



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Química

**OPTIMIZACIÓN DE LA RELACIÓN DE BOLAS, PARA LA MOLIENDA DE PIEDRA
CALIZA MEDIANTE UN MOLINO DE USO EXPERIMENTAL**

Emmanuel de Jesús Montufar Cárdenas

Asesorado por el Ing. Mario Norberto de León Manrique

Guatemala, mayo de 2013

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**OPTIMIZACIÓN DE LA RELACIÓN DE BOLAS, PARA LA MOLIENDA DE PIEDRA
CALIZA MEDIANTE UN MOLINO DE USO EXPERIMENTAL**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

EMMANUEL DE JESÚS MONTUFAR CÁRDENAS

ASESORADO POR EL ING. MARIO NORBERTO DE LEÓN MANRIQUE

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO

GUATEMALA, MAYO DE 2013

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

| | |
|------------|-------------------------------------|
| DECANO | Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos |
| VOCAL I | Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno |
| VOCAL II | Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco |
| VOCAL III | Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa |
| VOCAL IV | Br. Walter Rafael Véliz Muñoz |
| VOCAL V | Br. Sergio Alejandro Donis Soto |
| SECRETARIO | Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez |

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

| | |
|------------|----------------------------------|
| DECANO | Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos |
| EXAMINADOR | Ing. Otto Raúl de León de Paz |
| EXAMINADOR | Ing. Víctor Manuel Tay Oroxom |
| EXAMINADOR | Ing. César Alfonso García Guerra |
| SECRETARIO | Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez |

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

OPTIMIZACIÓN DE LA RELACIÓN DE BOLAS, PARA LA MOLIENDA DE PIEDRA CALIZA MEDIANTE UN MOLINO DE USO EXPERIMENTAL

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 10 de noviembre de 2011.

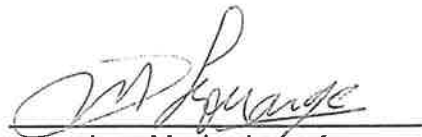

Emmanuel de Jesús Montufar Cárdenas

Guatemala, Septiembre de 2012

Estimado
Ing. Víctor Manuel Monzón
Director de Escuela de Ingeniería Química
Presente.

En este grato día, es un gusto poder saludarle y a la vez desearle éxitos en sus labores cotidianas.

El motivo de la presente es para hacer constar la aprobación del Informe Final de trabajo de graduación denominado "Optimización de la Relación de Bolas, Para la Molienda de Piedra Caliza Mediante un Molino de uso Experimental, del estudiante **Emmanuel de Jesús Montufar Cárdenas**, quien se identifica con número de carné 2005-1625.



Ing. Mario de León
Asesor de Trabajo de Graduación
No. Colegiado: 964

Mario N. de León Manrique
INGENIERO QUÍMICO, COLEGIADO NO. 964



Guatemala, 23 de enero de 2013
Ref. EI.Q.TG-IF.006.2013

Ingeniero
Víctor Manuel Monzón Valdez
DIRECTOR
Escuela Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero Monzón:

Como consta en el Acta TG-039-2010-IF le informo que reunidos los Miembros de la Terna nombrada por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del:

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADUACIÓN

Solicitado por el estudiante universitario: **Emmanuel de Jesús Montufar Cárdenas**

Identificado con número de carné: **2005-16259**

Previo a optar al título de INGENIERO QUÍMICO.

Siguiendo los procedimientos de revisión interna de la Escuela de Ingeniería Química, los Miembros de la Terna han procedido a **APROBARLO** con el siguiente título:

OPTIMIZACIÓN DE LA RELACIÓN DE BOLAS, PARA LA MOLIENDA DE PIEDRA CALIZA MEDIANTE UN MOLINO DE USO EXPERIMENTAL

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por el Ingeniero Químico: **Mario de León**.

Habiendo encontrado el referido informe final del trabajo de graduación **SATISFACTORIO**, se autoriza al estudiante, proceder con los trámites requeridos de acuerdo a las normas y procedimientos establecidos por la Facultad para su autorización e impresión.

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"

Ing. Adolfo Narciso Gramajo Antonio
COORDINADOR DE TERNA
Tribunal de Revisión
Trabajo de Graduación



C.c.: archivo





UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA

Guatemala, 20 de febrero de 2013
Ref. EI.Q.TG.42.2013

Señores
Área de Lingüística
Facultad de Ingeniería
Presente,

Estimados Señores

Como consta en el Acta TG-039-2010-IF le informo que reunidos los Miembros de la Terna nombrada por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del:

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADUACIÓN

Solicitado por el estudiante universitario: **Emmanuel de Jesús Montufar Cárdenas**

Identificado con número de carné: **2005-16259**

Previo a optar al título de INGENIERO QUÍMICO.

Siguiendo los procedimientos de revisión interna de la Escuela de Ingeniería Química, los Miembros de la Terna han procedido a **APROBARLO** con el siguiente título:

OPTIMIZACIÓN DE LA RELACIÓN DE BOLAS, PARA LA MOLIENDA DE PIEDRA CALIZA MEDIANTE UN MOLINO DE USO EXPERIMENTAL

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por el Ingeniero Químico: **Mario de León**.

Habiendo encontrado el referido informe final del trabajo de graduación **SATISFACTORIO**, se autoriza al estudiante, proceder con los trámites requeridos de acuerdo a las normas y procedimientos establecidos por la Facultad para su autorización e impresión.

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"

Ing. Víctor Manuel Monzón Valdez
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química



C.c.: archivo

PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
ACREDITADO POR
Agencia Centroamericana de Acreditación de
Programas de Arquitectura y de Ingeniería
Período 2009 - 2012



ACAAI

Agencia Centroamericana de Acreditación de
Programas de Arquitectura y de Ingeniería



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA

Ref.EIQ.TG.152.2013

El Director de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor y de los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química para revisar el Informe del Trabajo de Graduación del estudiante, **EMMANUEL DE JESÚS MONTUFAR CÁRDENAS** titulado: "**OPTIMIZACIÓN DE LA RELACIÓN DE BOLAS, PARA LA MOLIENDA DE PIEDRA CALIZA MEDIANTE UN MOLINO DE USO EXPERIMENTAL**". Procede a la autorización del mismo, ya que reúne el rigor, la secuencia, la pertinencia y la coherencia metodológica requerida.

Ing. Víctor Manuel Monzón Valdez
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química

Guatemala, mayo 2013

Cc: Archivo
VMMV/dle



El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al trabajo de graduación titulado: **OPTIMIZACIÓN DE LA RELACIÓN DE BOLAS, PARA LA MOLIENDA DE PIEDRA CALIZA MEDIANTE UN MOLINO DE USO EXPERIMENTAL**, presentado por el estudiante universitario: **Emmanuel de Jesús Montufar Cárdenas**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
Decano



Guatemala, mayo de 2013

/cc

ACTO QUE DEDICO A:

| | |
|--|--|
| Dios | Por ser el Rey Supremo, porque me ha permitido la vida. |
| Mis padres | José Manuel Montufar Martínez y Custodia Cárdenas de Montufar. |
| Mis hermanos | Marco Antonio, Glendy Rosalva, Luz Elena y José Leonardo Montufar Cárdenas. |
| Mis abuelos | Leonardo Montufar, Rufina Martínez de Montufar, Rogelio Cárdenas y Catalina Guerra de Cárdenas. Gracias por su cariño. |
| Mi esposa | Eymi Celeste de León de Montufar. |
| Mi familia en general | Por su apoyo incondicional. |
| Facultad de Ingeniería | Por haberme formado profesionalmente. |
| La Universidad de San Carlos de Guatemala | |

AGRADECIMIENTOS A:

| | |
|------------------------------|---|
| Dios | Por ser el Rey Supremo; quien me ha dado el regalo más grande: la vida. |
| Mis padres | Por el apoyo incondicional e inigualable, por todo ese amor, cariño y comprensión en todas las etapas de mi vida. |
| Mis hermanos | Por todo el apoyo que me han brindado. |
| Mis abuelos | Por el amor y cariño brindado. |
| Mi esposa | Por su amor, apoyo y comprensión. |
| Mi familia en general | Por ser una parte muy importante de mi vida. |
| Ing. Mario de León | Por su amistad incondicional y el apoyo brindado en la realización de mi trabajo de graduación. |
| Mis amigos | Que sin hacer mención, saben de mi gratitud, amistad, aprecio y admiración. |

**Universidad de San
Carlos de Guatemala**

En especial a la Facultad de Ingeniería.

ÍNDICE GENERAL

| | |
|--|------|
| ÍNDICE DE ILUSTRACIONES..... | III |
| LISTA DE SÍMBOLOS | VII |
| GLOSARIO | IX |
| RESUMEN..... | XI |
| OBJETIVOS..... | XIII |
| INTRODUCCIÓN | XV |
| | |
| 1. ANTECEDENTES | 1 |
| 2. MARCO TEÓRICO | 3 |
| 2.1. Molienda | 3 |
| 2.2. Molino de bolas..... | 5 |
| 2.2.1. Molienda de molinos tubulares | 7 |
| 2.2.2. Fuerza motriz para el molino de bolas | 9 |
| 2.2.3. Operación | 13 |
| 2.2.3.1. Carga de material y bolas..... | 19 |
| 2.2.3.2. Grado de llenado | 22 |
| 2.2.4. Longitud de los compartimientos | 25 |
| 2.2.5. Longitud del diámetro de un molino | 26 |
| | |
| 3. DISEÑO METODOLÓGICO..... | 29 |
| 3.1. Recursos | 29 |
| 3.1.1. Recurso humano | 29 |
| 3.1.2. Equipos..... | 29 |
| 3.1.3. Materiales de escritorio..... | 31 |
| 3.2. Metodología experimental | 31 |

| | | |
|----------|---|----|
| 3.2.1. | Determinacion de las 5 relaciones de bolas | 31 |
| 3.2.2. | Especificación del tamaño de partícula para la investigación..... | 32 |
| 3.2.2.1. | Proceso de preparación de la materia prima utilizada para la investigación..... | 32 |
| 3.2.3. | Determinación de la carga de bolas óptimas del molino, mediante el efecto cascada..... | 32 |
| 3.2.4. | Determinación de la carga de material óptimo del molino, mediante el efecto cascada..... | 33 |
| 3.2.5. | Molienda del material | 34 |
| 3.2.6. | Procedimiento para la toma de muestras | 34 |
| 3.2.7. | Determinación del porcentaje de retenido del material | 35 |
| 3.2.8. | Análisis estadístico | 35 |
| 3.2.9. | Generacion de datos | 35 |
| 3.2.10. | Manejo de desechos sólidos | 36 |
| 3. | RESULTADOS..... | 37 |
| 4. | INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS | 53 |
| | CONCLUSIONES..... | 57 |
| | RECOMENDACIONES | 59 |
| | BIBLIOGRAFÍA..... | 61 |
| | APÉNDICES..... | 63 |

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

| | | |
|-----|--|----|
| 1. | Molienda en molinos tubulares..... | 8 |
| 2. | Posición de equilibrio cinético | 9 |
| 3. | Factor c, según el grado de llenado y el tamaño de las bolas..... | 12 |
| 4. | Velocidad del molino | 16 |
| 5. | Porcentaje de velocidad crítica en función del diámetro del molino | 18 |
| 6. | Efecto en cascada de la carga de bolas en función del grado de llenado y de la velocidad crítica..... | 23 |
| 7. | Grado de llenado (f) en función de la altura (h) sobre la carga de bolas..... | 25 |
| 8. | Flujograma que presenta la metodología de un proceso de molienda de piedra caliza | 36 |
| 9. | Curva de correlación para el porcentaje de retenido en tamiz No. 200 (75 μm) versus tiempo de operación, para la relación de bolas No. 1 | 38 |
| 10. | Curva de correlación para el porcentaje de retenido en tamiz No. 325 (45 μm) versus tiempo de operación, para la relación de bolas No. 1 | 39 |
| 11. | Curva de correlación para el porcentaje de retenido en tamiz No. 200 (75 μm) versus tiempo de operación, para la relación de bolas No. 2 | 40 |
| 12. | Curva de correlación para el porcentaje de retenido en tamiz No. 325 (45 μm) versus tiempo de operación, para la relación de bolas No. 2 | 41 |

| | | |
|-----|---|----|
| 13. | Curva de correlación para el porcentaje de retenido en tamiz No. 200 (75 μm) versus tiempo de operación, para la relación de bolas No. 3..... | 42 |
| 14. | Curva de correlación para el porcentaje de retenido en tamiz No. 325 (45 μm) versus tiempo de operación, para la relación de bolas No. 3..... | 43 |
| 15. | Curva de correlación para el porcentaje de retenido en tamiz No. 200 (75 μm) versus tiempo de operación, para la relación de bolas No. 4..... | 44 |
| 16. | Curva de correlación para el porcentaje de retenido en tamiz No. 325 (45 μm) versus tiempo de operación, para la relación de bolas No. 4..... | 45 |
| 17. | Curva de correlación para el porcentaje de retenido en tamiz No. 200 (75 μm) versus tiempo de operación, para la relación de bolas No. 5..... | 46 |
| 18. | Curva de correlación para el porcentaje de retenido en tamiz No. 325 (45 μm) versus tiempo de operación, para la relación de bolas No. 5..... | 47 |
| 19. | Comparación de las cinco relaciones de bolas para el porcentaje de retenido en tamiz No. 200 (75 μm) versus tiempo de operación | 48 |
| 20. | Comparación de las cinco relaciones de bolas para el porcentaje de retenido en tamiz No. 325 (45 μm) versus tiempo de operación..... | 49 |
| 21. | Tiempo en el que cada relación de bolas alcanzó lo requerido en el tamiz 200 (75 μm)..... | 50 |
| 22. | Tiempo en el que cada relación de bolas alcanzó lo requerido en el tamiz 325 (45 μm) | 51 |

TABLAS

| | | |
|------|--|----|
| I. | Eficiencia para algunos equipos de molturación | 5 |
| II. | Porcentaje de velocidad crítica en función del grado de llenado y del tipo de placas de blindaje | 19 |
| III. | Peso específico de la masa de la carga de bolas | 22 |
| IV. | Grado de llenado para diferentes tipos de molinos | 24 |
| V. | Longitud de las cámaras molturadoras para diferente tipo de molinos | 26 |
| VI. | Relación de longitud y diámetro λ , para diferentes sistemas de molinos | 28 |
| VII. | Carga de bolas y de material óptimo para el molino | 37 |

LISTA DE SÍMBOLOS

| Símbolo | Significado |
|----------------|--|
| X | Carga óptima de bolas |
| Y | Carga óptima de material |
| K | Constante = 300 para vástagos y 200 para bolas |
| π | Constante pi |
| D_b | Diámetro del vástago o de la bola |
| D_M | Diámetro del molino |
| D_i | Diámetro interno de las placas de blindaje |
| b | Distancia del centro de gravedad de la carga en un plano vertical a través del eje de rotación |
| c | Factor de consumo de energía |
| F_c | Fuerza centrífuga |
| F_g | Fuerza de gravedad |
| N | Fuerza motriz |
| F | Grado de llenado |
| g | Gravedad |
| ρ_s | Gravedad específica del material alimentado |
| E_i | Índice del trabajo del material alimentado |
| L_M | Longitud del molino |
| L_i | Longitud interna del molino o del compartimiento |
| Q | Peso de la carga de bolas |
| γ | Peso específico de la masa de las bolas |
| Z | Relación de tamaño de los cuerpos trituradores |
| \mathcal{L} | Relación longitud-diámetro |

| | |
|-------|--|
| X_p | Tamaño de las partículas de alimentación más gruesas |
| t | Tiempo de operación |
| W | Velocidad angular |
| n | Velocidad del molino |
| n_r | Velocidad, por ciento de la velocidad crítica |
| V_o | Volumen de la carga de bolas |
| V_m | Volumen total del molino |

GLOSARIO

| | |
|--------------------------------|---|
| Alpin | Equipo utilizado para determinar el tamaño de partícula de materiales frágiles o de baja gravedad específica. El equipo cuenta con una aspiradora, la que le genera una succión de aire a través de una boquilla ranurada que gira lentamente, donde permite fluidificar suavemente la muestra en un tamiz de 8 pulgadas de diámetro. |
| Análisis granulométrico | Ensayo que se realiza en el laboratorio, mediante tamices de diferente enumeración, dependiendo de la separación de los cuadros de la maya. |
| Conminución | Acción de fragmentar o disminuir el tamaño de un determinado material. |
| Eficiencia | Es la óptima utilización de los recursos disponibles para la obtención de resultados deseados. |
| Fuerza motriz | Toda causa capaz de producir efectos dinámicos sobre un cuerpo o partícula. |
| Grado de liberación | Es una expresión cuantitativa de la magnitud en que la molienda es capaz de obtener partículas libres. |

| | |
|--------------------------|---|
| Gravedad | Fuerza de atracción que efectúa la masa de la Tierra sobre los cuerpos situados en el campo gravitatorio terrestre. |
| Molienda | Proceso que consiste en triturar una materia hasta reducirla a trozos muy pequeños o a polvo. |
| Molturación | Método mecánico de disgregación en partículas muy finas. |
| Lidita | Roca de alto contenido en sílice. |
| Sobremolienda | Proceso que consiste en triturar un material por debajo del tamaño requerido. |
| Submolienda | Proceso que consiste en triturar un material por arriba del tamaño requerido. |
| Tamiz | Utensilio que se utiliza para separar las partes finas de las gruesas de un material. |
| Velocidad angular | Es la variación de la posición angular sobre el intervalo de tiempo. |
| Velocidad crítica | Es la velocidad a la cual un cuerpo esférico pequeño dentro de un cilindro en movimiento empieza a centrifugar. |

RESUMEN

El presente trabajo de graduación se realizó con el objetivo de optimizar la relación de bolas y tiempo de operación, para la molienda de piedra caliza, así como la determinación de la carga óptima de material y de bolas para el molino de uso experimental.

El control de los parámetros que garanticen la calidad en un producto molido es de gran importancia. Una submolienda del material resultará en un producto que es demasiado grueso, con un grado de liberación demasiado bajo para separación.

Una sobremolienda innecesaria reduce el tamaño de partícula del constituyente mayoritario bajo el tamaño requerido, consumiendo demasiada energía, que es cara en el proceso.

La eficiencia de los molinos de bolas se encuentra entre 1 a 2% y un gasto energético de 12 a 15 kWh por tonelada de materia prima; esto se cumple cuando se cuenta con una carga de material, tamaño de bolas y tiempo adecuado de operación; si no se cumple con estos parámetros, la eficiencia de los molinos tubulares disminuye, incrementando así el gasto energético haciendo más caro el proceso y no rentable, de ahí la importancia de caracterizar u optimizar la molienda en los molinos tubulares (molinos de bolas).

La caracterización del molino, inició realizando pruebas de diferentes porcentajes de carga de bolas y de material, con lo que se determinó la carga óptima de bolas y carga óptima de material.

Conocidas las dos variables anteriores se logró ejecutar las corridas de molienda con diferentes tamaños de bolas a diferentes tiempos.

Para lograr determinar la carga óptima del molino, se utilizó el efecto de cascada. Mediante la realización de varias corridas, enfocado en este principio, se logró alcanzarlo requerido, lo cual se utilizó como base para la molienda de la piedra caliza.

Determinada la capacidad del molino, se realizaron 5 corridas combinando 4 diferentes tamaños de bolas, tomando muestra cada 10 minutos hasta los 60 minutos. Las muestras obtenidas se analizaron granulométricamente en maya 200 (75 μm) y 325 (45 μm), para determinar el porcentaje de retenido en esos tamices.

Dados los resultados de la investigación, mediante análisis estadístico se determinaron gráficos que presentan el comportamiento del porcentaje de retenido en tamiz 200 (75 μm) y tamiz 325 (45 μm) versus tiempo de operación y así lograr determinar el tiempo óptimo y la relación de bolas más adecuada, en la cual se logra un porcentaje del 10% en tamiz 200 (75 μm) y 20% en tamiz 325 (45 μm).

De las cinco relaciones de bolas se logró determinar mediante el análisis estadístico que la relación No. 2 y la relación No. 4 alcanzaron lo requerido para ambos tamices en el menor tiempo, en comparación de las otras tres relaciones de bolas.

El procedimiento experimental se realizó en el Centro Tecnológico, Cementos Progreso, finca La Pedrera zona 6, que se encuentra a una presión atmosférica de 650 mm de Hg.

OBJETIVOS

General

Optimizar la relación de bolas y tiempo de operación, para la molienda de piedra caliza, mediante un molino de uso experimental.

Específicos

1. Determinar la carga óptima de bolas, variando del 30 al 50% del volumen del molino, hasta lograr determinar mediante el método auditivo, caída en cascada.
2. Determinar la carga óptima de material, variando del 70 al 78% de sólidos, el volumen disponible entre bolas, hasta lograr encontrar la caída en cascada.
3. Determinar el tiempo óptimo de operación en el cual se alcance un porcentaje de retenido menor o igual al 10% en tamiz 200 (75 μm) y 20% en tamiz 325 (45 μm).
4. Presentar mediante curvas, el porcentaje de material retenido en tamiz 200 (75 μm) versus tiempo de operación, para cinco diferentes relaciones de bolas.

5. Presentar mediante curvas, el porcentaje de material retenido en tamiz 325 (45 μm) versus tiempo de operación, para cinco diferentes relaciones de bolas.

INTRODUCCIÓN

El proceso de molienda es la última etapa del proceso de conminución; en esta etapa las partículas se reducen de tamaño por una combinación de impacto y abrasión; las partículas de 5 a 250 mm son reducidas en tamaño a 10 a 300 micrones, aproximadamente, dependiendo del tipo de operación que se realice.

La molienda se realiza en molinos que giran alrededor de su eje horizontal y que contienen una carga de cuerpos sueltos de molienda conocidos como "medios de molienda", los cuales están libres para moverse a medida que el molino gira, produciendo la conminución de las partículas alimentadas.

El propósito de la operación de molienda es ejercer un control estrecho en el tamaño del producto; por esta razón frecuentemente se dice que una molienda correcta es la clave de una buena recuperación de la especie útil.

El desgaste por abrasión de los materiales viene a proporcionar información importante acerca de la dureza del material, siendo esto importante para tener un estimado del tiempo que el producto se llevará dentro del molino, para alcanzar la granulometría requerida.

Así, para la molienda de piedra caliza se determinará la fineza del material a diferentes tiempos con diferentes relaciones de bolas, logrando encontrar la relación de bolas óptimas y el tiempo de operación óptimo para alcanzar un porcentaje de retenido del 10% en tamiz 200 (75 μm) y 20% en tamiz 325 (45 μm).

Esta determinación logra hacer más eficiente la molienda, ya que es una de las operaciones más caras y menos eficiente.

Con el presente trabajo se pretende determinar mediante curvas, la optimización de relación de bolas y tiempo de molienda, para la molturación de piedra caliza, mediante un molino de uso experimental.

1. ANTECEDENTES

En el Laboratorio Centro Tecnológico, se realizan investigaciones y análisis de materiales, con el fin de promover nuevos productos de mejor calidad para la construcción. Para muchos materiales, el tamaño de partícula (fineza) es un parámetro importante que facilita el proceso de análisis y garantiza la calidad del producto.

En el laboratorio se encuentra un molino de bolas, el cual en épocas pasadas se utilizó como planta piloto para pruebas de producción, molturando los materiales a la granulometría específica requerida para su análisis, así como la evaluación de las propiedades físicas de cementos hidráulicos mezclados, fabricados a nivel de laboratorio, y la molienda de cal a fineza 325.

Los estudios realizados consumían demasiado tiempo, costo energético y recurso humano, debido al desconocimiento de la capacidad óptima de material dentro del molino, así como la carga óptima de bolas, relación de las mismas y tiempo de molienda.

Actualmente ha surgido la necesidad de realizar investigaciones con el fin de desarrollar nuevos productos de construcción, de los cuales se requiere su utilización para la molturación de diversas materias primas; siendo por ello conveniente especificar las condiciones de molienda para dicho molino.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Molienda

La molienda es la última etapa del proceso de conminución; en dicha etapa las partículas se reducen de tamaño por una combinación de impacto y abrasión, ya sea en seco o como una suspensión en agua pulpa.¹

La molienda se realiza en molinos que giran alrededor de su eje horizontal y que contienen una carga de cuerpos sueltos de molienda, conocidos como "medios de molienda", los cuales están libres para moverse a medida que el molino gira, produciendo la conminución de las partículas alimentadas.

En el proceso de molienda, partículas de 5 a 250 mm son reducidas en tamaño a 10 - 300 micrones, aproximadamente, dependiendo del tipo de operación que se realice (área de desarrollo de alta y nueva tecnología nacional).

El propósito de la operación de molienda es ejercer un control estrecho en el tamaño del producto y, por esta razón, frecuentemente se dice que una molienda correcta es la clave de una buena recuperación de la especie útil.

¹ BUEGG, R. Separating effect and efficiency of cement classifiers. p. 145.

Por supuesto, una submolienda del material resultará en un producto que es demasiado grueso, con un grado de liberación demasiado bajo para separación económica, obteniéndose una recuperación y una razón de enriquecimiento bajo en la etapa de concentración.

La sobremolienda innecesaria reduce el tamaño de partícula del constituyente mayoritario y puede reducir el tamaño de partícula del componente minoritario (generalmente el mineral valioso), bajo el tamaño requerido para la separación más eficiente.

Además, se pierde mucha energía, que es cara, en el proceso. Es importante destacar que la molienda es la operación más intensiva en energía del procesamiento del mineral; únicamente una pequeña parte del requerimiento de energía de un molino es convertida en trabajo de molturación.

La mayor parte del requerimiento de energía se pierde, por ejemplo:

- Pérdidas mecánicas en cojinetes y accionamientos (alrededor de 5 a 10%)
- Calentamiento del material, de las herramientas de molturación, de la maquinaria y del aire de desempolvamiento (alrededor de 80 a 95 %).

Basándose en investigaciones sobre la molturación de partículas únicas, Holderbank (1986), postuló los rangos descritos en la tabla I, para eficiencias de molturación de algunas máquinas de molienda.

Tabla I. **Eficiencias para algunos equipos de molturación**

| EQUIPO DE MOLTURACIÓN | EFICIENCIA |
|--------------------------|------------|
| Trituradora de rodillos | 70 – 100 % |
| Trituradora por impacto | 25 – 40 % |
| Trituradora de martillos | 15 – 25 % |
| Molino de rodillos | 7 – 15 % |
| Molino tubular | 1 – 2 % |

Fuente: DESCASPER, J. Manual de molinos, dimensionamiento de molinos tubulares. p. 122.

De las cifras arriba mencionadas se puede derivar que la eficiencia de un molino de rodillos es superior a la eficiencia de un molino tubular. Una evaluación de las aplicaciones industriales de estos dos tipos de molinos, muestran una superioridad de solo 30 – 50 % del molino de rodillos; lo que indica que, para una materia prima “normal” pueden asumirse los siguientes valores de consumo específico de energía:

- Molino de rodillos 6 – 7 kWh por tonelada de materia prima
- Molino tubular 12 – 15 kWh por tonelada de materia prima

2.2. Molino de bolas

Los molinos de bolas tienen una capa cónica o cilíndrica que gira sobre un eje horizontal, y se rellena parcialmente con un medio de molienda, por ejemplo, bolas de acero. El molino de bolas difiere del de tubos, el cual es de longitud más corta y, por regla general, dicha longitud no es muy distinta a su diámetro.

Los molinos de bolas convencionales utilizan bolas grandes con un material grueso, para producir un producto comparativamente grueso. El molino de tubos es largo en comparación con su diámetro, utiliza bolas de mayor tamaño y da un producto más fino.

El molino de compartimientos, que es una combinación de los dos tipos anteriores, consiste en un cilindro dividido en una o más secciones por medio de divisiones perforadas; la molienda preliminar se realiza en uno de los extremos y la de acabado, en el extremo de descarga. Los molinos de cabillas generan un producto granular más uniforme que otros molinos giratorios, reduciendo al mínimo con ellos, el porcentaje de finos que en ocasiones constituyen una desventaja.

El molino de piedras es un molino de tubo con piedras de pedernal o cerámica como medio de trituración, que pueden estar recubiertos con capas cerámicas u otros materiales no metálicos. El molino de piedra y roca es de tipo autógeno, en el que el medio consiste en grumos de mayor tamaño que tienen un cribado preliminar en una etapa precedente, durante la formación de la capa de flujo de molienda.

El molino de bolas y el de piedras son fáciles de operar y sus aplicaciones son versátiles; se tiene una capa de acero cilíndrica, ya sea de solo este material o recubierta con piedras, que contiene una carga de bolas de acero o piedras que giran horizontalmente en torno a su eje, y la reducción del tamaño o la pulverización se realiza por medio del volteo de las bolas o de las piedras, por el material que queda entre ellas.

Los molinos operan en fase mojada o seca ya sea por lotes, en circuito abierto o en circuito cerrado con clasificadores de tamaño.

2.2.1. Molienda con molinos tubulares

La rotación del molino tubular hace que la carga integrada por elementos molturadores y material alimentado, sea levantada a causa de fuerzas centrífugas y la fricción entre los elementos molturadores y el blindaje. La altura hasta la cual será elevada la carga depende de varios factores:

- Diseño de la placa
- Velocidad circunferencial del molino
- Tamaño, forma peso de los elementos molturadores
- Fricción entre el blindaje y los materiales molturadores
- Fricción dentro de la propia carga del molino

Los elementos efectúan un movimiento tipo catarata, tal como puede apreciarse en la figura 1a; si la velocidad de rotación del molino es suficientemente alta, se elige un porcentaje de carga adecuada; la carga de bolas es relativamente gruesa y se instalan placas levantadoras.²

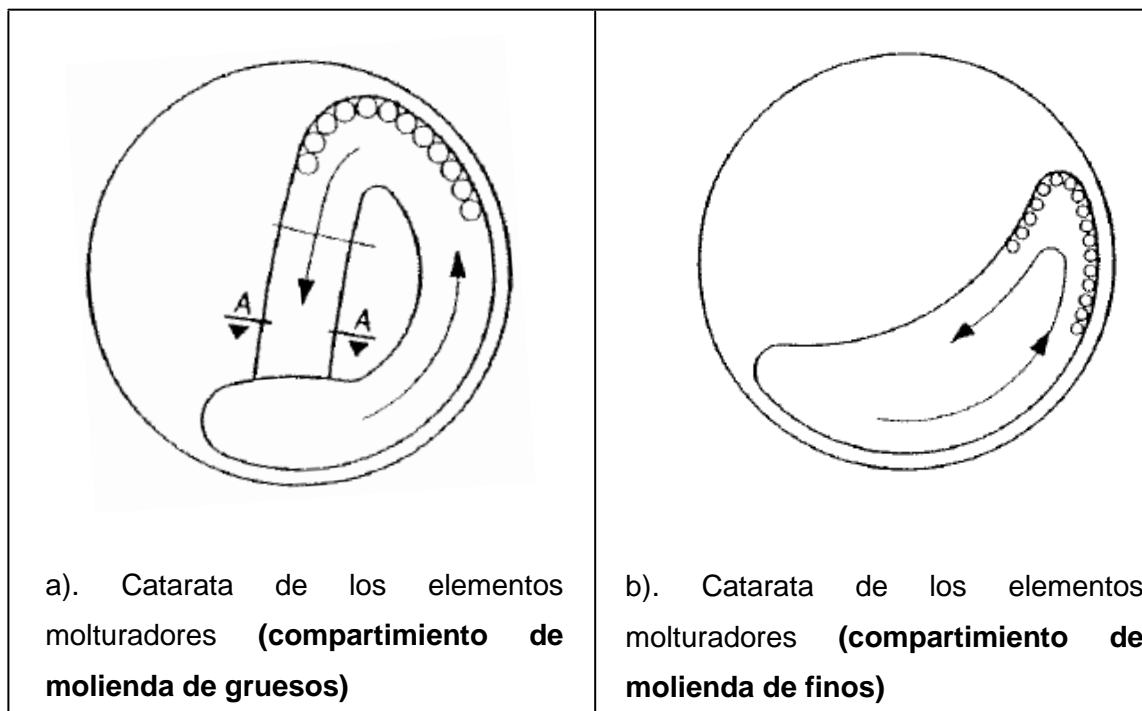
El material alimentado es molido en primer lugar por el impacto en la zona "A" en donde se concentra casi la mayor parte de la energía de los elementos molturadores que caen. Bajo condiciones similares, pero con una carga de bolas más finas y sin placas levantadoras, los elementos molturadores realizarán un movimiento tipo cascada, como puede verse en la figura 1b.

² DESCASPER, J. Manual de molinos, dimensionamiento de molinos tubulares. p. 176.

En el movimiento tipo cascada, los elementos molturadores en la corriente hacia abajo se caracterizan más bien por flujo y rodaduras, que por la caída.

Este movimiento de los elementos molturadores genera fuerza de fricción. Por tal motivo, el movimiento de cascada es poco adecuado para la molienda de material alimentado grueso, siendo por otro lado muy eficaz, para la molienda de finos.

Figura 1. **Molienda en molinos tubulares**

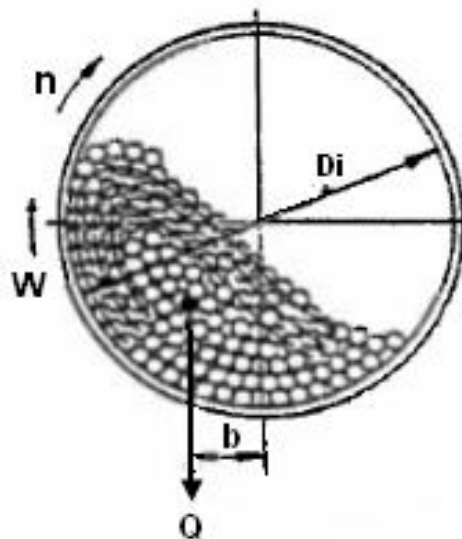


Fuente: DESCASPER, J. Manual de molinos, dimensionamiento de molinos tubulares. p 180.

2.2.2. Fuerza motriz para el molino de bolas

La fuerza motriz total necesaria para un molino de bolas es igual a la suma de la potencia neta necesaria para mantener el centro de gravedad de la carga en una posición de equilibrio cinético e incluye las pérdidas de potencia por fricción y por transmisión³.

Figura 2. Posición de equilibrio cinético



Fuente: DESCASPER, J. Manual de molinos, dimensionamiento de molinos tubulares. p. 190

³ DESCASPER, J. Manual de molinos, dimensionamiento de molinos tubulares. p. 190

Donde:

W = Velocidad angular [s^{-1}]

n = Velocidad del molino [min^{-1}]

D_i = Diámetro interno de las placas de blindaje [m]

b = Distancia del centro de gravedad de la carga en un plano vertical a través del eje de rotación [m]

Q = peso de la carga de bolas [N]

Según Mittag (1966) la distancia b puede ser expresada como una función del diámetro del molino, D_i , tomando en consideración los supuestos siguientes:

- La distancia b tiene siempre la misma relación con el diámetro para molinos, con el mismo grado de llenado, pero con diferentes diámetros.
- La distancia b no depende de la velocidad del molino cuando esta última oscila dentro de límites comunes.

En consecuencia, puede derivarse la fórmula siguiente:

$$b = x \cdot D_f$$

Donde x está principalmente en función del grado de llenado y del tamaño de las bolas.

El torque puede expresarse así:

$$M = x \cdot D_i \cdot Q \quad [Nm]$$

La fuerza motriz N como función de la velocidad angular ω y del torque

M:

$$N = M \cdot \omega \quad [\text{kw}]$$

Siendo la velocidad angular:

$$\omega = \frac{\pi \cdot n}{30} \quad [\text{s}^{-1}]$$

La fuerza motriz N puede ser expresada finalmente como:

$$N = \frac{x \cdot D_i \cdot q \cdot \pi \cdot n}{30} \quad [\text{kw}]$$

Para cálculos prácticos, la fórmula puede simplificarse como sigue:

$$N = c \cdot Q \cdot D_i \cdot n \quad [\text{kw}] \quad (\text{Ec. 1})$$

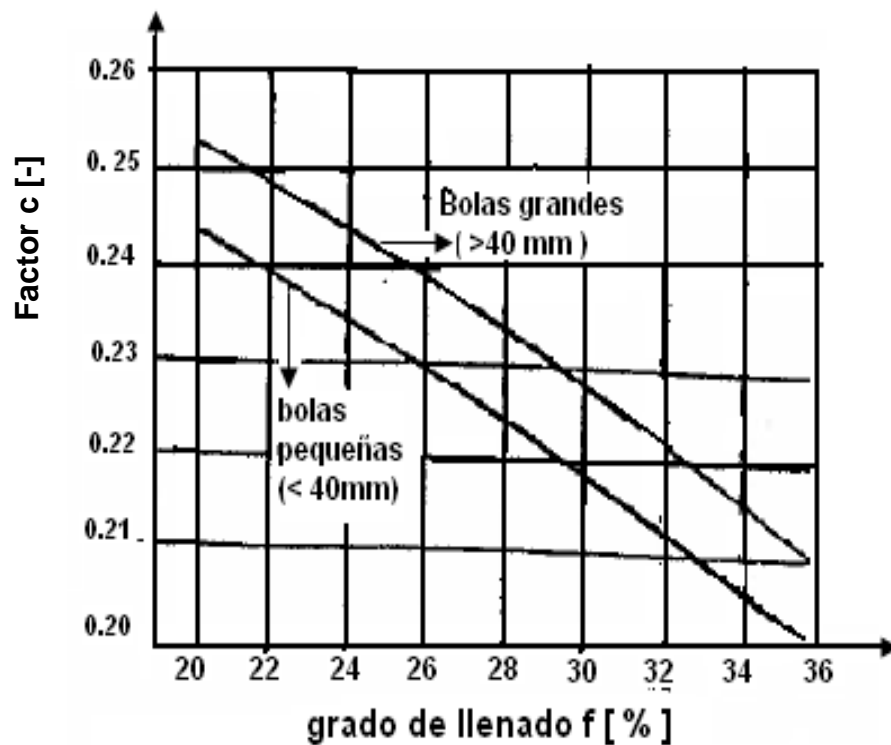
Donde:

| | | |
|-------|--|--|
| N | = Fuerza motriz | [kw] |
| Q | = Carga de bolas | [t] |
| D_i | = Diámetro interno de las placas de blindaje | [m] |
| n | = Velocidad del molino | [min ⁻¹] |
| c | = Factor de consumo de energía | [⁻] $\left(c = \frac{x \cdot \pi}{30}\right)$ |

La ecuación 1 permite el cálculo de la fuerza motriz total para un molino de bolas, incluyendo las pérdidas totales por fricción en los cojinetes.

El factor de consumo de energía C depende del grado de llenado y del tamaño de las bolas. El valor de x , y en consecuencia el valor de c no puede ser calculado teóricamente. Sin embargo, por mediciones de la fuerza motriz total de molinos en servicio y considerando los valores conocidos de Q , D_i y n , puede calcularse el factor de consumo de energía c , mediante la siguiente grafica:

Figura 3. **Factor c , según el grado de llenado y el tamaño de las bolas**



Fuente: DESCASPER, J. Manual de molinos, dimensionamiento de molinos tubulares. p. 210.

2.2.3. Operación

El cilindro se llena parcialmente con bolas de acero inoxidable, de acero o piedras duras. El material a pulverizar debe colocarse de forma tal que cubra todas las bolas, ya que si el material es demasiado, se da un efecto de acolchonamiento, evitando el contacto total entre las bolas; si la cantidad de material es menor, se incrementa el espacio muerto entre las bolas, causando una disminución en la eficiencia. La duración de la molienda puede variar desde horas hasta días, dependiendo de la dureza del material. Sin embargo, el equipo tiene la opción de recolectar el material a ciertos intervalos de tiempo.

Para conseguir una molienda eficaz, no se debe de exceder la velocidad crítica, que se define como la velocidad a la cual una bola pequeña esférica dentro del equipo empieza a centrifugar.⁴

La molienda ocurre principalmente por los mecanismos de impacto. Cuando el cilindro empieza a rotar, las bolas son empujadas por la fuerza centrífuga hacia la pared superior del cilindro. Las bolas que están más arriba viajan más rápido que las que están abajo; la velocidad óptima ocurre cuando las bolas forman un movimiento de cascada.⁵ Durante el movimiento, se produce un mecanismo de fricción entre las bolas, y estas al caer, impactan y fragmentan el material.

⁴ GOUNDA, G. R, Technical aspects of comminution in cement industry. p. 120.

⁵ PERRY, Robert. Manual del ingeniero químico. p. 826.

La velocidad crítica es aquella en que las bolas no forman el movimiento de cascada sino que rotan a la misma velocidad que el cilindro. Entre más grande sea el molino, menor será la velocidad crítica y viceversa. La molienda es más eficiente si las bolas ocupan entre el 30 - 50% del volumen del molino.⁶

La acción de bolas se ha estudiado y analizado desde el punto de vista matemático. Estos desarrollos matemáticos rigurosos se basan en hipótesis especulativas sobre la forma de la maza de bolas.

Los factores principales que determinan el tamaño de las bolas de molienda son el tamaño de partícula del material (finura) que se está pulverizando, y el costo de mantenimiento para la carga de las bolas. Cualquier material alimentado requiere una bola mayor que la alimentación fina; se ha propuesto la relación en $D_b^2 = KX_p$, donde es D_b el diámetro de la bola, X_p es el tamaño de las partículas de alimentación más gruesas, dándose ambas dimensiones en pulgadas; K es la constante de molienda que varía de 55 en el caso de la lidita, a 35 para la dolomita.

La necesidad de una distribución de alimentación, calculada según el tamaño de la bola, es una cuestión que no se ha aclarado aún por completo; sin embargo, se ha propuesto métodos para calcular una carga de bolas racionada.

⁶ DESCASPER, J. Manual de molinos, dimensionamiento de molinos tubulares. 465 p.

El tamaño óptimo recomendado para el vástago y las bolas es:

$$D_b = \sqrt{\frac{X_p E_i}{K n_r}} \sqrt{\frac{\rho_s}{\sqrt{D}}} \quad [\text{pul}] \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde:

D_b = Diámetro del vástago o de la bola [pul]

D = Diámetro del molino [pies]

X_p = Tamaño de las partículas de alimentación más gruesas [pul]

E_i = índice de trabajo del material alimentado

n_r = velocidad, por ciento de la velocidad crítica

ρ_s = Gravedad específica del material alimentado

K = Constante = 300 para vástagos y 200 para bolas

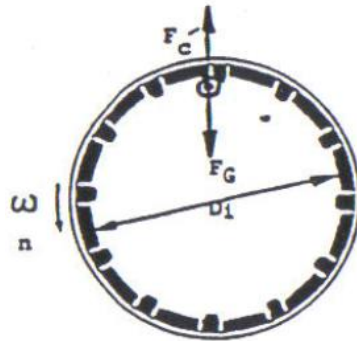
Esta ecuación da resultados razonables para molinos con tamaños de producción, pero no así con los de los laboratorios; la relación recomendada entre los tamaños de bolas (D_b) y varilla (D_v) es $D_b / D_v = 1.23$.

En el molino de varillas o vástago se origina una carga graduada de las mismas debido al desgaste. Por ejemplo, el diámetro del vástago puede variar de 4 a 1 pulg. Por lo común se acostumbra conformar una nueva carga de vástagos en función de la usada, y esto ha dado buenos resultados.

El criterio que se sigue para comparar la acción de las bolas en molinos de varios tamaños se basa en el concepto de la velocidad crítica. La velocidad crítica se obtiene cuando la fuerza centrífuga F_c obliga a la carga exterior de las bolas a girar con las placas de blindaje del molino.

Esta condición impide la caída continua en cascada de las bolas, de lo que depende una molienda eficaz.

Figura 4. **Velocidad del molino**



Fuente: DESCASPER, J. Manual de molinos, dimensionamiento de molinos tubulares. p. 212.

Donde:

Fc = Fuerza centrífuga [N]

Fg = Fuerza de gravedad [N]

Di = Diámetro interno de las placas de blindaje [m]

W_n = Velocidad angular [s^{-1}]

m = Masa [kg]

g = Gravedad [ms^{-1}]

La velocidad crítica se obtiene cuando la fuerza centrífuga Fc es igual a la fuerza de gravedad Fg:

$$Fg - Fc = m \cdot g - m \cdot \frac{D_i}{2} \cdot W_{crit}^2 = 0$$

La velocidad angular crítica W_{crit} será entonces:

$$W_{crit} = \sqrt{\frac{2 \cdot g}{D_i}} = \frac{\pi \cdot n_{crit}}{30}$$

La velocidad crítica del molino n_{crit} , por lo tanto, puede ser calculada en función del diámetro del molino D_i :

$$n_{crit} = \frac{30}{\pi} = \sqrt{\frac{2 \cdot g}{D_i}}$$

$$n_{crit} = \frac{42.3}{\sqrt{D_i}} \quad [\text{min}^{-1}] \quad \text{Ec. 3)}$$

La velocidad de operación del molino se calcula mediante el siguiente modelo:

$$n = k \cdot n_{crit} \quad [\text{min}^{-1}] \quad (\text{Ec. 4})$$

Donde:

n = velocidad de operación del molino

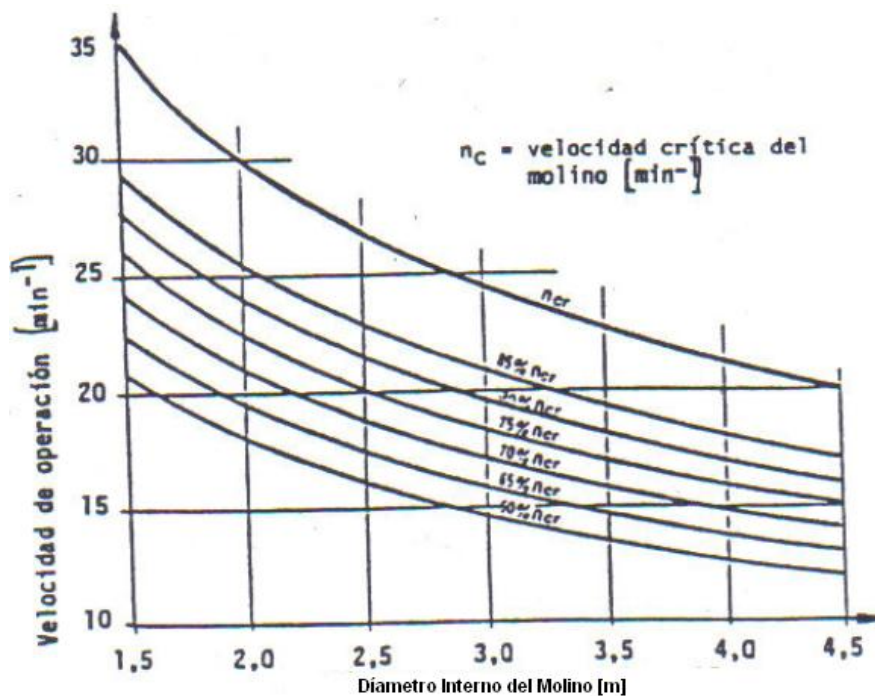
n_{crit} = Velocidad crítica del molino

k = Relación n/n_{crit}

D_i = Diámetro interno del molino

La figura 5 presenta la velocidad crítica basada en las ecuaciones 3 y 4 y permite una determinación rápida de la velocidad crítica para molinos tubulares de diferentes diámetros.

Figura 5. **Porcentaje de velocidad crítica en función del diámetro del molino**



Fuente: DESCASPER, J. Manual de molinos, dimensionamiento de molinos tubulares. p. 213.

Dependiendo de su aplicación, las velocidades normales de operación de molinos tubulares en la industria del cemento fluctúan actualmente entre 70 al 76 %, de la velocidad crítica. Hace algunos años, el parámetro estaba entre 65 y 72%.

La velocidad óptima depende básicamente del grado de llenado, del tamaño de las bolas y del tipo de las placas de blindaje.

En la tabla II se presentan valores prácticos para el porcentaje de la velocidad crítica:

Tabla II. Porcentaje de velocidad crítica en función del grado de llenado y del tipo de placas de blindaje

| Grado de llenado | Tipo de placas de blindaje del molino | % de velocidad crítica k |
|---------------------------------------|--|---------------------------------|
| Bajo (10 a 25 % capacidad del equipo) | Blindaje con elementos elevadores | 70 - 71 % |
| Alto (25 a 40 % capacidad del equipo) | Blindaje liso | 74 - 75 % |

Fuente: DESCASPER, J. Manual de molinos, dimensionamiento de molinos tubulares. p. 225

2.2.3.1. Carga de material y bolas

La carga de bolas de un molino consiste en bolas de molienda de varios tamaños y de diferentes calidades de material.

Para la molienda de gruesos, se suelen utilizar bolas entre 50 y 100 mm, y para la molienda de finos, bolas entre 15 y 50 mm. Las bolas de menor tamaño producen menos vacíos porque estas tienen mayor área de contacto por unidad de peso.

El tamaño máximo y mínimo de las bolas y su composición dependen de varios factores, tales como:

- Tamaño máximo de alimentación del material a ser molido
- Tamaño de partícula del producto
- Diámetro del molino, longitud del molino
- Molturabilidad y estructura mineralógica del material alimentado
- Sistema del molino (circuito abierto/cerrado, número de compartimientos, carga circulante)

En función del proceso de molturación o bien de las etapas de molienda, las bolas deben resistir:

- Fuerzas de impacto de las propias bolas (especialmente en la molienda de gruesos con bolas grandes).
- Desgaste provocado por las fuerzas de fricción entre las bolas y las placas de blindaje.
- Desgaste provocado por materiales abrasivos.
- Corrosión (molienda por vía húmeda).

Para mantener una producción constante y óptima del molino, debe procederse con gran cautela en la selección de tamaños adecuados de bolas y de la calidad correspondiente del material⁷.

⁷ ORDOÑEZ PORTA, Hugo Rafael; LEMKE A. Jorge A. Optimización de la operación de molinos de bolas en planta de cemento. 465 p.

La carga del medio de molienda se expresa en función del porcentaje del volumen del molino, al ocupado por el medio de molienda; por ejemplo, un volumen masivo de bolas que ocupan la mitad del molino, es aproximadamente una carga del 50%. El espacio vacío de un volumen estático de bolas es aproximadamente el 41%. Puesto que el medio se expande conforme gira el molino, el volumen real de funcionamiento se desconoce.

El peso de la carga de bolas puede ser calculado de la siguiente forma:

$$Q = \frac{\pi}{4} \times D_i^2 \times L_i \times f \times \gamma \quad \text{[(Ec.5)}$$

Donde:

Q = Carga de bolas

π =Constante pi

D_i = Diámetro interno de las placas de blindaje

L_i = Longitud interna del molino o del compartimiento

f = Grado de llenado

γ = Peso específico de la masa de las bolas

Los valores del peso específico de masa de las bolas se describen en la tabla III.

Tabla III. **Peso específico de la masa de la carga de bolas**

| Descripción | Tamaño de bolas | Peso específico |
|----------------|-----------------|----------------------|
| Bolas de acero | 100 – 60 mm Ø | 4.4 t/m ³ |
| Bolas de acero | 50 – 30 mm Ø | 4.6 t/m ³ |
| Bolas de acero | 30 – 20 mm Ø | 4.8 t/m ³ |
| Cylpebs | 30 -20 mm Ø | 4.8t/m ³ |

Fuente: DESCASPER, J. Manual de molinos, dimensionamiento de molinos tubulares. p. 250.

2.2.3.2. Grado de llenado

El grado de llenado f está definido como el volumen de la carga de bolas (V_o), expresado como un porcentaje del volumen total del molino (V_M)

$$f = \frac{V_o}{V_M} \times 100 \quad \% \quad \text{(Ec.6)}$$

Donde:

f = Grado de llenado

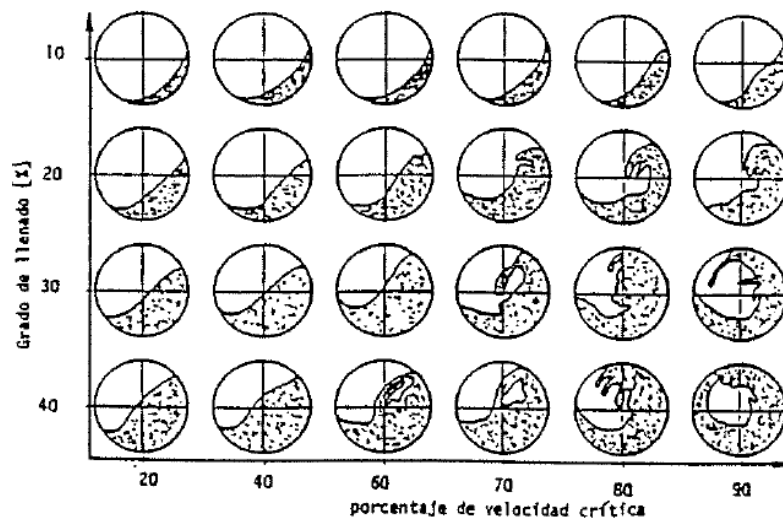
V_o = Volumen de la carga de bolas

V_M = Volumen total del molino

De acuerdo con la ecuación No. 1, la fuerza motriz es proporcional al peso de la carga de bolas. Por otra parte, la distancia del centro de gravedad decrecerá con un incremento del grado de llenado.

La figura 6 muestra el comportamiento de la carga de bolas en función del grado de llenado y el porcentaje de velocidad crítica.

Figura 6. **Efecto en cascada de la carga de bolas en función del grado de llenado y de la velocidad crítica**



Fuente: DESCASPER, J. Manual de molinos, dimensionamiento de molinos tubulares. p. 235.

Se han adoptado los valores descritos en la tabla IV para el grado de llenado de los molinos tubulares.

Tabla IV. **Grado de llenado para diferentes tipos de molinos**

| Tipo de molino | Grado de llenado | | |
|----------------------------|------------------|------------|------------|
| | Cámara I | Cámara. II | Cámara III |
| Molino de una cámara | 27 – 33 | --- | --- |
| Molino de dos cámaras | 27 – 33 | 25 - 30 | --- |
| Molino de tres cámaras | 26 – 32 | 26 - 30 | 23 - 27 |
| Molino de barrido por aire | 26 – 30 | --- | --- |

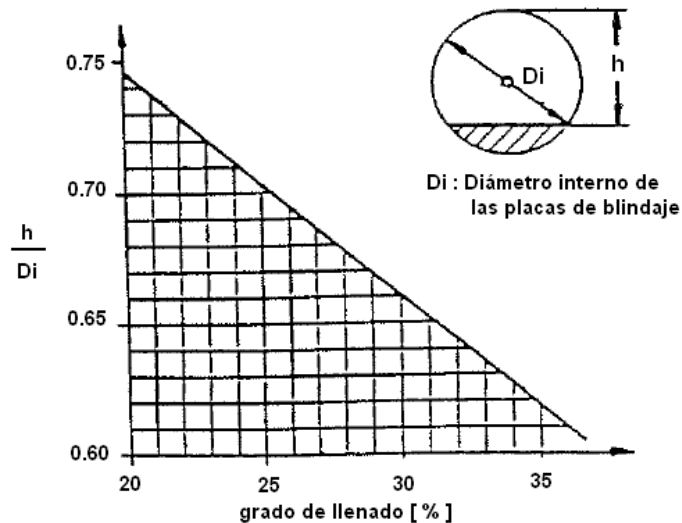
Fuente DESCASPER, J. Manual de molinos, dimensionamiento de molinos tubulares. p. 465

El grado de llenado en un molino tubular puede determinarse prácticamente midiendo la altura libre h sobre la carga de bolas, según indica la figura 7.

La cantidad de material que se tiene en un molino se expresa convenientemente como la relación entre su volumen y el de los espacios vacíos dentro de la carga de bolas. Esta expresión se conoce como razón de material a vacío.

Si el material sólido y su medio de suspensión (agua aire, etc.) llenan exactamente los huecos de bolas, la razón M/V es 1. La carga de los medios de molienda varía de 20 a 50% en la práctica y en general, la razón M/V se aproxima 1.

Figura 7. **Grado de llenado (f) en función de la altura libre (h) sobre la carga de bolas**



Fuente: DESCASPER, J. Manual de molinos, dimensionamiento de molinos tubulares. p. 258.

La carga de material en molinos continuos no se puede ajustar de manera directa, sino que se determina indirectamente según las condiciones de operación. Existe una razón de carga tratada máxima, que depende de la forma del molino, las características de flujo de la alimentación, la velocidad del molino, el tipo de material alimentado y la disposición de descarga.

2.2.4. Longitud de los compartimientos

Respecto de la longitud de las diferentes cámaras, los valores guía presentados en la tabla V, pueden aplicarse a molinos tubulares tanto en el proceso de vía seca como en el proceso de vía húmeda.

Tabla V. **Longitud de las cámaras molturadoras para diferente tipos de molinos**

| Tipo de molino | % de la longitud total | | |
|----------------------------|------------------------|-----------|------------|
| | Cámara I | Cámara II | Cámara III |
| Molino de dos cámaras | 30 – 35 | 70 - 65 | --- |
| Molino de tres cámaras | 20 | 30 | 50 |
| Molino de descarga central | 50 | 50 | --- |

Fuente: DESCASPER, J. Manual de molinos, dimensionamiento de molinos tubulares. p. 268.

Algunos fabricantes prefieren considerar, para molinos de tres cámaras, aproximadamente, 30% de la longitud total para el primer compartimiento y únicamente 20% de la longitud total para el segundo compartimiento.

2.2.5. Longitud del diámetro de un molino

La relación de longitud a diámetro de un molino tubular depende de varios factores. Los más importantes son:

- Producción por hora
- Dureza del material (molturabilidad)
- Tamaño de partícula del producto final
- Molienda en circuito abierto o cerrado
- Tamaño de materia prima con que se alimenta al molino
- Sistema de molienda

Por una parte, la producción por hora dependerá ciertamente del corte transversal y por consiguiente, del diámetro del molino. Por otra parte, la finura del material en la salida del molino depende principalmente del tiempo de retención del material en el molino.

El factor más determinante para el tiempo de retención es la longitud del molino. Por lo tanto, la relación de longitud a diámetro de un molino, constituye un factor importante para el diseño óptimo del mismo.

Los valores dados a continuación pueden considerarse como guía para la relación de longitud a diámetro λ de un molino:

$$\lambda = \frac{L_M}{D_M} \quad (\text{Ec. 7})$$

Donde:

λ = Relación longitud-diámetro

L_M = Longitud del molino

D_M = Diámetro del molino

Tabla VI. **Relación de longitud y diámetro λ , para diferentes sistemas de molinos**

| Sistema de molino | | Relación λ | |
|--------------------|--|-------------------------|---|
| Molinos de cemento | Molino de circuito abierto | 6.0 | \varnothing 2.0 – 2.4 |
| | | 5.0 | \varnothing 2.6 – 3.0 |
| 4.0 | | \varnothing 3.0 – 4.0 | |
| 3.0 – 3.5 | | \varnothing > – 4.0 | |
| | Molino de circuito cerrado | 3.0 – 3.5 | Molinos grandes: $\lambda = 3.0 – 3.2$ Una relación λ baja de una carga circulante más alta |
| Molino Pasta | Relación λ similar a la de molinos de cemento Longitud máxima 12 – 14 m | | |
| Molinos de crudo | Molino de descarga central | 2.1 – 2.7 | Los valores λ bajos se usan para molinos de crudo grande |
| | Molino de dos cámaras | 2.0 – 2.5 | |
| | Molino de una cámara | 1.7 – 2.2 | |
| | Molino de barrido por aire | 1.5 – 2.0 | |

Fuente: DESCASPER, J. Manual de molinos, dimensionamiento de molinos tubulares. p. 320.

3. DISEÑO METODOLÓGICO

3.1. Recursos

La parte experimental de la investigación se llevó a cabo en el Centro Tecnológico de Cementos Progreso, localizado en la 15 av. 18-01, finca La Pedrera, zona 6. La materia prima fue proporcionada por el centro.

3.1.1. Recurso humano

Investigador: Emmanuel De Jesús Montufar Cárdenas

Auxiliar: Ángel Estuardo Pernillo

Asesor: Ing. químico. Mario de León Manrique

3.1.2. Equipo

- Molino de bolas
Marca: Westinghouse
Modelo: HW-32
Voltaje: 220V
Potencia: 75 hp
Serial: 20942
Cap. Max: 0.3m³
RPM: 65

- Triturador de quijadas

Marca: BICO
 Modelo: 242-53
 Voltaje: 220V
 Potencia: 2 hp
- Tamizadora

Marca: GILSON COMPANY
 Modelo: TM – 3
 Serial: 2928
 Voltaje: 110 V
 Potencia: 450W
- Alpin

Marca: MICRON
 Modelo: AJ-SEVE
 Voltaje: 110v
- Balanza analítica

Marca: Ohaus
 Modelo: AP210S
 Cap. Max.: 210 g
 Cap. Min.: nd
 Voltaje: 110/120 VAC
 Amperaje: 160mA
- Báscula

Marca: Ohaus
 Modelo: LC123-34
 Cap. Max.: 250 Kg
 Cap. Min.: nd
 Voltaje: 110 V

- Termómetro
Marca: HUMBOLDT
Modelo: H3599
Tem. Max.: 500°C
Tem. Min.: -60°C

3.1.3. Materiales de escritorio

- Papelería y útiles de oficina
- Computadora
- Impresora
- Software: Microsoft Word, Microsoft Excel
- Dispositivo de almacenamiento USB
- Fotocopias

3.2. Metodología experimental

A continuación se describe el proceso metodológico para la obtención de los resultados.

3.2.1. Determinación de las 5 relaciones de bolas

- Selección de 5 relaciones de bolas de forma experimental, combinando diferentes porcentajes de bolas de 15 mm de diámetro, 19 mm de diámetro, 25 mm de diámetro y 32 mm de diámetro.

3.2.2. Especificación del tamaño de partícula para la investigación

La materia prima ingresa al laboratorio con un tamaño de partícula de $\frac{3}{4}$ de pulgada y para el diseño de investigación se requiere un tamaño de partícula que pase el tamiz de $\frac{3}{8}$ de pulgada y sea retenido en tamiz No. 16 (1.18 mm), debido al tamaño de bolas disponibles.

3.2.2.1. Proceso de preparación de la materia prima, utilizada para la investigación

- El material de alimentación utilizado se preparó en un triturador de quijadas.
- El material triturado se clasifica por tamaño de partícula, utilizando un tamizador eléctrico, fondo y dos mallas, una malla de $\frac{3}{8}$, de pulgada, donde se cargó el material y una malla No. 16 (1.18 mm), donde se retuvo el materia útil para el ensayo.

3.2.3. Determinación de la carga de bolas óptimas del molino, mediante el efecto cascada

- Identificación del volumen total del molino;
- Determinación del 30%, 35%, 40%, 45% y 50% del volumen total del molino. Volúmenes seleccionados experimentalmente, basados en los límites descritos anteriormente.

- Utilizando un recipiente de volumen definido, se completó con bolas al 30% del volumen total del molino; el total de bolas utilizadas se distribuyó de forma equitativa en bolas de 15 mm de diámetro, 19 mm de diámetro, 25 mm de diámetro y 32 mm de diámetro;
- Se activó el molino y se escuchó el efecto de cascada (caída libre de las bolas dentro del molino) en un lapso de 30 segundos;
- Se efectuó lo indicado en los dos incisos anteriores, para los porcentajes de 35%, 40%, 45% y 50%, calificando como muy bueno, bueno, malo y muy malo, el sonido de efecto de cascada.

3.2.4. Determinación de la carga de material óptimo del molino, mediante el efecto cascada

- Utilizando un recipiente de volumen definido, se cargó de bolas y se le depositó material de ensayo, moviéndolo hasta lograr el llenado de todos los vacíos disponibles entre bolas;
- El recipiente lleno se descargó en una malla de 3/8 de pulgada, donde permitió el paso de todo el material; este se midió en un recipiente de volumen definido, donde se determinó el volumen disponible entre bolas;
- Determinado el volumen total de material disponible entre bolas, se encontró el 70%, 72%, 74%, 76% y 78%, del volumen total; volúmenes seleccionados experimentalmente;
- Se cargó el molino con la cantidad de bolas óptimas y porcentaje de material definido;

- Se activó el molino y se escuchó el efecto de cascada (caída libre de los cuerpos trituradores y material dentro del molino) en un lapso de 30 segundos;
- Se efectuó lo señalado en los 2 incisos anteriores, para los porcentajes de 72%, 74%, 76% y 78%, calificando como muy bueno, bueno, malo y muy malo, el sonido de efecto de cascada.

3.2.5. Molienda del material

Determinada la carga óptima de bolas y de material, se inició con la fase de molienda:

- Carga de la primera relación de bolas y la cantidad de material determinado;
- Se inicia la molienda, en el proceso de la misma; se detuvo el molino cada 10 minutos, para toma de muestra, hasta completar los 60 minutos. El tiempo fue tomado de manera experimental;
- Se efectuó lo señalado en los dos incisos anteriores, para la relación de bolas No. 2, No. 3, No. 4 y No. 5.

3.2.6. Procedimiento para la toma de muestras

- A cada 10 minutos se detuvo el molino, se abrió, y con un cucharón se tomó una muestra de varios puntos, hasta completar aproximadamente 500g;

- La muestra tomada se homogeneizó y trasladó al laboratorio, para su análisis en tamiz 200 (75 μm) y 325 (45 μm);
- Analizada la muestra se regresó al molino, para continuar con el proceso de molienda;
- Lo indicado en los incisos anteriores se repitió para cada relación de bolas, durante los 60 minutos de operación.

3.2.7. Determinación del porcentaje de retenido del material

El porcentaje de retenido para las muestra tomadas cada 10 minutos, se determinó aplicando el método experimental del Alpin, según método de ensayo validado por el laboratorio (ver apéndice 7).

3.2.8. Análisis estadístico

Los resultados obtenidos se ordenaron en tablas y se analizaron mediante gráficos, para poder determinar la relación de bolas y el tiempo en el cual se alcanzó el 10% de retenido en tamiz 200 (75 μm) y 20% de retenido en tamiz 325(45 μm), con base en lo especificado en el protocolo de trabajo de graduación.

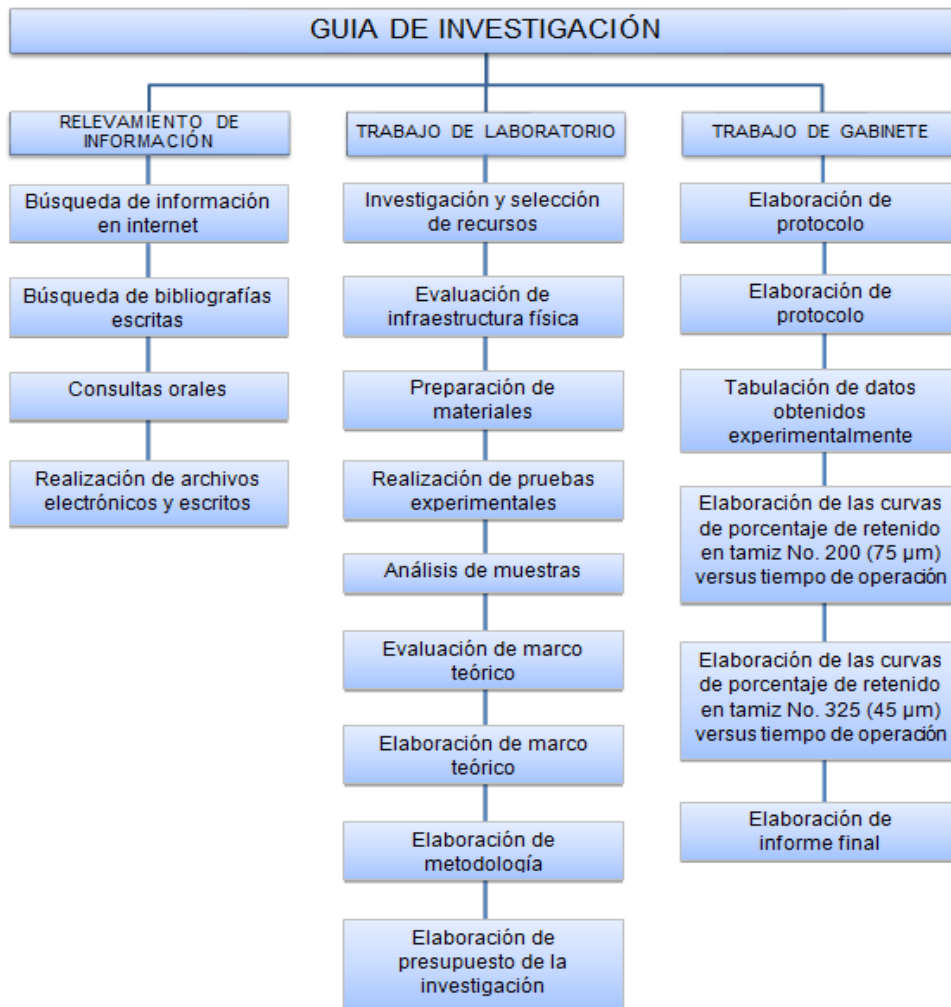
3.2.9. Generación de datos

Los datos obtenidos experimentalmente, que representarán el porcentaje de retenido de 10% en tamiz 200 (75 μm) y 20% en tamiz 325(45 μm), se ordenaron en tablas y luego se representaron en gráficos, según lo especificado en el protocolo de trabajo de graduación.

3.2.10. Manejo de desechos sólidos

Los sólidos remanentes se enviaron al área de producción, para su utilización en cualquier otra aplicación.

Figura 8. **Flujograma que presenta la metodología de un proceso de molienda de piedra caliza**



Fuente: elaboración propia.

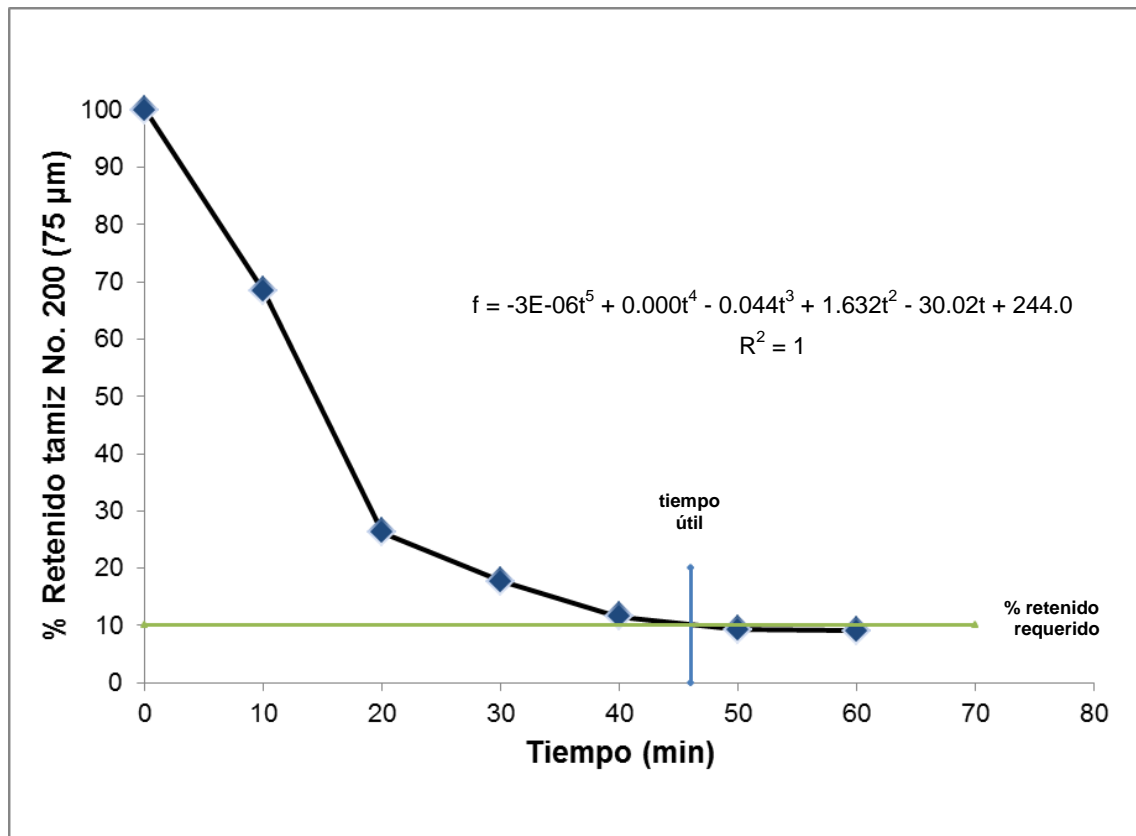
4. RESULTADOS

Tabla VII. **Carga de bolas y de material óptimo para el molino**

| Carga de bolas (Kg) | Carga de material (Kg) |
|--|--|
| 450 | 50 |
| Equivalente a la capacidad del molino | Equivalente al volumen disponible entre bolas |
| 30% | 70% |

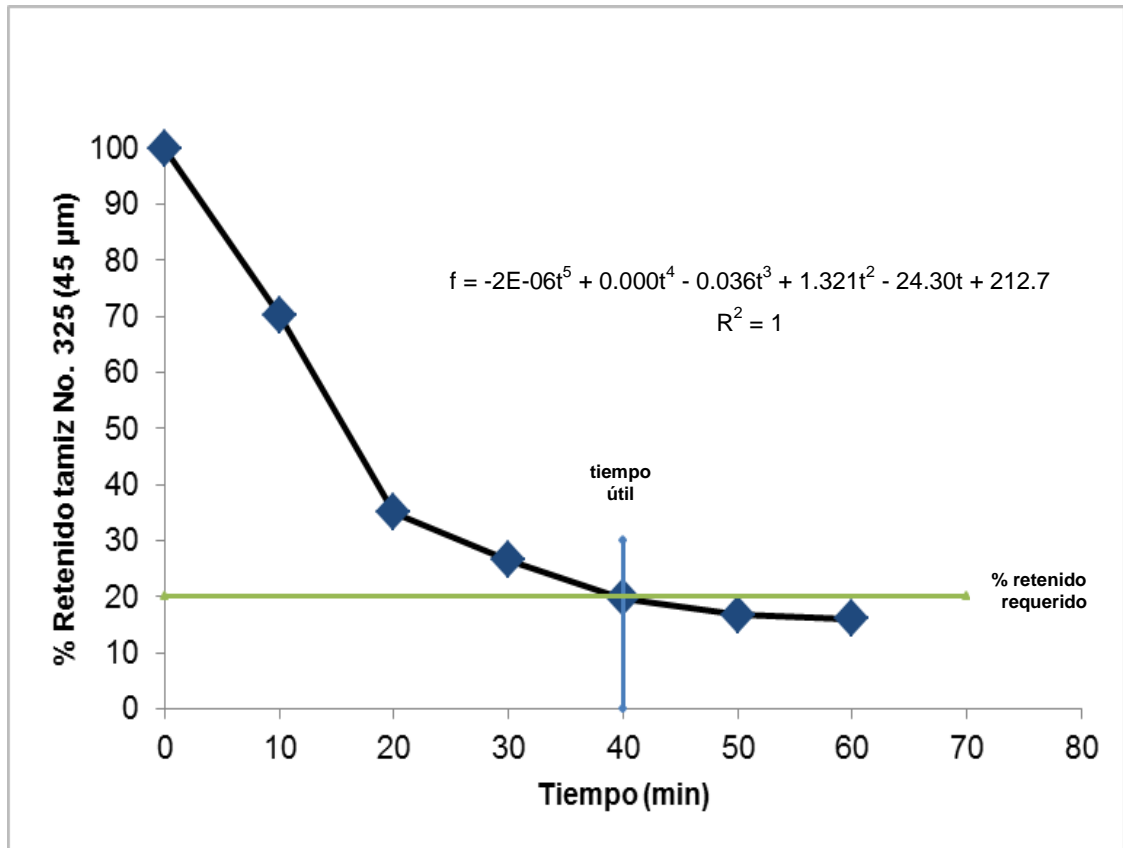
Fuente: elaboración propia, a partir de los datos calculados.

Figura 9. **Curva de correlación para el porcentaje de retenido en tamiz No. 200 (75 μm) versus tiempo de operación, para la relación de bolas No. 1**



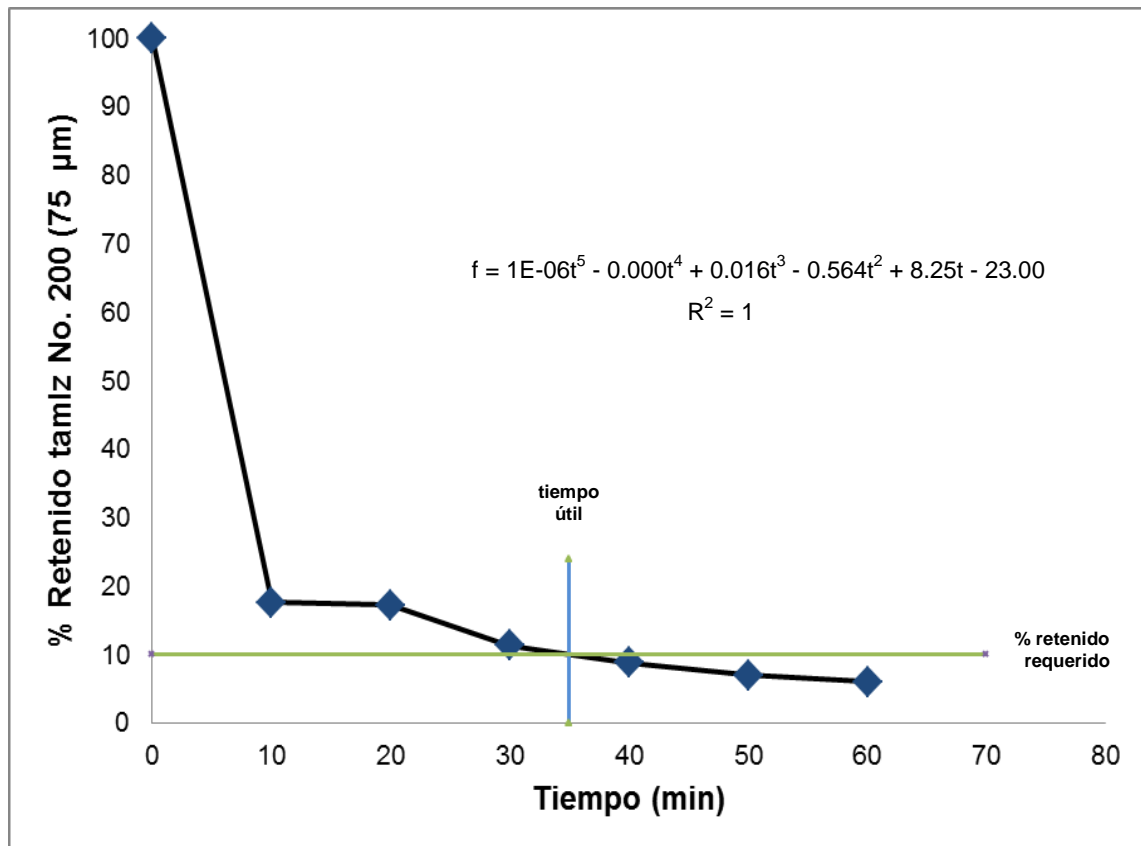
Fuente: elaboración propia, a partir de los datos calculados.

Figura 10. **Curva de correlación para el porcentaje de retenido en tamiz No. 325 (45 µm) versus tiempo de operación, para la relación de bolas No. 1**



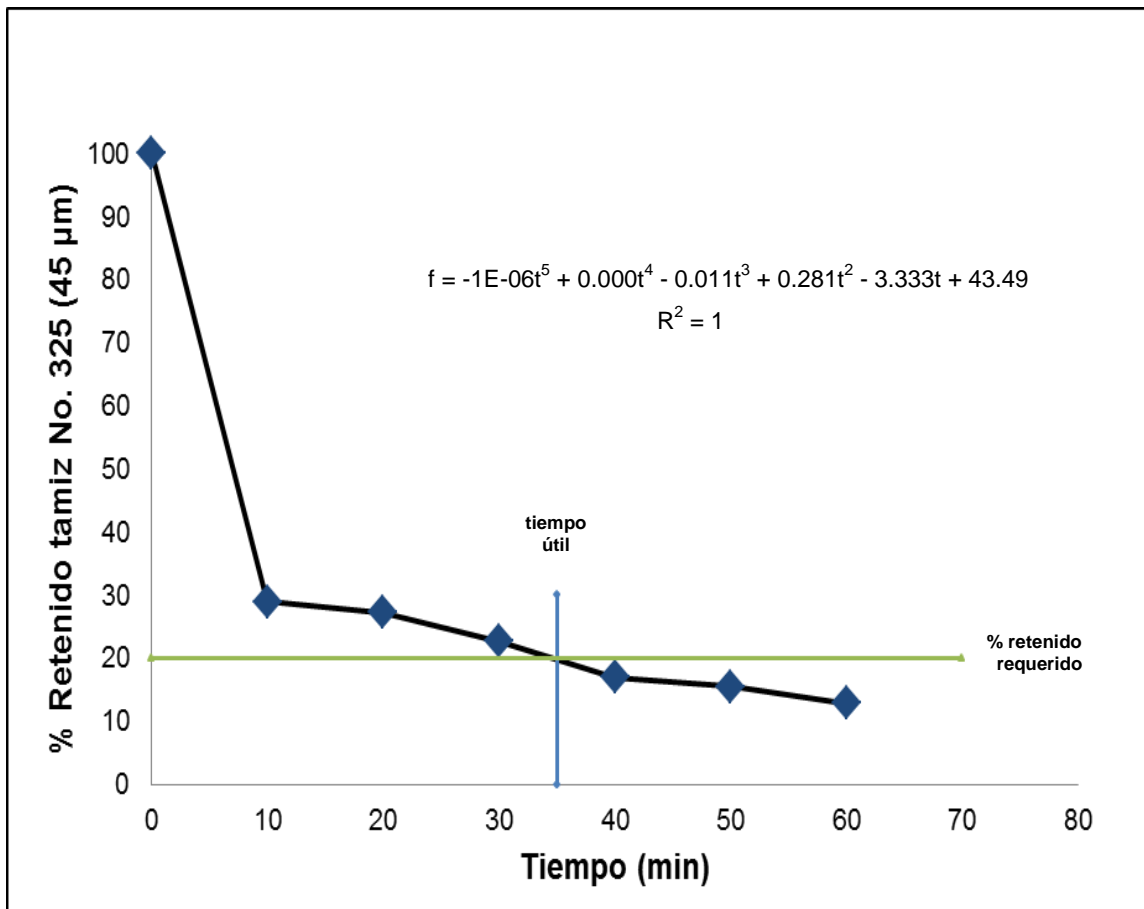
Fuente: elaboración propia, a partir de los datos calculados.

Figura 11. Curva de correlación para el porcentaje de retenido en tamiz # 200 (75 μm) versus tiempo de operación, para la relación de bolas No. 2



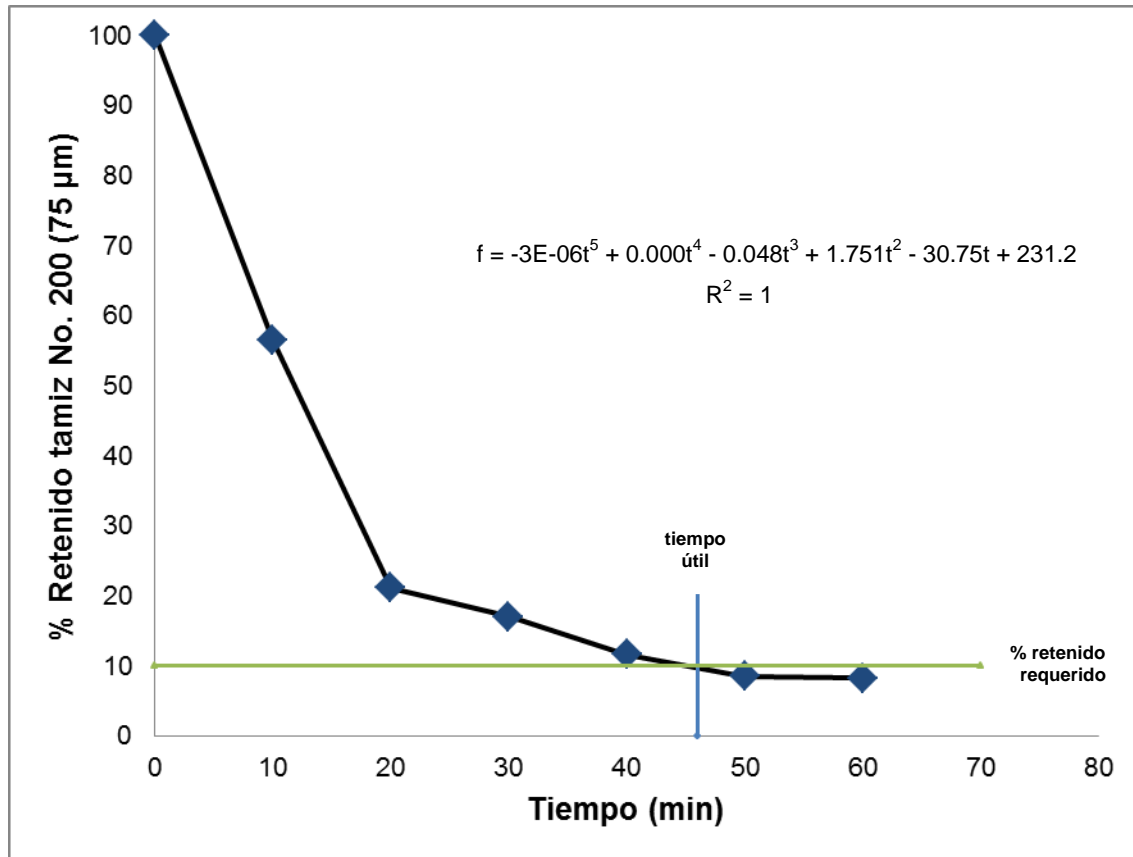
Fuente: elaboración propia, a partir de los datos calculados.

Figura 12. **Curva de correlación para el porcentaje de retenido en tamiz # 325 (45 μm) versus tiempo de operación, para la relación de bolas No. 2**



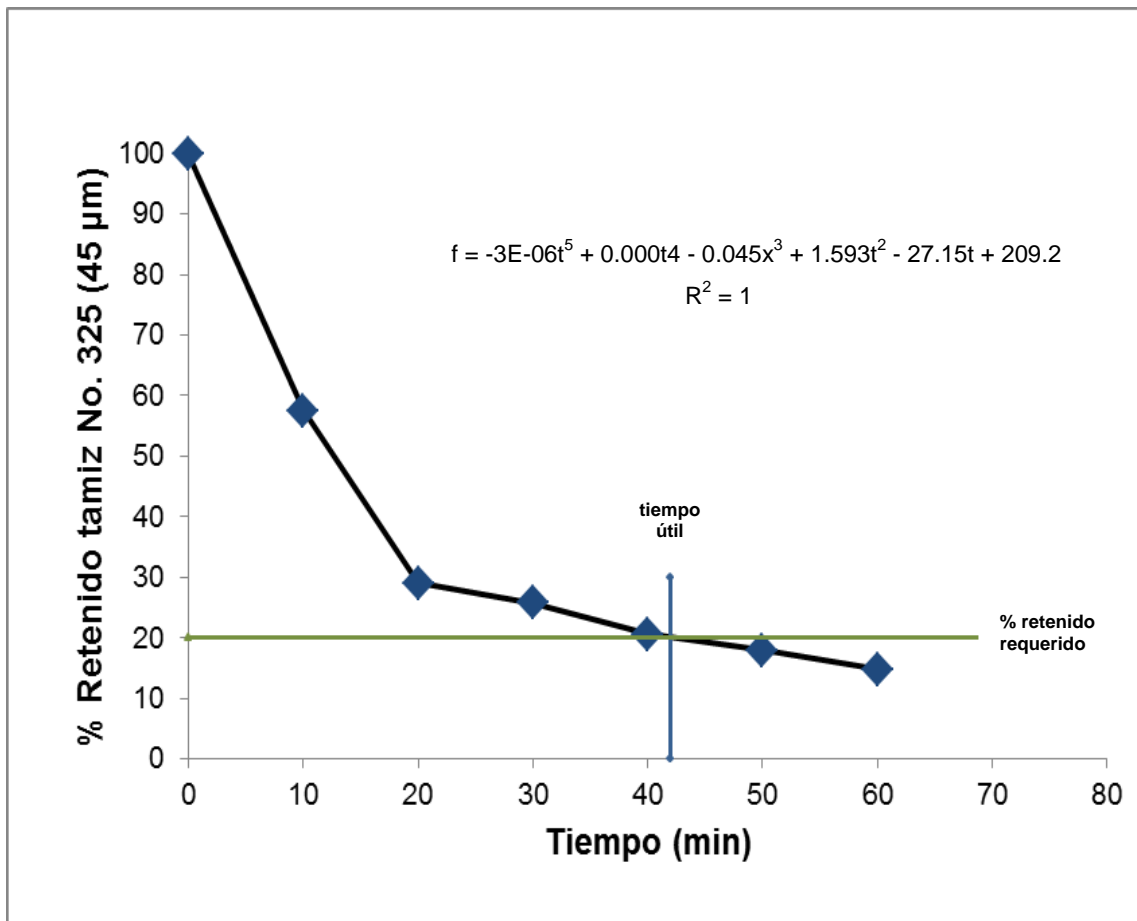
Fuente: elaboración propia, a partir de los datos calculados.

Figura 13. **Curva de correlación para el porcentaje de retenido en tamiz No. 200 (75 µm) versus tiempo de operación, para la relación de bolas No. 3**



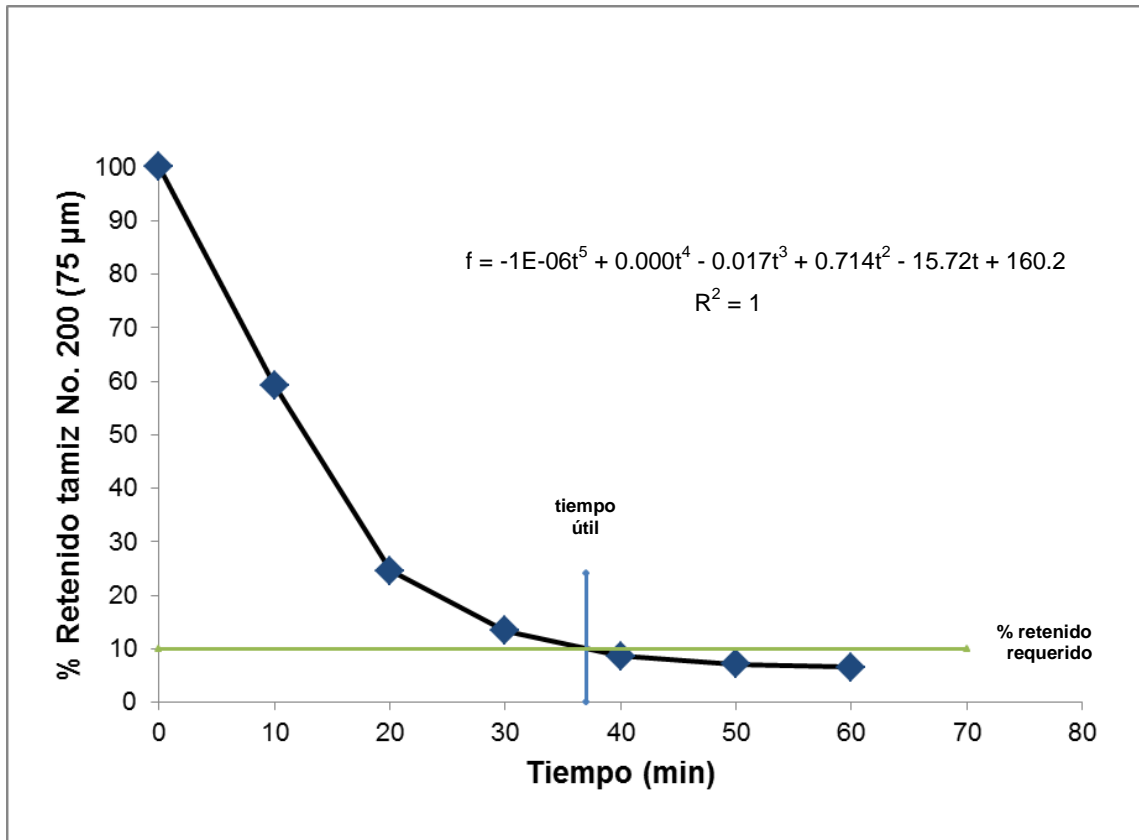
Fuente: elaboración propia, a partir de los datos calculados.

Figura 14. **Curva de correlación para el porcentaje de retenido en tamiz No. 325 (45 µm) versus tiempo de operación, para la relación de bolas No. 3**



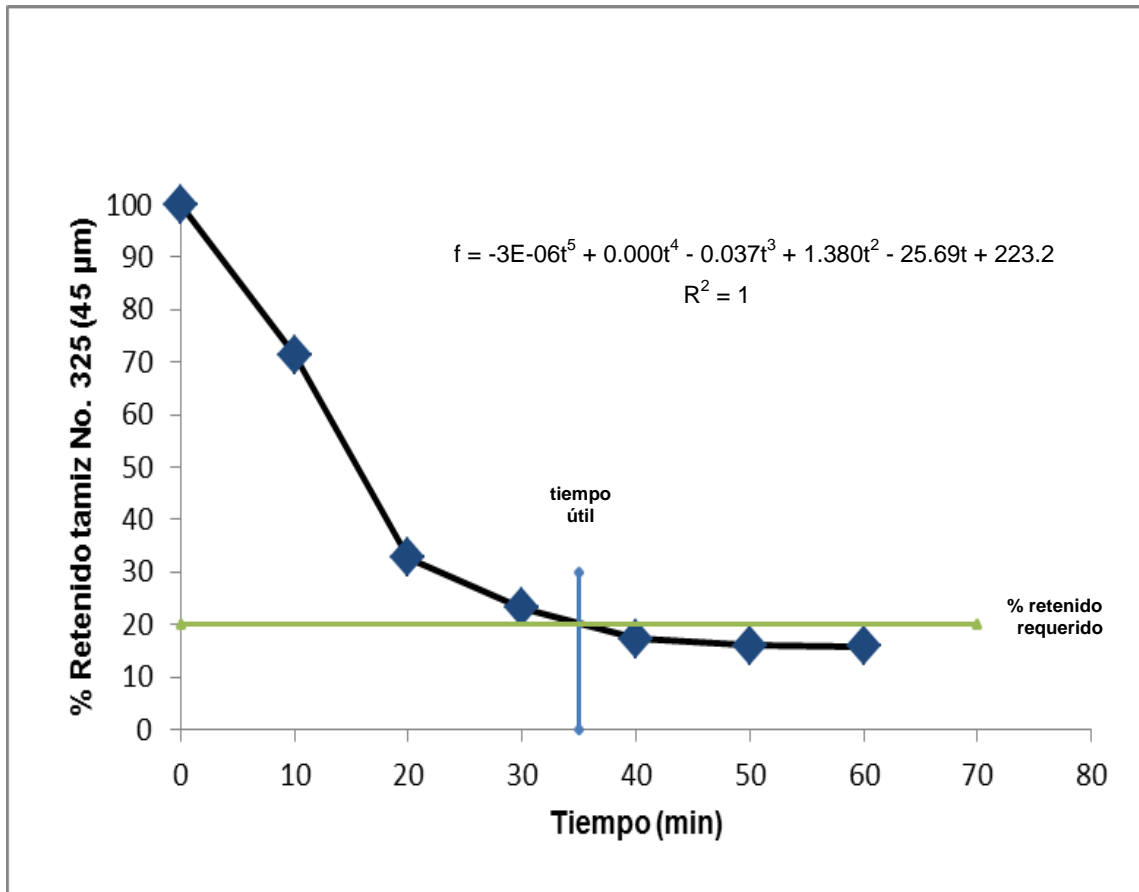
Fuente: elaboración propia, a partir de los datos calculados.

Figura 15. **Curva de correlación para el porcentaje de retenido en tamiz No. 200 (75 μm) versus tiempo de operación, para la relación de bolas No. 4**



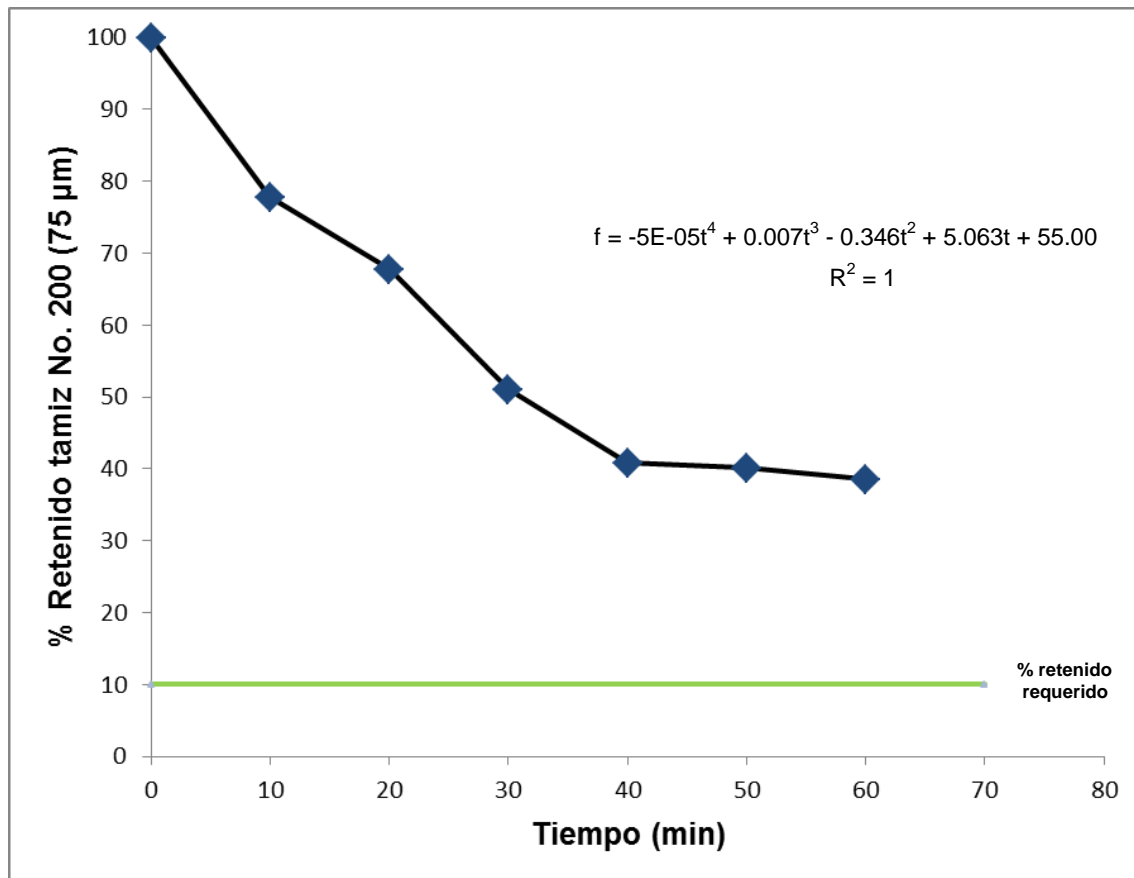
Fuente: elaboración propia, a partir de los datos calculados.

Figura 16. **Curva de correlación para el porcentaje de retenido en tamiz No. 325 (45 µm) versus tiempo de operación, para la relación de bolas No. 4**



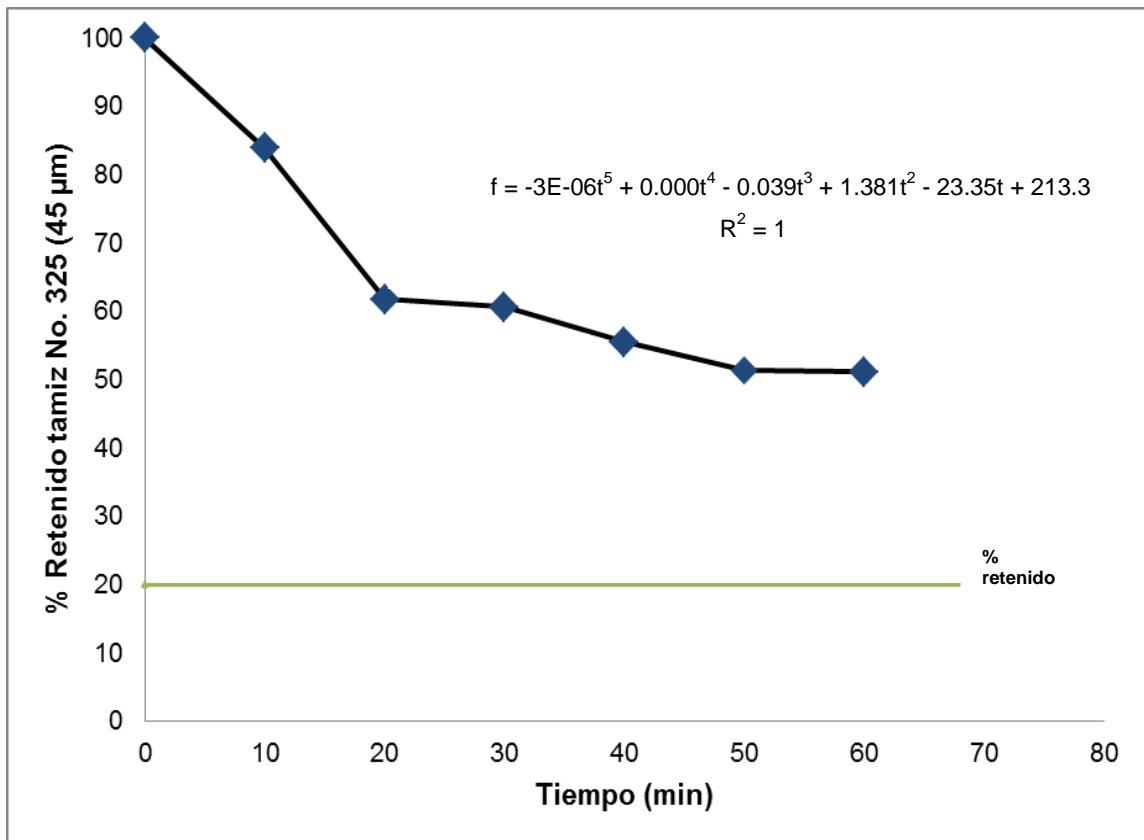
Fuente: elaboración propia, a partir de los datos calculados.

Figura 17. Curva de correlación para el porcentaje de retenido en tamiz No. 200 (75 μm) versus tiempo de operación, para la relación de bolas No. 5



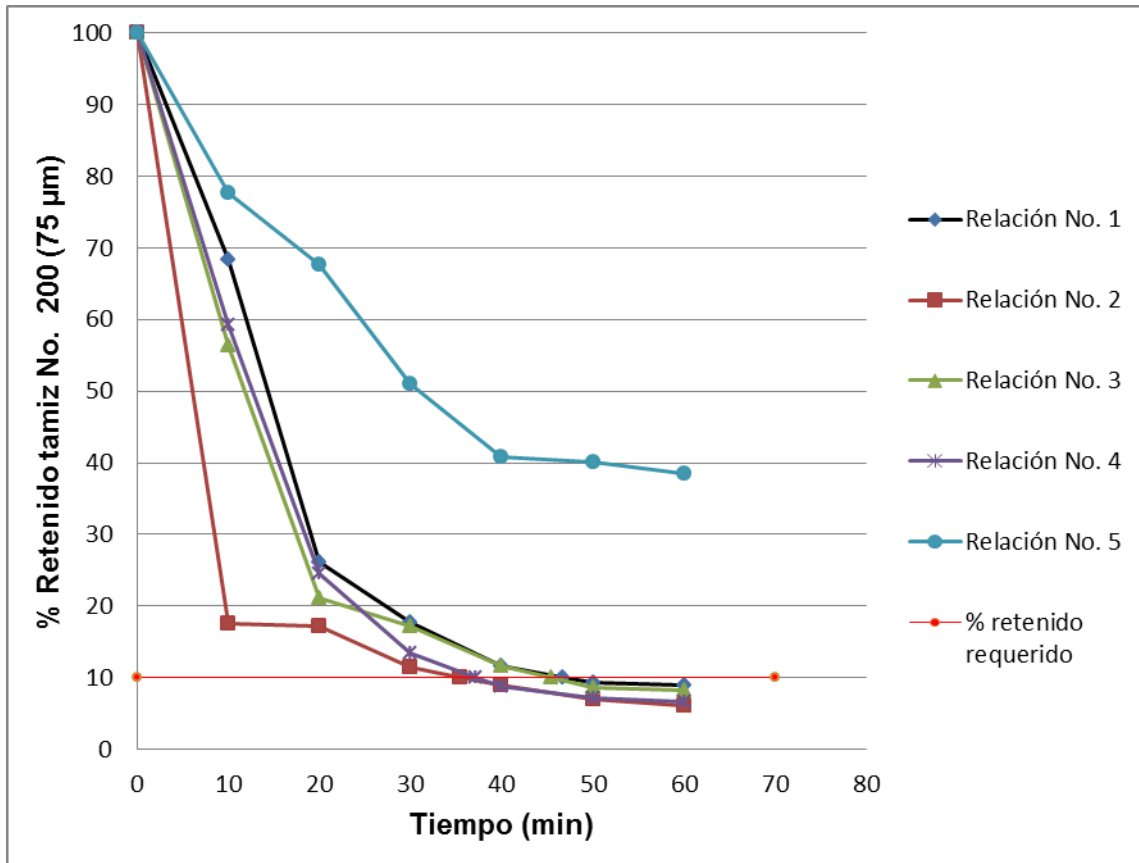
Fuente: elaboración propia, a partir de los datos calculados.

Figura 18. **Curva de correlación para el porcentaje de retenido en tamiz No. 325 (45 µm) versus tiempo de operación, para la relación de bolas No. 5**



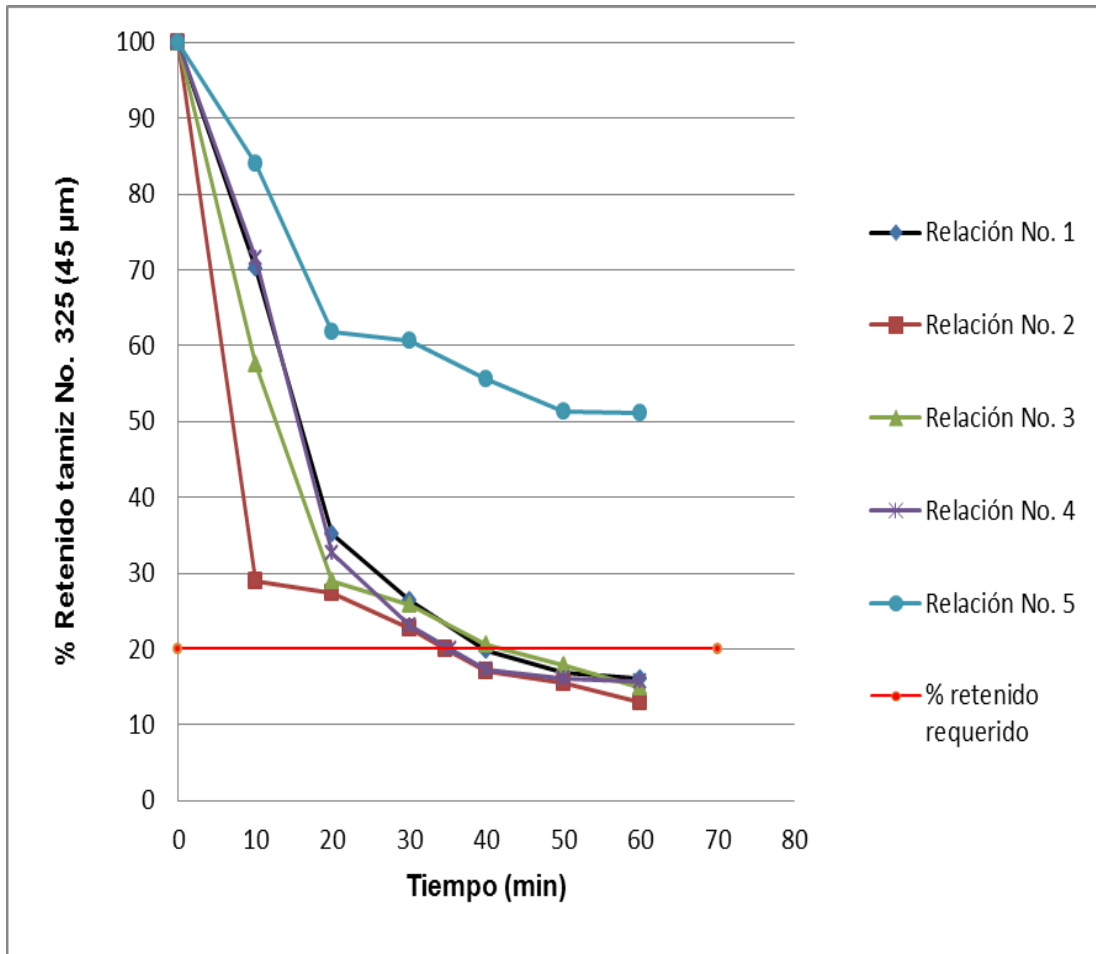
Fuente: elaboración propia, a partir de los datos calculados.

Figura 19. Comparación de las cinco relaciones de bolas para el porcentaje de retenido en tamiz No. 200 (75 μm) versus tiempo de operación



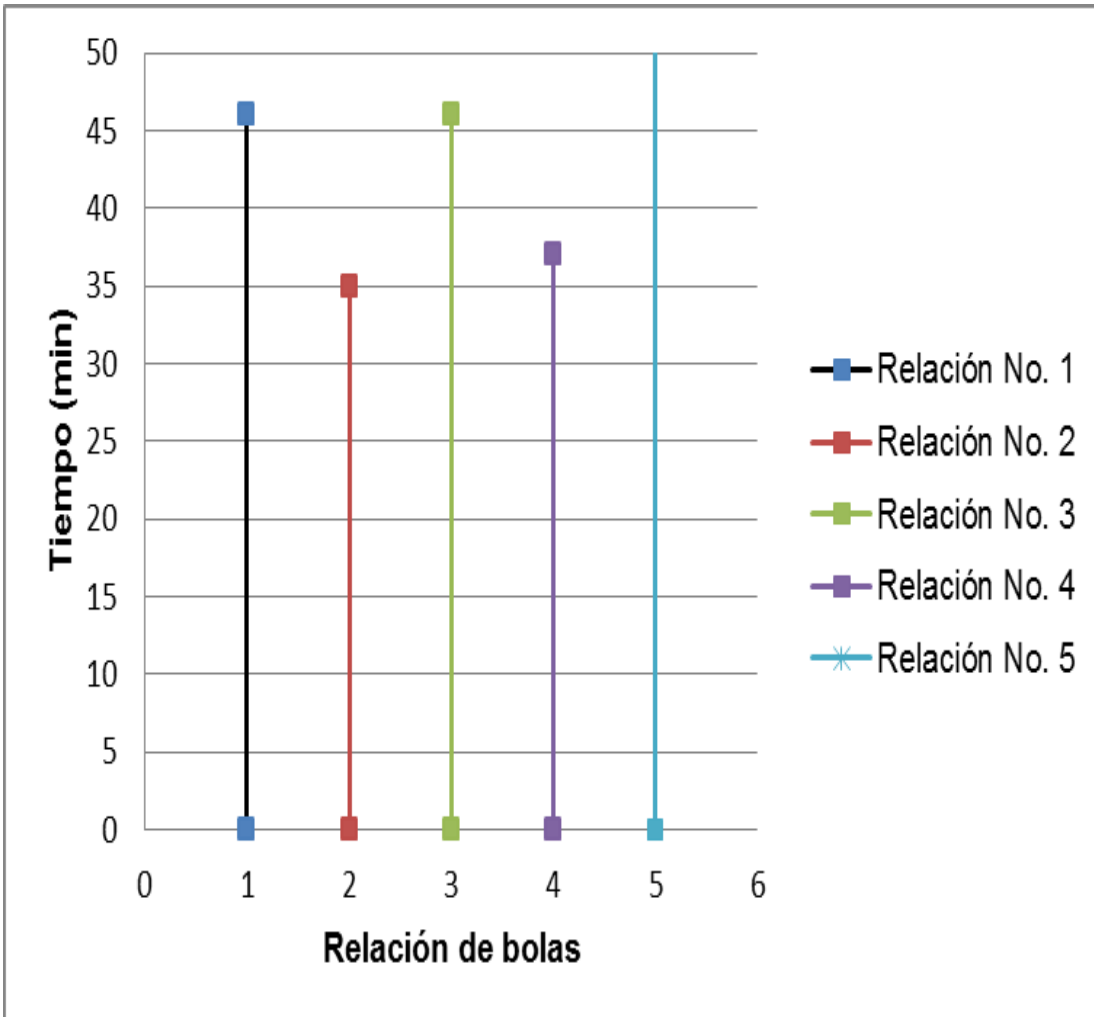
Fuente: elaboración propia, a partir de los datos calculados.

Figura 20. **Comparación de las cinco relaciones de bolas para el porcentaje de retenido en tamiz No. 325 (45 μm) versus tiempo de operación**



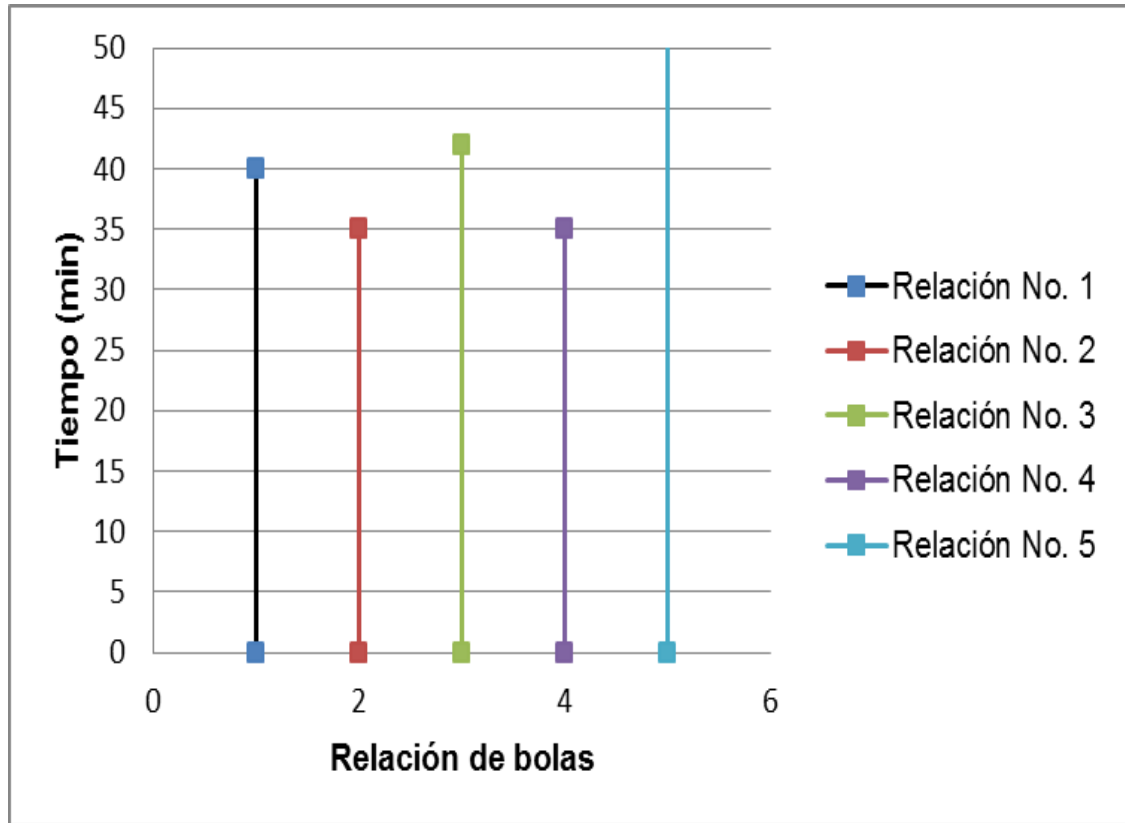
Fuente: elaboración propia, a partir de los datos calculados.

Figura 21. **Tiempo en el que cada relación de bolas alcanzó lo requerido en el tamiz 200 (75 μ m)**



Fuente: elaboración propia, a partir de los datos calculados.

Figura 22. **Tiempo en el que cada relación de bolas alcanzó lo requerido en el tamiz 325 (45 μ m)**



Fuente: elaboración propia, a partir de los datos calculados.

5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Concluida la parte experimental, se analizaron los datos correspondientes para la caracterización del molino, de tal manera que con base en los resultados obtenidos, se determinó la carga óptima de bolas y de material, tiempo óptimo de operación y gráficas que presentan cómo se comporta el porcentaje de retenido en tamiz 200 (75 μm) y tamiz 325 (45 μm), versus tiempo de operación.

Para alcanzar los resultados requeridos, se inició determinando la carga óptima de bolas, variando de 30%, 35%, 40%, 45% a 50%, la carga de bolas respecto del volumen total del molino. De las cinco corridas realizadas, el 45% y 50% del volumen total del molino ocupado por bolas y la intensidad de sonido de efecto de caída en cascada presentado fueron mínimos; el sonido correspondía a un rodamiento de las bolas dentro del molino; con el 35% y 40%, la intensidad de sonido de efecto de caída en cascada presentado fue intenso, pero aún se escuchaban pequeños rodamientos en el molino; el 30% presentó con mayor intensidad el efecto de caída en cascada, siendo este el indicado para el diseño experimental.

La cantidad de material a utilizar para el diseño experimental, se determinó variando de 70%, 72%, 74%, 76% a 78%, la carga de material, respecto del volumen disponible entre bolas. Siguiendo el mismo principio utilizado para encontrar la carga de bolas, se determinó que el porcentaje del volumen total disponible entre bolas, ocupado por el material, correspondió al 70%; siendo este el que presentó mayor intensidad de efecto de caída en cascada.

Determinada la carga óptima del molino respecto de la carga de bolas y material, se realizaron 5 corridas con diferente relación de bolas, las cuales fueron propuestas experimentalmente. La operación de molienda, para cada relación de bolas se realizó en un tiempo total de 60 minutos; durante este tiempo, se realizaron pausas a cada 10 minutos para la toma de muestra, para poder analizar el grado de fineza por tiempo de operación de la muestra.

De los resultados obtenidos se presentaron gráficos, en los que se puede observar (ver sección de resultados) que a partir de los resultados obtenidos de la relación de bolas No. 1, el 10% de retenido en el tamiz 200 se alcanzó a los 46 minutos, y el 20% de retenido en el tamiz 325, a los 40 minutos.

Los resultados obtenidos de la relación de bolas No. 2, tanto el porcentaje de retenido requerido para el tamiz 200 y tamiz 325 se alcanzó a los 35 minutos.

Los resultados obtenidos de la relación de bolas No. 3, el porcentaje de retenido requerido para el tamiz 200 se alcanzó a los 46 minutos y para el tamiz 325, a los 42 minutos.

Los resultados obtenidos de la relación de bolas No. 4, dan a conocer que el porcentaje de retenido requerido para el tamiz 200 se alcanzó a los 37 minutos y para el tamiz 325, a los 35 minutos; los resultados obtenidos de la relación de bolas No. 5, tanto el porcentaje de retenido requerido para el tamiz 200 y tamiz 325 no se alcanzó (ver figuras 21 y 22).

De las cinco relaciones de bolas, se determina que la relación No. 2 es la más eficiente, por ser la que alcanzó en el menor tiempo el tamaño de partícula requerido.

La relación de bolas No. 4, de igual manera presentó tiempos bajos, presentando únicamente 3 minutos más, en comparación con la relación No. 2 para alcanzar lo requerido en el tamiz 200, y el mismo tiempo en alcanzar lo requerido en el tamiz 325.

La relación de bolas No. 1 y 3, presentaron tiempos por arriba de los 40 minutos para alcanzar lo requerido y la relación No. 5 es la que se caracteriza por ser la menos eficiente, ya que esta no alcanzó lo requerido en el tiempo destinado; por lo que se puede apreciar en las figuras 19 y 20, a los 60 minutos presentó una tendencia horizontal donde se denota que no alcanzó en ningún momento lo requerido.

Fue con esto que se logró establecer el tiempo óptimo y la relación de bolas más adecuada, con lo que se alcanzó un porcentaje de retenido del 10% en tamiz 200 (75 μm) y 20% en tamiz 325 (45 μm).

CONCLUSIONES

1. La carga de bolas óptimas para el molino corresponde al 30% del volumen total.
2. La carga de material óptimo para el molino, corresponde al 70% del volumen disponible entre bolas.
3. La relación de bolas No.2, es la más eficiente para la molienda de piedra caliza.
4. El tiempo óptimo de molienda de piedra caliza, en la cual se alcanza un porcentaje de retenido del 10% en tamiz 200 (75 μm) y 20% en tamiz 325 (45 μm) corresponde a 35 minutos.
5. La relación de bolas No.5, no es indicada para la molienda de piedra caliza.

RECOMENDACIONES

1. Para la molienda de piedra caliza con tamaño de partícula pasa tamiz # 3/8 y retiene tamiz # 4, utilizar la relación de bolas No. 2, propuesta en este diseño experimental.
2. Realizar un estudio, tomando como variable el tamaño de partícula de entrada de material, dejando constante la relación más eficiente de bolas, determinada en esta investigación.
3. Realizar un estudio con otro tipo de material, para poder especificar el molino con toda la gama de materiales útiles para la construcción.
4. Para la molienda de piedra caliza, no utilizar la relación de bolas No. 5 propuesta en este diseño experimental.
5. Para la piedra caliza con tamaño de partícula de entrada, pasa tamiz # 3/8 y retenido tamiz # 4; no moler más allá de 40 minutos, debido a que la diferencia de material molido es insignificante.

BIBLIOGRAFÍA

1. ARAGON, R. Área de Desarrollo de Alta y Nueva Tecnología Nacional. *Molino de bolas*. [en línea]. China, 2008. Disponible en: <http://www.breakday.com/es/ball_mill.htm?gclid=CPTZtPLngqwCFRKn7QodYxinMw.> [Consulta: 06 de febrero de 2011].
2. BUEGG, R. *Separating effect and efficiency of cement classifiers*. Inglaterra: Cement and Lime Manufacture, 1968. 936 p.
3. DE LEÓN DE PAZ, Otto Raúl. *Manejo de sólidos en ingeniería química*. 2a ed. Guatemala: Antigua, 2006. 116 p.
4. DESCASPER, J. *Manual de molinos, dimensionamiento de molinos tubulares*. 2a ed. Suiza: Thomson 1893. 465 p.
5. GOUNDA, G. R. *Technical aspects of comminution in cement industry*. Mexico: World Cement Technology, 1981. 555 p.
6. JÚAREZ CHAVARRÍA, Elmer Rolando; RUANO PÉREZ, Manuel Eduardo. *Estudio de optimización a molinos de cemento en la planta de San Miguel, Cementos Progreso, Sanarate*. Trabajo de graduación de Ing. Industrial. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 1997. 114 p.

7. MENDIZÁBAL NEGRO, Axel Wosbely; GUZMAN TORRES, Jorge Mario. *Automatización de molinos de cemento*. Trabajo de graduación de Ing. Eléctrica. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 1997. 159 p.
8. MITTAG, Argel. *Tecnología de molinos*. México: McGraw-Hill, 1966. 325 p.
9. ORDÓÑEZ PORTA, Hugo Rafael; LEMKE A. Jorge A. *Optimización de la operación de molinos de bolas en planta de cemento*. Trabajo de graduación de Ing. Química. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 1986. 212 p.
10. PERRY, Robert. *Manual del ingeniero químico*. 6a ed. México: McGraw-Hill. 1996, 2856 p.
11. RODAS BARRIENTOS, Gianni. *Tecnología del molino de bolas*. [en línea]. <<http://www.tecnologia.com/trabajos3/molino-de-bolas/molino-de-bolas.shtml>> [Consulta: 12 de marzo de 2011].

APÉNDICES

Apéndice 1. Datos originales

Apéndice 1a. Especificaciones técnicas del molino

| | |
|------------------|--------------------|
| Longitud Interna | 1.2 m |
| Diámetro Interno | 0.74 m |
| Capacidad | 0.5 m ³ |
| RPM | 175 |

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 1b. Relación de bolas utilizadas

| CORRIDA | % de bolas de 15 mm (Ø) | % de bolas de 19 mm(Ø) | % de bolas de 25 mm(Ø) | % de bolas de 32 mm(Ø) |
|---------|-------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| 1 | 21 | 12 | 37 | 30 |
| 2 | 21 | 22 | 37 | 20 |
| 3 | 26 | 22 | 32 | 20 |
| 4 | 27 | 24 | 30 | 19 |
| 5 | 38 | 24 | 22 | 16 |

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 1c. **Especificaciones de material de entrada**

| | |
|--------------------------------|--|
| Tamaño de partícula de entrada | Pasa tamiz # 3/8 y retenido tamiz # 16 |
|--------------------------------|--|

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 1d. **Determinación del porcentaje de bolas óptimas, en función del sonido de efecto de cascada**

| % del volumen total del molino, ocupado por bolas | Equivalente (m^3) | Sonido de efecto de cascada |
|---|-----------------------|-----------------------------|
| 30 | 0.15 | Muy bueno |
| 35 | 0.18 | Bueno |
| 40 | 0.20 | Bueno |
| 45 | 0.23 | Malo |
| 50 | 0.25 | Muy malo |

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 1e. **Determinación del porcentaje de material óptimo, en función del sonido de efecto de cascada**

| % del volumen total disponible entre bolas, ocupado por material | Equivalente (m ³) | Sonido de efecto de cascada |
|--|-------------------------------|-----------------------------|
| 70 | 0,018 | Muy bueno |
| 72 | 0,019 | Bueno |
| 74 | 0,020 | Bueno |
| 76 | 0,021 | Malo |
| 78 | 0,022 | Muy malo |

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 1f. **Carga de bolas y de material óptimo**

| Carga de bolas | Carga de material |
|---|---|
| (Kg) | (Kg) |
| 450 | 50 |
| % Equivalente a la capacidad del molino | % Equivalente al volumen disponible entre bolas |
| 30% | 70% |

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 1g. **Retenido en el tamiz No. 200 (75 μm) para la relación de bolas No. 1**

| Tiempo (min) | Temperatura ($^{\circ}\text{C}$) | Retenido tamiz No. 200 (75 μm)(g) |
|--------------|------------------------------------|---|
| 0 | 28 | 100 |
| 10 | 37.4 | 68.34 |
| 20 | 38.6 | 26.21 |
| 30 | 40.1 | 17.71 |
| 40 | 41.9 | 11.56 |
| 50 | 43.3 | 9.24 |
| 60 | 45.6 | 9.04 |

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 1h. **Retenido en el tamiz No. 325 (45 μm) para la relación de bolas No. 1**

| Tiempo (min) | Temperatura ($^{\circ}\text{C}$) | Retenido tamiz No. 325 (45 μm)(g) |
|--------------|------------------------------------|---|
| 0 | 28 | 100 |
| 10 | 37.4 | 70.24 |
| 20 | 38.6 | 35.1 |
| 30 | 40.1 | 26.5 |
| 40 | 41.9 | 19.8 |
| 50 | 43.3 | 16.8 |
| 60 | 45.6 | 16.03 |

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 1i. **Retenido en el tamiz No. 200 (75 μm) para la relación de bolas No. 2**

| Tiempo (min) | Temperatura ($^{\circ}\text{C}$) | Retenido tamiz No. 200 (75 μm)(g) |
|--------------|------------------------------------|---|
| 0 | 19 | 100 |
| 10 | 23.9 | 17.62 |
| 20 | 26.6 | 17.27 |
| 30 | 28.3 | 11.37 |
| 40 | 29.9 | 8.87 |
| 50 | 31.9 | 7.01 |
| 60 | 34.9 | 6.1 |

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 1j. **Retenido en el tamiz No. 325 (45 μm) para la relación de bolas No. 2**

| Tiempo (min) | Temperatura ($^{\circ}\text{C}$) | Retenido tamiz No. 325 (45 μm)(g) |
|--------------|------------------------------------|---|
| 0 | 19 | 100 |
| 10 | 23.9 | 28.99 |
| 20 | 26.6 | 27.3 |
| 30 | 28.3 | 22.7 |
| 40 | 29.9 | 17 |
| 50 | 31.9 | 15.49 |
| 60 | 34.9 | 12.89 |

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 1k. **Retenido en el tamiz No. 200 (75 μm) para la relación de bolas No. 3**

| Tiempo (min) | Temperatura ($^{\circ}\text{C}$) | Retenido tamiz No. 200 (75 μm)(g) |
|--------------|------------------------------------|---|
| 0 | 37 | 100 |
| 10 | 51.4 | 56.45 |
| 20 | 53 | 21.19 |
| 30 | 54.6 | 17.11 |
| 40 | 53 | 11.67 |
| 50 | 56.3 | 8.59 |
| 60 | 57.6 | 8.31 |

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 1l. **Retenido en el tamiz No. 325 (45 μm) para la relación de bolas No. 3**

| Tiempo (min) | Temperatura ($^{\circ}\text{C}$) | Retenido tamiz No. 325 (45 μm)(g) |
|--------------|------------------------------------|---|
| 0 | 37 | 100 |
| 10 | 51.4 | 57.49 |
| 20 | 53 | 28.99 |
| 30 | 54.6 | 25.74 |
| 40 | 55 | 20.55 |
| 50 | 56.3 | 17.91 |
| 60 | 57.6 | 14.85 |

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 1m. **Retenido en el tamiz No. 200 (75 μm) para la relación de bolas No. 4**

| Tiempo (min) | Temperatura ($^{\circ}\text{C}$) | Retenido tamiz No. 200 (75 μm)(g) |
|--------------|------------------------------------|---|
| 0 | 38 | 100 |
| 10 | 53.4 | 59.26 |
| 20 | 52.8 | 24.54 |
| 30 | 54.4 | 13.35 |
| 40 | 55.2 | 8.69 |
| 50 | 55.6 | 7.13 |
| 60 | 56.5 | 6.62 |

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 1n. **Retenido en el tamiz No. 325 (45 μm) para la relación de bolas No. 4**

| Tiempo (min) | Temperatura ($^{\circ}\text{C}$) | Retenido tamiz No. 325 (45 μm)(g) |
|--------------|------------------------------------|---|
| 0 | 38 | 100 |
| 10 | 50 | 71.48 |
| 20 | 51.8 | 32.67 |
| 30 | 52.4 | 23.15 |
| 40 | 53 | 17.26 |
| 50 | 53.9 | 16.02 |
| 60 | 54.7 | 15.77 |

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 1ñ. **Retenido en el tamiz No. 200 (75 μm) para la relación de bolas No. 5**

| Tiempo (min) | Temperatura ($^{\circ}\text{C}$) | Retenido tamiz No. 200 (75 μm)(g) |
|--------------|------------------------------------|---|
| 0 | 35 | 100 |
| 10 | 41.2 | 77.77 |
| 20 | 43.4 | 67.73 |
| 30 | 46.9 | 51.05 |
| 40 | 48.1 | 40.8 |
| 50 | 50.2 | 40.16 |
| 60 | 52.4 | 38.57 |

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 1o. **Retenido en el tamiz No. 325 (45 μm) para la relación de bolas No. 5**

| Tiempo (min) | Temperatura ($^{\circ}\text{C}$) | Retenido tamiz No. 325 (45 μm)(g) |
|--------------|------------------------------------|---|
| 0 | 35 | 100 |
| 10 | 41.2 | 83.9 |
| 20 | 43.4 | 61.76 |
| 30 | 46.9 | 60.60 |
| 40 | 48.1 | 55.51 |
| 50 | 50.2 | 51.36 |
| 60 | 52.4 | 51.15 |

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. **Datos calculados**

Apéndice 2a. **Retenido en el tamiz No. 200 (75 μm) y 325 (45 μm) para la relación de bolas No. 1**

| Tiempo (min) | Retenido tamiz No. 200 (75 μm)(g) | Retenido tamiz No. 325 (45 μm)(g) |
|--------------|---|---|
| 0 | 100 | 100 |
| 10 | 68.34 | 70.24 |
| 20 | 26.21 | 35.1 |
| 30 | 17.71 | 26.5 |
| 40 | 11.56 | 19.8 |
| 50 | 9.24 | 16.8 |
| 60 | 9.04 | 16.03 |

Fuente: elaboración propia, con datos de apéndice 1.

Apéndice 2b. **Retenido en el tamiz No. 200 (75 μm) y 325 (45 μm) para la relación de bolas No. 2**

| Tiempo (min) | Retenido tamiz No. 200 (75 μm)(g) | Retenido tamiz No. 325 (45 μm)(g) |
|--------------|---|---|
| 0 | 100 | 100 |
| 10 | 17.62 | 28.99 |
| 20 | 17.27 | 27.3 |
| 30 | 11.37 | 22.7 |
| 40 | 8.87 | 17 |
| 50 | 7.01 | 15.49 |
| 60 | 6.1 | 12.89 |

Fuente: elaboración propia, con datos de apéndice 1.

Apéndice 2c. **Retenido en el tamiz No. 200 (75 μm) y 325 (45 μm) para la relación de bolas No. 3**

| Tiempo (min) | Retenido tamiz No. 200 (75 μm)(g) | Retenido tamiz No. 325 (45 μm)(g) |
|--------------|---|---|
| 0 | 100 | 100 |
| 10 | 56.45 | 57.49 |
| 20 | 21.19 | 28.99 |
| 30 | 17.11 | 25.74 |
| 40 | 11.67 | 20.55 |
| 50 | 8.59 | 17.91 |
| 60 | 8.31 | 14.85 |

Fuente: elaboración propia, con datos de apéndice 1.

Apéndice 2d. **Retenido en el tamiz No. 200 (75 μm) y 325 (45 μm) para la relación de bolas No. 4**

| Tiempo (min) | Retenido tamiz No. 200 (75 μm)(g) | Retenido tamiz No. 325 (45 μm)(g) |
|--------------|---|---|
| 0 | 100 | 100 |
| 10 | 59.26 | 71.48 |
| 20 | 24.54 | 32.67 |
| 30 | 13.35 | 23.15 |
| 40 | 8.69 | 17.26 |
| 50 | 7.13 | 16.02 |
| 60 | 6.62 | 15.77 |

Fuente: elaboración propia, con datos de apéndice 1.

Apéndice 2e. **Retenido en el tamiz No. 200 (75 μm) y 325 (45 μm) para la relación de bolas No. 5**

| Tiempo (min) | Retenido tamiz No. 200 (75 μm)(g) | Retenido tamiz No. 325 (45 μm)(g) |
|--------------|---|---|
| 0 | 100 | 100 |
| 10 | 77.77 | 83.9 |
| 20 | 67.73 | 61.76 |
| 30 | 51.05 | 60.60 |
| 40 | 40.8 | 55.51 |
| 50 | 40.16 | 51.36 |
| 60 | 38.57 | 51.15 |

Fuente: elaboración propia, con datos de apéndice 1.

Apéndice 3. Presupuesto de la investigación

Apéndice 3a. Costo de reactivos

| Reactivo | Unidad | Fuente | Fecha | Costo unitario (Q) | Cantidad | Costo total (Q) |
|---------------|----------------|------------------------------|------------|--------------------|--------------|-----------------|
| Piedra caliza | m ³ | Planta de agregados (Agreca) | 2011-09-22 | 350,00 | 3 | 1 050,00 |
| | | | | | TOTAL | 1 050,00 |

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 3b. Costo de equipo

| Equipo | Descripción | Fuente | Fecha | Costo inicial (Q) | Depreciación (Q) | Costo/ 1 mes (Q) |
|------------------------|---------------------------------|---------------------|------------|-------------------|------------------|------------------|
| Balanza analítica | Marca OHAUS, Modelo AP210S | Soluciones técnicas | 2005-04-18 | 16 500,00 | 1 838,00 | 315,10 |
| Báscula | Marca OHAUS, Modelo LC123-34 | Soluciones técnicas | 2008-04-18 | 22 000,00 | 2 450,67 | 420,13 |
| Termómetro | Marca HUMBOLDT, Modelo H3599 | BETA | 2010-06-23 | 1 200,00 | 133,67 | 22,92 |
| Molino | Marca Westinghouse Modelo HW-32 | Gilson | may-99 | 70 000,00 | 7 797,58 | 1 336,79 |
| Triturador de quijadas | Marca BICO Modelo 242-53 | Gilson | 2005-02-21 | 30 000,00 | 3 341,82 | 572,91 |
| Tamizadora | Marca: GILSON Modelo: TM – 3 | Gilson | 2005-02-21 | 32 000,00 | 3 564,61 | 611,10 |
| Alpin | Marca: MICRON Modelo: AJ-SEVE | HOSOKAWA MICROM | 2005-02-21 | 25 000,00 | 2 784,85 | 477,42 |
| | | | | | TOTAL | 3 756,37 |

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 3c. **Costo de energía eléctrica**

| Equipo | Potencia (Watts) | Cantidad (horas) | kW-h totales | Costo kW-h (Q) | Costo total (Q) |
|------------------------|-------------------------|-------------------------|---------------------|-----------------------|------------------------|
| Balanza analítica | 4,010 | 12 | 0,048 | 2,8 | 0,13 |
| Báscula | 12,00 | 20 | 0,24 | 2,8 | 0,67 |
| Molino | 55 927,58 | 32 | 1 789,68 | 2,8 | 5 011,11 |
| Triturador de quijadas | 1 491,40 | 16 | 23,86 | 2,8 | 66,81 |
| Tamizadora | 450,00 | 24 | 10,8 | 2,8 | 30,24 |
| Alpin | 120,00 | 12 | 1,44 | 2,8 | 4,03 |
| | | | | TOTAL | 5 113,00 |

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 3d. **Costo de personal**

| ID. personal | Cantidad personas | Costo por hora (Q) | Cantidad horas | Costo total (Q) |
|---------------------|--------------------------|---------------------------|-----------------------|------------------------|
| Asistente | 1 | 13,5 | 52 | 702,00 |
| | | | TOTAL | 702,00 |

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 3e. **Costo de otros**

| Otros | Fuente | Costo unitario (Q) | Cantidad | Costo total (Q) |
|----------------------|---------|--------------------|--------------|-----------------|
| Mascarillas | Dosilab | 10,00 | 10 | 100,00 |
| Guantes neopropileno | Dosilab | 75,00 | 4 | 300,00 |
| Lentes | Dosilab | 50,00 | 2 | 100,00 |
| Tapones auditivos | Dosilab | 5,00 | 8 | 40,00 |
| | | | TOTAL | 540,00 |

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 3f. **Costo total de la investigación**

| Tipo de gasto | Costo (Q) |
|-------------------|------------------|
| Reactivos | 1 050,00 |
| Equipo | 3 756,37 |
| Energía eléctrica | 5 113,00 |
| Personal | 702,00 |
| Otros | 540,00 |
| TOTAL | 1 1161,37 |

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 4. **Impactos ambientales generados durante la investigación**

Apéndice 4a. **Impactos ambientales generados**

| No. | Aspecto ambiental | Impacto ambiental | Tipo de impacto ambiental | Actividades de la investigación donde aplica el impacto ambiental | Manejo ambiental: indica qué se hará para evitar el impacto ambiental |
|------------|--------------------------|--------------------------|--|--|--|
| 1 | Aire | Gases | No aplica | No aplica | No aplica |
| | | Polvo | Contaminación del aire por partículas pequeñas | En el área de molienda, durante el proceso de molturación | Sellar con silicón todas las aberturas que podrían permitir el escape de partículas del molino |
| | | Ruido | Ruido | Molienda del material | Se señalará el área con todos lo referente a seguridad |

Continuación apéndice 4a.

| | | | | | |
|---|--------|----------------------------------|-------------------------------|--|--|
| 2 | Suelo | Desechos sólidos | Material molido | Finalización de la molienda | El residuo se analizará y luego será enviado a control de calidad para su utilización |
| 3 | Agua | Abastecimiento de agua | No aplica | No aplica | No aplica, se realiza en vía seca. |
| 4 | Social | Cambio o modificaciones sociales | Cultural político y económico | Al terminar la investigación se espera tener un aporte industrial para la operación de molino de bolas de uso industrial | Todas las actividades de la investigación se realizarán buscando causar el mínimo impacto ambiental. |

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 5. **Fotografías del proceso de investigación**

Apéndice 5a. **Diferentes vistas del molino de uso experimental**



Fuente: Laboratorio Centro Tecnológico, Cementos Progreso, La Pedrera, Zona 6.

Apéndice 5b. **Determinación del volumen de bolas**



Fuente: Laboratorio Centro Tecnológico, Cementos Progreso, La Pedrera, Zona 6.

Apéndice 5c. **Almacenamiento de materia prima en planta**



Fuente: Laboratorio Centro Tecnológico, Cementos Progreso, La Pedrera, Zona 6.

Apéndice 5d. **Almacenamiento de materia prima en laboratorio
CETEC**



Fuente: Laboratorio Centro Tecnológico, Cementos Progreso, La Pedrera, Zona 6.

Apéndice 5e. **Preparación de la materia prima (trituradora de quijas)**



Fuente: Laboratorio Centro Tecnológico, Cementos Progreso, La Pedrera, Zona 6.

Apéndice 5f. **Proceso de selección de material, pasa tamiz 3/8 y retiene tamiz No. 16 (tamizadora)**



Fuente: Laboratorio Centro Tecnológico, Cementos Progreso, La Pedrera, Zona 6.

Apéndice 5g. **Peso del material de alimentación**



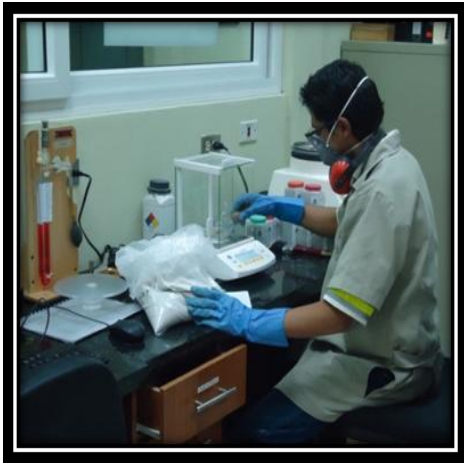
Fuente: Laboratorio Centro Tecnológico, Cementos Progreso, La Pedrera, Zona 6.

Apéndice 5g. **Toma de muestra del molino**



Fuente: Laboratorio Centro Tecnológico, Cementos Progreso, La Pedrera, Zona 6.

Apéndice 5h. **Análisis del material molido**



Fuente: Laboratorio Centro Tecnológico, Cementos Progreso, La Pedrera, Zona 6.

Apéndice 6. **Hoja técnica piedra caliza**

IDENTIFICACIÓN:

| | |
|---------------------------------|--|
| Nombre del fabricante: | Cemento Progreso S.A. |
| Dirección del fabricante: | 15 av. 18-01 Zona 6, La Pedrera |
| Nombre y concentración química: | Carbonato doble de calcio 76% |
| Sinónimos: | Caliza, cal agrícola |
| Número de registro CAS: | 471-34-1 |
| Composición: | Compuesto inorgánico de carbonato de calcio (CaCO ₃) |
| Fórmula química: | CaCO ₃ |
| Peso molecular: | 100.09 g/mol |

PROPIEDADES:

| | |
|----------------------------------|---|
| Estado físico: | Sólido |
| Color: | Blanquecino/grisáceo |
| Olor: | Inodoro |
| Punto de fusión: | 1,339 °C |
| Punto de ebullición: | Descomposición |
| Punto de inflamación: | No aplica |
| Densidad relativa: | 2.711 |
| Solubilidad en agua: | Insoluble en agua, soluble en ácidos diluidos y cloruro de amonio |
| Ionicidad en agua: | No aplica |
| Presión de vapor (mm de Hg): | No aplica |
| Densidad de vapor: | No aplica (aire 1) |
| Capacidad neutralizadora (PNRT): | 94% |

Apéndice 6a. **Composición química de la piedra caliza**

| COMPUESTO | FÓRMULA | Composición (% mínimo) |
|-----------------------|--------------------------------|-----------------------------------|
| Carbonato de calcio | CaCO ₃ | 76.00% |
| Carbonato de magnesio | MgCO ₃ | 4.50% |
| Dióxido de silicio | SiO ₂ | 3.00% |
| Trióxido de hierro | Fe ₂ O ₃ | 0.80% |
| Trióxido de aluminio | Al ₂ O ₃ | 0.50% |
| Óxido de calcio | CaO | 43.00% |
| Óxido de magnesio | MgO | 2.00% |
| Perdida al fuego | PF | 42.00% |
| Humedad | % H | 0.50% |

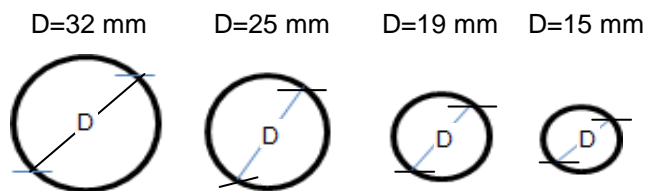
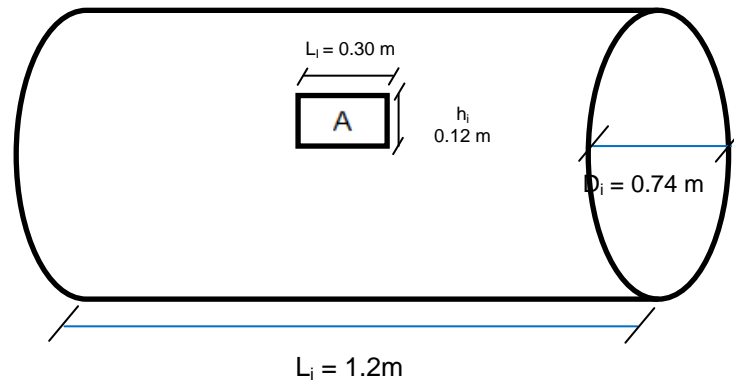
Fuente: Laboratorio Químico, Control de Calidad La Pedrera Cementos Progreso S.A.

Apéndice 7. **Determinación del porcentaje de retenido mediante el equipo Alpin**

- En un vidrio de reloj de peso conocido, pesar exactamente $5,0000 \pm 0,0002$ g de muestra;
- Depositar el material en el tamiz del equipo Alpin, asegurar que todo el material sea depositado mediante el uso de una brocha;
- Configurar el equipo para un tiempo de operación de 300 s;
- Regular la presión de succión en 10 ± 1 psi;
- Regresar el residuo al vidrio de reloj evitando pérdidas del material;
- Pesar el material retenido en el vidrio de reloj.

Apéndice 8.

Diagrama del equipo de investigación. Medidas del molino y bolas utilizadas en el diseño experimental



Donde:

D_i = Diámetro Interno

L_i = Longitud interna

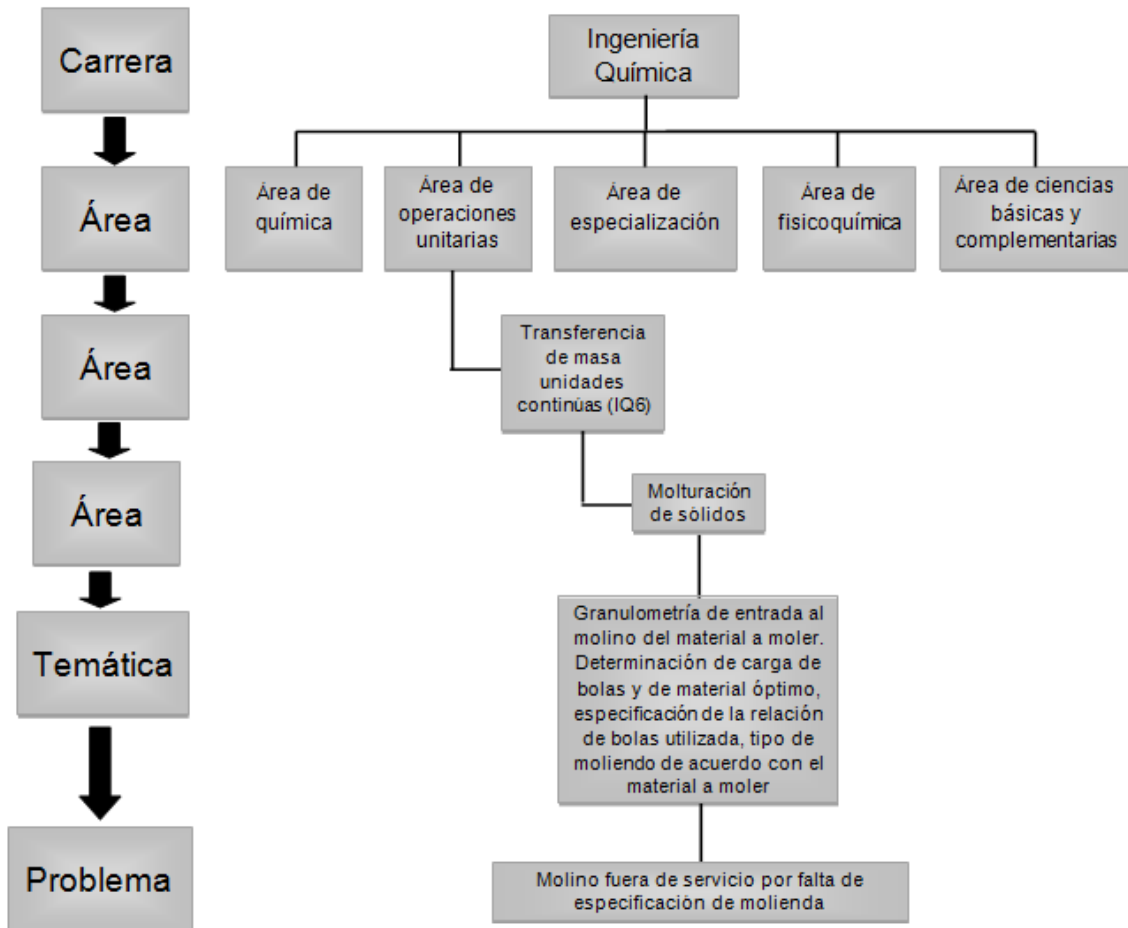
D = Diámetro externo

h_i = Altura interna

A = Área de carga y descarga

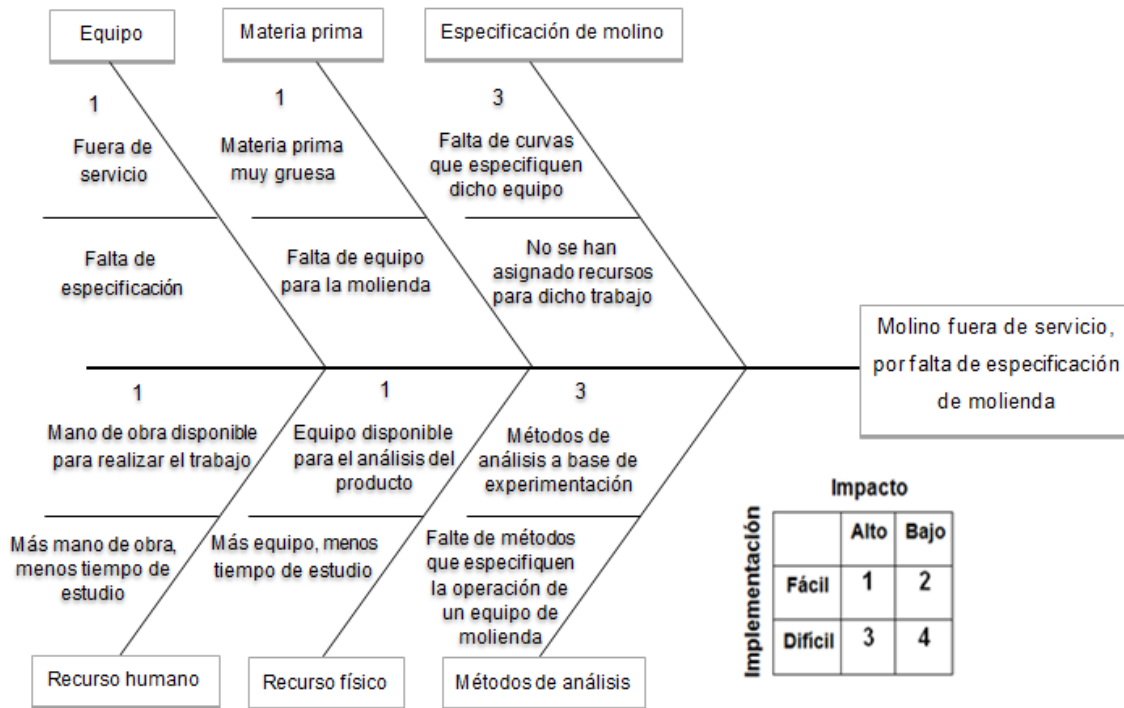
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 9. **Requerimiento académico para la elaboración del trabajo de graduación de molienda de piedra caliza**



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 10. **Diagrama de causa y efecto para determinar las variables en un proceso de molienda**



Fuente: elaboración propia.