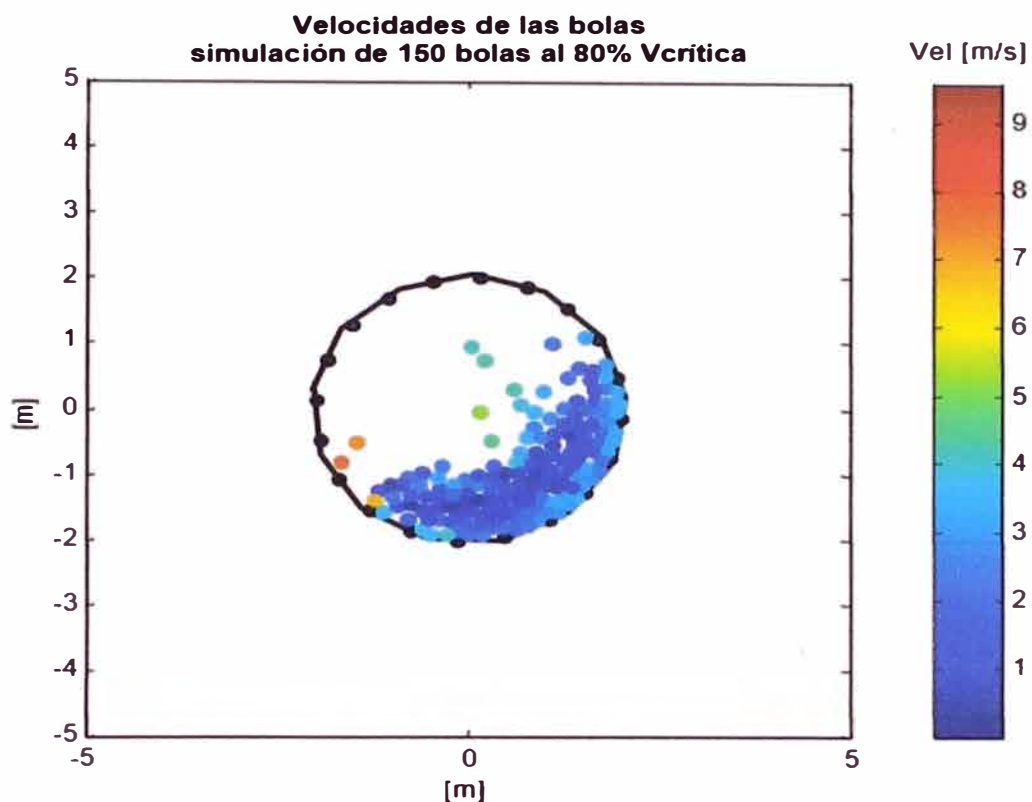


Fig.19 Evaluación de las cargas de impacto en el interior de un molino, Fuente: Universidad de Concepción, Gabriel Barrientos – Luis Espejo.

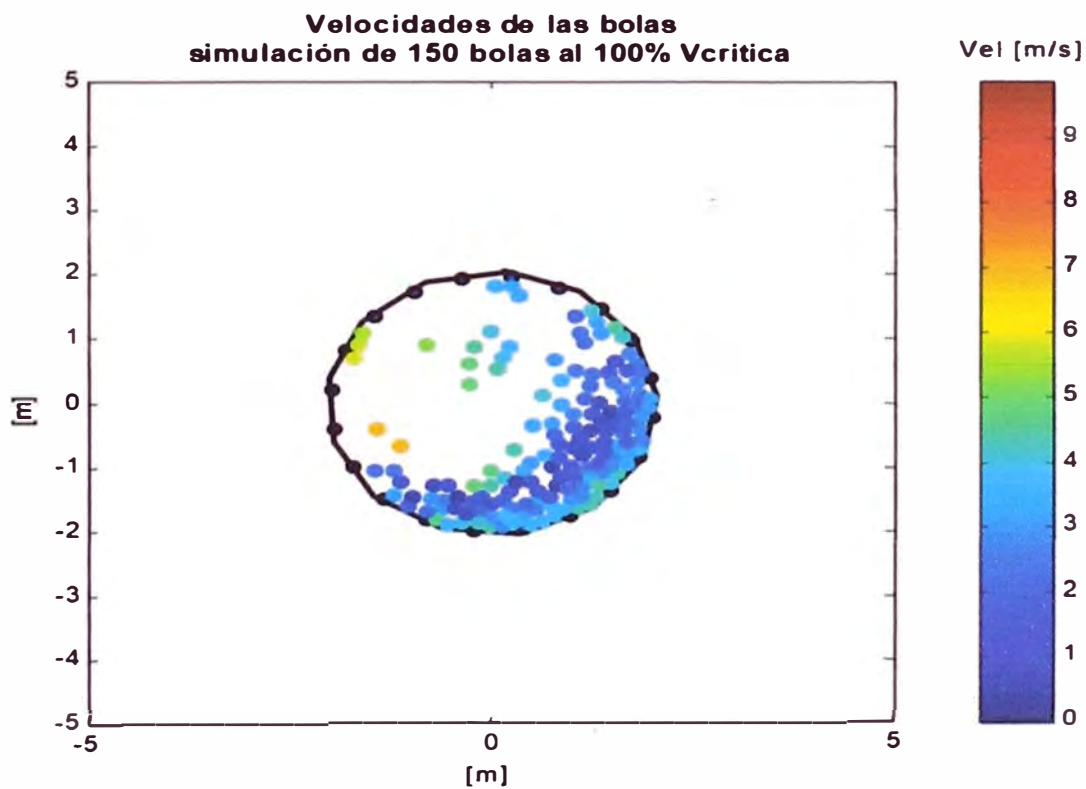


Fig.20 Evaluación de las cargas de impacto en el interior de un molino, Fuente: Universidad de Concepción, Gabriel Barrientos – Luis Espejo.

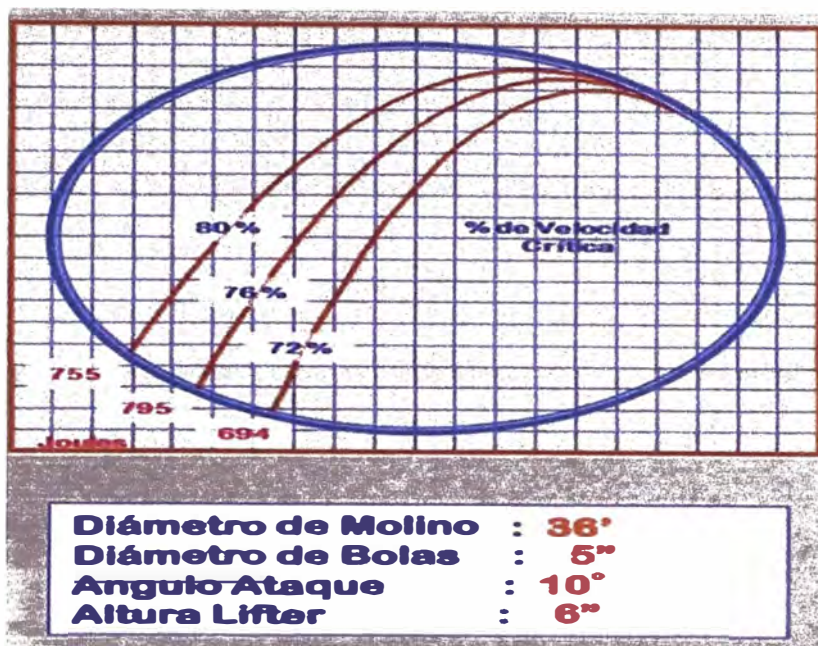


Fig.21 FUENTE: MOLYCOP CHILE, 9NO CONGRESO NACIONAL DE MINERIA TRUJILLO - PERU

2.6 TIPOS FUNDAMENTALES DE DESGASTE

El desgaste es conocido desde que el ser humano comenzó a utilizar elementos naturales que le servían como utensilios domésticos. Este fenómeno al igual que la corrosión y la fatiga, es una de las formas más importantes de degradación de piezas, elementos mecánicos y equipos industriales. El desgaste puede ser definido como el daño superficial sufrido por los materiales después de determinadas condiciones de trabajo a los que son sometidos. Este fenómeno se manifiesta por lo general en las superficies de los materiales, llegando a afectar la sub-superficie. El resultado del desgaste, es la pérdida de material y la subsiguiente disminución de las dimensiones y por tanto la pérdida de tolerancias. Los mecanismos de daño en los materiales se deben principalmente a deformación plástica, formación y propagación de grietas, corrosión y/o desgaste. Desde que el desgaste comenzó a ser un tópico importante y que necesitaba ser estudiado y entendido, comenzaron a aparecer en los libros de diseño y en la mente de los diseñadores, ideas sencillas de cómo prevenirlo o combatirlo, entre esas ideas se tienen:

1. Mantener baja la presión de contacto
2. Mantener baja la velocidad de deslizamiento
3. Mantener lisas las superficies de rodamientos
4. Usar materiales duros
5. Asegurar bajos coeficientes de fricción
6. Usar lubricantes

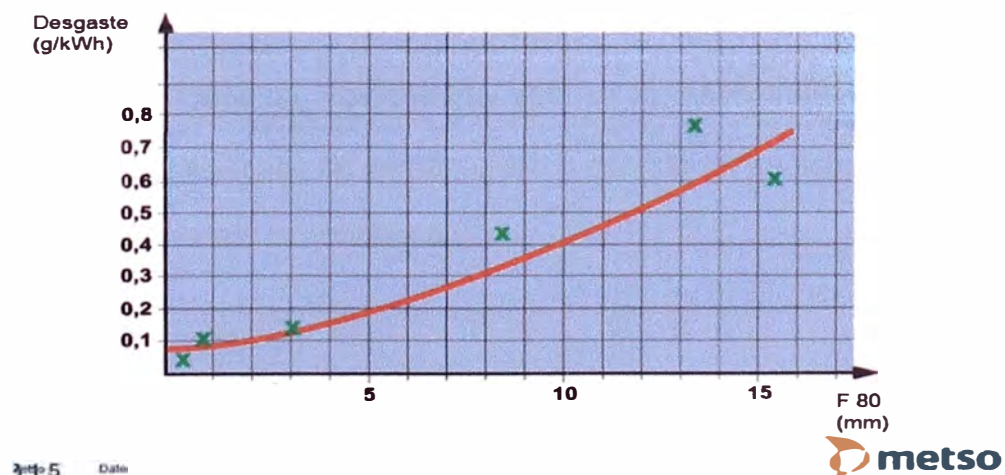
2.7 FACTORES QUE INFLUENCIAN EN LA VELOCIDAD DE DESGASTE DE LOS FORROS DE UN MOLINO

Se tiene los siguientes factores:

- Granulometría del material alimentado.
- Velocidad del molino.
- Volumen de carga (grado de llenado).
- Granulometría del material alimentado:

De la gráfica se observa que a mayor tamaño en la granulometría de la alimentación existe una mayor tasa de desgaste, quiere decir que, bajo los mismos parámetros de operación, un molino que es alimentado con un mineral de mayor tamaño tendrá un mayor desgaste en sus forros.

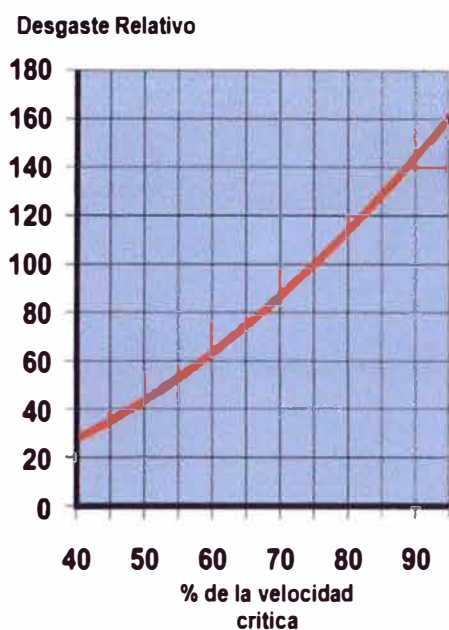
- Granulometría (Material alimentado) x Tasa de Desgaste



Velocidad de Giro del molino:

Vimos anteriormente como con un incremento en la velocidad de giro del molino incrementaba las velocidades de los medios de molienda ocasionando un mayor desgaste entre bola-bola y bola-revestimiento.

➤ Velocidad de Rotación x Tasa de Desgaste



Reducción de Velocidad

- Aumento de la vida del revestimiento;
- Aumento del consumo de los medios molidores.

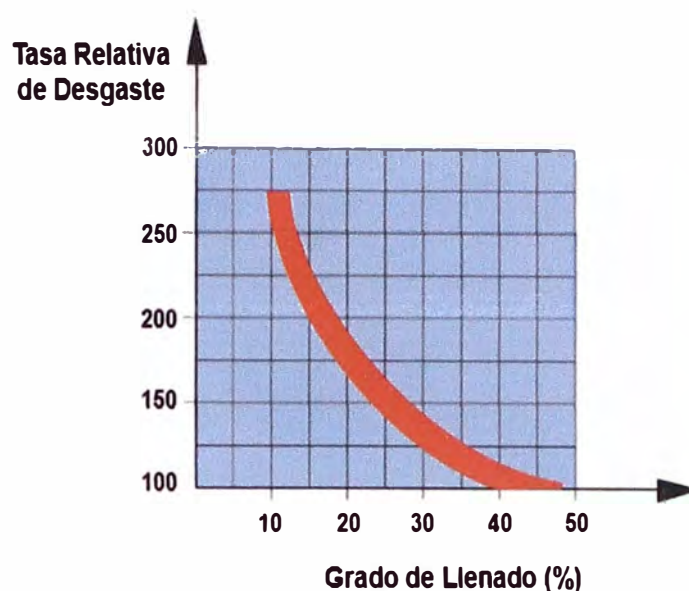
© Metso Date



- Porcentaje de llenado de un molino:

De los ensayos de laboratorio se ha podido obtener la gráfica, que claramente nos indica que un molino no debe trabajar sin carga, puesto que la tasa de desgaste se incrementa rápidamente, esto en la práctica se puede dar cuando hay atoros en los chutes de alimentación o cuando no se tiene un programa de reposición de medios molidores óptimo.

➤ Grado de Llenado del Molino x Tasa de Desgaste



Metso Dale



2.8 ENSAYOS DE RESISTENCIA AL DESGASTE.

Como se ha mencionado anteriormente, la resistencia al desgaste depende no sólo del material empleado sino de todo el sistema en el que está instalado. A pesar de que existen análisis que muestran la correlación entre los distintos métodos de ensayo, los mejores resultados se obtienen cuando se realizan ensayos de laboratorio que simulen las condiciones principales de desgaste y, particularmente, el mecanismo principal que opera en el sistema para permitir relacionar los resultados con la duración real en servicio. Con estas consideraciones existen cientos de ensayos de desgaste descritos, analizaremos los más conocidos en lo que a desgaste abrasivo refiere.

2.8.1 Ensayos de abrasión severa o por arranque de material

Este ensayo utiliza un molino de mandíbulas modificado, cuyo esquema se muestra en la figura 22. La placa fija (1) está fabricada en el material a ensayar y la placa móvil en un material de referencia. La placa móvil abre y cierra según el movimiento de una excéntrica (7). La apertura y el cierre de la placa móvil muelen el material entre ella y la placa fija hasta que es suficientemente fino para pasar por el espacio en la parte inferior de las dos placas. En un ensayo se muelen 1000 kg de roca de entre 4 y 5 centímetros de tamaño en cuatro lotes de 250 kilos cada uno. Tanto la placa fija como la móvil se pesan antes y después de la molienda con una precisión superior a la décima de gramo. Entre cada lote de molienda las mandíbulas se reposicionan para que el ancho en su parte inferior sea de 3.2 mm. Los resultados del ensayo se presentan como tasa de desgaste entre la placa a ensayar y la placa de referencia.

Se han ensayado numerosas aleaciones férreas según este sistema. Los resultados se suelen listar según dos criterios: según el efecto de la microestructura y según el efecto de la dureza. Las gráficas mostrando las bandas de dureza según estos criterios se muestran en la figura 23. Como puede apreciarse, no existe buena correlación entre la dureza original y la resistencia al desgaste siendo la correlación muy buena entre la dureza en estado deformado en la superficie y la resistencia al desgaste. Este endurecimiento superficial se produce en una capa muy fina y ha de ser medido por técnicas de microdureza.

De igual modo puede observarse la gran diferencia en la respuesta al desgaste entre la austenita al manganeso y la austenita al níquel.

Esto responde a la gran diferencia en el endurecimiento por deformación de ambas fases.

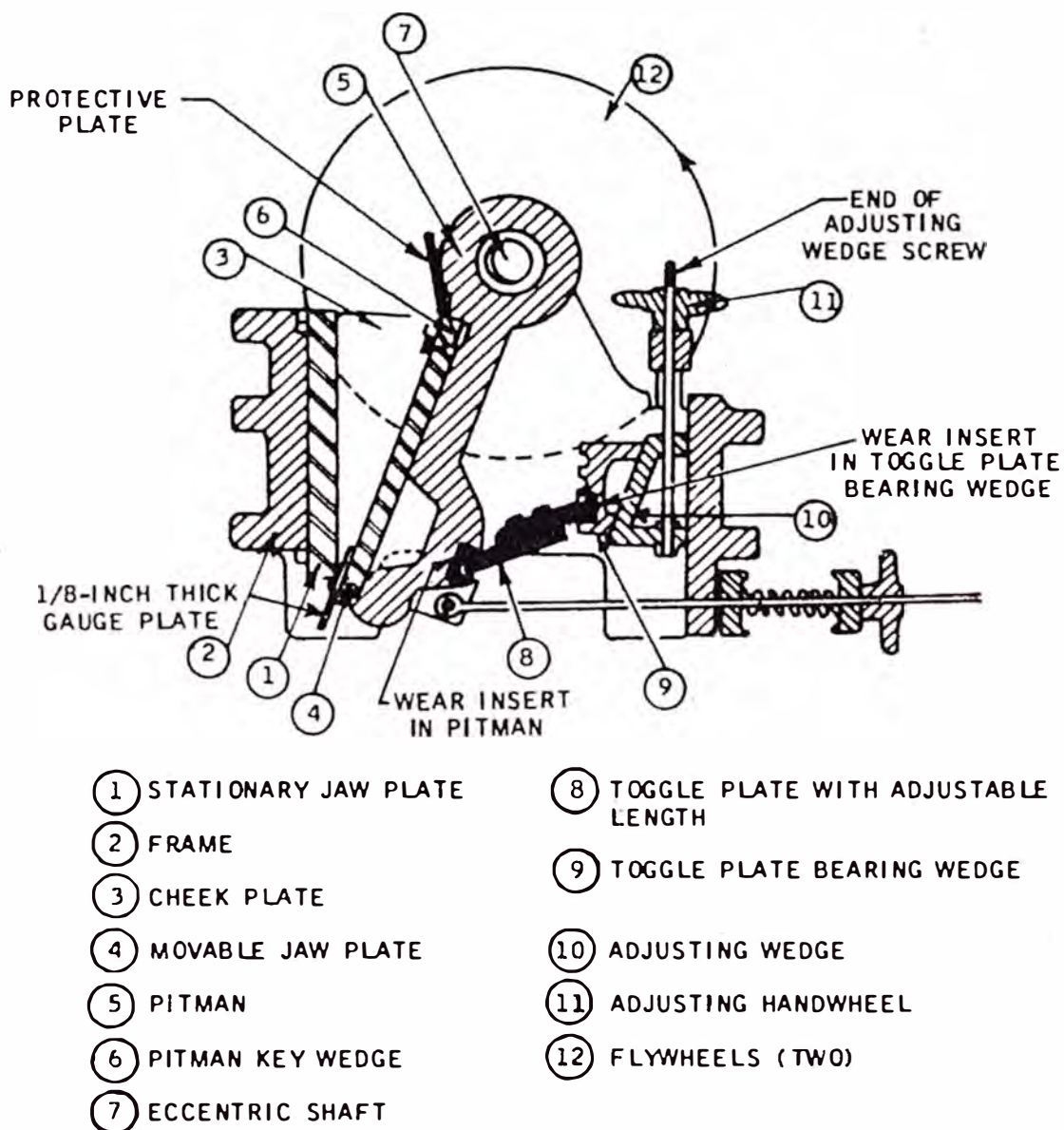


Figura 22 Ilustración de un molino de mandíbulas para ensayos de desgaste.
FUENTE: STEEL CASTING HANDBOOK CAPITULO 19

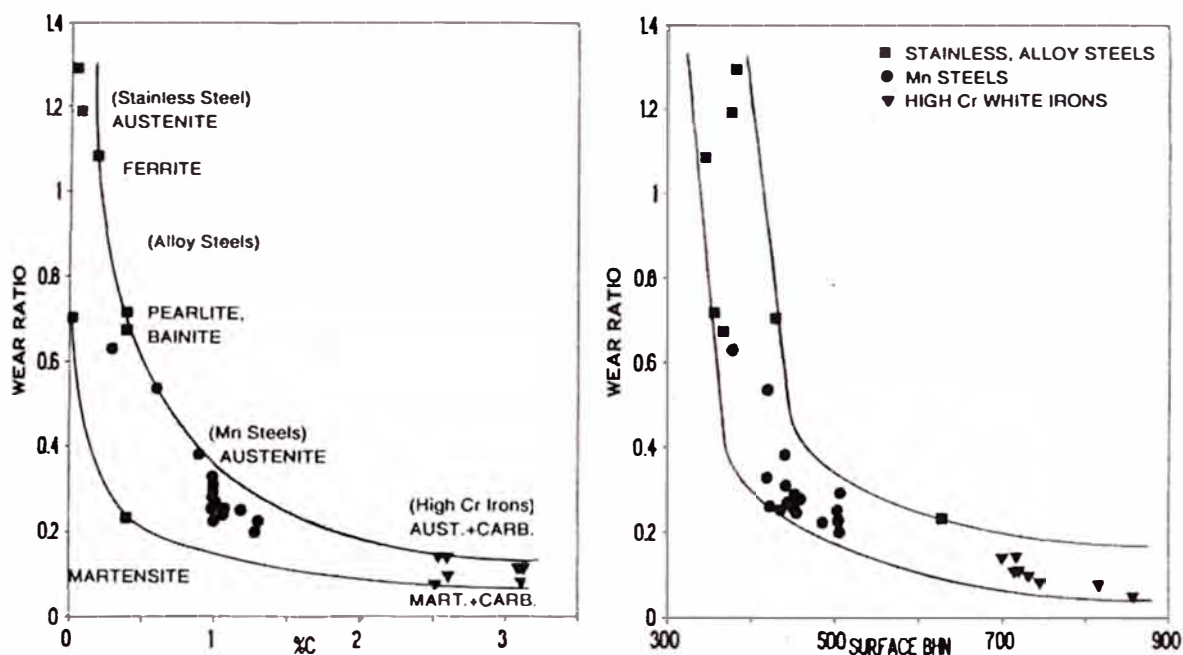


Figura 23 Efecto de la dureza y el carbono sobre el desgaste por arranque de material [1]

FUENTE: STEEL CASTING HANDBOOK CAPITULO 19

2.8.2 Ensayo de abrasión en arena húmeda.

Este ensayo simula el desgaste de alta presión como mecanismo primario. En la figura 24 se muestra un esquema de la máquina para este ensayo. Dos muestras situadas una opuesta a la otra recorren un camino de cobre circular que contiene agua arenosa. Una de las muestras es la aleación a ensayar mientras que la otra es un acero de referencia, AISI 1020 generalmente. La presión típica es de 3.8 kg/cm² y la velocidad de 0.6 m/s, mientras que el fluido está compuesto por un 40% de arena de grano 50 y un 60% de agua en peso.

Se realiza un primer período de adaptación de una hora de duración para que tanto la pieza ensayar como la de referencia se adapten a la pista de cobre. Tras este período se pesan cuidadosamente las dos muestras y se realiza un segundo período de una hora de duración. Se utiliza como índice del ensayo el cociente entre la pérdida de peso de la pieza ensayar y

de la pieza de referencia. La tabla N°1 muestra los valores del ensayo de algunos aceros y fundiciones usados en la industria minera donde la resistencia a la abrasión es un parámetro importante. Existe una tendencia general decreciente del índice de abrasión con la dureza, pero otros factores como el endurecimiento por deformación, contenido en carburos y microestructura son necesarios para explicar completamente los resultados.

Aleación	Estado	HRC	Factor abrasión
Acero perlítico al Cr	Normalizado	36	0,64
A532 IA	Elim. Tensiones	59	0,67
A532 IIIA	Bruto colada	50	0,8
A532 IIIA	Normalizado	62	0,64
A532 IIB	Bruto colada	46	0,87
A532 IIB	Normalizado + Elim. tensiones	60	0,77
A532 IID	Normalizado	62	0,49

TABLA N°1 Principales Aleaciones y sus propiedades

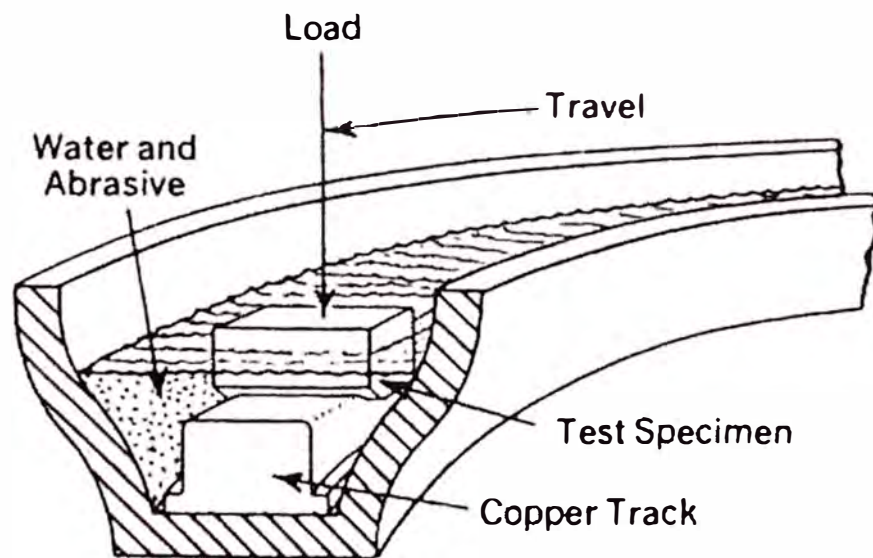
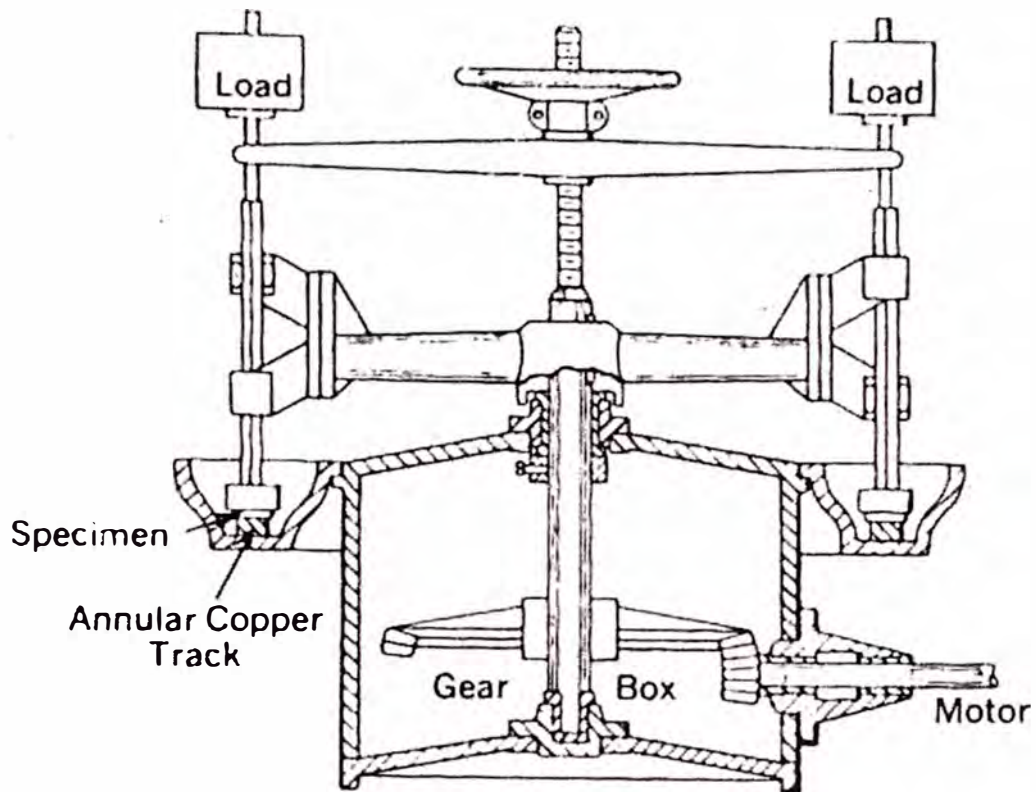


Figura 24 Diagrama de la máquina para ensayos de abrasión en arena húmeda.

FUENTE: STEEL CASTING HANDBOOK CAPITULO 19

2.8.4 Ensayos de rueda de caucho.

Existen dos ensayos normalizados con ruedas de caucho para la evaluación del desgaste a baja presión; de arena seca o de arena húmeda (ASTM G65 y G105 respectivamente). En ambos ensayos una rueda de caucho rueda a una velocidad predeterminada presionada contra el material a ensayar con una carga fija en presencia del abrasivo. Al final del ensayo se determina la pérdida de material y se utiliza como medida de su resistencia al desgaste de baja presión. Los valores más normales para este ensayo son un caudal de 300 g/minuto de arena sobre una rueda de caucho que gira a 200 rpm con una fuerza normal sobre la superficie a ensayar de 30 libras.

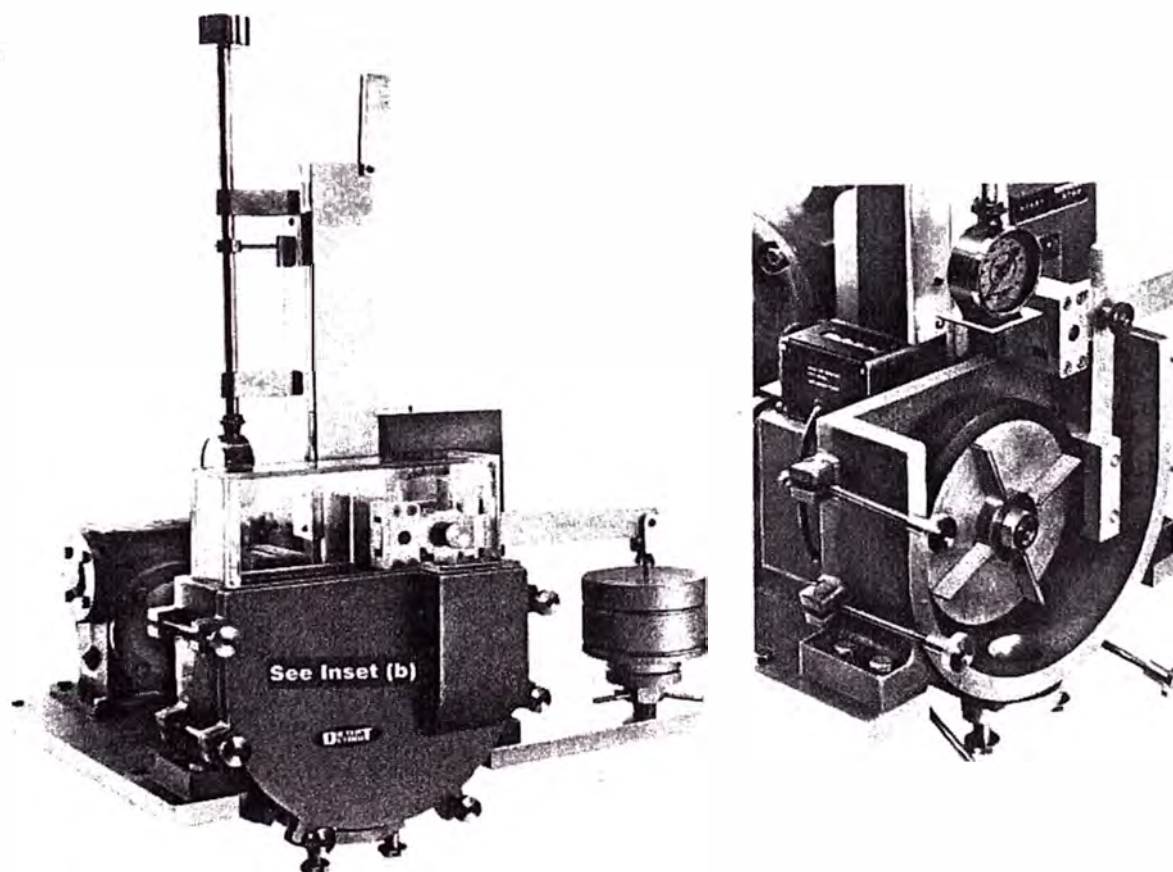


Figura 26. Aparato para la realización de ensayos ASTM G105
FUENTE: STEEL CASTING HANDBOOK CAPITULO 19

ASTM G105 normaliza otro test de naturaleza similar al primero con tres ruedas de caucho de durezas distintas rotando en arena húmeda. La figura 26 muestra la máquina para realizar estos ensayos y la figura 27 muestra los resultados típicos para algunas aleaciones férricas. Éstos resultados muestran una disminución en la pérdida de material cuando se incrementa la dureza del mismo. Sin embargo cuando aparecen carburos libres en la microestructura la resistencia a la abrasión se eleva muy por encima de lo esperado.

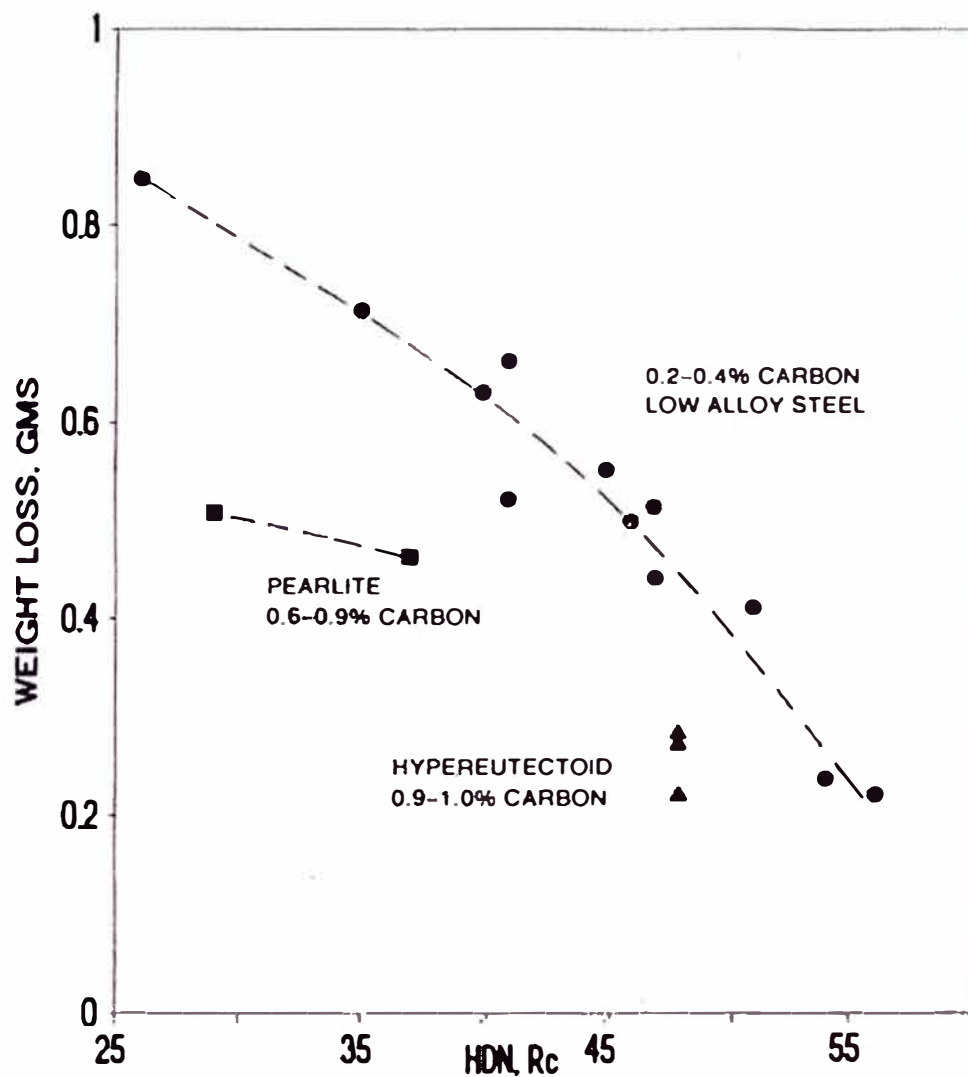


Figura 27. Resultados del ensayo ASTM G105 para algunas familias de aceros
FUENTE: STEEL CASTING HANDBOOK CAPITULO 19

2.8.5 Correlación de los ensayos de laboratorio con aplicaciones reales.

Los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio muestran una buena correlación con las aplicaciones reales siempre y cuando se identifique el mecanismo principal de desgaste para poder emplear el ensayo adecuado.

Venne [1] ha demostrado que el ensayo por arranque de material realizado en el laboratorio ha sido consistente con los datos reales contenidos en dientes de cazos y las excavadoras fabricados en aceros de construcción al carbono. Las marcas causadas por grandes piezas de roca son claramente arranque de material aunque sea un desgaste de dos cuerpos y el ensayo de laboratorio sea de tres.

Avery [2] ha demostrado la correlación entre el ensayo de arena húmeda y el desgaste de bolas de cinco pulgadas en un molino de nueve pies con mineral de molibdeno. Se ensayaron varios tipos de materiales férricos, cuyos resultados pueden observarse en la figura 28. La falta de linealidad entre los ensayos de laboratorio y el comportamiento real pueden deberse a él mayor desgaste por deformación que se produce en el molino, pero la correlación entre los dos valores es fuerte.

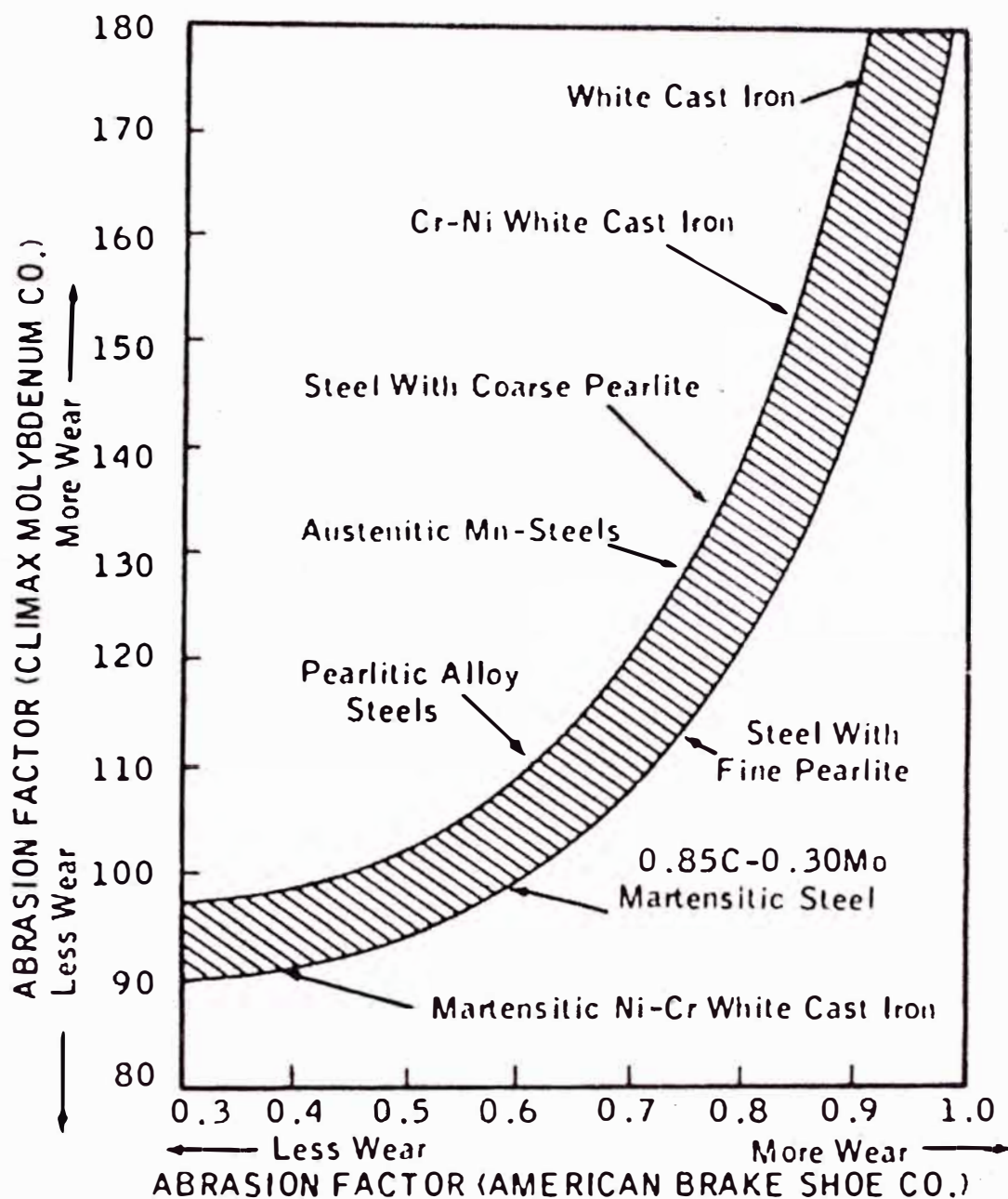


Figura 28 Correlación entre desgaste de bolas de molino y factor de abrasión [2].

Albright y Dunn [3] han observado una buena correlación entre la pérdida de peso en el ensayo de abrasión a dos cuerpos y la del revestimiento de molinos de bolas. Para ello ensayaron el revestimiento de un molino de nueve pies y medio de diámetro por ocho pies de longitud cargado con bolas de acero forjado de tres pulgadas. El desgaste se describió en término de libras de material desgastado por horas de operación. La figura 29 muestra los

resultados de aceros moldeados y fundiciones aleadas al cromo. Como puede observarse en la correlación entre el ensayo y el caso real es muy buena a pesar de que el ensayo es entre dos cuerpos mientras el caso real es un desgaste entre tres cuerpos.

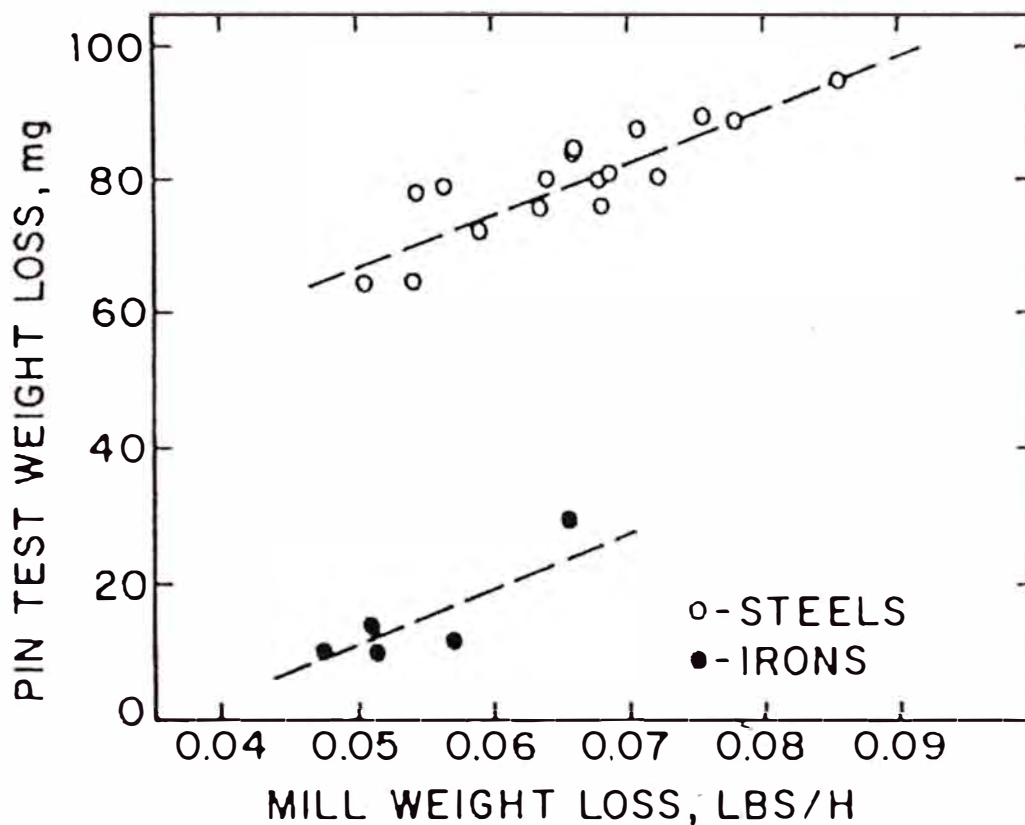


Figura 29. Comparativa de desgaste de revestimientos de molinos y ensayo de abrasión a dos cuerpos [3].

FUENTE: STEEL CASTING HANDBOOK CAPITULO 19

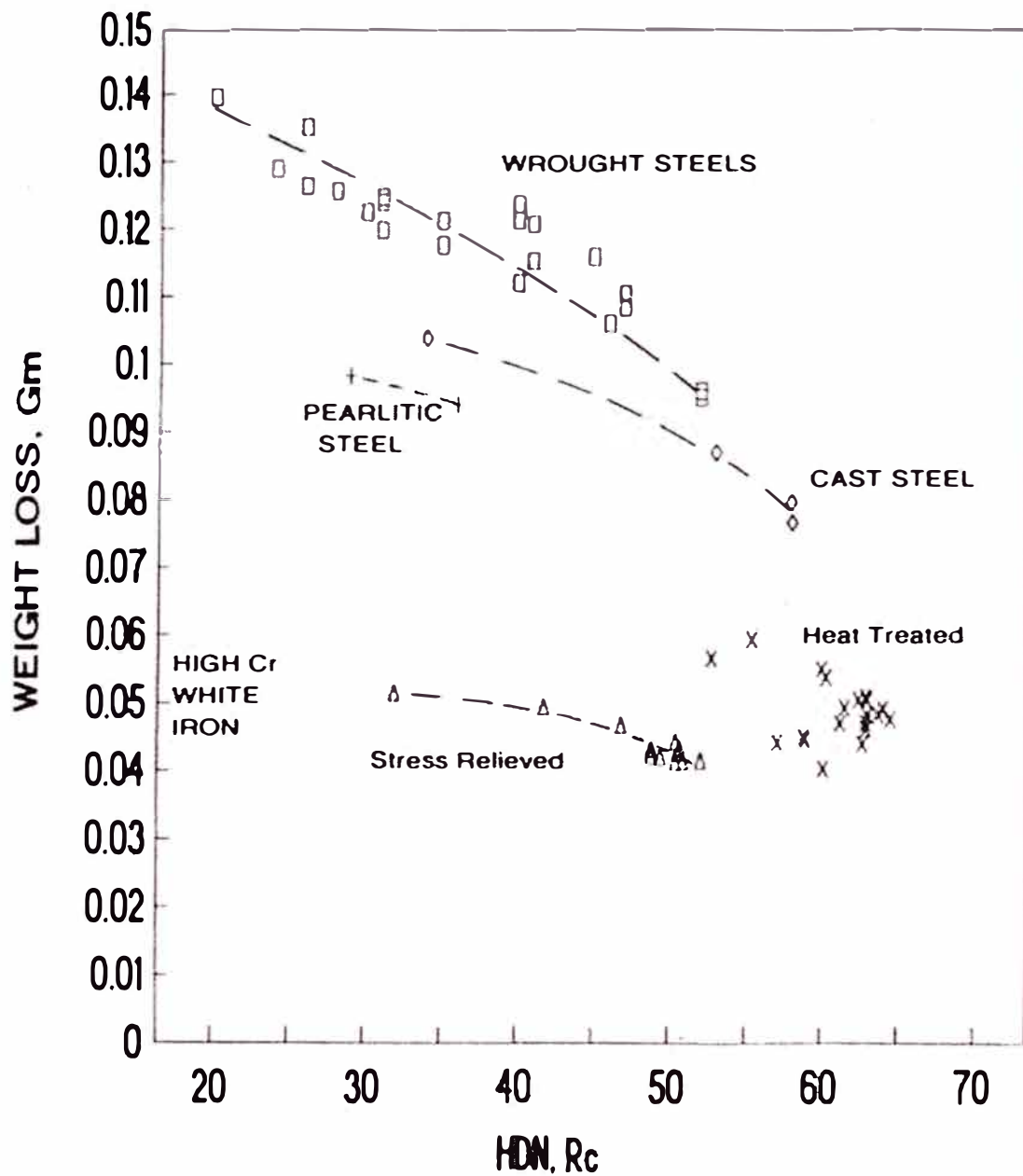


Figura 30. Resultados del ensayo ASTM G132 en alúmina de grano 180 para algunas aleaciones férreas [3].

FUENTE: STEEL CASTING HANDBOOK CAPITULO 19

Stolk [4] ha demostrado la correlación entre el ensayo con ruedas de caucho y el desgaste de arados. El arado de la tierra produce una erosión de baja presión por lo que el ensayo por rueda de caucho duplica convenientemente las condiciones reales a pesar de ser un ensayo entre tres cuerpos y el caso real un desgaste entre dos cuerpos. La figura 2.12 muestra la correlación para distintos materiales férreos.

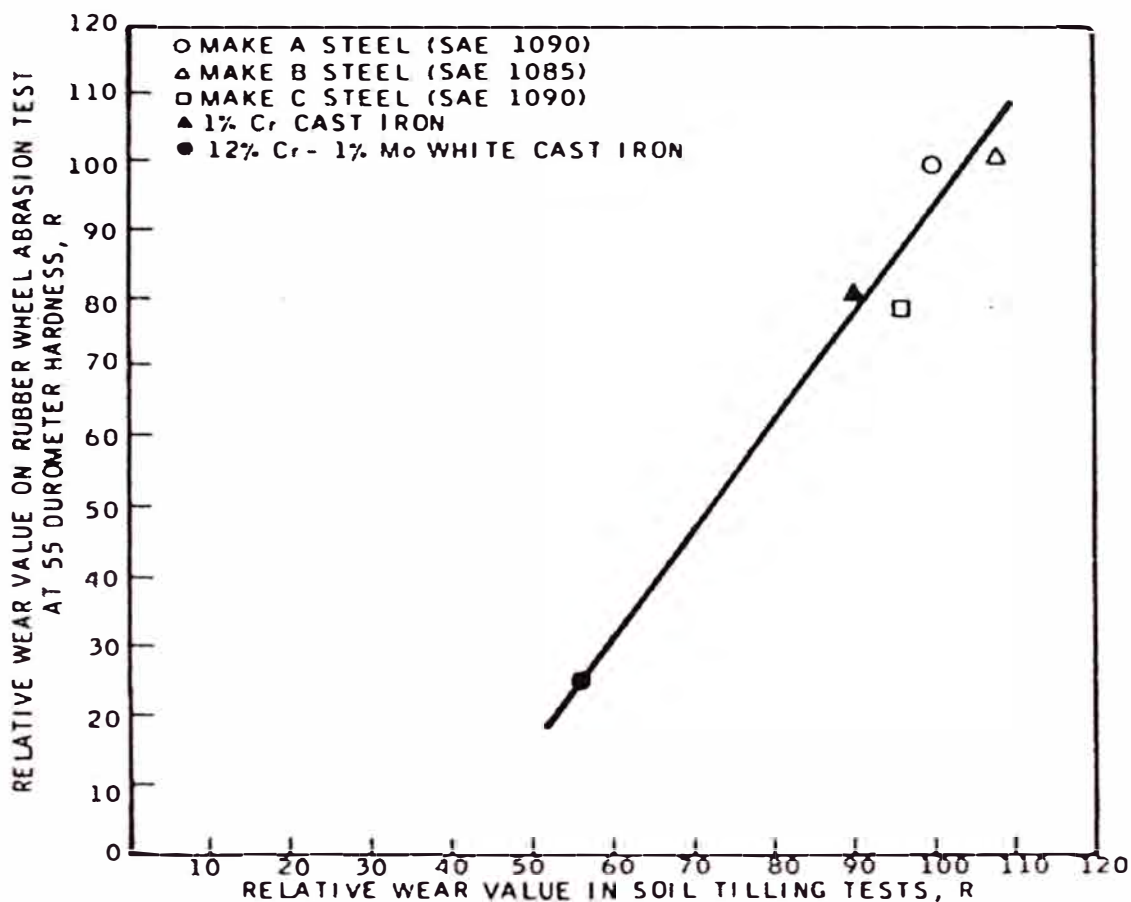


Figura 31 Correlación entre desgaste de arados y desgaste en rueda de caucho [4].

2.8.6 Aplicación práctica de los principios de resistencia desgaste.

La naturaleza complicada de los procesos de desgaste hace que las variables del material metálico y del abrasivo que conducen a una determinación cuantitativa del desgaste en un sistema determinado no puedan ser extrapoladas a otro sistema distinto. La extrapolación de estos datos a otros sistemas se realizará normalmente de manera cualitativa. Aún más, es un hecho en la molienda de mineral que las tasas de desgaste varían significativamente dependiendo del pozo o de la localización de mina de la que procede el mineral. Es por tanto muy conveniente realizar ensayos en términos relativos a un material estándar como referencia.

CAPITULO III

COMPORTAMIENTO ACTUAL DE DESGASTE EN LOS FORROS DEL CILÍNDRRO

3.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Como se mencionó en la parte introductoria del presente trabajo, la gerencia central de operaciones dispuso a las diferentes áreas, que reevalúen sus procesos más críticos a fin de optimizar recursos, reducir los costos operativos, incrementar el tonelaje tratado, disminuir las paradas de equipos, entre otros.

3.1.1 Metodología de mejoramiento

Se utilizó el ciclo de Deming, Planificar-Hacer-Verificar-Actuar (PHVA) como metodología de mejoramiento



1. Identificación de la situación

El molino primario al estar identificado como un equipo crítico, por su funcionalidad en el proceso de molienda, recibió un análisis de tormenta de ideas, para determinar las oportunidades de mejora, con el objetivo de disminuir los MTTR (Main time to repair), MTBF (Mean time between failure) y mejoras de otros KPI's.

2. Recopilación de la información

Dentro de este análisis y luego de una priorización de las propuestas obtenidas se llegó a determinar la existencia de una oportunidad de mejora en el proceso de cambios de forros de los molinos de la empresa, esta oportunidad hallada fue validada inicialmente por los mecánicos y operadores más antiguos y experimentados de la empresa y posteriormente por datos obtenidos en las mediciones mediante el uso del ultrasonido.

3. Análisis

El problema observado fue un desgaste irregular en los forros de la primera y segunda fila, del cilindro del molino primario, solo una zona presentaban mucho más desgaste que los forros de la tercera y cuarta fila, motivo por el cual todo el set de forros del molino tenía que ser cambiados.

Posteriormente este desgaste irregular fue validado con un monitoreo de los espesores de los forros, para la medición se utilizó un equipo de ultrasonido, se determinó las tendencias de desgaste y se cuantificó los espesores de los forros, con lo cual se corroboró lo inicialmente observado.

Del análisis Causa – Raíz se determinó que el aparente desgaste irregular se debía a que la molienda es más agresiva en las dos primeras filas, la granulometría es mucho mayor, el tamaño del mineral disminuye desde que ingresa hasta que sale del molino, vale decir que es un comportamiento normal que se desgaste en mayor proporción las dos primeras filas, sin embargo este desgaste era mucho más acentuado de lo convencional debido al alto índice de trabajo (W_i , Work Index) en promedio 19kw-h/ ton, siendo esta una propiedad inherente al mineral, luego se plantearon algunas alternativas de solución tales como:

- ✓ Incrementar el espesor de los forros en la primera y segunda fila.
- ✓ Investigar sobre aleaciones con mejor resistencia a la abrasión.
- ✓ Modificar el perfil de los forros.
- ✓ Variar los parámetros operativos como velocidad de operación, densidad, etc.

De las alternativas antes mencionadas se optó por la investigación de una aleación con mejores propiedades de resistencia al desgaste a fin de compensar este desgaste irregular.

4. Elaboración del Plan de Acción

Una vez identificada la oportunidad de mejora se estableció un plan de acción calendarizado y con sus respectivos responsables.

5. Ejecución del Plan de Acción

Las pruebas de la aleación seleccionada (ASTM A532 II B) para los forros de la primera y segunda fila dieron inicio el 28 de mayo 2013 y finalizaron el 14 de marzo 2014, esta selección se detalla en el capítulo IV.

6. Verificación

Los forros del molino fueron monitoreados continuamente en cada parada de planta obteniéndose el perfil de desgaste para los tipos de aleación ASTM A 532 y ASTM A 148 (primera-segunda fila y tercera – cuarta fila respectivamente)

7. Estandarización

De los resultados obtenidos en las pruebas se vio que era viable el cambio de aleación solo para las primeras dos filas y este significaba un ahorro para la empresa.

8. Consolidación y Conclusión

Al finalizar el informe se concluyó que la nueva disposición de los forros en el molino primario era: las dos primeras filas con la aleación mejorada ASTM A 532 IIB y las demás filas con la aleación convencional según la ASTM A148.

3.1.2 Condiciones de operación del molino primario 8'x10'

Según los reportes del área de operaciones, Laboratorio Metalúrgico y Laboratorio Químico de la empresa se detallan los siguientes parámetros:

- Tonelaje procesado: 2000 Toneladas métricas secas día (TMSD)
- Humedad promedio: 5%
- Volumen de carga: 40%
- Velocidad Crítica: 27.07 RPM
- Velocidad de operación: 21.74 RPM
- Amperaje nominal: 620 Amp
- Amperaje de trabajo: 547 Amp
- Potencia Instalada: 500 HP
- Voltaje: 440 Voltios
- Bolas de 3": 33%
- Bolas de 2 ½": 37%
- Bolas de 2": 19%
- Bolas de 1.5": 11%
- Perfil del Forro del cilindro: Ondular de 4"
- Número de hileras: 16
- Número de filas: 4
- Cantidad total de forros: 64

3.1.3 Uso del ultrasonido para medición de espesores

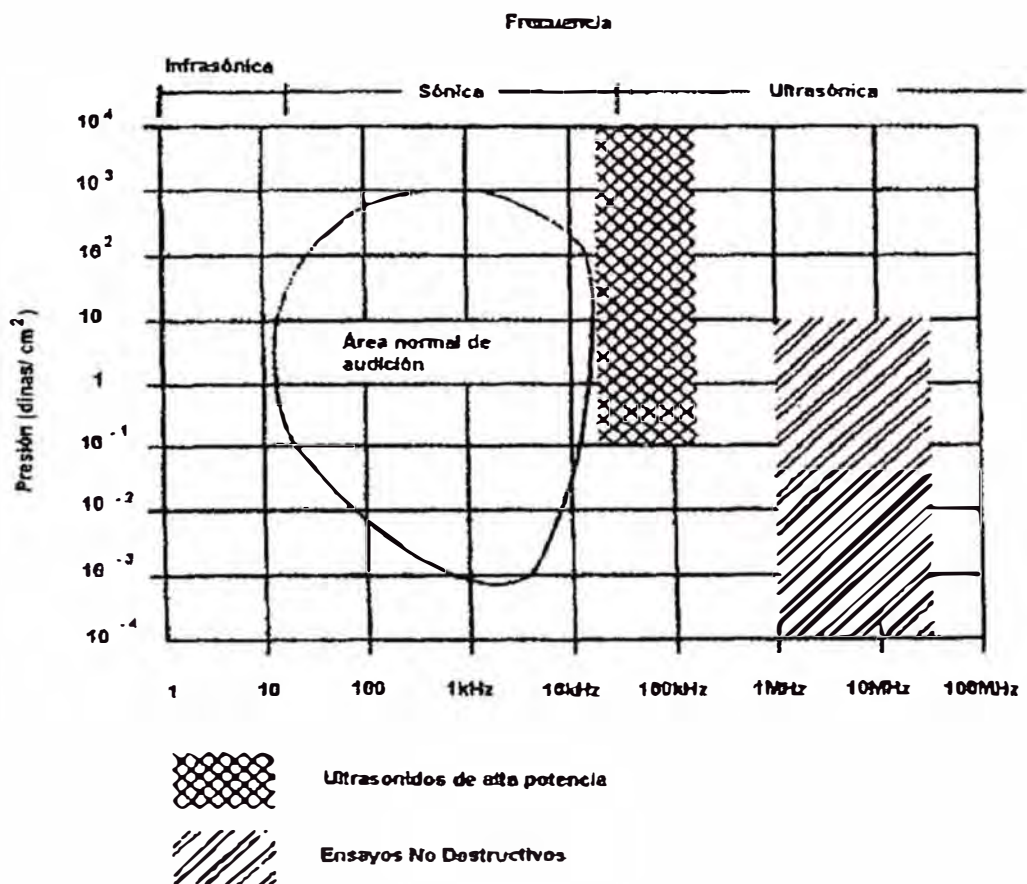
La primera utilización importante conocida de los ultrasonidos fue realizada por Langevin durante la Primera Guerra Mundial, para sondeos subacuáticos.

En 1929 el profesor S. Sokolov lo utilizó para revelar la presencia de objetos contenidos en bloques opacos de material para ello ideó un aparato que

enviaba sobre una pantalla especial, la imagen de los objetos ocultos que podían encontrarse en los cuerpos metálicos.

Hasta 1942, con el descubrimiento y aplicación del sonar por Firestone, para localización de buques, y medida de profundidades marinas, luego empezó el despegue en la utilización de los ultrasonidos en la detección de heterogeneidades en los materiales con la técnica de pulso-eco.

Los ultrasonidos son ondas del mismo tipo que los sonidos audibles, diferenciándose únicamente en la frecuencia de operación y forma de propagación. Los ultrasonidos operan con frecuencias por encima de la zona audible del espectro acústico.



En la figura se observan tres zonas perfectamente diferenciadas en el espectro acústico:

- INFRASONICA o sonidos no audibles por el oído humano. Corresponden a esta zona, las oscilaciones cuya frecuencia es menor de 16 Hz/seg.
- SÓNICA o sonidos audibles, comprendida en la gama de frecuencias de oscilación, de 16 a 20000 Hz/seg.
- Una onda acústica dentro de esta gama de frecuencia pudiera no ser audible al no tener el mínimo de presión acústica necesaria para ser registrada por el oído, o por sobrepasar la presión máxima soportable por los mecanismos físicos del oído.
- Para conocer cuando una onda sonora se aproxima al máximo de frecuencia soportable por el oído (20kHz), es el momento en que el sonido empieza a molestar en el oído: "Umbral del dolor".
- ULTRASÓNICA, es aquella donde la frecuencia de las oscilaciones es superior a 20kHz.

Las frecuencias más altas logradas hasta el momento son del orden de 1000MHz. Las frecuencias utilizadas en los ensayos para el control de heterogeneidades en ensayos de materiales metálicos se realizan con frecuencias generalmente comprendidas entre 1 y 25MHz.

3.1.4 Consideraciones para las mediciones por ultrasonido

Antes de realizar la inspección sobre una determinada pieza se debe estudiar el acabado superficial, rugosidad de la superficie, curvatura de la superficie, y dependiendo de todo ello, el tipo de acoplante, diámetro y frecuencia del transductor a utilizar.

Todos estos factores influyen notablemente en la transmisión de los ultrasonidos a través de la superficie de contacto, haciendo que estas

Pérdidas por transmisión nos dificulten la determinación del tamaño de un reflector pequeño. Estas pérdidas por transmisión, también llamadas pérdidas por transferencia, se evalúan comparando el eco del mismo reflector en la pieza a ensayar y en el bloque de calibración.

- **Acabado superficial**

Cuando la superficie de exploración presenta cascarilla por oxidación o cualquier tipo de recubrimiento, puede dar lugar a una disminución de la presión acústica debido a la falta de adherencia entre el material base, y la protección o la cascarilla. Cuando se presenten estos casos deben de eliminarse por medio de lija, muela o chorro de arena.

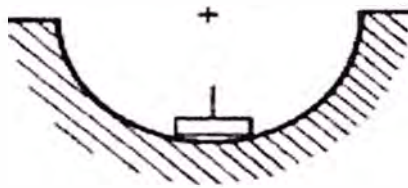
- **Rugosidad de la superficie**

Supongamos una superficie muy rugosa, con valles (depressiones de la superficie), y crestas (protuberancias de la superficie). Los valles están rellenos de acoplante, donde la velocidad de la onda acústica es menor que en las crestas o protuberancias que son metal. Las ondas después de atravesar la capa rugosa se encuentran en distinta fase, lo que produce: una disminución en la transmisión de la presión acústica; aumenta el ancho de la zona muerta; cambios en la dirección del haz; y aparición de ondas parásitas superficiales. También el estado superficial de la cara opuesta a la de exploración puede influir de una forma determinante en la interpretación de señales en pantalla. Si la rugosidad es muy grande puede hacer que el eco de fondo sea fuertemente amortiguado, no apareciendo en pantalla, y dando lugar a error en la determinación del tamaño de una discontinuidad, ya que podemos deducir que la discontinuidad es de tal tamaño, que corta totalmente el haz.

- **Curvatura de la superficie**

Esta curvatura puede hacer que la divergencia del haz aumente o disminuya (focalización). También puede afectar al fenómeno de conversión de ondas, dando lugar a la aparición de falsas indicaciones.

En los ensayos por contacto con incidencia normal en una superficie cóncava, la sensibilidad disminuye, pues el centro del palpador no hace contacto con la superficie de apoyo como se ve en la figura.



- **Medio de acoplamiento**

En cualquier inspección por contacto directo, entre el palpador y la superficie de la muestra, existe una fina capa de aire del orden de 10^{-4} mm que trabajando con las frecuencias normales (entre 2 y 12 MHz) utilizadas en la inspección de materiales metálicos daría como resultado una transmisión de la presión acústica del palpador a la pieza prácticamente nula.

Para evitar esto es imprescindible que en toda inspección por contacto se utilice un material acoplante acústicamente conductor interpuesto entre el palpador y la pieza en inspección, que elimina la capa de aire haciendo que toda la presión acústica del cristal entre en la pieza.

Los acoplantes más comúnmente utilizados son las grasas y aceites minerales de diferente viscosidad, dependiendo esta de la rugosidad que presente la superficie.

3.1.5 Descripción del equipo de ultrasonido

El equipo utilizado fue el Epoch 4 Plus, un detector de fallas muy ligero (2.6 Kg), portátil y que ofrece las ventajas de la inspección por ultrasonido, pantalla de barrido tipo A, memoria de pico, generación de las curvas DAC y TVG, capacidad para trabajar con palpadores de doble cristal y más:

Los avances y mejoras sobre las unidades anteriores incluyen:

Capacidad de almacenar por arriba de 6400 pantallas de barrido "A"; o 128 000 lecturas de espesor. Las calibraciones y los datos de la prueba, pueden ser identificados mediante un archivo con nombre alfanumérico compuesto de 16 caracteres, adicionalmente nuestra opción de edición permite que los IDs (identificadores) sean eliminados o limpiados para una utilización futura. La característica de crear apuntes (notas) permite introducir ilimitados comentarios y datos descriptivos. Se cuenta con una pantalla que muestra la memoria almacenada en la cual es posible revisar la información contenida dentro de los archivos con el fin de seleccionar alguno antes de que este sea borrado o se llame la información contenida en él. Finalmente, cualquier dato almacenado puede ser enviado directamente al programa de interfase del Epoch 4 Plus. Este programa de interfase trabaja en un navegador estándar de Internet

Los Beneficios de actualización del Epoch 4 Plus incluyen lo siguiente:

Ancho de banda de 25 Mhz, el usuario puede seleccionar filtros de banda angosta, PRF baja y alta (opcional) a velocidades de 30 Hz y 1,000 Hz respectivamente, opción para seleccionar el tipo de pulso con el que se trabajará entre pulso pico negativo y pulso cuadrado. El Epoch 4 Plus igualmente tiene una función de calibración automática del transductor para determinar la velocidad del material y el Zero Offset (retardo de barrido).

3.1.6 Calibración del Equipo de Ultrasonido

Se describe como calibrar el EPOCH 4 PLUS. Calibración es el proceso de ajuste del instrumento para que mida con precisión un material específico, usando un transductor específico a una temperatura específica.

El EPOCH 4 PLUS cuenta con una avanzada función de Auto-Calibración, la cual proporciona un proceso fácil y rápido de calibración. La siguiente sección detalla el procedimiento para calibrar el EPOCH 4 PLUS cuando se utiliza transductor de haz recto.

Para preparar el EPOCH 4 PLUS antes de cada calibración, siga estos pasos:

1. Presione (DISPLAY) para seleccionar el modo de pantalla dividida.
2. Presione (2ndF), (VEL) (REJECT) para ajustar el nivel de rechazo al 0%.
Presione (F1) o use la tecla (↓) para ajustar el valor a cero.
3. Presione (GAIN) para seleccionar el valor de ganancia inicial que es apropiado para la calibración y ajuste el valor usando las teclas de acceso directo o las teclas (↑), (↓). Si no se conoce el nivel apropiado de ganancia, ajuste la ganancia inicial a 30dB y modifique como sea necesario durante la calibración.
4. Presione (VEL) para introducir un valor aproximado de velocidad del material y ajuste el valor con las teclas de función o con las teclas (↑), (↓). Si no se conoce el valor de velocidad, encuentre un valor inicial en el apéndice IV.
5. Presione (RANGE) para seleccionar el rango y después ajuste el valor utilizando las teclas de función o las teclas (↑), (↓), (←), (→).
6. Presione (2ndF), (ANGLE) (THICKNESS) para ajustar el espesor del material a .00" o 0.00mm. Presione (F1) o utilice la tecla (↓) para ajustar el valor a cero.

7. Presione (ZERO OFFSET) para ajustar el retardo del transductor a $0.00\mu\text{s}$. Presione F1 o utilice las teclas (\downarrow), (\rightarrow) para traer el pulso inicial al lado izquierdo de la pantalla del instrumento.
8. Presione (ANGLE) para introducir el valor del ángulo de refracción para el transductor (0 para uno de haz recto o de 90° , 45 para uno de 45° , etc.). Utilice las teclas de función para acceder a los valores predeterminados o utilice las teclas (\uparrow), (\downarrow), (\leftarrow), (\rightarrow) para ajustar en pasos de 0.1° .
9. Una vez que el transductor es acoplado al bloque ajuste los parámetros del pulsador y los filtros para obtener una señal clara de barrido A. Presione (PULSER) varias veces para acceder a las opciones del pulsador y los filtros. También puede presionar (2ndF), (PULSER) (FILTER) para ir directamente a las opciones de los filtros. Ajuste cada opción con las teclas de función o con las teclas (\uparrow), (\downarrow), (\leftarrow), (\rightarrow).

Para calibrar el EPOCH 4 PLUS, siga estos pasos:

Utilice un transductor con una frecuencia de 2.25 MHz y un diámetro de 0.25" (6mm) para realizar un ejemplo de calibración con haz recto. La calibración requiere de un bloque de prueba con dos espesores conocidos, hecho del material que va a ser inspeccionado. Idealmente, los dos espesores deben ser representativos de los espesores mínimo y máximo que se espera obtener en la pieza a inspeccionar.

1. Realice el ajuste inicial mencionado anteriormente. Conecte el transductor y el cable al EPOCH 4 PLUS.
2. Presione (CALIBRATION). Aparecerá un símbolo de Cal en el lado derecho de la pantalla de Barrido A, esto significa que el EPOCH 4 PLUS se encuentra en el modo de Auto-Calibración. (Para salir del modo de Auto-calibración en cualquier momento presiones Enter).

3. Acople el transductor en el espesor de calibración más delgado.
4. Posicione la compuerta 1 de manera que el primer eco de reflexión del espesor conocido rebase el umbral de detección de la compuerta. Ajuste el valor de ganancia para llevar el eco a una amplitud aproximada del 80%.

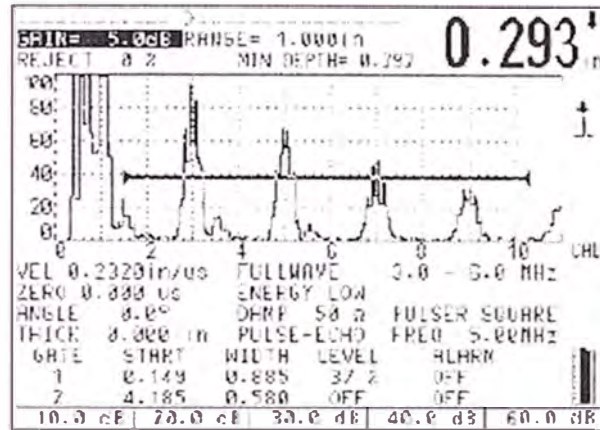


Figura 32 Calibración de un espesor delgado usando un transductor de haz recto

5. La lectura de espesor aparecerá sobre la pantalla de barrido A. Una vez que se obtenga una lectura estable, presione (ZERO OFFSET). La pantalla se congelara y aparecerá un recuadro en la pantalla. Utilice el teclado alfanumérico para introducir el valor exacto de espesor. Para este ejemplo presione (2), (0), (0). El valor aparecerá en el recuadro. Si introduce un número incorrectamente, presione 0 varias veces para borrarlo y después introduzca el espesor correcto.
6. Presione (CALIBRATION). La pantalla regresará al formato de barrido A en vivo. Acople el transductor al espesor de calibración más grueso. Para este ejemplo, el transductor es acoplado en el paso de 0.500".
7. Posicione la compuerta 1 de manera que el primer eco de reflexión del espesor conocido rebase el umbral de detección de la compuerta.

Ajuste el valor de ganancia para llevar el eco a una amplitud aproximada del 80%.

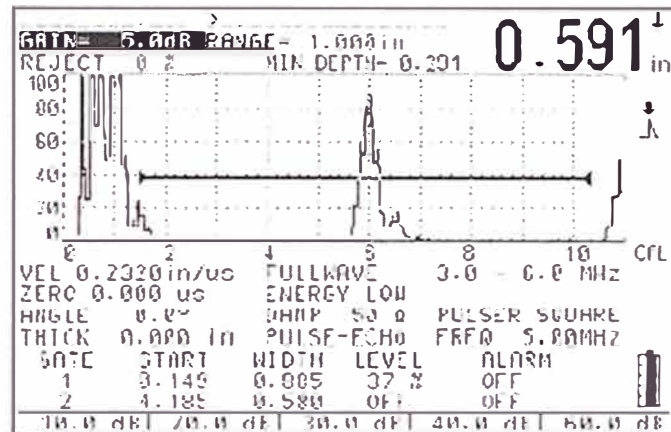


Figura 33 Calibración de un espesor grueso usando un transductor de haz recto

8. La lectura de espesor aparecerá sobre la pantalla de barrido A. Una vez que se obtenga una lectura estable, presione (VEL). La pantalla se congelará y aparecerá un recuadro en la pantalla.

Utilice el teclado alfanumérico para introducir el valor exacto de espesor. Para este ejemplo presione (5), (0), (0). El valor aparecerá en el recuadro.

Si introduce un número incorrectamente, presione 0 varias veces para borrarlo y después introduzca el espesor correcto.

9. Presione (ENTER) para completar la Auto-Calibración. Los valores de Zero Offset y Velocidad se ajustan automáticamente y en la pantalla se muestra la lectura de espesor con el valor correcto de cualquier señal que toque la compuerta.

3.2 PERFIL DE DESGASTE DE FORROS CON ALEACION INICIAL (ASTM A 148)

En el capítulo anterior se indicó que el forro en estudio es de tipo Ondular y se pueden definir dos zonas en este tipo de forros: Cresta y Valle.

La cresta viene dada por la zona de mayor espesor y el valle viene dado por las zonas de menor espesor (ver fig. N°34)

Geoméricamente el cambio de los forros viene determinado por el espesor en la zona del valle pues esta zona es la que se perfora primero, pudiendo llegar a dañar el cilindro.

Metalúrgicamente los forros deben ser cambiados cuando el espesor de la cresta ya no permita el levantamiento eficiente de las bolas y no se genere la catarata, disminuyendo la eficiencia de la molienda, como ya se mencionó anteriormente todos estos parámetros deben ser determinados para cada tipo de proceso de molienda, pues todos los parámetros difieren uno del otro.

En el presente trabajo se monitoreo las tendencias de desgaste del espesor del forro en las zonas del valle (menor espesor)

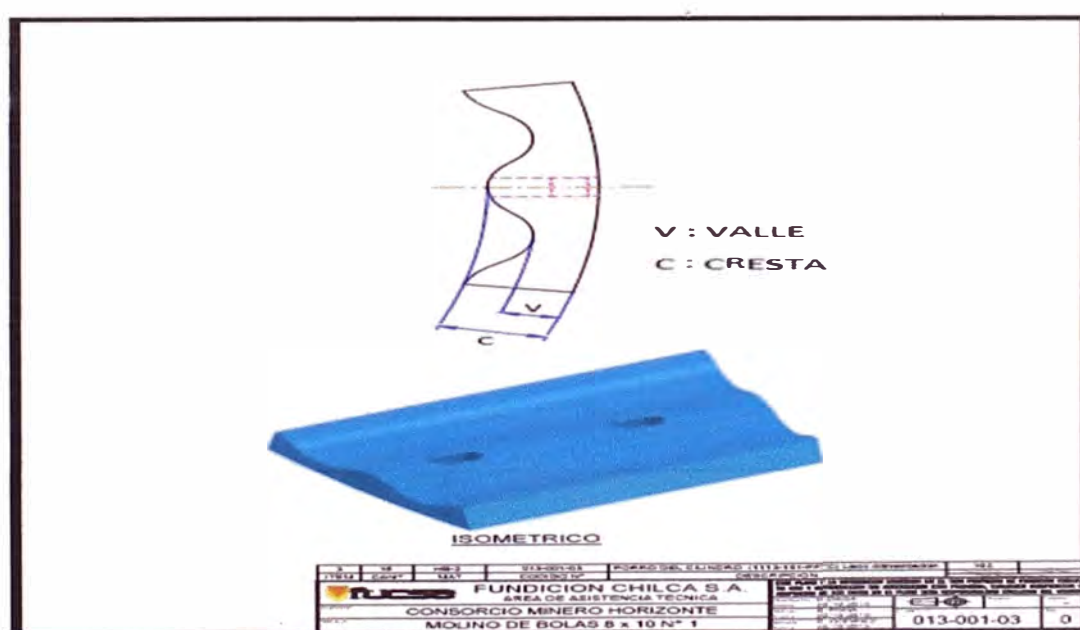


Fig. N°34 Perfil del forro, zonas típicas Cresta y Valle

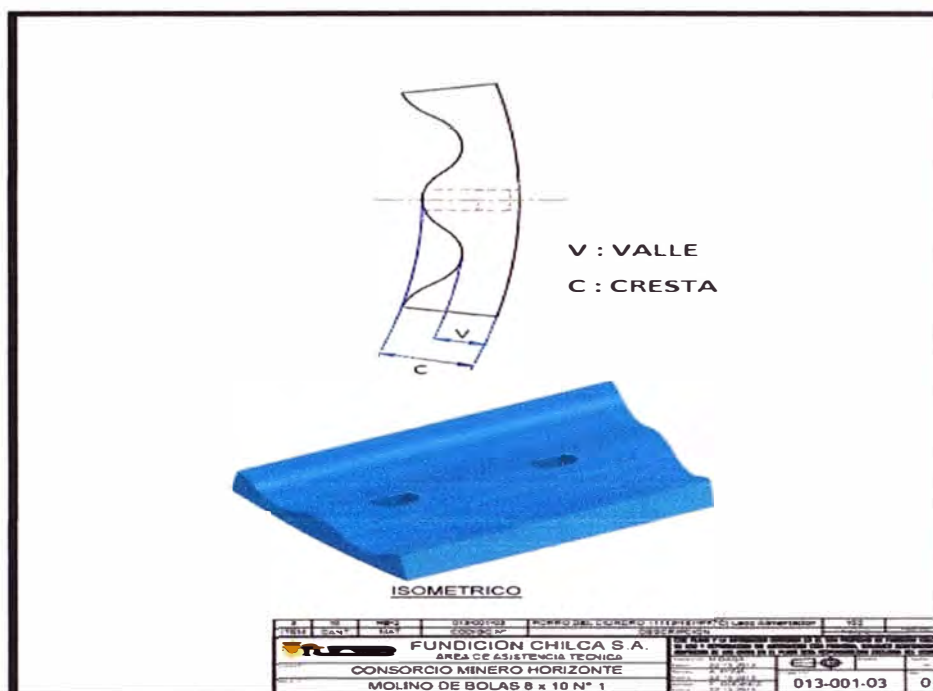


Fig. N°34 Perfil del forro, zonas típicas Cresta y Valle

3.2.1 Aleación convencional ASTM A 148 Gr 130 - 115

Aleación actual de los revestimientos:

ASTM A148 Gr 130 – 115		
Segunda, Tercera y Cuarta Fila		
Elemento	Simbolo	Rango
Carbón	C	0,60 – 1,00
Manganeso	Mn	0,40 – 1,00
Silicio	Si	0,40 – 1,00
Cromo	Cr	1,80 – 2,50
Molibdeno	Mo	0,30 – 0,50

Propiedades Mecánicas

ALEACION	Características	Propiedades Mecánicas	
		Resistencia a la tracción	Dureza
ASTM A148 Gr 130 – 115	Resistente a la abrasión e impacto.	130000 PSI	420 – 510 HBN

Microestructura: Acero de estructura Perlitica Fina.

Metalografía de un acero al cromo molibdeno ASTM A148 Gr 130-115, matriz con perlita fina y carburos globulares finos diseminado toda la matriz

3.2.2 Determinación de la zona de mayor desgaste

Mediante las curvas de tendencia de desgaste se logró observar que las zonas con mayor daño se dieron en la primera y segunda fila vistas desde la alimentación, siendo estas dos filas las que determinan la frecuencia de cambio de los forros, esto nos dio la posibilidad de buscar una aleación que sea más resistente a la abrasión a fin de poder uniformizar los desgastes y prolongar la vida útil del set de forros.

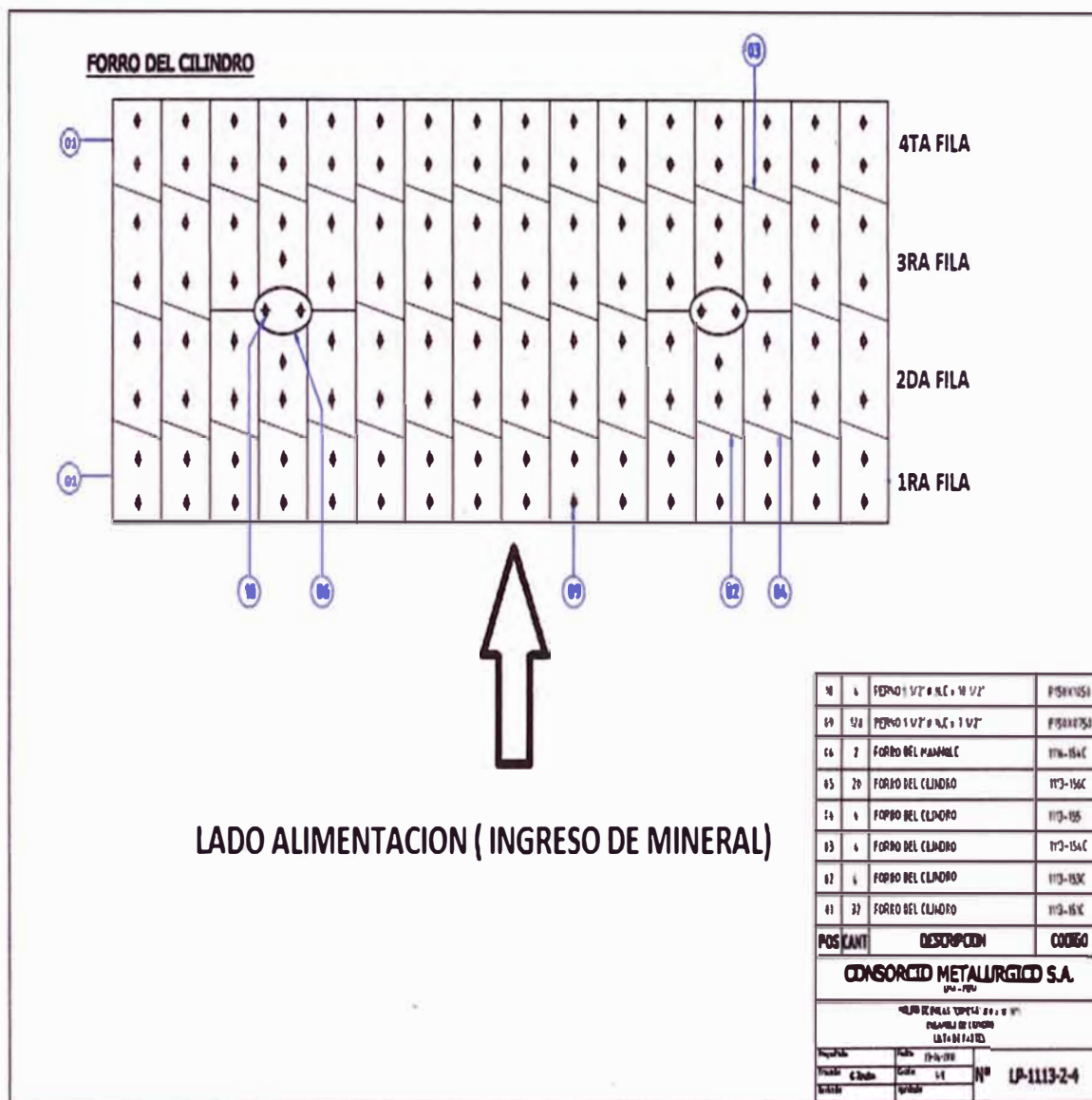
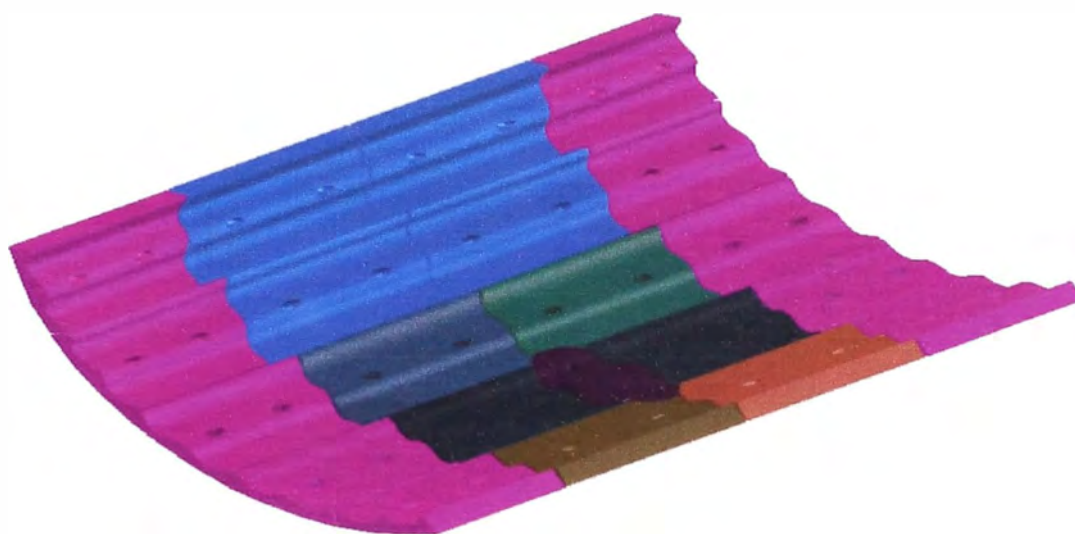
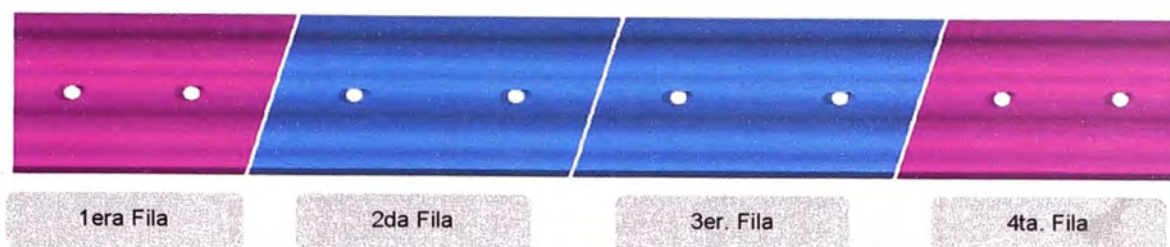


Fig. N°35, desarrollo de los forros



Se tomaron mediciones en 12 puntos en total del set de forros, llegando a determinar que en los puntos 3 y 4 ocurre el mayor desgaste siendo estos los espesores determinantes para programar el cambio del set completo de forros.



TABLA Nº 2: PERFILES DE DESGASTE DE FORROS EN ALEACION DE ACERO CROMO – MOLY, SEGÚN LA ASTM A 148

FECHA	DIAS ACUM.	TMS	TMS-ACUM	DIAS	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12
28/09/12	0	0	0	0	57	57	57	57	57	57	57	57	57	57	57	57
06/11/12	39	77053	77053	39	53.5	52.7	50.5	52	52.5	53	53.9	53.5	53.2	53.1	53.8	55
14/12/12	77	75105	152118	38	50.7	48.6	44	46.6	47	47.2	48	48	48.7	49.3	49.8	53
26/01/13	120	85028	237126	43	47	44.1	38	39.8	40.5	42.9	41.5	42.7	42.8	45.3	46	50.5
27/02/13	152	63304	300332	32	44.6	40.7	33.5	34.6	36	38.7	37.5	38.9	39.1	42.3	42	48.5
13/04/13	197	88850	389122	45	41.6	34.9	21	22.5	27.8	30	31.3	32.9	34.5	37.1	38	45
28/05/13	242	88925	477967	45	38.1	30.1	4	5.5	12	19.7	26.5	26.5	30.9	31.5	34.6	43

TABLA N°3 TENDENCIAS DE DESGASTE DEL ESPESOR DEL FORRO EN LA ZONA DEL VALLE VS TONELAJE CON LOS FORROS CONVENCIONALES ASTM A 148

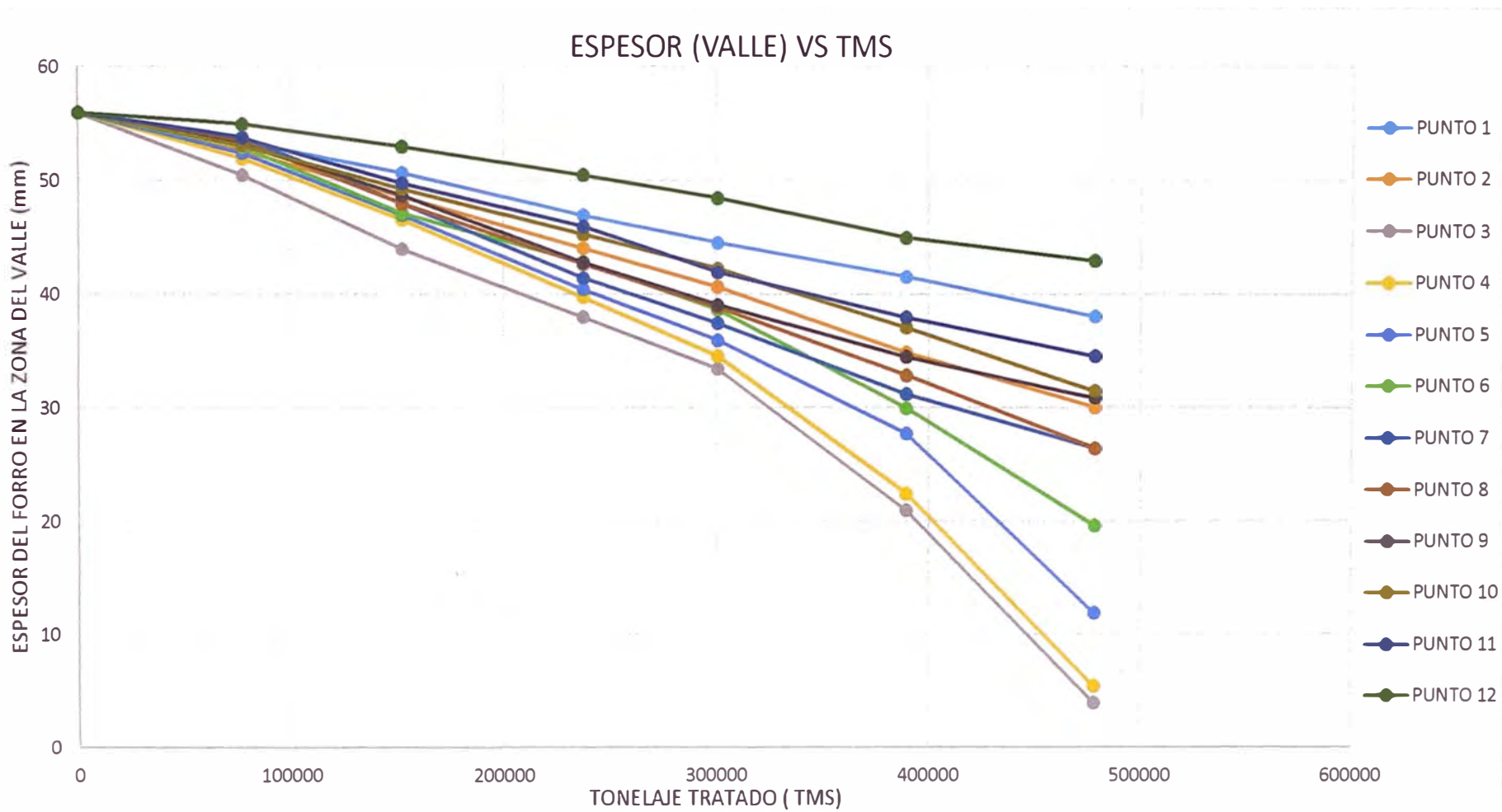
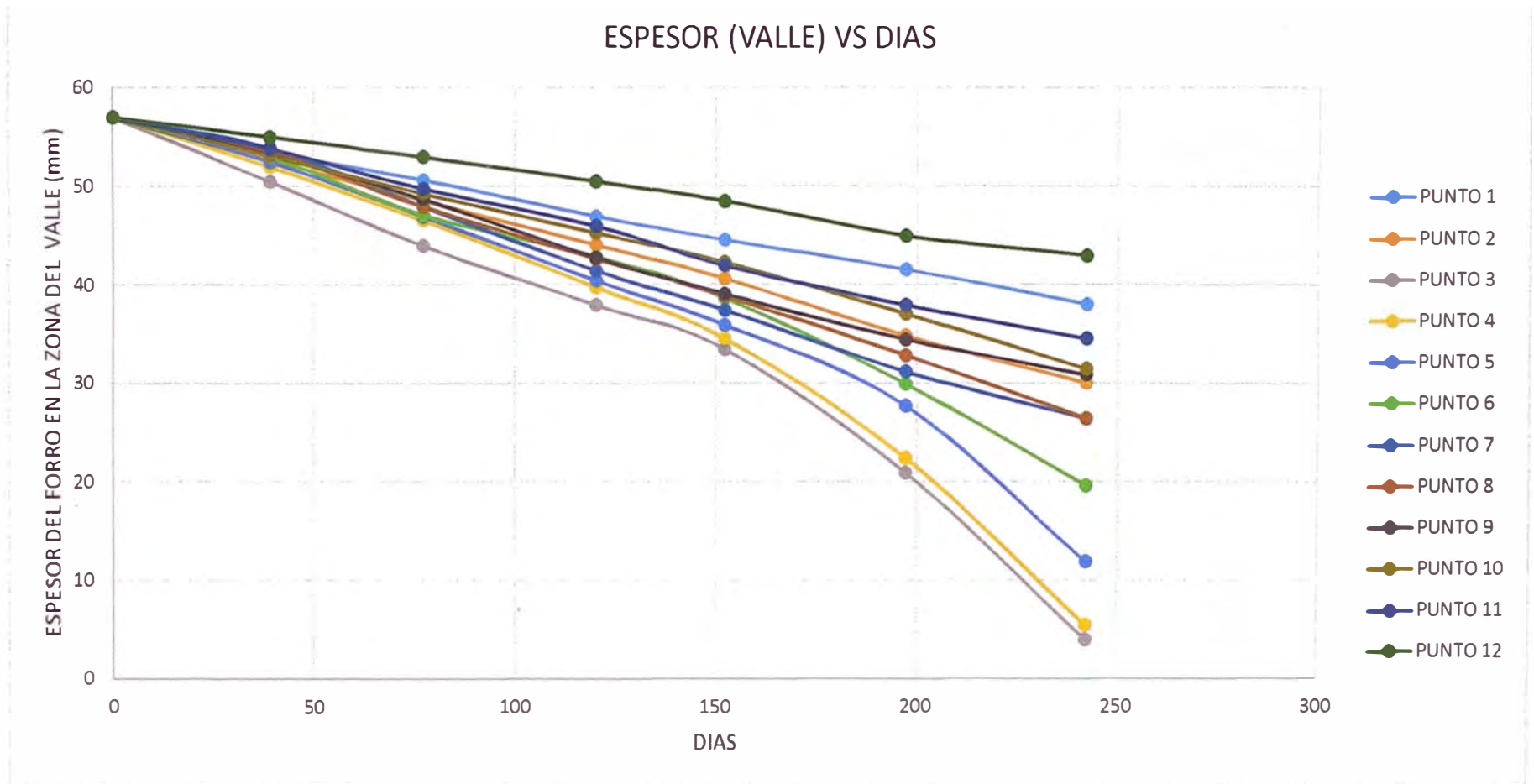


TABLA N°4 TENDENCIAS DE DESGASTE DEL ESPESOR DEL FORRO EN LA ZONA DEL VALLE VS DIAS CON LOS FORROS CONVENCIONALES ASTM A 148



CAPITULO IV

OPTIMIZACIÓN DEL CICLO DE VIDA DE LOS FORROS

(SOLUCION DEL PROBLEMA, ALEACIÓN CON MEJOR RESISTENCIA A LA ABRASIÓN)

4.1 PLANTEAMIENTO DE LA SOLUCIÓN

4.1.1 Selección de la aleación con mejor resistencia a la abrasión

Se tomó como base los resultados obtenidos en los ensayos del desgaste abrasivo a dos cuerpos (2.8.3) y se concluye de la figura 30 que las fundiciones con aleaciones de cromo son las que presentan el menor ratio de pérdida de peso por hora, la correlación entre este ensayo y el desgaste de los forros en un molino es buena, teniendo en cuenta que lo real en un molino es el desgaste de tres cuerpos.

Las fundiciones blancas de alto cromo están especificadas bajo la norma ASTM A532, se debe determinar la composición química que tendrán los forros del molino, teniendo en cuenta que el desgaste

abrasivo decrece cuando la dureza del metal aumenta o aumenta el porcentaje en volumen de segundas fases duras en su estructura.

Las reducciones del desgaste abrasivo están limitadas solamente por la tenacidad del material o la capacidad de la fase dura de resistir a la fractura, es muy importante entender que en un molino de bolas se tiene abrasión e impacto de los medios moledores y el mineral sobre los revestimientos pero que el tipo de desgaste predominante es el desgaste abrasivo.

La especificación ASTM A 532 cubre los requisitos de composición y dureza de las fundiciones blancas utilizadas para el servicio de resistencia a la abrasión. A las fundiciones blancas de alta aleación se las puede clasificar en tres grandes grupos:

A) Tipo I, Fundiciones Blancas al níquel - cromo: Estas fundiciones son de bajo contenido de cromo 1 – 4 % y 3 – 5 % Ni, existiendo una aleación con contenidos de cromo del 7 al 11%. Ver tabla 3

Des	Type	Designation	Composition, wt%(a)									
			TC(b)	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Mo	Cu	
I.....	A	Ni-Cr-FC	3.0-3.6	1.3	0.30	0.15	0.8	1.4-4.0	3.3-5.0	1.0	...	
I.....	B	Ni-Cr-LC	2.5-3.0	1.3	0.30	0.15	0.8	1.4-4.0	3.3-5.0	1.0	...	
I.....	C	Ni-Cr-GB	2.9-3.7	1.3	0.30	0.15	0.8	1.1-1.5	2.7-4.0	1.0	...	
I.....	D	Ni-Hi Cr	2.5-3.6	1.3	0.10	0.15	1.0-2.2	7-11	5-7	1.0	...	
II.....	A	12% Cr	2.4-2.8	0.5-1.5	0.10	0.06	1.0	11-14	0.5	0.5-1.0	1.2	
II.....	B	15% Cr-Mo-LC	2.4-2.8	0.5-1.5	0.10	0.06	1.0	14-18	0.5	1.0-3.0	1.2	
II.....	C	15% Cr-Mo-FC	2.8-3.6	0.5-1.5	0.10	0.06	1.0	14-18	0.5	2.3-3.5	1.2	
II.....	D	20% Cr-Mo-LC	2.0-2.6	0.5-1.5	0.10	0.06	1.0	18-23	1.5	1.5	1.2	
II.....	E	20% Cr-Mo-FC	2.6-3.2	0.5-1.5	0.10	0.06	1.0	18-23	1.5	1.0-2.0	1.2	
III.....	A	25% Cr	2.3-3.0	0.5-1.5	0.10	0.06	1.0	23-28	1.5	1.5	1.2	

Tabla N°5 Grados ASTM A532 de fundiciones aleadas al cromo

B) Tipo II, Fundiciones Blancas al cromo molibdeno con contenidos de Cr del 11 al 23% y contenido de Molibdeno de hasta el 3%, con pequeñas adiciones de Ni o Cu. pudiendo ser elaborada con una

matriz austenítica o austenítica- martensítica, y por medio de tratamiento térmico se obtiene una matriz martensítica para obtener una máxima resistencia a la abrasión, siendo considerada la más dura de todas las fundiciones blancas. comparadas con las fundiciones blancas al níquel – cromo de menor aleación, el eutéctico de carburo son más duros pudiéndose tratar con TT para alcanzar una alta dureza en la pieza.

La adición de Molibdeno, cobre y níquel es para evitar la estructura perlítica y de ese modo asegurar la máxima dureza.

- C) Fundiciones Blancas con contenidos de Cr entre 25 al 28 % y con contenidos de aleantes como Mo de hasta 1,5 % adicionándose para prevenir la perlita. El contenido de Ni y de Cu es del 1%.

En la tabla n°4 se puede apreciar comparativos de ratios de desgaste y resistencia a la abrasión de las fundiciones bajo la norma ASTM A532

Abrasion resistance and wear rates of selected white irons

Material designation	ASTM designation		Abrasion resistance			Relative wear rate in grinding mill liners(a)
	Class	Type	Gauging wear ratio	Pin test	Rubber-wheel test	
Ni-Cr-HC.....	I	A	0.035	105-109
Ni-Cr-LC.....	I	B	0.151	...	0.055	...
15% Cr-Mo-LC.....	II	B	0.076	...	0.065	88-90
15% Cr-Mo-HC.....	II	C	0.044	...	0.036	...
20% Cr-Mo-HC.....	II	E	0.081	0.042	0.054	...
25% Cr.....	III	A	0.127	...	0.099	98-100
Martensitic steel (1C-5Cr-1Mo),.....	0.077	...	100

(a) Martensitic steel used as a reference and assigned a value of 100. Values < 100 indicate a more wear-resistant material; > 100 indicates a less wear-resistant material. Source: Ref 3

Tabla N° 6 resistencia a la abrasión y ratio de desgaste de fundiciones blancas bajo la norma ASTM A 532, pag 97 ASM Alloy Cast Iron

Los desgastes relativos de los principales tipos de fundiciones blancas de alto cromo se muestran en la fig n°4, determinadas en diferentes laboratorios, se puede observar en la última columna los ratios de desgaste relativos de forros (liners) de molinos asimismo que la aleación de clase II tipo B es la que presenta el menor ratio de desgaste relativo 88 – 90 y es la aleación que seleccionaremos para nuestro trabajo de investigación.

4.1.2 Aleación ASTM A 532 II B

La aleación propuesta con mejores propiedades de resistencia a la abrasión

ASTM A532 Gr IIB		
Primera y Segunda Fila		
Elemento	Símbolo	Rango
Carbón	C	2.40 – 2.80
Manganeso	Mn	1,00 – 1,50
Silicio	Si	0,30 – 1,00
Cromo	Cr	14,00 – 18,00
Molibdeno	Mo	1.50 – 2.50

Propiedades Mecánicas

ALEACION	Características	Propiedades Mecánicas	
		Resistencia a la tracción	Dureza
ASTM A532 Gr IIB	Resistente a la abrasión e impacto moderado.	NO APLICA	600 – 700 HBN

Microestructura: Matriz Martensítica y Carburos.



4.2 PERFIL DE DESGASTE DE FORROS CON ALEACIÓN DE MEJOR RESISTENCIA A LA ABRASIÓN (ASTM A 532 IIB)

Las mediciones realizadas con el cambio de aleación se detallan a continuación

TABLA N° 7 PERFILES DE DESGASTE DE FORROS EN ALEACION ASTM A 532 IIB

FECHA	DIAS ACUM.	TMS	TMS-ACUM	DIAS	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12
28/05/13	0	0	0	0	57	57	57	57	57	57	57	57	57	57	57	57
13/07/13	46	91110	91110	46	55.5	54.8	52	52	52.5	53.3	52	51.7	52	52.9	53.1	55.2
10/09/13	105	116105	207215	59	53.8	51.9	46	46.6	47	48	44.5	45	46	47.4	49	52
13/10/13	138	65004	272219	33	52.7	50.3	42	41	43.6	45.3	39.5	40	42	44.1	45.8	50.1
03/12/13	189	99987	372206	51	50.9	47.7	35.5	34.6	37.8	40.9	31.9	33	35.7	38	40.7	47
28/01/14	245	111198	483404	56	48.7	44	28	26.5	32	35	24.6	25	29.3	30.9	36	43.1
14/03/14	290	88524	571928	45	46.9	41.5	20.6	19.7	25	30	16	16.5	23.5	25.2	32.1	39.8

TABLA N°8: TENDENCIAS DE DESGASTE DEL ESPESOR DEL FORRO EN LA ZONA DEL VALLE VS TONELAJE CON ALEACION ASTM A 532 IIB

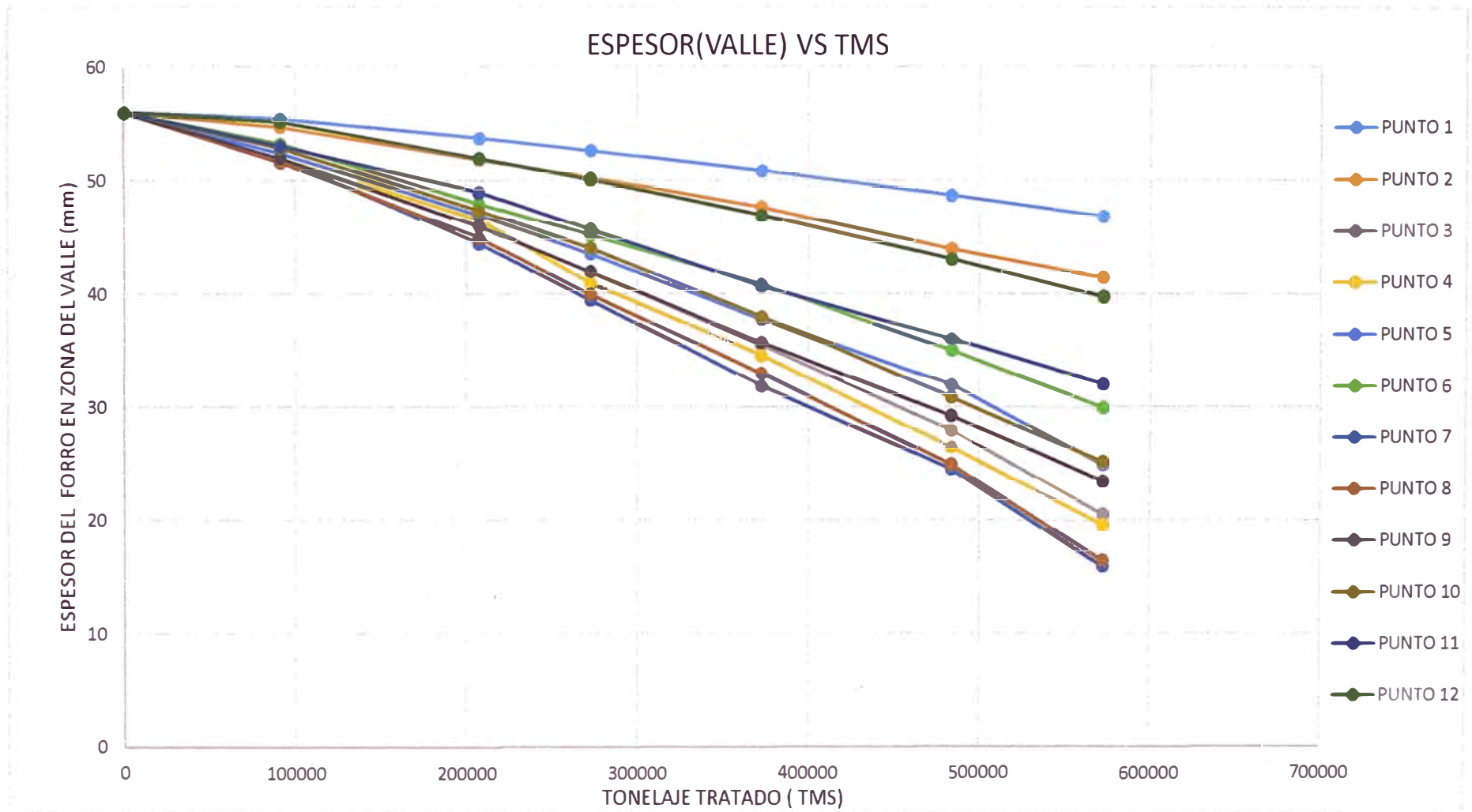
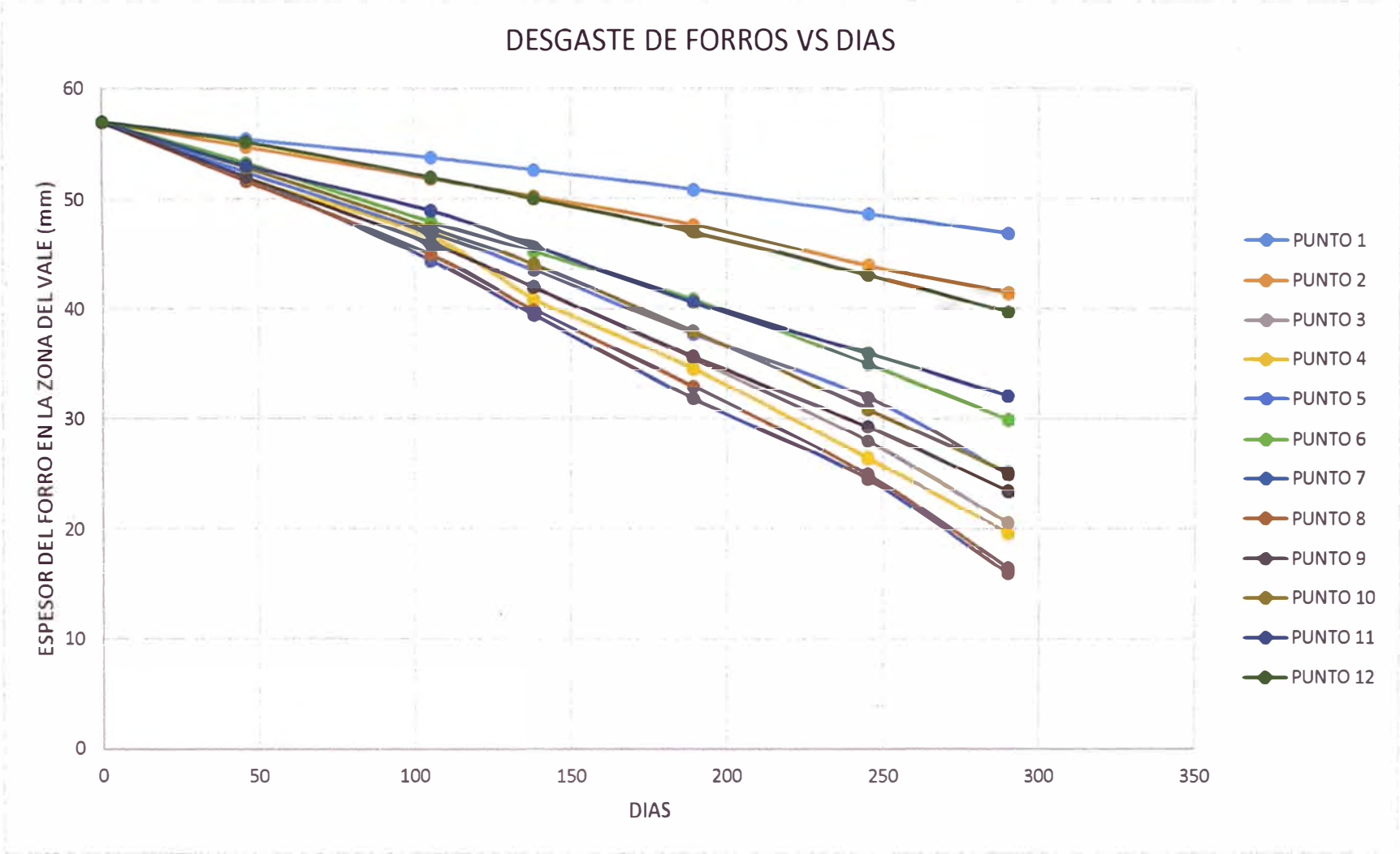


TABLA N°9 TENDENCIAS DE DESGASTE DEL ESPESOR DEL FORRO EN LA ZONA DEL VALLE VS DIAS CON ALEACION ASTM A 532 IIB



CAPITULO V

COSTOS

5.1 DETERMINACIÓN DE LOS COSTOS

Para el cálculo de los costos se ha tomado como base el precio del oro más bajo de los últimos años, según la tabla n° 7

AÑO	ORO EE.UU(1) (US\$/oz) Nominal
2010	1.224,5
2011	1.571,1
2012	1.668,0
2013	1.409,7
2014	1352.3 (*)

TABLA N°10

(*) Precio promedio del oro al día de 20-10-2014

Según el histórico de la empresa, los cambio de forros se dan cada 8 meses (240 días) en promedio, con el cambio en la aleación se llegó a 290 días, teniendo aun vida útil del espesor en los forros, en un aproximado de 30 días más, vale decir que con la aleación mejorada se pudo llegar hasta los 320 días, sin embargo se tomara un valor referencial de solo 300 días.

Para facilitar el cálculo de los costos se tomara una proyección de 10 años, desde el 2014 hasta el 2023, teniendo dos escenarios el primero con la aleación convencional ASTM A 148 y el segundo con el cambio de aleación ASTM A 532

Tonelaje procesado/ día	2000
Ley de cabeza (gr/TMS)	10.5
% Recuperación total	90.50%
gr AU/día	19005
Oz troy/día	611.02
\$ / Oz troy	1352
\$ / día	826099.04
\$/hr	34,420.7933

TABLA N°11 Calculo del costo \$ / hora del mineral tratado

De la tabla n° 11 se tiene que el costo por cada hora que la planta deja de producir es de: **\$34,420.80**

	Aleación ASTM A148 GR 130-115	Aleación ASTM A532 IIB
Periodo de cambio de forros	240	300
Periodo de evaluación 2014- 2023 (días)	3650	3650
# de paradas de planta por cambio de forro en periodo de evaluación	15.21	12.17
# de hrs de parada de planta por cambio de forros	30	30
horas totales	456.25	365
Ahorro total (horas)	91.25	
Costo \$/hora-producida	34,420.79333	
Ahorro total (\$)	3'140,897.392	
Ahorro por concepto de tratamiento de mineral (\$/año)	314,089.7392	

TABLA N°12 Calculo del ahorro \$/año por mineral tratado

Se observa que mejorando la aleación de los forros del cilindro hay en total una disminución de la frecuencia de cambio de 15 veces a 12 veces en un periodo de 10 años.

De la tabla n°12 se obtiene que el ahorro anual por concepto de mineral procesado asciende a \$ 314,089.7

	Aleación ASTM A148 GR 130-115	Aleación ASTM A532 IIB
Cantidad de juego de forros en el periodo de evaluación 2014-2023 (días)	15	12
Costo del set de forros (\$)	45,970	58,650
Costo total de set de forros(\$)	689,550	703,800
Ahorro total (\$)	-14,250	
Ahorro \$/año	-1,425	

TABLA N°13 Calculo del ahorro \$ / año por costo del set de forros

De la tabla n° 13 se observa que el ahorro anual por concepto del costo de los forros asciende a \$ - 1,425 (incremento en el costo)

CONCLUSIONES

Al concluir el desarrollo del informe de suficiencia se ha llegado a las siguientes conclusiones:

1. Utilizando la aleación de acero en ASTM A532 IIB, con mejores propiedades de resistencia a la abrasión, se consiguió optimizar el ciclo de vida de los forros del cilindro del molino primario en aproximadamente 60 días, desde un ciclo de 240 días se consiguió llevar el cambio a 300 días, lo que significa un incremento del 25% de la vida útil de los forros.
2. Utilizando la aleación de acero en ASTM A532 IIB, se obtiene un ahorro anual total de \$ 312,664.70
3. De la tabla n°6 se obtiene que la aleación que presenta un mejor rendimiento para forros de molinos es la ASTM A 532 clase II tipo B.
4. Utilizando la aleación de acero en ASTM A532 IIB, se obtiene un ahorro anual por concepto de mineral procesado de \$ 314,089.7
5. Utilizando la aleación de acero en ASTM A532 IIB, se obtiene un sobrecosto anual por concepto del set de forros de \$ 1,425

RECOMENDACIONES

1. Tener presente que ante una variación de las condiciones de operación se tendrá una variación significativa en el tiempo de vida útil esperado en los forros del cilindro.
2. Recomendamos efectuar un mejor análisis en lo que a tratamientos térmicos de los forros se refiere teniendo en cuenta que este debe de ser especificado al momento de generar la compra del set de forros pues la dureza y la composición química del material es muy susceptible a estos cambios.
3. Recomendamos como segunda fase de esta investigación realizar un análisis mediante métodos de elementos discretos para evaluar el comportamiento y una posible mejora del perfil de los forros.
4. En general ningún molino deberá trabajar bajo condiciones en vacío, porque esto generara un desgaste prematuro en los forros del cilindro, como regla general este trabajo de los molinos en vacío se traduce en una baja en el amperaje de operación y produce un sonido tipo anormal.
5. Para molinos con diámetros mayores a 20' no se recomienda el uso de la aleación propuesta ASTM A 532 porque la probabilidad de fractura de los forros se incrementa.
6. Considerar siempre que los forros de ASTM A 532 no son soldables, cualquier intervención mediante oxicorte u otro proceso exotérmico dañara la microestructura haciendo que la probabilidad de fractura en operación sea muy alta.
7. Considerar dentro del set de forros de la primera y segunda fila al menos dos forros del tipo candado para facilitar el montaje y desmontaje.

BIBLIOGRAFIA

1. Malcom Blair, ASM International, Steel Casting Handbook, sexta edición, Abrasive Wear, capítulo 19.
2. Richard B. Gundlach y Douglas V. Doane, Metals Handbook, Volumen 1, Properties and Selection: Irons, Steels and High Performance Alloys, Capítulo: Alloy Cast Irons, pag. 85 - 103
3. Malcom Blair, ASM International, Metals Handbook, Volumen 1, Properties and Selection: Irons, Steels and High Performance Alloys, Capítulo: Steel Casting, Carbon and Low Alloy Steels, pag. 363 – 379
4. Jeff Hawk y Richard Wilson, ASM International, Metals Handbook, Volumen 11, Failure Analysis and Prevention, Capítulo: Abrasive Wear Failure, pag 906 - 921
5. Jeff Hawk y U.S. Department of Energy, Albany Research Center, Metals Handbook, Volumen 8, Mechanical Testing and Evaluation, Capítulo: Abrasive Wear Testing, pag 325 - 335
6. Handbook Metso Minerals
7. Luis Magne, Waldo Valderrama, M. Quintero y J. Menacho, Mill Lifter Design and Grinding Kinetics, VI Meeting of the Southern Hemisphere Mineral Technology y III Latin-American Congress in Flotation, Concepción (Chile), 20-23 nov. 1994
8. Luis Magne y Waldo Valderrama, Efecto del diseño de revestimientos sobre el consumo de potencia, Consejo superior de investigaciones científicas Universidad de Santiago de Chile.
9. Pablo Mamani Calla, Estudio de resistencia al desgaste por abrasión de aceros de baja aleación, aceros al manganeso y hierros fundidos aleados, Instituto de Investigación de la Facultad de Ingeniería Mecánica – Energía de la Universidad Nacional del Callao, Resolución Directoral de aprobación N° 580 – 99 – R
10. Levi Guzman Rivera, El efecto de la trayectoria de la carga moledora en la eficiencia de molienda, Moly – Cop Adesur
11. Luis Magne, Waldo Valderrama y Jorge Pontt, Avances en diseño de revestimientos para molinos semiautógenos, Centro Tecnológico en Molienda y Sistemas Eléctricos de la Universidad Técnica Federico Santa María.

APENDICE

MATERIAL	DENSIDAD (ρ) (kg/m ³)	IMPEDANCIA ACUSTICA ($Z \times 10^{-3}$) (kg/m ² seg)	VELOCIDAD LONGITUDINAL (V) l (m/seg)	VELOCIDAD TRANSVERSAL (V) t (m/seg)	MODULO DE ELASTICIDAD (E) (N/cm ²)	MODULO DE RIGIDEZ (G x 10 ⁷) (N/cm ²)
ACEITE DE MOTOR	870	1.514	1.740	-----	-----	-----
ACERO ESTRUCTURAL	7.850	46.629	5.940	3.250	213.320	82.916
ACERO DE BLOQUE PATRON	7.850	46.472	5.920	3.250	212.977	82.916
AGUA	1.000	1.480	1.480	-----	-----	-----
AIRE	1	0	333	-----	-----	-----
ALUMINIO	2.700	17.064	6.320	3.130	70.758	26.452
ARALDITA	1.200	3.000	2.500	-----	-----	-----
BAQUELITA	1.400	3.526	2.590	-----	-----	-----
BISMUTO	9.800	21.364	2.180	1.100	31.524	11.058
BRONCE	8.100	35.883	4.430	1.500	98.400	36.405
CADMIO	8.600	19.350	2.780	2.160	50.103	19.350
COBRE	8.900	41.830	4.700	2.260	122.701	45.458
CONCRETO	2.000	9.200	4.600	-----	-----	-----
ESTAÑO	7.300	24.235	3.320	1.670	54.181	20.359
FUNDICION GRIS	7.200	33.120	4.600	2.650	126.570	50.562
GLICERINA	1.300	2.495	1.920	-----	-----	-----
GOMA DURA	1.200	2.760	2.300	-----	-----	-----
HIERRO COLADO	6.900	24.150	3.500	2.260	78.375	33.396
MAGNESIO	1.700	9.809	5.170	3.050	41.311	15.614

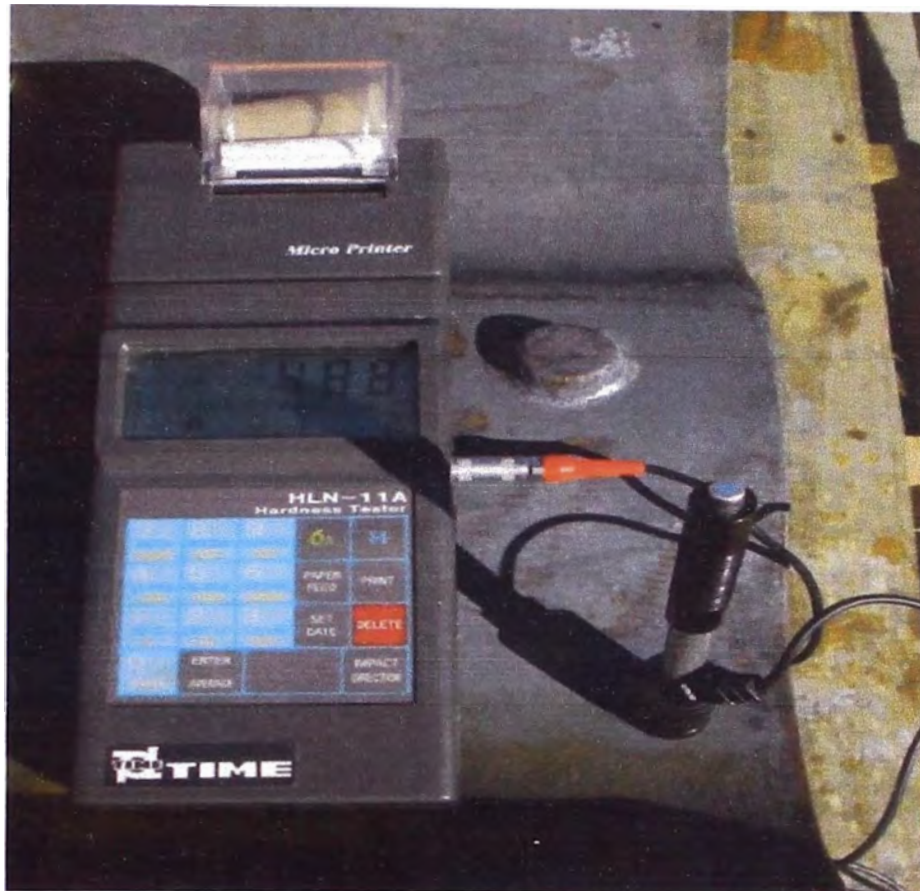
Anexo N°1 Velocidades típicas del sonido en distintos materiales

Tyler Standard Screen Scale

Mesh (malla)	Micrones (μ)	Milímetro (mm)	Pulgadas (inch)
400	33	0.033	0.0012992
325	43	0.043	0.0016929
270	53	0.053	0.0020866
250	61	0.061	0.0024016
200	74	0.074	0.0029134
170	88	0.088	0.0034646
150	104	0.104	0.0040945
115	121	0.121	0.0047638
100	147	0.147	0.0057874
80	173	0.173	0.0068110
65	208	0.208	0.0081890
60	246	0.246	0.0096850
48	295	0.295	0.0116142
42	351	0.351	0.0138189
35	417	0.417	0.0164173
32	495	0.495	0.0194882
28	589	0.589	0.0231890
24	701	0.701	0.0275984
20	833	0.833	0.0327953
16	991	0.991	0.0390160
14	1168	1.168	0.0459843
12	1397	1.397	0.0550000
10	1651	1.651	0.0650000
9	1981	1.981	0.0779921
8	2362	2.362	0.0929921
7	2794	2.794	0.1100000
6	3327	3.327	0.1309843
5	3962	3.962	0.1559843
4	4699	4.699	0.1838543
3.5	5613	5.613	0.2209843
3	6680	6.680	0.2629921



ANEXO N° 3 Fotos de dureza en los forros con aleación ASTM A 532 IIB



ANEXO N° 4 Fotos de dureza en los forros con aleación ASTM A 148 Gr 130 - 115

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE LOS PRODUCTOS DEL MOLINO 8'x10' Nº 1									
MALLA	MICRONES	ALIMENTO			DESCARGA			CALCULO 80% PASANTE	
		PESO (t/h)	% PESO	ACUM (-)	PESO (t/h)	% PESO	ACUM (-)	F ₈₀	P ₈₀
3/8"	9510	0.76	0.91	99.09	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00
1/4"	6350	13.26	15.94	83.14	0.00	0.00	100.00	5996.54	0.00
10	1680	40.89	49.17	33.97	12.68	15.24	84.76	0.00	0.00
14	1410	3.92	4.72	29.26	3.48	4.18	80.58	0.00	1370.94
16	1180	2.25	2.71	26.55	2.98	3.59	76.99	0.00	0.00
18	1000	2.04	2.45	24.10	3.34	4.02	72.97	0.00	0.00
20	850	1.57	1.89	22.21	3.01	3.62	69.36	0.00	0.00
30	600	2.92	3.52	18.69	7.23	8.70	60.66	0.00	0.00
40	425	2.21	2.66	16.03	7.04	8.46	52.20	0.00	0.00
50	300	1.88	2.26	13.77	6.85	8.24	43.96	0.00	0.00
70	212	1.52	1.83	11.95	5.62	6.76	37.20	0.00	0.00
100	150	1.54	1.85	10.10	5.11	6.15	31.05	0.00	0.00
140	106	1.32	1.59	8.51	4.11	4.94	26.11	0.00	0.00
200	75	1.13	1.36	7.16	3.62	4.35	21.76	0.00	0.00
270	53	0.86	1.03	6.13	2.80	3.37	18.39	0.00	0.00
325	45	0.28	0.34	5.79	1.00	1.20	17.19	0.00	0.00
400	38	0.06	0.08	5.71	0.32	0.38	16.81	0.00	0.00
-400	0	4.75	5.71	0.00	13.98	16.81	0.00	0.00	0.00
TOTAL		83.17	100.0		83.17	100.0		5996.54	1370.94

ANEXO Nº 5 Análisis Granulométrico en Molino 8' x 10'

Standard Specification for Steel Castings, High Strength, for Structural Purposes¹

This standard is issued under the fixed designation A 148/A 148M; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

This standard has been approved for use by agencies of the Department of Defense.

1. Scope

1.1 This specification covers carbon steel, alloy steel, and martensitic stainless steel castings that are to be subjected to higher mechanical stresses than those covered in Specification A 27/A 27M.

1.2 Several grades of steel castings are covered, having the chemical composition and mechanical properties prescribed in Table 1 and Table 2.

1.3 The values stated in inch-pound units or SI units are to be regarded separately as standard. Within the text, the SI units are shown in brackets. The values stated in each system are not exact equivalents; therefore, each system must be used independently of the other. Combining values from the two systems may result in nonconformance with the specification.

2. Referenced Documents

2.1 ASTM Standards:

- A 27/A 27M Specification for Steel Castings, Carbon, for General Application²
- A 370 Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products³
- A 781/A 781M Specification for Castings, Steel and Alloy, Common Requirements for General Industrial Use²
- E 29 Practice for Using Significant Digits in Test Data to Determine Conformance with Specifications⁴

3. General Conditions for Delivery

3.1 Material furnished to this specification shall conform to the requirements of Specification A 781/A 781M, including any supplementary requirements that are indicated in the purchase order. Failure to comply with the general requirements of Specification A 781/A 781M constitutes nonconformance with this specification. In case of conflict between the requirements of this specification and Specification A 781/

¹ This specification is under the jurisdiction of ASTM Committee A01 on Steel, Stainless Steel, and Related Alloys and is the direct responsibility of Subcommittee A01.18 on Castings.

Current edition approved Mar. 10, 2001. Published May 2001. Originally published as A 148 – 55. Last previous edition A 148/A 148M – 93b (1998).

² Annual Book of ASTM Standards, Vol 01.02.

³ Annual Book of ASTM Standards, Vol 01.03.

⁴ Annual Book of ASTM Standards, Vol 14.02.

TABLE 1 Chemical Requirements

Grade	Composition, %	
	Sulfur, max	Phosphorus, max
80-40 [550-275]	0.06	0.05
80-50 [550-345]	0.06	0.05
90-60 [620-415]	0.06	0.05
105-85 [725-585]	0.06	0.05
115-95 [795-655]	0.06	0.05
130-115 [895-795]	0.06	0.05
135-125 [930-860]	0.06	0.05
150-135 [1035-930]	0.06	0.05
160-145 [1105-1000]	0.06	0.05
165-150 [1140-1035]	0.020	0.020
165-150L [1140-1035L]	0.020	0.020
210-180 [1450-1240]	0.020	0.020
210-180L [1450-1240L]	0.020	0.020
260-210 [1795-1450]	0.020	0.020
260-210L [1795-1450L]	0.020	0.020

A 781M, this specification shall prevail.

4. Ordering Information

4.1 The inquiry and order should include or indicate the following:

- 4.1.1 A description of the casting by pattern number or drawing (dimensional tolerances shall be included on the casting drawing),
- 4.1.2 Grade of steel,
- 4.1.3 Options in the specification, and
- 4.1.4 The supplementary requirements desired, including the standards of acceptance.

5. Heat Treatment

5.1 All castings shall be heat treated either by full annealing, normalizing, normalizing and tempering, or quenching and tempering. Unless otherwise specified in the inquiry, contract, or order, the castings may be heat treated by any of these heat treatments or combination of these heat treatments at the option of the manufacturer.

5.2 Heat treatment shall be performed after the castings have been allowed to cool below the transformation range.

6. Temperature Control

6.1 Furnace temperatures for heat-treating shall be regulated

 **A 148/A 148M**
TABLE 2 Tensile Requirements

Grade	Tensile strength min, ksi [MPa]	Yield point min, ksi [MPa]	Elongation in 2 in. or 50 mm, min, % ^a	Reduction of Area, min, %
80-40 [550-275]	80 [550]	40 [275]	18	30
80-50 [550-345]	80 [550]	50 [345]	22	35
90-60 [620-415]	90 [620]	60 [415]	20	40
105-85 [725-585]	105 [725]	85 [585]	17	35
115-95 [795-655]	115 [795]	95 [655]	14	30
130-115 [895-795]	130 [895]	115 [795]	11	25
135-125 [930-860]	135 [930]	125 [860]	9	22
150-135 [1035-930]	150 [1035]	135 [930]	7	18
160-145 [1105-1000]	160 [1105]	145 [1000]	6	12
165-150 [1140-1035]	165 [1140]	150 [1035]	5	20
165-150L [1140-1035L] ^b	165 [1140]	150 [1035]	5	20
210-180 [1450-1240]	210 [1450]	180 [1240]	4	15
210-180L [1450-1240L] ^b	210 [1450]	180 [1240]	4	15
260-210 [1795-1450]	260 [1795]	210 [1450]	3	6
260-210L [1795-1450L] ^b	260 [1795]	210 [1450]	3	6

^a When IC1 test bars are used in tensile testing as provided for in this specification, the gage length to reduced section diameter ratio shall be 4 to 1.

^b These grades must be Charpy impact tested as prescribed in Section 9, and with minimum values as shown in Table 3.

by the use of pyrometers.

7. Chemical Composition

7.1 The steel shall conform to sulfur and phosphorus requirements as prescribed in Table 1.

7.2 The content of carbon, manganese, silicon, and alloying elements may, by agreement, be prescribed by the purchaser. If not specified, the content may be selected by the manufacturer to obtain the required mechanical properties.

7.3 When the analysis of carbon, manganese, silicon, or any intentionally added alloying element is specifically requested in the contract or order, it shall be made by the manufacturer and reported to the purchaser. The results of these analyses shall not be used as a basis for rejection except by prior agreement.

8. Tensile Requirements

8.1 One tension test shall be made from each heat and shall conform to the tensile requirements specified in Table 2.

8.2 The test coupons and specimens shall conform to requirements specified in Section 11.

8.3 Tension test coupons shall be machined to the form and dimension shown in Fig. 5 of Test Methods and Definitions A 370 and tested in accordance with those test methods.

8.4 To determine conformance with the tension test requirements, an observed value or calculated value shall be rounded off in accordance with Practice E 29 to the nearest 500 psi [5 MPa] for yield point and tensile strength and to the nearest 1 % for elongation and reduction of area.

9. Charpy Impact Requirements

9.1 This section is applicable only to grades 165-150L [1140-1035L], 210-180L [1450-1240L], and 260-210L [1795-1450L].

NOTE 1—Other grades may be ordered to Charpy impact test requirements in accordance with Supplementary Requirement S9 of Specification A 781/A 781M.

9.2 The notched bar impact properties of each heat shall be determined by testing one set of three Charpy V-notch impact

specimens at $-40^{\circ} \pm 2^{\circ}\text{F}$ [$-40^{\circ} \pm 1^{\circ}\text{C}$]. The energy value of the three specimens shall not be less than shown in Table 3.

9.3 Test coupons and specimens shall conform to the requirements specified in Section 11.

9.4 Impact test specimens shall be machined to the form and dimensions shown in Test Methods and Definitions A 370, Type A, Charpy V-notch specimen, Fig. 11, and tested in accordance with those test methods.

10. Retests

10.1 If the results of the tensile or Charpy tests do not conform to the requirements specified, heat-treated castings may, at the manufacturer's option, be reheat treated. Testing after reheat treatment shall consist of the full number of specimens complying with the specification or order.

11. Test Coupons and Specimens

11.1 Test bars shall be poured from the same heat as the castings represented. Test coupons may be cast integrally with the castings or as separate blocks similar to those shown in Fig. 1 of Specification A 781/A 781M.

11.1.1 In the case of quenched and tempered castings where the ruling section of the casting exceeds three inches, supplementary requirement S 15 of Specification A 781/A 781M shall apply.

11.2 The bar from which the test piece is taken shall be heat treated in production furnaces with the castings or to the same procedure as the castings it represents.

TABLE 3 Impact Requirements

Grade	165-150L [1140- 1035L]	210-180L [1450- 1240L]	260-210L [1795- 1450L]
Impact Requirements	20 [27]	15 [20]	6 [8]
Charpy V-notch Energy value, ft-lbf [J], min value for two specimens and minimum average of three specimens			
Energy value, ft-lbf [J], min for single specimen	16 [22]	12 [16]	4 [5]

ASTM A 148/A 148M

11.2.1 When the bar from which the test piece is taken is not heat treated as part of the same heat treatment load as the casting(s) it qualifies, the austenitizing (or solution, if applicable) temperatures for the bar shall be within 25°F of those for the casting(s). The tempering temperature for the bar shall be no higher than 25°F above that of the casting(s) and no higher than permitted by the heat treatment procedure for the material. The cycle time at each temperature shall not exceed that for the casting(s).

11.3 Test specimens may be cut from heat-treated castings, at the producer's option, instead of from test bars.

11.4 If any specimen shows defective machining, or exhibits flaws, it may be discarded and another substituted from the same heat.

12. Repair by Welding

12.1 Weld repairs shall be inspected to the same quality standards that are used to inspect the castings. When castings are produced with Supplementary Requirement S1 specified, weld repairs shall be inspected by magnetic particle examination to the same standards that are used to inspect the castings.

When castings are produced with Supplementary Requirement S2 specified, weld repairs in which the depth of the cavity prepared for repair welding exceeds 20 % of the wall thickness or 1 in. [25 mm], whichever is smaller, or in which the cavity prepared for welding is greater than approximately 10 in.² [65 cm²], shall be radiographed to the same standards that are used to inspect the castings.

12.2 Welds exceeding 20 % of the wall thickness or 1 in. [25 mm], whichever is smaller, or exceeding approximately 10 in.² [65 cm²] in area, shall be given a suitable stress relief or heat treatment.

13. Rehearing

13.1 Tested samples representing rejected material shall be held for two weeks from the date of the test report. In case of dissatisfaction with the results of the tests, the manufacturer may make claim for a rehearing within that time.

14. Keywords

14.1 alloy steel; carbon steel; castings; high strength steel; martensitic stainless steel; steel castings; structural castings

SUPPLEMENTARY REQUIREMENTS

The following supplementary requirements shall not apply unless specified in the purchase order. A list of standardized supplementary requirements for use at the option of the purchaser is included in Specification A 781/A 781M. Those which are ordinarily considered suitable for use with this specification are given below together with additional supplementary requirements that are applicable only to this specification. Other supplementary requirements enumerated in Specification A 781/A 781M may be used with this specification upon agreement between the manufacturer and purchaser.

S1. Magnetic Particle Examination.

S2. Radiographic Examination.

S6. Certification.

S8. Marking.

S9. Charpy Impact Test

S9.1 Charpy impact test properties shall be determined on each heat from a set of three Charpy V-notch specimens made from a test coupon in accordance with Test Methods and Definitions A 370 and tested at a test temperature agreed upon between the manufacturer and purchaser. The acceptance requirements shall be either energy absorbed, lateral expansion, or percent shear area, or all three, and shall be that agreed upon by the manufacturer and purchaser. Test specimens shall

be prepared as Type A and tested in accordance with Test Methods and Definitions A 370.

S9.2 *Absorbed Energy*—Average energy value of three specimens shall be not less than specified, with not more than one value permitted to fall below the minimum specified and no value permitted below the minimum specified for a single specimen.

S9.3 *Lateral Expansion*—Lateral expansion value shall be agreed upon between the manufacturer and purchaser.

S9.4 *Percent Shear Area*—Percent shear area shall be agreed upon between the manufacturer and purchaser.

S15. Alternate Tension Test Coupons and Specimen Locations for Castings (in lieu of Test Bars Poured from Special Blocks).

The American Society for Testing and Materials takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.

This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, at the address shown below.

 **A 148/A 148M**

This standard is copyrighted by ASTM, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States. Individual reprints (single or multiple copies) of this standard may be obtained by contacting ASTM at the above address or at 610-832-9585 (phone), 610-832-9555 (fax), or service@astm.org (e-mail); or through the ASTM website (www.astm.org).

Standard Specification for Abrasion-Resistant Cast Irons¹

This standard is issued under the fixed designation A 532/A 532M; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ε) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

ε¹ Note Keywords were added editorially in October 1999.

1. Scope

1.1 This specification covers a group of white cast irons that have been alloyed to secure high resistance to abrasive wear in the applications of the mining, milling, earth-handling, and manufacturing industries.

1.2 Simple and low-alloy white cast irons that consist essentially of iron carbides and pearlite are specifically excluded from this specification.

1.3 The values stated in inch-pound units or SI units are to be regarded separately as the standard. Within the text, SI units are shown in brackets. The values stated in each system are not exact equivalents; therefore, each system must be used independently of the other. Combining values from the two systems may result in nonconformance with the specification.

2. Referenced Documents

2.1 ASTM Standards:

- E 10 Test Method for Brinell Hardness of Metallic Materials²
- E 18 Test Methods for Rockwell Hardness and Rockwell Superficial Hardness of Metallic Materials²
- E 92 Test Method for Vickers Hardness of Metallic Materials²
- E 350 Test Methods for Chemical Analysis of Carbon Steel, Low-Alloy Steel, Silicon Electrical Steel, Ingot Iron, and Wrought Iron³
- E 351 Test Methods for Chemical Analysis of Cast Iron—All Types³

3. Ordering Information

3.1 Orders for material in this specification should include the following information:

- 3.1.1 Quantity,
- 3.1.2 Specification number, class, and type,
- 3.1.3 Description of the casting, pattern number, or drawing,
- 3.1.4 Chilling of the casting, if required (see 4.2),

3.1.5 Heat treat condition (see 5.1),

3.1.6 Hardness level, if supplied hardened or hardened and stress relieved, and

3.1.7 Hardness method, Brinell, Rockwell, Vickers (see Section 9). If the hardness method is not specified, it shall be at the manufacturer's option.

4. Method of Manufacture

4.1 These alloys may be made by any suitable melting process.

4.2 If the casting is to be chilled or otherwise specially treated on any portion, the inquiries and the purchase order shall so state and a properly marked drawing of the casting will accompany both the inquiry and the purchase order.

5. Heat Treatment

5.1 The casting will be supplied in one of the following conditions:

- 5.1.1 As-cast,
- 5.1.2 As-cast and stress relieved,
- 5.1.3 Hardened,
- 5.1.4 Hardened and stress relieved, or
- 5.1.5 Softened for machining.

5.2 Unless otherwise specified by the purchaser, the manufacturer shall supply the castings in the heat treatment he deems best for the application.

5.3 If the heat treatment specified for delivered condition is not that of final use, it shall be the responsibility of the purchaser to provide the additional heat treatment.

5.4 Class II and Class III alloys are frequently ordered in the annealed condition with a maximum hardness of 400 HB. After machining operations are performed the castings may then be hardened. If both annealing and machining are to be performed by the manufacturer, as specified in the inquiry, contract, or order, the purchaser may then specify delivery in the hardened condition. If the purchaser specifies delivery in the annealed condition, subsequent hardening (and stress-relief, if it is desired) is the responsibility of the purchaser.

6. Chemical Composition

6.1 The composition of the metal of a class and type produced under this specification shall fall within the ranges

¹ This specification is under the jurisdiction of ASTM Committee A-4 on Iron Castings and is the direct responsibility of Subcommittee A04.01 on Grey and White Iron Castings.

Current edition approved Jan. 15, 1993 and April 15, 1993. Published November 1993. Originally published as A 532-65 T. Last previous edition A 532-93.

² Annual Book of ASTM Standards, Vol 03.01.

³ Annual Book of ASTM Standards, Vol 03.05.

 **A 532/A 532M**

prescribed in Table 1 for that class and type.

6.2 Spectrographic, X-ray, or wet chemical laboratory techniques are acceptable for routine and control determinations, but shall be standardized against, and give essentially the same results as, the umpire methods specified in 6.3 of this specification.

6.3 In case of dispute, umpire determinations of the chemical analysis of the metal shall be made using ASTM standard methods detailed as follows:

6.3.1 The following is in accordance with Test Methods E 351:

6.3.1.1 Carbon, Total by the Combustion Gravimetric Method.

6.3.1.2 Chromium by the Peroxydisulfate-Oxidation Titrimetric Method.

6.3.1.3 Copper by the Sulfide Precipitation-Electrodeposition Gravimetric Method.

6.3.1.4 Manganese by the Peroxydisulfate-Arsenite Titrimetric Method.

6.3.1.5 Nickel by the Dimethylglyoxime Gravimetric Method.

6.3.1.6 Phosphorus by the Molybdenum Blue Photometric Method.

6.3.1.7 Sulfur by the Combustion-Iodate Titration Method.

6.3.2 The following is in accordance with Test Methods E 350:

6.3.2.1 Molybdenum by the Photometric Method.

7. Microstructure

7.1 The alloys covered by this specification are expected to have microstructures that consist essentially of carbides, martensite, bainite, austenite; and in exceptional cases minor amounts of graphite or pearlite.

7.2 The microstructure will not be routinely determined nor reported except in accordance with special agreement between the manufacturer and the purchaser, or in cases of dispute.

8. Hardness Requirements

8.1 The castings shall conform to the hardness requirements specified in Table 2.

8.2 The hardness test shall be performed on the original surface of the casting or up to $\frac{1}{16}$ in. (3 mm) below that surface.

9. Hardness Method

9.1 Perform the hardness test in accordance with one of the following methods to be specified by the purchaser:

9.1.1 Test Method E 10 (Brinell) using a tungsten carbide ball and 3000 kgf load,

9.1.2 Test Method E 18 (Rockwell) using a diamond cone penetrator, 150 kgf load, and the Rockwell C Scale, or

9.1.3 Test Method E 92 (Vickers).

10. Keywords

10.1 abrasion resistant; alloyed cast iron; cast iron; white cast iron

TABLE 1 Chemical Requirements, Weight %


Class	Type	Designation	Carbon	Manganese	Silicon	Nickel	Chromium	Molybdenum	Copper	Phosphorus	Sulfur
I	A	Ni-Cr-Hc	2.8-3.6	2.0 max	0.8 max	3.3-5.0	1.4-4.0	1.0 max	...	0.3 max	0.15 max
I	B	Ni-Cr-Lc	2.4-3.0	2.0 max	0.8 max	3.3-5.0	1.4-4.0	1.0 max	...	0.3 max	0.15 max
I	C	Ni-Cr-GB	2.5-3.7	2.0 max	0.8 max	4.0 max	1.0-2.5	1.0 max	...	0.3 max	0.15 max
I	D	Ni-HiCr	2.5-3.6	2.0 max	2.0 max	4.5-7.0	7.0-11.0	1.5 max	...	0.10 max	0.15 max
II	A	12 % Cr	2.0-3.3	2.0 max	1.5 max	2.5 max	11.0-14.0	3.0 max	1.2 max	0.10 max	0.06 max
II	B	15 % Cr-Mo	2.0-3.3	2.0 max	1.5 max	2.5 max	14.0-18.0	3.0 max	1.2 max	0.10 max	0.06 max
II	D	20 % Cr-Mo	2.0-3.3	2.0 max	1.0-2.2	2.5 max	18.0-23.0	3.0 max	1.2 max	0.10 max	0.06 max
III	A	25 % Cr	2.0-3.3	2.0 max	1.5 max	2.5 max	23.0-30.0	3.0 max	1.2 max	0.10 max	0.06 max

TABLE 2 Hardness Requirements

Class	Type	Designation	Hardness Value-HB															Typical Section Thickness
			Sand Cast, min ^A									Chill Cast, min ^B			Softened, max			
			As Cast or As Cast and Stress Relieved			Hardened or Hardened and Stress Relieved												
						Level 1			Level 2									
HB	HRC	HV	HB	HRC	HV	HB	HRC	HV	HB	HRC	HV	HB	HRC	HV				
I	A	Ni-Cr-HiC	550	53	600	600	56	660	650	59	715	600	56	660	400	41	430	
I	B	Ni-Cr-LoC	550	53	600	600	56	660	650	59	715	600	56	660	400	41	430	
I	C	Ni-Cr-GB	550	53	600	600	56	660	650	59	715	600	56	660	400	41	430	
I	D	Ni-HiCr	500	50	540	600	56	660	650	59	715	550	53	600	400	41	430	
II	A	12 % Cr	550	53	600	600	56	660	650	59	715	550	53	600	400	41	430	
II	B	15 % Cr-Mo	450	46	485	600	56	660	650	59	715	400	41	430	400	41	430	
II	D	20 % Cr-Mo	450	46	485	600	56	660	650	59	715	400	41	430	400	41	430	
III	A	25 % Cr	450	46	485	600	56	660	650	59	715	400	41	430	400	41	430	

^A 90 % of the minimum surface hardness level shall be maintained to a depth of 40 % of the casting section, with any softer material being at the thermal center of the casting. A sampling procedure should be established by agreement between the supplier and the purchaser.

^B Non-chilled areas of casting shall meet minimum hardness or sand cast requirements.

 **A 532/A 532M**

The American Society for Testing and Materials takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.

This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, 100 Barr Harbor Drive, West Conshohocken, PA 19428.

This standard is copyrighted by ASTM, 100 Barr Harbor Drive, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States. Individual reprints (single or multiple copies) of this standard may be obtained by contacting ASTM at the above address or at 610-832-9585 (phone), 610-832-9555 (fax), or service@astm.org (e-mail); or through the ASTM website (<http://www.astm.org>).