

# **TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

## **DISEÑO DE UN PROGRAMA DE SIMULACIÓN PARA OPTIMIZAR LA SELECCIÓN DE MOLINOS CILÍNDRICOS DE BOLAS O BARRAS PARA EL TRATAMIENTO MECÁNICO DE MINERALES NO METÁLICOS.**

Trabajo Especial de Grado

Presentado ante la ilustre

Universidad Central de Venezuela

Por el Br. Serrano Mauricio

Para optar al título de Ingeniero de Minas

Caracas, Agosto del 2012.

# **TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

## **DISEÑO DE UN PROGRAMA DE SIMULACIÓN PARA OPTIMIZAR LA SELECCIÓN DE MOLINOS CILÍNDRICOS DE BOLAS O BARRAS PARA EL TRATAMIENTO MECÁNICO DE MINERALES NO METÁLICOS.**

Tutor Académico: Profa. Katherine Silva

Trabajo especial de grado

Presentado ante la ilustre

Universidad Central de Venezuela

Por el Br. Serrano Mauricio

Para optar al título de Ingeniero de Minas

Caracas, Agosto del 2012.

Caracas, Agosto del 2012.

Los abajo firmantes, miembros del jurado designado por el Consejo de Escuela de Geología, Minas y Geofísica, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por el Bachiller Serrano, Mauricio, titulado:

**DISEÑO DE UN PROGRAMA DE SIMULACIÓN PARA  
OPTIMIZAR LA SELECCIÓN DE MOLINOS CILÍNDRICOS DE  
BOLAS O BARRAS PARA EL TRATAMIENTO MECÁNICO DE  
MINERALES NO METÁLICOS.**

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudios conducente al título de Ingeniero de Minas, y lo declaran APROBADO.

---

**Prof. Luis Chacón**

**Jurado**

---

**Prof. Carlos De Yorio**

**Jurado**

---

**Profa. Katherine Silva**

**Tutora**

## **AGRADECIMIENTOS**

A mi madre, padre y hermana por demostrarme siempre que la generosidad desinteresada es una de las fuentes de felicidad más abundantes, que la verdadera riqueza no se mide ni se pesa y que la humildad es una virtud cultivable y que siempre se debe fortalecer. No pude haber nacido y crecido en condiciones más favorables. A ustedes debo todo lo que me tocó ser esta vez.

A mis amistades, compañeros de estudio, de trabajo y familiares por ser siempre el reflejo de mis cualidades y perturbaciones. A ustedes, por haber sido y ser una fuente de experiencia y sabiduría, debo y deberé mi desarrollo personal en todos los ámbitos.

A todos los profesores de la Universidad Central de Venezuela que de alguna manera guiaron mi educación en determinado momento; en especial al profesor Mauricio Bermudez y a las profesoras: Katherine Silva, Aurora Piña, Alba Castillo y Nuris Orihuela de la escuela de Geología, Minas y Geofísica por ser un ejemplo vivo de excelencia académica.

A la Universidad Central de Venezuela, por haber sembrado en mí la llama que siempre vencerá a la sombra.

**Serrano H. Mauricio A.**

**DISEÑO DE UN PROGRAMA DE SIMULACIÓN PARA OPTIMIZAR LA SELECCIÓN DE MOLINOS CILÍNDRICOS DE BOLAS O BARRAS PARA EL TRATAMIENTO MECÁNICO DE MINERALES NO METÁLICOS.**

**Tutor Académico: Profa. Katherine Silva. Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Geología, Minas y Geofísica (Departamento de Minas).**

**2012, N° 135 de Pág.**

**Palabras Clave:** Molienda, Programa de Simulación, Molinos cilíndricos.

**RESUMEN**

En el presente trabajo se planteó establecer un criterio que pueda apoyar a la selección de molinos cilíndricos horizontales, para reducir de tamaño minerales no metálicos, buscando asegurar un nivel operacional adecuado tomando en cuenta los minerales a tratar. Para ello, se desarrolló un procedimiento experimental basado en el análisis granulométrico y la reducción de tamaño de dos minerales utilizados como aditivos para cemento: *Albita* y *Clinocloro*. Los datos obtenidos fueron procesados en un programa desarrollado en esta investigación bajo la plataforma de *Matlab v7.10*, cuyo algoritmo se basó en las relaciones teóricas propuestas para el dimensionamiento de molinos cilíndricos. Este programa permite estimar el comportamiento de molinos cilíndricos de bolas y barras con diversas características técnicas y operacionales; el programa de simulación a partir de datos introducidos por el usuario realiza una serie de cálculos y arroja de esa manera diferentes resultados para cada escenario, resultados que deben ser analizados e interpretados por el usuario. Los datos que se introducen en el programa son recopilados en diferentes ensayos realizados en el laboratorio siguiendo una metodología específica. La primera etapa de los ensayos consistió en el cálculo del consumo de energía de la

molienda. Para ello, se empleó la ecuación definida por Fred C. Bond, calculándose el índice de trabajo para ambos minerales y bajo ambas condiciones, el diámetro promedio del 80% de las partículas pasantes de los 100  $\mu\text{m}$  en la alimentación y de la descarga; éstos junto a otros datos de operatividad sirvieron como la información de entrada para que el programa arrojara las diversas simulaciones.

El programa de simulación diseñado indicó que el equipo más idóneo para el tratamiento de ambos minerales debe ser un molino de bolas con las siguientes características: diámetro de 4 m, largo de 6 m, y con las siguientes especificaciones operacionales: porcentaje de la carga moledora de 40% para bolas y 21% en el caso de barras y fracción de la velocidad límite 60%. Con éstos valores el consumo energético y la capacidad del molino será de: (1158 kw-h/ton y 2 ton/h) para la *Albita* y de (812 kw-h/ton y 3 ton/h) para el *Clinocloro* respectivamente. De acuerdo a los resultados arrojados por la simulación.

## ÍNDICE

|  |    |
|--|----|
| ÍNDICE DE FIGURAS.....                             | ix |
| ÍNDICE DE TABLAS .....                             | x  |
| ÍNDICE DE GRÁFICOS .....                           | xi |
| INTRODUCCIÓN .....                                 | 1  |
| CAPÍTULO I3 GENERALIDADES .....                    | 3  |
| 1.1) PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....               | 4  |
| 1.2) OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN .....           | 4  |
| CAPÍTULO II7 MARCO TEÓRICO .....                   | 7  |
| 2.1) ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN.....         | 8  |
| 2.1) BASES TEÓRICAS .....                          | 11 |
| 2.1.1) Molienda.....                               | 11 |
| 2.3) ALTERNATIVAS PARA EL CÁLCULO ENERGÉTICO. .... | 28 |
| 2.4) ESTUDIOS RELACIONADOS CON MOLIENDA.....       | 30 |
| 2.5) ADITIVOS PARA CEMENTO.....                    | 31 |
| CAPÍTULO III MARCO METODOLÓGICO .....              | 34 |
| 3.1) TIPO DE INVESTIGACIÓN.....                    | 36 |
| 3.2) DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN.....               | 36 |
| 3.3) POBLACIÓN Y MUESTRA. ....                     | 37 |

|   |     |
|---|-----|
| 3.4) PARTE EXPERIMENTAL .....   | 38  |
| 3.5) APLICACIÓN DEL PROGRAMA DE SIMULACIÓN BASADO EN EL<br>SOFTWARE MATLAB v7.10..... | 40  |
| 3.6) ANÁLISIS DE DATOS Y VALIDACIÓN DE LOS RESULTADOS.....                            | 41  |
| CAPÍTULO IV ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.....   | 42  |
| 4.1) CARACTERIZACIÓN Y CLASIFICACIÓN DE LA ALIMENTACIÓN Y<br>LA DESCARGA .....        | 44  |
| 4.2 ENSAYOS DE BOND.....  | 51  |
| 4.3) SIMULACIÓN EN ICARUS. ....   | 60  |
| 4.4) VALIDACIÓN DE ICARUS .....   | 75  |
| CONCLUSIONES .....  | 78  |
| RECOMENDACIONES .....   | 80  |
| BIBLIOGRAFÍA .....  | 81  |
| ANEXOS .....  | 83  |
| ANEXO 1: RESULTADOS DE LA DIFRACCIÓN DE RAYOS X AL MINERAL<br>1.....                  | 84  |
| ANEXO 2: RESULTADOS DE LA DIFRACCIÓN DE RAYOS X AL MINERAL<br>2.....                  | 88  |
| ANEXO 3: REPORTE DE ANÁLISIS POR MICROSCOPIA ELECTRÓNICA<br>DE BARRIDO .....          | 92  |
| ANEXO 4: MANUAL DEL PROGRAMA DE SIMULACIÓN .....                                      | 101 |
| ANEXO 5: ALGORITMO DISEÑADO PARA ICARUS.....  | 106 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

| Figura # | Título   | Página |
|----------|--|--------|
| 1        | <i>Molino de bolas horizontal</i>                              | 12     |
| 2        | <i>Tipos de molinos</i>  | 13     |
| 3        | <i>Efecto cascada en un molino de bolas</i>                    | 18     |
| 4        | <i>Test de impacto de Bond</i>                                 | 29     |
| 5        | <i>Equipo de péndulo de rebote</i>                             | 30     |
| 6        | <i>Albita, mineral 1</i>                                       | 37     |
| 7        | <i>Clinocloro, mineral 2</i>                                   | 37     |
| 8        | <i>Molino de barras en bancada de Ghaliguer</i>                | 38     |
| 9        | <i>Batería de Tamices</i>                                      | 39     |
| 10       | <i>Morfología del mineral 1: descarga del molino de bolas</i>  | 56     |
| 11       | <i>Morfología del mineral 2: descarga del molino de bolas</i>  | 57     |
| 12       | <i>Morfología del mineral 1: descarga del molino de barras</i> | 58     |
| 13       | <i>Morfología del mineral 2: descarga del molino de barras</i> | 58     |
| 14       | <i>Interface de inicio</i>                                     | 60     |
| 15       | <i>Interfaz del molino de bolas: etapa 1.</i>                  | 61     |
| 16       | <i>Interfaz del molino de bolas: etapa 2.</i>                  | 61     |
| 17       | <i>Interfaz del molino de barras: etapa 1.</i>                 | 62     |
| 18       | <i>Interfaz del molino de barras: etapa 2.</i>                 | 62     |
| 19       | <i>Análisis D vs E: molino de bolas.</i>                       | 64     |
| 20       | <i>Resultados de las simulaciones</i>                          | 64     |
| 21       | <i>Análisis L/D vs Q para un <math>\phi=0,6</math>.</i>        | 66     |
| 22       | <i>Resultados L/D vs Q para un <math>\phi=0,6</math></i>       | 66     |
| 23       | <i>Simulación <math>\phi</math> vs Q para L/D=1,5</i>          | 67     |
| 24       | <i>Resultados <math>\phi</math> vs Q para L/D=1,5</i>          | 67     |
| 25       | <i>Análisis D vs E: molino de barras.</i>                      | 70     |
| 26       | <i>Resultados de las simulaciones</i>                          | 70     |
| 27       | <i>Análisis L/D vs Q para un <math>\phi=0,6</math>.</i>        | 72     |
| 28       | <i>Resultados L/D vs Q para un <math>\phi=0,6</math></i>       | 72     |
| 29       | <i>Simulación <math>\phi</math> vs Q para L/D=1,5</i>          | 73     |
| 30       | <i>Resultados <math>\phi</math> vs Q para L/D=1,5</i>          | 73     |

## ÍNDICE DE TABLAS

| Tabla # | Título   | Página |
|---------|--|--------|
| 1       | <i>Clasificación de los molinos</i>                          | 13     |
| 2       | <i>Análisis granulométrico de la alimentación: mineral 1</i> | 45     |
| 3       | <i>Análisis granulométrico de la alimentación: mineral 2</i> | 46     |
| 4       | <i>Análisis granulométrico de la descarga: mineral 1</i>     | 47     |
| 5       | <i>Análisis granulométrico de la descarga: mineral 2</i>     | 48     |
| 6       | <i>Composición química del mineral 1 DRX</i>                 | 49     |
| 7       | <i>Composición química del mineral 2 DRX</i>                 | 50     |
| 8       | <i>Dimensiones del molino de bolas</i>                       | 52     |
| 9       | <i>Dimensiones de la carga moledora: bolas de 3 cm</i>       | 52     |
| 10      | <i>Dimensiones de la carga moledora: bolas de 5 cm</i>       | 52     |
| 11      | <i>Combinación de la carga</i>                               | 53     |
| 12      | <i>Cálculo de Wit para el mineral 1: molino de bolas</i>     | 54     |
| 13      | <i>Cálculo de Wit para el mineral 2: molino de bolas</i>     | 54     |
| 14      | <i>Cálculo de Wit para el mineral 1: molino de barras</i>    | 55     |
| 15      | <i>Cálculo de Wit para el mineral 2: molino de barras</i>    | 55     |
| 16      | <i>Datos de entrada para la simulación: molino de bolas</i>  | 63     |
| 17      | <i>Datos de entrada para la simulación: molino de barras</i> | 69     |

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

| Gráfico # | Título  | Página |
|-----------|---|--------|
| 1         | <i>Distribución granulométrica del mineral 1 en la alimentación</i> | 45     |
| 2         | <i>Distribución granulométrica del mineral 2 en la alimentación</i> | 46     |
| 3         | <i>Distribución granulométrica del mineral 1 en la descarga</i>     | 47     |
| 4         | <i>Distribución granulométrica del mineral 2 en la descarga</i>     | 48     |
| 5         | <i>Validación de ICARUS: molino de bolas</i>                        | 75     |
| 6         | <i>Validación de ICARUS: molino de barras</i>                       | 76     |

## INTRODUCCIÓN

La minería de no metálicos representa en la actualidad una de las explotaciones más importantes para cualquier nación, pues no solo aporta al Estado rubros de interés para los sectores energético y económico, sino que además le suministra a las empresas de construcción la materia prima necesaria para su desarrollo y para la elaboración de tecnologías que satisfagan las necesidades del mercado interno y externo. En Venezuela actualmente el rubro de agregados para la construcción, en otras palabras minería de no metálicos, es una prioridad en la construcción y en el desarrollo industrial y de construcción de viviendas.

Dentro de la industria de la construcción, además de la roca caliza los aditivos para cemento son de suma importancia. Ya que estos materiales son añadidos a la mezcla con el fin de lograr que ésta adquiera ciertas características mecánicas, todo ello en función de las reacciones químicas que estos producen. Por otro lado, la distribución de tamaño requerido de estos aditivos suele ser por el orden de los micrones, por lo que el circuito de reducción de tamaño a utilizar debe ser muy bien diseñado y específicamente tener una atención especial sobre la selección de los equipos para la operación de molienda.

Las operaciones de preparación del mineral involucran la clasificación, reducción y transporte del mineral. Sin embargo reducción del mineral para su uso posterior comienza con métodos mecánicos, los mismos son los que consumen mayor cantidad de energía. Estos métodos principalmente lo constituyen operaciones para reducir de tamaño las rocas provenientes del frente de explotación y clasificación de los tamaños de las partículas producidas en las operaciones previas, con el objetivo de cumplir con los requerimientos que exijan las operaciones posteriores.

El presente trabajo busca diseñar una herramienta informática que apoye en la selección de equipos de molienda más idóneos para cumplir un determinado objetivo,

diseño que debe ir acompañado de un análisis de las variables más influyentes en el proceso de molienda, a fin de optimizar marcadores de interés como el consumo energético de la operación. El programa, hace un análisis sistemáticos de todas las variables involucradas en el proceso de molienda; la manera de realizar estos cálculos es basándose en unas relaciones teóricas propuestas para el dimensionamiento de molinos dichas relaciones toman en consideración todas estas variables, el enfoque que se le dio a esta aproximación fue el de adaptar este concepto a conocer las dimensiones óptimas de un molino, así se estructuraron todas estas ecuaciones para finalmente diseñar que funcione como interfaz de usuario sencillo y que permita formar un criterio de selección de equipos n base al consumo energético y la capacidad.

Varios investigadores sugieren que parámetros como el grado de moliendabilidad de un material no sólo está relacionado a las características físico-químicas del mismo sino también a los parámetros físicos del equipo; es por ello que para optimizar la selección de molinos se hace necesario evaluar todos los factores que pudieran o no influir en el desenvolvimiento óptimo de las operaciones.

Este trabajo está estructurado de la siguiente manera: en el primer capítulo, se describen las generalidades del trabajo, es decir el Planteamiento del Problema y los objetivos planteados; el capítulo dos está estructurado con los antecedentes de la investigación, las bases teóricas en donde se presentan todas las relaciones utilizadas en el estudio y hay un pequeño apartado en donde se habla un poco de los aditivos para las mezclas de cemento; el capítulo tres está compuesto por el Marco Metodológico, en él se detallan los pasos seguidos para el desarrollo del estudio; el capítulo cuatro que abarca el Análisis de los Resultados, está compuesto por los siguientes ítems: la caracterización de las muestras ensayadas, los ensayos de laboratorio realizados, la simulación en el programa generado y la validación del mismo. Finalmente se presentan las Conclusiones y Recomendaciones.

**CAPÍTULO I**  
**GENERALIDADES**

## **1.1) PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.**

La preparación mecánica de los minerales para su uso posterior comienza con operaciones mecánicas de reducción de tamaño y clasificación que buscan cumplir con los requerimientos de las plantas, por lo que la optimización de las operaciones de trituración y molienda del mineral se vuelve imprescindible, ya que en ellas se consume la mayor cantidad de energía dentro de la planta, lo que incide sobre el costo de producción; por lo tanto, la mala selección de uno de estos equipos provoca un aumento en el consumo energético y en el costo de la operación

De manera que si se conociera un marcador que pueda ser optimizado con criterios que apoyen la selección de molinos para asegurar así un nivel operacional adecuado, al menor consumo y costo.

De allí, nace el interés en proponer el diseño de un programa de simulación, que brinde un criterio básico sobre el cual basar la selección de molinos, optimizando así este proceso.

## **1.2) OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN**

### **1.2.1) OBJETIVO GENERAL:**

Diseñar un programa de simulación que optimice la selección de molinos cilíndricos de bolas o barras para el tratamiento de minerales no metálicos, a partir de ensayos realizados en el laboratorio de preparación de minerales de la Universidad Central de Venezuela.

### **1.2.2) OBJETIVOS ESPECÍFICOS:**

- Caracterizar los minerales a ensayar, para conocer la composición químico-mineralógica de cada uno.
- Calcular el consumo energético del proceso de reducción de tamaño de cada material, en ensayos de molienda a nivel de laboratorio, aplicando la teoría de consumo de Energía de Bond.
- Generar un programa de simulación para la selección de molinos, en un demo del programa MATLAB v7.10, a partir del estructuramiento de las relaciones de escalamiento de molinos a utilizar para cada caso.
- Proponer un criterio de selección de molinos para cada mineral ensayado, al esquematizar los resultados arrojados por el programa que deberá ser validado.

### **1.2.3) JUSTIFICACIÓN**

Las operaciones de reducción de tamaño imprescindibles en las plantas de tratamiento y preparación de minerales son las que consumen más energía dentro de las labores, por tanto, la mayor parte del costo de la producción se ve reflejado en éstas, siendo la molienda la que resulta más costosa en términos de consumo/producción. Este consumo energético se debe básicamente a dos causas: la obsolescencia de los equipos y/o la mala selección de éstos. En cuanto a la obsolescencia es algo inevitable, cuyas consecuencias se pueden mitigar mediante el mantenimiento, pero al hablar de mala selección surge inevitablemente la duda ¿Sobre qué criterio debe basarse el encargado de la planta para adquirir un molino?

Este criterio debe estar acompañado de resultados que sean lógicos y empíricamente demostrables, debe además brindarle a el/la interesado/a la libertad de modificar ciertas variables y obtener varias simulaciones y a partir de éstas seleccionar la que más se ajuste a sus necesidades. En el proyecto que se plantea, se pretende diseñar un programa sencillo que permitirá hacer un análisis sistemático de todas las variables físicas involucradas en la molienda; esta simulación arrojará diferentes modelos para cada escenario y a partir de estos resultados, el usuario debería poder contar con un criterio confiable sobre el cual basarse al momento de seleccionar un molino. El criterio se fundamenta en la elección de un equipo cuya capacidad sea óptima y cuyo consumo energético sea el menor posible, asegurando así un bajo costo en las operaciones industriales.

**CAPÍTULO II**  
**MARCO TEÓRICO**

## 2.1) ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN.

Herbst J. A. y Fuerstesnau D.W. Procedimiento de diseño de escalamiento para un molino continuo mediante el uso de modelos de balance de población. ***“Scale-up Procedure for continuous Grinding Mill Design using Population balance Models”***, publicaron un estudio donde presentaron desarrollo de un procedimiento para el escalamiento de un molino basado en modelos de balance poblacional en circuitos de molienda. En el estudio, se examinaron diferentes modelos señalando varios grados de detalle en ruptura cinética, transporte de material a través del molino y el comportamiento del clasificador. Como resultado se demostró la valía del uso del concepto de consumo energético en modelos cinéticos para el diseño de molinos comerciales. Department of Metallurgical Engineering, University of Utah, Salt Lake City, Utah, USA (1980).

Gupta V.K. Zouit H. y Hodouin D. en: Efectos de las bolas y diámetros de molinos sobre parámetros de molienda en operaciones de molienda en seco. ***“The effect of Ball and Mill Diameters on Gringing Rate Parameters in Dry Grinding Operations”***, concluyeron que el tamaño de la partícula luego de la molienda es independiente de la carga moledora (en este caso bolas) y del diámetro del molino y en base a ello, desarrollaron una correlación para describir el efectos de éstos sobre los parámetros de molienda. Groupe de Recherche en Automatisation appliqué à l’Industrie minérale (GRAAIM), Quebec, Canada (1985).

I.B. Klymowsky y A.L.M. Rijkers en: Uso de los datos provenientes de molinos a pequeña escala y técnicas de simulación computarizada para el escalamiento y diseño de molinos semiautógenos (SAG) ***“The use of data from small-scale mills and computer simulation techniques for scale-up and design of SAG mill circuits.”***, concluyeron que los molinos semi autogenos (SAG) de pequeña escala pueden ser usados para el diseño de molinos industriales SAG, que el escalamiento puede

realizarse sin problemas con la formulación disponible y que este tipo de simulación ha resultado ser muy precisa en cuanto a los resultados, para llegar a estas conclusiones los autores realizaron comparaciones de los resultados que obtuvieron con molinos SAG de tamaño real, específicamente estas comparaciones se centraron en: consumo energético y la distribución de tamaño en el producto. International Journal of mineral processing, Elsevier, Amsterdam, The Netherlands (1996).

Coello A., Tijonov O. Molienda de Minerales Multicomponentes: Modelo íntegro-diferencial para la valoración de la energía “*Multicomponent Grinding: Integrate-Differential Model for Energy Evaluation*”. En el artículo se realiza un análisis crítico-valorativo sobre los modelos que describen la relación matemática entre la energía consumida en la molienda y la reducción dimensional así como sus limitaciones para la evaluación de la energía en la molienda de poliminerale. A partir de esto se proponen importantes adecuaciones modelo de Tijonov, que derivan en uno nuevo para la valoración de la energía en la molienda de minerales multicomponentes. El modelo propuesto no sólo permite la determinación del consumo de energía de cada componente de la mezcla mineral en su molienda conjunta, sino también los flujos energéticos de cada clase de tamaño de cada componente de la mezcla. Rusia (2001)

Rodríguez L. “Estudio del comportamiento granulométrico de menas de Hierro de bajo tenor en el proceso de reducción de tamaño en la planta piloto de concentración de C.V.G. FERROMINERA ORINOCO, C.A. Ciudad Piar, estado Bolivar”. Este Trabajo se basó en el estudio del comportamiento granulométrico de las menas de hierro de bajo tenor en el proceso de reducción de tamaño en los circuitos de conminución en planta. De los resultados, se pudo conocer que el material de alimentación a la trituración, posee un alto contenido de material fino cuyo tamaño corresponde a la alimentación de la molienda, por lo cual se recomienda hacer una clasificación de la alimentación al triturador primario o rediseñar el circuito de trituración. Por otro lado, el material de alimentación al molino posee un tamaño que

se corresponde con la descarga del mismo, por lo que se recomienda hacer una clasificación más selectiva en la última etapa del circuito de trituración. UCV (2001).

Maiolino R., Navas H., “Reducción de tamaño de laterita Ferruginosa, sector El Menito, estado Zulia.”. Aquí, se buscó adecuar los circuitos de reducción de tamaño a escala de laboratorio y planta piloto para el material a fin de direccionar las estrategias de comercialización de la empresa. Se logró, caracterizando química, física y mineralógicamente la mena que posteriormente fue sometida a trituración primaria, secundaria y molienda en húmedo, por último, se logró controlar los parámetros del equipo para obtener los resultados esperados: un porcentaje de material retenido y un 88.6% de material con las características deseadas, por la descarga superior del molino. UCV (2004).

Osorio A., Peláez J. F., Sánchez R., Rodríguez N., Fidelgranda C., Restrepo G., “Elaboración de Nomogramas de propiedades e Implementación del Índice de Trabajo de Bond para la Molienda de Clínker de Cemento”. Evaluaron la molienda de un clínker de cemento y en los ensayos variaron ciertos marcadores como: carga de bolas, tiempo de residencia y velocidad; se implementó además el cálculo del índice de trabajo de Bond para molinos con dimensiones diferentes y se concluyó que éste valor energético varió levemente al hacer las modificaciones en los experimentos. *Scientia et Technica*, Colombia (2007).

Osorio A., Restrepo G., y Marín J., “Molienda de clinker de cemento: evaluación de la influencia de la velocidad de giro del molino, el tiempo de residencia y la carga de los medios de molienda”. Evaluaron la molienda de clínker en un molino de bolas, variando: velocidad, tiempo de residencia y carga moledora; determinaron también propiedades físico químicas y granulométricas de las muestras y concluyeron que la cantidad de masa pasante de 45 micras crece al aumentar la velocidad del molino y en menor proporción al incrementar el tiempo y que la carga moledora resulta insignificante al evaluar la capacidad con relación a las variaciones. Colombia (2009).

## **2.1) BASES TEÓRICAS**

### **2.1.1) Molienda**

Según Kelly (1990) y Wills (1997), se habla de molienda cuando el tamaño de las partículas a procesar es menor a 2.54 cm (1”) de diámetro. En cambio, Peláez (1976) considera que el tamaño de partícula debe estar entre 1.91 – 1.27 cm (3/4 – 1/2”).

El objetivo fundamental de la molienda es reducir partículas desde algunas decenas de milímetros hasta algunas decenas de micrones, con el fin de obtener un tamaño apropiado para los procedimientos de concentración subsiguientes, ya que el mineral alimentado presenta una distribución de tamaño de partículas que depende de las características de la mena y de los procesos de trituración. Ésta se considera como la última etapa de las operaciones de reducción de tamaño y puede absorber más del 40% de los costos totales directos de operación de una planta. (Mining Engineering Handbook, SME, 1992)

En procesamiento de minerales, el interés básico está dado en una molienda justa y en la energetización superficial de las partículas, fundamentalmente para incrementar las propiedades físico-químicas necesarias en algunos procesos de concentración (ejemplo: flotación).

Los equipos comúnmente empleados para lograr la reducción de tamaño en esta etapa son los molinos de tambor o molinos rotativos horizontales, los cuales aplican una pequeña fuerza de fractura a un gran número de partículas, lográndose el efecto mediante el uso de medios de molienda para que se produzca predominantemente fractura por una combinación de impacto y fricción.

Los molinos de tambor consisten en un tambor hueco, cerrado por tapas laterales, en cuyos centros se tienen unos muñones huecos por los que entra y sale el género (Figura 1). Los molinos giran alrededor de un eje horizontal. Éstos contienen en su

interior a los cuerpos moledores, los cuales, al girar el tambor, son arrastrados por su superficie interna ascendiendo hasta alcanzar un equilibrio dinámico. Los medios de molienda descenden en caída libre (efecto catarata) o rodando uno sobre otro (efecto cascada).

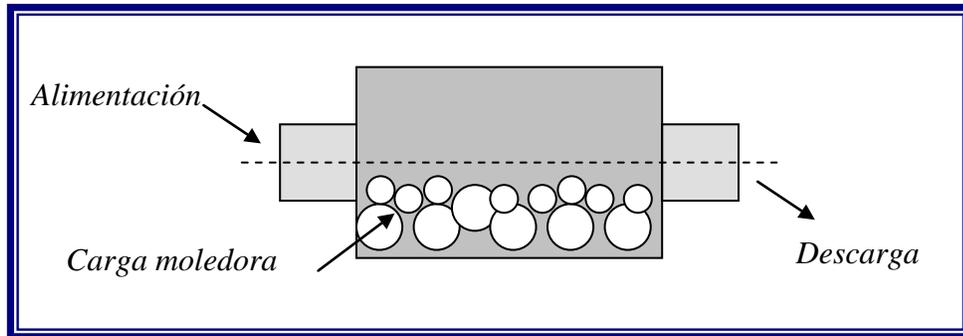


Figura 1.: Molino de bolas horizontal rotatorio o de tambor. Fuente: Rodríguez L. (2001)

La fragmentación resulta de los choques y de los impactos de los cuerpos moledores sobre los granos, al igual que el roce y la abrasión de los sólidos entre ellos. La abrasión es preponderante cuando las partículas vienen finas.

Los molinos se caracterizan por el diámetro interior ( $D$ ) del tambor y por la longitud de trabajo ( $L$ ). De allí que, de acuerdo a la forma del tambor los molinos pueden ser cilindro - cónicos o cilíndricos. Éstos últimos se subdividen en cortos, alargados y tubulares. En los molinos cortos, la longitud ( $L$ ) es menor que el diámetro ( $D$ ) o próximo a él; en los alargados, alcanza 2 – 3 veces el diámetro y en los tubulares, la longitud del tambor es mayor que el diámetro en no menos de 3 veces. (Andréiev, 1987) (Figura 2)

La longitud y el diámetro del molino determinan su volumen y por lo tanto la capacidad del mismo. (Wills, 1997)

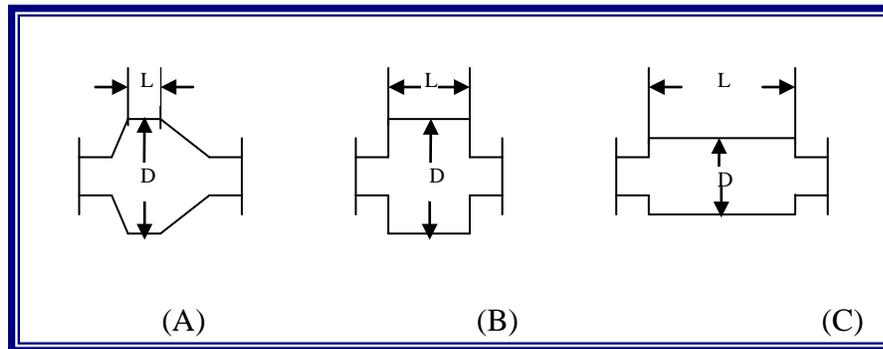


Figura 2: Tipos de Molinos según la Forma del Tambor: (A) cilindro – cónicos,

(B) cilíndrico corto, (C) cilíndrico alargado y tubular. (Andréiev, 1987) Fuente: Rodríguez L. (2001)

Según la naturaleza y forma de la carga moledora los molinos de tambor han sido clasificados, de acuerdo a varios autores, como se indica en la Tabla 1.

Tabla 1. Clasificación de los Molinos según varios autores. Fuente: Maiolino et al (2004)

| AUTOR           | CLASIFICACIÓN                   | CARGA MOLEDORA               |
|-----------------|---------------------------------|------------------------------|
| PELAEZ (1976)   | Molino de Bolas                 | Bolas                        |
|                 | Molino de Barras                | Barras                       |
|                 | Molino de Guijarros o Tubulares | Guijarros o Trozos de Mena   |
|                 | Molino de Mineral o Autógeno    | Mena                         |
| ANDREIEV (1987) | Molino de Bolas                 | Bolas                        |
|                 | Molino de Varillas              | Varillas                     |
|                 | Molino de Grava                 | Grave desmenuzada de sílice  |
|                 | Molino de Autodesmenuzamiento   | Trozos grandes de Mena       |
| KELLY (1990)    | Molino de Bolas                 | Bolas                        |
|                 | Molino de Barras                | Barras                       |
|                 | Molino Autógeno                 | Mena                         |
|                 | Molino de Guijas*               | Trozos seleccionados de Mena |
| SME (1992)      | Molino de Bolas                 | Bolas                        |
|                 | Molino de Barras                | Barras                       |
|                 | Molino de Pebbles               | Bolas de porcelana, , mena   |
|                 | Molino Autógeno                 | Mena                         |
| WILLS (1997)    | Molino de Bolas                 | Bolas                        |
|                 | Molino de Barras                | Barras                       |
|                 | Molino Tubular**                | Bolas, Barras o Pebbles      |
|                 | Molino Autógeno                 | Mena                         |

\* Variante del molino autógeno.

\*\* Variante del molino de bolas.

En dependencia del método de descarga del producto molido, se distinguen los molinos de descarga por rebose y los molinos de descarga forzada a través de una rejilla.

La molienda puede realizarse en seco o en húmedo. En la molienda seca la descarga del material se lleva a cabo por una corriente de aire, que se origina al extraer el aire del tambor, mientras que en la molienda húmeda el material es arrastrado por una corriente de agua de desagüe. Ésta última presenta ciertas ventajas en cuanto al rendimiento energético, la eliminación de los polvos y una menor alteración de las partículas, además, acondicionan el mineral y favorecen a muchos procesos de beneficio de menas de minerales. Los cuales son efectuados cuando el mineral se encuentra en forma de pulpa.

Para Benavides (s/f), se distinguen tres tipos de molienda de acuerdo al tamaño de partícula de los productos:

Molienda gruesa: producto de 3 a 2 mm hasta 0,5 mm.

Molienda media: producto de 0,5 mm hasta 0,1 mm.

Molienda fina: producto inferior a 0,1 mm.

Generalmente junto con las operaciones de molienda se lleva a cabo una clasificación, ambas actividades se realizan en circuito cerrado, cuyas ventajas se enumeran a continuación:

Disminución de la sobremolienda y mejor control del tamaño del producto. Con la carga circulante, aumenta el flujo a través del molino, por lo que el tiempo de residencia de las partículas en el molino disminuye. Habiendo un clasificador en la salida, las partículas finas que se hayan producido son sacadas del proceso, mientras que las gruesas retornan hasta que alcancen el tamaño de corte del clasificador.

Aumento de la capacidad del molino. El hecho de que las partículas finas son eliminadas rápidamente del circuito, inmediatamente cuando alcanzan el tamaño adecuado, hace que la energía que se consumiría en sobremolienda quede disponible para moler mayor cantidad de mineral fresco.

### **Consumo energético en la molienda:**

#### ***Teorías:***

1. **Rittinger (1867)**. Establece que la energía consumida en la reducción de tamaño es proporcional al área de la nueva superficie producida por la fractura, y que ésta es inversamente proporcional al diámetro de la partícula. La Ec. (1) ilustra esta relación.

$$E = k * \left( \frac{1}{D_2} - \frac{1}{D_1} \right) \quad \text{Ec. (1)}$$

Donde:

**E**=Energía consumida

**D<sub>2</sub>**= Diámetro final

**D<sub>1</sub>**= Diámetro inicial

**K**= Constante

2. **Kick (1885)**. Estableció que el trabajo requerido para la reducción de tamaño es proporcional a la reducción en volumen de las partículas en cuestión. La Ec. (2) ilustra esta relación.

$$E = \frac{1}{0,301} \times \log \frac{F}{P} \quad \text{Ec. (2)}$$

Donde:

**E**=Energía consumida

**F**= Diámetro promedio de las partículas en la alimentación

**P**= Diámetro promedio de las partículas en el producto

3. **Bond (1960)**. Desarrolló una ecuación (Ec. (3)), en la que se postula que el trabajo consumido es proporcional a la longitud producida en el quebrado de la partícula y que esta longitud es inversamente proporcional a la raíz cuadrada del diámetro. En esta ecuación se hace uso de los tamaños en micrómetros del 80% pasante de 100  $\mu\text{m}$  de la alimentación y de la descarga (**F<sub>80</sub>** y **P<sub>80</sub>** respectivamente).

$$E = Wi \times \left[ \frac{10}{\sqrt{F_{80}}} - \frac{10}{\sqrt{P_{80}}} \right] \quad \text{Ec. (3)}$$

### 2.2.1) Factores a considerar en el dimensionamiento de molinos

#### Postulados para el dimensionamiento de molinos horizontales.

Cuando se quiere describir un sistema de molienda, existen diferentes caminos con distintos niveles de complejidad que pueden ser usados *Austin (1994)*. Éstos son:

- 1) **Método de la energía específica global**: Cuyo objeto es determinar experimentalmente la capacidad de molienda de un material desde una

alimentación conocida a un producto determinado en el laboratorio. En este, se supone que la energía específica de molienda para un producto señalado es independiente del diseño del molino o de su operación esta aproximación tiende a resultar errónea puesto que la energía específica de la molienda deba mantenerse constante, no estudia los problemas relacionados a las limitaciones del flujo másico, las condiciones de óptima operación, etc.

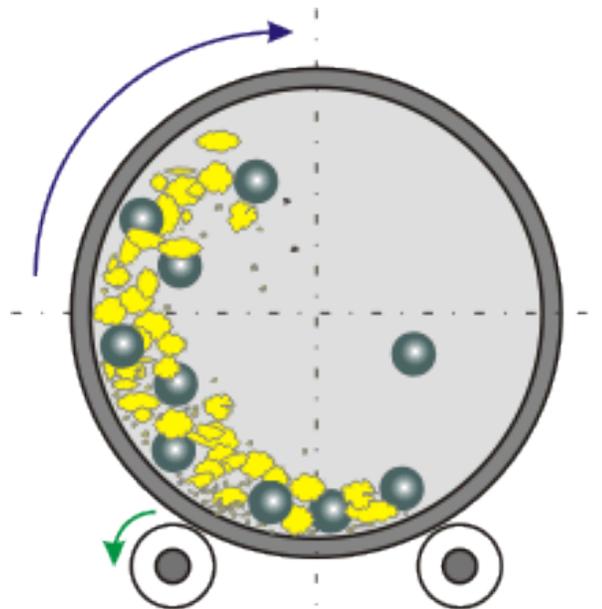
- 2) **Métodos globales Bond/Charles:** Este método utiliza elementos del Método anterior y agrega relaciones empíricas, como las de la “Ley” de Bond o la “Ley” de Charles, que describen cómo la energía específica de molienda varía con cambios en el tamaño de la alimentación o el tamaño del producto. Se utilizan factores de escalamiento y a menudo es necesario hacer una serie de correcciones empíricas basadas en experiencias previas para obtener resultados correctos.
- 3) **Método de balance tamaño-masa:** Consiste en realizar un balance de tamaño y de masa completo para todos los tamaños de partículas del molino, utilizando los conceptos de velocidad específica de fractura, distribución de fractura primaria, distribución de tiempos de residencia y una descripción matemática de la acción de clasificación.

### **Método de Bond/Charles para el dimensionamiento de molinos.**

El objetivo principal de la reducción de tamaño de menas es el de liberar el mineral de interés de los otros contenidos en el cuerpo de la mena. La Trituración por sí sola no cumple completamente con este fin por lo que se hace necesaria una reducción de tamaño más eficiente, la operación que cumple con este requisito es la Molienda en la que dependiendo del característico proceso molidor del equipo se impartirán fuerzas que se traducen finalmente en la reducción de tamaño deseada. Osorio A. *et al.* (2007), implementaron el índice de trabajo de Bond para dos molinos con

dimensiones diferentes, variando los marcadores como: volumen de la carga, velocidad del molino y tiempo de residencia; con el objetivo de relacionar mediante nomogramas propiedades como: área superficial, número de partículas con el tiempo de residencia.

En un molino rotatorio cargado con el material y la carga moledora (bolas o barras), la carga total es elevada en contra del perímetro del equipo en la dirección del movimiento de este (Figura 3), al llegar a una cierta altura, parte de esta carga cae al fondo del molino creando un efecto cascada que aporta la fricción y el efecto abrasador que logra la fragmentación de las partículas.



*Figura 3: Efecto cascada dentro de un molino de bolas. Peláez (1981) p.68.*

El efecto cascada está directamente relacionado con la velocidad con que rota el molino y a su vez con el consumo energético o la energía suministrada para el proceso, como sus causantes, y como resultado, este efecto cascada y todo lo que implica influye directamente en la capacidad del molino, puesto que mientras más sea la proporción de reducción de partículas al tamaño esperado mayor será el flujo de alimentación que el equipo requiera para continuar con el proceso de manera

continua. Bond (1963) estableció un método para el cálculo de la energía necesaria para la reducción de tamaño de diversos materiales mediante el uso de molinos de barras y de bolas a nivel de laboratorio, el método toma en consideración parámetros como las dimensiones del equipo en el que se realizará el ensayo, características de la carga moledora, entre otros. La versatilidad del mismo es poder realizarlo a nivel de laboratorio, en condiciones controladas para poder de esa manera establecer un valor promedio en cuando al suministro energético necesario para el proceso de molienda, dicho valor es conocido como Índice de trabajo de Bond ( $W_{it}$ ).

### **Ensayo de Bond para molino de bolas.**

El ensayo primeramente requiere de la medición de las proporciones del molino así como de la carga moledora, Bond (1963) propone que para un ensayo ideal, un molino debería contar con las siguientes medidas: un diámetro de 30,5 cm y un largo de 30,5 cm y para las bolas diámetros aproximados que varían entre 1,5 y 4,4 cm; sin embargo, éstas condiciones propuestas por Bond son ideales, al final, las medidas tomadas al equipo en laboratorio serían sometidas a ecuaciones y a transformaciones que arrojarían resultados ya normalizados para las condiciones presentes, por tanto, estos valores son tomados como referencia. Posterior a esto seguiría el cálculo de la carga del molino, para este apartado se calcula el volumen de las bolas en el molino, se hace uso de la siguiente ecuación referenciada por Osorio, Restrepo, y Marín, (2009).

$$V_{bolas} \cong V_{molino} \times \frac{40\%}{100\%} \times 0,52 \quad \text{Ec (4)}$$

En la Ec. 4, se toma en cuenta la proporción que la carga moledora debería tener en un molino para que el proceso fuera efectivo y que según Peláez (1981), ésta no debiera sobrepasar el 40% del volumen del equipo y un factor de empaquetamiento del material a moler en seco de 0,52.

Conociendo el volumen total que ocuparía la carga moledora en el equipo y conociendo el volumen de cada tipo de bola disponible para el ensayo, en el caso de realizar el mismo con bolas de diferentes proporciones, se podría obtener entonces el número exacto de bolas de cada tipo para el experimento. Luego de conocer esto, es necesario conocer la fracción de material a moler, Bond (1963), propone alimentar al molino con 700 g de material pero esa cifra sería para su ensayo ideal, según Peláez (1981) la proporción de alimentación debería estar entre 8% y 14% del volumen total ocupado por las bolas en el molino.

Finalmente, el ensayo de Bond abarca una serie de cálculos y de medidas a realizar luego del proceso, para cada ciclo de molienda tomando en cuenta el ensayo, el autor recomienda que éste no sobrepase las 50 RPM para materiales de baja tenacidad y 100 RPM en caso contrario. Posterior al primer ciclo se procedería pues a realizar una clasificación granulométrica de la descarga del molino y con estos datos a realizar una serie de operaciones de acuerdo a las siguientes fórmulas:

$$IPP \cong M / 3,5 \quad \text{Ec (5)}$$

En Ec. 5 *IPP* significa producto ideal por periodo (*Ideal Period Product*) y *M* representa la alimentación del molino para el experimento.

Luego del ensayo, se clasifica la descarga usando un tamiz cuyo tamaño correspondería al tamaño deseado del producto para el proceso. En este caso la cantidad de material que cumple la condición del tamaño representaría *m* y el material que no cumple con ella *R*, luego, ese resultado se comprueba teóricamente según la Ec. 6.

$$m \cong Mo - R \quad \text{Ec. (6)}$$

$$APSMF = (1 - ro) \times IPP \quad \text{Ec. (7)}$$

En la Ec. 7 *APSMF*, cantidad de material de tamaño producto en la alimentación, (*Amount of Product Size Material in the Feed*); *ro* representa la fracción de material más grueso que el esperado en la alimentación. En la Ec 8, *NGP* corresponde al cálculo de los gramos netos de producto (*Net Grams of Product*)

$$NGP = m - (1 - ro) \times IPP \quad \text{Ec. (8)}$$

$$G = \frac{[m - (1 - ro) \times IPP]}{N} \quad \text{Ec. (9)}$$

En la Ec. 9, *N* representa el tiempo de permanencia para el periodo, mientras que *G* corresponde a los gramos producidos por revolución. En la Ec. 10, con *N* se calcula el número de revoluciones necesarias para el siguiente período, en el caso de repetir el experimento.

$$N = ro \times IPP / G \quad \text{Ec. (10)}$$

Estas ecuaciones forman parte del ensayo normalizado de Bond, es importante señalar que en éste se persigue obtener el número de revoluciones necesarias para lograr una reducción del material específica; el ensayo se debe realizar repetidamente de manera de hallar el periodo en el cual el valor *G* se estabiliza, o el mismo comienza a tener una disminución en su moda, en ese caso se tomaría en cuenta el último valor de *G* más alto antes del descenso.

Luego de tener este valor, se procedería según la Ec. 11, para obtener finalmente el Índice de trabajo del material. (*W<sub>it</sub>*).

$$W_{it} = \frac{48,95}{A^{0,23} \times G^{0,82} \times \left( \frac{10}{\sqrt{df80}} - \frac{10}{\sqrt{di80}} \right)} \quad \text{kw-h/t} \quad \text{Ec. (11)}$$

La Ec. 11, representa el último paso en la obtención del índice de trabajo para el material; es importante señalar que en esta ecuación se toman en cuenta las

dimensiones de producto esperado ( $A$ ), la dimensión promedio del pasante del 80% del producto luego de la clasificación ( $df_{80}$ ) y la dimensión promedio del pasante del 80% de la alimentación ( $di_{80}$ ) y los gramos producidos por revolución ( $G$ ).

### **Ensayo de Bond para un molino de barras.**

El ensayo propuesto por Bond (1963) para el cálculo de índice de trabajo para un molino de barras es similar al propuesto para un molino de bolas en tanto a la metodología, en un primer momento varían las dimensiones del molino de laboratorio las cuales recomienda el autor: el molino debería tener un diámetro de  $30,5\text{ cm}$  y una altura de  $61,0\text{ cm}$  y girar a una velocidad constante de  $46,0\text{ rpm}$ , para finalmente variar una sola relación Ec. 12 que corresponde al cálculo del producto ideal por periodo (*Ideal Period Product*), para el cálculo de los demás parámetros se hace uso de las Ec. 6, 7, 8, 9 y 10.

$$IPP = M / 2,0 \quad \text{Ec. (12)}$$

Con respecto al cálculo del índice de trabajo  $Wit$  para molinos de barras, se hace uso de la Ec. 13:

$$Wit = \frac{68,2}{A^{0,23} \times G^{0,625} \times \left( \frac{10}{\sqrt{df_{80}}} - \frac{10}{\sqrt{di_{80}}} \right)} \quad \text{kw-h/t} \quad \text{Ec. (13)}$$

La Ec. 14 muestra la relación para el cálculo de la energía específica consumida, donde  $P_{80}$  Y  $F_{80}$  hace referencia a los valores  $\sqrt{df_{80}}$  y  $\sqrt{dp_{80}}$  respectivamente, este valor nos da una idea de la energía real consumida en el proceso sin tomar en cuenta las pérdidas energéticas en el proceso; esta ecuación es válida para ambos escenarios:

$$E = W_{it} \times \left( \frac{10}{P_{80}} - \frac{10}{F_{80}} \right) \text{ kw-h/t} \quad \text{Ec. (14)}$$

Para el diseño de molinos a escala industrial desde resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio, Austin (1973) propuso resolver el problema mediante dos aproximaciones, la primera de ellas, relaciona el consumo energético con el diámetro del molino de bolas y/o barras y el segundo método relaciona la capacidad del molino con el diámetro anterior y a su vez con un factor de escalamiento que está vinculado con otras variables de diseño; las siguientes relaciones fueron referenciadas por Austin, G. y Concha, A. (1994).

### 2.2.2) Postulado de Austin para el Diseño de un molino de bolas.

#### *Primera etapa*

$$W_d = \left\{ \left( \frac{2,44}{D} \right)^{0,2} \times Wit \right. \quad \text{para } D \leq 3,81 \text{ m}$$

$$Wid = 0,914 \times Wit \quad \text{para } D > 3,81 \text{ m} \quad \text{Ec. (15)}$$

En Ec. 15, ( $W_{id}$ ) es el índice de trabajo para el material en un molino de diámetro  $D$ ; sin embargo, para obtener el consumo energético real de la maquinaria bajo estas nuevas condiciones ( $W_i$ ), es necesario el uso de factores de corrección, la Ec. 13 ilustra esta relación.

$$W_i = k \times Wid \quad \text{Ec. (16)}$$

Donde el factor de corrección ( $k$ ):

$$k = k_1 \times k_2 \times k_3 \times k_4$$

Siendo estas constantes para cada tipo de corrección dependiendo del caso de estudio: corrección a molienda seca ( $k_1$ ), corrección por sobre tamaño en la alimentación ( $k_2$ ),

corrección por fineza en la molienda ( $k_3$ ) y corrección por razón de reducción pequeña ( $k_4$ );  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$ , y  $k_4$  respectivamente. Las ecuaciones que rigen dichas correcciones son las siguientes: Ec 17, 18 y 19.

$k_1 = 1,3$  Para molienda seca y

$k_1 = 1$  Para molienda húmeda.

$K_2$ , se corrige si se cumple que:

$$F_{80} > 4000 \times \sqrt{1,1 \times \left(\frac{13}{Wit}\right)}$$

Entonces:

$$k_2 = \frac{\left[\left(\frac{Wit}{1,1}\right) - 7\right] \times \left[\frac{di_{80}}{4000 \times \sqrt{1,1 \times \left(\frac{13}{Wit}\right)}} - 1\right]}{\left(\frac{di_{80}}{df_{80}}\right)} \quad \text{Ec. (17)}$$

Cuando la molienda es fina, tal que:

$P_{80} < 75 \mu\text{m}$ ; entonces.

$$k_3 = \frac{(df_{80} + 10,3)}{1,145 \times df_{80}} \quad \text{Ec. (18)}$$

Para moliendas con relación de reducción pequeña, tal que  $\frac{F_{80}}{P_{80}} < 6$  entonces:

$$k_4 = 1 + \frac{0,13}{\left(\frac{di_{80}}{df_{80}}\right)^{-1,35}} \quad \text{Ec. (19)}$$

$$E = Wi \times \left[ \frac{10}{\sqrt{di_{80}}} - \frac{10}{\sqrt{df_{80}}} \right] \quad \text{Ec. (20)}$$

### Segunda etapa

La Ec. (20) la propuso Bond para el cálculo de energía consumida específica para una relación de reducción determinada y que puede aplicarse para el diseño de molinos a partir de ensayos a pequeña escala; esta energía está basada en la potencia que consume el motor en el eje del molino sin tomar en cuenta las pérdidas eléctricas ( $W_i$ ). Como último paso en el proceso de diseño de molinos, Austin (1973) propuso una última relación en la que la capacidad del nuevo molino ( $Q$ ) está directamente relacionada al diámetro de diseño ( $D$ ) y a un factor de escalamiento ( $Z$ ). Ec. 21.

$$Q = 6,13 \times Z \times D^{3,5} \quad \text{Para } D \leq 3,81 \text{ m}$$

$$Q = 8,01 \times Z \times D^{3,3} \quad \text{Para } D \geq 3,81 \text{ m} \quad \text{Ec. (21)}$$

$$Z = \frac{A \times \left(\frac{L}{D}\right) \times (J - 0,937 \times J^2) \times \left(\varphi_c - \frac{0,1 \times \varphi_c}{2^{9-10 \times \varphi_c}}\right)}{k \times Wit \times \left(10 / \sqrt{df_{80}} - 10 \times \sqrt{di_{80}}\right)} \quad \text{Ec. (22)}$$

De acuerdo a la Ec. 22, la variable  $Z$  relaciona a una constante con valor de 1 ( $A$ ), la relación entre el largo y el diámetro ( $L/D$ ) del diseño del molino este valor depende del criterio del diseñador, el porcentaje que ocupa la carga moledora dentro del molino ( $J$ ), la fracción de la velocidad límite ( $\varphi_c$ ), la constante ( $k$ ), el índice de trabajo calculado según el ensayo de Bond ( $W_{it}$ ),  $P80$  y  $F80$ . Con el planteamiento

anterior se puede conocer cuáles son los parámetros que están directamente relacionados al diseño y selección de un molino cilíndrico de bolas ( $D$ ,  $L/D$  y  $\varphi_c$ ); estos parámetros en su condición de variables le brindan al diseñador la libertad de modificarlos según su criterio y a partir de estas simulaciones, observar que tanto afectan la modificación de cada uno de estos en la capacidad y el consumo energético del nuevo molino.

### 2.2.3) Postulado de Austin para el Diseño de un molino de barras

*Primera etapa.*

$$W_{iD} = \left(2,44 \frac{L}{D}\right)^{0,2} \times Wit \quad \text{para } D \leq 3,81 \text{ m}$$

$$W_{iD} = 0,914 \times W_{it} \quad \text{para } D > 3,81 \text{ m} \quad \text{Ec. (23)}$$

Así como la Ec.15, en el apartado de molinos de bolas, brinda la posibilidad de calcular el índice de trabajo de un material para un diámetro determinado en el caso de molino de bolas; la Ec. 23 hace lo propio, a partir de un diámetro experimental  $D$  y del índice de trabajo de Bond  $W_{it}$  se puede conocer entonces este mismo valor pero para la medida experimental. Sin embargo y así como en el apartado anterior este valor es sólo un estado intermedio para conocer el índice de trabajo real  $W_i$  en este caso se hace uso también de la Ec.13; las relaciones que rigen las correcciones para esta ecuación son las siguientes, según Austin (1973).

$$k = k_1 \times k_2 \times k_3 \quad \text{Ec. (24)}$$

Siendo,  $k_1$  corrección por tipo de circuito:

$k_1 = 1,4$       La alimentación proviene de un circuito abierto.

$k_1 = 1,2$       La alimentación proviene de un circuito cerrado.

En tanto,  $k_2$  conversión a molienda seca y el valor de  $k_2$  en ese caso es de 1,3.

La corrección por sobretamaño en la alimentación  $k_3$  está acotada por la Ec. 25 si se cumple que:

$$F_{80} > 16000 \times \sqrt{1,1 \times \left( \frac{13}{Wit} \right)}$$

$$k_3 = \frac{1 + \left[ \left( \frac{Wit}{1,1} \right) - 7 \right] \times \left[ \frac{di_{80}}{16000 \times \sqrt{1,1 \times \left( \frac{13}{Wit} \right)}} - 1 \right]}{\left( \frac{di_{80}}{df_{80}} \right)} \quad \text{Ec. (25)}$$

Para el cálculo de la energía específica consumida por un molino de barras se hace uso también de la Ec 20.

### *Segunda etapa.*

Similar al apartado 2.1.3 en el que se espera conocer la capacidad  $Q$  a partir de un diámetro óptimo; en el caso de un molino de barras se hace uso de relaciones que parten de los mismos principios. En la Ec. 26 se establece la ecuación general para el cálculo de la capacidad de un molino de barras  $Q$ , en ella se relaciona el diámetro del mismo junto a un factor  $X$  Ec. 27 que a su vez relaciona a otras variables como  $J$ ,  $L/D$ ,  $\varphi_c$ , etc.

$$Q = 5,81 \times X \times D^{3,54} \quad \text{para} \quad D \leq 3,81 \text{ m}$$

$$Q = 7,59 \times X \times D^{3,34} \quad \text{para} \quad D > 3,81 \text{ m} \quad \text{Ec. (26)}$$

$$X = \frac{\rho_b \times \left( \frac{L}{D} \right) \times (J - 0,5871 \times J^2) \times \varphi_c}{k \times Wit \times \left( \frac{10}{df_{80}} - \frac{10}{di_{80}} \right)} \quad \text{Ec. (27)}$$

Al final, lo ideal con estas apreciaciones es conocer cuáles serían las dimensiones físicas que tendrá el nuevo molino a seleccionar y obtener un criterio de selección de un equipo cuyos requerimientos energéticos sean bajos y su capacidad sea la máxima.

### **2.3) ALTERNATIVAS PARA EL CÁLCULO ENERGÉTICO.**

De acuerdo a Austin (2006), los procedimientos estándar para la estimación del índice de trabajo pueden ser divididos en dos categorías: la primera involucra ensayos en partículas individuales de la roca y la segunda categoría involucra ensayos en masas rocosas. Los procedimientos clasificados bajo estas nomenclaturas son:

#### **1. El ensayo de Péndulo de Bond**

En este ensayo se determina la energía requerida para pulverizar una partícula seca de mena mediante el choque de dos martillos. El ensayo es como sigue:

Dos martillos de igual peso aproximadamente 13,6 kg cada uno (Imagen 4) y aproximadamente 70 cm de largo son suspendidos desde dos rims de ruedas de bicicletas. Los martillos son levantados hasta una altura conocida y luego son soltados para que simultáneamente choquen en una pieza de mineral seco. Los martillos inicialmente son elevados hasta que alcancen un ángulo de  $10^\circ$  con la vertical. Luego del impacto la pieza de mineral es revisada para de esa manera registrar el número de fracturas. Si la pieza no está completamente fracturada, los martillos son elevados otros  $5^\circ$  adicionales y la operación es repetida hasta que la pieza esté completamente fracturada. Se deben registrar también las alturas a las cuales los martillos son elevados cada vez.

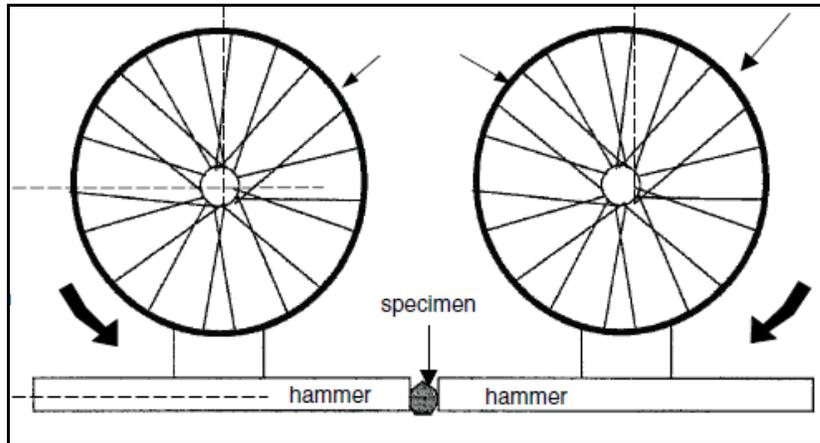


Figura 4: Test de impacto de Bond.

La fuerza de impacto es calculada luego de cada operación según las expresiones:

$$I = \frac{2 \times \text{masa de un martillo} \times \text{altura final del martillo}}{d} \quad \text{kg-m/mm} \quad \text{Ec (28)}$$

Donde:

d= espesor de la muestra (mm)

El valor de I es promediado tomando en cuenta los 10 o 20 ensayos realizados. La fuerza de impacto se determina para calcular el índice de trabajo de Bond mediante la expresión:

$$W_i = \frac{C \times I}{\text{Densidad relativa de la muestra}} \quad \text{kw-h/t} \quad \text{Ec. (29)}$$

Donde:

C es una constante que convierte numérica y dimensionalmente a la fuerza de impacto en el índice de trabajo de Bond; C=2,59 si I ft-lb/in y C=53,49 si I Joules/mm.

## 2. El ensayo de péndulo de Narayana y Whiten

Narayana y Whiten idearon un ensayo para medir la potencia invertida en la trituración de rocas. En este ensayo, el espécimen es facturado por el impacto de un péndulo. Al impactar, parte de la energía es absorbida en el fracturamiento de la muestra, y parte es transmitida al bloque contrario el cual se desplaza por la fuerza del impacto y comienza a oscilar. El remanente energético es disipado como sonido o calor. (Imagen 5)

El desplazamiento  $D$ , del péndulo desde su posición de reposo está dado por:

$$D = L \times \sin \alpha \quad \text{Ec. (30)}$$

Donde  $L$  es la longitud de la cuerda de suspensión y  $\alpha$  es el ángulo formado con la dirección vertical a partir de la posición de reposo.

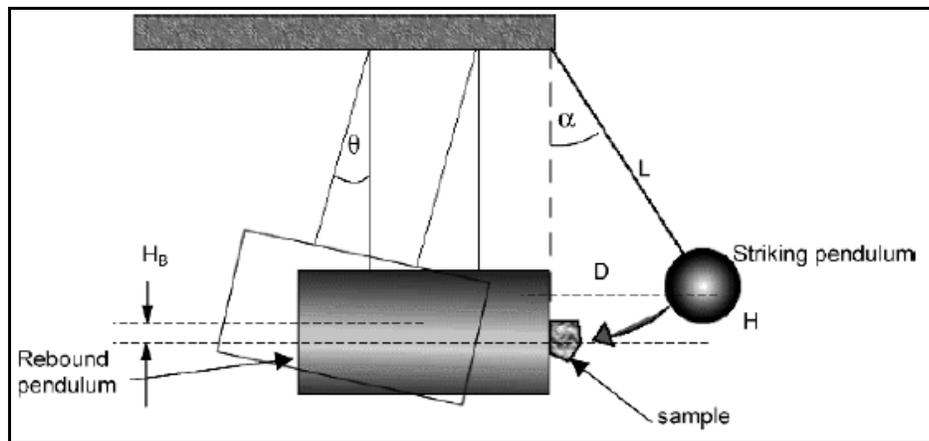


Figura 5: equipo de péndulo de rebote.

#### 2.4) ESTUDIOS RELACIONADOS CON MOLIENDA.

Osorio A. et al: Evaluaron la molienda de un clínker de cemento y en los ensayos variaron ciertos marcadores como: carga de bolas, tiempo de residencia y velocidad; se implementó además el cálculo del índice de trabajo de Bond para molinos con

dimensiones diferentes y concluyeron que el consumo energético varió levemente al hacer las modificaciones en los experimentos.

Gupta V.K. Zouit H. y Hodouin D. estudiaron que el tamaño de la partícula luego de la molienda es independiente de la carga moledora (en este caso bolas) y del diámetro del molino y en base a ello, desarrollaron una correlación para describir el efectos de éstos sobre los parámetros de molienda.

Por otro lado Osorio A. et al. evaluaron la molienda de clínker en un molino de bolas, variando: velocidad, tiempo de residencia y carga moledora; determinaron también propiedades físico químicas y granulométricas de las muestras y concluyeron que la cantidad de masa pasante de 45 micras crece al aumentar la velocidad del molino y en menor proporción al incrementar el tiempo y que la carga moledora resulta insignificante al evaluar la capacidad con relación a las variaciones.

## **2.5) ADITIVOS PARA CEMENTO**

Reciben el nombre de aditivos aquellos productos químicos que se añaden en pequeña proporción a los componentes principales de los morteros o de los concretos, durante su mezclado, con el propósito de modificar algunas de las propiedades de las mezclas en estado fresco o en estado endurecido. Aproximadamente un 80% del peso del concreto u hormigón está compuesto por partículas de origen pétreo, de diferentes tamaños, materiales denominados usualmente como agregados, aditivos, áridos o inertes. Al evaluar la conveniencia o no del uso de un determinado aditivo se deben tomar en cuenta, no sólo las ventajas que se supone reportará su empleo, sino también las precauciones adicionales a respetar durante todo el proceso. Dosis excesivas e aditivos pueden generar reacciones imprevistas (fraguados instantáneos, concreto que no endurece, segregación y exudación excesiva, disminución importante de las

resistencias), y una dosis insuficiente podría no tener efectos; es por ello que conocer las características de estos materiales son decisivas para la calidad de la mezcla del cemento. *Porrero et al (2004), Manual del concreto estructural.*

### **2.5.1) Efectos de los aditivos.**

A continuación se enumeran los efectos generados tras la incorporación de los aditivos a la mezcla.

- **Modificadores de la Relación triangular**

Los aditivos que entrar en esta clase son seleccionados de acuerdo al efecto que predomine en su acción final los cuales pueden ser: a) acción plastificante, b) ahorrador de cemento, c) reductor de agua. Las acciones previamente enumeradas modifican a manera general la relación agua/cemento lo que afectará la resistencia del concreto. Los aditivos agrupados en esta categoría están compuestos por ácidos lignosulfónicos, hidróxidos carboxílicos, carbohidratos, sales de zinc, baratos, fosfatos, entre otros.

- **Acción plastificante**

Esta acción es generada al añadir a la mezcla dosis de aditivos llamados “reductores de agua” y a partir de su acción es generado un incremento en la fluidez del cemento, incremento que es logrado sin modificar la dosis de cemento ni la relación agua/cemento. Éstos aditivos son particularmente útiles en estas situaciones:

- a) Por su facilidad de bombeo, para la fabricación de elementos de concreto pretensado
- b) Por su mayor resistencia a la abrasión en pisos industriales
- c) Donde sea conveniente controlar el calor de hidratación y la retracción.

- **Modificadores de los tiempos de fraguado; aditivos aceleradores.**

Los aditivos acelerados pueden considerarse formando dos grupos: a) los de alta velocidad de reacción y b) los de ganancia más moderada en la aceleración de la reacción. En el primer caso, el fraguado o atiesamiento puede producirse a los pocos segundos de su aplicación, su fundamento químico suele estar basado en una alta alcalinidad con lo cual lograr la aceleración de las resistencias tempranas. Los aditivos de moderada aceleración tienen su principal campo de aplicación en los climas fríos, El acelerador por excelencia es el cloruro de calcio.

- **Aditivos retardadores.**

Los aditivos retardadores de fraguado tienen amplias oportunidades de empleo. Cuando el tiempo requerido para las operaciones de transporte, colocación y vibrado del concreto es mayor que el lapso estimado para el fraguado, es necesario retardar esa reacción.

**CAPÍTULO III**  
**MARCO METODOLÓGICO**

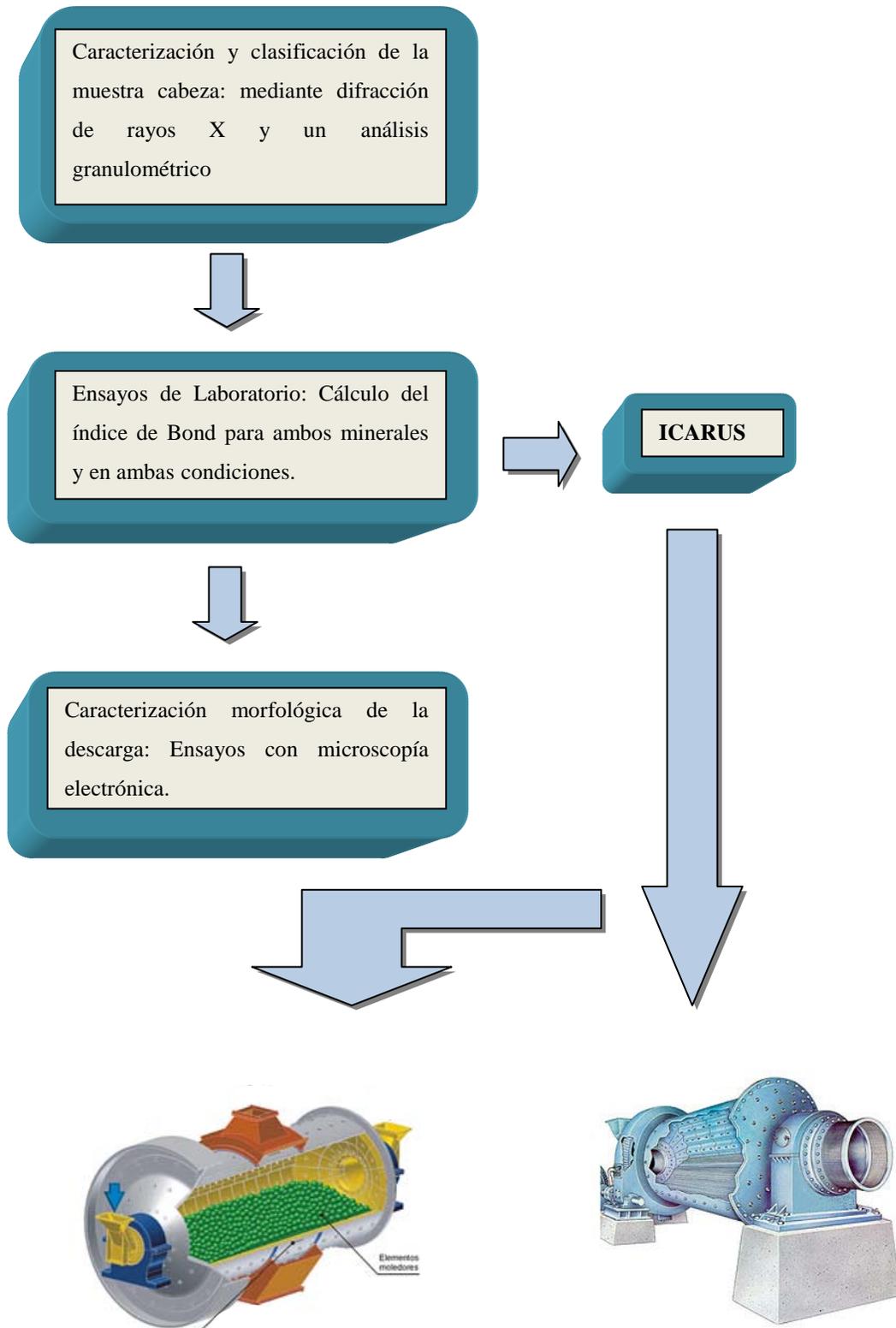


Diagrama 1: Diseño experimental de la investigación.

### **3.1) TIPO DE INVESTIGACIÓN.**

La investigación que se planteó en el proyecto es primeramente correlacional, puesto que se persiguió determinar el grado en el cual una o más variables una vez manipuladas influyen o se relacionan con otras, permitiendo así verificar dichas asociaciones partiendo de un basamento teórico. Es también descriptiva, pues su meta no se limitó a la recolección de datos, sino a la predicción e identificación de las relaciones que existen entre dos o más variables.

### **3.2) DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN.**

Se planteó un diseño experimental cuyo principal objetivo fue el de manipular las variables independientes en los experimentos a nivel de laboratorio y se analizará posteriormente las consecuencias de esta manipulación sobre las variables dependientes, partiendo de unas relaciones teóricas ya establecidas.

De esa forma se partió con el ensayo del cálculo de energía consumida de Bond para molinos de bolas y barras, con el que se buscaba conocer la energía consumida por cada molino para reducir cada uno de los materiales desde el tamaño original hasta el deseado; posteriormente y con todas las relaciones teóricas se diseñó el programa de simulación, el mismo requiere la inserción de los datos obtenidos en el ensayo de laboratorio así como también de la modificación de algunas variables presentes en la formulación a fin de conocer el comportamiento de cada tipo de molino una vez conocidas sus dimensiones a nivel industrial.

### 3.3) POBLACIÓN Y MUESTRA.

En el estudio planteado el universo estaría constituido por los minerales no metálicos, la población estaría representada por lo minerales no metálicos usados como aditivos de cemento *Albita* y *Clinocloro*. (ver *ANEXOS 1* y *2*). Estos aditivos se llamarán: *mineral 1* y *mineral 2* respectivamente. (ver *Figuras 6* y *7*)



*Figura 6: Albita, mineral 1.*



*Figura 7: Clinocloro, mineral 2.*

### 3.4) PARTE EXPERIMENTAL

En el *diagrama 1*, se detallan los pasos a seguir para los ensayos experimentales. En primer lugar se realizó la caracterización y clasificación de la muestra cabeza: mediante difracción de rayos X de la escuela de Geología, Minas y Geofísica de la Universidad Central de Venezuela, y un análisis granulométrico apoyado con una serie de tamices TYLER # 18, 25, 100, 200 y 325. (ver *Figura 9*)

Las características del difractor:

Modelo Phillips. Generador 1130-96

Goniómetro PW 1050/25

Radiación: Cu K $\alpha$

Intervalo angular ( $2\theta$ ): 4 a 80°



*Figura 8: Molino de barras en bancada de Ghaliguer.*



*Figura 9: Batería de tamices.*

Al producto de la molienda se le realizaron análisis granulométricos en los casos molinos de barras y de bolas; con la finalidad de determinar el d80 en cada caso y se estimó la razón de reducción a partir de ello. Se coloca la nomenclatura de los diferentes productos. El montaje experimental se hizo según lo especificado en los ensayos de Bond.

Por otra parte, estos productos fueron analizados a través de la técnica de Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) en modo de electrones secundario SE, con un equipo Jeol, modelo JEE-4X siguiendo la siguiente metodología: Las muestras fueron colocadas en portamuestras de aluminio y se recubrieron con grafito en el evaporador al vacío.

Las condiciones de operación fueron las siguientes:

- Voltaje Acelerador: 15 kV
- Distancia de Trabajo: 10 mm
- Spot Size: 45

- Corriente del filamento: 85  $\mu$ A
- Señal: SEI

El objetivo de los mismos se centró en determinar la morfología de las muestras bajo ambas condiciones dado que la misma es fundamental para de esa manera apoyar aún más el criterio de selección.

Finalmente y luego de tener diseñado el programa de simulación, al mismo se le introdujeron los datos de entrada necesarios para que realizara los respectivos cálculos. Como consecuencia todos los resultados obtenidos a partir de las simulaciones arrojadas permitieron conocer las dimensiones de los molinos de bolas y barras así como también las especificaciones operacionales de los equipos, con los resultados obtenidos, el usuario podrá realizar una comparación y de esa manera seleccionar el equipo más adecuado.

### **3.5) APLICACIÓN DEL PROGRAMA DE SIMULACIÓN BASADO EN EL SOFTWARE MATLAB v7.10**

El algoritmo del programa, que se decidió llamarlo: *ICARUS*, consistió en la estructuración de una serie de relaciones teóricas propuestas por la literatura, que permiten el diseño de molinos cilíndricos de bolas y barras a partir de información obtenida en experimentos de laboratorio; éstas relaciones se estructuraron y se diseñó un programa, una interfaz de usuario sencilla, en la que el mismo pueda conocer los requerimientos que tendría un molino a nivel industrial además de conocer cuáles serían sus características físicas y seleccionar el equipo más recomendable para tratar determinado mineral.

*ICARUS* se diseñó con la estructura del programa de computación *MATLAB v 7.10*, en su versión demostrativa, dicha versión se utilizó por la accesabilidad y

funcionabilidad del lenguaje y también porque permite al programador la obtención de entidades gráficas según requiera la investigación que esté llevando a cabo; estas entidades permitirían en última instancia tener una lectura más precisa de los resultados arrojados por el programa. La limitación de este trabajo es que sin la versión completa solo se pudo utilizar unos módulos del programa debido a las condiciones de ser demostrativo

Se diseñará el programa de manera de que el usuario pueda: introducir la información inicial obtenida en los ensayos de laboratorio, modificar según su criterio las condiciones sobre las cuales esperaría se realice las simulaciones y por último tener un campo de visualización de los resultados arrojados que se complementaria con la generación de los diversos gráficos según los mismos.

### **3.6) ANÁLISIS DE DATOS Y VALIDACIÓN DE LOS RESULTADOS**

El análisis de datos partió una vez el programa de simulación arrojó los resultados para cada estudio, con éstos, los resultados arrojados por el programa pueden ser visualizados en entidades gráficas y de esa manera los mismos pueden ser analizados de manera más sencilla. Una vez analizados cada uno de los gráficos se procedió a comparar los resultados mostrados, esto junto a información adicional en cuanto a los minerales sirvió de apoyo para formar el criterio de selección.

La validación del programa se realizó de la siguiente manera: se compararon los resultados arrojados por *ICARUS* para los dos tipos de molinos evaluados en el presente trabajo, con las especificaciones técnicas de estos mismos equipos que ponen a disposición del usuario las empresas que los distribuyen; básicamente se compararon los siguientes parámetros: diámetro del equipo, largo y consumo energético del mismo.

**CAPÍTULO IV**  
**ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS**

En la etapa experimental, se contó con dos lotes de 20 kg cada uno de dos minerales usados como aditivos de concreto para la elaboración de cemento, ya previamente triturados; en primer lugar, se procedió a la clasificación granulométrica de cada muestra cabeza que alimentaría a cada molino en posteriores análisis, a la par de esto, se remitieron una muestra de cada mineral al laboratorio de análisis químico de la Universidad Central de Venezuela a fin de que se les ensayara mediante difracción de rayos X para así conocer la composición química de cada uno e identificar a que fase geológica pertenece.

Los aditivos de acuerdo a su composición química son añadidos en ciertas proporciones a la mezcla de concreto a fin de que éste adquiera cierta propiedad, en el caso acá señalado, los aditivos ensayados necesariamente deben cumplir con una granulometría específica, y es que como norma su tamaño óptimo debe ser menor a 45 micrones o en otras palabras ser pasante de la malla TYLER # 325. Información que resultó ser importante puesto que para los ensayos posteriores, específicamente el del cálculo del índice de trabajo de Bond, es necesario conocer el tamaño en micrones del tamiz de prueba para de esa manera se pueda calcular el consumo energético. Y fue lo que seguidamente se realizó, se calcularon los índices de trabajo de Bond de cada mineral según el ensayo propuesto por el autor y para cada tipo de molino: bolas y barras.

Por último, se diseñó el programa de simulación, tomando en cuenta las relaciones matemáticas propuestas para el dimensionamiento de molinos partiendo desde equipos a nivel de laboratorio; así, conociendo el índice de trabajo de Bond y de acuerdo al criterio del usuario el programa arrojaría diferentes simulaciones permitiendo elegir de entre ellas la más conveniente para el usuario.

El diseño del programa estuvo orientado a conocer básicamente el consumo energético y la capacidad para diferentes molinos con diferentes dimensiones, el programa se diseñó de manera de brindarle la oportunidad al usuario la posibilidad de variar las dimensiones del equipo y de esa manera poder comparar en base a los

resultados arrojados. Éstos cálculos son realizados en base a las relaciones teóricas propuestas por Austin (1973) para el dimensionamiento de molinos cilíndricos, en principio, el autor postuló estas relaciones con el fin de obtener los parámetros de diseño de molinos sin embargo y como ya se ha mencionado, a fines de la investigación se adaptó esta aproximación al objetivo planteado. Las relaciones matemáticas se pueden clasificar en dos etapas y para ambos tipos de molino, la primera etapa busca calcular el consumo energético que tendría un molino con un diámetro en específico mientras que la segunda etapa está caracterizada por el cálculo de la capacidad de los equipos, en este caso, la capacidad está relacionada con las dimensiones del equipo y con otras características operacionales de la molienda.

#### **4.1) CARACTERIZACIÓN Y CLASIFICACIÓN DE LA ALIMENTACIÓN Y LA DESCARGA.**

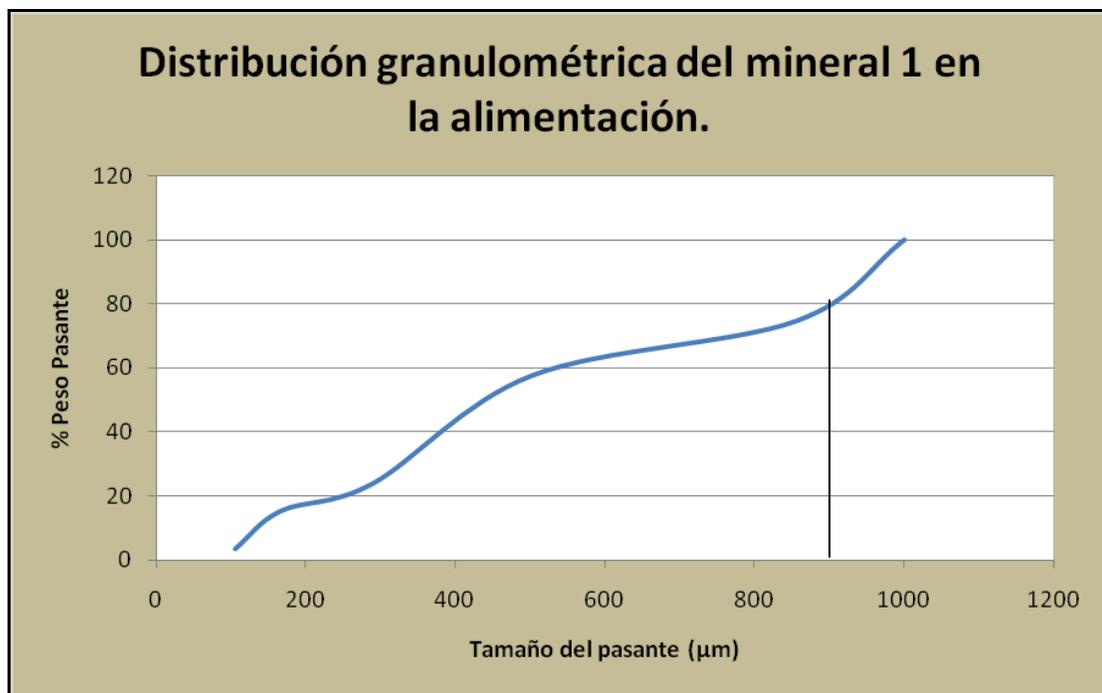
##### ***Serie de tamices***

Los tamices usados para la clasificación granulométrica de los minerales tanto de la alimentación como de la descarga para ambos molinos fueron los tamices de la serie de TYLER # (18, 25, 80, 100, 200 y 325), con tamaños de (1000, 710, 180, 150, 75 y 45)  $\mu\text{m}$  respectivamente. Para clasificar la descarga se usaron los tamices de la serie de TYLER # (100,200 y 325). (ver *Figura 9*)

### *Análisis Granulométrico.*

| Tamices | Tamaño prom ( $\mu\text{m}$ ) | Peso retenido | % Peso Retenido | % Peso Acumulado | % Peso Pasante |
|---------|-------------------------------|---------------|-----------------|------------------|----------------|
| 18      | 1000                          | 150           | 25,42           | 25,42            | 100            |
| 25      | 855                           | 100           | 16,95           | 42,37            | 74,58          |
| 100     | 503                           | 200           | 33,90           | 76,27            | 57,63          |
| 200     | 289                           | 50            | 8,47            | 84,74            | 23,73          |
| 325     | 167                           | 70            | 11,86           | 96,61            | 15,26          |
| -325    | 106                           | 20            | 3,39            | 100,00           | 3,39           |
|         | <b>Total</b>                  | <b>590</b>    | <b>100,00</b>   |                  |                |

*Tabla 2: Análisis granulométrico de la alimentación para el mineral 1.*



*Gráfico 1: Distribución granulométrica del mineral 1 en la alimentación.*

| Tamices | Tamaño prom ( $\mu\text{m}$ ) | Peso retenido | % Peso Retenido | % Peso Acumulado | % Peso Pasante |
|---------|-------------------------------|---------------|-----------------|------------------|----------------|
| 18      | 1000                          | 100           | 14,93           | 14,93            | 100            |
| 25      | 855                           | 140           | 20,90           | 35,83            | 85,07          |
| 100     | 503                           | 360           | 53,73           | 89,56            | 64,17          |
| 200     | 289                           | 30            | 4,48            | 94,03            | 10,44          |
| 325     | 167                           | 20            | 2,99            | 97,02            | 5,97           |
| -325    | 106                           | 20            | 2,99            | 100,00           | 2,98           |
|         | <b>Total</b>                  | <b>670</b>    | <b>100,00</b>   |                  |                |

Tabla 3: Análisis granulométrico de la alimentación para el mineral 2.

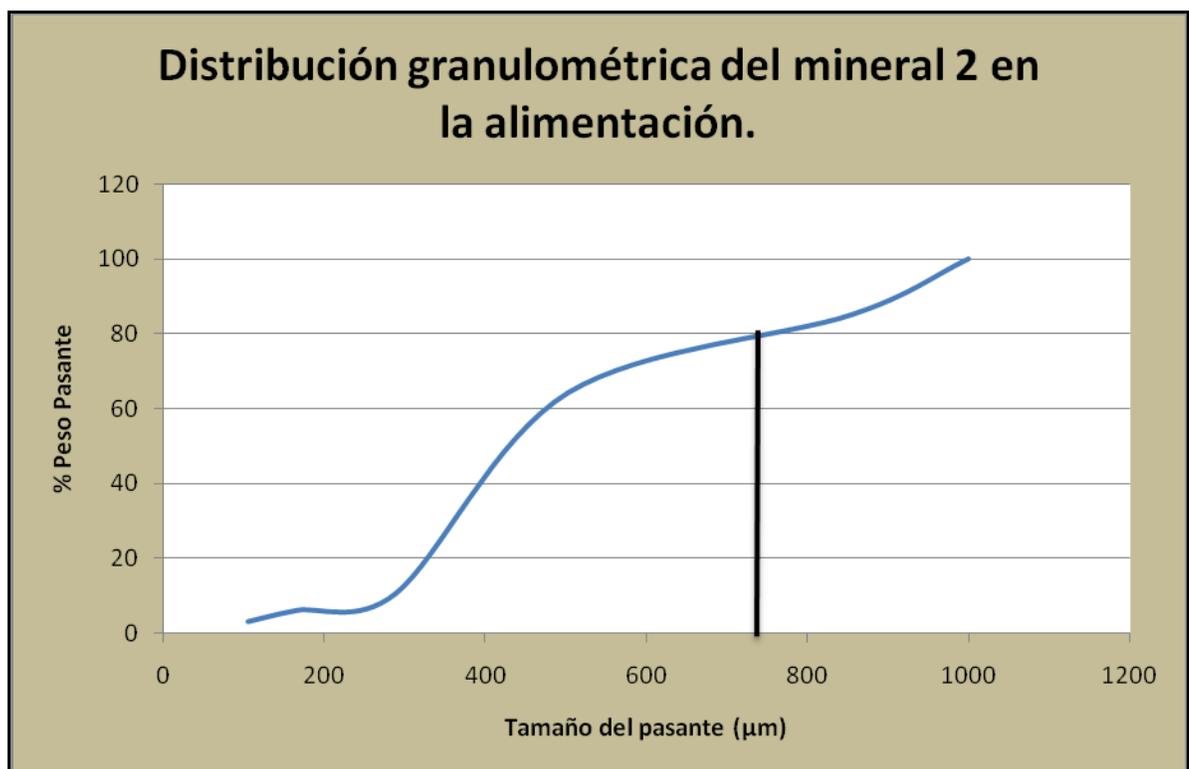


Gráfico 2: Distribución granulométrica del mineral 2 en la alimentación.

| Tamices | Tamaño prom ( $\mu\text{m}$ ) | Peso retenido | % Peso Retenido | % Peso Acumulado | % Peso Pasante |
|---------|-------------------------------|---------------|-----------------|------------------|----------------|
| 100     | 503                           | 29,4          | 14,73           | 14,73            | 100            |
| 200     | 289                           | 111,6         | 55,91           | 70,64            | 85,27          |
| 325     | 167                           | 47            | 23,55           | 94,19            | 29,36          |
| -325    | 106                           | 11,6          | 5,81            | 100,00           | 5,81           |
|         | <b>Total</b>                  | <b>199,6</b>  | <b>100,00</b>   |                  |                |

Tabla 4: Análisis granulométrico de la descarga para el mineral 1.

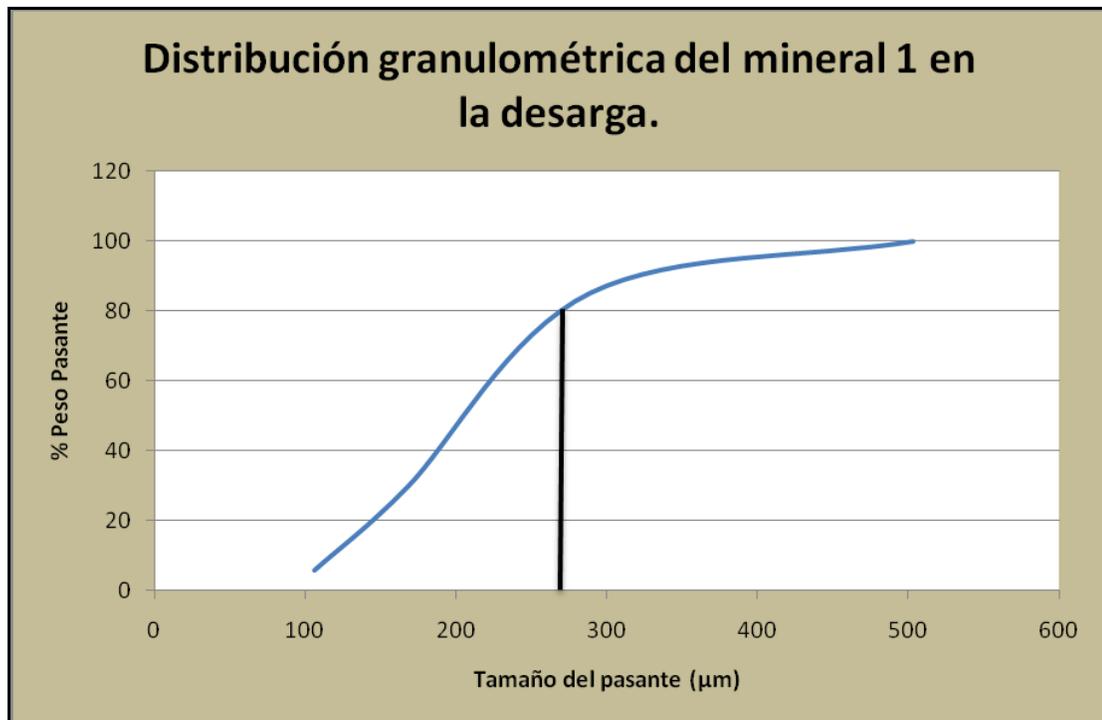


Gráfico 3: Distribución granulométrica del mineral 1 en la descarga.

| Tamices | Tamaño prom ( $\mu\text{m}$ ) | Peso retenido | % Peso Retenido | % Peso Acumulado | % Peso Pasante |
|---------|-------------------------------|---------------|-----------------|------------------|----------------|
| 100     | 503                           | 27,8          | 14,07           | 14,07            | 100            |
| 200     | 289                           | 77            | 38,97           | 53,04            | 85,93          |
| 325     | 167                           | 65            | 32,89           | 85,93            | 46,96          |
| -325    | 106                           | 27,8          | 14,07           | 100,00           | 14,07          |
|         | <b>Total</b>                  | <b>197,6</b>  | <b>100,00</b>   |                  |                |

Tabla 5: Análisis granulométrico de la descarga para el mineral 2.

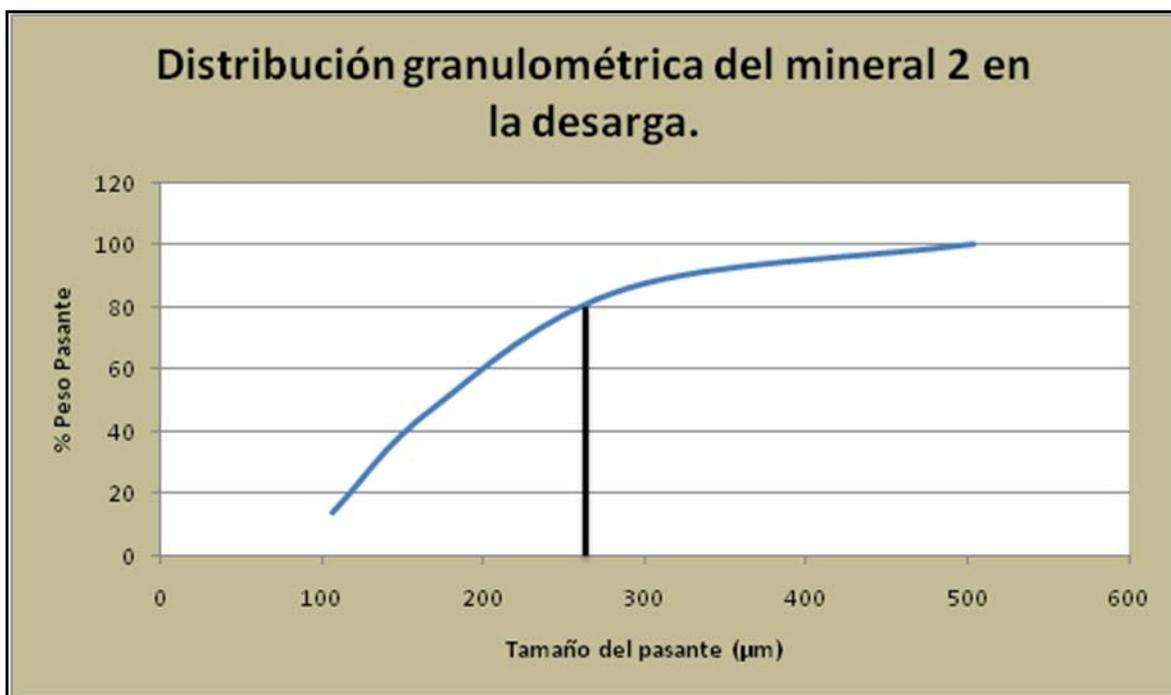


Gráfico 4: Distribución granulométrica del mineral 2 en la descarga.

Con base a los resultados ilustrados en las *Tablas 2,...*, 5 y los *Gráficos 1,...*, 4 se deduce que el tamaño por el cual pasa el 80% de la alimentación **di80** corresponde a 900  $\mu\text{m}$  y 270  $\mu\text{m}$  para M1 y M2 respectivamente; el tamaño promedio del 80% de las partículas en la descarga **dp80** resultó en 270  $\mu\text{m}$  para ambos minerales; siendo el **F80** 30 y 27 para M1 y M2 respectivamente y **P80** 16,4 para ambos minerales.

El Índice de trabajo de Bond *Wit* se calculó de acuerdo a las relaciones plateadas por el autor. Estos resultados son resumidos en la *Tabla 6*.

|           |           |           |           |             | Mbo          | Mba         |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-------------|--------------|-------------|
|           | di80 (µm) | dp80 (µm) | F80       | P80         | Wit (kw-h/t) | Wit(kw-h/t) |
| <b>M1</b> | 900       | 270       | <b>30</b> | <b>16,4</b> | <b>539</b>   | <b>282</b>  |
| <b>M2</b> | 730       | 270       | <b>27</b> | <b>16,4</b> | <b>378</b>   | <b>338</b>  |

*Tabla 6: resumen de los resultados interpretados de la clasificación granulométrica y cálculo del Wit.*

### ***Caracterización de las muestras: difracción de rayos X***

La difracción por rayos X (DRX) es la técnica más importante no destructiva, para analizar materiales variados, desde líquidos o polvos hasta cristales perfectos. Su aplicación fundamental es la identificación cualitativa de las fases cristalinas de una muestra.

Ambas muestras minerales fueron pulverizadas y entregadas al Laboratorio de análisis químico de la Universidad Central de Venezuela para que se les ensayaran; los resultados arrojados por el ensayo (ver *ANEXOS 1 y 2*) indicaron la siguiente información (ver: *Tablas 6 y ANEXO 1*)

| Ref. Code | Chemical Formula  |
|-----------|---|
| Cuarzo    | Si O <sub>2</sub>   |
| Albita    | Na Al Si <sub>3</sub> O <sub>8</sub>  |
| Muscovita | ( K , Na ) ( Al , Mg , Fe ) <sub>2</sub> ( Si <sub>3.1</sub> Al <sub>0.9</sub> ) O <sub>10</sub> ( O H ) <sub>2</sub> |
| Ortoclasa | K Al Si <sub>3</sub> O <sub>8</sub>   |

*Tabla 6: composición química del mineral 1, DRX.*

De acuerdo a la información arrojada por el ensayo de DRX, el mineral 1 contiene una composición mayoritariamente de *Albita*, mineralógicamente se define como un aluminio silicato de magnesio y hierro perteneciente al grupo de la clorita. De acuerdo a *Jimenez et al (2010)* este mineral es un aditivo de tipo plastificante añadido a la mezcla de concreto.

| Ref. Code  | Chemical Formula  |
|------------|---|
| Cuarzo     | Si O <sub>2</sub>   |
| Albita     | Na Al Si <sub>3</sub> O <sub>8</sub>  |
| Clinocloro | ( Mg <sub>2.96</sub> Fe <sub>1.55</sub> Fe <sub>.136</sub> Al <sub>1.275</sub> ) ( Si <sub>2.622</sub> Al <sub>1.376</sub> O <sub>10</sub> ) ( O H ) <sub>8</sub> |
| Carbonato* | Ca ( Mg , Fe ) ( C O <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>  |

*Tabla 7: composición química del mineral 2: DRX.*

De acuerdo a la información arrojada por el ensayo de DRX, el mineral 2 contiene una composición mayoritariamente de *Clinocloro* perteneciente al grupo de las cloritas. Ver: *Tabla 7 y ANEXO 2.*

Ambos minerales se clasifican dentro de los aditivos para cemento de tipo plastificante, su acción produce un mayor desarrollo de la reacción de hidratación del cemento y reduce la cantidad de agua empleada por su efecto de incluso de aire y humectante.

## 4.2 ENSAYOS DE BOND

Los ensayos fueron realizados en el Laboratorio de preparación de minerales de acuerdo a la metodología propuesta por Bond; las muestras de los dos minerales *Albita* y *Clinocloro* a las que por conveniencias serán llamadas *Mineral 1* y *Mineral 2*. La metodología que se siguió fue la siguiente: era necesario calcular el índice de trabajo de Bond *Wit* para cada material procesado en cada Molino por lo tanto cada material se distribuyó en dos lotes cada uno de los cuales fue ensayado en cada Molino de acuerdo a las condiciones.

Una vez hecho esto, se procedió a hacer un análisis granulométrico de cada material con el fin de conocer parámetros como el tamaño de malla por el cual paso el 80% de la alimentación del equipo y el tamaño por el cual pasa el 80% de la descarga del proceso *F80* y *P80* respectivamente, estos datos junto con el tamaño de partícula requerido en el proceso *45 $\mu$ m* serán necesario al momento de realizar las simulaciones para los diferentes estadíos.

### *Cálculo de la carga moledora.*

#### *Molino de bolas*

El método planteado por Bond (1963), plantea que las condiciones en las que se realicen los ensayos deben ser los más estándar posible, es por ello que para los experimentos se tomaron mediciones de los parámetros que condicionarían la práctica; primeramente, y con base a lo publicado por Osorio, Restrepo y Marín (2009), se midió la velocidad de giro del molino, sus dimensiones así como las dimensiones de las dos tipos de bolas que representarían la carga moledora y se obtuvo de esa manera los volúmenes para cada uno de estos ítems (*ver: Tablas 5, 6, y 7*). Debido a que esos datos resultan de interés para cálculos posteriores.

| Diametro Int. [cm] | Altura [cm] | Volumen [cm <sup>3</sup> ] |
|--------------------|-------------|----------------------------|
| 21,5               | 22          | 7983,1                     |

Tabla 8: Dimensiones del molino

| D1 | D2 | D3 | D. Prom | Volumen [cm <sup>3</sup> ] | Peso prom. [g] |
|----|----|----|---------|----------------------------|----------------|
| 3  | 3  | 3  | 3       | 14,13                      | 123            |

Tabla 9: Dimensiones de la carga, bolas 3 cm.

| D1  | D2  | D3  | D. Prom | Volumen [cm <sup>3</sup> ] | Peso prom. [g] |
|-----|-----|-----|---------|----------------------------|----------------|
| 4,6 | 4,6 | 4,6 | 4,6     | 50,94                      | 520            |

Tabla 10: Dimensiones de la carga, bolas 5 cm.

Luego, con estos datos se calculó el volumen que ocuparía la carga en el molino de acuerdo a Ecuación (31).

$$V_{\text{bolas molino}} = V_{\text{molino}} \times \frac{40\%}{100\%} \times 0.52$$

**Ec. (31)**

En esta ecuación, referenciada por Osorio y otros (2009), se toma en consideración el volumen del molino, el porcentaje que ocuparía la carga dentro de este y un factor de empaquetamiento, de esa manera se obtuvo como resultado que:  $V_{\text{bolas molino}} = 1660,4 \text{ cm}^3$  lo cual representaría un aproximado de **21%** del volumen total del mismo; ahora bien conociendo este valor y el volumen de cada tamaño de bolas, se procedió a calcular el número de bolas y a proponer diferentes combinaciones posibles para el proceso. Ver: *Tabla 11*.

| Bolas peq. | Bolas gran. | Bolas peq. | Bolas gran. | Bolas peq. | Bolas gran. |
|------------|-------------|------------|-------------|------------|-------------|
| 45         | 20          | 63         | 15          | <b>81</b>  | <b>10</b>   |

*Tabla 11: Combinación de la carga.*

La combinación que se tomó como la más viable fue la última con **81** bolas pequeñas y **10** bolas grandes; principalmente para evitar exceso en la producción de ruido durante los ensayos. Ahora bien, según Peláez (1981), para molienda en seco, el peso del material varía entre un **8%** y **14%** del peso de la carga moledora, para el estudio se tomó un aproximado de **10%** lo que equivaldría a **166 g** de material para realizar los ensayos, mientras que la velocidad del molino es de **110 RPM**, manteniéndose esta constante.

#### **Molino de barras.**

Las mismas medidas se tomaron para el Molino de barras; sus dimensiones son: **(15x30.5)cm** lo que indica un volumen total a ocupar de **5387 cm<sup>3</sup>** las dimensiones de las barras son **(2x29,5)cm**, con un total de 12 barras disponibles, éstas ocuparían un volumen aproximado de **1111,5 cm<sup>3</sup>** lo que se traduce en un **21%** del volumen total del molino lo que de acuerdo a la literatura entra en el rango para estos equipos. De acuerdo a la literatura, el volumen del género en un Molino de barras debería ser del **5%** del volumen de la carga moledora, lo cual se traduce en **56 g**.

#### **4.2.1) Molino de Bolas.**

El cálculo del índice de trabajo de Bond **Wit** tal y como se especificó en el Capítulo II, consta de una metodología a seguir, en la cual se van calculando ciertos parámetros hasta que uno de ellos, en este caso **G** (gramos producidos por revolución)

se hace constante o empieza a disminuir en su moda al hacer este experimento de manera repetitiva. Bond planteó esta metodología para el cálculo del índice de trabajo de minerales procesados en molinos de bolas y de barras. Las *Tablas 12 y 13* recogen los resultados obtenidos para ambos minerales.

| N[rpm] | r0 [%] | m [g] | R [g] | IPP   | APSMF [g] | NGP [g] | G [g] | Wit [kw-h/t] |
|--------|--------|-------|-------|-------|-----------|---------|-------|--------------|
| 220    | 0,94   | 10    | 160   | 48,57 | 2,91      | 7,08    | 0,032 | <b>539</b>   |

*Tabla 12: Cálculo de Wit para el mineral 1 en el Molino de bolas.*

| N[rpm] | r0 [%] | m [g] | R [g] | IPP   | APSMF [g] | NGP [g] | G [g] | Wit [kw-h/t] |
|--------|--------|-------|-------|-------|-----------|---------|-------|--------------|
| 220    | 0,71   | 30    | 185   | 54,14 | 15,70     | 14,30   | 0,06  | <b>378</b>   |

*Tabla 13: Cálculo de Wit para el mineral 2 en el Molino de bolas.*

Partiendo de los resultados mostrados en las *Tablas 12 y 13*, y tomando en consideración la caracterización de ambos minerales, se concluye que la composición mineralógica de los materiales influye directamente en la energía requerida por el equipo para el proceso de molienda; siendo que el *mineral 1* tiene una mayor proporción de sílice en su composición que el *mineral 2*, resulta más tenaz al momento de someterse a un quebrantamiento mecánico. Un Molino de bolas requeriría para fracturar el *mineral 2*, un 30% menos de la energía que requiere para procesar el *mineral 1*.

#### 4.2.2) Molino de Barras

Las *Tablas 14 y 15* recogen los resultados obtenidos para ambos minerales en este caso para el Molino de barras.

| N[rpm] | r0 [%] | m [g] | R [g] | IPP | APSMF [g] | NGP [g] | G [g] | Wit [kw-h/t] |
|--------|--------|-------|-------|-----|-----------|---------|-------|--------------|
| 30     | 0,86   | 10    | 62    | 28  | 3,92      | 6,08    | 0,20  | <b>282</b>   |

*Tabla 14: Cálculo de Wit para el material 1 en el Molino de barras.*

| N[rpm] | r0 [%] | m [g] | R [g] | IPP | APSMF [g] | NGP [g] | G [g] | Wit [kw-h/t] |
|--------|--------|-------|-------|-----|-----------|---------|-------|--------------|
| 30     | 0,84   | 10    | 160   | 28  | 4,3       | 5,68    | 0,19  | <b>338</b>   |

*Tabla 15: Cálculo de Wit para el material 2 en el Molino de barras.*

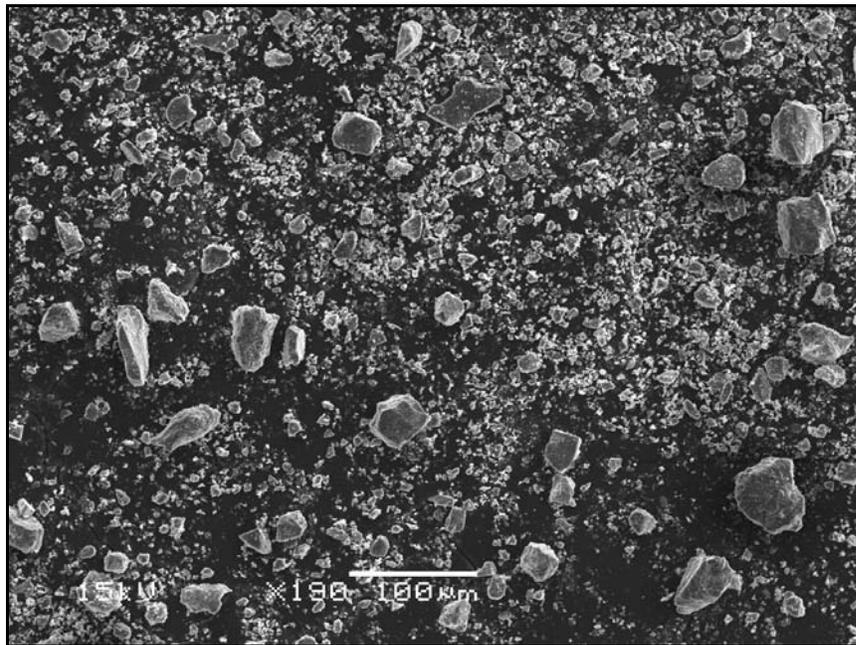
Los resultados mostrados en las *Tablas 14 y 15* no muestran una diferencia sustancial en cuanto al consumo energético por el equipo al procesar ambos materiales. En este caso, la composición mineralógica de los materiales tiene poca o nula influencia al respecto; se intuye que la similitud observada en este dato de deba más bien a la distribución uniforme de la energía a través de cada barra, situación que no sucede en el caso de usar bolas como carga moledora.

El requerimiento energético para procesar ambos materiales es menor en un molino de barras que en un molino de bolas (ver: *Tablas 12, ..., 15*).

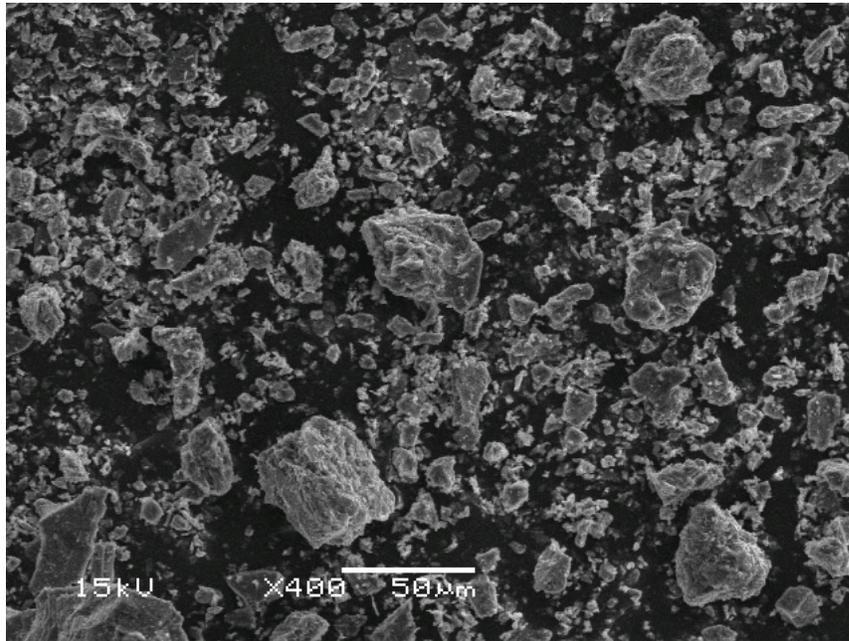
#### 4.2.3) Morfología de la descarga: ensayos realizados con el Microscopio Eléctrico de Barrido (MEB).

Se analizó la morfología de la descarga de ambos minerales y para ambos molinos; estos ensayos fueron realizados en el Laboratorio de microscopía electrónica del Instituto Nacional de Geología y Minería, *INGEOMIN*.

##### *Molino de bolas*



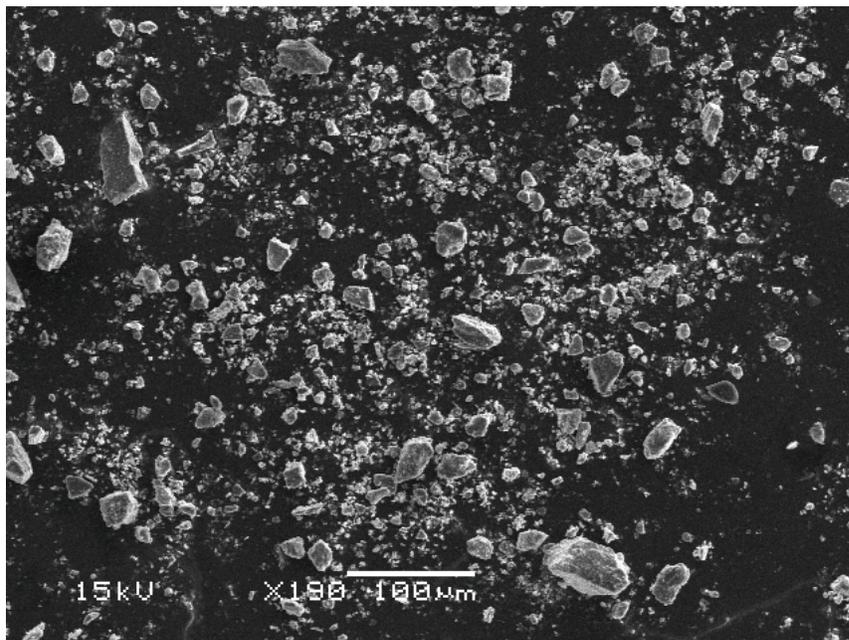
*Figura 10: Morfología del mineral 1: descarga del molino de bolas.*



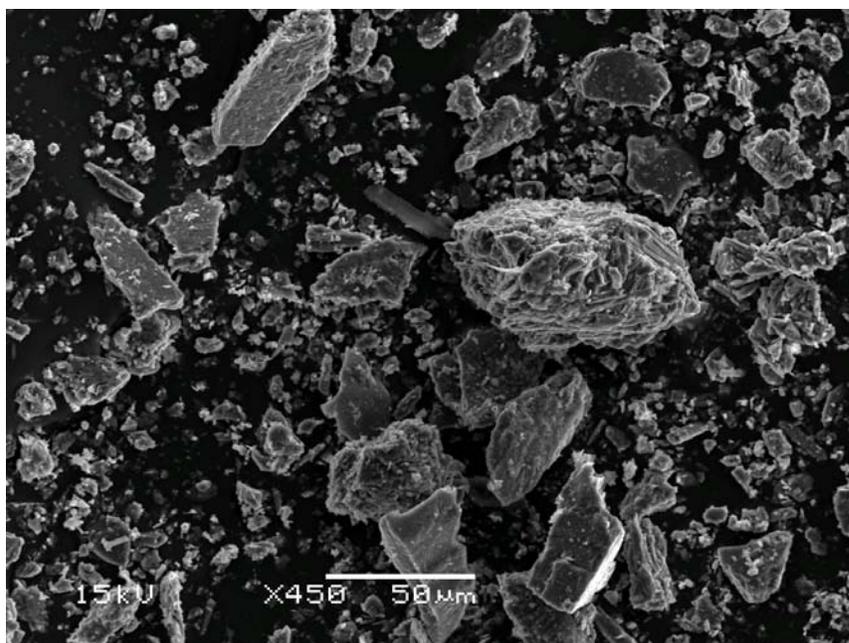
*Figura 11: Morfología del mineral 2: descarga del molino de bolas.*

La *Figura 10* correspondiente a la descarga del mineral 1 del molino de bolas, visiblemente refleja que las partículas en su mayoría poseen una morfología cúbica o redondeada lo que se corresponde con la literatura. Esta morfología resultante en ambos minerales se debe al efecto abrasivo que produce esta carga moledora (bolas) en el material.

*Molino de barras*



*Figura 12: Morfología del mineral 1: descarga del molino de barras.*



*Figura 13: Morfología del mineral 2: descarga del molino de barras.*

La *Figura 12* correspondiente a la descarga del mineral 1 del molino de barras, visiblemente refleja que las partículas en su mayoría poseen una morfología alargada. La *Figura 13* visiblemente refleja el tamaño alargado de las partículas. En ambas imágenes se reflejan la morfología alargada de la descarga del molino de barras, lo que de acuerdo a la bibliografía es debido al efecto tijera producido por carga moledora (barras) en el mineral.

#### **4.2.4) Diseño de ICARUS**

El diseño del programa de simulación se basó en la estructuración de las diferentes relaciones propuestas para el dimensionamiento de molinos, tomando en cuenta que esta aproximación debe ser adaptada a los requerimientos que tenga el usuario; en ese sentido se diseñó el programa de manera de hacerlo sencillo de usar, se dispusieron en cada interface creada, campos en los cuales el usuario en primer lugar pueda colocar la información recopilada en el laboratorio (**Wit**, **F80** y **P80**); luego otros campos fueron también añadidos de manera de que de acuerdo a su criterio, el usuario pueda asignarle diferentes valores a variable para que posteriormente el programa pueda entonces realizar los cálculos y arrojar los resultados de estas simulaciones.

La versatilidad del programa usado como plataforma para el diseño del programa es que permite el uso de ciertos comandos para la construcción de gráficos en función de los resultados arrojados. (*ver*: ANEXO 4 y ANEXO 5).

### 4.3) SIMULACIÓN EN ICARUS.

El programa generado se estructuró de tal manera de brindarle al usuario la posibilidad de introducir los valores obtenidos en el laboratorio que harían las veces de constantes para el estudio a llevar a cabo y de introducir y modificar según su criterio ciertos parámetros de interés ( $L/D$ ,  $\varphi_c$ ,  $J$  y  $D$ ), para evaluar de esta manera su efecto en el resultado final ( $Wi$ ,  $E$  y  $Q$ ) (ver: Figuras 14,..,18) por otra parte, los resultados para cada simulación pueden ser visualizados en un gráfico generado por el mismo programa.

El diseño del programa y de acuerdo a las fórmulas propuestas por *Austin y Concha (1994)* (ver: *Capítulo II*, apartado: 2.2.2 y 2.2.3) se dividió en dos partes, cada una de acuerdo a la carga moledora a usar en el equipo (bolas o barras) y cada parte en dos etapas, la primera etapa se caracteriza por el análisis de la influencia de diferentes diámetro del molino ( $D$ ) en el requerimiento energético para la operación ( $Wi$ ), y la segunda etapa permite analizar la influencia de parámetros como: Largo/Ancho del equipo, Fracción de la velocidad límite y porcentaje de la carga moledora ( $L/D$ ,  $\varphi_c$  y  $J$  respectivamente) en la capacidad del molino ( $Q$ ).



Figura 14: Interface de inicio.

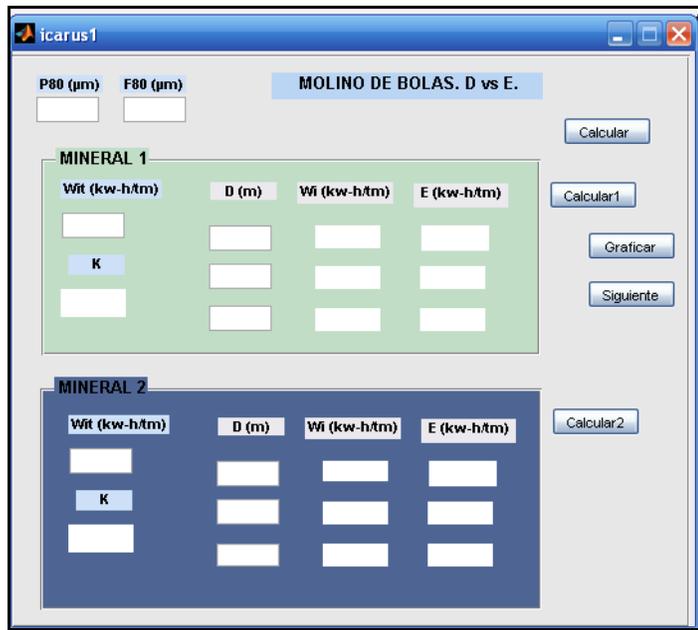


Figura 15: Interface para el molino de bolas, etapa 1.

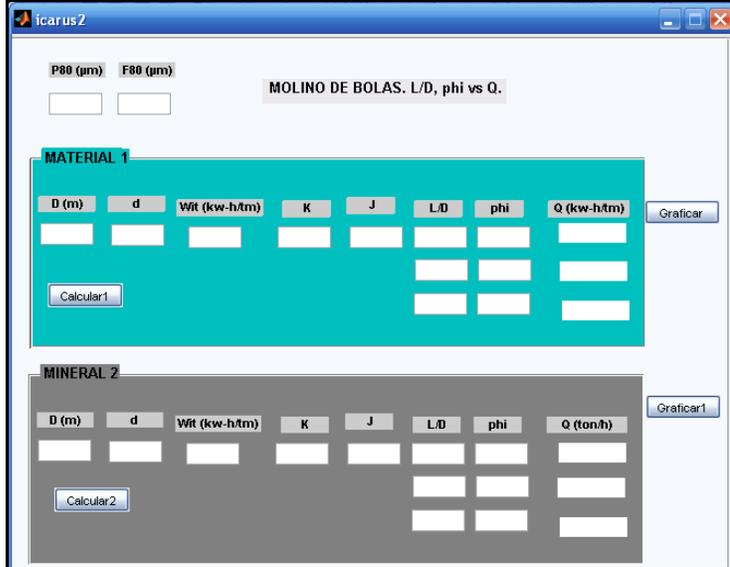


Figura 16: Interface para el Molino de bolas, etapa 2.

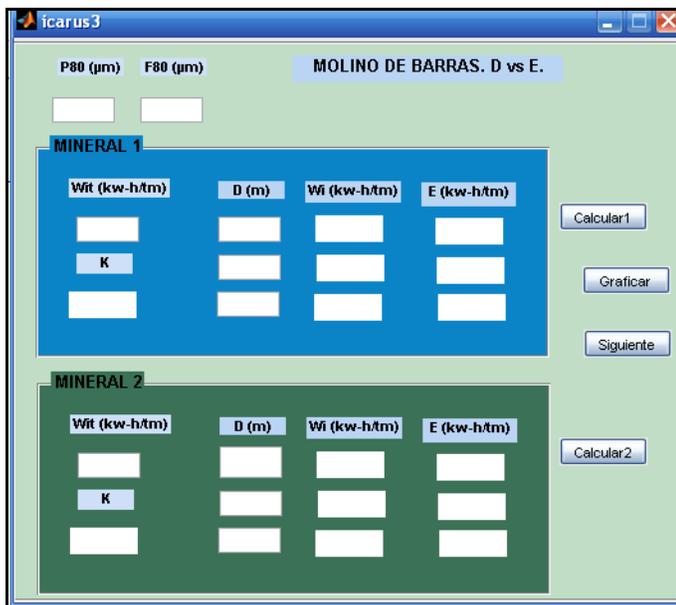


Figura 17: Interface para el Molino de barras, etapa 1.

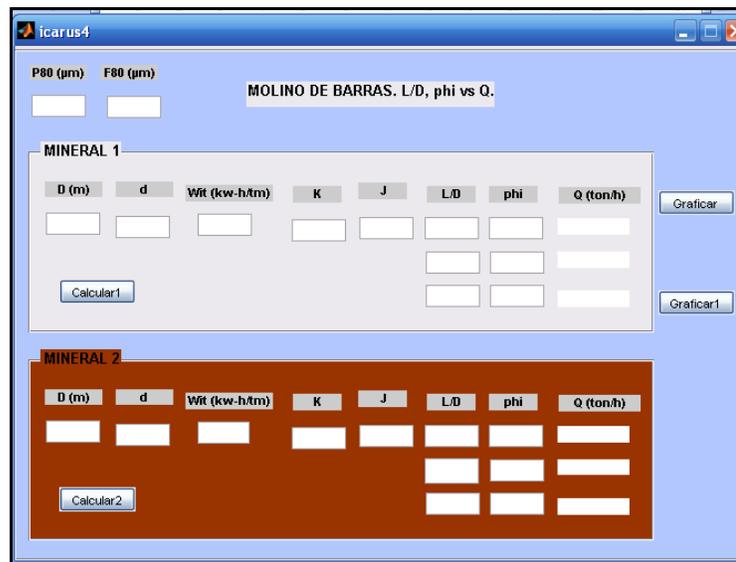


Figura 18: Interface para el Molino de barras, etapa 2.

#### 4.3.1) Datos recopilados en los ensayos del molino de bolas

|    | Wi [kw-m/tm] | P80 [ $\mu$ m] | F80 [ $\mu$ m] | d [g/cm <sup>3</sup> ] | J   |
|----|--------------|----------------|----------------|------------------------|-----|
| M1 | 539          | 16,4           | 30             | 8.7                    | 0.4 |
| M2 | 378          | 16,4           | 27             |                        |     |

*Tabla 16: datos de entrada para la simulación.*

La *Tabla 16*, resume los datos de entrada a introducir en el programa para obtener la simulación en el caso de los molinos de bolas, los datos resultaron a partir de los ensayos de laboratorio (ver: *Tablas 12 y 13*), y de las referencias consultadas como es el caso de *J* y que corresponde a la proporción de carga moledora en un molino.

#### *Primera etapa.*

La interface creada permite al usuario estimar el consumo energético de un molino de bolas para diferentes diámetros y procesando determinados minerales; todo ello basándose en las relaciones propuestas por *Austin y Concha (1994)*. La *Figura 15* muestra la simulación realizada en *ICARUS* para dos molinos de bolas pensados a procesar ambos minerales; en este caso, se estudió el consumo energético de un molino con tres diámetros diferentes: (**2**, **3** y **4**) m y para ambos minerales.

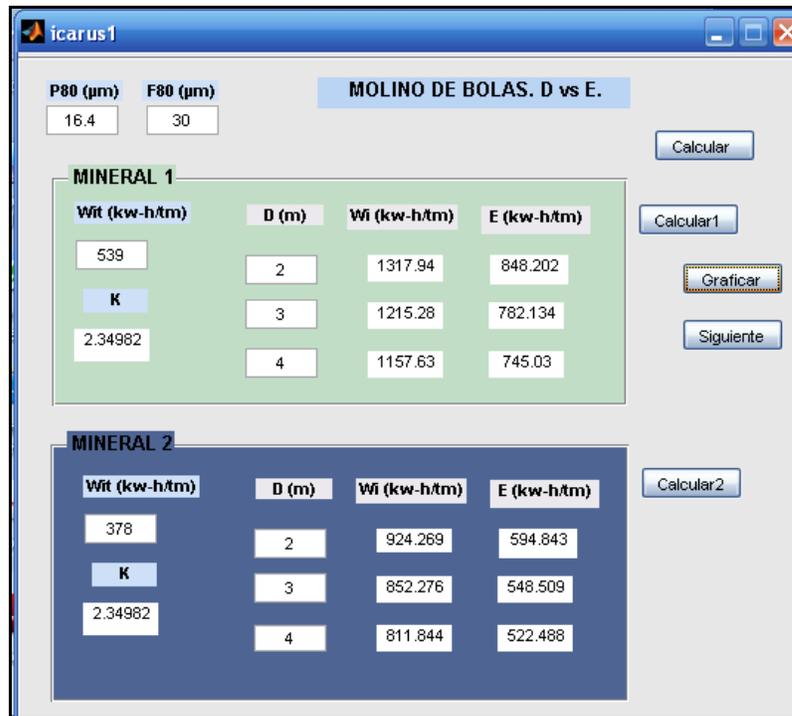


Figura 19: Análisis D vs E para un molino de bolas.

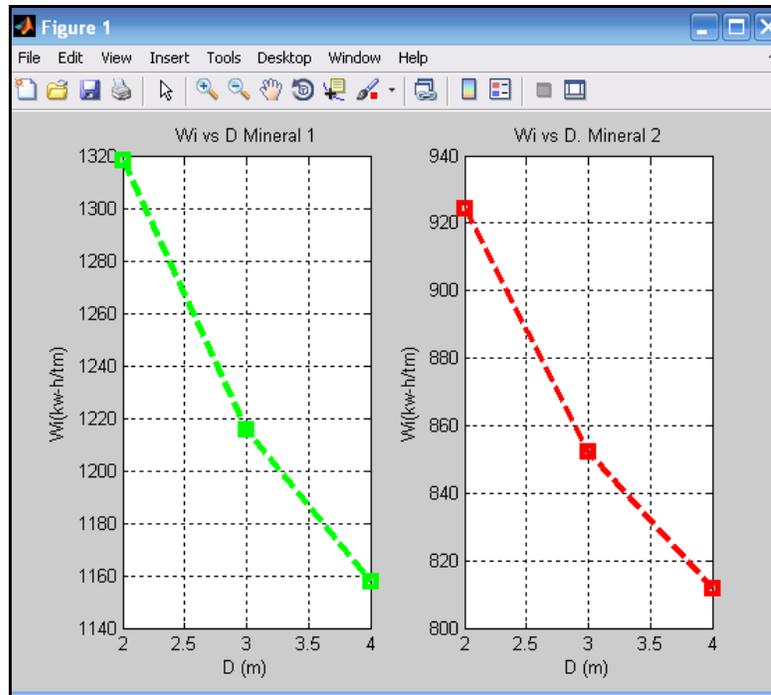


Figura 20: Resultados de las simulaciones.

De los resultados mostrados en las *Figuras 19 y 20*, se puede concluir que: para el mineral 1, un molino con diámetros de los diámetros **D (2, 3 y 4)** m corresponde un consumo energético **Wi** de **(1318, 1215 y 1158)** kw-h/tm, respectivamente, lo que se traduce en una reducción en el consumo energético de *6%* aproximadamente por cada metro adicional que posea el diámetro del equipo, partiendo de un diámetro de dos metros. Para el mineral 2 y para diámetros **D (2, 3 y 4)** m corresponde un consumo energético **Wi** de **(924, 852 y 812)** kw-h/tm respectivamente lo que se traduce en una reducción en el consumo energético de *7%* aproximadamente por cada metro adicional que posea el diámetro del equipo, partiendo de un diámetro de dos metros.

En base a estos resultados se puede concluir que: el diámetro aconsejable para un molino que procese ambos minerales, léase menor consumo energético, es de **4 m** por otra parte, el equipo consume un aproximado de *30%* más de energía al procesar el mineral 1 que al mineral 2; este alto consumo energético se relaciona directamente con la composición mineralógica del mineral, éste, al poseer mayor contenido de sílice requiere de mucha más energía para lograr la fractura cinemática.

### ***Segunda etapa.***

En la segunda etapa de la simulación se analizó y comparó la influencia que tiene la variación de parámetros como: Largo/Ancho del equipo, Fracción de la velocidad límite y porcentaje de la carga moledora (***L/D***, ***φ<sub>c</sub>*** y ***J*** respectivamente) en la capacidad del molino (***Q***). Dichas variaciones tuvieron los siguientes rangos: ***L/D***: 1,3; 1,4 y 1,5 y ***φ<sub>c</sub>***: 0,6; 0,7 y 0,8 y para cada par de éstos valores se obtuvo un resultado específico de la capacidad; la versatilidad del programa también permitió en primer lugar decidir a partir de los resultados arrojados, elegir la fracción de la velocidad límite más conveniente y a partir de este valor, elegir la proporción Largo/Ancho que resulte más beneficiosa.



Figura 21: Análisis de L/D vs Q. Para un  $\phi=0,6$ .

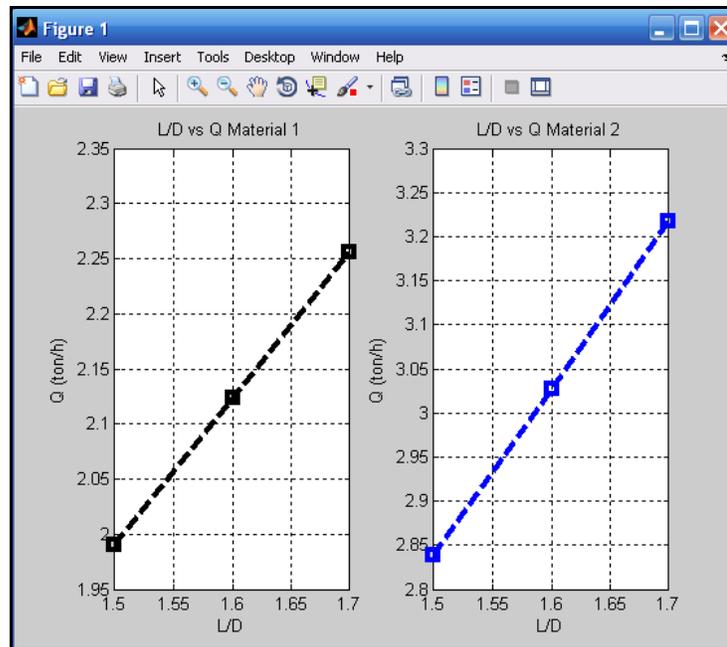


Figura 22: Resultados L/D vs Q Para un  $\phi=0,6$ .



Figura 23: Simulación de phi vs Q. Para L/D=1.5.

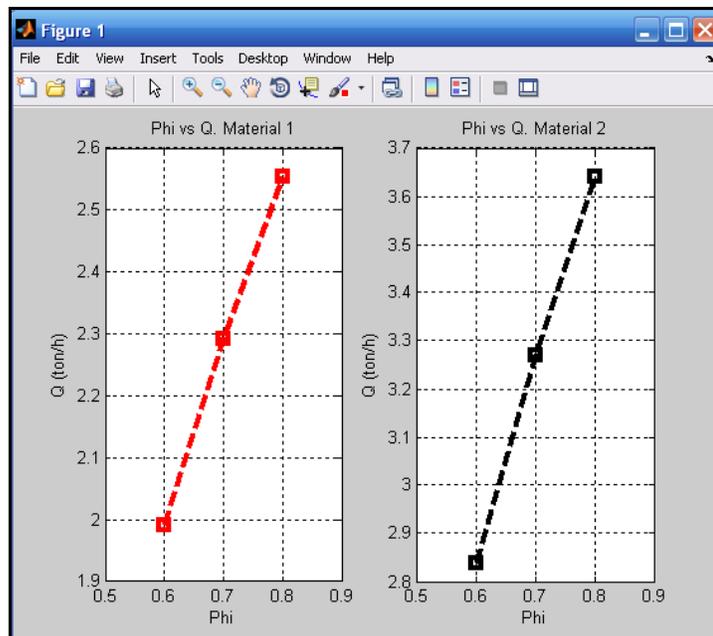


Figura 24: Resultados phi vs Q Para un L/D=1.5.

Los resultados mostrados en la *Figura 21* muestran las diferentes simulaciones hechas en ambos para un molino que procese ambos minerales, en éstas, se buscó conocer la proporción  $L/D$  óptima para ello, se corrió el programa con diferentes valores de este ítem (1,3; 1,4 y 1,5) y para analizar la influencia de este parámetro sobre la capacidad, se fijó un valor para phi 0,6; éstos resultados los ilustra la *Figura 22*; desde donde se puede observar que la proporción  $L/D$  óptima para ambos materiales es de 1.5 resultando en una capacidad de (2 y 3) ton/h respectivamente.

Las *Figuras: 23 y 24* muestran los resultados obtenidos de la simulación hecha una vez conocida la proporción  $L/D$  en este caso, se buscaba evaluar la fracción de velocidad límite más recomendable a la cual el molino pudiera funcionar teniendo ya este parámetro fijo. Los resultados muestran que para ambos minerales, el equipo debería funcionar con una velocidad del 80% de su velocidad nominal; puestos que las capacidades son óptimas en estas condiciones (2,5 y 4) ton/h para el mineral 1 y el mineral 2 respectivamente, sin embargo es recomendable que los molinos giren a 60% de su velocidad nominal a fin de asegurar una buena capacidad sin que se sobrecarguen las máquinas. Siendo las capacidades: 2 y 3 ton/h para M1 y M2.

En este caso se observa que de nuevo la composición mineralógica del mineral 1 juega un papel fundamental en la capacidad del molino, al requerir mayor energía el equipo para procesar este mineral la capacidad del molino será baja en comparación a la del mineral 2, aun cuando se modifiquen las características físicas del mismo.

#### 4.3.2) Simulación del molino de Barras.

|    | Wi [kw-m/tm] | P80 [ $\mu\text{m}$ ] | F80 [ $\mu\text{m}$ ] | d [g/cm <sup>3</sup> ] | J    |
|----|--------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|------|
| M1 | 282          | 16,4                  | 30                    | 7.9                    | 0.21 |
| M2 | 338          | 16,4                  | 27                    |                        |      |

*Tabla 17: datos de entrada para la simulación.*

La *Tabla 17*, resume los datos de entrada a introducir en el programa para obtener la simulación en el caso de los molinos de barras, los datos resultaron a partir de los ensayos de laboratorio (ver: *Tablas 14 y 15*), y de las referencias consultadas como es el caso de **J** y que corresponde a la proporción de carga moledora en un molino.

#### ***Primera etapa.***

La *Figura 17* muestra la simulación realizada en **ICARUS** para dos molinos de bolas pensados a procesar ambos materiales; en este caso, se estudió el consumo energético de un molino con tres diámetros diferentes: (**2, 3 y 4**) m y para ambos minerales.

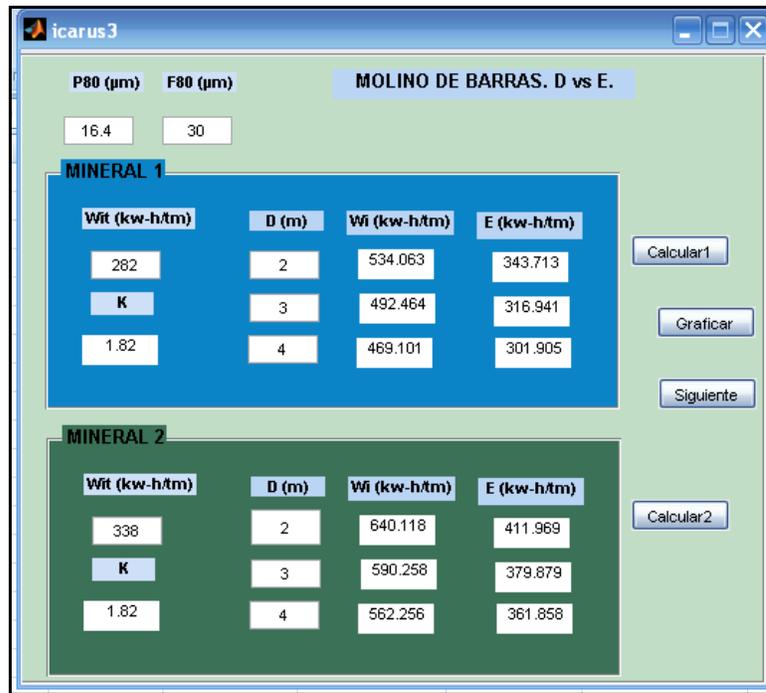


Figura 25: Análisis D vs E para un molino de barras.

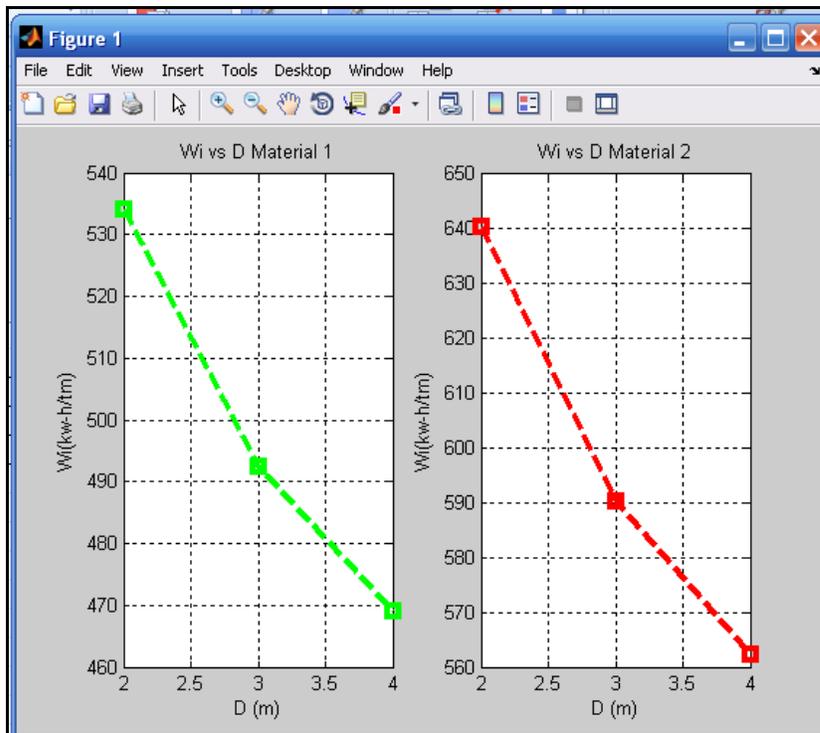


Figura 26: Resultados de las simulaciones.

De los resultados mostrados en las *Figuras 25 y 26*, se puede concluir que: para el mineral 1, un molino con diámetros de los diámetros **D (2, 3 y 4)** m corresponde un consumo energético **Wi** de **(534, 432 y 469)** kw-h/tm, respectivamente, lo que se traduce en una reducción en el consumo energético de 7% aproximadamente por cada metro adicional que posea el diámetro del equipo, partiendo de un diámetro de dos metros. Para el mineral 2 y para diámetros **D (2, 3 y 4)** m corresponde un consumo energético **Wi** de **(640, 590 y 562)** kw-h/tm respectivamente lo que se traduce en una reducción en el consumo energético de 7% aproximadamente por cada metro adicional que posea el diámetro del equipo, partiendo de un diámetro de dos metros.

En base a estos resultados se puede concluir que: el diámetro aconsejable para un molino que procese ambos minerales, léase menor consumo energético, es de **4 m**. En este caso, no se puede inferir alguna relación entre la composición mineralógica de ambos materiales y el consumo energético para la operación puesto que no se observa una diferencia substancial entre ambos; sin embargo, estos valores relativamente cercanos se pueden atribuir a la distribución equitativa de la energía por cada barra, cosa que no se observa en el caso de usar bolas como carga moledora.

### ***Segunda etapa.***

En la segunda etapa de la simulación se analizó y comparó la influencia que tiene la variación de parámetros como: Largo/Ancho del equipo, Fracción de la velocidad límite y porcentaje de la carga moledora (**L/D**,  **$\varphi_c$**  y **J** respectivamente) en la capacidad del molino (**Q**). Dichas variaciones tuvieron los siguientes rangos: **L/D**: 1,3; 1,4 y 1,5 y  **$\varphi_c$** : 0,6; 0,7 y 0,8 y para cada par de éstos valores se obtuvo un resultado específico de la capacidad; la versatilidad del programa también permitió en primer lugar decidir a partir de los resultados arrojados, elegir la fracción de la velocidad límite más conveniente y a partir de este valor, elegir la proporción Largo/Ancho que resulte más beneficiosa.

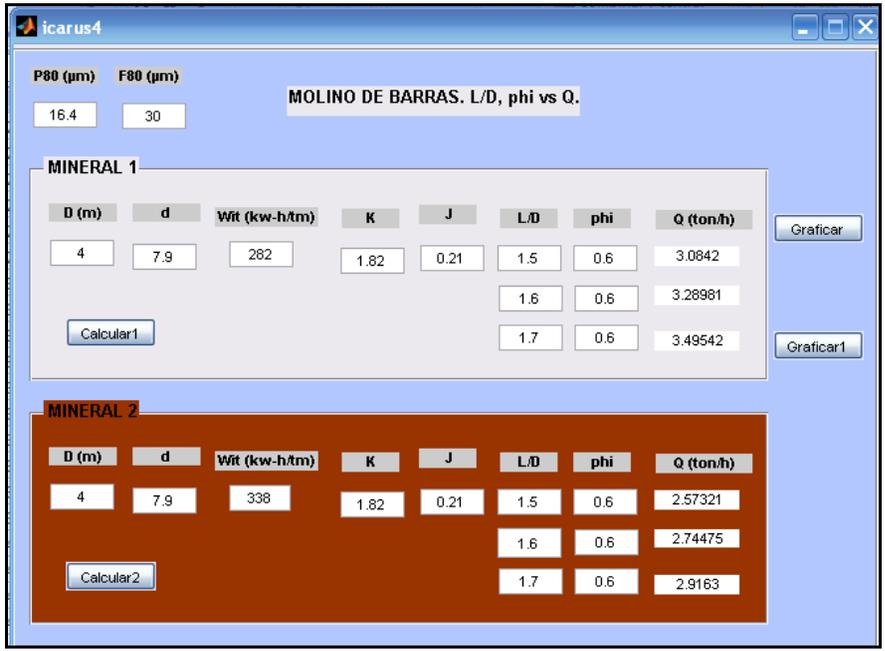


Figura 27: Análisis de L/D vs Q. Para un phi=0,6.

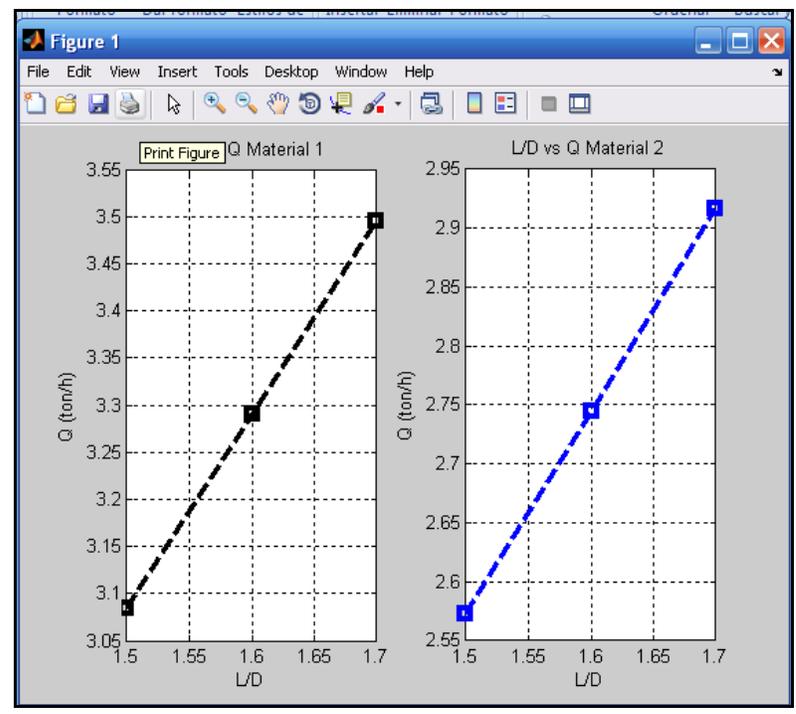


Figura 28: Resultados L/D vs Q Para un phi=0,6.

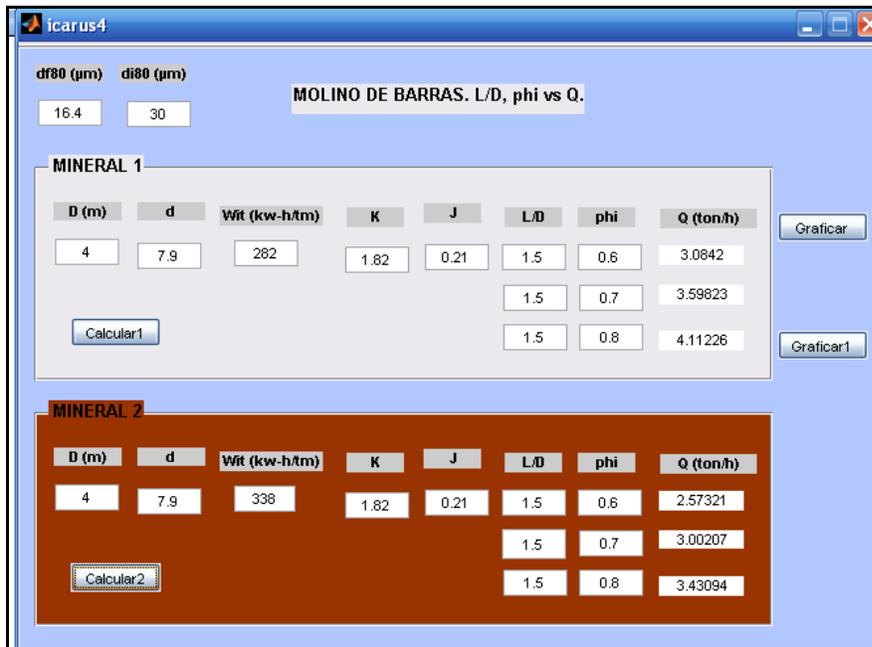


Figura 29: Simulación de phi vs Q. Para L/D=1.5.

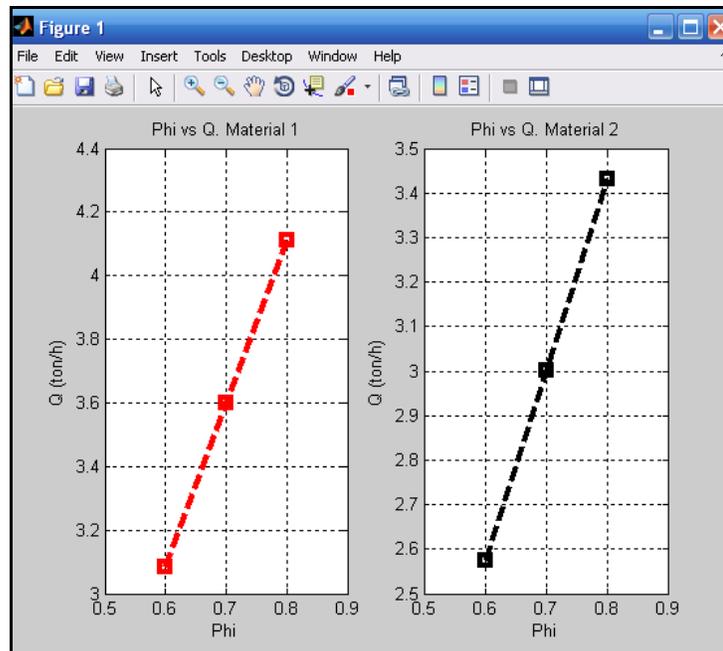


Figura 30: Resultados phi vs Q Para un L/D=1.5.

Los resultados mostrados en la *Figura 27* muestran las diferentes simulaciones hechas para ambos minerales, en éstas, se buscó conocer la proporción  $L/D$  óptima, para ello, se corrió el programa con diferentes valores de este ítem (1,3; 1,4 y 1,5) y para analizar la influencia de este parámetro sobre la capacidad, se fijó un valor para  $\phi$  0,6; éstos resultados los ilustra la *Figura 28*; desde donde se puede observar que la proporción  $L/D$  óptima para ambos materiales es de 1.5 resultando en una capacidad en ambos casos de 3 ton/h.

Las *Figuras: 29 y 30* muestran los resultados obtenidos de la simulación hecha una vez conocida la proporción  $L/D$  en este caso, se buscaba evaluar la fracción de velocidad límite más recomendable a la cual el molino pudiera operar. Los resultados muestran que para ambos materiales, el equipo debería funcionar con una velocidad del 80% de su velocidad nominal; puestos que las capacidades son óptimas en estas condiciones (4 y 3,4) ton/h para M1 y M2 respectivamente, sin embargo es recomendable que los molinos giren a 60% de su velocidad nominal a fin de asegurar una buena capacidad sin que se sobrecarguen las máquinas. Siendo las capacidades: 3 ton/h.

En este caso se observa que la composición mineralógica de los minerales no juega un papel fundamental al calcular la capacidad del molino, se deduce que esto se debe a que la distribución de la energía por cada barra tiende a ser constante a lo largo de todo su volumen.

#### 4.4) VALIDACIÓN DE ICARUS

La validación se llevó a cabo comparando los resultados arrojados por la simulación en *ICARUS* (ver: Figuras 19 ,..., 30) con los datos suministrados por las empresas que comercializan estos equipos a nivel industrial, las mismas disponen de un catálogo electrónico desde donde se pueden apreciar las especificaciones de estos equipos (Largo, Diámetro, consumo energético  $E$  y capacidad  $Q$ ); los mismos se encuentran disponibles en las páginas web de estas empresas.

##### 4.4.1) Molino de Bolas

La validación de los datos arrojados por *ICARUS* para el caso del molino de bolas se basaron en la comparación entre los valores arrojados por el programa con el catalogo de venta de molinos de la empresa: Shangai Lipu Heavy Industry Co., Ltd. La misma puede encontrarse en su página web (<http://lipuchina.com/index.html>).

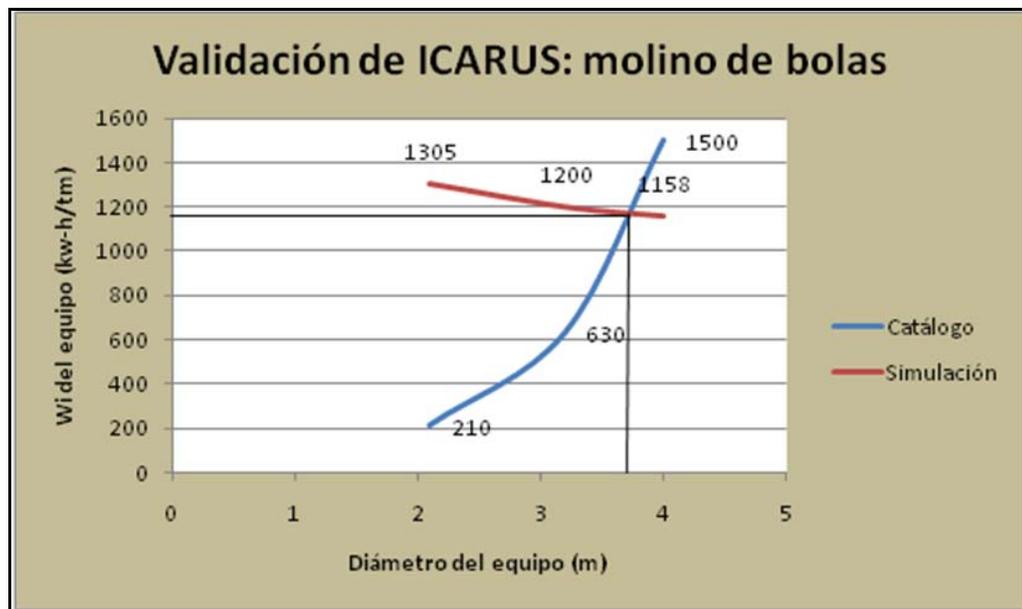
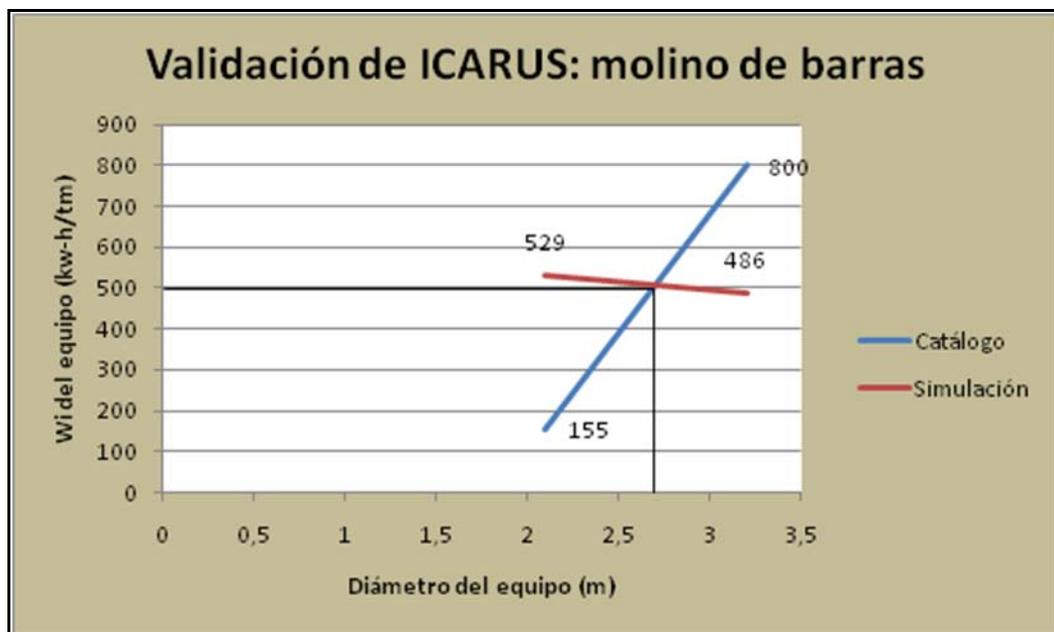


Gráfico 5: Validación de ICARUS: molino de bolas.

Para la validación de **ICARUS** en el caso del molino de bolas, se tomaron en cuenta los valores tanto los suministrados por las empresas distribuidoras de equipos como los datos experimentales con los cuales se corrió el programa; para el molino de bolas, los siguientes diámetros fueron tomados en cuenta: (2,1; 3,2 y 4) m siendo los resultados: (210, 630 y 1500) kw – h/ton y (1305, 1200 y 1158) kw – h/ton correspondientes al catalogo y a la simulación respectivamente (ver: *Gráfico 5*). La validación no demostró ser satisfactoria pues los valores resultan ser significativamente diferentes, sin embargo, ambas tendencias se igualan para un equipo con un diámetro de aproximadamente 3,7 m para el cual el consumo energético será de aproximadamente 1180 kw-h/tm.



*Gráfico 6: Validación de ICARUS: molino de barras.*

La validación de los datos arrojados por **ICARUS** para el caso del molino de barras se basaron en la comparación entre los valores arrojados por el programa con el catalogo de venta de molinos de la empresa: Shangai Esong Mining Machinery Co., Ltd. La misma puede encontrarse en su página web.

Para la validación de *ICARUS* en el caso del molino de barras, fueron tomados en cuenta los siguientes diámetros: (2,1 y 3,2) m y a partir de ellos los resultados (155 y 800) kw – h/ton y (529 y 486) kw – h/ton correspondientes al catalogo y a la simulación respectivamente (ver: *Gráfico 6*). *ICARUS* no se valida en esta parte del todo, puesto que los valores comparados resultan ser diferentes, sin embargo, y como en el caso del molino de bolas hay un diámetro para el cual ambas tendencias se igual, este valor es de aproximadamente 2,7 m para el que el consumo energético se sitúa en 500 kw-h/tm.

Los valores mostrados en las *Gráficas 5 y 6*, visiblemente muestran una diferencia entre los valores nominales del fabricante y los arrojados por la simulación en *ICARUS*. La dispersión entre ambas curvas se debe a la composición mineralógica de los minerales ensayados; los datos suministrados por la empresa distribuidora, si bien son nominales, no toman en cuenta los diferentes minerales que se pueden tratar con esos equipos por tanto resultan ser generales; por otra parte, los resultados arrojados por la simulación en *ICARUS* si toman en cuenta la composición mineralógica de los minerales bajo el cálculo del índice de trabajo de Bond. (ver: *Gráficos 5 y 6*).

Otro factor a considerar, y que indudablemente influyó en los valores calculados del índice de trabajo de Bond, en la posteriores simulaciones y finalmente en la validación de *ICARUS* fue el hecho de que al no existir en el laboratorio donde se realizaron los ensayos molinos ni carga modulante que satisfagan completamente las normas propuestas por Bond, los ensayos fueron realizados con los equipos disponibles, teniendo éstos dimensiones muy parecidas a las propuestas por el autor, más no las dimensiones exactas para realizar estos ensayos.

## CONCLUSIONES

Las siguientes conclusiones resultaron del estudio llevado a cabo:

1. En base al criterio de selección fundamentado en los resultados mostrados, y en base a los datos de requerimiento energético y a la capacidad arrojados por la simulación en *ICARUS*; para el tratamiento de ambos minerales debe ser seleccionado un molino de bolas con las siguientes características: diámetro de **4 m**, largo de **6 m**, y con las siguientes especificaciones operacionales: porcentaje de la carga moledora de **40%** y fracción de la velocidad límite **70%**. Con éstos valores el consumo energético y la capacidad del molino será de: **1158 kw-h/ton** y de **812 kw-h/ton** para el *mineral 1* y el *mineral 2* respectivamente.
2. Para validar a *ICARUS* se compararon los valores nominales que están disponibles en los catálogos de las empresas que distribuyen estos equipo; la diferencia entre los valores comparados se deben a que la información nominal del catalogo resulta ser genérica en cambio en la simulación en *ICARUS* se toma en cuenta la composición de los minerales a tratar y también debido a que para los ensayos de laboratorio se usaron molinos que no satisfacen completamente la norma propuesta por Bond, lo que finalmente pudo haber influido en la simulación y validación del programa.
3. Un molino de bolas con las siguientes características y condiciones operativas ***L/D 1,5;  $\phi c$  0,6*** y ***D 4 m***, tendrá la siguientes capacidades **(2 y 3) ton/h** al tratar al *mineral 1* y el *mineral 2* respectivamente
4. Un molino de barras con las siguientes características y condiciones operativas ***L/D 1,5;  $\phi c$  0,6*** y ***D 4 m***, tendrá la siguiente capacidad: **3 ton/h** al tratar ambos minerales.

5. Los índices de Bond para ambos minerales bajo la condición de molino de bolas fueron: **(539 y 378)** kw-h/ton para el *mineral 1* y *mineral 2* respectivamente. Y bajo la condición de molino de barras: **(282 y 338)** kw-h/ton para el *mineral 1* y *mineral 2* respectivamente.
6. La DRX realizada en ambas muestras clasificaron al *mineral 1* como un *Albita* perteneciente al grupo de *Plagioclasas sódicas* y al *mineral 2* como un *clinocloro* perteneciente al grupo de las *cloritas* y definido formalmente como un *Alumino silicato* de origen metamórfico. El contenido de *sílice* es mayor en el *mineral 1* que en el *mineral 2*.

## RECOMENDACIONES

Las siguientes recomendaciones quedan a ser analizadas y/o implementadas en futuros trabajos de investigación relacionados al tema:

1. Editar el programa *ICARUS* añadiéndole la opción de evaluar la simulación en molienda en húmedo.
2. Editar el programa *ICARUS* añadiéndole la opción de poder establecer el tamaño de partícula que se requiere en la descarga de manera de hacer el programa más genérico.
3. Estructurar otras relaciones de escalamiento y diseño de los otros tipos de molinos y junto con las mostradas en el trabajo, diseñar un programa de simulación mucho más eficiente y más completo.
4. Evaluar la eficiencia de *ICARUS* al tratar minerales metálicos así como también, otros minerales no metálicos.
5. Realizar los ensayos para el cálculo del Índice de Trabajo de Bond, con instrumentos y equipos que se ajusten completamente a los requerimientos propuestos por el autor.
6. Realizar ensayos controlados, según las normas *COVENIN* a los aditivos producto de la descarga de ambos molinos a fin de evaluar la influencia de la morfología característica de cada uno en el efecto sobre la mezcla de cemento; para de esa manera apoyar el criterio de selección de equipos.

## **BIBLIOGRAFÍA**

Austin L. G., (1973), Understanding Ball Mill Sizing, *Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.*, 12 (2), 121–129

Austin, G. L. Y Concha, A.F. (1994), *Diseño y Simulación de Circuitos de Molienda y clasificación*, España, Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología. 389 p.

Austin G., Yan, D.S., (2006), *Mineral Processing Design and Operation*, 63-98.

Bond F.C., (1963), Discussion of Papers Published Prior to 1957, *Grinding Ball Size Selection* (1958). Transactions AIME, Mular and R. Bhappu, eds. 54.

Catalogo de molinos, Shangai Lipu Heavy Industry Co., Ltd. Obtenido el 13 de Junio de 2012 de: <http://lipuchina.com/index.html>.

Catalogo de molinos. Shangai Esong Mining Machinery Co., Ltd. Obtenido el 13 de Junio de 2012 de: <http://shsg.en.alibaba.com/>

Howard L. et al (1992). *Mining Engineering Handbook*. SME. 988 p.

I.B. Klymowsky, A.L.M. Rijkers (1996) The use of data from small-scale mills and computer simulation techniques for scale-up and design of SAG mill circuits. *International Journal of mineral processing*, Elsevier, Amsterdam, The Netherlands 273-287.

Jímenes F., Téllez L., (2010). Efecto de un aditivo plastificante comercial sobre la estructura cristalina de la plagioclasa utilizada en la fabricación de blocks ligeros de concreto. *Sociedad Mexicana de Ciencia y Tecnología de Superficies y Materiales, Superficies y Vacío* 23(S) 104-108, agosto de 2010. México.

Maiolino R., Navas H., (2004). Reducción de tamaño de laterita Ferruginosa, sector El Menito, estado Zulia. Trabajo especial de grado. Inédito. Universidad Central de Venezuela.

Osorio A., Peláez J. F., Sánchez R., Rodríguez N., Fidelgranda C., Restrepo G., (2007), Elaboración de Nomogramas de propiedades e Implementación del Índice de Trabajo de Bond para la Molienda de Clínter de Cemento. Scientia et Technica, año/vol XIII, Número 036 pp. 363-368.

Osorio A., Restrepo G., y Marín J., (2009) Molienda de clinker de cemento: evaluación de la influencia de la velocidad de giro del molino, el tiempo de residencia y la carga de los medios de molienda. Dyna, Universidad Nacional de Colombia, LXXVI, (158), 69-77.

Peláez, E., (1981), Preparación y Concentración de minerales, Caracas, Venezuela, Universidad Central de Venezuela. 311p.

Poreros J., Ramos C., Grases J., Velazco G., (2004). Manuel del concreto estructural, conforme con la norma COVENIN 1753:03, SIDETUR, 1ra Edición. Caracas, Venezuela, 503p.

Rowland, C.A., Jr. and Kjos, D.M. (1978) Ball and Rod Milling, Mineral Processing Plant Design, New York, USA 2nd Ed. 239-278.

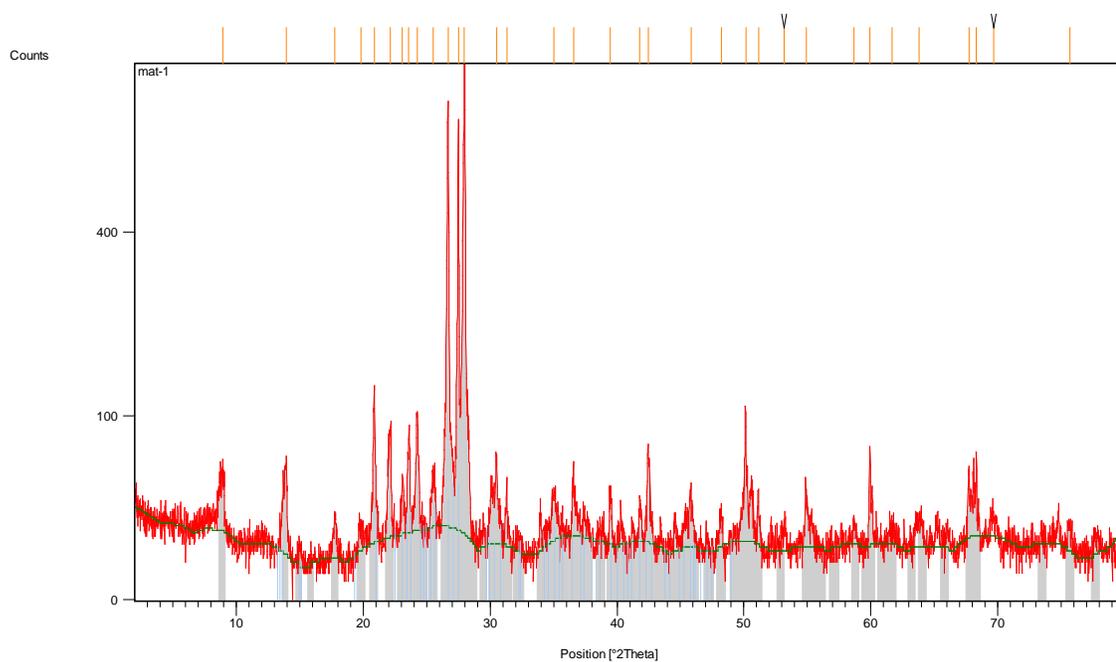
Rodríguez L., (2001). Estudio del comportamiento granulométrico de menas de Hierro de bajo tenor en el proceso de reducción de tamaño en la planta piloto de concentración de C.V.G. FERROMINERA ORINOCO, C.A. Ciudad Piar, estado Bolívar. Trabajo especial de grado. Inédito. Universidad Central de Venezuela. Caracas.

## **ANEXOS**

## ANEXO 1: RESULTADOS DE LA DIFRACCIÓN DE RAYOS X AL MINERAL 1.

|  |   |
|--|---|
| Dataset Name                                   | <b>MAT-1</b>  |
| File name                                      | C:\Documents and Settings\Geología\Escritorio\mat-1.rd            |
| Sample Identification                          | TEG-MINAS-Mauicio   |
| Comment  | Exported by X'Pert SW<br>Generated by Laboratorio in project Proj |
| Measurement Date / Time                        | 09/05/2012 11:42:00 a.m.  |
| Raw Data Origin                                | PHILIPS-binary (scan) (.RD)                                       |
| Scan Axis                                      | Gonio   |
| Start Position [ $^{\circ}2\text{Th.}$ ]       | 2,0100  |
| End Position [ $^{\circ}2\text{Th.}$ ]         | 79,9900   |
| Step Size [ $^{\circ}2\text{Th.}$ ]            | 0,0200  |
| Scan Step Time [s]                             | 0,5000  |
| Scan Type                                      | Continuous  |
| Offset [ $^{\circ}2\text{Th.}$ ]               | 0,0000  |
| Divergence Slit Type                           | Fixed   |
| Divergence Slit Size [ $^{\circ}$ ]            | 1,0000  |
| Specimen Length [mm]                           | 10,00   |
| Receiving Slit Size [mm]                       | 0,1000  |
| Measurement Temperature [ $^{\circ}\text{C}$ ] | 0,00  |
| Anode Material                                 | Cu  |
| K-Alpha1 [ $\text{\AA}$ ]                      | 1,54060   |
| K-Alpha2 [ $\text{\AA}$ ]                      | 1,54443   |
| K-Beta [ $\text{\AA}$ ]                        | 1,39225   |

|                               |              |
|-------------------------------|--------------|
| K-A2 / K-A1 Ratio             | 0,50000      |
| Generator Settings            | 10 mA, 10 kV |
| Diffractometer Type           | PW3710       |
| Diffractometer Number         | 1            |
| Goniometer Radius [mm]        | 173,00       |
| Dist. Focus-Diverg. Slit [mm] | 91,00        |
| Incident Beam Monochromator   | No           |
| Spinning                      | No           |



| Ref. Code | Chemical Formula  |
|-----------|---|
| Cuarzo    | Si O <sub>2</sub>   |
| Albita    | Na Al Si <sub>3</sub> O <sub>8</sub>  |
| Muscovita | ( K , Na ) ( Al , Mg , Fe ) <sub>2</sub> ( Si <sub>3.1</sub> Al <sub>0.9</sub> ) O <sub>10</sub> ( O H ) <sub>2</sub> |
| Ortoclasa | K Al Si <sub>3</sub> O <sub>8</sub>   |

| Pos.    | Height | Tip width | d-spacing | Rel. Int. | Matched by                   |
|---------|--------|-----------|-----------|-----------|------------------------------|
| [°2Th.] | [cts]  | [°2Th.]   | [Å]       | [%]       |                              |
| 8,9095  | 32,35  | 0,4723    | 9,92559   | 3,76      | Muscovita                    |
| 13,9319 | 48,90  | 0,1889    | 6,35670   | 5,69      | Albita                       |
| 17,7825 | 15,49  | 0,2834    | 4,98797   | 1,80      | Muscovita                    |
| 19,8233 | 8,51   | 0,5668    | 4,47881   | 0,99      | Muscovita                    |
| 20,8703 | 125,65 | 0,1417    | 4,25643   | 14,62     | Cuarzo; Ortoclasa            |
| 22,1312 | 75,17  | 0,3306    | 4,01670   | 8,74      | Albita; Ortoclasa            |
| 23,1050 | 31,83  | 0,1889    | 3,84957   | 3,70      | Albita; Muscovita; Ortoclasa |
| 23,6041 | 71,64  | 0,2362    | 3,76930   | 8,33      | Albita                       |
| 24,2467 | 84,35  | 0,1653    | 3,67083   | 9,81      | Albita; Ortoclasa            |
| 25,5351 | 29,32  | 0,3779    | 3,48846   | 3,41      | Albita; Ortoclasa            |
| 26,6930 | 718,87 | 0,1417    | 3,33971   | 83,62     | Cuarzo; Muscovita; Ortoclasa |
| 27,4895 | 666,89 | 0,0945    | 3,24472   | 77,57     | Ortoclasa                    |
| 27,9800 | 859,71 | 0,1653    | 3,18895   | 100,00    | Albita                       |
| 30,4974 | 50,70  | 0,1417    | 2,93121   | 5,90      | Albita; Ortoclasa            |
| 31,3121 | 19,30  | 0,2834    | 2,85678   | 2,24      | Albita                       |

---

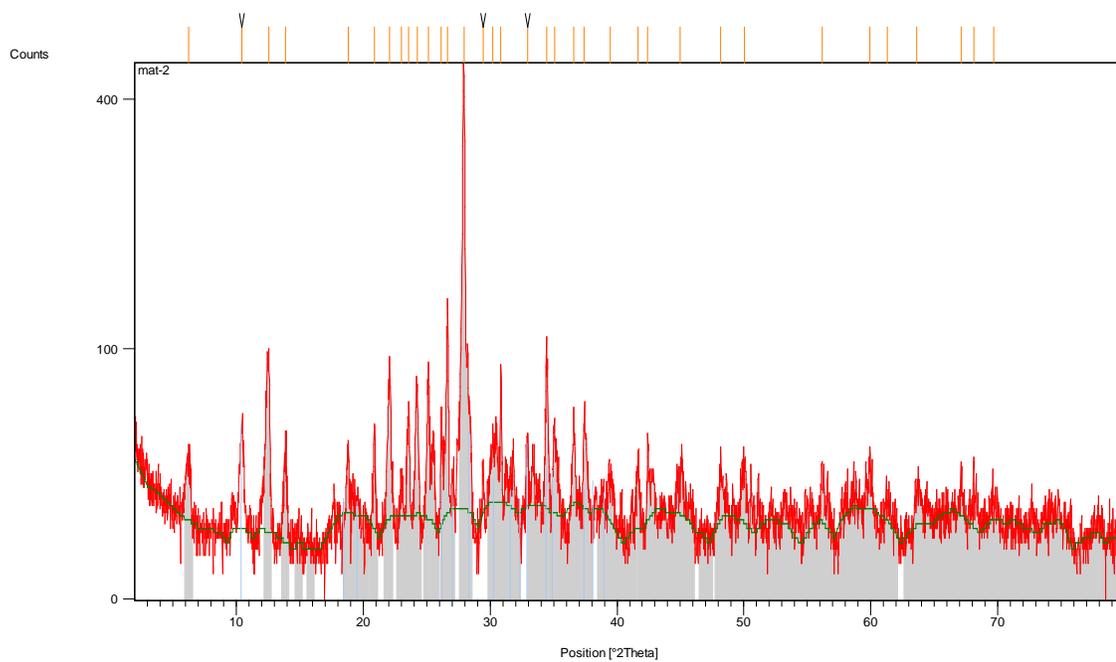
|         |       |        |         |       |                           |
|---------|-------|--------|---------|-------|---------------------------|
| 35,0117 | 22,05 | 0,4723 | 2,56293 | 2,57  | Albita; Muscovita         |
| 36,5581 | 32,10 | 0,1889 | 2,45799 | 3,73  | Cuarzo; Albita; Muscovita |
| 39,4903 | 26,16 | 0,1889 | 2,28198 | 3,04  | Cuarzo; Albita            |
| 41,7944 | 20,64 | 0,1889 | 2,16135 | 2,40  | Ortoclasa                 |
| 42,4719 | 53,35 | 0,1889 | 2,12843 | 6,21  | Cuarzo; Albita; Muscovita |
| 45,8489 | 21,00 | 0,2834 | 1,97921 | 2,44  | Cuarzo; Albita; Ortoclasa |
| 48,2159 | 14,86 | 0,2834 | 1,88744 | 1,73  | Albita; Muscovita         |
| 50,1482 | 92,99 | 0,0864 | 1,81764 | 10,82 | Cuarzo; Albita            |
| 51,1791 | 16,46 | 0,2834 | 1,78490 | 1,91  | Albita                    |
| 53,1820 | 7,57  | 0,5668 | 1,72231 | 0,88  |                           |
| 54,9274 | 24,10 | 0,2834 | 1,67164 | 2,80  | Cuarzo                    |
| 58,7008 | 7,00  | 0,5668 | 1,57286 | 0,81  | Ortoclasa                 |
| 59,9409 | 56,98 | 0,0945 | 1,54325 | 6,63  | Cuarzo; Ortoclasa         |
| 61,6763 | 5,83  | 0,7557 | 1,50393 | 0,68  | Muscovita                 |
| 63,7955 | 9,91  | 0,5668 | 1,45899 | 1,15  | Cuarzo                    |
| 67,7443 | 28,75 | 0,2834 | 1,38324 | 3,34  | Cuarzo                    |
| 68,3297 | 52,08 | 0,0864 | 1,37167 | 6,06  | Cuarzo                    |
| 69,7133 | 6,63  | 0,7557 | 1,34891 | 0,77  |                           |
| 75,6999 | 8,44  | 0,6912 | 1,25538 | 0,98  | Cuarzo                    |

---

## ANEXO 2: RESULTADOS DE LA DIFRACCIÓN DE RAYOS X AL MINERAL 2.

|  |  |
|--|--|
| Dataset Name                                   | MAT-2  |
| File name                                      | D:\Mis documentos\LABORATORIO\RESULTADOS\UCV\Ing GEOLOGIA, MINAS, GEOFISICA\2012-05-11_TEG_Mauricio-Serrano_MINAS\mat-2.rd |
| Sample Identification                          | Mauricio-TEG MINAS   |
| Comment  | Exported by X'Pert SW<br>Generated by Laboratorio in project Proj  |
| Measurement Date / Time                        | 08/05/2012 05:44:00 p.m.   |
| Raw Data Origin                                | PHILIPS-binary (scan) (.RD)  |
| Scan Axis                                      | Gonio  |
| Start Position [ $^{\circ}2\text{Th.}$ ]       | 2,0100   |
| End Position [ $^{\circ}2\text{Th.}$ ]         | 79,9900  |
| Step Size [ $^{\circ}2\text{Th.}$ ]            | 0,0200   |
| Scan Step Time [s]                             | 0,5000   |
| Scan Type                                      | Continuous   |
| Offset [ $^{\circ}2\text{Th.}$ ]               | 0,0000   |
| Divergence Slit Type                           | Fixed  |
| Divergence Slit Size [ $^{\circ}$ ]            | 1,0000   |
| Specimen Length [mm]                           | 10,00  |
| Receiving Slit Size [mm]                       | 0,1000   |
| Measurement Temperature [ $^{\circ}\text{C}$ ] | 0,00   |
| Anode Material                                 | Cu   |
| K-Alpha1 [ $\text{\AA}$ ]                      | 1,54060  |
| K-Alpha2 [ $\text{\AA}$ ]                      | 1,54443  |

|                               |              |
|-------------------------------|--------------|
| K-Beta [ $\text{\AA}$ ]       | 1,39225      |
| K-A2 / K-A1 Ratio             | 0,50000      |
| Generator Settings            | 10 mA, 10 kV |
| Diffractometer Type           | PW3710       |
| Diffractometer Number         | 1            |
| Goniometer Radius [mm]        | 173,00       |
| Dist. Focus-Diverg. Slit [mm] | 91,00        |
| Incident Beam Monochromator   | No           |
| Spinning                      | No           |



---

Ref. Code

Chemical Formula

---

|            |   |
|------------|---|
| Cuarzo     | Si O2   |
| Albita     | Na Al Si3 O8  |
| Clinocloro | ( Mg2.96 Fe1.55 Fe.136 Al1.275 ) ( Si2.622 Al1.376 O10 ) ( O H )8 |
| Carbonato* | Ca ( Mg , Fe ) ( C O3 )2  |

*\*Entre dolomita-calcita, no se distingue bien las fases*

| Pos.<br>[°2Th.] | Height<br>[cts] | Tip width<br>[°2Th.] | d-spacing<br>[Å] | Rel. Int.<br>[%] | Matched by                    |
|-----------------|-----------------|----------------------|------------------|------------------|-------------------------------|
| 6,2454          | 20,68           | 0,4723               | 14,15230         | 5,24             | Clinocloro                    |
| 10,4174         | 38,02           | 0,3779               | 8,49202          | 9,64             | Clinocloro                    |
| 12,5659         | 85,56           | 0,4251               | 7,04447          | 21,70            | Clinocloro                    |
| 13,8611         | 29,00           | 0,1889               | 6,38903          | 7,35             | Albita                        |
| 18,7969         | 24,55           | 0,2362               | 4,72100          | 6,23             | Clinocloro                    |
| 20,8903         | 33,59           | 0,1417               | 4,25242          | 8,52             | Cuarzo; Clinocloro            |
| 22,0850         | 77,95           | 0,3306               | 4,02501          | 19,77            | Albita; Clinocloro            |
| 23,0058         | 11,08           | 0,2834               | 3,86594          | 2,81             | Albita; Clinocloro            |
| 23,5947         | 40,61           | 0,2834               | 3,77078          | 10,30            | Albita                        |
| 24,2351         | 59,54           | 0,3306               | 3,67257          | 15,10            | Albita; Clinocloro; Carbonato |
| 25,1336         | 71,72           | 0,1889               | 3,54327          | 18,19            | Albita; Clinocloro            |
| 26,1670         | 43,09           | 0,1417               | 3,40564          | 10,93            | Albita                        |
| 26,6635         | 132,67          | 0,1653               | 3,34334          | 33,64            | Cuarzo; Albita; Clinocloro    |
| 27,9476         | 394,33          | 0,1889               | 3,19257          | 100,00           | Albita                        |
| 29,4350         | 14,52           | 0,1417               | 3,03455          | 3,68             | Carbonato                     |
| 30,1942         | 21,09           | 0,3779               | 2,95995          | 5,35             | Albita; Clinocloro            |

---

|         |       |        |         |       |                                       |
|---------|-------|--------|---------|-------|---------------------------------------|
| 30,8366 | 73,85 | 0,0945 | 2,89974 | 18,73 | Carbonato                             |
| 32,9322 | 26,68 | 0,1889 | 2,71985 | 6,76  | Carbonato                             |
| 34,4725 | 74,45 | 0,2362 | 2,60177 | 18,88 | Clinocloro                            |
| 35,0774 | 31,62 | 0,4723 | 2,55828 | 8,02  | Albita; Clinocloro; Carbonato         |
| 36,6132 | 31,88 | 0,2362 | 2,45442 | 8,09  | Cuarzo; Albita; Clinocloro            |
| 37,4111 | 37,43 | 0,3306 | 2,40389 | 9,49  | Albita; Clinocloro; Carbonato         |
| 39,4596 | 14,70 | 0,5668 | 2,28368 | 3,73  | Cuarzo; Albita; Clinocloro            |
| 41,6352 | 21,25 | 0,2834 | 2,16924 | 5,39  | Clinocloro                            |
| 42,4221 | 24,24 | 0,1889 | 2,13081 | 6,15  | Cuarzo; Albita; Clinocloro            |
| 44,9724 | 13,43 | 0,5668 | 2,01573 | 3,40  | Clinocloro; Carbonato                 |
| 48,1470 | 12,79 | 0,7557 | 1,88998 | 3,24  | Albita; Clinocloro                    |
| 50,0571 | 19,66 | 0,4723 | 1,82224 | 4,99  | Cuarzo; Albita; Clinocloro; Carbonato |
| 56,1883 | 16,66 | 0,2834 | 1,63708 | 4,23  | Clinocloro                            |
| 59,8981 | 11,20 | 0,5668 | 1,54425 | 2,84  | Cuarzo; Clinocloro; Carbonato         |
| 61,2863 | 5,29  | 0,9446 | 1,51256 | 1,34  | Clinocloro                            |
| 63,6195 | 9,55  | 0,4723 | 1,46260 | 2,42  | Clinocloro; Carbonato                 |
| 67,1483 | 11,12 | 0,3779 | 1,39406 | 2,82  | Clinocloro; Carbonato                 |
| 68,1164 | 10,04 | 0,5668 | 1,37659 | 2,55  | Cuarzo; Clinocloro                    |
| 69,6898 | 4,92  | 0,9216 | 1,34819 | 1,25  | Clinocloro                            |

---

**ANEXO 3: REPORTE DE ANÁLISIS POR MICROSCOPIA ELECTRÓNICA  
DE BARRIDO**

Caracas, 16 de mayo de 2012

**LABORATORIO DE INVESTIGACIONES GEOANALÍTICAS REGIÓN  
CAPITAL**

**REPORTE DE ANÁLISIS POR MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE  
BARRIDO**

|   |                              |
|---|------------------------------|
| <b>Reporte N°:</b>                      | SEM 02-2012                  |
| <b>Solicitud N°:</b>                    | 19-2012                      |
| <b>Enviada(s) por:</b>                  | Profesora Katherine L. Silva |
| <b>Número de Muestras:</b>              | 4                            |
| <b>Naturaleza de la(s) muestra(s):</b>  | Polvo mineral                |
| <b>Procedencia de la(s) muestra(s):</b> | UCV                          |
| <b>Proyecto(s):</b>                     |                              |
| <b>Responsable(s) del Proyecto:</b>     |                              |

**PROFESORA KATHERINE SILVA.**

**REPORTE DEL ANÁLISIS POR MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO A CUATRO MUESTRAS DE POLVO MINERAL.**

Solicitud N°: 19-2012

Reporte N°: SEM 02-2012

Fecha: 16/05/2012

**Análisis por microscopía electrónica de barrido**

Las muestras fueron colocadas en portamuestras de aluminio y se recubrieron con grafito en el evaporador al vacío Jeol, modelo JEE-4X. Posteriormente, se procedió analizarlas en el Microscopio Electrónico de Barrido Jeol, modelo JSM-5910LV. Las condiciones de operación fueron las siguientes:

Voltaje Acelerador: 15 kV

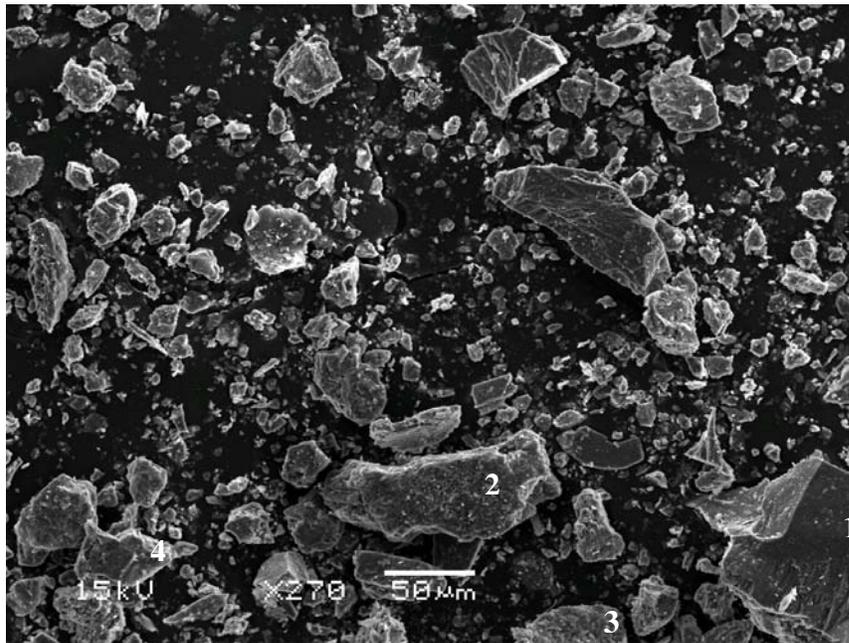
Distancia de Trabajo: 10 mm

Spot Size: 45

Corriente del filamento: 85  $\mu$ A

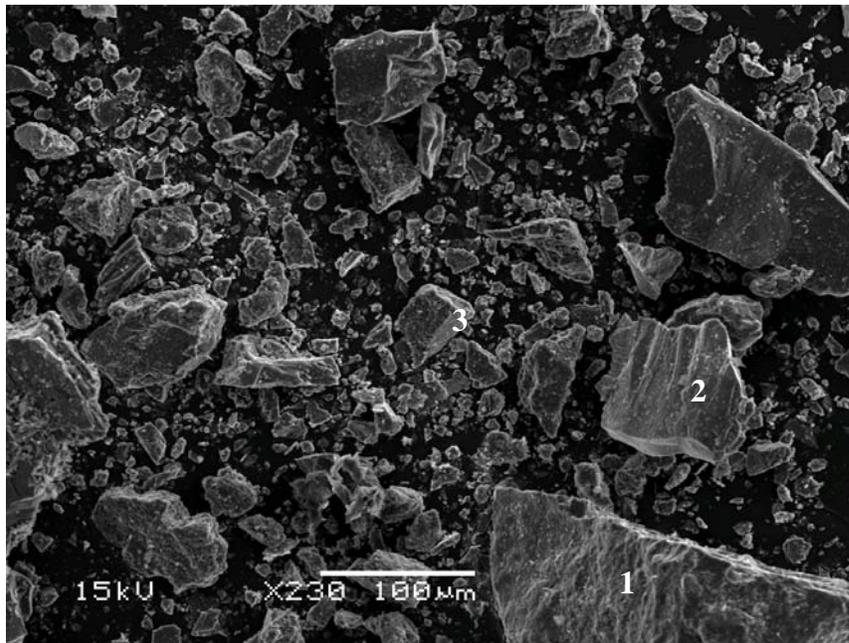
Señal: SEI

## Resultados



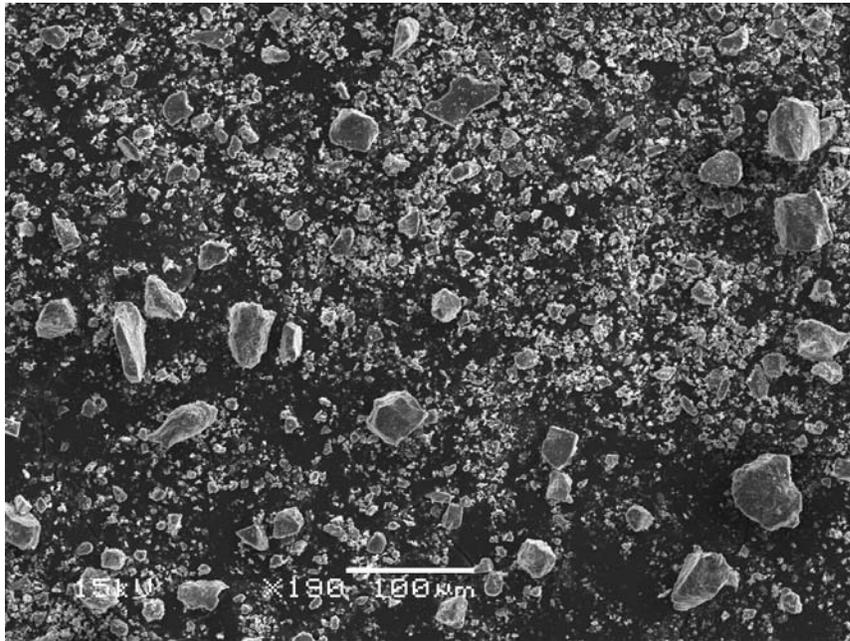
**Figura 1:** Imagen de la muestra 1ba adquirida por microscopio electrónico de barrido en el modo de electrones secundarios, SEM-SEI.

| Análisis químico del punto 1 |               | Análisis químico del punto 2 |               | Análisis químico del punto 3 |               | Análisis químico del punto 4 |               |
|------------------------------|---------------|------------------------------|---------------|------------------------------|---------------|------------------------------|---------------|
| Compound Formula             | Compound Wt % |
| SiO2                         | 99.82         | SiO2                         | 63.13         | SiO2                         | 47.24         | SiO2                         | 78.01         |
| Al2O3                        | 0.02          | Al2O3                        | 21.78         | Al2O3                        | 17.65         | Al2O3                        | 3.34          |
| CaO                          | 0.00          | CaO                          | 0.34          | Fe2O3                        | 13.45         | Fe2O3                        | 17.54         |
| Na2O                         | 0.16          | Na2O                         | 0.24          | CaO                          | 0.52          | CaO                          | 0.29          |
| K2O                          | 0.00          | K2O                          | 14.50         | Na2O                         | 2.74          | Na2O                         | 0.40          |
| ---                          | ---           | ---                          | ---           | K2O                          | 1.53          | K2O                          | 0.43          |
|                              | 100.00        |                              | 100.00        | ZrO2                         | 16.87         | ZrO2                         | 0.00          |
|                              |               |                              |               | ---                          | ---           | ---                          | ---           |
|                              |               |                              |               |                              | 100.00        |                              | 100.00        |

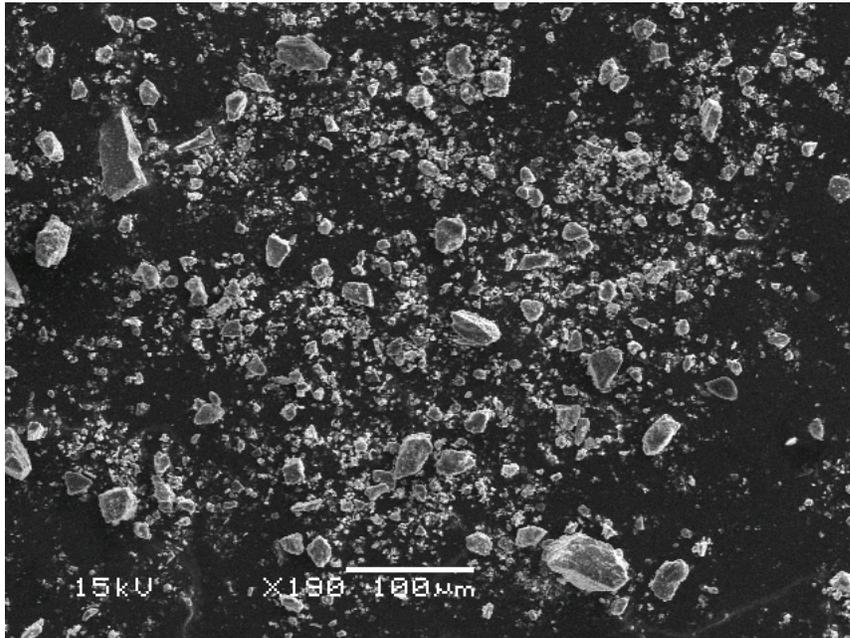


**Figura 2:** Imagen de la muestra 1ba adquirida por microscopio electrónico de barrido en el modo de electrones secundarios, SEM-SEI.

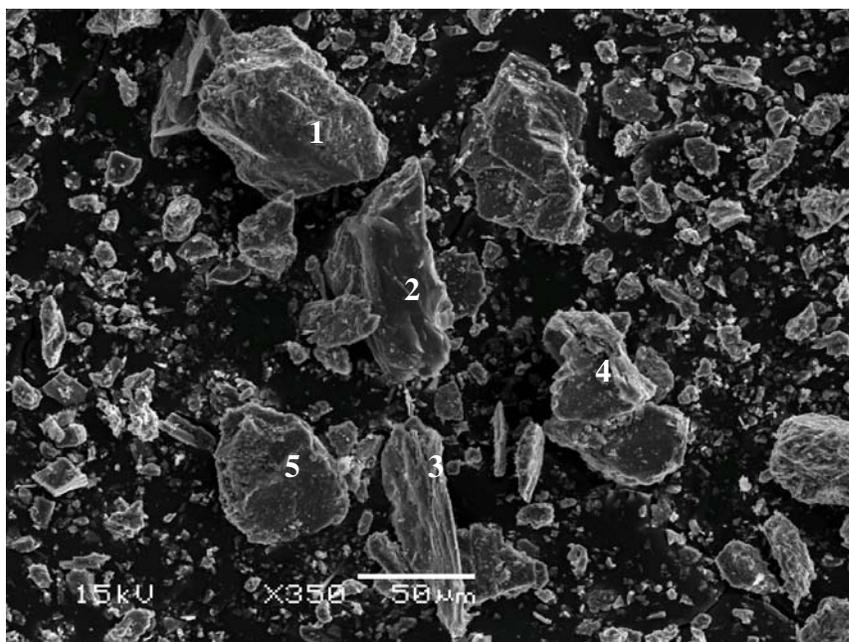
| Análisis químico del punto 1  | Análisis químico del punto 2 | Análisis químico del punto 3 |      |       |       |       |     |      |      |      |     |      |     |     |  |        |  |                  |               |      |       |       |      |     |      |      |      |     |      |     |     |  |        |   |                  |               |      |       |       |       |     |      |      |      |     |      |     |     |  |        |
|---|------------------------------|------------------------------|------|-------|-------|-------|-----|------|------|------|-----|------|-----|-----|--|--------|--|------------------|---------------|------|-------|-------|------|-----|------|------|------|-----|------|-----|-----|--|--------|---|------------------|---------------|------|-------|-------|-------|-----|------|------|------|-----|------|-----|-----|--|--------|
| <table border="1"> <thead> <tr> <th>Compound Formula</th> <th>Compound Wt %</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>SiO2</td> <td>72.03</td> </tr> <tr> <td>Al2O3</td> <td>20.57</td> </tr> <tr> <td>CaO</td> <td>1.24</td> </tr> <tr> <td>Na2O</td> <td>5.16</td> </tr> <tr> <td>K2O</td> <td>0.99</td> </tr> <tr> <td>---</td> <td>---</td> </tr> <tr> <td></td> <td>100.00</td> </tr> </tbody> </table> | Compound Formula             | Compound Wt %                | SiO2 | 72.03 | Al2O3 | 20.57 | CaO | 1.24 | Na2O | 5.16 | K2O | 0.99 | --- | --- |  | 100.00 | <table border="1"> <thead> <tr> <th>Compound Formula</th> <th>Compound Wt %</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>SiO2</td> <td>97.33</td> </tr> <tr> <td>Al2O3</td> <td>1.58</td> </tr> <tr> <td>CaO</td> <td>0.13</td> </tr> <tr> <td>Na2O</td> <td>0.40</td> </tr> <tr> <td>K2O</td> <td>0.55</td> </tr> <tr> <td>---</td> <td>---</td> </tr> <tr> <td></td> <td>100.00</td> </tr> </tbody> </table> | Compound Formula | Compound Wt % | SiO2 | 97.33 | Al2O3 | 1.58 | CaO | 0.13 | Na2O | 0.40 | K2O | 0.55 | --- | --- |  | 100.00 | <table border="1"> <thead> <tr> <th>Compound Formula</th> <th>Compound Wt %</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>SiO2</td> <td>69.14</td> </tr> <tr> <td>Al2O3</td> <td>21.01</td> </tr> <tr> <td>CaO</td> <td>3.84</td> </tr> <tr> <td>Na2O</td> <td>5.44</td> </tr> <tr> <td>K2O</td> <td>0.58</td> </tr> <tr> <td>---</td> <td>---</td> </tr> <tr> <td></td> <td>100.00</td> </tr> </tbody> </table> | Compound Formula | Compound Wt % | SiO2 | 69.14 | Al2O3 | 21.01 | CaO | 3.84 | Na2O | 5.44 | K2O | 0.58 | --- | --- |  | 100.00 |
| Compound Formula  | Compound Wt %                |                              |      |       |       |       |     |      |      |      |     |      |     |     |  |        |  |                  |               |      |       |       |      |     |      |      |      |     |      |     |     |  |        |   |                  |               |      |       |       |       |     |      |      |      |     |      |     |     |  |        |
| SiO2  | 72.03                        |                              |      |       |       |       |     |      |      |      |     |      |     |     |  |        |  |                  |               |      |       |       |      |     |      |      |      |     |      |     |     |  |        |   |                  |               |      |       |       |       |     |      |      |      |     |      |     |     |  |        |
| Al2O3   | 20.57                        |                              |      |       |       |       |     |      |      |      |     |      |     |     |  |        |  |                  |               |      |       |       |      |     |      |      |      |     |      |     |     |  |        |   |                  |               |      |       |       |       |     |      |      |      |     |      |     |     |  |        |
| CaO   | 1.24                         |                              |      |       |       |       |     |      |      |      |     |      |     |     |  |        |  |                  |               |      |       |       |      |     |      |      |      |     |      |     |     |  |        |   |                  |               |      |       |       |       |     |      |      |      |     |      |     |     |  |        |
| Na2O  | 5.16                         |                              |      |       |       |       |     |      |      |      |     |      |     |     |  |        |  |                  |               |      |       |       |      |     |      |      |      |     |      |     |     |  |        |   |                  |               |      |       |       |       |     |      |      |      |     |      |     |     |  |        |
| K2O   | 0.99                         |                              |      |       |       |       |     |      |      |      |     |      |     |     |  |        |  |                  |               |      |       |       |      |     |      |      |      |     |      |     |     |  |        |   |                  |               |      |       |       |       |     |      |      |      |     |      |     |     |  |        |
| ---   | ---                          |                              |      |       |       |       |     |      |      |      |     |      |     |     |  |        |  |                  |               |      |       |       |      |     |      |      |      |     |      |     |     |  |        |   |                  |               |      |       |       |       |     |      |      |      |     |      |     |     |  |        |
|   | 100.00                       |                              |      |       |       |       |     |      |      |      |     |      |     |     |  |        |  |                  |               |      |       |       |      |     |      |      |      |     |      |     |     |  |        |   |                  |               |      |       |       |       |     |      |      |      |     |      |     |     |  |        |
| Compound Formula  | Compound Wt %                |                              |      |       |       |       |     |      |      |      |     |      |     |     |  |        |  |                  |               |      |       |       |      |     |      |      |      |     |      |     |     |  |        |   |                  |               |      |       |       |       |     |      |      |      |     |      |     |     |  |        |
| SiO2  | 97.33                        |                              |      |       |       |       |     |      |      |      |     |      |     |     |  |        |  |                  |               |      |       |       |      |     |      |      |      |     |      |     |     |  |        |   |                  |               |      |       |       |       |     |      |      |      |     |      |     |     |  |        |
| Al2O3   | 1.58                         |                              |      |       |       |       |     |      |      |      |     |      |     |     |  |        |  |                  |               |      |       |       |      |     |      |      |      |     |      |     |     |  |        |   |                  |               |      |       |       |       |     |      |      |      |     |      |     |     |  |        |
| CaO   | 0.13                         |                              |      |       |       |       |     |      |      |      |     |      |     |     |  |        |  |                  |               |      |       |       |      |     |      |      |      |     |      |     |     |  |        |   |                  |               |      |       |       |       |     |      |      |      |     |      |     |     |  |        |
| Na2O  | 0.40                         |                              |      |       |       |       |     |      |      |      |     |      |     |     |  |        |  |                  |               |      |       |       |      |     |      |      |      |     |      |     |     |  |        |   |                  |               |      |       |       |       |     |      |      |      |     |      |     |     |  |        |
| K2O   | 0.55                         |                              |      |       |       |       |     |      |      |      |     |      |     |     |  |        |  |                  |               |      |       |       |      |     |      |      |      |     |      |     |     |  |        |   |                  |               |      |       |       |       |     |      |      |      |     |      |     |     |  |        |
| ---   | ---                          |                              |      |       |       |       |     |      |      |      |     |      |     |     |  |        |  |                  |               |      |       |       |      |     |      |      |      |     |      |     |     |  |        |   |                  |               |      |       |       |       |     |      |      |      |     |      |     |     |  |        |
|   | 100.00                       |                              |      |       |       |       |     |      |      |      |     |      |     |     |  |        |  |                  |               |      |       |       |      |     |      |      |      |     |      |     |     |  |        |   |                  |               |      |       |       |       |     |      |      |      |     |      |     |     |  |        |
| Compound Formula  | Compound Wt %                |                              |      |       |       |       |     |      |      |      |     |      |     |     |  |        |  |                  |               |      |       |       |      |     |      |      |      |     |      |     |     |  |        |   |                  |               |      |       |       |       |     |      |      |      |     |      |     |     |  |        |
| SiO2  | 69.14                        |                              |      |       |       |       |     |      |      |      |     |      |     |     |  |        |  |                  |               |      |       |       |      |     |      |      |      |     |      |     |     |  |        |   |                  |               |      |       |       |       |     |      |      |      |     |      |     |     |  |        |
| Al2O3   | 21.01                        |                              |      |       |       |       |     |      |      |      |     |      |     |     |  |        |  |                  |               |      |       |       |      |     |      |      |      |     |      |     |     |  |        |   |                  |               |      |       |       |       |     |      |      |      |     |      |     |     |  |        |
| CaO   | 3.84                         |                              |      |       |       |       |     |      |      |      |     |      |     |     |  |        |  |                  |               |      |       |       |      |     |      |      |      |     |      |     |     |  |        |   |                  |               |      |       |       |       |     |      |      |      |     |      |     |     |  |        |
| Na2O  | 5.44                         |                              |      |       |       |       |     |      |      |      |     |      |     |     |  |        |  |                  |               |      |       |       |      |     |      |      |      |     |      |     |     |  |        |   |                  |               |      |       |       |       |     |      |      |      |     |      |     |     |  |        |
| K2O   | 0.58                         |                              |      |       |       |       |     |      |      |      |     |      |     |     |  |        |  |                  |               |      |       |       |      |     |      |      |      |     |      |     |     |  |        |   |                  |               |      |       |       |       |     |      |      |      |     |      |     |     |  |        |
| ---   | ---                          |                              |      |       |       |       |     |      |      |      |     |      |     |     |  |        |  |                  |               |      |       |       |      |     |      |      |      |     |      |     |     |  |        |   |                  |               |      |       |       |       |     |      |      |      |     |      |     |     |  |        |
|   | 100.00                       |                              |      |       |       |       |     |      |      |      |     |      |     |     |  |        |  |                  |               |      |       |       |      |     |      |      |      |     |      |     |     |  |        |   |                  |               |      |       |       |       |     |      |      |      |     |      |     |     |  |        |



**Figura 3:** Imagen de la muestra 1bo adquirida por microscopio electrónico de barrido en el modo de electrones secundarios, SEM-SEI.

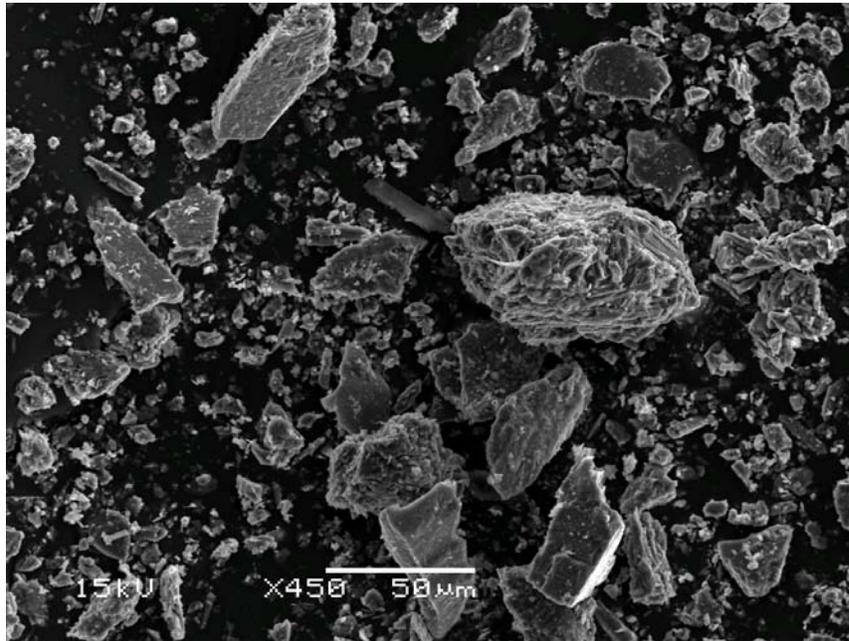


**Figura 4:** Imagen de la muestra 1bo adquirida por microscopio electrónico de barrido en el modo de electrones secundarios, SEM-SEI.

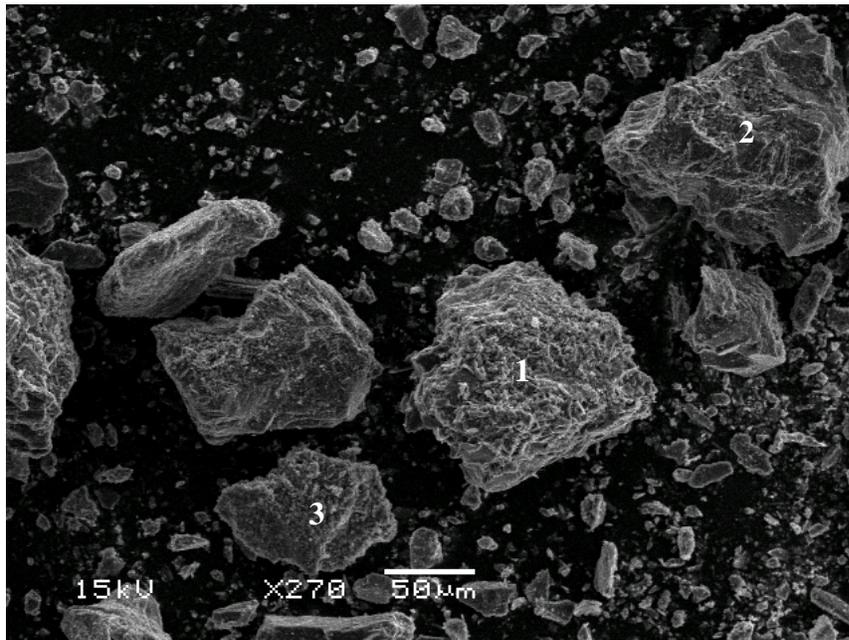


**Figura 5:** Imagen de la muestra 2ba adquirida por microscopio electrónico de barrido en el modo de electrones secundarios, SEM-SEI.

| Análisis químico del punto 1 |               | Análisis químico del punto 2 |               | Análisis químico del punto 3 |               | Análisis químico del punto 4 |               | Análisis químico del punto 5 |               |
|------------------------------|---------------|------------------------------|---------------|------------------------------|---------------|------------------------------|---------------|------------------------------|---------------|
| Compound Formula             | Compound Wt % |
| SiO2                         | 17.20         | SiO2                         | 23.88         | SiO2                         | 16.77         | SiO2                         | 49.55         | SiO2                         | 98.21         |
| Al2O3                        | 8.83          | Al2O3                        | 15.26         | Al2O3                        | 6.32          | Al2O3                        | 28.92         | Al2O3                        | 0.16          |
| Fe2O3                        | 14.77         | Fe2O3                        | 48.12         | Fe2O3                        | 72.23         | Fe2O3                        | 6.33          | Fe2O3                        | 0.93          |
| MgO                          | 9.32          | MgO                          | 11.81         | MgO                          | 2.71          | MgO                          | 1.50          | MgO                          | 0.13          |
| CaO                          | 47.45         | CaO                          | 0.32          | CaO                          | 0.82          | CaO                          | 0.18          | CaO                          | 0.38          |
| Na2O                         | 1.99          | Na2O                         | 0.54          | Na2O                         | 0.87          | Na2O                         | 0.18          | Na2O                         | 0.10          |
| K2O                          | 0.44          | K2O                          | 0.00          | K2O                          | 0.28          | K2O                          | 13.32         | K2O                          | 0.00          |
| ZrO2                         | 0.00          | ZrO2                         | 0.07          | ZrO2                         | 0.01          | ZrO2                         | 0.03          | ZrO2                         | 0.09          |
| ---                          | ---           | ---                          | ---           | ---                          | ---           | ---                          | ---           | ---                          | ---           |
|                              | 100.00        |                              | 100.00        |                              | 100.00        |                              | 100.00        |                              | 100.00        |

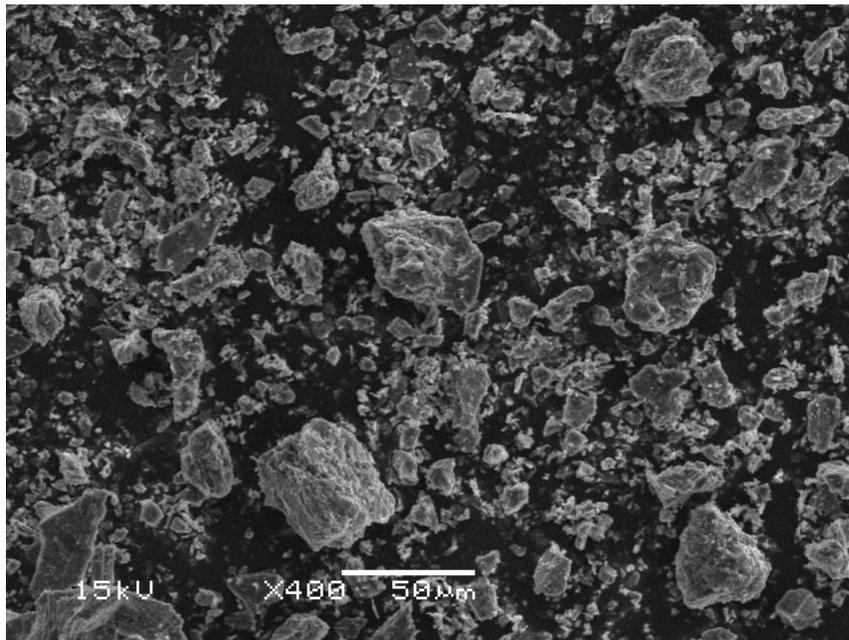


**Figura 6:** Imagen de la muestra 2ba adquirida por microscopio electrónico de barrido en el modo de electrones secundarios, SEM-SEI.

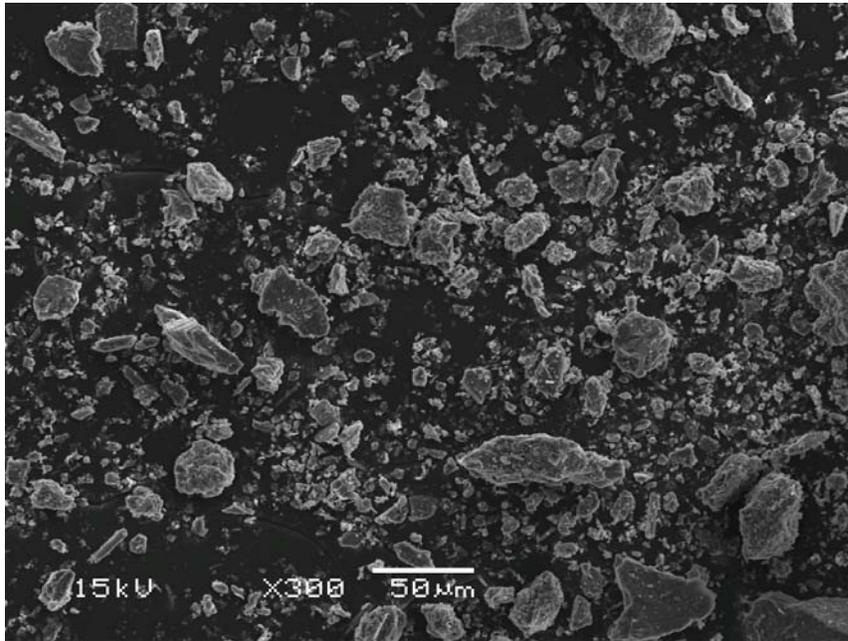


**Figura 7:** Imagen de la muestra 2ba adquirida por microscopio electrónico de barrido en el modo de electrones secundarios, SEM-SEI.

| Análisis químico del punto 1 |               | Análisis químico del punto 2 |               | Análisis químico del punto 3 |               |
|------------------------------|---------------|------------------------------|---------------|------------------------------|---------------|
| Compound Formula             | Compound Wt % | Compound Formula             | Compound Wt % | Compound Formula             | Compound Wt % |
| SiO2                         | 28.98         | SiO2                         | 50.80         | SiO2                         | 64.09         |
| Al2O3                        | 19.64         | Al2O3                        | 6.72          | Al2O3                        | 13.76         |
| Fe2O3                        | 32.79         | Fe2O3                        | 17.10         | Fe2O3                        | 7.36          |
| MgO                          | 16.88         | MgO                          | 11.95         | MgO                          | 0.77          |
| CaO                          | 0.40          | CaO                          | 10.24         | CaO                          | 13.42         |
| Na2O                         | 1.10          | Na2O                         | 2.93          | Na2O                         | 0.43          |
| K2O                          | 0.11          | K2O                          | 0.26          | K2O                          | 0.06          |
| ZrO2                         | 0.09          | ZrO2                         | 0.00          | ZrO2                         | 0.11          |
| ---                          | ---           | ---                          | ---           | ---                          | ---           |
|                              | 100.00        |                              | 100.00        |                              | 100.00        |



**Figura 8:** Imagen de la muestra 2bo adquirida por microscopio electrónico de barrido en el modo de electrones secundarios, SEM-SEI.



**Figura 9:** Imagen de la muestra 2bo adquirida por microscopio electrónico de barrido en el modo de electrones secundarios, SEM-SEI.

Ander De Abrisqueta

Laboratorio De Microscopía Electrónica de Barrido

## ANEXO 4: MANUAL DEL PROGRAMA DE SIMULACIÓN

### MANUAL DE ICARUS.

El programa de simulación *ICARUS* le brinda al usuario la posibilidad de anticipar el comportamiento que tendrán molinos de bolas o barras, de diversas dimensiones a partir de la introducción de algunos valores previamente calculados en ensayos de laboratorio. *ICARUS* cuenta con unos campos en donde el usuario puede introducir valores necesarios para el proceso tales como: el tamaño en  $\mu\text{m}$  del 80% de las partículas en la alimentación y su contraparte en la descarga, llamados *F80* y *P80* respectivamente; el índice de Bond *Wit*, previamente calculando en ensayos de laboratorio, y otras variables que el mismo programa calcula.

*ICARUS* está estructurado en dos etapas, cada una disponible para ambos tipos de molinos; en la etapa 1, *ICARUS* permite conocer cuál será el requerimiento energético del molino de bolas o de barras con tres diferentes diámetros, a partir de estos primeros resultados el usuario podrá elegir el molino más conveniente cuyo requerimiento energético sea menor; en la etapa 2, el programa permite relacionar el diámetro previamente obtenido, la relación largo ancho del equipo y la fracción de la velocidad límite con la producción del molino; en pocas palabras, permite estimar la producción del equipo a partir de las dimensiones físicas y las características operacionales del mismo. En esta parte, el programa también le brinda al usuario la libertad de seleccionar la fracción de la velocidad límite más conveniente a utilizar y la relación largo ancho al comparar el efecto que tengan estas variaciones sobre la producción horaria del equipo.

El programa *ICARUS* cuenta también con la opción de representar todos estos resultados en una entidad gráfica, todo ello con el fin de facilitarle a la parte

interesada la lectura de los mismos para de esa manera apoyar su criterio de selección.

Las limitaciones del programa son básicamente tres: si bien la formulación permite la libertad de evaluar estos escenarios en molida en húmedo y en seco, al diseñar el programa sólo se tomó en consideración la molienda en seco, **ICARUS** sólo permite la evaluación con dos minerales a la vez y el algoritmo sólo tomó en consideración los molinos cilíndricos de bolas y barras puesto que el estudio se centró en la evaluación de estos molinos y debido también a limitaciones técnicas.

### **GLOSARIO DE TÉRMINOS.**

***F80***: Tamaño en  $\mu\text{m}$  del 80% de las partículas de la alimentación.

***P80***: Tamaño en  $\mu\text{m}$  del 80% de las partículas de la descarga.

***D***: Diámetro de los molinos. Expresados en metros [m].

***Wit***: Índice de trabajo de Bond para un mineral. Expresado en kw-h/ton.

***Wi***: Consumo energético del molino. Expresado en kw-h/ton.

***E***: Energía específica consumida por la carga moledora en el proceso de molienda. Expresado en kw-h/ton.

***K***: constante de corrección para los procesos de molienda. Adimensional.

***L/D***: Relación largo/acho del equipo. Adimensional.

**$\Phi_c$** : Fracción de la velocidad límite en el proceso.

***d***: Densidad de la carga moledora.

***J***: Porcentaje de la carga moledora.

***Q***: Capacidad del molino. Expresada en: Ton/h.

## PROGRAMA DE SIMULACIÓN

El programa *ICARUS* se estructuró de la siguiente manera:

*ICARUS0*: Interface de inicio, aquí el usuario tiene la libertad de elegir con qué tipo de molino hacer el estudio (*Imagen 1*).

*ICARUS1*: Interface que permite el análisis de la influencia del diámetro sobre el consumo energético del equipo *D* vs *E*. Para molino de bolas.

*ICARUS2*: Interface que permite el análisis de la influencia de variable como *L/D*,  $\Phi_c$  sobre *Q*. Para el molino de bolas.

*ICARUS3*: Interface que permite el análisis de la influencia del diámetro sobre el consumo energético del equipo *D* vs *E*. Para molino de barras.

*ICARUS4*: Interface que permite el análisis de la influencia de variable como *L/D*,  $\Phi_c$  sobre *Q*. Para el molino de barras.

La estructura, se podría resumir de la siguiente manera: *ICARUS 1* e *ICARUS 3* corresponden a la primera etapa del estudio (*Imagen 2*) mientras que *ICARUS 2* e *ICARUS 4* a la segunda etapa (*Imagen 3*), para un molino de bolas y uno de barras respectivamente.



Imagen 1: Interface de inicio.

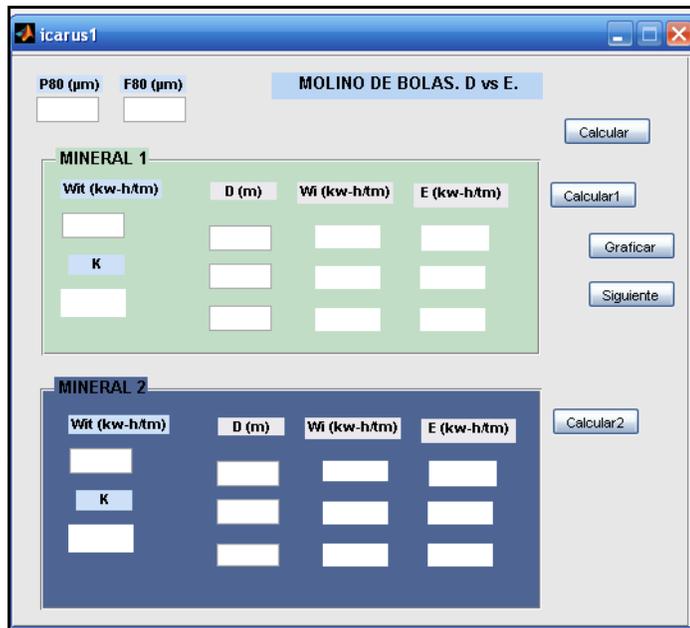
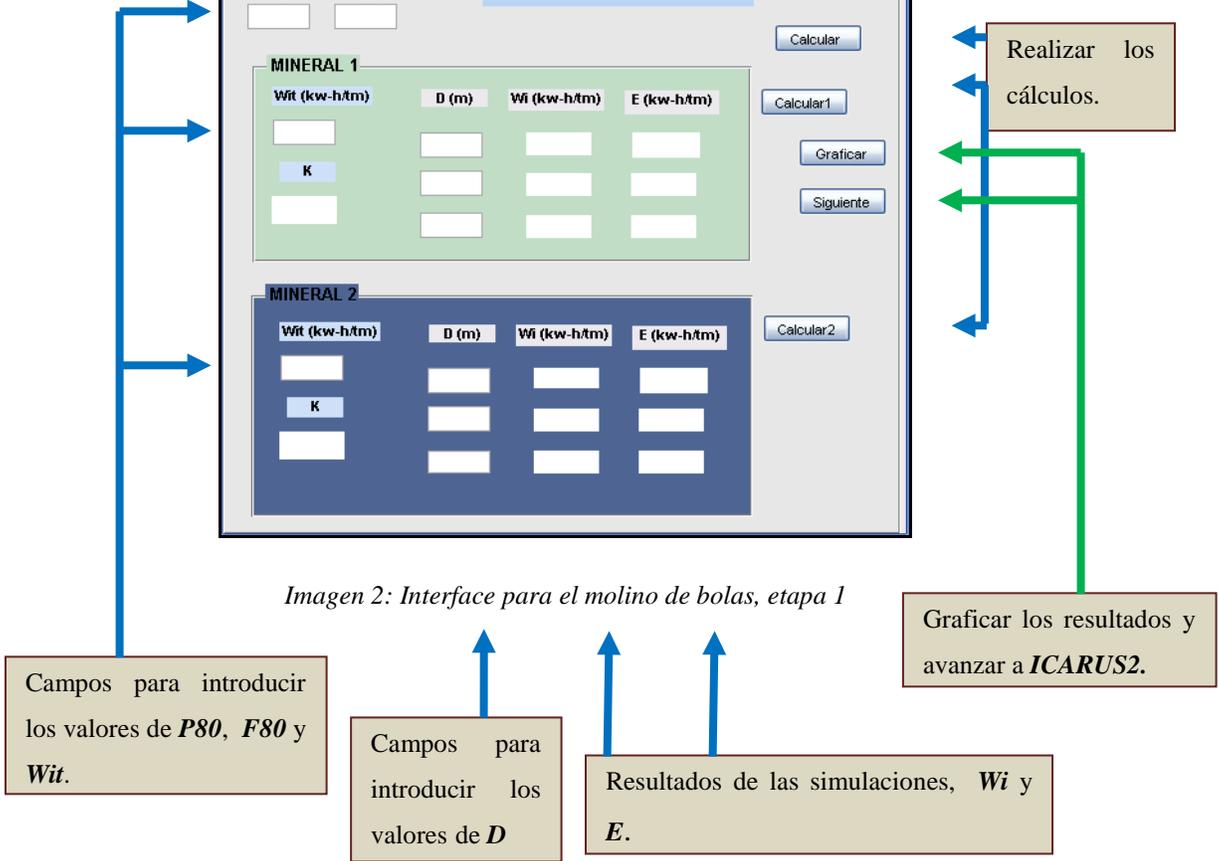


Imagen 2: Interface para el molino de bolas, etapa 1



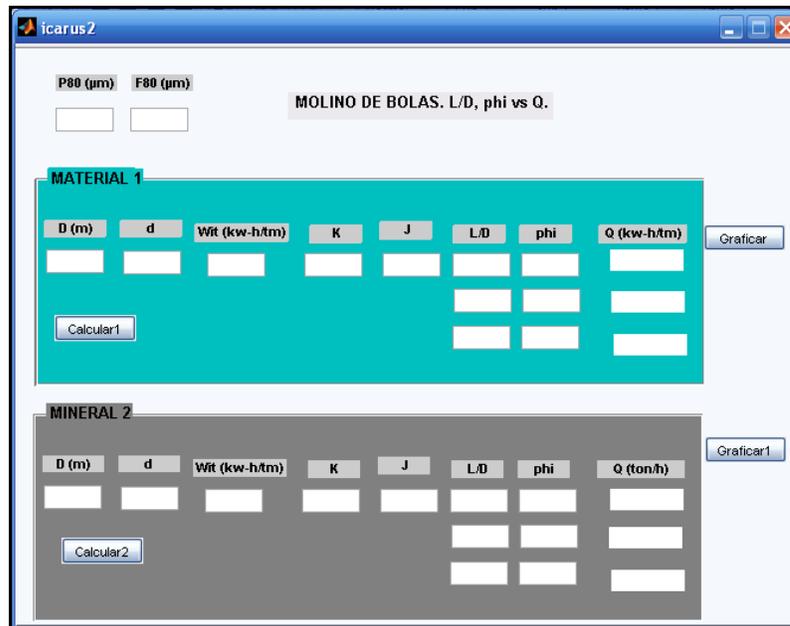
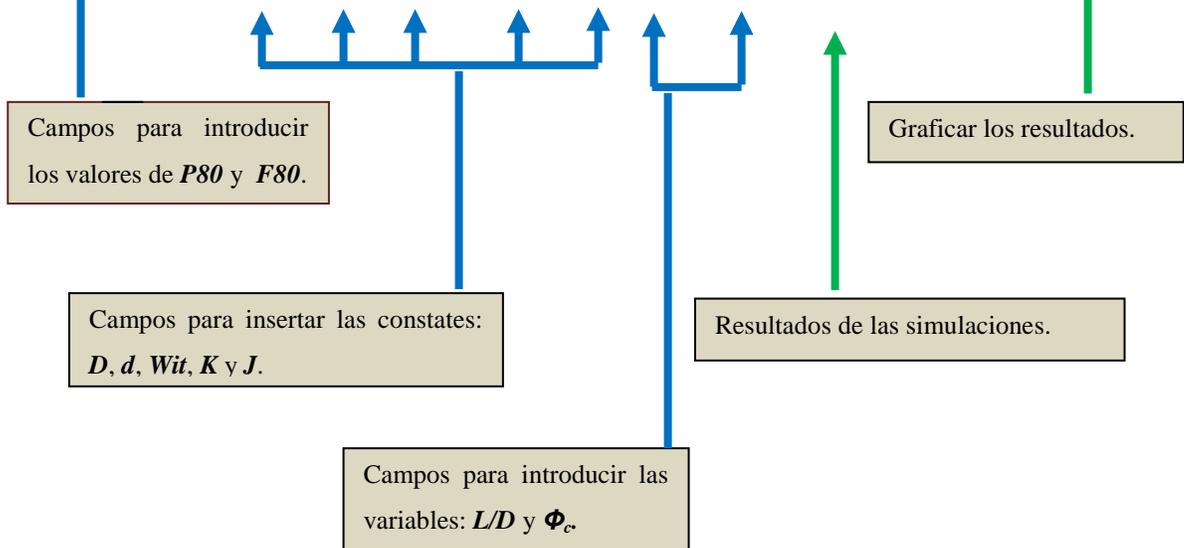


Imagen 3: Interface para el Molino de bolas, etapa 2.



Nótese que *ICARUS 3* E *ICARUS 4* tienen el mismo formato que las interfaces arriba mostradas.

## ANEXO 5: ALGORITMO DISEÑADO PARA ICARUS

### Molino de bolas

#### Etapa 1: ICARUS1

```
a=str2num(get(handles.edit1,'String'));
b=str2num(get(handles.edit2,'String'));
c=str2num(get(handles.edit3,'String'));

k111=1.3;

if b>4000.*sqrt(1.1*(13/c));

    k211=1+((((c/1.1)-7).*(b/(4000*sqrt(1.1*(13/c)))))./(b/a));

else
k211=1;
end

if 15<a<75;

k311=(a+10.3)/(1.145.*a);

else
    k311=1;
end

if b/a<6;

    k411=(1+(0.13)/((b/a)-1.35));
else
    k411=1;
end

k11=k111*k211*k311*k411;

set(handles.salida1,'String',k11);

.....

a=str2num(get(handles.edit1,'String'));
```

```

b=str2num(get(handles.edit2,'String'));
c=str2num(get(handles.edit3,'String'));
d111=str2num(get(handles.e1,'String'));
d211=str2num(get(handles.e2,'String'));
d311=str2num(get(handles.e3,'String'));
k11=str2num(get(handles.salida1,'String'));

if d111<3.81;

    wid111=((2.44/d111).^2)*c;
end

if d111>3.81;

wid111=0.914*c;
end

wi111=k11*wid111;
set(handles.s1,'String',wi111);

E111=10*wi111*((1/sqrt(a))-(1/sqrt(b)));
set(handles.s2,'String',E111);

if d211<3.81;

    wid211=(2.44/d211).^2*c;
end

if d211>3.81;

wid211=0.914*c;
end

wi211=k11*wid211;
set(handles.s3,'String',wi211);

E211=10*wi211*((1/sqrt(a))-(1/sqrt(b)));
set(handles.s4,'String',E211);

if d311<3.81;

    wid311=(2.44/d311).^2*c;
end

if d311>3.81;

wid311=0.914*c;

```

```

end

wi311=k11*wid311;
set(handles.s5, 'String', wi311);

E311=10*wi311*((1/sqrt(a))-(1/sqrt(b)));
set(handles.s6, 'String', E311);

.....

a=str2num(get(handles.edit1, 'String'));
b=str2num(get(handles.edit2, 'String'));
d=str2num(get(handles.edit4, 'String'));

k121=1.3;

if b>4000.*sqrt(1.1*(13/d));

    k221=1+(((d/1.1)-7).*(b/(4000*sqrt(1.1*(13/d)))))./(b/a));

else
    k221=1;
end

if 15<a<75;

k321=(a+10.3)/(1.145.*a);

else
    k321=1;
end

if b/a<6;

    k421=(1+(0.13)/((b/a)-1.35));
else
    k421=1;
end

k21=k121*k221*k321*k421;

set(handles.salida2, 'String', k21);

d121=str2num(get(handles.e4, 'String'));
d221=str2num(get(handles.e5, 'String'));

```

```

d321=str2num(get(handles.e6, 'String'));
k21=str2num(get(handles.salida2, 'String'));

if d121<3.81;

    wid121=((2.44/d121).^2)*d;
end

if d121>3.81;

wid121=0.914*d;
end

wi121=k21*wid121;
set(handles.s7, 'String', wi121);

E121=10*wi121*((1/sqrt(a))-(1/sqrt(b)));
set(handles.s8, 'String', E121);

if d221<3.81;

    wid221=(2.44/d221).^2*d;
end

if d221>3.81;

wid221=0.914*d;
end

wi221=k21*wid221;
set(handles.s9, 'String', wi221);

E221=10*wi221*((1/sqrt(a))-(1/sqrt(b)));
set(handles.s10, 'String', E221);

if d321<3.81;

    wid321=(2.44/d321).^2*d;
end

if d321>3.81;

wid321=0.914*d;
end

wi321=k21*wid321;
set(handles.s11, 'String', wi321);

```

```
E321=10*wi321*((1/sqrt(a))-(1/sqrt(b)));
set(handles.s12, 'String', E321);
```

.....

```
d111=str2num(get(handles.e1, 'String'));
d211=str2num(get(handles.e2, 'String'));
d311=str2num(get(handles.e3, 'String'));
wi111=str2num(get(handles.s1, 'String'));
wi211=str2num(get(handles.s3, 'String'));
wi311=str2num(get(handles.s5, 'String'));
```

```
d121=str2num(get(handles.e4, 'String'));
d221=str2num(get(handles.e5, 'String'));
d321=str2num(get(handles.e6, 'String'));
wi121=str2num(get(handles.s7, 'String'));
wi221=str2num(get(handles.s9, 'String'));
wi321=str2num(get(handles.s11, 'String'));
```

```
D11=[d111,d211,d311];
WI11=[wi111,wi211,wi311];
```

```
D21=[d121,d221,d321];
WI21=[wi121,wi221,wi321];
```

figure

```
subplot (1,2,1)
plot(D11,WI11, 'gs--', 'LineWidth', 3)
title('Wi vs D Material 1')
xlabel('D (m)')
ylabel('Wi(kw-h/tm)')
grid on;
```

```
subplot (1,2,2)
plot(D21,WI21, 'rs--', 'LineWidth', 3)
title('Wi vs D. Material 2')
xlabel('D (m)')
ylabel('Wi(kw-h/tm)')
grid on;
```

.....

## Etapa 2: ICARUS2

```
a=str2num(get(handles.edit1,'String'));
b=str2num(get(handles.edit2,'String'));
d2=str2num(get(handles.e12,'String'));
den2=str2num(get(handles.e13,'String'));
wit2=str2num(get(handles.e14,'String'));
k2=str2num(get(handles.e15,'String'));
j2=str2num(get(handles.e16,'String'));
ld21=str2num(get(handles.e17,'String'));
ld22=str2num(get(handles.e18,'String'));
ld23=str2num(get(handles.e19,'String'));
phi21=str2num(get(handles.e20,'String'));
phi22=str2num(get(handles.e21,'String'));
phi23=str2num(get(handles.e22,'String'));

z21=(1.08*den2*ld21*(j2-.937*j2.^2)*(phi21-((.1*phi21)/(2.^(9-
10*phi21)))))/(k2*wit2*((10/sqrt(a))-(10/sqrt(b))));

if d2<3.81;

    q21=6.13*z21*d2.^3.5;

end

if d2>3.81;

    q21=8.01*z21*d2.^3.3;
end

set(handles.s4,'String',q21);

z22=(1.08*den2*ld22*(j2-.937*j2.^2)*(phi22-((.1*phi22)/(2.^(9-
10*phi22)))))/(k2*wit2*((10/sqrt(a))-(10/sqrt(b))));

if d2<3.81;

    q22=6.13*z22*d2.^3.5;

end

if d2>3.81;

    q22=8.01*z22*d2.^3.3;
end

set(handles.s5,'String',q22);
```

```

z23=(1.08*den2*ld23*(j2-.937*j2.^2)*(phi23-((.1*phi23)/(2.^(9-
10*phi23)))))/(k2*wit2*((10/sqrt(a))-(10/sqrt(b))));

if d2<3.81;

    q23=6.13*z23*d2.^3.5;

end

if d2>3.81;

    q23=8.01*z23*d2.^3.3;
end

set(handles.s6,'String',q23);
.....

ld11=str2num(get(handles.e6,'String'));
ld12=str2num(get(handles.e7,'String'));
ld13=str2num(get(handles.e8,'String'));
phi11=str2num(get(handles.e9,'String'));
phi12=str2num(get(handles.e10,'String'));
phi13=str2num(get(handles.e11,'String'));
q11=str2num(get(handles.s1,'String'));
q12=str2num(get(handles.s2,'String'));
q13=str2num(get(handles.s3,'String'));
ld21=str2num(get(handles.e17,'String'));
ld22=str2num(get(handles.e18,'String'));
ld23=str2num(get(handles.e19,'String'));
phi21=str2num(get(handles.e20,'String'));
phi22=str2num(get(handles.e21,'String'));
phi23=str2num(get(handles.e22,'String'));
q21=str2num(get(handles.s4,'String'));
q22=str2num(get(handles.s5,'String'));
q23=str2num(get(handles.s6,'String'));

LD11=[ld11,ld12,ld13];
PHI11=[phi11,phi12,phi13];
Q11=[q11,q12,q13];
LD21=[ld21,ld22,ld23];
PHI21=[phi21,phi22,phi23];
Q21=[q21,q22,q23];

figure

subplot (1,2,1)

```

```

plot(LD11,Q11,'ks--','LineWidth',3)
title('L/D vs Q Material 1')
xlabel('L/D')
ylabel('Q (ton/h)')
grid on;

```

```

subplot (1,2,2)
plot(LD21,Q21,'bs--','LineWidth',3)
title('L/D vs Q Material 2')
xlabel('L/D')
ylabel('Q (ton/h)')
grid on;

```

.....

```

a=str2num(get(handles.edit1,'String'));
b=str2num(get(handles.edit2,'String'));
d1=str2num(get(handles.e1,'String'));
den1=str2num(get(handles.e2,'String'));
wit1=str2num(get(handles.e3,'String'));
k1=str2num(get(handles.e4,'String'));
j1=str2num(get(handles.e5,'String'));
ld11=str2num(get(handles.e6,'String'));
ld12=str2num(get(handles.e7,'String'));
ld13=str2num(get(handles.e8,'String'));
phi11=str2num(get(handles.e9,'String'));
phi12=str2num(get(handles.e10,'String'));
phi13=str2num(get(handles.e11,'String'));

```

```

z11=(1.08*den1*ld11*(j1-.937*j1.^2)*(phi11-((.1*phi11)/(2.^(9-
10*phi11)))))/(k1*wit1*((10/sqrt(a))-(10/sqrt(b))));

```

```

if d1<3.81;

```

```

    q11=6.13*z11*d1.^3.5;

```

```

end

```

```

if d1>3.81;

```

```

    q11=8.01*z11*d1.^3.3;

```

```

end

```

```

set(handles.s1,'String',q11);

```

```

z12=(1.08*den1*ld12*(j1-.937*j1.^2)*(phi12-((.1*phi12)/(2.^(9-
10*phi12)))))/(k1*wit1*((10/sqrt(a))-(10/sqrt(b))));

if d1<3.81;

    q12=6.13*z12*d1.^3.5;

end

if d1>3.81;

    q12=8.01*z12*d1.^3.3;
end

set(handles.s2, 'String', q12);

z13=(1.08*den1*ld13*(j1-.937*j1.^2)*(phi13-((.1*phi13)/(2.^(9-
10*phi13)))))/(k1*wit1*((10/sqrt(a))-(10/sqrt(b))));

if d1<3.81;

    q13=6.13*z13*d1.^3.5;

end

if d1>3.81;

    q13=8.01*z13*d1.^3.3;
end

set(handles.s3, 'String', q13);
.....

phi11=str2num(get(handles.e9, 'String'));
phi12=str2num(get(handles.e10, 'String'));
phi13=str2num(get(handles.e11, 'String'));

phi21=str2num(get(handles.e20, 'String'));
phi22=str2num(get(handles.e21, 'String'));
phi23=str2num(get(handles.e22, 'String'));

q11=str2num(get(handles.s1, 'String'));
q12=str2num(get(handles.s2, 'String'));
q13=str2num(get(handles.s3, 'String'));

q21=str2num(get(handles.s4, 'String'));
q22=str2num(get(handles.s5, 'String'));

```

```
q23=str2num(get(handles.s6, 'String'));
```

```
PHI11=[phi11,phi12,phi13];
```

```
PHI21=[phi21,phi22,phi23];
```

```
Q11=[q11,q12,q13];
```

```
Q21=[q21,q22,q23];
```

```
figure
```

```
subplot(1,2,1)
```

```
plot(PHI11,Q11,'rs--','LineWidth',3)
```

```
title('Phi vs Q. Material 1')
```

```
xlabel('Phi')
```

```
ylabel('Q (ton/h)')
```

```
grid on;
```

```
subplot(1,2,2)
```

```
plot(PHI21,Q21,'ks--','LineWidth',3)
```

```
title('Phi vs Q. Material 2')
```

```
xlabel('Phi')
```

```
ylabel('Q (ton/h)')
```

```
grid on;
```

```
.....
```

## Molino de barras

### **Etapal: ICARUS3**

```
a=str2num(get(handles.edit1, 'String'));
b=str2num(get(handles.edit2, 'String'));
c=str2num(get(handles.edit3, 'String'));

k112=1.4;
k212=1.3;

if b>16000.*sqrt(1.1*(13/c));

    k312=1+(((c/1.1)-7).*(b/(16000*sqrt(1.1*(13/c)))-1))./(b/a));
else
    k312=1;
end

k12=k112*k212*k312;
set(handles.salida1, 'String', k12);

d112=str2num(get(handles.e1, 'String'));
d212=str2num(get(handles.e2, 'String'));
d312=str2num(get(handles.e3, 'String'));
k12=str2num(get(handles.salida1, 'String'));

if d112<3.81;

    wid112=((2.44/d112).^2)*c;
end

if d112>3.81;

wid112=0.914*c;
end

wil12=k12*wid112;
set(handles.s1, 'String', wil12);

E112=10*wil12*((1/sqrt(a))-(1/sqrt(b)));
set(handles.s4, 'String', E112);

if d312<3.81;

    wid312=((2.44/d312).^2)*c;
end
```

```

if d312>3.81;

wid312=0.914*c;
end

wi312=k12*wid312;
set(handles.s3, 'String', wi312);

E312=10*wi312*((1/sqrt(a))-(1/sqrt(b)));
set(handles.s6, 'String', E312);

if d212<3.81;

    wid212=((2.44/d212).^2)*c;
end

if d212>3.81;

wid212=0.914*c;
end

wi212=k12*wid212;
set(handles.s2, 'String', wi212);

E212=10*wi212*((1/sqrt(a))-(1/sqrt(b)));
set(handles.s5, 'String', E212);

.....

a=str2num(get(handles.edit1, 'String'));
b=str2num(get(handles.edit2, 'String'));
d=str2num(get(handles.edit4, 'String'));

k122=1.4;
k222=1.3;

if b>16000.*sqrt(1.1*(13/d));

    k322=1+(((d/1.1)-7).*(b/(16000*sqrt(1.1*(13/d)))-1))./(b/a));
else
    k322=1;
end

k22=k122*k222*k322;
set(handles.salida2, 'String', k22);

d122=str2num(get(handles.e4, 'String'));
d222=str2num(get(handles.e5, 'String'));

```

```

d322=str2num(get(handles.e6, 'String'));
k22=str2num(get(handles.salida2, 'String'));

if d122<3.81;

    wid122=((2.44/d122).^2)*d;
end

if d122>3.81;

wid122=0.914*d;
end

wi122=k22*wid122;
set(handles.s7, 'String', wi122);

E122=10*wi122*((1/sqrt(a))-(1/sqrt(b)));
set(handles.s10, 'String', E122);

if d222<3.81;

    wid222=((2.44/d222).^2)*d;
end

if d222>3.81;

wid222=0.914*d;
end

wi222=k22*wid222;
set(handles.s8, 'String', wi222);

E222=10*wi222*((1/sqrt(a))-(1/sqrt(b)));
set(handles.s11, 'String', E222);

if d322<3.81;

    wid322=((2.44/d322).^2)*d;
end

if d322>3.81;

wid322=0.914*d;
end

wi322=k22*wid322;
set(handles.s9, 'String', wi322);

```

```
E322=10*wi322*((1/sqrt(a))-(1/sqrt(b)));
set(handles.s12, 'String', E322);
```

```
.....

d112=str2num(get(handles.e1, 'String'));
d212=str2num(get(handles.e2, 'String'));
d312=str2num(get(handles.e3, 'String'));
wi112=str2num(get(handles.s1, 'String'));
wi212=str2num(get(handles.s2, 'String'));
wi312=str2num(get(handles.s3, 'String'));
```

```
d122=str2num(get(handles.e4, 'String'));
d222=str2num(get(handles.e5, 'String'));
d322=str2num(get(handles.e6, 'String'));
wi122=str2num(get(handles.s7, 'String'));
wi222=str2num(get(handles.s8, 'String'));
wi322=str2num(get(handles.s9, 'String'));
```

```
D12=[d112,d212,d312];
WI12=[wi112,wi212,wi312];
```

```
D22=[d122,d222,d322];
WI22=[wi122,wi222,wi322];
```

figure

```
subplot (1,2,1)
plot(D12,WI12, 'gs--', 'LineWidth', 3)
title('Wi vs D Material 1')
xlabel('D (m)')
ylabel('Wi(kw-h/tm)')
grid on;
```

```
subplot (1,2,2)
plot(D22,WI22, 'rs--', 'LineWidth', 3)
title('Wi vs D Material 2')
xlabel('D (m)')
ylabel('Wi(kw-h/tm)')
grid on;
```

```
.....
```

## Etapa2: ICARUS4

```
a=str2num(get(handles.edit1,'String'));
b=str2num(get(handles.edit2,'String'));
d1=str2num(get(handles.e1,'String'));
den1=str2num(get(handles.e2,'String'));
wit1=str2num(get(handles.e3,'String'));
k1=str2num(get(handles.e4,'String'));
j1=str2num(get(handles.e5,'String'));
ld12=str2num(get(handles.e6,'String'));
ld22=str2num(get(handles.e7,'String'));
ld32=str2num(get(handles.e8,'String'));
phi12=str2num(get(handles.e9,'String'));
phi22=str2num(get(handles.e10,'String'));
phi32=str2num(get(handles.e11,'String'));

x12=(den1*ld12*(j1-.5871*j1.^2)*(phi12)/(k1*wit1*((10/sqrt(a))-
(10/sqrt(b)))));

if d1<3.81;

    q12=5.81*x12*d1.^3.54;

end

if d1>3.81;

    q12=7.59*x12*d1.^3.34;
end

set(handles.s1,'String',q12);

x22=(den1*ld22*(j1-.5871*j1.^2)*(phi22)/(k1*wit1*((10/sqrt(a))-
(10/sqrt(b)))));

if d1<3.81;

    q22=5.81*x22*d1.^3.54;

end

if d1>3.81;

    q22=7.59*x22*d1.^3.34;
end

set(handles.s2,'String',q22);
```

```

x32=(den1*ld32*(j1-.5871*j1.^2)*(phi32)/(k1*wit1*((10/sqrt(a))-
(10/sqrt(b)))));

if d1<3.81;

    q32=5.81*x32*d1.^3.54;

end

if d1>3.81;

    q32=7.59*x32*d1.^3.34;
end

set(handles.s3, 'String', q32);
.....

a=str2num(get(handles.edit1, 'String'));
b=str2num(get(handles.edit2, 'String'));
d2=str2num(get(handles.e12, 'String'));
den2=str2num(get(handles.e13, 'String'));
wit2=str2num(get(handles.e14, 'String'));
k2=str2num(get(handles.e15, 'String'));
j2=str2num(get(handles.e16, 'String'));
ld122=str2num(get(handles.e17, 'String'));
ld222=str2num(get(handles.e18, 'String'));
ld322=str2num(get(handles.e19, 'String'));
phi122=str2num(get(handles.e20, 'String'));
phi222=str2num(get(handles.e21, 'String'));
phi322=str2num(get(handles.e22, 'String'));

x122=(den2*ld122*(j2-.5871*j2.^2)*(phi122)/(k2*wit2*((10/sqrt(a))-
(10/sqrt(b)))));

if d2<3.81;

    q122=5.81*x122*d2.^3.54;

end

if d2>3.81;

    q122=7.59*x122*d2.^3.34;
end

set(handles.s4, 'String', q122);

```

```

x222=(den2*ld222*(j2-.5871*j2.^2)*(phi222)/(k2*wit2*((10/sqrt(a))-
(10/sqrt(b)))));

if d2<3.81;

    q222=5.81*x222*d2.^3.54;

end

if d2>3.81;

    q222=7.59*x222*d2.^3.34;
end

set(handles.s5, 'String', q222);

x322=(den2*ld322*(j2-.5871*j2.^2)*(phi322)/(k2*wit2*((10/sqrt(a))-
(10/sqrt(b)))));

if d2<3.81;

    q322=5.81*x322*d2.^3.54;

end

if d2>3.81;

    q322=7.59*x322*d2.^3.34;
end

set(handles.s6, 'String', q322);

.....

ld11=str2num(get(handles.e6, 'String'));
ld12=str2num(get(handles.e7, 'String'));
ld13=str2num(get(handles.e8, 'String'));
phi11=str2num(get(handles.e9, 'String'));
phi12=str2num(get(handles.e10, 'String'));
phi13=str2num(get(handles.e11, 'String'));
q11=str2num(get(handles.s1, 'String'));
q12=str2num(get(handles.s2, 'String'));
q13=str2num(get(handles.s3, 'String'));
ld122=str2num(get(handles.e17, 'String'));
ld222=str2num(get(handles.e18, 'String'));
ld322=str2num(get(handles.e19, 'String'));
phi122=str2num(get(handles.e20, 'String'));
phi222=str2num(get(handles.e21, 'String'));
phi322=str2num(get(handles.e22, 'String'));
q122=str2num(get(handles.s4, 'String'));
q222=str2num(get(handles.s5, 'String'));

```

```
q322=str2num(get(handles.s6, 'String'));
```

```
LD12=[ld11,ld12,ld13];  
PHI12=[phi11,phi12,phi13];  
Q12=[q11,q12,q13];  
LD22=[ld122,ld222,ld322];  
PHI22=[phi122,phi222,phi322];  
Q22=[q122,q222,q322];
```

figure

```
subplot (1,2,1)  
plot(LD12,Q12, 'ks--', 'LineWidth', 3)  
title('L/D vs Q Material 1')  
xlabel('L/D')  
ylabel('Q (ton/h)')  
grid on;
```

```
subplot (1,2,2)  
plot(LD22,Q22, 'bs--', 'LineWidth', 3)  
title('L/D vs Q Material 2')  
xlabel('L/D')  
ylabel('Q (ton/h)')  
grid on;
```

.....

```
phi11=str2num(get(handles.e9, 'String'));  
phi12=str2num(get(handles.e10, 'String'));  
phi13=str2num(get(handles.e11, 'String'));
```

```
phi122=str2num(get(handles.e20, 'String'));  
phi222=str2num(get(handles.e21, 'String'));  
phi322=str2num(get(handles.e22, 'String'));
```

```
q11=str2num(get(handles.s1, 'String'));  
q12=str2num(get(handles.s2, 'String'));  
q13=str2num(get(handles.s3, 'String'));
```

```
q122=str2num(get(handles.s4, 'String'));  
q222=str2num(get(handles.s5, 'String'));  
q322=str2num(get(handles.s6, 'String'));
```

```
PHI11=[phi11,phi12,phi13];  
PHI21=[phi122,phi222,phi322];  
Q11=[q11,q12,q13];  
Q21=[q122,q222,q322];
```

```
figure
```

```
subplot(1,2,1)  
plot(PHI11,Q11,'rs--','LineWidth',3)  
title('Phi vs Q. Material 1')  
xlabel('Phi')  
ylabel('Q (ton/h)')  
grid on;
```

```
subplot(1,2,2)  
plot(PHI21,Q21,'ks--','LineWidth',3)  
title('Phi vs Q. Material 2')  
xlabel('Phi')  
ylabel('Q (ton/h)')  
grid on;
```

.....