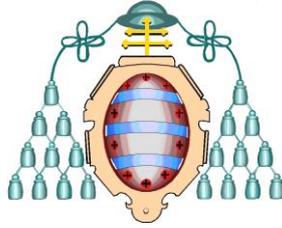


UNIVERSIDAD DE OVIEDO



**Programa de doctorado: MINERÍA, OBRA CIVIL Y MEDIO
AMBIENTE**

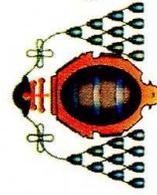
**“METODOLOGÍA PARA LA DETERMINACIÓN INDIRECTA DEL
ÍNDICE DE BOND EN TAMAÑOS DE PARTÍCULA ULTRAFINOS”**

Autor: D. Miguel Onofre Fernández Pérez

Director: Dr. Juan María Menéndez Aguado

Codirector: Dr. Manuel María Mahamud López

JULIO 2012



RESUMEN DEL CONTENIDO DE TESIS DOCTORAL

1.- Título de la Tesis

Español:
METODOLOGÍA PARA LA DETERMINACIÓN,
INDIRECTA DEL ÍNDICE DE BOND EN
TAMAÑOS DE PARTÍCULAS ULTRAFINOS

Inglés:

A NON-DIRECT METHODOLOGY FOR THE
BOND WORK INDEX CALCULATION, FOR
ULTRAFINE PARTICLE SIZES

2.- Autor

Nombre:
MIGUEL ONOFRE FERNÁNDEZ PÉREZ

Programa de Doctorado: MINERÍA, OBRA CIVIL Y MEDIO AMBIENTE

Órgano responsable: DEPARTAMENTO DE EXPLOTACIÓN Y PROSPECCIÓN DE MINAS

RESUMEN (en español)

Determinación de manera indirecta del Índice de Bond para tamaños de partículas ultrafinos (<20 μm).

En las partículas ultrafinas (tamaños entre 20 micrómetros y 0,1 micrómetros) no disponemos de datos empíricos, partiendo de datos de determinados materiales (ensayados para diferentes tamaños de corte) buscaremos la relación que describa el índice de Bond para todo el rango de tamaños.

En partículas de un tamaño inferior a 0,1 micrómetros o 100 nanómetros (entraríamos en el campo de la nanotecnología) observamos propiedades especiales que se regen ya no bajo la mecánica clásica (como en los tamaños grandes) sino bajo las leyes de la mecánica cuántica.

RESUMEN (en Inglés)

Non-direct calculation of Bond Index in ultrafine particle sizes (<20 microns).

In ultrafine particles (sizes between 20 microns and 0.1 microns) we do not have empirical data, based on data of selected materials (tested for different sizes of cut) we look for the relationship that describes the Bond index for the entire range of sizes.

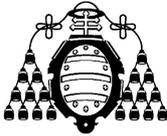
In particles of a size below 0.1 microns or 100 nanometers (we would enter into the field of nanotechnology) we observed special properties that no longer behave under classical mechanics (as in the larger sizes) but under the laws of quantum mechanics.



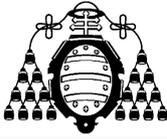
<u>Capítulo</u>	<u>Página</u>
<u>Capítulo 1: Introducción y objetivos</u>	1
1.1.- INTRODUCCIÓN	3
1.2.- OBJETIVOS	4
<u>Capítulo 2: Determinación experimental</u>	5
2.1.- DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DEL ÍNDICE DE BOND	7
2.2.- ÍNDICE DE TRABAJO	7
2.3.- ENSAYOS PARA LA DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE TRABAJO	9
2.4.- LEYES ENERGÉTICAS DE LA FRAGMENTACIÓN	23
2.4.1.- Ley de Rittinger	26
2.4.2.- Ley de Kick	26
2.4.3.- Ley de Bond	27
2.4.4.- Ley de Charles-Holmes	28
2.5.- ANALIZADOR DE PARTÍCULAS LS 13 320 BECKMAN COULTER	29
<u>Capítulo 3: Modelos de fragmentación</u>	34
3.1.- MODELOS DE FRAGMENTACIÓN	36
3.1.1.- Modelos matemáticos de simulación	36
3.1.2.- Modelo cinético acumulativo	48
3.2.- MODELOS DE DISTRIBUCIÓN	53
3.2.1.- Representación logarítmico-cartesiana	53
3.2.2.- Representación cartesiana-cartesiana	54
<u>Capítulo 4: Ensayos de caracterización</u>	56
4.1.- INTRODUCCIÓN	58
4.2.- MATERIALES UTILIZADOS	58
4.2.1.- Caliza	58
4.2.2.- Carbón	63
4.2.3.- Magnetita	67
4.2.4.- Scheelita	71
4.2.5.- Sílice	75
4.2.6.- Zeolita	79
4.3.- ENSAYOS DE LABORATORIO	83
4.4.- APLICACIÓN DE LOS MODELOS DE REPRESENTACIÓN PARA LA OBTENCIÓN DE F_{80} Y P_{80}	84



4.5.- ÍNDICES DE BOND OBTENIDOS	84
4.6.- RESUMEN DE LOS RESULTADOS	88
Capítulo 5: Verificación de resultados	89
5.1.- VERIFICACIÓN DE RESULTADOS PARA TAMAÑOS ULTRAFINOS	91
5.2.- CONSIDERACIONES	93
5.3.- VALORACIÓN DE RESULTADOS	94
5.3.1.- Caliza	94
5.3.2.- Carbón	98
5.3.3.- Magnetita	102
5.3.4.- Scheelita	106
5.3.5.- Sílice	110
5.3.6.- Zeolita	114
Capítulo 6: Conclusiones	118
Capítulo 7: Líneas de investigación futuras	121
Capítulo 8: Bibliografía	124
Anexo I: Ensayos de Bond realizados	129
1.1.- Ensayo nº1	131
1.2.- Ensayo nº2	133
1.3.- Ensayo nº3	134
1.4.- Ensayo nº4	135
1.5.- Ensayo nº5	137
1.6.- Ensayo nº6	138
1.7.- Ensayo nº7	139
1.8.- Ensayo nº8	141
1.9.- Ensayo nº9	142
1.10.- Ensayo nº10	143
1.11.- Ensayo nº11	145
1.12.- Ensayo nº12	146
Anexo II: Equipos Utilizados	148
1.- INTRODUCCIÓN	150
2.- PROBETA	150
3.- MOLINO DE BOLAS	151
4.- TAMIZADORA Y TAMICES	152
5.- BALANZA	154
6.- DESMUESTREADOR	155
7.- ANALIZADOR DE TAMAÑO DE PARTÍCULAS	156

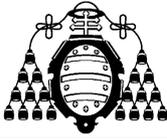


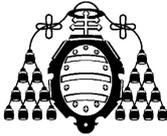
Anexo III: Gráficos y cálculos	159
1.- Gráficos (ALM)	161
2.- Gráficos (DPS)	166
3.- Datos (ALM)	170
4.- Datos (DPS)	172
5.- Esquema de algoritmo predictivo	174
6.- Estimación del índice de Bond de una planta industrial	175
7.- Cálculos de ajustes de gráficos	177
8.- Programas utilizados	181



Capítulo 1

Introducción y Objetivos





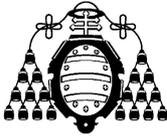
1.1.- INTRODUCCIÓN.

Las operaciones de fragmentación son una de las fases más importantes y que mayor consumo energético generan dentro de cualquier proceso industrial.

Para aumentar y mejorar la eficiencia de dichas operaciones hemos de analizar y estimar el consumo energético que se produce en sus diferentes etapas.

El consumo energético de las operaciones de trituración usa desde mediados del siglo XX la metodología propuesta por Fred Bond en el año 1952 (utilizando en laboratorio un molino de bolas estándar), donde se relacionan los datos empíricos de la energía consumida por tonelada de material, para reducirlo de tamaño. (Work Index).

El método de Bond para calcular el índice de trabajo (W_i) no siempre es útil, especialmente en la predicción de la energía utilizada en operaciones de remolienda o en establecer claras relaciones en partículas de tamaños inferiores a veinte micrones (ultrafinos).



1.2.- OBJETIVOS.

El principal objetivo de la presente tesis es proponer algoritmos que sirvan para determinar de una manera indirecta el Índice de Bond para tamaños de partículas ultrafinos ($<20 \mu\text{m}$).

Puesto que para partículas ultrafinas (tamaños entre 20 micrómetros y 0,1 micrómetros) no disponemos de datos empíricos, partiendo de datos de determinados materiales (ensayados para diferentes tamaños de corte) buscaremos una ecuación que describa el índice de Bond para todo el rango de tamaños.

Para partículas de un tamaño inferior a 0,1 micrómetros o 100 nanómetros (entraríamos en el campo de la nanotecnología) donde observaríamos propiedades especiales que se regirían ya no bajo la mecánica clásica (como en los tamaños grandes) sino bajo las leyes de la mecánica cuántica.

En el **capítulo segundo**, titulado “*Determinación experimental*” se realiza una descripción del procedimiento para calcular el índice de trabajo (Wi).

En el **capítulo tercero**, titulado “*Modelos de fragmentación*”, se explican los diferentes modelos de fragmentación que se utilizan, y se analiza con más detalle el modelo cinético acumulativo. Se explica someramente el método de utilización del analizador de tamaño de partículas LS 13 320 Beckman Coulter.

En el **capítulo cuarto**, titulado “*Ensayos de caracterización*”, se verifican las relaciones que se dan entre las funciones gráficas obtenidas para determinados materiales y las que tendrían en tamaños de partícula ultrafinos, se explica asimismo los resultados que cabría esperar obtener utilizando un analizador de tamaño de partículas LS 13 320 Beckman Coulter.

En el **capítulo quinto**, titulado “*Verificación de resultados*”, según las diferentes clases de materiales utilizadas comprobamos el algoritmo que relacione las curvas granulométricas en todo el intervalo de tamaños, incluido el de los tamaños ultrafinos.

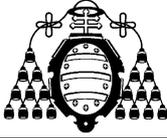
En el **capítulo sexto**, titulado “*Conclusiones*”, se exponen los resultados obtenidos según los diferentes ensayos realizados.

En el **capítulo séptimo**, titulado “*Líneas de investigación futuras*”, se proponen los planteamientos a considerar en próximos estudios de las materias tratadas.

En el **capítulo octavo**, titulado “*Bibliografía*”, aparecen los textos utilizados (como fundamento teórico) y los datos numéricos, en ellos aparecidos, para la realización de la presente tesis.

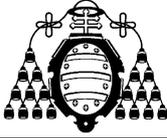
Finalmente se añaden los siguientes anexos:

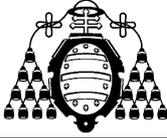
- **Anexo I:** de ensayos de Bond realizados.
- **Anexo II:** de equipos utilizados.
- **Anexo III:** de gráficos y cálculos.



Capítulo 2

Determinación experimental del índice de Bond





2.1.- DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DEL ÍNDICE DE BOND.

En este capítulo realizaremos una descripción de la determinación experimental del Índice de Bond. En nuestro caso, hemos realizado ensayos con muestras de caliza, carbón, magnetita, scheelita, sílice y zeolita utilizando, en los ensayos de laboratorio, tamaños de tamices hasta de 32 micrómetros para comprobar el tipo de convergencia que obtendríamos de sus curvas granulométricas y finalmente extrapolar esos datos con tamaños de muestra ultrafinos. Expondremos finalmente las características del analizador de tamaño de partículas LS 13 320 Beckman-Coulter.

2.2.- ÍNDICE DE TRABAJO.

El ingeniero jefe del Departamento de Maquinaria de Procesamiento de la empresa norteamericana Allis-Chalmers **Fred Bond** definió los ensayos experimentales que llevan a la determinación de este parámetro, tanto en el caso de la trituración, como en los casos correspondientes a molienda en molinos de barras o molinos de bolas, ensayos que siguieron siendo objeto de publicación años después (**Deister, 1987**).

El índice de trabajo se estudia de un modo técnico y teórico.

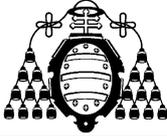
Desde el punto de vista técnico, constituye el método clásico más fiable de caracterización de un mineral con vistas al diseño de los molinos de tipo cilíndrico en los que se va a procesar. Desde el punto de vista teórico, es sin duda una ingeniosa aproximación a la práctica, ya que los clásicos ensayos de caracterización de materiales se revelaban insuficientes a la hora de predecir el comportamiento de un material ante la molienda. En todo caso existen estudios en los que se ve la dificultad de tal pretensión (**Bearman et al., 1997**).

No cabe duda que la lógica podría intentar buscar alguna relación entre parámetros como la dureza o la resistencia a tracción, con el comportamiento que un determinado material tiene ante la molienda en molino de bolas, por ejemplo.

Podría incluso suponerse que cuanto más duro y/o resistente a tracción fuese un material, más difícil sería su molienda, o incluso extender tal suposición a la implicación en sentido contrario, convirtiendo tal condición en necesaria y suficiente.

Pero la práctica nos da contraejemplos para cada una de las dos implicaciones. Tal es el caso del diamante o algunos tipos de vidrio, materiales duros, pero frágiles que llevarían a valores bajos del índice de trabajo; o los casos de mica o grafito, materiales blandos y plásticos, pero que debido a sus peculiaridades geométricas nos ofrecen valores de índices de Bond altos, hasta el punto de que el mayor valor referenciado en la bibliografía consultada por el autor de este trabajo, corresponde a ensayos realizados con mica.

Cualquier estudio general en el que se intentase llevar a cabo una correlación de datos de ese tipo sería infructuoso, porque no hay que olvidar que lo que se está tratando de estudiar es el comportamiento ante la molienda en circuito cerrado de un determinado material. Por tanto, eso engloba sin duda el comportamiento mecánico del material ante los esfuerzos a los que se le somete dentro del molino (sea cual sea el tipo del molino y sus características de acción), pero también la etapa de cribado o clasificación que supone el cierre del circuito, en la que es sabido que la geometría del producto tendrá una influencia enorme.



Analicemos brevemente uno de los ejemplos citados, como es el caso de la mica. Si hablamos por ejemplo de una molienda en molinos de bolas, en primer lugar hay que decir que conocida la acción molturante de este tipo de máquinas, el comportamiento plástico de esta sustancia hará que se invierta una gran cantidad de energía en deformaciones de las partículas que no finalizarán en rotura, y por ello el consumo energético específico en esa operación será necesariamente alto. Pero a ello hay que añadir la tendencia de la mica a la exfoliación en láminas, lo cual dificultará su etapa posterior de cribado o clasificación.

Se concluye, a la vista de lo comentado, que el comportamiento de la mica en circuito cerrado en un molino de bolas, se resumiría en una gran dificultad de reducción de tamaño, similar o incluso superior a la que presentarían otros materiales más duros y tenaces. Hay que decir, en todo caso, que lógicamente la Técnica evoluciona para adaptarse a las peculiaridades de cada material, y que por supuesto existen diseños alternativos de máquinas y procesos más eficaces para la preparación de estos materiales.

Además de la falta de facilidad de previsión de este parámetro, que obliga necesariamente a la disposición del dato experimental, el índice de Bond es también objeto de rechazo entre diversos autores por la necesidad práctica de disponer de un molino de dimensiones estándar, con escasa disponibilidad en el mercado (lo cual eleva su precio bastante y hace que no todos los laboratorios puedan permitirse el disponer del mismo).

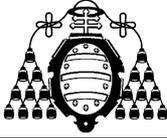
Es por esto por lo que se han tratado de definir alternativas de cálculo, ya sea mediante:

1. La media indirecta de este parámetro (**Berry y Bruce, 1966**; puede encontrarse una buena recopilación de métodos de determinación indirecta en el libro de **Gutiérrez y Sepúlveda, 1986**).
2. El establecimiento de correlaciones con datos de ensayos realizados en molinos de laboratorio comunes (**Yap et al, 1982**; **Bonoli and Ciancabilla, 1992**; **Chakrabarti, 2000**), o a partir de ensayos realizados en otros equipos (**Napier-Munn et al, 1996**).
3. La aplicación de la simulación matemática (**Lewis et al, 1990**; **Aksani y Sönmez, 2000**).

En todo caso, y a pesar de la controversia sobre este parámetro, es indudable la amplia aceptación en la industria, incluso hasta el punto de ser el método recomendado para el cálculo de la potencia del motor de accionamiento en los molinos cilíndricos, que son, con mucho, los de mayor volumen de trabajo en el procesamiento de minerales.

Como ya se ha dicho, el principal objetivo de este trabajo es la obtención de una metodología para la obtención del índice de trabajo que se base en la caracterización del material a tratar mediante la realización de ensayos de laboratorio más sencillos en cuanto a las operaciones y cálculos a realizar, que precisen de personal no tan especializado y que supongan un ahorro de tiempo de laboratorio evidente; y una vez caracterizado el material, llevar a cabo la simulación matemática de lo que serían los pasos a seguir en el ensayo de Bond, para así obtener un índice que veremos en qué medida es comparable al obtenido mediante el ensayo real. Se subrayará en este trabajo la importancia del algoritmo de cálculo utilizado, proponiéndose uno que se mostrará ventajoso sobre el utilizado en los pocos trabajos publicados al respecto.

Como paso previo a todo ello, es preciso realizar una descripción del método de ensayo propuesto por Bond.



2.3.- ENSAYOS PARA LA DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE TRABAJO.

La Tercera Ley de la Fragmentación, propone la siguiente ecuación

$$W = 10 \cdot w_i \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{d}} - \frac{1}{\sqrt{D}} \right)$$

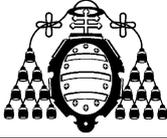
en la que W es el consumo energético específico, en kWh/t, d y D son los tamaños que dan un pasante del 80% en producto y alimentación respectivamente, expresados en micras.

De la fórmula se puede deducir una definición, de valor más teórico que práctico, del índice de Bond, que sería el consumo energético específico en kWh/t necesario para reducir el material desde un tamaño suficientemente grande (teóricamente infinito) hasta un tamaño de 100 micras, y según el propio Bond sería un parámetro de conminución que expresa la resistencia del material ante las operaciones de trituración y molienda.

Según Bond, si el material se comportase de manera homogénea ante la reducción de tamaño (caso muy poco habitual, por otra parte), el valor de su índice de trabajo se mantendrá constante en las sucesivas etapas de conminución.

Pero la realidad es que los materiales frecuentemente son heterogéneos en su estructura, pudiendo hablarse normalmente de un tamaño de grano natural, de forma que el comportamiento de ese material a tamaños de molienda superiores a dicho tamaño nos daría valores del índice de trabajo inferiores que en el caso de realizar la molienda a un tamaño inferior a dicho tamaño de grano natural; esto se explica de una forma sencilla, ya que en el primer caso, los esfuerzos sobre las partículas generados por la acción de la molienda se dirigirá en principio preferentemente hacia las superficies intergranulares, que normalmente presentarán una resistencia inferior a la presentada por la red del grano monocristalino, y por tanto el consumo energético de la operación será menor.

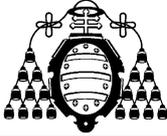
No cabe duda que la eficacia de la operación estará influenciada enormemente por las características de la máquina, y es por ello que Bond definió con bastante precisión las condiciones en las que se debería realizar el ensayo, como veremos posteriormente. Por tanto, las determinaciones del índice de Bond mediante ensayos de laboratorio muestran el comportamiento del material en un rango estrecho de tamaños, y cualquier desviación puede acusar la influencia de esa heterogeneidad, y por tanto traducirse en variaciones que pueden ser importantes del índice de trabajo. Por esto es muy recomendable que la determinación del índice de trabajo se realice lo más cerca posible del tamaño requerido en la molienda industrial.



Puede hablarse de un índice de trabajo operacional (**Rowland, 1976; Rowland, 1998**), que sería resultado de la medición en la planta real de los consumos energéticos en los que se ha incurrido al procesar una cantidad de material determinada; ese sería el valor idóneo para el diseño del circuito, pero el inconveniente está en que normalmente este valor no es conocido sino a posteriori, y podría considerarse como una medida de eficacia de operación la comparación entre el índice de trabajo obtenido en el laboratorio y el calculado en la planta.

En la tabla aparecen los valores publicados por Bond para un gran número de materiales, tanto en el caso de molinos de barras como molinos de bolas.

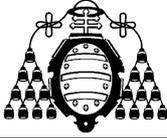
El método de Bond proporciona una primera estimación del consumo real de energía necesario para triturar o moler un material en un determinado equipo a escala industrial (error promedio $\pm 20\%$). Sin embargo, debido a su simplicidad, este procedimiento se utiliza con asiduidad para el dimensionado de trituradoras, molinos de barras y bolas, tanto a escala piloto como industrial. Veremos a continuación una breve descripción de los ensayos propuestos por Bond para cada uno de los casos, tratando con una mayor profundidad el caso del ensayo de Bond para molinos de bolas, por ser el directamente relacionado con el presente trabajo.



Capítulo 2: Determinación experimental del índice de Bond.

Material	Rod mill			Ball mill		
	No. tests	Avg.	Range	No. tests	Avg.	Range
Alumina	3	12.2	9-17	6	17.9	7-34
Barite	6	5.7	2-12	7	5.8	4- 9
Bauxite	33	10.8	2-20	29	14.5	1-31
Cement clinker	29	12.1	8-15	180	13.6	7-77
Cement raw material	115	12.3	4-18	284	10.0	3-27
Chrome ore	2	7.9	7- 9	5	13.4	7-17
Clay	4	12.5	6-18	11	10.8	4-23
Clay, calcined	4	7.0	3-13	7	19.6	15-26
Coal	4	9.8	8-12	6	15.4	13-18
Coke	7	16.9	12-24	4	33.5	29-40
Copper-nickel ore	4	19.2	16-24	6	15.5	13-18
Copper ore	396	14.3	4-34	769	12.8	4-30
Copper-zinc ore	4	11.0	6-16	9	9.8	5-14
Diorite	7	17.5	10-30	2	11.6	10-13
Dolomite	11	14.2	3-24	5	13.9	6-25
Feldspar	7	11.0	8-16	7	11.7	9-14
Ferrochrome	1	8.4	-	6	20.4	3-77
Ferromagnesium				5	7.2	6- 9
Ferromanganese	2	7.6	7- 8	5	7.9	5-14
Ferrosilicon	3	7.1	4-11	8	17.9	6-51
Flint	1	18.1	-	5	27.4	22-31
Fluorspar	4	11.0	9-13	9	12.7	6-25
Gold ore	42	15.2	8-29	183	14.6	3-42
Granite	10	16.3	8-36	8	9.9	10-11
Gravel	21	15.9	8-24	6	18.0	11-27
Iron ore, unidentified	54	11.3	3-20	118	12.4	4-31
Hematite	64	12.5	5-22	116	11.1	2-31
Conc.				5	18.5	7-29
Limonite	12	9.3	4-16	20	9.0	5-19
Magnetite	43	11.4	5-25	73	13.2	6-29
Conc.				23	19.2	7-27
Tailings				5	14.0	12-16
Siderite				5	10.4	9-14
Taconite	35	19.3	7-37	20	12.0	8-19
Conc.	12	11.6	10-13			
Lead ore	14	12.6	10-15	12	10.3	8-13
Lead-zinc ore	31	12.4	7-19	58	12.5	7-26
Limestone	84	13.7	7-50	177	9.9	4-36
Limestone, burnt				5	11.0	6-18
Magnesite	3	15.9	10-22	18	14.6	5-25
Manganese ore	3	10.9	7-14	19	13.9	6-23
Marl	2	10.6	10-11	8	10.2	4-18
Molybdenum ore	25	11.8	8-18	43	11.6	10-16
Nickel matte	2	9.8	9-11	6	28.4	12-37
Nickel ore	19	14.9	8-22	39	12.5	2-24
Oil shale	1	27.0	-	5	38.2	16-78
Oyster shells	5	17.6	2-28	5	15.1	13-19
Phosphate fertilizer				6	16.5	12-40
Phosphate rock	22	12.8	5-28	36	13.6	3-25
Pyrite	3	8.7	8-10	6	10.1	7-13
Quartz	1	14.4	-	13	14.4	11-21
Quartzite	8	12.3	8-19	13	11.2	7-16
Sand, silica	14	13.0	3-33	45	23.8	9-50
Sandstone	6	11.4	1-20	8	27.4	16-38
Shale	4	13.4	6-24	12	10.1	3-21
Silica rock	6	8.9	7-12	11	14.3	8-23
Silver ore	6	17.5	15-19	19	17.0	13-22
Slag	10	16.0	10-27	26	17.2	10-27
Slag, blast furnace	4	10.1	5-13	8	18.3	12-26
Steel mill scrap				16	22.1	6-89
Talc				10	15.3	8-22
Tin ore	4	14.1	11-16	12	11.8	10-14
Titanium ore	3	10.9	10-12	9	11.4	7-17
Tungsten ore	5	12.8	9-17	4	11.0	7-17
Uranium ore	13	13.3	3-18	18	14.6	10-20
Zinc ore	6	12.9	7-22	9	10.9	6-16
Totals	1244			2633		

Tabla 2.1. Valores del índice de trabajo según Bond.



El procedimiento experimental estándar de laboratorio, para determinar el índice de trabajo en la etapa de trituración, básicamente consiste en lo siguiente:

- Preparación del material a un tamaño comprendido entre 2 y 3 pulgadas. Se coloca parte de dicho material entre 2 péndulos opuestos e iguales (30 lbs de peso cada uno), que pueden levantarse controladamente a distintas alturas de caída.
- Efectuar un ensayo de impacto sobre el material, colocando la dimensión menor de la roca en la dirección del impacto a producir por ambos péndulos, los cuales se levantarán progresivamente, hasta producir la fractura requerida del material.
- El índice de trabajo (W_i ; kwh/ton. corta) se calculará a partir de un promedio de 10 ensayos válidos, mediante la fórmula:

$$W_i = \frac{2,59}{\rho_s} \cdot C$$

Donde:

W_i = índice de trabajo del material, aplicable a trituración (kwh/ton corta)

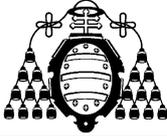
ρ_s = peso específico del sólido

C = esfuerzo del impacto aplicado, necesario para fracturar el material (lb-pie/pulg de espesor de la roca).

Para el caso de los molinos de barras, la alimentación se prepara en trituración a tamaño inferior a ½ pulgada (< 1, 27 mm), midiéndose un volumen de 1250 cm³ en un cilindro graduado, que es pesado y analizado granulométricamente. Se procede con ello a realizar una molienda en seco en un molino de barras de laboratorio de 12" de diámetro y 24" de largo con revestimiento interno ondulado, que gira a 46 rpm, y en unas condiciones de 100% de carga circulante. La carga molturante consiste en seis barras de 1.25" de diámetro y 21" de largo, y dos de 1.75" de diámetro y también 21" de largo, con un peso total de 33.380 kg.

Con el fin de contrarrestar la segregación que se puede producir en los bordes del molino, la forma de llevar a cabo la molienda es como se recoge a continuación. La molienda se lleva a cabo con el molino horizontal durante 8 vueltas, tras las cuales el eje del molino se inclina 5° en un sentido, para dar una vuelta, y se vuelve a inclinar 5° en el otro sentido, para volver a la horizontalidad durante las siguientes ocho vueltas, repitiéndose en lo sucesivo el modo operatorio.

Los tamaños de cierre del circuito llegan hasta las 200 micras. Al final de cada período de molienda, la descarga del molino se produce inclinando el molino 45° durante 30 revoluciones. El producto es tamizado al tamaño de cierre del circuito correspondiente, el pasante se pesa y se adiciona al rechazo una cantidad de alimentación representativa igual al peso del pasante, para recomponer el peso inicial de los 1250 cm³.



Este material es introducido al molino, moliéndose durante un número de revoluciones calculado para dar una carga de recirculación igual al peso de la alimentación fresca añadida (100% de carga circulante).

Se continúa con los ciclos de molienda hasta que los gramos de pasante producidos por revolución alcanzan el equilibrio o modifican su tendencia de crecimiento o decrecimiento. El pasante del último ciclo se analiza granulométricamente, y el valor medio de gramos producidos por revolución de los tres últimos ciclos es el índice de molturabilidad en molinos de barras.

El cálculo final del índice de Bond, para el caso de molinos de barras, se realiza mediante la aplicación de la fórmula siguiente:

$$W_i = \frac{62}{P_{100}^{0.23} \cdot Gbp^{0.625} \cdot \left(\frac{10}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{10}{\sqrt{F_{80}}} \right)}$$

en la que:

W_i es el índice de trabajo del material, en kWh/ton corta.

P_{100} es la abertura en micras de la malla de corte utilizada para cerrar el circuito.

Gbp es el índice de molturabilidad del material en molinos de bolas, en g/rev.

F_{80} es el tamaño correspondiente al 80% de pasante de la alimentación fresca, en micras.

P_{80} es el tamaño correspondiente al 80% de pasante del producto final, en micras.

Este valor de índice de trabajo sería válido para el cálculo de la potencia de salida del motor de accionamiento de un molino de 8 ft de diámetro interno, trabajando en vía húmeda y en circuito abierto, en función del caudal másico (t/h) de alimentación.

Bond propuso factores correctores al valor obtenido mediante la metodología anterior, de forma que si el molino tiene un valor del diámetro diferente, el índice de trabajo obtenido debería ser

$$\left(\frac{8}{D} \right)^{0.20}$$

corregido multiplicándolo por $\left(\frac{8}{D} \right)^{0.20}$, siendo D el diámetro del molino expresado en ft.

Bond propuso además un factor de corrección para el caso de la molienda en vía seca, de forma que en esas condiciones de operación el valor del índice de trabajo debería ser incrementado multiplicándolo por 1.30. En todo caso, en el apartado siguiente se realiza un análisis y exposición conjunta de los factores de corrección aplicables tanto en el caso de molinos de barras como de bolas (Rowland, 1998).

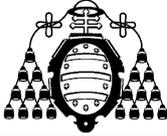
El índice de trabajo de un material, aplicable a la molienda fina en molinos de bolas, se determina en un molino de laboratorio de dimensiones estándar, de 12 pulgadas de diámetro y 12 pulgadas de largo, que gira a 70 rpm, posee esquinas redondeadas y revestimiento liso, con una carga de bolas de acero determinada.

En lo que se refiere a la carga molturante, debemos detenernos para realizar la aclaración que se realiza seguidamente.

En su publicación más conocida (Bond, 1961), Bond definió carga de bolas mostrada en la tabla:

Carga recomendada por Bond en 1961				
Tamaño bolas		Nº bolas	Área cm ²	Peso (g)
pulgadas	cm			
1,45	3,683	43	1832,4	8803
1,17	2,972	67	1858,9	7206
1,00	2,540	10	202,7	672
0,75	1,905	71	809,5	2011
0,61	1,549	94	708,9	1433
Total:		285	5412,4	20125

Tabla 2.2. Distribución recomendada por Bond inicialmente.



Sin embargo, según **BICO (1999)**, empresa fabricante del molino utilizado para la realización de los ensayos recogidos en el presente trabajo, mediante correspondencia particular Bond admitió la dificultad de especificar un número de bolas de cada peso para dar el área superficial y el peso total especificados, realizando una corrección que según la mencionada referencia debería ser la siguiente:

Carga recomendada por Bond finalmente				
Tamaño bolas		Nº bolas	Área	Peso
pulgadas	cm		cm²	(g)
1,500	3,810	25	1140,1	5690
1,250	3,175	39	1235,1	5137
1,000	2,540	60	1216,1	4046
0,875	2,223	68	1055,2	3072
0,750	1,905	93	1060,3	2646
<i>Total:</i>		<i>285</i>	<i>5706,8</i>	<i>20592</i>

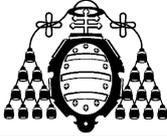
Tabla 2.3. Distribución recomendada por Bond finalmente.

En donde los valores de área y peso han sido calculados considerando bolas perfectamente esféricas y con la misma densidad que las propuestas inicialmente, ya que Bond en este caso simplemente corrigió el número de bolas.

Hay que decir que las bolas recibidas junto con el equipo correspondían en número con esta nueva distribución, para a la hora de realizar las comprobaciones necesarias, se encontró que los valores de peso, obtenidos mediante pesada real de las bolas, son los recogidos en la tabla siguiente:

Valores medidos en laboratorio				
Tamaño bolas		Nº bolas	Área	Peso
pulgadas	cm		cm²	(g)
1,500	3,810	25	1140,1	6763
1,250	3,175	39	1235,1	5468
1,000	2,540	60	1216,1	4500
0,875	2,223	68	1055,2	3787
0,750	1,905	93	1060,3	3720
<i>Total:</i>		<i>285</i>	<i>5706,8</i>	<i>24238</i>

Tabla 2.4. Distribución de bolas medida.



En la tabla anterior, los valores de área superficial se han obtenido de nuevo por cálculo, pero los pesos han sido medidos en el laboratorio. Se debe resaltar, porque es la causa de la decisión que llevó a la definición de la distribución final de bolas que sería utilizada, que el peso total medido de bolas es muy superior a las 44,5 libras que Bond aconsejó siempre en todo caso (≈ 20.125 kg). Debido a esto, se tomó la decisión de reajustar la carga de bolas suministrada con el molino, manteniendo la distribución de tamaños propuesta finalmente por Bond, pero de manera que el peso final de bolas sea más cercano a los 20.125 kg. La distribución final utilizada, por tanto, es la que se muestra a continuación:

Valores medidos en laboratorio				
Tamaño bolas		Nº bolas	Área cm ²	Peso (g)
pulgadas	cm			
1,500	3,810	22	1003,3	5951
1,250	3,175	34	1076,8	4767
1,000	2,540	50	1013,4	3750
0,875	2,223	54	838,0	3007
0,750	1,905	73	832,3	2920
Total:		233	4763,7	20396

Tabla 2.5. Distribución de bolas utilizada en los ensayos.

En la que el peso de bolas se ha ajustado mejor. El valor calculado del área superficial ha quedado disminuido en este caso, pero hay que decir que el valor real, de haberse podido medir, sería bastante superior al calculado, al presentar la mayoría de las bolas imperfecciones geométricas no despreciables.

La figura siguiente expresa y resume la presente discusión de manera gráfica.

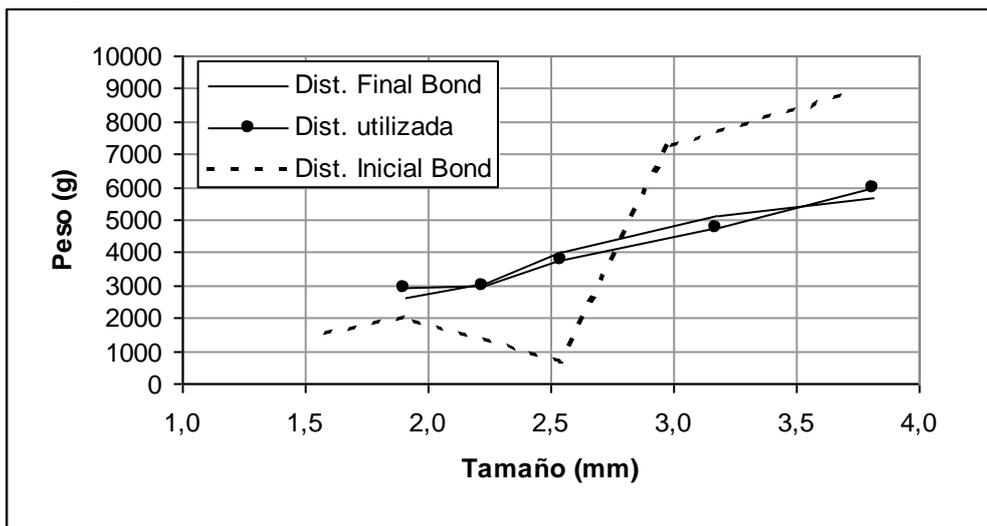
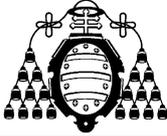


Fig. 2.6. Comparación entre las distintas distribuciones analizadas.

Una vez realizado este pequeño análisis acerca de la distribución de la carga molturante, continuemos con la definición de las condiciones de ensayo.

La alimentación al molino corresponde a material triturado controladamente al 100% menor de 6 mallas Tyler (< 3.35 mm), pudiendo utilizarse una alimentación más fina si fuese necesario; el volumen aparente de dicha alimentación es en este caso de 700 cm³. Previamente a la realización del ensayo, la alimentación se caracteriza mediante su peso y su distribución granulométrica.



El ensayo consiste en la realización de una molienda en seco en el molino de bolas, simulando una operación en circuito cerrado con 250% de carga circulante, y utilizando la malla de corte requerida, de acuerdo con el circuito industrial, de forma que los tamaños de cierre del circuito se encuentren siempre en el rango comprendido entre 28 y 325 mallas Tyler (entre 600 y 40 micras, aprox.).

El circuito sería este:.

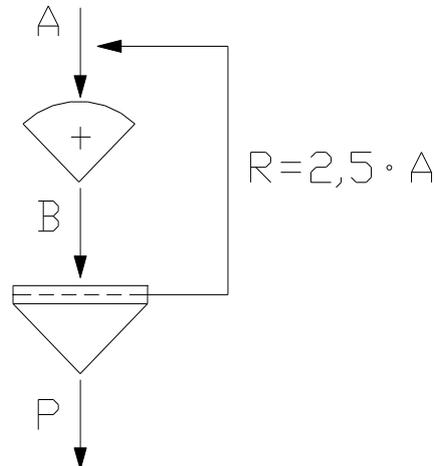


Fig. 2.7. Esquema del circuito cerrado utilizado en el ensayo de Bond.

El ensayo de Bond se inicia moliendo el material durante un número arbitrario de revoluciones, normalmente 100 aunque puede ser 50 en el caso de materiales blandos; se vacía el molino con la carga de bolas, y se tamizan el material sobre el tamiz correspondiente a la malla de corte del circuito.

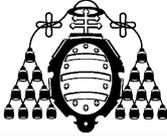
A continuación, se pesa el pasante, dejándolo a parte, y se agrega carga fresca al rechazo para reconstruir la carga inicial de sólidos alimentada al molino en cada ciclo, completando el peso de los 700 cm³ iniciales. Este material se retorna al molino, junto con la carga de bolas, siendo dicho material molido durante el número de revoluciones calculado para producir un 250% de carga circulante, repitiendo dicho procedimiento hasta alcanzar las condiciones requeridas de equilibrio. El número de revoluciones requeridas se calculará en base a los resultados del ciclo precedente (según el valor de los gramos de finos producidos por cada revolución del molino).

Se continúa con los ciclos de molienda hasta que el número de gramos netos de pasante producidos por revolución alcance el equilibrio (que debería ser cuando el pasante total de finos sea 1/3.5 veces el peso total al molino).

En ese momento, se realizará un análisis granulométrico del pasante en el tamizado (correspondiente al producto final del circuito de molienda), con el objeto de determinar el valor P₈₀. El índice de molidurabilidad del molino de bolas (gramos por revolución) se obtendrá promediando los valores correspondientes a los tres últimos ciclos.

El índice de trabajo del material, válido para molienda en molinos de bolas, se calculará según la siguiente expresión empírica propuesta por Bond:

$$W_i = \frac{44.5}{P_{100}^{0.23} \cdot Gbp^{0.82} \cdot \left(\frac{10}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{10}{\sqrt{F_{80}}} \right)}$$



en la que:

W_i es el índice de trabajo del material, en kWh/ton corta.

P_{100} es la abertura en micras de la malla de corte utilizada para cerrar el circuito.

Gbp es el índice de molturabilidad del material en molinos de bolas, en g/rev.

F_{80} es el tamaño correspondiente al 80% de pasante de la alimentación fresca, en micras.

P_{80} es el tamaño correspondiente al 80% de pasante del producto final, en micras.

El valor del índice de trabajo calculado según la expresión anterior, es consistente con la potencia mecánica de salida de un motor capaz de accionar un molino de bolas del tipo descarga por rebose, de 8 pies de diámetro interno, trabajando en vía húmeda en húmedo y en circuito cerrado con un clasificador.

En principio, Bond propuso sólo dos factores de corrección, los mismos que en el caso de los molinos de barras y con los mismos valores.

En trabajos posteriores (**Rowland, C.A., 1988**) se analizaron y actualizaron diversos factores de corrección, y aquí recogeremos los publicados más recientemente por Rowland en la referencia antes citada.

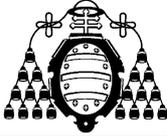
Como el propio Rowland menciona en dicho trabajo, los tamaños típicos de molinos, tanto de bolas como de barras, crecieron bastante desde los años 60 en los que Bond hizo fundamentalmente su investigación; así, si en 1960 el mayor molino de barras tenía un diámetro de 3.20 a 3.51 metros (10.5 a 11.5 ft) y a finales de dicha década ya había molinos de barras de 5.03 m (16.5 ft), y de forma idéntica con los molinos de bolas que en esa época llegaron a los 5.5m de diámetro (18 ft), época que coincidió con la aparición de los grandes molinos de molienda autógena y semiautógena, de hasta 10.4 m de diámetro (34 ft).

Factores de corrección al índice de Bond:

- **Corrección de unidades de masa:** la primera de las correcciones que se pueden hacer el índice de Bond es una mera cuestión de unidades, ya que los valores obtenidos por aplicación directa de la fórmula se obtienen en kWh/sht, es decir, por tonelada corta, de forma que para obtener el consumo energético específico referido a unidades métricas, es preciso multiplicar el valor en kwh/sht por 1.102
- **Corrección a molienda en vía seca:** en este caso, el parámetro continuó siendo el propuesto por Bond originalmente, es decir, se aplica un coeficiente multiplicador $K_1 = 1.3$ para el caso de la molienda en vía seca.
- **Corrección a circuito abierto:** el valor del multiplicador K_2 aplicable en el caso de que la operación se realice en circuito abierto, se recoge en la tabla siguiente, en función del porcentaje de pasante deseado por el tamaño utilizado como P_{100} en el ensayo de Bond.

Pasante especificado (%)	K_2
50	1.035
60	1.05
70	1.10
80	1.20
90	1.40
92	1.46
95	1.57
98	1.70

Tabla 2.8. Valores del multiplicador K_2 .



Los valores intermedios se obtendrán por interpolación.

- **Corrección del diámetro del molino:** para determinar el multiplicador K_3 correspondiente al escalamiento de tamaño del molino, éste se puede calcular de la siguiente forma:

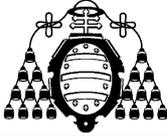
$$K_3 = \begin{cases} \left(\frac{2.44}{D}\right)^{0.2} & \text{para } D \leq 3.96 \text{ m} \\ 0.914 & \text{para } D \geq 3.96 \text{ m} \end{cases}$$

siendo D el diámetro interno del molino (sin incluir el revestimiento) donde se ve que se toma como base el molino de 8.5 ft de diámetro, y que el multiplicador es constante para diámetros internos superiores a los 13 ft (3.96 m).

En la siguiente tabla se recogen los valores correspondientes a los diámetros más frecuentes, pudiendo verse la evolución del multiplicador con el diámetro del molino.

Diámetro interno, sin revestimiento		Diámetro interno, con revestimiento		Multiplicador K_3
ft	m	ft	m	
3.0	0.914	2.6	0.79	1.25
3.281	1.0	2.88	0.88	1.23
4.0	1.22	3.6	1.10	1.17
5.0	1.52	4.6	1.40	1.12
6.0	1.83	5.6	1.71	1.075
6.562	2.0	5.96	1.82	1.06
7.0	2.13	6.5	1.98	1.042
8.0	2.44	7.5	2.29	1.014
8.5	2.59	8.0	2.44	1.00
9.0	2.74	8.5	2.59	0.992
9.5	2.90	9.0	2.74	0.977
9.843	3.0	9.34	2.85	0.97
10.0	3.05	9.5	2.9	0.966
10.5	3.2	10.0	3.05	0.956
11.0	3.35	10.5	3.20	0.948
11.5	3.51	11.0	3.35	0.939
12.0	3.66	11.5	3.51	0.931
12.5	3.81	12.0	3.66	0.923
13.0	3.96	12.5	3.81	0.914
13.124	4.0	12.62	3.85	0.914

Tabla 2.9. Valores del multiplicador K_3 .



- **Corrección al tamaño de la alimentación:** hay unos límites superiores óptimos de tamaño para la alimentación, tanto en molinos de bolas como de barras, que pueden ser calculados según las expresiones siguientes:

$$F_{opt} = 16000 \cdot \left(\frac{13}{w_i} \right)^{0.5}, \quad \text{para molinos de barras}$$

$$F_{opt} = 4000 \cdot \left(\frac{13}{w_i} \right)^{0.5}, \quad \text{para molinos de bolas}$$

Para tamaños de alimentación F_{80} superiores a F_{opt} , se aplica un multiplicador K_4 dado por:

$$K_4 = 1 + \frac{(w_i - 7) \cdot \frac{F_{80} - F_{opt}}{F_{opt}}}{R}$$

siendo R la relación de reducción :

$$R = \frac{F_{80}}{P_{80}}$$

- **Corrección por finura en molinos de bolas:** cuando se lleva a cabo la molienda a tamaños de P_{80} inferiores a 74 micras (200 mallas), la pérdida de eficacia aumenta mucho al disminuir el tamaño. Se define así un nuevo multiplicador K_5 de la forma siguiente:

$$K_5 = \frac{P_{80} + 10.3}{1.145 \cdot P_{80}}$$

- **Corrección por relación de reducción anómala en molinos de barras:** esta es aplicable sólo en el caso de molinos de barras. Se define la relación de reducción

$$R_0 = 8 + 5 \cdot \frac{L}{D}$$

normal en un molino de barras como $\frac{L}{D}$, siendo L la longitud de las barras y D el diámetro interno considerando el revestimiento. Cuando la diferencia en valor

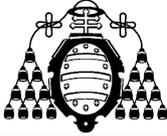
absoluto entre R y R_0 es mayor que 2, $|R - R_0| > 2$, entonces se aplica un nuevo multiplicador K_6 , obtenido como sigue:

$$K_6 = 1 + \frac{(R - R_0)^2}{150}$$

En el caso de relaciones de reducción muy grandes, este multiplicador sólo se aplica si $W_i > 8$.

- **Corrección por relación de reducción pequeña en molinos de bolas:** cuando la relación de reducción en el caso de los molinos de bolas es pequeña, $R < 6$, se aplica un nuevo multiplicador K_7 definido de la forma siguiente:

$$K_7 = 1 + \frac{0.13}{R - 1.35}$$



- **Corrección por el modo de operación en molinos de barras:** la operación de un molino de barras está muy afectada por cómo se prepara la alimentación, así por el desgaste en la carga molturante y revestimiento, al afectar a la acción de las barras en el molino.

Así, en el caso de un circuito con sólo molinos de barras, entonces se recomiendan los siguiente valores del multiplicador K_8 :

$K_8 = 1.4$, si la alimentación se prepara con trituración en circuito abierto,
 $K_8 = 1.2$, si la alimentación se prepara con trituración en circuito cerrado.

En este caso se recomienda además la aplicación de los multiplicadores K_3 , K_4 y K_6 .

Sin embargo, en el caso de que sea un circuito molino de barras – molino de bolas, los valores del multiplicador en cuestión serán los siguientes:

$K_8 = 1.2$, si la alimentación al molino de barras se prepara con trituración en circuito abierto,
 $K_8 = 1$, si la alimentación al molino de barras se prepara con trituración en circuito cerrado, es decir, no es necesaria ninguna corrección en este caso.

También en este caso se recomienda además la aplicación de los multiplicadores K_3 , K_4 y K_6 .

Multiplicador de corrección total

En cada caso particular, al valor obtenido a partir del ensayo de laboratorio antes descrito, ya sea en el caso de molinos de barras o de bolas, será corregido por un factor de corrección

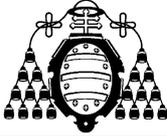
$$K = \prod_i K_i$$
total, i , siendo los valores de i , entre 1 y 8, los aplicables a cada caso particular, además del factor de conversión previo ya comentado para el paso de tonelada corta a tonelada métrica.

Descripción paso a paso del ensayo de Bond para molinos de bolas

Se pretende a continuación ofrecer una descripción paso a paso de las operaciones a realizar en el desarrollo del ensayo de Bond para molinos de bolas. El objetivo no es sólo favorecer el aprendizaje del método en sí, sino más aún, analizar todas las operaciones unitarias necesarias y a realizar en el mismo, con vistas a su simulación matemática, tal como se llevará a cabo en capítulos posteriores.

Los pasos a seguir para la ejecución del ensayo son:

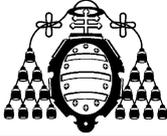
- 1) Preparación de la alimentación: El material debe ser triturado a un tamaño inferior a 3360 micras, seco, homogeneizado y a ser posible desmuestreado en bolsas de 1-3 kg, para su facilidad de manejo en las sucesivas operaciones de aporte de material fresco que se han de realizar en todos los ciclos.
- 2) Determinación de la densidad aparente de la alimentación, por ejemplo mediante la medición en un cilindro graduado. Debe tenerse especial cuidado en que el material logre el máximo empaquetamiento posible en dicho cilindro, pudiendo recurrirse a vibrado del mismo.



- 3) Cálculo del peso de 700 cm³ de alimentación mediante el valor de la densidad aparente, o directamente por pesada de dicho volumen. Ese será el peso de alimentación en el primer ciclo, y en todo caso, el peso total al molino alimentado en cada ciclo.
- 4) Cálculo del peso de producto ideal o peso ideal de finos, suponiendo una carga circulante de 250%. Este valor será:

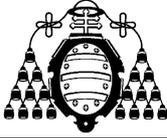
$$\text{Peso ideal} = P_i = \frac{\text{peso de } 700 \text{ cm}^3 \text{ de alimentación}}{3,5}$$

- 5) Caracterización granulométrica de la alimentación, con especial cuidado en la obtención del valor del tamaño característico F_{80} , y el porcentaje de material en la alimentación inferior al tamaño de corte.
- 6) En el caso de que en el análisis granulométrico realizado a la alimentación, se obtenga un porcentaje pasante por el tamaño de corte superior al 28%, se realizará un ciclo en vacío, es decir, se asignará cero al número de revoluciones y al número de gramos neto por revolución en el primer periodo, se llevará a cabo el tamizado del total de la carga al tamaño de corte, separándose el cernido y completando el rechazo con alimentación fresca representativa hasta completar el peso inicial.
- 7) Introducción de la carga de alimentación en el molino, teniendo especial cuidado en el cierre del mismo. A este respecto, hay que decir que es conveniente comprobar regularmente el estado de las juntas de cierre, para garantizar que no se produzcan acumulaciones de material no triturado en los espacios que puedan quedar, o incluso pérdidas de material en el giro del molino.
- 8) Se hace girar el molino un número arbitrario de revoluciones, que suele ser 100, pudiendo iniciarse en 50 para tamaños gruesos o materiales blandos, con el fin de reducir en ese caso las necesidades de material, ya que en muchos casos la disponibilidad de muestra es un parámetro limitante.
- 9) Se descarga el molino sobre una superficie tipo chapa perforada, para facilitar la separación de las bolas del material; se limpia el interior del molino y las bolas para recuperar en lo posible la totalidad de la masa introducida, y se cargan de nuevo las bolas limpias.
- 10) Se tamiza cuidadosamente la descarga del molino con el tamiz de corte seleccionado; se puede agilizar esta operación disponiendo una serie de tamices sobre el tamaño de corte.
- 11) Se procede al pesado del total de rechazo tamizado, con precisión al menos de décimas de gramo.
- 12) Se calcula el peso del pasante por diferencia entre el peso total de producto y el peso de rechazo, aunque si es posible, se recomienda realizar la pesada directa como comprobación, o incluso podría realizarse directamente la pesada del material pasante.
- 13) Se calcula la cantidad de material de tamaño menor que el del tamiz de corte en la alimentación, según el análisis realizado en el paso 5, para conocer así el peso adicionado de finos en la carga de alimentación al actual periodo.



- 14) Se calcula el valor de los **gramos de finos netos** producidos, que corresponde al peso de pasante producido (calculado en el paso 12), menos el peso de finos introducidos con la alimentación (calculado en el paso 13).
- 15) Se calcula el valor de los **gramos netos producidos por revolución**, dividiendo el número de gramos netos (obtenidos en el paso 14), entre el número de revoluciones del periodo.
- 16) Se añade una cantidad de muestra representativa de alimentación fresca al rechazo obtenido, para constituir de nuevo el peso definido en el paso 3.
- 17) Se calcula la cantidad aproximada de **finos ya presentes** en la cantidad añadida en el paso 16, basándose en el análisis granulométrico del paso 5. Este valor debe ser anotado para usarlo en el cálculo de los finos netos producidos en el siguiente período, como se describió en el paso 12.
- 18) Se calcula el peso que deberá ser molido en el próximo período para obtener la carga circulante deseada; se obtiene restando al peso ideal de finos, según el paso 4, la cantidad de finos presentes en la alimentación al molino.
- 19) Se calcula el número de revoluciones correspondientes al siguiente período. Se obtiene dividiendo la cantidad de material que debe ser molido (calculada en el paso 18), entre el número de gramos netos por revolución del período anterior (calculado en el paso 15).
- 20) Se añade nueva alimentación al rechazo del ensayo (como en el paso 16) y se repiten los pasos del 7 al 20. Deben realizarse, como mínimo, 5 periodos de molienda.
- 21) Según Bond, es de esperar una convergencia del sistema donde el número de gramos netos por revolución frente al número de periodos muestre una tendencia creciente o decreciente, de forma que en un determinado ciclo se produzca una inversión de tal tendencia, y según Bond, una vez producido dicho cambio de tendencia, y pasados al menos cinco ciclos, puede darse por terminado el ensayo. En todo caso, este tipo de convergencia no es general, y de no presentarse tal inversión de tendencia, se debería continuar el ensayo hasta que no se haya visto una variación significativa en el número de gramos netos por revolución.
- 22) Promediando los valores de gramos netos por revolución obtenidos en los tres últimos períodos (si hubo la inversión de tendencia comentada en el paso 21), o de los dos últimos (si no la hubo), se calcula obtiene el **índice de molturabilidad** en molinos de bolas, **Gbp**.
- 23) Mediante análisis por tamizado, se determina la distribución granulométrica del pasante del tamiz de corte en el último ensayo realizado, con el fin de determinar el valor P_{80} .
- 24) Se calcula el índice de trabajo W_i , en molino de bolas, mediante la ecuación propuesta por Bond, ya comentada anteriormente:

$$W_i = \frac{44.5}{P_{100}^{0.23} \cdot Gbp^{0.82} \cdot \left(\frac{10}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{10}{\sqrt{F_{80}}} \right)}$$



siendo:

P_{100} es la abertura del tamiz de corte, en micras.

G_{bp} es el índice de molturabilidad o capacidad de molienda, en g/rev.

F_{80} es el tamaño correspondiente al 80% de pasante de la alimentación fresca, en micras.

P_{80} es el tamaño correspondiente al 80% de pasante de los finos del último periodo de molienda, en micras.

Una vez realizado el ensayo de Bond para molinos de bolas, ya es posible definir el algoritmo de cálculo necesario para llevar a cabo la simulación matemática (en nuestro caso el material será sílice), una vez sean especificados los modelos matemáticos de fragmentación, lo que trataremos en el capítulo tercero.

2.4.- LEYES ENERGÉTICAS DE LA FRAGMENTACIÓN.

Las ecuaciones básicas que rigen el fenómeno de la reducción de tamaño no están perfectamente definidas, siendo quizás el motivo principal el hecho de que la conminución trate con sólidos en los que existe un complejo equilibrio entre enlaces cohesivos y acciones repulsivas a nivel atómico y molecular.

La rotura es claramente producida por esfuerzos de tracción. En el caso de los esfuerzos de compresión, aunque tienden a acercar más los núcleos, la rotura se produce porque generan esfuerzos de tracción en la partícula. Cuando la compresión va acompañada de esfuerzo cortante, hay una tendencia al deslizamiento de unas capas de átomos sobre otras, y si el esfuerzo cortante es suficiente, se produce la rotura de la partícula.

Como es bien sabido, la rotura puede ser producida por métodos térmicos solamente, ya que el aumento de temperatura implica un aumento de la distancia atómica media, a la vez que un aumento en la amplitud de la vibración atómica. Esto se manifiesta en una expansión térmica, y la expansión térmica diferencial de las diferentes especies lleva a la rotura. De forma similar se puede favorecer la rotura por medios químicos, debido a la diferente susceptibilidad al ataque químico que presentan los enlaces tensionados entre átomos y moléculas y los enlaces no tensionados.

Durante años, los investigadores han intentado determinar la energía requerida para la rotura de las rocas. Desde el punto de vista de la metalurgia, este interés radica en la necesidad de liberar el mineral encajado en la roca. Ha sido observado que en el proceso de reducción de tamaño, al disminuir el tamaño de partículas el área superficial de las partículas aumenta. Por ello, una medida del tamaño o del área superficial de partículas antes y después del proceso de reducción debería indicar la energía requerida en el proceso de conminución. De ahí que si " E " es la energía usada para la reducción de tamaño deseada, el cual produjo un cambio en el área superficial " S ", se ha llegado a la expresión genérica desarrollada por **Hukki** a partir de las leyes de **Charles** y **Holmes**:

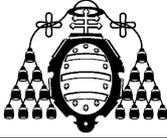
$$dE = k[S^n dS]$$

Donde " k " es una constante que depende de la resistencia a compresión de la roca. El valor de " n " ha sido determinado por diferentes trabajos como:

$n = -2$ (para la Ley de Rittinger)

$n = -1$ (para la Ley Kick)

$n = -1,5$ (para la Ley Bond)



Se ha observado que la expresión de Rittinger, $n = -2$, es más aplicable a tamaños de molienda gruesa mientras que la de Kick, $n = -1$, es más apropiado a tamaños de molienda más fina. El valor intermedio de Bond, $n = -1,5$, cubre casi toda la gama de partículas.

Sustituyendo $n = -1,5$ en la ecuación anterior y a continuación integrando entre el tamaño de partículas de la alimentación, " F ", y el tamaño de partículas producidas, " P ", se obtiene la **ecuación general de Bond** de la energía requerida en la reducción de tamaño:

$$E = 2K \left[\frac{1}{\sqrt{P}} - \frac{1}{\sqrt{F}} \right]$$

Donde " K " es una constante que depende de las características del mineral. Para tamaños de reducción del mineral en un proceso de reducción en circuito cerrado, Bond derivó la **energía específica para molienda** como:

$$E_G = 10 \cdot w_i \left[\frac{1}{\sqrt{P}} - \frac{1}{\sqrt{F}} \right] \quad (\text{kWh/t})$$

La ecuación anterior es el resultado fundamental del trabajo de Bond y ha sido aceptada universalmente. La fórmula de Bond tiene las dimensiones en toneladas cortas (sht), por lo que al resultado hay que aplicarle un factor de conversión (1,112) para obtener el resultado en toneladas (t). En la práctica en vez de un tamaño específico de alimentación, se generan gran variedad de tamaños de partículas como resultado de voladuras, los cuales se someterán al proceso de reducción. Como resultado de la trituración se obtiene un producto de tamaños más pequeños los cuales se introducirán en el siguiente proceso de reducción, la molienda.

Por lo tanto, en la ecuación anterior Bond considera el trabajo como la energía requerida para la reducción de las partículas de alimentación con un determinado F_{80} a un tamaño de partícula en el producto con un determinado P_{80} .

La forma final de la **ecuación de Bond** para la reducción de tamaño de una masa (M_F) de alimentación en circuito cerrado de molienda tiene la siguiente forma:

$$E_G = 10 \cdot w_i \left[\frac{1}{\sqrt{P}} - \frac{1}{\sqrt{F}} \right] M_F \quad (\text{kWh})$$

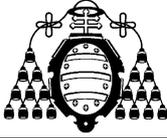
Donde:

F: tamaño de partícula correspondiente a un 80% de pasante en la alimentación expresado en micras (F_{80})

P: tamaño de partícula correspondiente a un 80% de pasante en el producto expresado en micras (P_{80})

w_i : es una constante que depende del mineral. Es conocido como **Índice de Trabajo o Índice de Bond** (representa el trabajo requerido para reducir el mineral de un tamaño infinito a $100 \mu\text{m}$).

M_F : masa, en toneladas.



El valor de w_i puede considerarse independiente de cualquier clasificador presente en el circuito. Los términos “F” y “P” se suelen expresar como “ F_{80} ” y “ P_{80} ”, donde los subíndices indican el porcentaje de pasante considerado para definir los tamaños de alimentación y producto respectivamente. Los términos $\frac{10}{\sqrt{F}}$ y $\frac{10}{\sqrt{P}}$ son adimensionales por que el 10 tiene unidades.

Por definición, la energía específica de molienda es la energía requerida por unidad de masa de roca en el proceso de reducción. La **energía de molienda específica** para una partícula de mineral se expresa como:

$$E_G = 10 \cdot w_i \left[\frac{1}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{1}{\sqrt{F_{80}}} \right] \text{ (kWh/t)}$$

La energía de molienda específica **en la ecuación de Bond**:

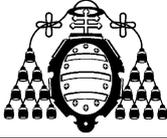
$$E_G = 10 \cdot w_i \left[\frac{1}{\sqrt{P}} - \frac{1}{\sqrt{F}} \right]$$

La energía de molienda, E_G , requerida para la reducción de tamaño de las rocas en molinos industriales se basa en la energía del eje del molino, P_M , y en su capacidad de molienda, Q . La relación entre ambos parámetros es la siguiente:

$$E_G = \frac{\text{energía del molino}}{\text{capacidad de molienda}} = \frac{P_M}{Q}$$

Por lo tanto, para cualquier roca puede determinarse la energía requerida para la conminución conociendo su Índice de Trabajo (w_i).

A continuación se expone cronológicamente una revisión de las leyes clásicas que relacionan la energía de rotura con parámetros simples.



2.4.1.- Ley de Rittinger.

Rittinger postuló en 1867, que el área de nueva superficie producida es proporcional a la energía consumida en la reducción de tamaño. Como el área de la superficie de una tonelada de partículas de diámetro uniforme **d** es proporcional a **1/d**, la ley de Rittinger se expresará como sigue:

$$W = K_R \cdot \left(\frac{1}{d_{80}} - \frac{1}{D_{80}} \right) \quad [\text{Ec. 2.7}]$$

Siendo **d₈₀** y **D₈₀** tamaños característicos de producto y alimentación, respectivamente.

Expresado en términos de utilización energética:

$$E_{ee} \alpha \left(\frac{1}{d} - \frac{1}{D} \right) = K_1 \cdot \Delta s \quad [\text{Ec. 2.8}]$$

$$\Delta s \frac{\Delta s}{E_{ee}} = K_1 = cte. \quad [\text{Ec. 2.9}]$$

2.4.2.- Ley de Kick.

En 1885 **Kick** afirmó que para cualquier unidad de masa de material, la energía necesaria para producir una relación de reducción dada es constante, sin importar el tamaño que pudiera tener originalmente la partícula.

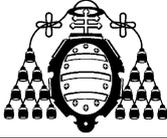
Sea **K₂** la energía específica aplicada para una reducción de tamaño desde **D** hasta **d=D/2**, esto representa un paso de reducción. Si **r** pasos son precisos para una reducción de tamaño de **D/n**, entonces **n=2^r** o bien **r = Log n / Log 2**. Por tanto la energía necesaria es **K₂ · (Log n / Log 2) = K₃ Log n**, o de forma más general para una relación de reducción **n = D/d**:

$$W = K_K \cdot \log \left(\frac{D}{d} \right) = K_K \cdot (\log D - \log d)$$

En términos de utilización energética:

$$E_{ee} = K_3 \cdot \log \left(\frac{D}{d} \right) = K_3 \cdot (\log D - \log d)$$

La ley quedaría así:



$$\frac{D}{d} = \exp\left(\frac{E_{ee}}{K_3}\right)$$

Como:

$$\Delta s = K_4 \cdot \left(\frac{1}{d} - \frac{1}{D}\right) = \frac{K_4}{D} \cdot \left(\frac{D}{d} - 1\right)$$

Entonces:

$$\frac{\Delta s}{E_{ee}} = \frac{K_4}{E_{ee} \cdot D} (\exp(E_{ee}/K_3) - 1)$$

2.4.3.- Ley de Bond.

Bond concluyó en 1952, que el trabajo necesario para romper un cubo de lado **d** es proporcional al volumen **d³** de dicho cubo; pero al formarse la primera grieta, la energía fluye a las nuevas superficies resultantes, que serán proporcionales a **d²**. Cuando se produce la rotura de una partícula de forma irregular, la energía de deformación se distribuye irregularmente según dicho autor, y por tanto la energía requerida para la rotura está entre **d³** y **d²**, siendo la media geométrica **d^{2.5}**, un compromiso entre Kick y Rittinger. Como el número de partículas con, supuestamente, la misma forma, es proporcional a **1/d³**, el trabajo necesario para romper la unidad de volumen será **d^{2.5}/d³ = 1/√d**. Así, en este caso se puede escribir:

$$E_{ee} = K_5 \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{d}} - \frac{1}{\sqrt{D}}\right)$$

Bond definió el “Índice de Trabajo” o Índice de Bond como:

$$w_i = K_5 \cdot \frac{1}{\sqrt{100}}$$

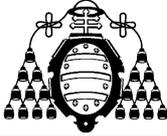
Que será la energía total requerida para reducir el tamaño de un mineral desde un tamaño teóricamente infinito hasta un producto con un 80% inferior a 100 micras. Sustituyendo, se obtiene la conocida fórmula de Bond:

$$E_{ee} \equiv W = w_i \cdot 10 \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{d}} - \frac{1}{\sqrt{D}}\right)$$

En la que d y D son expresados en micras y corresponden al tamaño por el que pasa el 80% de producto y alimentación respectivamente.

También en este caso se puede expresar la ley de Bond en términos de utilización energética (**Rose, 1972**):

$$\frac{\Delta s}{E_{ee}} = \frac{1}{K_6} E_{ee} + \frac{1}{K_7} \cdot \frac{1}{\sqrt{D}}$$



2.4.4.- Ley de Charles-Holmes.

En 1957, de manera independiente, el americano **Charles** y el británico **Holmes** propusieron una generalización de las leyes anteriores, resumiéndolas en una sola, que según **Hukki** (1975) podría expresarse así:

$$dW = -C \cdot \frac{dx}{x^n}$$

En la que “*C*” es una constante, y “*n*” toma los valores de 1 para la Ley de Kick, 2 para la ley de Rittinger y 1.5 para la Ley de Bond.

Según el propio Hukki, la Ley de Kick resultaría adecuada para partículas de tamaño superiores a 1 cm, lo que corresponde con el ámbito de la trituración. La Ley de Bond sería aplicable con mayor precisión en el rango correspondiente a la molienda convencional en molinos de barras y de bolas; finalmente, la Ley de Rittinger se aplicaría en el rango de la molienda fina. Lógicamente, hay un solapamiento de rangos entre cada dos leyes, de forma que a determinados tamaños, en teoría, podría aplicarse cualquiera de ambas con igual validez.

En la siguiente figura se realiza una representación comparativa de la ley diferencial general y las tres leyes clásicas.

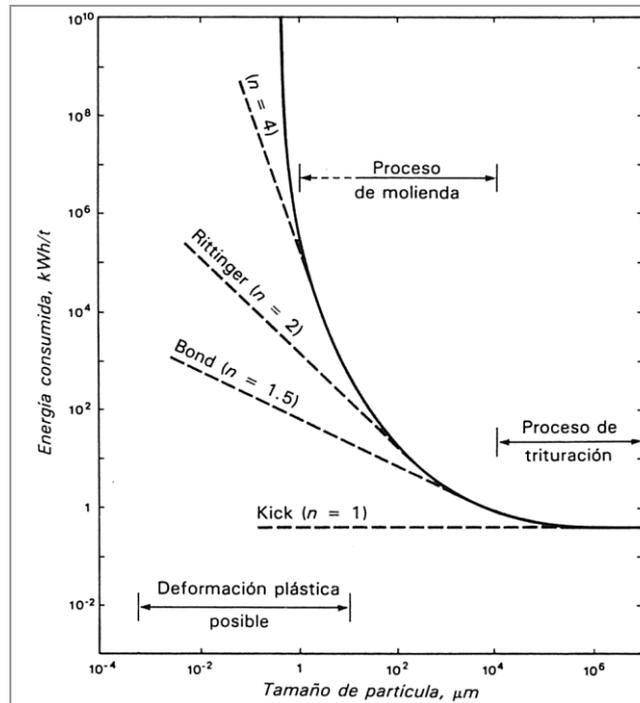
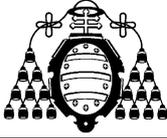


Fig. 2.10.- Comparación gráfica de las leyes de la fragmentación



2.5.- ANALIZADOR DE TAMAÑO DE PARTÍCULAS LS 13 320 BECKMAN COULTER

A continuación expondremos brevemente las sucesivas opciones de configuración que se presentan para la utilización del equipo de análisis de tamaño de partícula:

Existen cuatro módulos para el análisis de partículas:

- ALM: módulo líquido acuoso (mide desde 0,04 μm hasta 2000 μm)
- ULM: módulo líquido universal (mide desde 0,04 μm hasta 2000 μm)
- DPS: Sistema tornado para polvo seco (mide desde 0,4 μm hasta 2000 μm)
- MLM: módulo micro líquido (mide desde 0,4 μm hasta 2000 μm)

En los ensayos realizados se han utilizado los módulos: líquido acuoso (ALM) y el universal (ULM), para comprobar las distribuciones de las curvas granulométricas también se utilizó el sistema de tornado (DPS).

Una **guía rápida** para empezar a realizar ensayos con el analizador de partículas consistiría en los siguientes puntos:

1. Seleccionamos en **PREFERENCES** el modelo óptico que vamos a utilizar (dependiendo del tamaño de partícula que queramos medir utilizaremos el de Mie o el de Fraunhofer).
2. Cargamos las características de un procedimiento operativo estándar mediante la opción **LOAD SOP**.
3. Introducimos las características de la muestra a medir (en nuestro caso la densidad del material) mediante **SAMPLE INFO**.
4. Seleccionamos la tecla **START SOP**.
5. Esperamos a que la máquina mida y realice las comprobaciones de: **OFFSETS, ALIGNING y BACKGROUND**.
6. En el momento que aparezca el mensaje de “**MEASURE LOADING**” se echan en el módulo pequeñas cantidades del material a medir hasta que el parámetro **OBSCURATION** pone **OK**.
7. Después de unos segundos (o minutos) dependiendo de los parámetros seleccionados se obtienen los resultados en la forma previamente seleccionada.

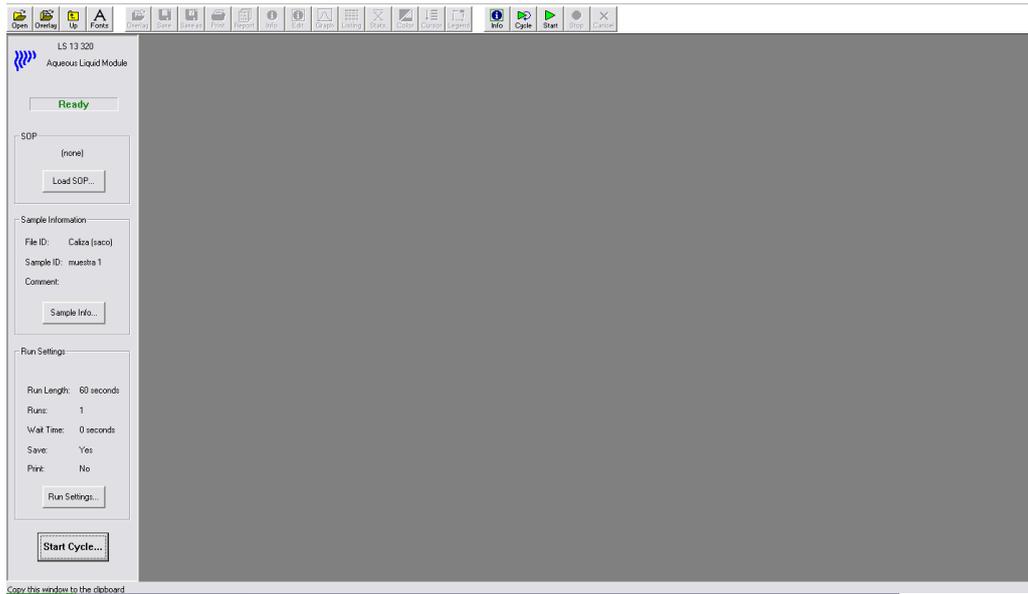
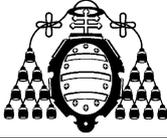


Fig. 2.11.- Pantalla inicial del ALM

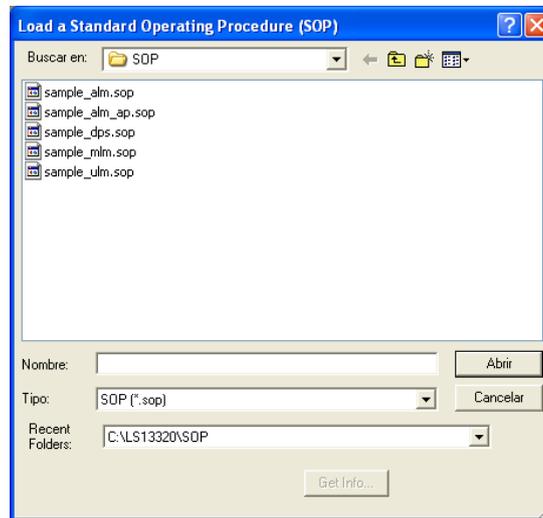
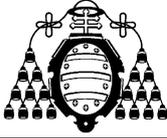


Fig. 2.12.- Pantalla de carga de los procedimientos de operación estándar (SOP)



Enter Sample Info

File ID: Operator:

Sample ID: Bar Code:

Comment 1: Run Number:

Comment 2:

Sample Density: g/mL Control Sample

Fluid: Water

Template: <F20>_<R2>_<U2>.<X>
File Name: _00_00.\$ls

Fig. 2.13.- Pantalla de carga de los procedimientos de operación estándar (SOP)

Preferences

Printed Report | **Statistics** | Averaging & Trend | Export | Page Setup | Graph Options | Fonts & Colors | Result Options

Sample Info Short

Size

Graphs

Statistics

Averaged Statistics

Compare Statistics

Overlay Statistics

Listing

Interpolation

Size Trend

Graph

Listing

Printer

Use Default Printer

Use Specified Printer:

Size Statistics

Volume %

Number %

Surface Area %

Sieve

Graphs

Listing

Statistics

Intensity

Graphs PIDS

Listing PIDS

Report Printing Order

Sample Info
Size Graphs
Size Statistics
Trend Graph
Size Interpolation
Average Statistics
Compare Statistics
Size Listing
Trend Listing
Intensity Graphs

Fig. 2.14.- Menú de preferencias

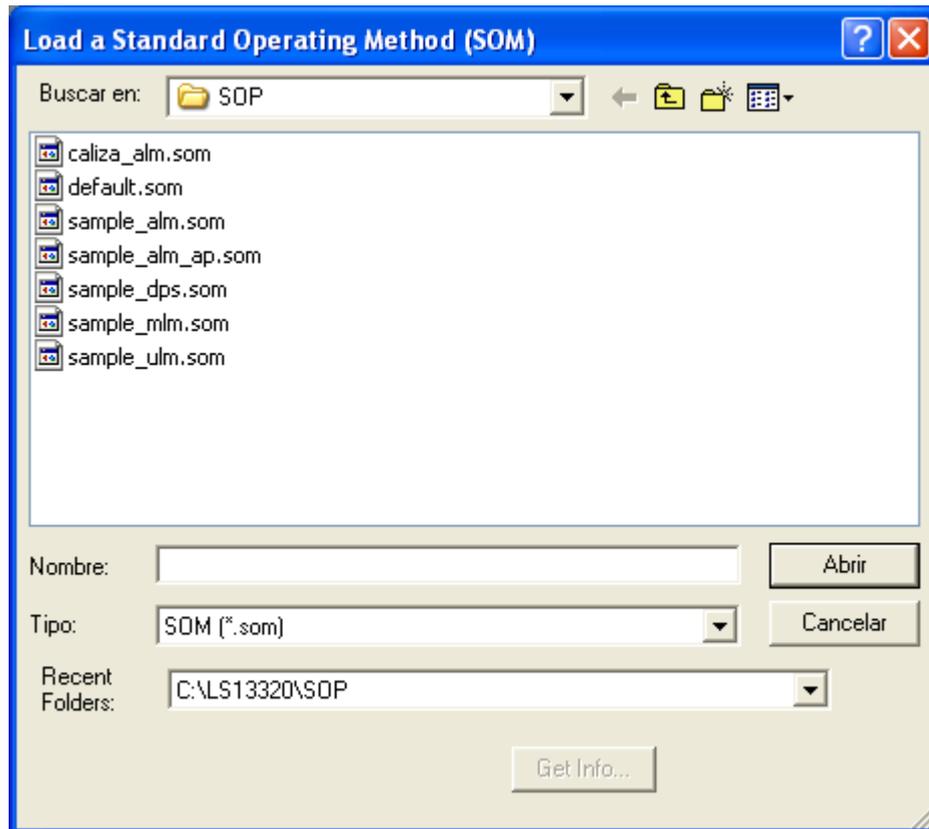
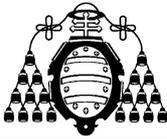


Fig. 2.15.- Pantalla de carga de los métodos de operación estándar (SOM)

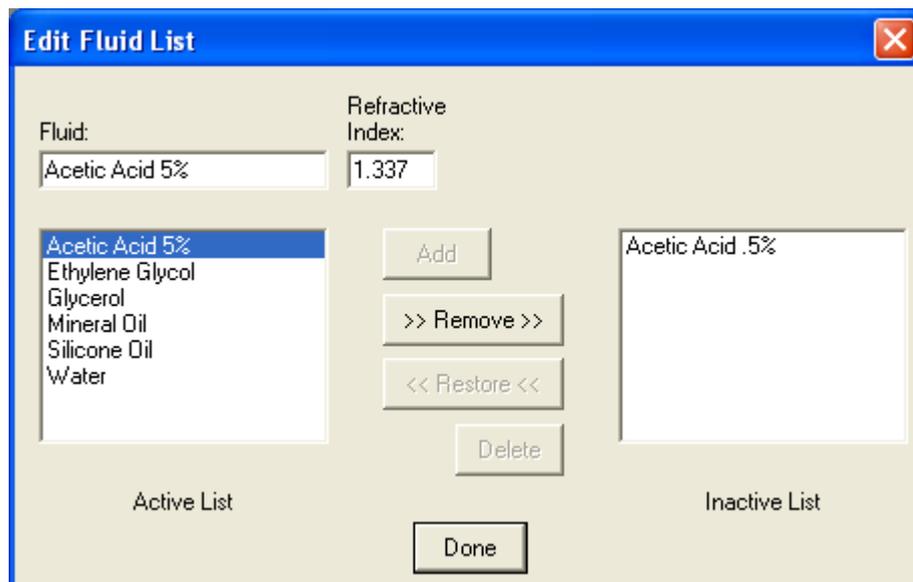
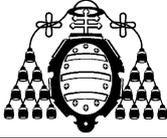


Fig. 2.16.- Selección de fluido utilizado y su índice de refracción



LS Particle Size Analyzer

Page 1

27 Jan 2011 17:53

Beckman Coulter LS 13 320

File name:	C:\LS13320\caliza_pruebas_3.\$is		
File ID:	caliza_pruebas_3.\$is		
Sample ID:	caliza_prueba_2		
Operator:	MF		
Run number:	1		
	Control Sample		
Optical model:	Me.r780d PIDS included		
Fluid R.I.:	1.454	Sample R.I.:	1.6 10
Residual:	0.53%		
LS 13 320	Aqueous Liquid Module		
Start time:	17:50 27 Jan 2011	Run length:	94 seconds
Pump speed:	50		
Obscuration:	10%	RDS Obscur:	48%
Fluid:	Water		
Sample Density:	2.4 g/mL		
Software:	5.01	Firmware:	2.02

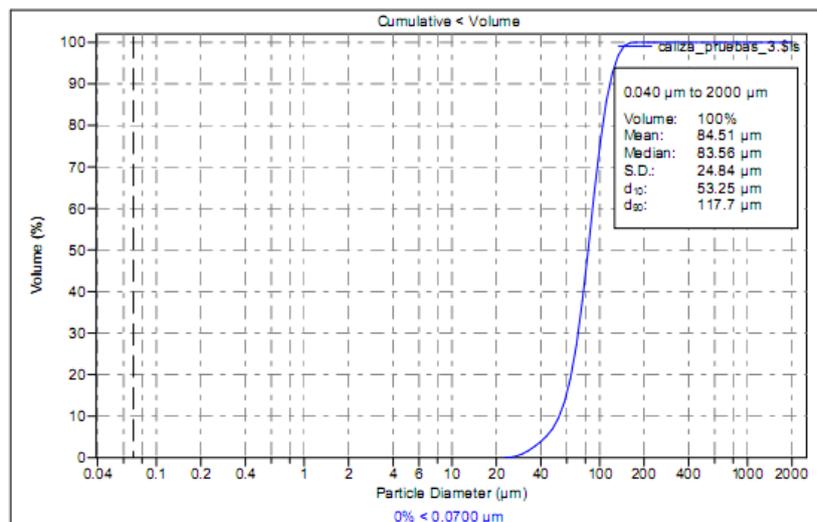
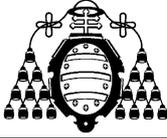
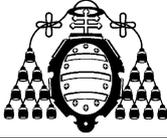


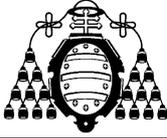
Fig. 2.17.- Representación de un informe del analizador



Capítulo 3:

Modelos de fragmentación





3.1.- MODELOS DE FRAGMENTACIÓN.

En este capítulo, se explicarán los diferentes modelos de fragmentación utilizados, y se analizará con más detalle el modelo cinético acumulativo.

3.1.1.- Modelos matemáticos de simulación.

Cuando se pretende llevar a cabo el diseño o la optimización de una planta de tratamiento de minerales, el objetivo fijado consiste en averiguar la combinación más idónea entre las variables que entran en juego, para conseguir una óptima economía global del circuito.

En la obtención de dicha combinación óptima de variables, uno de los puntos críticos se encuentra en la fase de conminución, por dos motivos fundamentales:

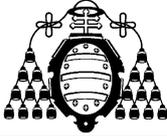
- En primer lugar, por la magnitud del consumo energético que estas operaciones suponen siempre.
- En segundo lugar, porque de su eficacia depende el resultado de las fases posteriores de tratamiento del material.

Como es lógico, una de las formas de estudiar la disposición óptima del circuito consiste en el estudio experimental del mismo, es decir, mediante ensayos en planta piloto. Hasta hace relativamente poco, esa era la única vía posible, y no siempre satisfactoria, debido al alto coste que lleva aparejado.

Una vía alternativa a la descrita anteriormente, que se vio muy favorecida por el gran desarrollo de las tecnologías informáticas, consiste en la Simulación de Procesos por Ordenador, basada en el desarrollo de modelos matemáticos de diversa naturaleza, capaces de describir las operaciones unitarias llevadas a cabo, que han probado suficientemente su validez en estos últimos años. En especial, se presentan como de gran eficacia los modelos desarrollados para los procesos de conminución.

La simulación por ordenador de los procesos de conminución puede proporcionar mucha mayor rapidez y ahorro en costes, e incluso mayor precisión, siempre que se utilicen modelos adecuados. En todo caso, quizás la mejor óptica se obtenga cuando se considere la simulación por ordenador como una técnica complementaria, es decir, como una técnica útil para la evaluación rápida de diferentes posibilidades, cuyos resultados en casos de mayor compromiso puedan ser refinados en ensayos en planta piloto.

Un modelo matemático de conminución o de una máquina de clasificación consiste en una serie de *ecuaciones* que pueden ser usadas para calcular las características del producto o productos de una máquina cuando se producen cambios en la alimentación o en las características de operación de la misma. Como la distribución granulométrica del producto es uno de los resultados que se esperan de un modelo, se estudia previamente las formas de representación de dicha distribución.



Representación de distribuciones granulométricas

Los métodos que pueden ser utilizados para caracterizar granulométricamente un colectivo de partículas, se pueden clasificar en:

Métodos de parámetro único:

Consisten en la caracterización del colectivo de partículas por un solo parámetro. Los que se utilizan con más asiduidad son:

- Tamaño por el que pasa una determinada fracción en peso del material.
- Área superficial por unidad de masa.

Aunque es el primero de los citados el más utilizado, en particular el caso en que se utiliza el 80% como fracción en peso de pasante, representándose dicho tamaño característico como D_{80} . El segundo de los parámetros citados se utiliza como medida de la finura de la molienda en algunas industrias, como la del cemento o la de óxidos de hierro para peletización.

En todo caso, es evidente que con un solo parámetro no se describe con suficiente precisión a un colectivo, siendo necesario en muchos casos el disponer de la distribución granulométrica por tamaños o una función que la represente.

Funciones continuas

Se han propuesto muchas funciones para definir las distribuciones de tamaños, siendo las más comunes las siguientes:

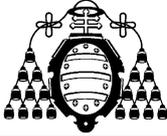
Rosin-Rammler:
$$Y = 1 - e^{-b \cdot x^n}$$

Gaudin-Schuhmann:
$$Y = \left(\frac{x}{k} \right)^m$$

Gaudin-Meloy:
$$Y = 1 - \left(1 - \frac{x}{x_0} \right)^r$$

En los tres casos, Y representa la proporción de material que pasa por una abertura de tamaño x , teniendo cada función parámetros propios que pueden proporcionar información sobre pendiente y posición de la curva. El inconveniente que presentan este tipo de funciones es que no son capaces de describir con precisión toda la distribución, lo que adquiere especial importancia en los circuitos cerrados de molienda, en los que la alimentación al molino es un producto parcial o totalmente clasificado, no molido.

La alternativa a utilizar funciones continuas de dudosa precisión, consiste en el uso de una función discontinua que permita la suficiente precisión, y desarrollar modelos que la incorporen.



Funciones discontinuas

Broadbent y Callcott (1956) definieron la distribución granulométrica como una serie de puntos $x_0, x_1, x_2, \dots, x_n$ y representaron la diferencia entre puntos consecutivos mediante un vector columna de dimensión $n \times 1$. Así, la curva granulométrica se aproximaba a una línea quebrada cuyos vértices eran los puntos considerados. Cuanto mayor fuese el número de puntos considerados, mayor sería la aproximación a la curva original, pero en general se consideraba de suficiente precisión la utilización de al menos cuatro intervalos.

Las ventajas que presenta este método de representación son:

- Se abarca todo el rango de tamaños con suficiente precisión.
- No se realizan aproximaciones que busquen el ajuste a una función continua.
- Cualquier distribución puede ser representada de esta forma.
- Este tipo de representación es adecuada para su uso en ordenadores.
- Suelen elegirse los puntos de forma que exista una relación constante entre dos consecutivos, lo que equivale al uso de aberturas de tamices en progresión geométrica.

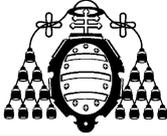
Frente a la interpolación lineal, debe mencionarse la interpolación mediante trazadores cúbicos o **splines**, que consigue la unión de los puntos mediante una línea más suave que la quebrada, obteniendo así una aproximación mayor sin una excesiva complicación de los cálculos. En todo caso, los errores de tipo numérico asociados al algoritmo pueden llevar a errores.

Para explicar los modelos de conminución hemos de considerar que se han realizado intentos para desarrollar modelos de procesos de reducción dimensional en base a relaciones entre reducción de tamaño-energía, en base a técnicas empíricas y desde un punto de vista mecanicista.

De todos ellos, únicamente la aproximación mecanicista, basada en el reconocimiento de los sucesos físicos que tienen lugar en el proceso de reducción dimensional, ha probado ser satisfactoria para la simulación. Fue Epstein (1948) el primero en describir un modelo estadístico del proceso de rotura, dependiente de dos funciones básicas: $P_n(y)$, la probabilidad de rotura de una partícula de tamaño y en la etapa n -ésima de rotura, y $F(x,y)$, distribución en peso de partículas de tamaño x menor o igual a y y provenientes de una fracción granulométrica de tamaño y . Epstein mostró que la primera de ellas, en un proceso de fragmentación repetitivo, y tras n etapas de molienda, es asintóticamente logarítmico-normal, lo que concuerda con la experiencia observada. Esta aproximación de Epstein subyace en los modelos conocidos como matricial y cinético.

Aunque aparece habitualmente en la literatura la distinción entre modelos de conminución matricial y cinético, conviene antes de nada resaltar que ambos no son sino dos formas diferentes de aproximarse a una misma realidad, aunque vestidas matemáticamente de forma ya sea discreta (caso del modelo matricial) o continua (caso del modelo cinético).

En el modelo matricial, la reducción de tamaño se considera como una sucesión de etapas de rotura, de forma que la alimentación a una etapa está constituida por el producto de la etapa anterior. Cuanto mayor sea el tiempo de molienda, mayor será el número de etapas y la reducción de tamaño conseguida. En el modelo cinético, la conminución se considera como un proceso continuo, de forma que cuanto mayor sea el tiempo de proceso, mayor será la reducción de tamaño conseguida.



Ambos modelos se basan en:

- Probabilidad de rotura, caracterizada por las funciones de selección y de tasa de rotura.
- Distribución de tamaños tras el proceso de rotura, conocida como distribución de rotura o función de apariencia.
- Transferencia de materia dentro o hacia fuera del molino, que suele depender del tamaño y se caracteriza por la función de clasificación o de velocidad de descarga, o el coeficiente de difusión en función del tamaño.

Las bases constitutivas del modelo matricial fueron establecidas por Broadbent y Callcott (1956). Siendo ampliamente analizado en trabajos posteriores (Whiten, 1974; Lynch, 1977; Kelly and Spottiswood, 1990; Mehta et al, 1993).

Si se consideran n intervalos granulométricos, sin incluir el inferior, las distribuciones de la alimentación y del producto pueden ser escritas vectores $n \times 1$, f y p respectivamente, de forma que estén ambos relacionados mediante la expresión:

$$p = X \cdot f$$

donde la matriz cuadrada X de rango n estaría definida de forma que su primera columna sería la distribución granulométrica del producto de rotura del intervalo superior de la alimentación, y así sucesivamente. Esta definición implica que la matriz X es además triangular inferior, con todos los elementos por encima de la diagonal nulos.

Se puede llegar a un mayor conocimiento de la matriz X teniendo en cuenta que el producto estará compuesto por partículas que pasan por el proceso sin romperse y fragmentos de partículas rotas.

Si s_1 es la proporción de partículas del intervalo superior que son seleccionadas para la rotura, entonces la masa de partículas rotas en ese intervalo será $s_1 \cdot f_1$. De forma similar, la masa de las partículas rotas en el intervalo n -ésimo se obtendrá como $s_n \cdot f_n$. De esta forma, se puede escribir de forma matricial las partículas que son rotas como $S \cdot f$, siendo S una matriz diagonal de orden n cuyos términos de la diagonal son las probabilidades de rotura de las partículas pertenecientes a cada intervalo granulométrico. De esta forma, las partículas que pasarán por el proceso sin fragmentarse estarán representadas por:

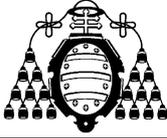
$$(I-S) \cdot f$$

Cuando la matriz X se refiere a aquellas partículas de la alimentación que son realmente fragmentadas, y no al peso total de la alimentación, se representa por B , de forma que la ecuación quedará:

$$p = B \cdot S \cdot f + (I-S) \cdot f = (B \cdot S + I - S) \cdot f$$

Hay dos características más de operación en las máquinas de reducción dimensional que se deben contemplar en el modelo:

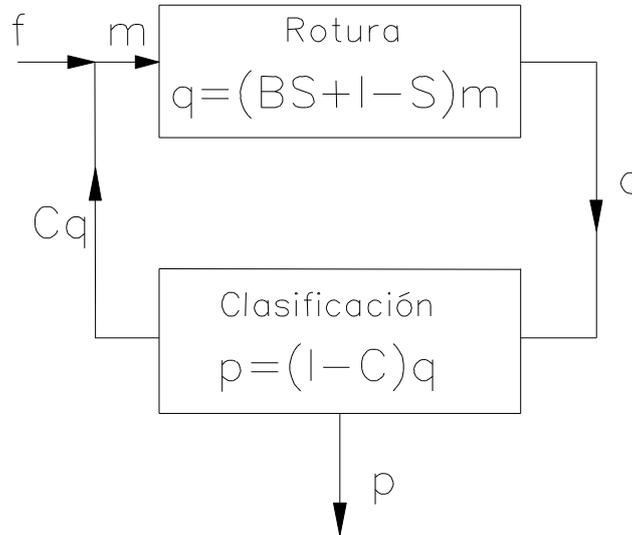
En gran multitud de aplicaciones, la molienda se realiza en circuito cerrado, produciéndose el cierre del circuito mediante un dispositivo clasificador. Pero además, en algunos tipos de máquinas se produce una *clasificación interna*, lo cual produce normalmente en un tipo de rotura altamente preferencial hacia las partículas gruesas, como ocurre típicamente en la acción de un molino de barras o incluso en cualquier molino con de descarga por parrilla o rejilla.



La ecuación correspondiente para describir este tipo de procesos será la siguiente:

$$p = (I-C) \cdot q$$

donde **C** sería una matriz cuadrada de orden n, diagonal, representando cada elemento la probabilidad de esa fracción de ir a los tamaños gruesos del clasificador.



Esquema general del proceso de fragmentación.

Observando el esquema de la figura, se puede escribir el desarrollo siguiente:

$$p = (I-C) \cdot (B \cdot S + I - S) \cdot m$$

Como:

$$m = f + C \cdot q$$

Entonces:

$$m = f + C \cdot (B \cdot S + I - S) \cdot m \Rightarrow f = (I - C \cdot (B \cdot S + I - S)) \cdot m$$

$$m = (I - C \cdot (B \cdot S + I - S))^{-1} \cdot f \Rightarrow p = (I - C) \cdot (B \cdot S + I - S) \cdot (I - C \cdot (B \cdot S + I - S))^{-1} \cdot f$$

Los sucesos repetitivos ocurren en cierto grado en la mayoría de las máquinas de conminución, excepto quizás en los molinos de rodillos. Si tienen lugar v ciclos repetidos, el proceso puede ser descrito por la ecuación siguiente:

$$p = \left\{ \prod_{j=1}^{j=v} X_j \right\} \cdot f$$

en la que X_j es el proceso en el ciclo j -ésimo, cumpliéndose:

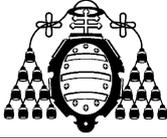
$$X_j = (I - C) \cdot (B \cdot S + I - S) \cdot (I - C \cdot (B \cdot S + I - S))^{-1}$$

Un caso particular sería cuando tienen lugar v ciclos idénticos de rotura, y la clasificación interna es insignificante. La ecuación en ese caso quedaría:

$$p = (B \cdot S + I - S)^v \cdot m$$

El parámetro v depende del tiempo de retención de las partículas en el molino, es decir, es inversamente proporcional al caudal de alimentación.

Los ciclos incompletos pueden ser manejados matemáticamente con facilidad.



La mayoría de las máquinas de fragmentación operan de forma tal que los fenómenos sucesivos de fracturación se producen mientras que las partículas están en la máquina, de forma que si se producen n procesos consecutivos, se podría escribir:

$$\begin{aligned} p_1 &= X \cdot f \\ p_2 &= X \cdot p_1 \\ p_3 &= X \cdot p_2 \\ &\dots\dots\dots \\ p_n &= X \cdot p_{n-1} \end{aligned}$$

donde se representa por p el producto y f la alimentación, simbolizando el subíndice la etapa correspondiente.

Así, si el producto final se denota por p , tras n etapas de molienda se podrá escribir:

$$p = \left[\prod_{i=1}^{i=n} X_i \right] \cdot f$$

En la expresión anterior X_i representa la matriz de fragmentación en la etapa i , refiriéndose en este caso el término *etapa* a un aspecto que se puede elegir de manera arbitraria, como puede ser una vuelta o una unidad de tiempo. En el caso particular de que todas las etapas puedan considerarse equivalentes, como es el caso del molino de bolas, la matriz X sería única, de forma que la expresión anterior que define el producto tras n etapas de fragmentación quedaría:

$$p = X^n \cdot f$$

P

ara determinar la matriz de fragmentación está ampliamente aceptado y contrastado (Gutiérrez y Sepúlveda, 1986; Kelly and Spottiswood, 1990) que la función de distribución de la fragmentación es independiente del tamaño inicial de partícula, pudiendo llevarse a cabo una normalización de la misma de la siguiente forma:

$$B_{i,j} = \Phi \cdot \left(\frac{x_i}{x_j} \right)^\alpha + (1 - \Phi) \cdot \left(\frac{x_i}{x_j} \right)^\beta$$

con $i = 1, \dots, n; j \leq i$

Obsérvese que $B_{i,j}$ no depende de los tamaños x_i o x_j separadamente, sino de su cociente. Esto permite que baste evaluar experimentalmente dicha expresión para $j = 1$, y en base a la expresión anterior, estimar dicho valor para cualquier $j > 1$, utilizando:

$$B_{i,1} = \Phi \cdot \left(\frac{x_i}{x_1} \right)^\alpha + (1 - \Phi) \cdot \left(\frac{x_i}{x_1} \right)^\beta$$

con $i = 2, \dots, n$

En la que los parámetros pueden ser calculados gráficamente mediante la representación gráfica de los valores experimentales obtenidos para $B_{i,1}$ frente al tamaño. Se observa que Φ y α se obtienen de la tangente en el tramo inicial de la curva, mientras que β se obtiene de la tangente en el tramo final.

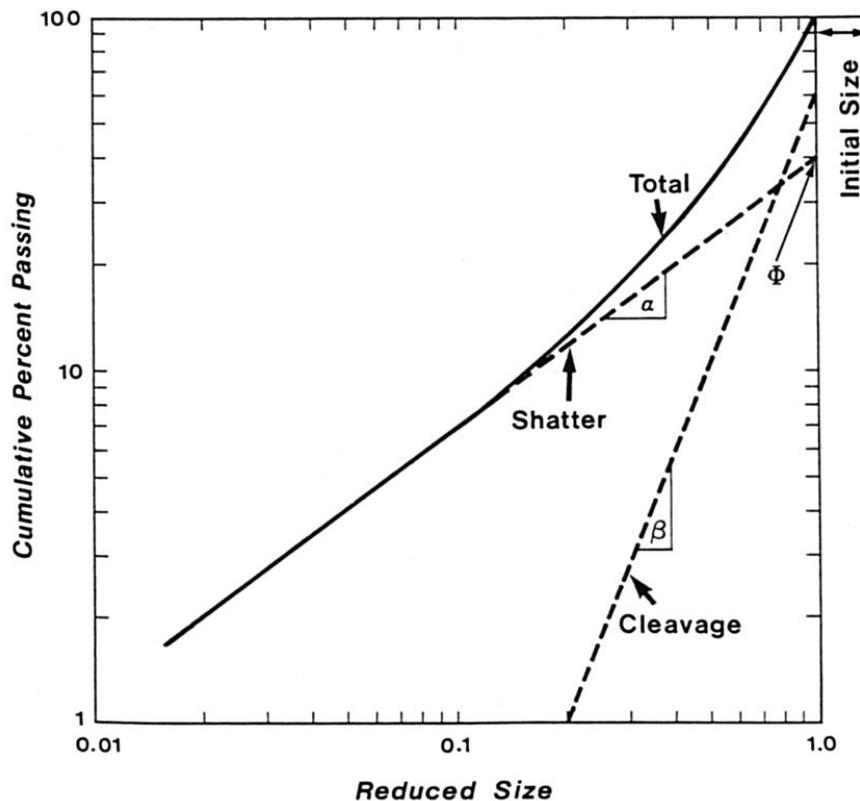
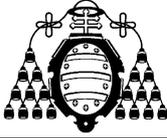


Fig. 3.1. Determinación gráfica de los parámetros del modelo.

En Gutiérrez y Sepúlveda (1986) puede encontrarse una descripción muy detallada de los pasos a seguir para la determinación experimental de esta función, incluso con planteamiento de ejemplos sobre casos reales, además de varias metodologías de determinación de la función de selección.

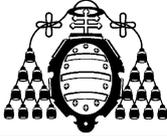
Asimismo, en el trabajo de Kelly and Spottiswood, 1990, se realiza un interesante análisis sobre la significación real de los parámetros obtenidos, y como se aprecia en la figura anterior, concluyen que se puede considerar dos tipos de rotura diferenciados, según la velocidad de aplicación de la energía.

Así, distinguen la rotura a baja velocidad de aplicación de la energía (cleavage) de la rotura con alta velocidad de aplicación de la energía, (shatter), estando ambas en relación directa con los parámetros β y α respectivamente, de forma que la rotura total se entendería como una composición de ambas tendencias, lo que se vería recogido en la expresión formulada anteriormente.

Para realizar el método simplificado de caracterización una vez comentada en el apartado anterior la ecuación matricial básica que define el modelo matricial de fragmentación:

$$p = X \cdot f$$

se lleva a cabo la propuesta de J.M. Menéndez Aguado (1999), de un método simplificado de caracterización, es decir un método de determinación de la matriz del sistema X sin necesidad de entrar en análisis, factorizaciones o descomposiciones de la misma.



Dado que la forma de expresión matricial de este modelo realiza una analogía con la teoría algebraica de las Aplicaciones Lineales, siendo en ese caso X la matriz característica de la aplicación, lo que aquí se propone es ir un poco más allá en el aprovechamiento de dicha analogía.

Hay que decir que, a pesar de que la representación vectorial de distribuciones granulométricas se haya revelado muy útil en la práctica, parece infructuoso todo intento de definir con rigor algebraico un sub-espacio vectorial del conjunto de las matrices cuadradas de orden n , sobre el que se pueda proyectar el isomorfismo existente con las Aplicaciones Lineales. Sirva como ejemplo el hecho de que no se podría definir la operación “producto por un escalar”.

En todo caso, como se ha comentado, la aplicación práctica de dicha analogía tiene un interés indudable, y es por ello por lo que nuestra proposición se basa en ella, y por lo que su planteamiento no puede estar justificado, como sin duda nos complacería, con un basamento algebraico indiscutible.

Ese paso más allá que se ha mencionado, consiste simplemente en observar uno de los más importantes teoremas, por no decir el más importante, de la Teoría de Aplicaciones Lineales, conocido como “Teorema de Existencia y Unicidad de Aplicaciones Lineales”. Dicho teorema es el responsable directo del establecimiento de un isomorfismo entre el espacio vectorial de las aplicaciones lineales y el espacio vectorial de las matrices de cuadradas de orden n . Según este teorema, es posible caracterizar una aplicación lineal mediante una matriz, definida dicha matriz, en virtud a dicho teorema, disponiendo por columnas los transformados, según dicha aplicación, de los vectores de una base.

En este punto es donde procede a realizarse la analogía, ya que no podemos hablar de base de un espacio vectorial sin definir previamente dicho espacio, cosa que como hemos comentado no es posible.

En todo caso, la representación de la base natural de un espacio vectorial, en la que cada vector tiene 0 en todas sus posiciones salvo un 1 en una posición, diferente a la que ocupa en el resto de vectores de la base, es la que permite continuar con la analogía, ya que una distribución granulométrica que estuviese representada por un vector de esas características sería un mono-tamaño, es decir, correspondería a un colectivo granulométrico en el que todas sus partículas estarán comprendidas entre dos tamaños suficientemente próximos. Tal representación sería como se muestra en las figuras siguientes:

Intervalo (micras)	Peso (%)	Tamaño	Pasante acum. (%)
500/250	0,0%	500	100,0%
250/200	100,0%	250	100,0%
200/160	0,0%	200	0,0%
160/100	0,0%	160	0,0%
<100	0,0%	100	0,0%

Tabla 3.2. Distribución granulométrica de un mono-tamaño

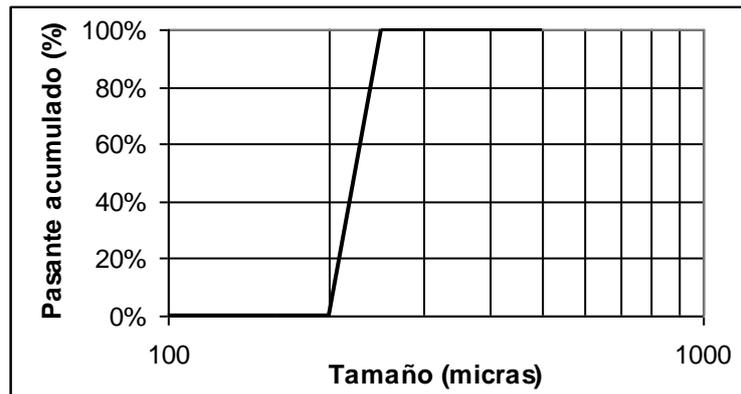
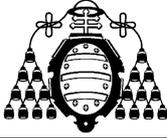


Tabla 3.3. Representación granulométrica de un mono-tamaño.

Definidos los tamices, los intervalos correspondientes nos definen esta pseudo-base en la que toda distribución granulométrica podría expresarse.

La idea está, por lo tanto, en llevar a cabo la definición de la matriz **X** de la aplicación a partir de los vectores producto de una serie de mono-tamaños, que quedarán definidos al seleccionar el rango de tamices a utilizar en cada caso.

Los vectores producto de cada uno de los pertenecientes a la mencionada pseudo-base, dispuestos ordenadamente en columnas, nos definen la matriz del sistema.

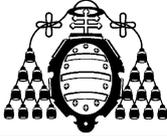
A continuación se muestra un ejemplo práctico de caracterización, con un menor número de tamices, y no llevado a cabo en un molino estándar de Bond, pero que puede ser útil para aclarar más si cabe lo expuesto anteriormente.

En la aplicación práctica que se llevará a cabo, se define una etapa como un número arbitrario de gramos por minuto procesados en el equipo de conminución, de forma que se establece como base de cálculo un valor, al que se referirán todas las determinaciones posteriores. Este valor puede ser fácilmente convertido a gramos por revolución siempre que se conozca la velocidad de giro del molino (lo cual es, por otro lado, habitual) y siempre que ésta se mantenga constante.

Así, se realizarán fácilmente los cálculos para el caso de ensayos con un número entero de etapas, mientras que en el caso de un número no entero de etapas se llevaría a cabo el cálculo mediante interpolación entre las dos etapas completas entre las que se encuentre.

Pueden extraerse una serie de anotaciones destacables como resultado de este planteamiento:

- Si se definen la etapa unitaria como un número determinado de gramos de material procesados durante un tiempo determinado (o durante un número de revoluciones dado), se ha de suponer equivalente, por ejemplo, la molienda de 100 g de material durante 1 minuto, a la molienda de 50 g durante ½ minuto, dado que en ambos casos correspondería al mismo número de etapas.
- Asimismo, se debe considerar equivalente el efecto sobre el producto final de la disminución a la mitad del tiempo de molienda de una cantidad de material dado, o de la duplicación de la masa de material procesada durante un tiempo dado.



La evaluación de estos supuestos mediante un análisis comparativo permitirá conocer hasta qué punto se cumple esto una vez establecido el modelo (es decir, una vez definidos los gramos por minuto correspondientes a una etapa y obtenida la matriz para ese número de gramos por minuto con cada uno de los mono-tamaños.

Obtención de la matriz

La forma de proceder se puede esquematizar de la forma que sigue:

- Definición de los intervalos granulométricos a considerar.
- Preparación de cantidades determinadas de material perteneciente a cada una de las granulometrías consideradas.
- Realización de los ensayos de molienda sobre cada una de las granulometrías. Para que la matriz esté bien definida, todas las moliendas deben corresponder al mismo número de etapas, es decir, que se debe llevar a cabo una molienda con el mismo número de gramos por minuto para cada granulometría.
- Caracterización granulométrica del producto de la molienda en cada caso, obteniéndose un vector producto por ensayo.
- Definición de la matriz característica mediante la disposición por columnas, de forma ordenada, de los vectores producto obtenidos.

La matriz así definida, presenta las siguientes propiedades características:

- Debe ser una matriz triangular inferior, es decir, todos los elementos por encima de la diagonal deben ser nulos. Esta propiedad es evidente, ya que el producto de un mono-tamaño dado nunca contendrá tamaños superiores a tal mono-tamaño. Aunque esto pueda parecer obvio, la importancia de este hecho puede ser grande cuando se plantee una excepción, como por ejemplo en el caso de que la molienda se lleve a cabo con materiales que puedan producir aglomeraciones.
- La suma de los elementos de cada columna debe ser la unidad, ya que cada columna está definida como la distribución granulométrica del mono-tamaño correspondiente.
- La última columna tendrá todos los elementos nulos excepto el de la última fila, cuyo valor será siempre la unidad.

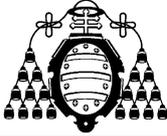
Para realizar la obtención de la matriz según como se ha descrito, se realizó inicialmente la elección de los intervalos granulométricos a considerar, que resultaron ser (en micras):

3150/1600 1600/800 800/400 400/200 200/0

Empleando una roca pegmatítica, se prepararon unos 400 g de cada una de las fracciones granulométricas antes citadas, siendo posteriormente fragmentado independientemente y en idénticas condiciones, durante dos minutos, en un molino de bolas. Los resultados de los ensayos se muestran en las tablas:

Primer monotamaño			
Tamaño	Alimentación	Producto (g)	Peso (%)
3150/1600	400	263,1	0,661
1600/800	0	73,8	0,185
800/400	0	21,8	0,055
400/200	0	10,4	0,026
200/0	0	29	0,073

Tabla 3.4. Resultados obtenidos con la fracción 3150/1600



Segundo monotamaño			
Tamaño	Alimentación	Producto	Peso (%)
3150/1600	0	0	0,000
1600/800	400	223,8	0,562
800/400	0	94,2	0,237
400/200	0	30,4	0,076
200/0	0	49,5	0,124

Tabla 3.5. Resultados obtenidos con la fracción 1600/800

Tercer monotamaño			
Tamaño	Alimentación	Producto	Peso (%)
3150/1600	0	0	0,000
1600/800	0	0	0,000
800/400	402	228,3	0,569
400/200	0	88,4	0,221
200/0	0	84,2	0,210

Tabla 3.6. Resultados obtenidos con la fracción 800/400

Cuarto monotamaño			
Tamaño	Alimentación	Producto	Peso (%)
3150/1600	0	0	0,000
1600/800	0	0	0,000
800/400	0	0	0,000
400/200	405	243,9	0,606
200/0	0	158,4	0,394

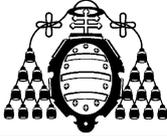
Tabla 3.7. Resultados obtenidos con la fracción 400/200

Es innecesaria la realización del ensayo con la fracción 200/0, ya que necesariamente su producto estará contenido en dicho intervalo.

A partir de los resultados expresados en las tablas anteriores, se puede escribir la matriz obtenida como sigue:

$$\mathbf{x} = \begin{pmatrix} 0,661 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 \\ 0,185 & 0,562 & 0,000 & 0,000 & 0,000 \\ 0,055 & 0,237 & 0,569 & 0,000 & 0,000 \\ 0,026 & 0,076 & 0,221 & 0,606 & 0,000 \\ 0,073 & 0,124 & 0,210 & 0,394 & 1,000 \end{pmatrix}$$

Para validar el modelo usaremos matrices de orden bajo, lo que significa un número pequeño de tamices, aumentando así la imprecisión del modelo. Por ello, en la aplicación práctica de este modelo no se han utilizado menos de diez intervalos. Sin embargo, para realizar la exposición completa del ejemplo mencionado, mostraremos una comparativa de los valores reales y los valores calculados mediante el uso de dicha matriz.



Se llevaron a cabo una serie de ensayos para realizar la comprobación de la validez del modelo lineal representado por la ecuación matricial $\mathbf{p} = \mathbf{X} \cdot \mathbf{f}$, de forma que se podría obtener el producto de la molienda de etapas sucesivas mediante: $\mathbf{p}_n = \mathbf{X} \cdot \mathbf{f}_n = \mathbf{X}^n \cdot \mathbf{f}$

Los resultados de los ensayos realizados se expresan gráficamente en la siguiente figura, realizándose una representación comparada entre los valores reales y los valores obtenidos por simulación.

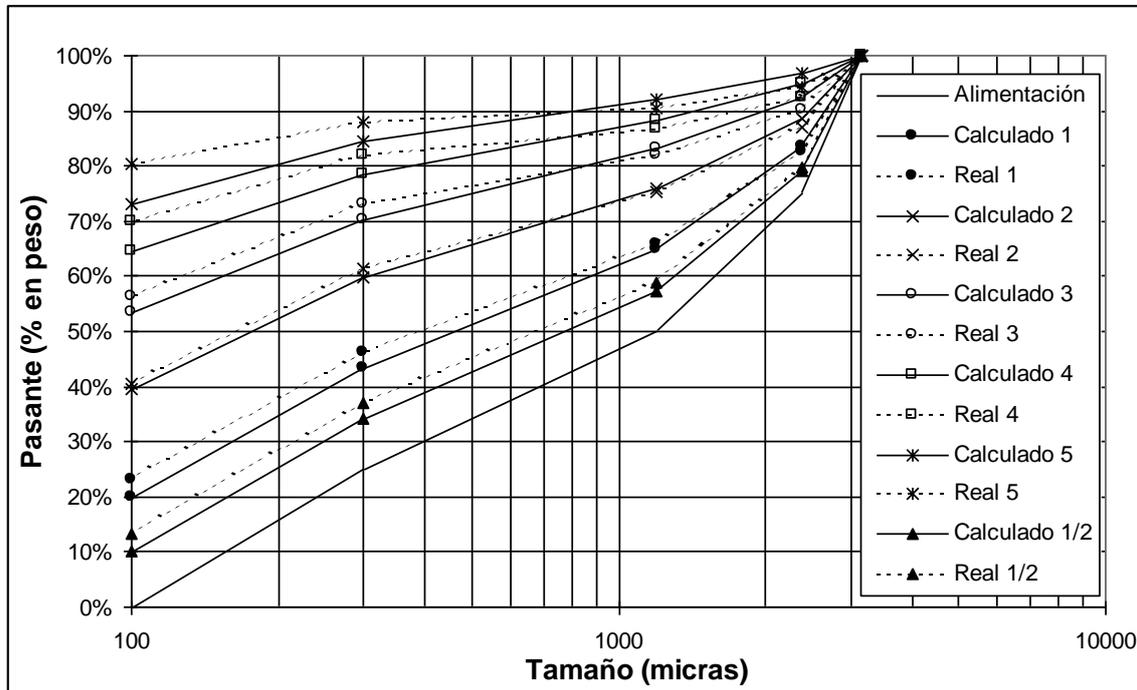


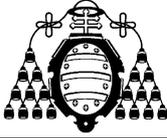
Fig. 3.8. Pasante (% peso) real y calculado

Como se puede observar en la figura, la aproximación obtenida es mejor en las tres primeras etapas de conminución, comenzando a observarse a partir de ese punto mayores desviaciones.

La importancia de estos resultados radica en que a la hora de establecer las condiciones de ensayo para la simulación del índice de Bond, las etapas de conminución a simular deberían enmarcarse en esos límites.

Una forma de definir a priori las condiciones óptimas de caracterización se basa en la consideración del primer ciclo de molienda en el ensayo de Bond. Si se considera la velocidad de rotación del molino y el número de revoluciones arbitrario que se vaya a elegir, el cual suele ser 100 revoluciones; y si se tiene en cuenta el peso de la cantidad de material a tratar (unos 700 cm^3 , en función de la densidad aparente del material a ensayar, pero que suele en general ser un valor en torno a 1 kg), se podría obtener un valor orientativo de los gramos por minuto. Dicho valor se puede utilizar como referencia a la hora de elegir el caudal correspondiente a una etapa de fragmentación.

En el trabajo de J.M. Menéndez Aguado (1999) se analizó la caracterización de tipo matricial, según el Método Simplificado Matricial, de dicho trabajo se puede concluir que existen dos inconvenientes de carácter práctico, propios de este método de caracterización, que son los citados a continuación:



- Las necesidades de cantidad de material disponible para la preparación de los mono-tamaños crecen enormemente con el número de intervalos, medida indispensable si se quiere aumentar la precisión.
- El tiempo de laboratorio necesario para dicha preparación crece igualmente que en el caso anterior, de forma que si el objetivo es realizar la simulación matemática del ensayo de Bond, sólo con la etapa de caracterización se puede superar con creces el tiempo necesario para la realización del propio ensayo de Bond.

Sin embargo, como ventaja principal habría que mencionar la simplicidad de cálculo, ya que mediante el uso de programas informáticos matemáticos del tipo MATLAB, que permiten el manejo de matrices de una forma sencilla, puede realizarse de manera fácil la simulación matemática de los procesos de molienda.

3.1.2.- Modelo cinético acumulativo.

Una forma de definir a priori las condiciones óptimas de caracterización se basa en la consideración del primer ciclo de molienda en el ensayo de Bond. Si se considera la velocidad de rotación del molino y el número de revoluciones arbitrario que se vaya a elegir, el cual suele ser 100 revoluciones; y si se tiene en cuenta el peso de la cantidad de material a tratar (unos 700 cm³, en función de la densidad aparente del material a ensayar, pero que suele en general ser un valor en torno a 1 kg), se podría obtener un valor orientativo de los gramos por minuto. Dicho valor se puede utilizar como referencia a la hora de elegir el caudal correspondiente a una etapa de fragmentación.

En este caso, se considera el proceso de conminución como un proceso continuo en el que la rotura de las partículas por unidad de tiempo para un intervalo granulométrico dado es proporcional a la masa presente en dicho intervalo. La ecuación básica fue descrita por Loveday (1967) como una ecuación cinética de primer orden:

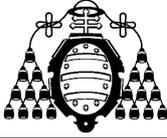
$$\frac{dW_D}{dt} = k_D \cdot W_D$$

en la que W_D es el peso de las partículas de tamaño D y k_D es la constante cinética para cada tamaño D . En este caso, la distribución de tamaños puede ser considerada de tipo continuo o discontinuo.

En el caso de considerar funciones continuas, si la función de fragmentación es $B(D, D_0)$, Loveday obtuvo la siguiente ecuación integro-diferencial para el caso de molienda discontinua o continua en flujo pistón:

$$\frac{d[W_D(t)dD]}{dt} = \int_D^\infty k_{D_0} \cdot W_{D_0}(t) \cdot (B(D, D_0) \cdot dD) \cdot dD_0 - k_D \cdot W_D(t) \cdot dD$$

El principal problema de esta ecuación es obtener una definición satisfactoria de la función continua para la distribución de tamaños. Loveday dedujo una solución analítica aproximada. Otras fueron publicadas por Reid (1965) y Kapur (1971), pero fueron Laplante et al. (1987) los que definieron la sencilla solución correspondiente al Modelo Cinético Acumulativo, que será el que en este trabajo será utilizado. Las evidentes ventajas de este método son las citadas a continuación:



- Este modelo queda definido por dos parámetros, lo que simplifica también la interpretación de los resultados.
- Existen estudios hechos por investigadores de reconocido prestigio en el campo que nos ocupa, en los que se concluye que los parámetros determinados a escala de laboratorio pueden ser directamente aplicados a la escala industrial, (Finch and Ramírez-Castro, 1980).

El Modelo Cinético Acumulativo queda definido matemáticamente, tanto en el caso de la molienda discontinua como continua en flujo pistón, por la siguiente expresión:

$$W_{(x,t)} = W_{(x,0)} \cdot e^{-k \cdot t}$$

donde:

$W_{(x,t)}$ es el porcentaje acumulado de material de tamaño superior a un tamaño x dado (rechazo acumulado) en un tiempo t .

$W_{(x,0)}$ es el rechazo acumulado correspondiente al mismo tamaño x , en la alimentación
 K , parámetro cinética, se puede definir como la velocidad de desaparición del material, en min^{-1}

Según este modelo, la relación entre el parámetro cinético y el tamaño de partícula puede ser descrita matemáticamente mediante la siguiente expresión:

$$k = C \cdot x^n$$

en la que C y n son constantes dependientes del molino y de las características del material, respectivamente (Ersayin et al., 1993).

De esta forma, una vez sean conocidos C y n , podría obtenerse la distribución granulométrica de un producto tras un tiempo t de molienda a partir de una alimentación determinada, haciendo uso de la composición de las dos expresiones anteriores:

$$W_{(x,t)} = W_{(x,0)} \cdot e^{-C \cdot x^n \cdot t}$$

expresión que nos daría el porcentaje de rechazo al tamaño x , tras un tiempo de molienda t . La validez de este modelo ya ha sido estudiado anteriormente (Finch and Ramírez-Castro, 1981; Akasani and Sönmez, 2000), aunque en la parte experimental realizada en este trabajo se realizan comparativas entre distribuciones reales y distribuciones calculadas en las que se comprueba de nuevo dicha validez, obteniéndose gráficos comparativos como el presentado en la figura, para el caso del clinker, en el que el grado de ajuste para todos los tiempos ha sido excelente:

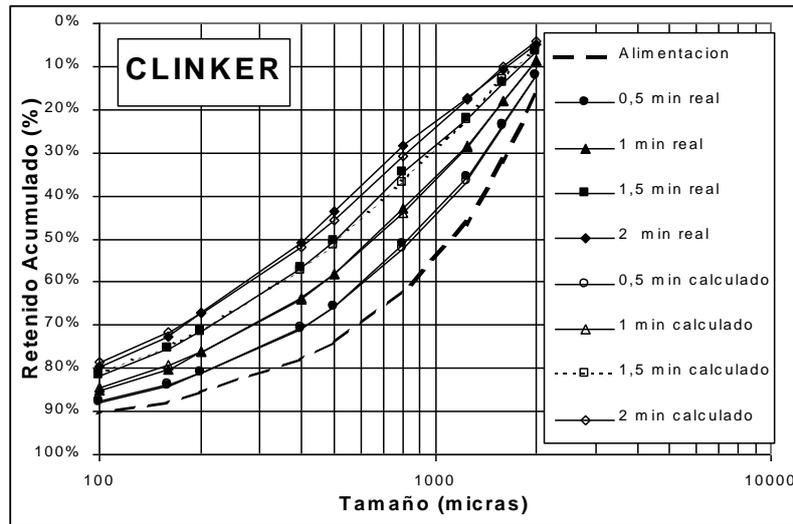
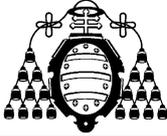


Fig. 3.9. Comparación entre valores reales y calculados.

Para llevar a cabo la obtención de los parámetros del modelo, y dado que el tipo de molino ejerce cierta influencia como ya se ha comentado, se realizan ensayos en un molino estándar de Bond, a partir de muestras de alimentación representativas y verificando las condiciones definidas en el ensayo de Bond. Dichos ensayos consisten en la molienda durante varios tiempos diferentes, determinando la distribución granulométrica del producto resultante a cada uno de los tiempos.

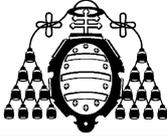
Los valores del parámetro cinético k para cada tamaño se pueden obtener realizando una regresión lineal de los valores de rechazo acumulado frente al tiempo, sobre la ecuación linealizada de la siguiente forma:

$$L(W_{(x,t)}) = L(W_{(x,0)}) - k \cdot t \Rightarrow L(W_{(x,t)}) - L(W_{(x,0)}) = -k \cdot t$$

Para el cálculo de C y n , a partir de los valores de k obtenidos para cada tamaño, se realizó de nuevo una regresión de tipo lineal, teniendo en cuenta, al igual que antes, la linealización mediante logaritmos de lo siguiente:

$$L(k) = L(C) + n \cdot L(x)$$

Como ejemplo para facilitar la comprensión de lo expuesto, se muestran a continuación las tablas de cálculo correspondientes al clinker, que llevan a la obtención final de los parámetros del modelo para este caso.



De los ensayos realizados a 0,5, 1, 1,5 y 2 minutos, tras la realización de los análisis granulométricos a los productos obtenidos en cada caso, se obtiene la tabla:

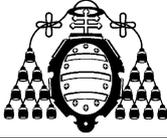
x \ t	W(x,t)				
	0	0,5	1	1,5	2
2000	0,172890377	0,122387804	0,087090956	0,066855963	0,047225095
1600	0,322516954	0,236724906	0,180709439	0,13844433	0,106773526
1250	0,467250408	0,357913669	0,285407541	0,221992772	0,174164081
800	0,62280024	0,51276122	0,427381259	0,345379453	0,282316443
500	0,743497296	0,65870161	0,581722924	0,50369988	0,435625646
400	0,783586574	0,708119219	0,638752899	0,567114094	0,508273009
200	0,859215383	0,80952381	0,762947694	0,711667527	0,671406412
160	0,880676453	0,840013703	0,801855192	0,754947513	0,724922441
100	0,907974933	0,877869133	0,850897535	0,814919979	0,795329197

Tabla 3.10. Resultados de la molienda a diferentes tiempos

A partir de los datos de la tabla anterior, se pueden realizar los cálculos de $L(W(x,t)) - L(W(x,0))$, recogidos en la tabla siguiente:

x \ t	L(W(x,t)) - L(W(x,0))				
	0	0,5	1	1,5	2
2000	0	-0,34546301	-0,68570469	-0,95011724	-1,29773231
1600	0	-0,30925697	-0,57926527	-0,84568741	-1,10544569
1250	0	-0,26657351	-0,49294719	-0,74422049	-0,98686747
800	0	-0,19441555	-0,37654933	-0,58958215	-0,79119725
500	0	-0,12109449	-0,24537087	-0,38938452	-0,53458186
400	0	-0,10126908	-0,20436387	-0,32332104	-0,43286283
200	0	-0,05957344	-0,11883015	-0,18840878	-0,24664499
160	0	-0,0472721	-0,09376228	-0,15404208	-0,19462564
160	0	-0,03371924	-0,06492506	-0,10812685	-0,13246066

Tabla 3.11. Cálculos realizados



Realizando para cada tamaño la mencionada regresión, se obtienen los valores de k siguientes:

x	k
2000	0,640023771
1600	0,549464364
1250	0,490276384
800	0,395512219
500	0,267490751
400	0,217555524
200	0,124425065
160	0,099204251
160	0,067865785

Tabla 3.12. Valores de k obtenidos

A partir de la tabla anterior, se puede ya realizar el cálculo de los valores de C y n mediante regresión lineal:

Lx	Lk
7,60090246	-0,446249961
7,377758908	-0,598811359
7,13089883	-0,712785998
6,684611728	-0,927573596
6,214608098	-1,31867029
5,991464547	-1,52530118
5,298317367	-2,084051629
5,075173815	-2,310574416
4,605170186	-2,690223272

Tabla 3.13. Análisis de regresión efectuado

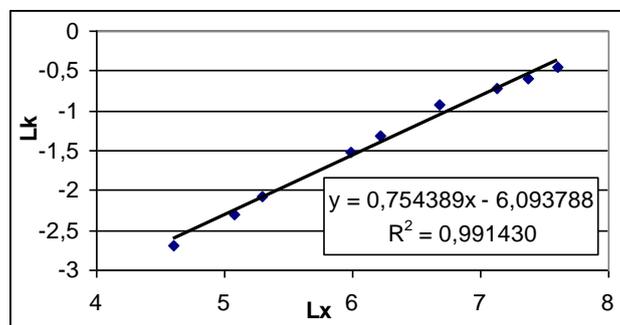
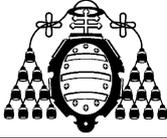


Fig. 3.14. Recta obtenida

Y teniendo en cuenta que $L(k) = L(C) + n \cdot L(x)$, se obtienen finalmente los parámetros del modelo, que en este caso serán:

C	n
0,002256844	0,754389



Las principales ventajas de este modelo son las siguientes:

- La cantidad mínima de material necesaria para realizar los ensayos de caracterización no es más que el peso de 700 cm^3 , lo cual puede suponer un peso no superior a 2 kg.
- La realización de los ensayos de caracterización requiere un número limitado de operaciones unitarias, de forma que el tiempo de laboratorio es mínimo.

Por el contrario, la simulación matemática es algo más compleja que en el caso del Modelo Simplificado Matricial, a pesar de que al no existir cálculo matricial, con una simple hoja de cálculo podrían realizarse todas las operaciones necesarias.

En nuestro caso haremos las comprobaciones del material molido en una hoja de cálculo, de donde obtendremos los datos que nos servirán para realizar una simulación en MatLab y determinar si los resultados son coherentes con los predecibles en teoría y los observables con el analizador Coulter.

3.2.- MODELOS DE DISTRIBUCIÓN.

A continuación expondremos brevemente los dos modelos de distribución utilizados en esta tesis.

3.2.1.- Representación logarítmico-cartesiana.

Es un modelo de **representación gráfica** ya que no calcula la función que pasa por todos los puntos, sino que representa los datos (tamaño partícula versus %pasante acumulado) en escala logarítmica-cartesiana. La gráfica obtenida se asemeja a una curva de forma sinusoidal.

La curva se representa mediante una **polilínea**. Como en el presente estudio sólo interesa conocer un valor (d_{80}), los cálculos se simplifican al tener que calcular solamente la línea que pasa por dicho valor. De este modo, se simplifican los cálculos a una interpolación lineal entre los dos puntos en el que se encuentra d_{80} .

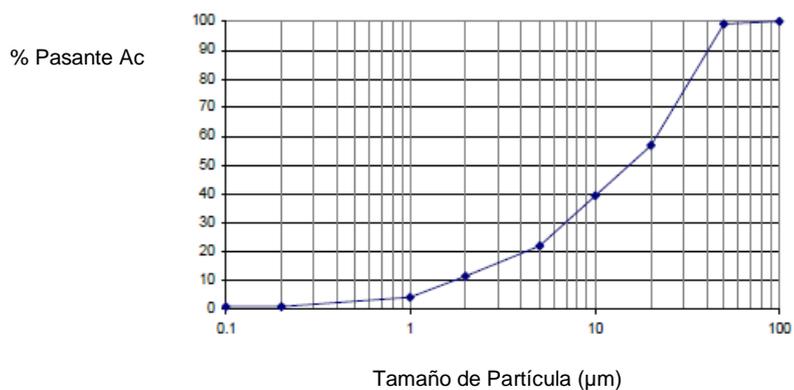
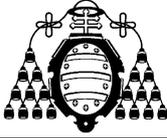


Fig. 3.15.- Ejemplo modelo log-cartesiano.



Las **ecuaciones** a considerar en este modelo son:

$$y = mx + n$$

$$\% Pasante Ac. = m \cdot \log(d_{80}) + n$$

El tamaño se calcularía a través de la siguiente ecuación:

$$\log(d_{80}) = \frac{\% Pasante Ac. - n}{m}$$

Como el %pasante acumulado es el 80%:

$$\log(d_{80}) = \frac{80 - n}{m}$$
$$d_{80} = 10^{\frac{80 - n}{m}}$$

Siendo d_{80} (μm) el tamaño de partícula correspondiente a F_{80} y P_{80} según se esté calculando para la alimentación o los finos.

3.2.2.- Representación cartesiana-cartesiana

Es una **representación gráfica** en la cual se representa el tamaño de partícula (μm) versus %pasante acumulado. Ambos ejes están en escala cartesiana. Se puede calcular la ecuación de la recta que más se aproxime todos los puntos, pero el error cometido sería muy grande y se opta por calcular la recta que pasa por el intervalo en el que se encuentran el valor de d_{80} (F_{80} , P_{80}).

La **ecuación** general de una recta es:

$$y = mx + n$$

En nuestro caso:

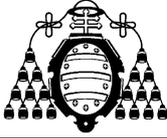
$$\% Pasante Ac. = m \cdot d_{80} + n$$

El tamaño se calcularía a través de la siguiente ecuación:

$$d_{80} = \frac{\% Pasante Ac. - n}{m}$$

Como el %pasante acumulado es el 80%:

$$d_{80} = \frac{80 - n}{m}$$



Para la obtención del parámetro F_{80} :

Para obtener el valor de F_{80} (mediante representación cartesiana-cartesiana) se toman los datos de los dos puntos más cercanos al 80% de pasante acumulado de la granulometría inicial del material según el modelo considerado, con estos valores se calcula la ecuación de la recta que pasa por dichos puntos según las siguientes ecuaciones:

$$y = a x + b$$

$$\% \text{ Pasante Ac.} = a * \text{Tamaño} + b$$

$$\% \text{ Pasante Ac.} = 0,0202 * \text{Tamaño} + 36,315$$

Finalmente sustituyendo el porcentaje de pasante acumulado por 80 se obtiene el valor de F_{80}

Para la obtención del parámetro P_{80} :

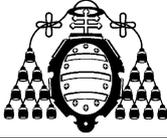
Para obtener el valor de P_{80} (mediante representación cartesiana-cartesiana) se toman los datos de los dos puntos más cercanos al 80% de pasante acumulado de la granulometría inicial del material según el modelo considerado, con estos valores se calcula la ecuación de la recta que pasa por dichos puntos según las siguientes ecuaciones:

$$y = a x + b$$

$$\% \text{ Pasante Ac} = a * \text{Tamaño} + b$$

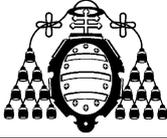
$$\% \text{ Pasante Ac} = 0,25404 * \text{Tamaño} - 25,21$$

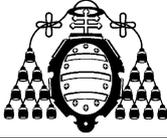
Finalmente sustituyendo el porcentaje de pasante acumulado por 80 se obtiene el valor de P_{80}



Capítulo 4

Ensayos de caracterización





4.1.- INTRODUCCIÓN.

En este capítulo se verificaron las relaciones que se dan entre las funciones gráficas obtenidas para determinados materiales y las que tendrían en tamaños de partícula ultrafinos, se explican asimismo los resultados que se obtendrían utilizando un analizador de partículas de tipo Coulter.

Se han realizado un total de **120 ensayos**, verificándose la reproducibilidad del método con varias repeticiones de los mismos para eliminar las posibles fuentes de error en los datos obtenidos.

Los materiales sometidos a ensayos fueron: Caliza, Carbón, Magnetita, Scheelita, Sílice y Zeolita.

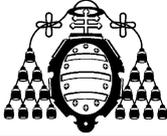
4.2.- MATERIALES UTILIZADOS.

4.2.1.- Caliza.

Las muestras de caliza utilizadas han sido obtenidas del Laboratorio de Mineralurgia de la Escuela Politécnica de Mieres. Obteniéndose los siguientes resultados:

CALIZA

DATOS DE ENTRADA					
Intervalo	Alimentación	0,5 min	1 min	1,5 min	2 min
35	236,80	349,00	320,00	169,20	74,00
25	236,80	106,30	99,00	100,00	85,60
18	236,80	112,50	105,80	118,30	109,50
12	236,80	123,10	102,60	115,50	127,50
10	236,80	43,00	55,60	49,70	55,60
7	0,00	73,00	74,50	89,50	99,80
6	0,00	40,10	30,00	37,80	43,50
4	0,00	90,30	199,60	275,40	279,00
2	0,00	143,70	106,50	115,00	168,40
< 2	0,00	102,70	90,00	112,30	138,40
	1.184,00	1.183,70	1.183,60	1.182,70	1.181,30

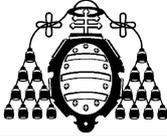


Intervalo	Peso fracción (tanto por uno)				
	Alimentación	0,5 min	1 min	1,5 min	2 min
35	0,2000	0,2948	0,2704	0,1431	0,0626
25	0,2000	0,0898	0,0836	0,0846	0,0725
18	0,2000	0,0950	0,0894	0,1000	0,0927
12	0,2000	0,1040	0,0867	0,0977	0,1079
10	0,2000	0,0363	0,0470	0,0420	0,0471
7	0,0000	0,0617	0,0629	0,0757	0,0845
6	0,0000	0,0339	0,0253	0,0320	0,0368
4	0,0000	0,0763	0,1686	0,2329	0,2362
2	0,0000	0,1214	0,0900	0,0972	0,1426
< 2	0,0000	0,0868	0,0760	0,0950	0,1172
	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000

Tamaño	Pasante Acumulado (%)				
	Alimentación	0,5 min	1 min	1,5 min	2 min
35	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
25	80,00%	70,52%	72,96%	85,69%	93,74%
18	60,00%	61,54%	64,60%	77,24%	86,49%
12	40,00%	52,03%	55,66%	67,24%	77,22%
10	20,00%	41,63%	46,99%	57,47%	66,43%
7	0,00%	38,00%	42,29%	53,27%	61,72%
6	0,00%	31,83%	36,00%	45,70%	53,27%
4	0,00%	28,44%	33,47%	42,50%	49,59%
2	0,00%	20,82%	16,60%	19,22%	25,97%

LOG(Tamaño)	Alimentación	TENDENCIA	F80
1,5441	100,00%	1,3979	25,00
1,3979	80,00%		

Tamaño	Rechazo Acumulado (%)				
	Alimentación	0,5 min	1 min	1,5 min	2 min
35	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
25	20,00%	29,48%	27,04%	14,31%	6,26%
18	40,00%	38,46%	35,40%	22,76%	13,51%
12	60,00%	47,97%	44,34%	32,76%	22,78%
10	80,00%	58,37%	53,01%	42,53%	33,57%
7	100,00%	62,00%	57,71%	46,73%	38,28%
6	100,00%	68,17%	64,00%	54,30%	46,73%
4	100,00%	71,56%	66,53%	57,50%	50,41%
2	100,00%	79,18%	83,40%	80,78%	74,03%



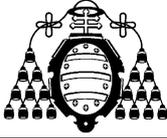
x\t	W(x,t)				
	0	0,5	1	1,5	2
35	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
25	0,2000	0,2948	0,2704	0,1431	0,0626
18	0,4000	0,3846	0,3540	0,2276	0,1351
12	0,6000	0,4797	0,4434	0,3276	0,2278
10	0,8000	0,5837	0,5301	0,4253	0,3357
7	1,0000	0,6200	0,5771	0,4673	0,3828
6	1,0000	0,6817	0,6400	0,5430	0,4673
4	1,0000	0,7156	0,6653	0,5750	0,5041
2	1,0000	0,7918	0,8340	0,8078	0,7403

x\t	L(W(x,t))				
	0	0,5	1	1,5	2
35	-	-	-	-	-
25	-1,6094	-1,2213	-1,3080	-1,9445	-2,7703
18	-0,9163	-0,9554	-1,0384	-1,4801	-2,0017
12	-0,5108	-0,7346	-0,8133	-1,1158	-1,4793
10	-0,2231	-0,5384	-0,6347	-0,8550	-1,0914
7	0,0000	-0,4780	-0,5498	-0,7607	-0,9602
6	0,0000	-0,3832	-0,4463	-0,6107	-0,7608
4	0,0000	-0,3347	-0,4075	-0,5535	-0,6850
2	0,0000	-0,2334	-0,1815	-0,2134	-0,3007

x\t	L(W(x,t)) - L(W(x,0))				
	0	0,5	1	1,5	2
35	0,0000	-	-	-	-
25	0,0000	0,3881	0,3014	-0,3350	-1,1609
18	0,0000	-0,0392	-0,1222	-0,5638	-1,0854
12	0,0000	-0,2238	-0,3025	-0,6050	-0,9685
10	0,0000	-0,3153	-0,4116	-0,6318	-0,8683
7	0,0000	-0,4780	-0,5498	-0,7607	-0,9602
6	0,0000	-0,3832	-0,4463	-0,6107	-0,7608
4	0,0000	-0,3347	-0,4075	-0,5535	-0,6850
2	0,0000	-0,2334	-0,1815	-0,2134	-0,3007

(-k)
-
-0,6090

x	k	Lx	Lk
35	-	3,5553	-
25	0,6090	3,2189	-0,4960

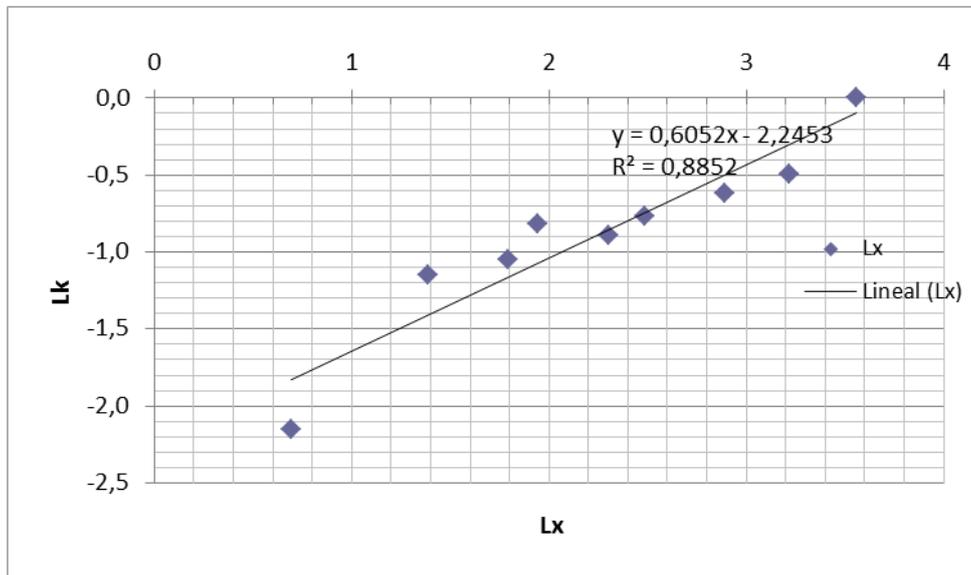


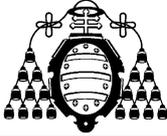
-0,5391
-0,4636
-0,4106
-0,4406
-0,3498
-0,3177
-0,1163

18	0,5391	2,8904	-0,6179
12	0,4636	2,4849	-0,7687
10	0,4106	2,3026	-0,8901
7	0,4406	1,9459	-0,8195
6	0,3498	1,7918	-1,0503
4	0,3177	1,3863	-1,1465
2	0,1163	0,6931	-2,1516

$$L(W(x,t)) = L(W(x,0)) - k \cdot t$$

LC	C	n
-2,1956	0,1113	0,5758



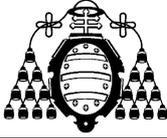


$$k = C \cdot x^n$$

$$Lk = LC + n \cdot Lx$$

$$W(x,t) = W(x,0) \cdot \exp(-C \cdot x^n \cdot t)$$

x\t	W(x,t) calculados				
	0	0,5	1	1,5	2
35	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
25	0,2000	0,1402	0,0983	0,0689	0,0483
18	0,4000	0,2981	0,2222	0,1656	0,1234
12	0,6000	0,4754	0,3767	0,2985	0,2365
10	0,8000	0,6488	0,5261	0,4267	0,3460
7	1,0000	0,8431	0,7109	0,5994	0,5053
6	1,0000	0,8554	0,7318	0,6260	0,5355
4	1,0000	0,8837	0,7809	0,6901	0,6099
2	1,0000	0,9204	0,8471	0,7797	0,7177



4.2.2.- Carbón.

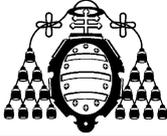
Las muestras de carbón utilizadas han sido obtenidas del Laboratorio de Mineralurgia de la Escuela Politécnica de Mieres. Obteniéndose los siguientes resultados:

CARBÓN

DATOS DE ENTRADA					
Intervalo	Alimentación	0,5 min	1 min	1,5 min	2 min
35	138,90	115,20	89,00	63,00	45,00
25	138,90	179,40	179,70	161,00	111,20
18	138,90	179,60	182,50	174,00	162,50
12	138,90	98,50	109,60	119,60	159,60
10	138,90	33,50	36,50	45,60	49,10
7	0,00	42,60	39,80	48,10	62,10
6	0,00	19,50	23,20	37,70	43,90
4	0,00	14,50	19,80	27,60	33,60
2	0,00	8,60	9,90	12,50	19,00
< 2	0,00	2,90	4,20	5,00	7,20
	694,50	694,30	694,20	694,10	693,20

Intervalo	Peso fracción (tanto por uno)				
	Alimentación	0,5 min	1 min	1,5 min	2 min
35	0,2000	0,1659	0,1282	0,0908	0,0649
25	0,2000	0,2584	0,2589	0,2320	0,1604
18	0,2000	0,2587	0,2629	0,2507	0,2344
12	0,2000	0,1419	0,1579	0,1723	0,2302
10	0,2000	0,0483	0,0526	0,0657	0,0708
7	0,0000	0,0614	0,0573	0,0693	0,0896
6	0,0000	0,0281	0,0334	0,0543	0,0633
4	0,0000	0,0209	0,0285	0,0398	0,0485
2	0,0000	0,0124	0,0143	0,0180	0,0274
< 2	0,0000	0,0042	0,0061	0,0072	0,0104
	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000

Tamaño	Pasante Acumulado (%)				
	Alimentación	0,5 min	1 min	1,5 min	2 min
35	80,00%	83,41%	87,18%	90,92%	93,51%
25	60,00%	57,57%	61,29%	67,73%	77,47%

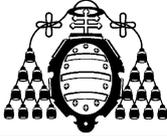


18	40,00%	31,70%	35,00%	42,66%	54,02%
12	20,00%	17,51%	19,22%	25,43%	31,00%
10	0,00%	12,69%	13,96%	18,86%	23,92%
7	0,00%	6,55%	8,23%	11,93%	14,96%
6	0,00%	3,74%	4,88%	6,50%	8,63%
4	0,00%	1,66%	2,03%	2,52%	3,78%
2	0,00%	0,42%	0,61%	0,72%	1,04%

LOG(Tamaño)	Alimentación	TENDENCIA	F80
1,5441	80,00%	1,5441	35,000
1,3979	60,00%		

Tamaño	Alimentación	Rechazo Acumulado (%)			
		0,5 min	1 min	1,5 min	2 min
35	20,00%	16,59%	12,82%	9,08%	6,49%
25	40,00%	42,43%	38,71%	32,27%	22,53%
18	60,00%	68,30%	65,00%	57,34%	45,98%
12	80,00%	82,49%	80,78%	74,57%	69,00%
10	100,00%	87,31%	86,04%	81,14%	76,08%
7	100,00%	93,45%	91,77%	88,07%	85,04%
6	100,00%	96,26%	95,12%	93,50%	91,37%
4	100,00%	98,34%	97,97%	97,48%	96,22%
2	100,00%	99,58%	99,39%	99,28%	98,96%

x/t	W(x,t)				
	0	0,5	1	1,5	2
35	0,2000	0,1659	0,1282	0,0908	0,0649
25	0,4000	0,4243	0,3871	0,3227	0,2253
18	0,6000	0,6830	0,6500	0,5734	0,4598
12	0,8000	0,8249	0,8078	0,7457	0,6900
10	1,0000	0,8731	0,8604	0,8114	0,7608
7	1,0000	0,9345	0,9177	0,8807	0,8504
6	1,0000	0,9626	0,9512	0,9350	0,9137
4	1,0000	0,9834	0,9797	0,9748	0,9622
2	1,0000	0,9958	0,9939	0,9928	0,9896



x/t	L(W(x,t))				
	0	0,5	1	1,5	2
35	-1,6094	-1,7962	-2,0541	-2,3995	-2,7347
25	-0,9163	-0,8573	-0,9492	-1,1310	-1,4902
18	-0,5108	-0,3813	-0,4308	-0,5562	-0,7771
12	-0,2231	-0,1925	-0,2134	-0,2934	-0,3711
10	0,0000	-0,1357	-0,1503	-0,2090	-0,2734
7	0,0000	-0,0678	-0,0858	-0,1270	-0,1620
6	0,0000	-0,0382	-0,0501	-0,0672	-0,0902
4	0,0000	-0,0167	-0,0205	-0,0255	-0,0385
2	0,0000	-0,0042	-0,0061	-0,0072	-0,0104

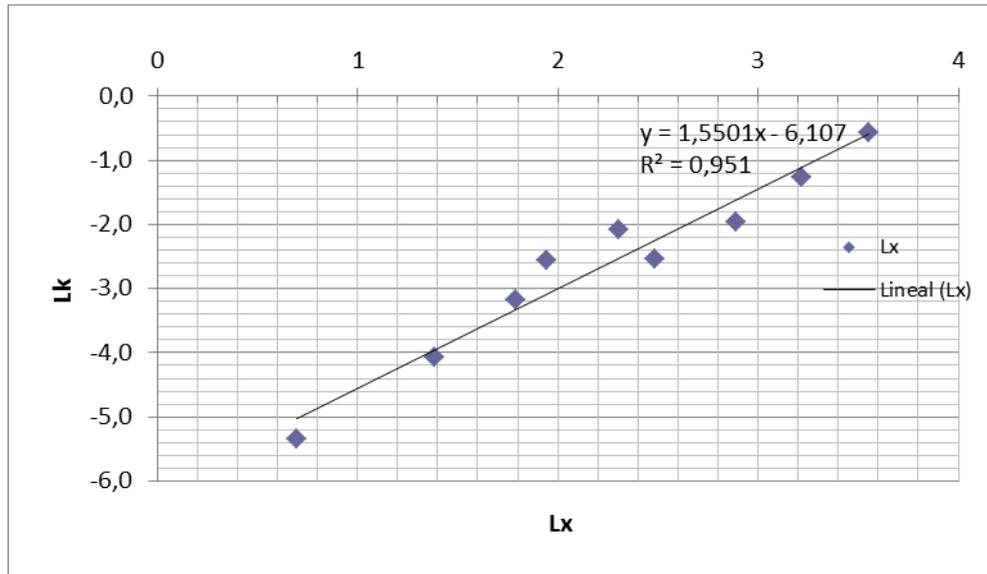
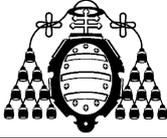
x/t	L(W(x,t)) - L(W(x,0))				
	0	0,5	1	1,5	2
35	0,0000	-0,1868	-0,4447	-0,7900	-1,1252
25	0,0000	0,0590	-0,0329	-0,2147	-0,5739
18	0,0000	0,1296	0,0800	-0,0453	-0,2662
12	0,0000	0,0306	0,0097	-0,0703	-0,1479
10	0,0000	-0,1357	-0,1503	-0,2090	-0,2734
7	0,0000	-0,0678	-0,0858	-0,1270	-0,1620
6	0,0000	-0,0382	-0,0501	-0,0672	-0,0902
4	0,0000	-0,0167	-0,0205	-0,0255	-0,0385
2	0,0000	-0,0042	-0,0061	-0,0072	-0,0104

(-k)
-0,5707
-0,2843
-0,1415
-0,0793
-0,1240
-0,0767
-0,0419
-0,0172
-0,0048

x	k	Lx	Lk
35	0,5707	3,5553	-0,5608
25	0,2843	3,2189	-1,2577
18	0,1415	2,8904	-1,9556
12	0,0793	2,4849	-2,5339
10	0,1240	2,3026	-2,0875
7	0,0767	1,9459	-2,5683
6	0,0419	1,7918	-3,1727
4	0,0172	1,3863	-4,0641
2	0,0048	0,6931	-5,3422

$$L(W(x,t)) = L(W(x,0)) - k \cdot t$$

LC	C	n
-6,1070	0,0022	1,5501

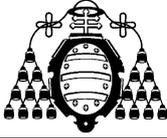


$$k = C \cdot x^n$$

$$Lk = LC + n \cdot Lx$$

$$W(x,t) = W(x,0) \cdot \exp(-C \cdot x^n \cdot t)$$

x/t	W(x,t) calculados				
	0	0,5	1	1,5	2
35	0,2000	0,1518	0,1153	0,0875	0,0664
25	0,4000	0,3396	0,2884	0,2449	0,2079
18	0,6000	0,5438	0,4929	0,4468	0,4049
12	0,8000	0,7591	0,7204	0,6836	0,6486
10	1,0000	0,9612	0,9240	0,8882	0,8538
7	1,0000	0,9775	0,9555	0,9341	0,9131
6	1,0000	0,9823	0,9648	0,9477	0,9309
4	1,0000	0,9905	0,9811	0,9718	0,9625
2	1,0000	0,9967	0,9935	0,9903	0,9870



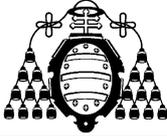
4.2.3.- Magnetita.

Las muestras de magnetita utilizadas han sido obtenidas del Laboratorio de Mineralurgia de la Escuela Politécnica de Mieres. Obteniéndose los siguientes resultados:

MAGNETITA

DATOS DE ENTRADA					
Intervalo	Alimentación	0,5 min	1 min	1,5 min	2 min
35	348,00	298,70	199,00	163,00	95,70
25	348,00	590,00	468,00	391,20	299,80
18	348,00	399,10	444,00	459,10	475,40
12	348,00	141,20	256,30	215,60	226,40
10	348,00	130,20	175,40	199,90	241,50
7	0,00	38,50	41,20	91,10	124,30
6	0,00	40,20	44,50	75,40	95,40
4	0,00	41,20	45,20	54,90	63,40
2	0,00	34,50	35,40	42,50	55,20
< 2	0,00	25,10	29,50	45,60	60,10
	1.740,00	1.738,70	1.738,50	1.738,30	1.737,20

Intervalo	Peso fracción (tanto por uno)				
	Alimentación	0,5 min	1 min	1,5 min	2 min
35	0,2000	0,1718	0,1145	0,0938	0,0551
25	0,2000	0,3393	0,2692	0,2250	0,1726
18	0,2000	0,2295	0,2554	0,2641	0,2737
12	0,2000	0,0812	0,1474	0,1240	0,1303
10	0,2000	0,0749	0,1009	0,1150	0,1390
7	0,0000	0,0221	0,0237	0,0524	0,0716
6	0,0000	0,0231	0,0256	0,0434	0,0549
4	0,0000	0,0237	0,0260	0,0316	0,0365
2	0,0000	0,0198	0,0204	0,0244	0,0318
< 2	0,0000	0,0144	0,0170	0,0262	0,0346
	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000

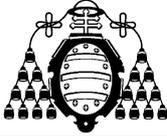


Tamaño	Pasante Acumulado (%)				
	Alimentación	0,5 min	1 min	1,5 min	2 min
35	80,00%	82,82%	88,55%	90,62%	94,49%
25	60,00%	48,89%	61,63%	68,12%	77,23%
18	40,00%	25,93%	36,09%	41,71%	49,87%
12	20,00%	17,81%	21,35%	29,30%	36,84%
10	0,00%	10,32%	11,26%	17,80%	22,93%
7	0,00%	8,11%	8,89%	12,56%	15,78%
6	0,00%	5,80%	6,33%	8,23%	10,29%
4	0,00%	3,43%	3,73%	5,07%	6,64%
2	0,00%	1,44%	1,70%	2,62%	3,46%

LOG(Tamaño)	Alimentación		TENDENCIA	F80
1,5441	80,00%		1,5441	35,000
1,3979	60,00%			

Tamaño	Rechazo Acumulado (%)				
	Alimentación	0,5 min	1 min	1,5 min	2 min
35	20,00%	17,18%	11,45%	9,38%	5,51%
25	40,00%	51,11%	38,37%	31,88%	22,77%
18	60,00%	74,07%	63,91%	58,29%	50,13%
12	80,00%	82,19%	78,65%	70,70%	63,16%
10	100,00%	89,68%	88,74%	82,20%	77,07%
7	100,00%	91,89%	91,11%	87,44%	84,22%
6	100,00%	94,20%	93,67%	91,77%	89,71%
4	100,00%	96,57%	96,27%	94,93%	93,36%
2	100,00%	98,56%	98,30%	97,38%	96,54%

x/t	W(x,t)				
	0	0,5	1	1,5	2
35	0,2000	0,1718	0,1145	0,0938	0,0551
25	0,4000	0,5111	0,3837	0,3188	0,2277
18	0,6000	0,7407	0,6391	0,5829	0,5013
12	0,8000	0,8219	0,7865	0,7070	0,6316
10	1,0000	0,8968	0,8874	0,8220	0,7707
7	1,0000	0,9189	0,9111	0,8744	0,8422
6	1,0000	0,9420	0,9367	0,9177	0,8971
4	1,0000	0,9657	0,9627	0,9493	0,9336
2	1,0000	0,9856	0,9830	0,9738	0,9654

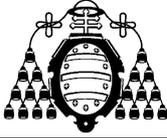


x\t	L(W(x,t))				
	0	0,5	1	1,5	2
35	-1,6094	-1,7615	-2,1675	-2,3669	-2,8988
25	-0,9163	-0,6711	-0,9580	-1,1431	-1,4799
18	-0,5108	-0,3002	-0,4478	-0,5397	-0,6905
12	-0,2231	-0,1962	-0,2402	-0,3468	-0,4594
10	0,0000	-0,1090	-0,1195	-0,1961	-0,2605
7	0,0000	-0,0846	-0,0931	-0,1343	-0,1717
6	0,0000	-0,0597	-0,0654	-0,0858	-0,1086
4	0,0000	-0,0349	-0,0380	-0,0520	-0,0687
2	0,0000	-0,0145	-0,0171	-0,0266	-0,0352

x\t	L(W(x,t)) - L(W(x,0))				
	0	0,5	1	1,5	2
35	0,0000	-0,1520	-0,5580	-0,7575	-1,2894
25	0,0000	0,2452	-0,0417	-0,2268	-0,5636
18	0,0000	0,2106	0,0631	-0,0289	-0,1797
12	0,0000	0,0270	-0,0170	-0,1236	-0,2363
10	0,0000	-0,1090	-0,1195	-0,1961	-0,2605
7	0,0000	-0,0846	-0,0931	-0,1343	-0,1717
6	0,0000	-0,0597	-0,0654	-0,0858	-0,1086
4	0,0000	-0,0349	-0,0380	-0,0520	-0,0687
2	0,0000	-0,0145	-0,0171	-0,0266	-0,0352

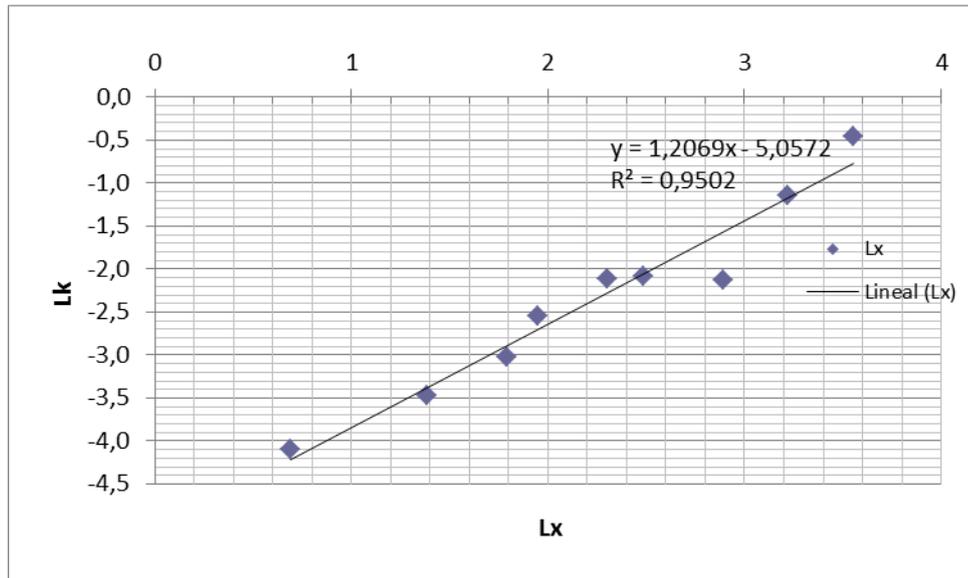
(-k)
-0,6368
-0,3198
-0,1198
-0,1246
-0,1216
-0,0786
-0,0486
-0,0309
-0,0165

x	k	Lx	Lk
35	0,6368	3,5553	-0,4512
25	0,3198	3,2189	-1,1399
18	0,1198	2,8904	-2,1222
12	0,1246	2,4849	-2,0824
10	0,1216	2,3026	-2,1068
7	0,0786	1,9459	-2,5431
6	0,0486	1,7918	-3,0232
4	0,0309	1,3863	-3,4771
2	0,0165	0,6931	-4,1049



$$L(W(x,t)) = L(W(x,0)) - k \cdot t$$

LC	C	n
-5,0572	0,0064	1,2069

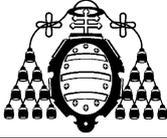


$$k = C \cdot x^n$$

$$Lk = LC + n \cdot Lx$$

$$W(x,t) = W(x,0) \cdot \exp(-C \cdot x^n \cdot t)$$

x\t	W(x,t) calculados				
	0	0,5	1	1,5	2
35	0,2000	0,1585	0,1256	0,0996	0,0789
25	0,4000	0,3426	0,2935	0,2514	0,2153
18	0,6000	0,5406	0,4872	0,4390	0,3956
12	0,8000	0,7505	0,7041	0,6605	0,6197
10	1,0000	0,9501	0,9026	0,8575	0,8147
7	1,0000	0,9672	0,9355	0,9049	0,8752
6	1,0000	0,9727	0,9462	0,9204	0,8953
4	1,0000	0,9832	0,9667	0,9504	0,9344
2	1,0000	0,9927	0,9854	0,9782	0,9710



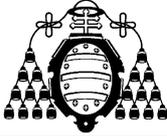
4.2.4.- Scheelita.

Las muestras de scheelita utilizadas han sido obtenidas del Laboratorio de Mineralurgia de la Escuela Politécnica de Mieres. Obteniéndose los siguientes resultados:

SCHEELITA

DATOS DE ENTRADA					
Intervalo	Alimentación	0,5 min	1 min	1,5 min	2 min
35	235,0	36,5	41,2	48,8	55,7
25	235,0	37,4	49,5	55,4	65,5
18	235,0	40,2	58,6	66,4	79,4
12	235,0	50,9	59,4	67,5	81,5
10	235,0	55,4	65,4	79,4	86,3
7	0,0	62,5	77,8	92,1	105,2
6	0,0	88,7	99,9	102,5	112,0
4	0,0	91,2	100,0	108,5	120,9
2	0,0	99,5	112,4	122,3	148,0
< 2	0,0	612,0	510,0	431,0	319,0
	1.175,00	1.174,30	1.174,20	1.173,90	1.173,50

Intervalo	Peso fracción (tanto por uno)				
	Alimentación	0,5 min	1 min	1,5 min	2 min
35	0,2000	0,0311	0,0351	0,0416	0,0475
25	0,2000	0,0318	0,0422	0,0472	0,0558
18	0,2000	0,0342	0,0499	0,0566	0,0677
12	0,2000	0,0433	0,0506	0,0575	0,0695
10	0,2000	0,0472	0,0557	0,0676	0,0735
7	0,0000	0,0532	0,0663	0,0785	0,0896
6	0,0000	0,0755	0,0851	0,0873	0,0954
4	0,0000	0,0777	0,0852	0,0924	0,1030
2	0,0000	0,0847	0,0957	0,1042	0,1261
< 2	0,0000	0,5212	0,4343	0,3672	0,2718
	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000

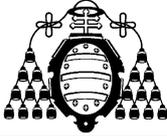


Tamaño	Pasante Acumulado (%)				
	Alimentación	0,5 min	1 min	1,5 min	2 min
35	80,00%	96,89%	96,49%	95,84%	95,25%
25	60,00%	93,71%	92,28%	91,12%	89,67%
18	40,00%	90,28%	87,28%	85,47%	82,91%
12	20,00%	85,95%	82,23%	79,72%	75,96%
10	0,00%	81,23%	76,66%	72,95%	68,61%
7	0,00%	75,91%	70,03%	65,11%	59,64%
6	0,00%	68,36%	61,52%	56,38%	50,10%
4	0,00%	60,59%	53,01%	47,13%	39,80%
2	0,00%	52,12%	43,43%	36,72%	27,18%

LOG(Tamaño)	Alimentación	TENDENCIA	F80
1,5441	80,00%	1,5441	35,000
1,3979	60,00%		

Tamaño	Rechazo Acumulado (%)				
	Alimentación	0,5 min	1 min	1,5 min	2 min
35	20,00%	3,11%	3,51%	4,16%	4,75%
25	40,00%	6,29%	7,72%	8,88%	10,33%
18	60,00%	9,72%	12,72%	14,53%	17,09%
12	80,00%	14,05%	17,77%	20,28%	24,04%
10	100,00%	18,77%	23,34%	27,05%	31,39%
7	100,00%	24,09%	29,97%	34,89%	40,36%
6	100,00%	31,64%	38,48%	43,62%	49,90%
4	100,00%	39,41%	46,99%	52,87%	60,20%
2	100,00%	47,88%	56,57%	63,28%	72,82%

x/t	W(x,t)				
	0	0,5	1	1,5	2
35	0,2000	0,0311	0,0351	0,0416	0,0475
25	0,4000	0,0629	0,0772	0,0888	0,1033
18	0,6000	0,0972	0,1272	0,1453	0,1709
12	0,8000	0,1405	0,1777	0,2028	0,2404
10	1,0000	0,1877	0,2334	0,2705	0,3139
7	1,0000	0,2409	0,2997	0,3489	0,4036
6	1,0000	0,3164	0,3848	0,4362	0,4990
4	1,0000	0,3941	0,4699	0,5287	0,6020
2	1,0000	0,4788	0,5657	0,6328	0,7282



x\t	L(W(x,t))				
	0	0,5	1	1,5	2
35	-1,6094	-3,4711	-3,3499	-3,1804	-3,0478
25	-0,9163	-2,7657	-2,5608	-2,4218	-2,2703
18	-0,5108	-2,3314	-2,0624	-1,9288	-1,7664
12	-0,2231	-1,9625	-1,7274	-1,5954	-1,4255
10	0,0000	-1,6730	-1,4548	-1,3076	-1,1586
7	0,0000	-1,4233	-1,2050	-1,0529	-0,9074
6	0,0000	-1,1506	-0,9551	-0,8296	-0,6951
4	0,0000	-0,9311	-0,7552	-0,6374	-0,5074
2	0,0000	-0,7364	-0,5698	-0,4575	-0,3172

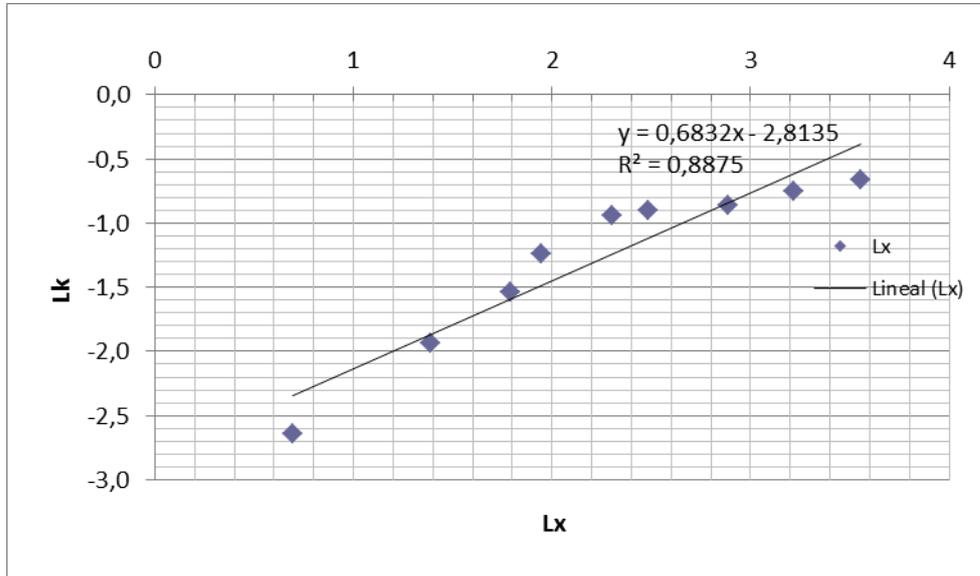
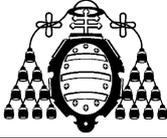
x\t	L(W(x,t)) - L(W(x,0))				
	0	0,5	1	1,5	2
35	0,0000	-1,8617	-1,7405	-1,5709	-1,4383
25	0,0000	-1,8494	-1,6445	-1,5055	-1,3540
18	0,0000	-1,8205	-1,5516	-1,4179	-1,2556
12	0,0000	-1,7393	-1,5043	-1,3723	-1,2023
10	0,0000	-1,6730	-1,4548	-1,3076	-1,1586
7	0,0000	-1,4233	-1,2050	-1,0529	-0,9074
6	0,0000	-1,1506	-0,9551	-0,8296	-0,6951
4	0,0000	-0,9311	-0,7552	-0,6374	-0,5074
2	0,0000	-0,7364	-0,5698	-0,4575	-0,3172

(-k)
-0,5172
-0,4728
-0,4217
-0,4075
-0,3904
-0,2889
-0,2138
-0,1442
-0,0711

x	k	Lx	Lk
35	0,5172	3,5553	-0,6594
25	0,4728	3,2189	-0,7490
18	0,4217	2,8904	-0,8634
12	0,4075	2,4849	-0,8977
10	0,3904	2,3026	-0,9407
7	0,2889	1,9459	-1,2418
6	0,2138	1,7918	-1,5426
4	0,1442	1,3863	-1,9364
2	0,0711	0,6931	-2,6434

$$L(W(x,t)) = L(W(x,0)) - k \cdot t$$

LC	C	n
-2,8135	0,0600	0,6832

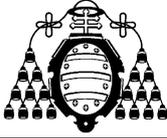


$$k = C \cdot x^n$$

$$Lk = LC + n \cdot Lx$$

$$W(x,t) = W(x,0) \cdot \exp(-C \cdot x^n \cdot t)$$

x\t	W(x,t) calculados				
	0	0,5	1	1,5	2
35	0,2000	0,1423	0,1013	0,0720	0,0513
25	0,4000	0,3052	0,2329	0,1777	0,1356
18	0,6000	0,4834	0,3895	0,3138	0,2528
12	0,8000	0,6791	0,5765	0,4894	0,4155
10	1,0000	0,8653	0,7488	0,6480	0,5607
7	1,0000	0,8928	0,7972	0,7117	0,6355
6	1,0000	0,9030	0,8154	0,7363	0,6649
4	1,0000	0,9256	0,8567	0,7929	0,7339
2	1,0000	0,9530	0,9082	0,8655	0,8248



4.2.5.- Sílice.

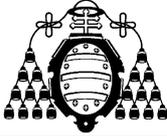
Las muestras de sílice utilizadas han sido obtenidas del Laboratorio de Mineralurgia de la Escuela Politécnica de Mieres. Obteniéndose los siguientes resultados:

SÍLICE

DATOS DE ENTRADA					
Intervalo	Alimentación	0,5 min	1 min	1,5 min	2 min
35	229,00	142,00	120,00	95,40	67,00
25	229,00	407,00	400,00	294,50	212,40
18	229,00	403,00	384,90	399,50	425,60
12	229,00	119,50	129,20	192,80	222,90
10	229,00	22,00	33,50	40,10	47,20
7	0,00	20,00	26,50	45,30	68,70
6	0,00	9,30	18,90	33,60	39,90
4	0,00	12,60	19,70	25,60	36,10
2	0,00	7,10	9,10	14,20	19,60
< 2	0,00	1,20	1,70	2,10	3,60
	1.145,00	1.143,70	1.143,50	1.143,10	1.143,00

Peso fracción (tanto por uno)					
Intervalo	Alimentación	0,5 min	1 min	1,5 min	2 min
35	0,2000	0,1242	0,1049	0,0835	0,0586
25	0,2000	0,3559	0,3498	0,2576	0,1858
18	0,2000	0,3524	0,3366	0,3495	0,3724
12	0,2000	0,1045	0,1130	0,1687	0,1950
10	0,2000	0,0192	0,0293	0,0351	0,0413
7	0,0000	0,0175	0,0232	0,0396	0,0601
6	0,0000	0,0081	0,0165	0,0294	0,0349
4	0,0000	0,0110	0,0172	0,0224	0,0316
2	0,0000	0,0062	0,0080	0,0124	0,0171
< 2	0,0000	0,0010	0,0015	0,0018	0,0031
	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000

Pasante Acumulado (%)					
Tamaño	Alimentación	0,5 min	1 min	1,5 min	2 min
35	80,00%	87,58%	89,51%	91,65%	94,14%



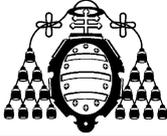
25	60,00%	52,00%	54,53%	65,89%	75,56%
18	40,00%	16,76%	20,87%	30,94%	38,32%
12	20,00%	6,31%	9,57%	14,08%	18,82%
10	0,00%	4,39%	6,64%	10,57%	14,69%
7	0,00%	2,64%	4,32%	6,60%	8,68%
6	0,00%	1,83%	2,67%	3,67%	5,19%
4	0,00%	0,73%	0,94%	1,43%	2,03%
2	0,00%	0,10%	0,15%	0,18%	0,31%

LOG(Tamaño)	Alimentación	TENDENCIA	F80
1,5441	80,00%	1,5441	35,000
1,3979	60,00%		

Tamaño	Alimentación	Rechazo Acumulado (%)			
		0,5 min	1 min	1,5 min	2 min
35	20,00%	12,42%	10,49%	8,35%	5,86%
25	40,00%	48,00%	45,47%	34,11%	24,44%
18	60,00%	83,24%	79,13%	69,06%	61,68%
12	80,00%	93,69%	90,43%	85,92%	81,18%
10	100,00%	95,61%	93,36%	89,43%	85,31%
7	100,00%	97,36%	95,68%	93,40%	91,32%
6	100,00%	98,17%	97,33%	96,33%	94,81%
4	100,00%	99,27%	99,06%	98,57%	97,97%
2	100,00%	99,90%	99,85%	99,82%	99,69%

x\t	W(x,t)				
	0	0,5	1	1,5	2
35	0,2000	0,1242	0,1049	0,0835	0,0586
25	0,4000	0,4800	0,4547	0,3411	0,2444
18	0,6000	0,8324	0,7913	0,6906	0,6168
12	0,8000	0,9369	0,9043	0,8592	0,8118
10	1,0000	0,9561	0,9336	0,8943	0,8531
7	1,0000	0,9736	0,9568	0,9340	0,9132
6	1,0000	0,9817	0,9733	0,9633	0,9481
4	1,0000	0,9927	0,9906	0,9857	0,9797
2	1,0000	0,9990	0,9985	0,9982	0,9969

x\t	L(W(x,t))				
	0	0,5	1	1,5	2
35	-1,6094	-2,0862	-2,2544	-2,4834	-2,8367



25	-0,9163	-0,7339	-0,7880	-1,0756	-1,4088
18	-0,5108	-0,1835	-0,2340	-0,3702	-0,4832
12	-0,2231	-0,0652	-0,1006	-0,1517	-0,2085
10	0,0000	-0,0449	-0,0687	-0,1117	-0,1589
7	0,0000	-0,0268	-0,0442	-0,0683	-0,0908
6	0,0000	-0,0184	-0,0270	-0,0373	-0,0533
4	0,0000	-0,0073	-0,0095	-0,0144	-0,0205
2	0,0000	-0,0010	-0,0015	-0,0018	-0,0032

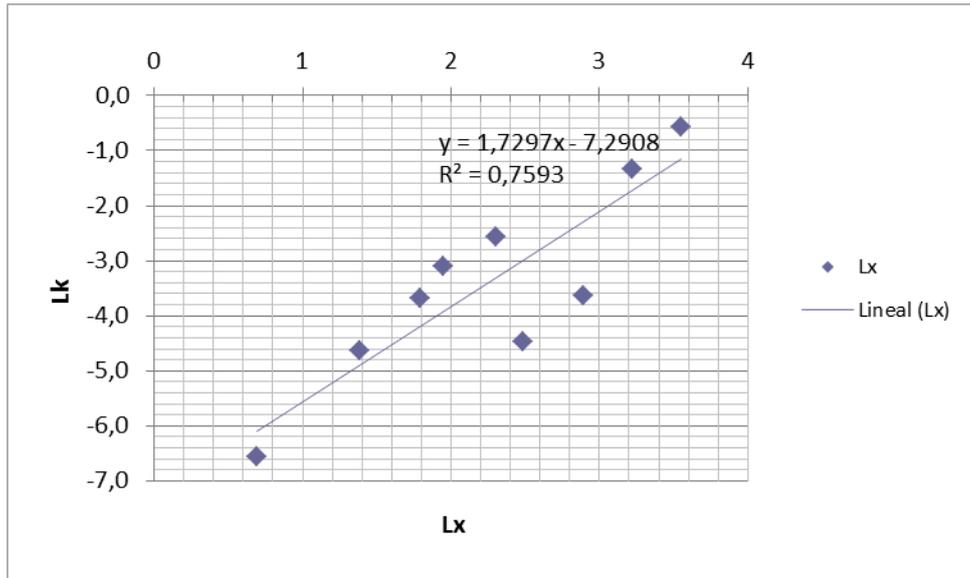
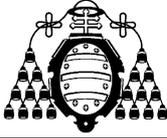
x\t	L(W(x,t)) - L(W(x,0))				
	0	0,5	1	1,5	2
35	0,0000	-0,4768	-0,6449	-0,8740	-1,2273
25	0,0000	0,1824	0,1283	-0,1593	-0,4925
18	0,0000	0,3274	0,2768	0,1406	0,0276
12	0,0000	0,1579	0,1226	0,0714	0,0147
10	0,0000	-0,0449	-0,0687	-0,1117	-0,1589
7	0,0000	-0,0268	-0,0442	-0,0683	-0,0908
6	0,0000	-0,0184	-0,0270	-0,0373	-0,0533
4	0,0000	-0,0073	-0,0095	-0,0144	-0,0205
2	0,0000	-0,0010	-0,0015	-0,0018	-0,0032

(-k)
-0,5704
-0,2653
-0,0263
-0,0114
-0,0769
-0,0446
-0,0251
-0,0096
-0,0014

x	k	Lx	Lk
35	0,5704	3,5553	-0,5615
25	0,2653	3,2189	-1,3268
18	0,0263	2,8904	-3,6379
12	0,0114	2,4849	-4,4709
10	0,0769	2,3026	-2,5651
7	0,0446	1,9459	-3,1094
6	0,0251	1,7918	-3,6853
4	0,0096	1,3863	-4,6441
2	0,0014	0,6931	-6,5574

$$L(W(x,t)) = L(W(x,0)) - k \cdot t$$

LC	C	n
-7,2908	0,0007	1,7297

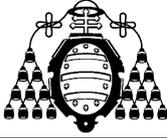


$$k = C \cdot x^n$$

$$Lk = LC + n \cdot Lx$$

$$W(x,t) = W(x,0) \cdot \exp(-C \cdot x^n \cdot t)$$

x/t	W(x,t) calculados				
	0	0,5	1	1,5	2
35	0,2000	0,1705	0,1453	0,1239	0,1056
25	0,4000	0,3658	0,3346	0,3060	0,2799
18	0,6000	0,5704	0,5423	0,5156	0,4901
12	0,8000	0,7802	0,7609	0,7420	0,7237
10	1,0000	0,9819	0,9641	0,9466	0,9294
7	1,0000	0,9902	0,9805	0,9708	0,9613
6	1,0000	0,9925	0,9850	0,9776	0,9702
4	1,0000	0,9963	0,9925	0,9888	0,9851
2	1,0000	0,9989	0,9977	0,9966	0,9955



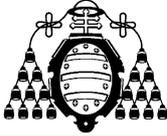
4.2.6.- Zeolita.

Las muestras de zeolita utilizadas han sido obtenidas del Laboratorio de Mineralurgia de la Escuela Politécnica de Mieres. Obteniéndose los siguientes resultados:

ZEOLITA

DATOS DE ENTRADA					
Intervalo	Alimentación	0,5 min	1 min	1,5 min	2 min
35	148,00	169,00	102,00	81,00	55,80
25	148,00	175,90	171,40	165,00	99,80
18	148,00	181,20	206,40	213,00	183,50
12	148,00	89,50	121,40	112,80	181,30
10	148,00	41,20	35,60	43,50	59,50
7	0,00	35,50	39,40	46,90	55,40
6	0,00	18,80	28,50	31,20	42,60
4	0,00	16,90	21,40	30,00	37,70
2	0,00	8,90	10,20	12,50	19,20
< 2	0,00	2,90	3,40	3,60	4,50
	740,00	739,80	739,70	739,50	739,30

Intervalo	Peso fracción (tanto por uno)				
	Alimentación	0,5 min	1 min	1,5 min	2 min
35	0,2000	0,2284	0,1379	0,1095	0,0755
25	0,2000	0,2378	0,2317	0,2231	0,1350
18	0,2000	0,2449	0,2790	0,2880	0,2482
12	0,2000	0,1210	0,1641	0,1525	0,2452
10	0,2000	0,0557	0,0481	0,0588	0,0805
7	0,0000	0,0480	0,0533	0,0634	0,0749
6	0,0000	0,0254	0,0385	0,0422	0,0576
4	0,0000	0,0228	0,0289	0,0406	0,0510
2	0,0000	0,0120	0,0138	0,0169	0,0260
< 2	0,0000	0,0039	0,0046	0,0049	0,0061
	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000

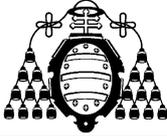


Tamaño	Pasante Acumulado (%)				
	Alimentación	0,5 min	1 min	1,5 min	2 min
35	80,00%	77,16%	86,21%	89,05%	92,45%
25	60,00%	53,38%	63,04%	66,73%	78,95%
18	40,00%	28,89%	35,14%	37,93%	54,13%
12	20,00%	16,79%	18,72%	22,68%	29,61%
10	0,00%	11,22%	13,91%	16,80%	21,56%
7	0,00%	6,42%	8,58%	10,45%	14,07%
6	0,00%	3,88%	4,73%	6,23%	8,31%
4	0,00%	1,60%	1,84%	2,18%	3,21%
2	0,00%	0,39%	0,46%	0,49%	0,61%

LOG(Tamaño)	Alimentación		TENDENCIA	F80
1,5441	80,00%		1,5441	35,000
1,3979	60,00%			

Tamaño	Rechazo Acumulado (%)				
	Alimentación	0,5 min	1 min	1,5 min	2 min
35	20,00%	22,84%	13,79%	10,95%	7,55%
25	40,00%	46,62%	36,96%	33,27%	21,05%
18	60,00%	71,11%	64,86%	62,07%	45,87%
12	80,00%	83,21%	81,28%	77,32%	70,39%
10	100,00%	88,78%	86,09%	83,20%	78,44%
7	100,00%	93,58%	91,42%	89,55%	85,93%
6	100,00%	96,12%	95,27%	93,77%	91,69%
4	100,00%	98,40%	98,16%	97,82%	96,79%
2	100,00%	99,61%	99,54%	99,51%	99,39%

x/t	W(x,t)				
	0	0,5	1	1,5	2
35	0,2000	0,2284	0,1379	0,1095	0,0755
25	0,4000	0,4662	0,3696	0,3327	0,2105
18	0,6000	0,7111	0,6486	0,6207	0,4587
12	0,8000	0,8321	0,8128	0,7732	0,7039
10	1,0000	0,8878	0,8609	0,8320	0,7844
7	1,0000	0,9358	0,9142	0,8955	0,8593
6	1,0000	0,9612	0,9527	0,9377	0,9169
4	1,0000	0,9840	0,9816	0,9782	0,9679
2	1,0000	0,9961	0,9954	0,9951	0,9939

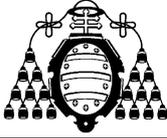


x/t	L(W(x,t))				
	0	0,5	1	1,5	2
35	-1,6094	-1,4765	-1,9813	-2,2115	-2,5839
25	-0,9163	-0,7631	-0,9953	-1,1006	-1,5584
18	-0,5108	-0,3409	-0,4329	-0,4769	-0,7794
12	-0,2231	-0,1838	-0,2073	-0,2572	-0,3511
10	0,0000	-0,1190	-0,1498	-0,1839	-0,2428
7	0,0000	-0,0664	-0,0898	-0,1104	-0,1516
6	0,0000	-0,0396	-0,0485	-0,0644	-0,0867
4	0,0000	-0,0161	-0,0186	-0,0220	-0,0326
2	0,0000	-0,0039	-0,0046	-0,0049	-0,0061

x/t	L(W(x,t)) - L(W(x,0))				
	0	0,5	1	1,5	2
35	0,0000	0,1330	-0,3718	-0,6021	-0,9745
25	0,0000	0,1532	-0,0790	-0,1844	-0,6421
18	0,0000	0,1699	0,0780	0,0339	-0,2686
12	0,0000	0,0394	0,0158	-0,0340	-0,1280
10	0,0000	-0,1190	-0,1498	-0,1839	-0,2428
7	0,0000	-0,0664	-0,0898	-0,1104	-0,1516
6	0,0000	-0,0396	-0,0485	-0,0644	-0,0867
4	0,0000	-0,0161	-0,0186	-0,0220	-0,0326
2	0,0000	-0,0039	-0,0046	-0,0049	-0,0061

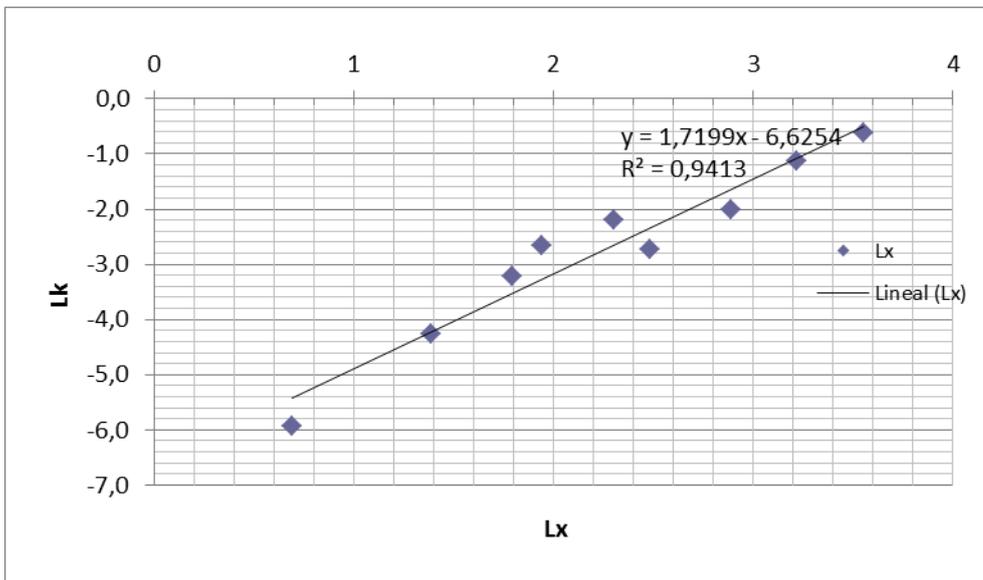
(-k)
-0,5368
-0,3244
-0,1346
-0,0659
-0,1101
-0,0695
-0,0396
-0,0142
-0,0026

x	k	Lx	Lk
35	0,5368	3,5553	-0,6221
25	0,3244	3,2189	-1,1259
18	0,1346	2,8904	-2,0051
12	0,0659	2,4849	-2,7201
10	0,1101	2,3026	-2,2063
7	0,0695	1,9459	-2,6671
6	0,0396	1,7918	-3,2279
4	0,0142	1,3863	-4,2531
2	0,0026	0,6931	-5,9398



$$L(W(x,t)) = L(W(x,0)) - k \cdot t$$

LC	C	n
-6,6254	0,0013	1,7199

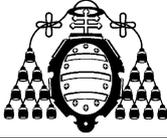


$$k = C \cdot x^n$$

$$L_k = LC + n \cdot L_x$$

$$W(x,t) = W(x,0) \cdot \exp(-C \cdot x^n \cdot t)$$

x/t	W(x,t) calculados				
	0	0,5	1	1,5	2
35	0,2000	0,1482	0,1097	0,0813	0,0602
25	0,4000	0,3381	0,2857	0,2415	0,2041
18	0,6000	0,5453	0,4956	0,4504	0,4093
12	0,8000	0,7628	0,7273	0,6935	0,6613
10	1,0000	0,9658	0,9328	0,9009	0,8701
7	1,0000	0,9813	0,9630	0,9450	0,9274
6	1,0000	0,9857	0,9715	0,9576	0,9438
4	1,0000	0,9928	0,9857	0,9786	0,9716
2	1,0000	0,9978	0,9956	0,9935	0,9913



4.3.- ENSAYOS DE LABORATORIO.

Los ensayos realizados consistieron en preparar muestras representativas: tamizarlas, pesarlas y de las que se obtuvieron sus respectivas granulometrías.

Como alimentación inicial se tomaron 700 cm³ de material, que suponen un peso diferente según la especie mineral que se ensayó. Para simular la operación en circuito cerrado con un 250% de carga circulante, será necesario después de la molienda, la obtención de un peso de finos (denominado peso ideal de finos) que se obtiene de la fórmula de:

Peso ideal de finos = Peso en gramos del material / 3,5

Inicialmente asignamos un número arbitrario de revoluciones, en nuestro caso 100.

Finalmente se calcula el índice de molturabilidad, según la fórmula de:

$$Gbp = \frac{\text{Finos netos}}{n^{\circ} \text{ revoluciones}}$$

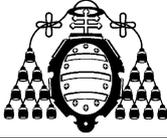
El pasante se retira, empaqueta y etiqueta adecuadamente. El rechazo retorna al molino, al cual se le añade alimentación fresca hasta reconstituir la carga inicial.

El rechazo de la operación anterior más la alimentación fresca adicionada, componen la alimentación del segundo ciclo. El número de revoluciones de esta etapa se calcula como el cociente entre el peso ideal de finos menos los finos añadidos en la carga fresca, y el valor del Gbp del ciclo anterior.

Nuevamente el pasante se retira, empaqueta y etiqueta adecuadamente. El rechazo retorna al molino, al cual se le añade alimentación fresca hasta reconstituir la carga inicial. Así realizaremos hasta seis ciclos, al finalizar el índice de molturabilidad lo calculamos como la media entre los tres últimos ciclos.

Y el índice de trabajo del material, (para molienda en molinos de bolas), lo calculamos mediante la siguiente fórmula propuesta por Fred Bond:

$$w_i = \frac{44,5}{P_{100}^{0,23} \cdot Gbp^{0,82} \cdot \left(\frac{10}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{10}{\sqrt{F_{80}}} \right)} \text{ (kWh/ sht)}$$



4.4.- APLICACIÓN DE LOS MODELOS DE REPRESENTACIÓN PARA LA OBTENCIÓN DE F_{80} Y P_{80} .

Para obtener el parámetro F_{80} (en la representación Cartesiana-Cartesiana), tomamos los dos puntos entre los que se encuentra el 80% de pasante acumulado de la granulometría inicial del material y con esos valores calculamos la ecuación de la recta que pasa por dichos puntos según las siguientes fórmulas:

$$y = a x + b$$

$$\% \text{ Pasante Ac.} = a * \text{Tamaño} + b$$

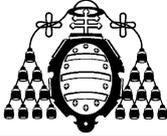
Sustituyendo el % de pasante acumulado por 80, se obtiene finalmente el valor de F_{80}

De un modo análogo obtendríamos el valor de P_{80}

4.5.- ÍNDICES DE BOND OBTENIDOS.

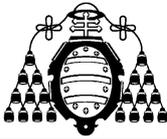
Una vez que tenemos los datos de F_{80} , P_{80} , tamaño de corte e índice de molturabilidad calculamos los índices de Bond.

MATERIAL	Nº de ensayo	P_{100}	Gbp	F_{80}	P_{80}	Wi (kWh/t)
CALIZA	1	60	0,02	25	1	53,64
CALIZA	2	60	0,04	25	2	47,93
CALIZA	3	60	0,06	25	3	46,19
CALIZA	4	60	0,08	25	4	45,89
CALIZA	5	60	0,12	25	5	39,94
CALIZA	6	60	0,20	25	6	31,19
CALIZA	7	60	0,30	25	7	26,17
CALIZA	8	60	0,40	25	8	23,96
CALIZA	9	60	0,50	25	9	22,98
CALIZA	10	60	0,60	25	10	22,70
CALIZA	11	60	0,90	25	11	18,64
CALIZA	12	60	1,10	25	12	18,10
CALIZA	13	60	1,40	25	13	17,03
CALIZA	14	60	1,70	25	14	16,70
CALIZA	15	60	2,10	25	15	16,23
CALIZA	16	60	2,60	25	16	15,85
CALIZA	17	60	3,20	25	17	15,72
CALIZA	18	60	4,00	25	18	15,60
CALIZA	19	60	5,40	25	19	14,80
CALIZA	20	60	7,70	25	20	13,79



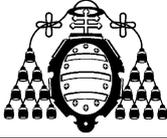
MATERIAL	Nº de ensayo	P ₁₀₀	Gbp	F ₈₀	P ₈₀	Wi (kWh/t)
CARBÓN	1	90	0,03	25	1	35,04
CARBÓN	2	90	0,06	25	2	31,31
CARBÓN	3	90	0,09	25	3	30,18
CARBÓN	4	90	0,13	25	4	28,08
CARBÓN	5	90	0,17	25	5	27,34
CARBÓN	6	90	0,22	25	6	26,27
CARBÓN	7	90	0,30	25	7	23,84
CARBÓN	8	90	0,40	25	8	21,82
CARBÓN	9	90	0,50	25	9	20,93
CARBÓN	10	90	0,60	25	10	20,68
CARBÓN	11	90	0,80	25	11	18,70
CARBÓN	12	90	1,10	25	12	16,49
CARBÓN	13	90	1,40	25	13	15,51
CARBÓN	14	90	1,80	25	14	14,51
CARBÓN	15	90	2,20	25	15	14,23
CARBÓN	16	90	2,80	25	16	13,59
CARBÓN	17	90	3,50	25	17	13,30
CARBÓN	18	90	4,80	25	18	12,23
CARBÓN	19	90	6,60	25	19	11,44
CARBÓN	20	90	8,80	25	20	11,26

MATERIAL	Nº de ensayo	P ₁₀₀	Gbp	F ₈₀	P ₈₀	Wi (kWh/t)
MAGNETITA	1	70	0,02	25	1	51,77
MAGNETITA	2	70	0,04	25	2	46,26
MAGNETITA	3	70	0,08	25	3	35,21
MAGNETITA	4	70	0,11	25	4	34,11
MAGNETITA	5	70	0,14	25	5	33,97
MAGNETITA	6	70	0,20	25	6	30,10
MAGNETITA	7	70	0,26	25	7	28,40
MAGNETITA	8	70	0,32	25	8	27,77
MAGNETITA	9	70	0,40	25	9	26,63
MAGNETITA	10	70	0,48	25	10	26,31
MAGNETITA	11	70	0,90	25	11	17,99

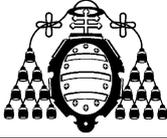


MAGNETITA	12	70	1,10	25	12	17,47
MAGNETITA	13	70	1,40	25	13	16,43
MAGNETITA	14	70	1,70	25	14	16,12
MAGNETITA	15	70	2,10	25	15	15,66
MAGNETITA	16	70	2,60	25	16	15,30
MAGNETITA	17	70	3,20	25	17	15,17
MAGNETITA	18	70	4,00	25	18	15,05
MAGNETITA	19	70	5,40	25	19	14,28
MAGNETITA	20	70	7,70	25	20	13,31

MATERIAL	Nº de ensayo	P₁₀₀	G_{bp}	F₈₀	P₈₀	Wi (kWh/t)
SCHEELITA	1	100	0,02	25	1	47,69
SCHEELITA	2	100	0,05	25	2	35,49
SCHEELITA	3	100	0,10	25	3	27,02
SCHEELITA	4	100	0,14	25	4	25,79
SCHEELITA	5	100	0,20	25	5	23,36
SCHEELITA	6	100	0,30	25	6	19,89
SCHEELITA	7	100	0,40	25	7	18,38
SCHEELITA	8	100	0,50	25	8	17,74
SCHEELITA	9	100	0,80	25	9	13,90
SCHEELITA	10	100	1,00	25	10	13,28
SCHEELITA	11	100	1,40	25	11	11,54
SCHEELITA	12	100	1,90	25	12	10,28
SCHEELITA	13	100	2,50	25	13	9,41
SCHEELITA	14	100	3,00	25	14	9,32
SCHEELITA	15	100	3,60	25	15	9,27
SCHEELITA	16	100	4,40	25	16	9,16
SCHEELITA	17	100	5,50	25	17	8,96
SCHEELITA	18	100	7,00	25	18	8,76
SCHEELITA	19	100	9,00	25	19	8,66
SCHEELITA	20	100	12,00	25	20	8,52



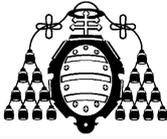
MATERIAL	Nº de ensayo	P ₁₀₀	G _{bp}	F ₈₀	P ₈₀	Wi (kWh/t)
SÍLICE	1	80	0,02	25	1	50,20
SÍLICE	2	80	0,04	25	2	44,86
SÍLICE	3	80	0,08	25	3	34,15
SÍLICE	4	80	0,12	25	4	30,80
SÍLICE	5	80	0,16	25	5	29,53
SÍLICE	6	80	0,20	25	6	29,19
SÍLICE	7	80	0,26	25	7	27,54
SÍLICE	8	80	0,32	25	8	26,93
SÍLICE	9	80	0,40	25	9	25,82
SÍLICE	10	80	0,52	25	10	23,89
SÍLICE	11	80	0,70	25	11	21,44
SÍLICE	12	80	0,90	25	12	19,97
SÍLICE	13	80	1,20	25	13	18,08
SÍLICE	14	80	1,60	25	14	16,43
SÍLICE	15	80	2,10	25	15	15,19
SÍLICE	16	80	2,60	25	16	14,84
SÍLICE	17	80	3,50	25	17	13,67
SÍLICE	18	80	4,50	25	18	13,25
SÍLICE	19	80	6,00	25	19	12,71
SÍLICE	20	80	8,00	25	20	12,50



MATERIAL	Nº de ensayo	P ₁₀₀	G _{bp}	F ₈₀	P ₈₀	Wi (kWh/t)
ZEOLITA	1	50	0,05	25	1	26,38
ZEOLITA	2	50	0,10	25	2	23,58
ZEOLITA	3	50	0,20	25	3	17,95
ZEOLITA	4	50	0,30	25	4	16,19
ZEOLITA	5	50	0,40	25	5	15,52
ZEOLITA	6	50	0,52	25	6	14,86
ZEOLITA	7	50	0,65	25	7	14,48
ZEOLITA	8	50	0,80	25	8	14,15
ZEOLITA	9	50	1,10	25	9	12,55
ZEOLITA	10	50	1,40	25	10	11,82
ZEOLITA	11	50	2,00	25	11	10,10
ZEOLITA	12	50	2,50	25	12	9,63
ZEOLITA	13	50	3,10	25	13	9,25
ZEOLITA	14	50	3,80	25	14	9,00
ZEOLITA	15	50	4,80	25	15	8,59
ZEOLITA	16	50	5,90	25	16	8,44
ZEOLITA	17	50	7,40	25	17	8,24
ZEOLITA	18	50	9,50	25	18	8,00
ZEOLITA	19	50	13,00	25	19	7,51
ZEOLITA	20	50	18,00	25	20	7,17

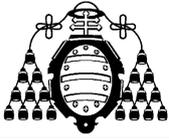
4.6.- RESUMEN DE RESULTADOS.

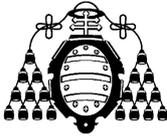
Los resultados obtenidos con el tamaño de corte (P_{100}), índice de molturabilidad y los valores de F_{80} y el P_{80} calculados según el modelo de representación Cartesiana-Cartesiana nos han proporcionado valores de Índice de Bond que aumentaban gradualmente a lo largo de las sucesivas etapas de reducción.



Capítulo 5

Verificación de resultados

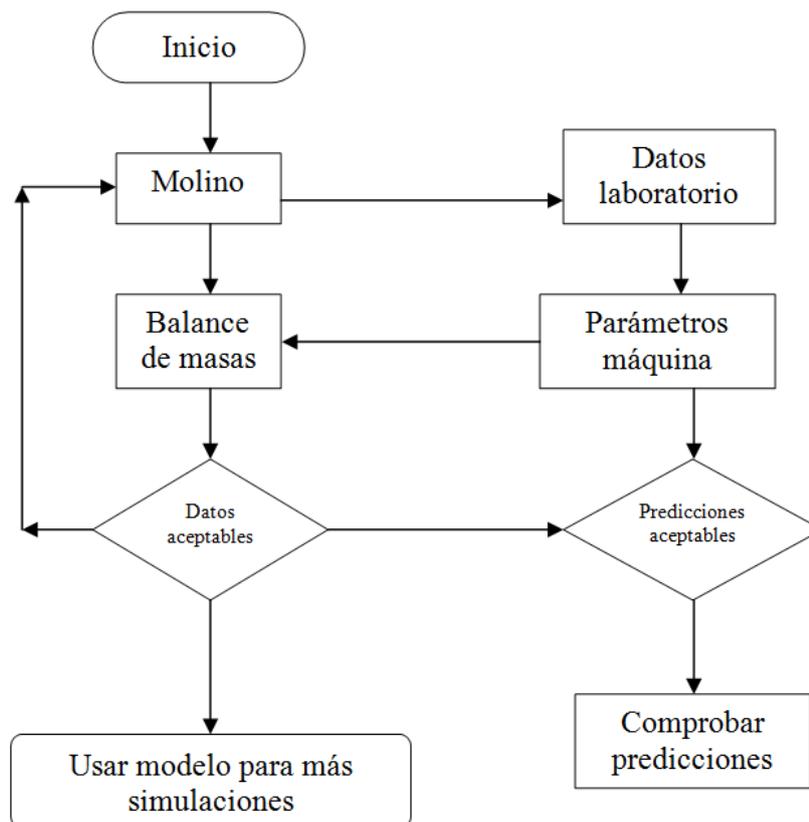


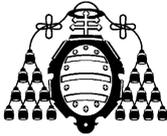


5.1.- VERIFICACIÓN DE RESULTADOS PARA TAMAÑOS ULTRAFINOS

En este capítulo expondremos brevemente el algoritmo o conjunto ordenado y finito de operaciones que permitiría hallar la solución que relaciona las curvas granulométricas en todo el intervalo de tamaños, incluido el de los tamaños ultrafinos.

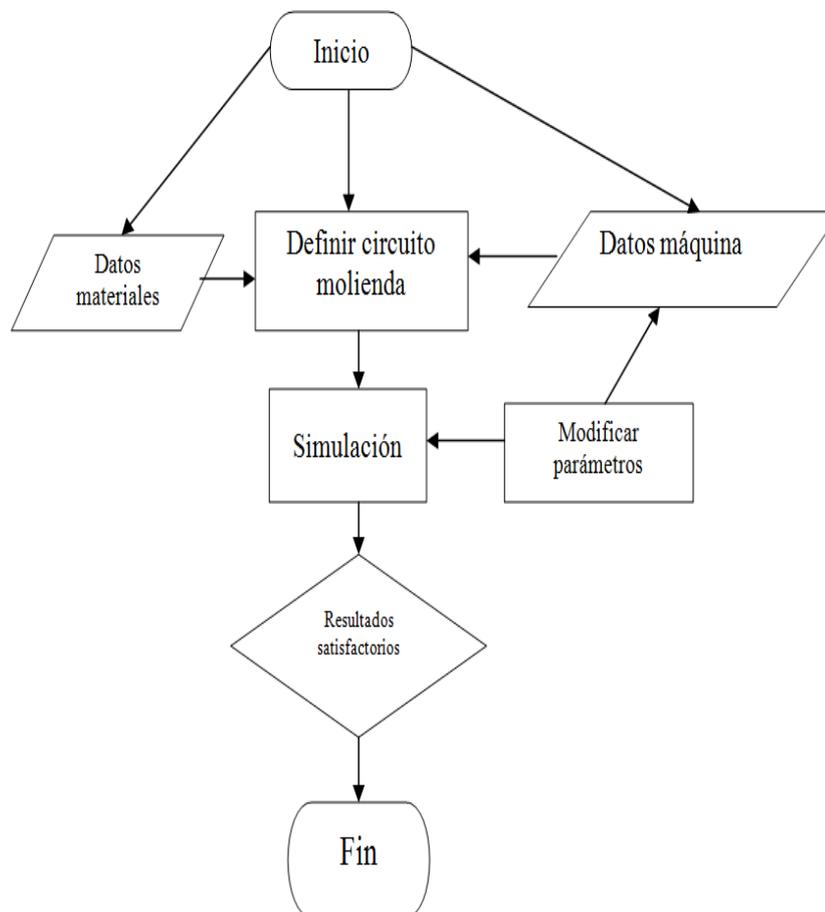
Los siguientes esquemas-algoritmos de verificación de resultados para tamaños ultrafinos se utilizarían en el diseño y simulación para la optimización de un circuito de molienda:

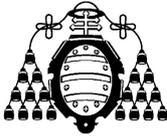




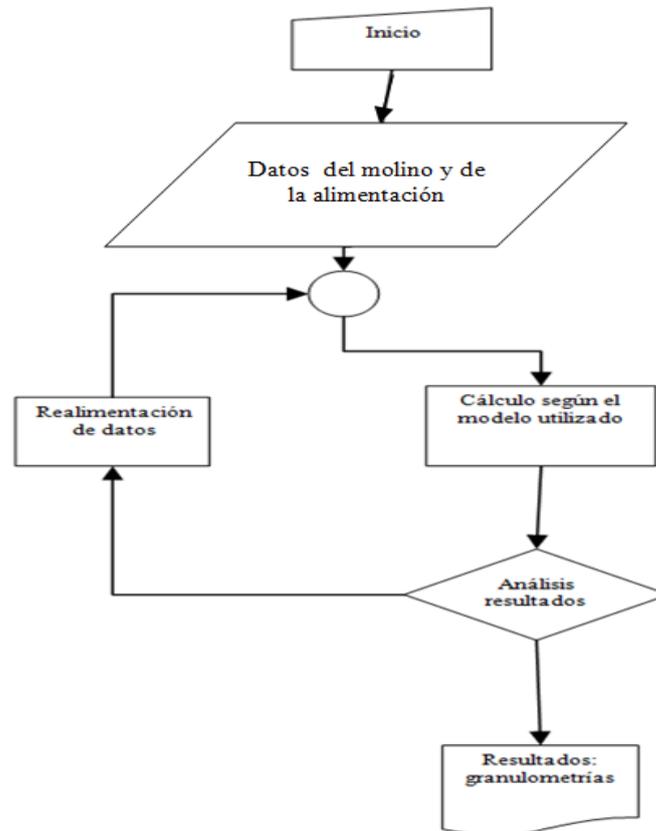
El siguiente modelo permite la simulación según las diferentes variables introducidas:

- Fragmentación del mineral
- Rendimiento
- Distribución de tamaño de alimentación
- Geometría de Molino
- Velocidad de Molino
- Tamaño y carga de bolas





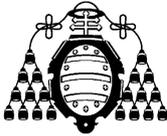
Esquema gráfico del algoritmo utilizado en la simulación del circuito molienda-clasificación:



5.2.- CONSIDERACIONES

Es importante tener en cuenta que:

- Algunos materiales tienen un fuerte carácter higroscópico, lo que provoca que su tamizado se dificulte y se obtengan resultados que no se asemejan con la realidad.
- El modelo utilizado para los ensayos es el Cartesiano-Cartesiano, que sólo tienen en cuenta los dos valores entre los que se encuentran los parámetros F_{80} y P_{80} , los modelos que tienen en cuenta todos los valores (Splines, Gates-Gaudin-Schumann, Rosin-Ramler, Log-Normal) aumentan considerablemente el error del modelo.
- El modelo de distribución utilizado es el que menores errores produce y más se acerca a la media de los valores obtenidos del Índice de Bond, es la representación en escala cartesiana-cartesiana. El cálculo de los parámetros F_{80} y P_{80} en este modelo se hace de manera directa y no requiere una linealización del modelo.



5.3.- VALORACIÓN DE RESULTADOS.

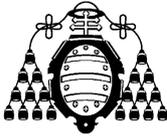
5.3.1.- Caliza.

Las muestras de caliza utilizadas han sido obtenidas del Laboratorio de Mineralurgia de la Escuela Politécnica de Mieres. Obteniéndose los siguientes resultados de la simulación:

Modelo:	$W(x,t) = W(x,0) \cdot \exp(-C \cdot x^n \cdot t)$					x en micras				
						t en minutos				
Parámetros:	C		n							
	0,0014033		1,15992659							
Simulación:	P100		Peso 700 cm ³	F80	Finos en alimentación (%)					
	5		1.273,76	250	17,49%					
Tamices:	355	250	180	125	100	75	63	42	32	0
Alimentación (%rechazo ac.):	0,6668	0,7038	0,7503	0,7982	0,8251	0,8660	0,9034	0,9509	0,9922	0,0078

Tamaño	Pasante ac. (%)	Rechazo ac. (%)
355	33,32%	66,68%
250	29,62%	70,38%
180	24,97%	75,03%
125	20,18%	79,82%
100	17,49%	82,51%
75	13,40%	86,60%
63	9,66%	90,34%
42	4,91%	95,09%
32	0,78%	99,22%

1º Ciclo	nº vueltas	t (min)	Rechazo (%)	Rechazo (g)	Pasante (g)	Finos netos	Gbp			
	100	1,429	81,447	1037,43	236,33	13,54	0,1			
Granulometría producto	tamaño:	250	180	125	100	75	63	42	32	
Rechazo acum(%):		20,947	32,785	46,401	54,282	64,160	70,7	81,6	88,7	
Pasante acum(%):		79,053	67,215	53,599	45,718	35,840	29,3	18,4	11,3	
Pasante acum (g):		1006,95	856,15	682,73	582,33	456,51	373,1	234,5	143,5	
Corte a 500 micras	> 500 (g)	266,81	150,80	173,43	100,39	0,00	0,00	0,00	0,00	691,43
	< 500 (g)	0,00	0,00	0,00	125,82	83,40	138,64	90,98	143,50	582,33
Alimentación siguiente ciclo										
Recirculado (g)		266,81	150,80	173,43	100,39	0,00	0,00	0,00	0,00	691,43
Fresco (g)		165,03	10,90	11,21	6,32	9,59	8,76	11,14	9,68	232,64
Total (g)		431,84	161,70	184,64	106,71	9,59	8,76	11,14	9,68	924,07
Total (g)/Peso 700 cm ³ (%)		33,90%	12,69%	14,50%	8,38%	0,75%	0,69%	0,87%	0,76%	72,55%



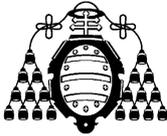
Capítulo 5: Verificación de resultados.

Tamaño	Retenido Ac. (%)	
250	33,90%	
180	46,60%	
125	61,09%	W(500,0)
100	69,47%	0,6947
75	70,22%	
63	70,91%	
42	71,79%	
32	72,55%	

2º Ciclo	nº vueltas	t (min)	Rechazo (%)	Rechazo (g)	Pasante (g)	Finos netos	Gbp			
	2.382,7	34,038	51,007	649,71	624,05	522,20	0,2192			
Granulometría producto	tamaño:	250	180	125	100	75	63	42	32	
	Rechazo acum(%):	0,000	0,000	0,000	0,003	0,055	0,207	1,871	5,071	
	Pasante acum(%):	100,000	100,000	100,000	99,997	99,945	99,793	98,129	94,929	
	Pasante acum (g):	1273,76	1273,76	1273,76	1273,72	1273,06	1271,13	1249,93	1209,17	
Corte a 500 micras	> 500 (g)	0,00	0,00	0,00	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04
	< 500 (g)	0,00	0,00	0,00	0,66	1,93	21,20	40,76	1209,17	1273,72
Alimentación siguiente ciclo										
	Recirculado (g)	0,00	0,00	0,00	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	
	Fresco (g)	435,79	28,80	29,60	16,68	25,33	23,14	29,41	25,57	614,32
	Total (g)	435,79	28,80	29,61	16,72	25,33	23,14	29,41	25,57	614,36
	Total (g)/Peso 700 cm3 (%)	34,21%	2,26%	2,32%	1,31%	1,99%	1,82%	2,31%	2,01%	48,23%

Tamaño	Retenido Ac. (%)	
250	34,21%	
180	36,47%	
125	38,80%	W(500,0)
100	40,11%	0,4011
75	42,10%	
63	43,92%	
42	46,23%	
32	48,23%	

3º Ciclo	nº vueltas	t (min)	Rechazo (%)	Rechazo (g)	Pasante (g)	Finos netos	Gbp			
	1.162,5	16,607	34,498	439,42	834,34	611,56	0,5261			
Granulometría producto	tamaño:	250	180	125	100	75	63	42	32	
	Rechazo acum(%):	0,000	0,002	0,071	0,309	1,289	2,545	7,799	13,169	
	Pasante acum(%):	100,000	99,998	99,929	99,691	98,711	97,455	92,201	86,831	
	Pasante acum (g):	1273,76	1273,73	1272,86	1269,83	1257,35	1241,34	1174,42	1106,02	
Corte a 500 micras	> 500 (g)	0,00	0,03	0,87	3,03	0,00	0,00	0,00	0,00	3,93
	< 500 (g)	0,00	0,00	0,00	12,48	16,00	66,92	68,41	1106,02	1269,83
Alimentación siguiente ciclo										
	Recirculado (g)	0,00	0,03	0,87	3,03	0,00	0,00	0,00	0,00	
	Fresco (g)	582,64	38,50	39,58	22,30	33,86	30,94	39,33	34,18	821,32
	Total (g)	582,64	38,53	40,45	25,33	33,86	30,94	39,33	34,18	825,25
	Total (g)/Peso 700 cm3 (%)	45,74%	3,02%	3,18%	1,99%	2,66%	2,43%	3,09%	2,68%	64,79%



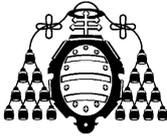
Capítulo 5: Verificación de resultados.

Tamaño	Retenido Ac. (%)	
250	45,74%	
180	48,77%	
125	51,94%	W(500,0)
100	53,93%	0,5393
75	56,59%	
63	59,02%	
42	62,11%	
32	64,79%	

4º Ciclo	nº vueltas	t (min)	Rechazo (%)	Rechazo (g)	Pasante (g)	Finos netos	GBP			
	414,4	5,920	51,109	651,01	622,75	400,65	0,9668			
Granulometría producto	tamaño:	250	180	125	100	75	63	42	32	
	Rechazo acum(%):	0,301	1,578	5,487	9,512	16,329	21,382	32,933	40,788	
	Pasante acum(%):	99,699	98,422	94,513	90,488	83,671	78,618	67,067	59,212	
	Pasante acum (g):	1269,92	1253,66	1203,87	1152,60	1065,76	1001,40	854,27	754,22	
Corte a 500 micras	> 500 (g)	3,84	16,26	49,80	51,27	0,00	0,00	0,00	0,00	121,16
	< 500 (g)	0,00	0,00	0,00	86,84	64,36	147,13	100,05	754,22	1152,60
Alimentación siguiente ciclo										
Recirculado (g)		3,84	16,26	49,80	51,27	0,00	0,00	0,00	0,00	
Fresco (g)		434,88	28,74	29,54	16,64	25,27	23,09	29,35	25,51	613,04
Total (g)		438,72	44,99	79,34	67,91	25,27	23,09	29,35	25,51	734,20
Total (g)/Peso 700 cm3 (%)		34,44%	3,53%	6,23%	5,33%	1,98%	1,81%	2,30%	2,00%	57,64%

Tamaño	Retenido Ac. (%)	
250	34,44%	
180	37,98%	
125	44,20%	W(500,0)
100	49,54%	0,4954
75	51,52%	
63	53,33%	
42	55,64%	
32	57,64%	

5º Ciclo	nº vueltas	t (min)	Rechazo (%)	Rechazo (g)	Pasante (g)	Finos netos	GBP			
	263,8	3,768	47,870	609,75	664,01	462,41	1,7532			
Granulometría producto	tamaño:	250	180	125	100	75	63	42	32	
	Rechazo acum(%):	1,409	4,276	10,571	16,417	23,357	27,948	37,155	42,935	
	Pasante acum(%):	98,591	95,724	89,429	83,583	76,643	72,052	62,845	57,065	
	Pasante acum (g):	1255,82	1219,29	1139,11	1064,65	976,24	917,77	800,50	726,87	
Corte a 500 micras	> 500 (g)	17,94	36,53	80,19	74,45	0,00	0,00	0,00	0,00	209,11
	< 500 (g)	0,00	0,00	0,00	88,41	58,47	117,28	73,62	726,87	1064,65
Alimentación siguiente ciclo										
Recirculado (g)		17,94	36,53	80,19	74,45	0,00	0,00	0,00	0,00	
Fresco (g)		463,70	30,64	31,50	17,75	26,95	24,62	31,30	27,20	653,65
Total (g)		481,64	67,17	111,69	92,20	26,95	24,62	31,30	27,20	862,76
Total (g)/Peso 700 cm3 (%)		37,81%	5,27%	8,77%	7,24%	2,12%	1,93%	2,46%	2,14%	67,73%



Capítulo 5: Verificación de resultados.

Tamaño	Retenido Ac. (%)	
250	37,81%	
180	43,09%	
125	51,85%	W(500,0)
100	59,09%	0,5909
75	61,21%	
63	63,14%	
42	65,60%	
32	67,73%	

6º Ciclo	nº vueltas	t (min)	Rechazo (%)	Rechazo (g)	Pasante (g)	Finos netos	GBP			
	141,3	2,019	58,019	739,02	534,74	348,53	2,4658			
Granulometría producto	tamaño:	250	180	125	100	75	63	42	32	
	Rechazo acum(%):	6,818	13,369	24,090	32,697	40,060	44,660	52,835	57,844	
	Pasante acum(%):	93,182	86,631	75,910	67,303	59,940	55,340	47,165	42,156	
	Pasante acum (g):	1186,91	1103,47	966,92	857,28	763,50	704,90	600,76	536,97	
Corte a 500 micras	> 500 (g)	86,85	83,44	136,56	109,64	0,00	0,00	0,00	0,00	416,48
	< 500 (g)	0,00	0,00	0,00	93,78	58,60	104,13	63,80	536,97	857,28
										1273,76

Intervalo	Peso (g)	Peso (%)	Luz malla	Pasante (%)
500 / 400	93,8	10,94	100	100,0
400 / 200	58,6	6,84	75	89,06
200 / 160	104,1	12,15	63	82,22
160 / 100	63,8	7,44	42	70,08
<100	537,0	62,64	32	62,64
	857,3	100,00		

LOG(LUZ MALLA)	1,8751	Pasante (%)	89,06
LOG(LUZ MALLA)	1,7993	Pasante (%)	82,22

LOG(d80)	1,8751
d80	75
GBP	1,7286
Wi	37,57



5.3.2.- Carbón.

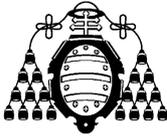
Las muestras de carbón utilizadas han sido obtenidas del Laboratorio de Mineralurgia de la Escuela Politécnica de Mieres. Obteniéndose los siguientes resultados de la simulación:

Modelo:	$W(x,t) = W(x,0) \cdot \exp(-C \cdot x^n \cdot t)$				x en micras					
					t en minutos					
Parámetros:	C		n							
	5,28E-06		2,0645112							
Simulación:	P100	Peso 700 cm ³	F80	Finos en alimentación (%)						
	90	696,88	250	6,55%						
Tamices:	355	250	180	125	100	75	63	45	32	0
Alimentación (%rechazo ac.):	0,1858	0,5899	0,7687	0,9117	0,9345	0,9649	0,9774	0,9914	0,9968	0,0032

Tamaño	Pasante ac. (%)	Rechazo ac. (%)
355	81,42%	18,58%
250	41,01%	58,99%
180	23,13%	76,87%
125	8,83%	91,17%
100	6,55%	93,45%
75	3,51%	96,49%
63	2,26%	97,74%
45	0,86%	99,14%
32	0,32%	99,68%

1º Ciclo	nº vueltas	t (min)	Rechazo (%)	Rechazo (g)	Pasante (g)	Finos netos	Gbp			
	100	1,429	86,124	600,18	96,70	51,05	0,5105			
Granulometría producto	tamaño:	250	180	125	100	75	63	45	32	
	Rechazo acum(%):	30,098	54,634	77,620	84,432	91,237	93,997	97,222	98,726	
	Pasante acum(%):	69,902	45,366	22,380	15,568	8,763	6,003	2,778	1,274	
	Pasante acum (g):	487,13	316,14	155,96	108,49	61,07	41,83	19,36	8,88	
Corte a 500 micras	> 500 (g)	209,75	170,99	160,18	47,47	0,00	0,00	0,00	0,00	588,39
	< 500 (g)	0,00	0,00	0,00	47,42	19,24	22,47	10,48	8,88	108,49
Alimentación siguiente ciclo										
Recirculado (g)		209,75	170,99	160,18	47,47	0,00	0,00	0,00	0,00	588,39
Fresco (g)		56,86	17,24	13,78	2,20	2,94	1,20	1,34	0,53	96,09
Total (g)		266,60	188,23	173,96	49,67	2,94	1,20	1,34	0,53	684,48
Total (g)/Peso 700 cm ³ (%)		38,26%	27,01%	24,96%	7,13%	0,42%	0,17%	0,19%	0,08%	98,22%

Tamaño	Retenido Ac. (%)	
250	38,26%	
180	65,27%	
125	90,23%	W(500,0)
100	97,36%	0,9736
75	97,78%	
63	97,95%	
45	98,15%	
32	98,22%	



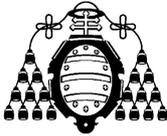
Capítulo 5: Verificación de resultados.

2º Ciclo	nº vueltas	t (min)	Rechazo (%)	Rechazo (g)	Pasante (g)	Finos netos	Gbp			
	377,6	5,394	71,531	498,49	198,39	191,28	0,5066			
Granulometría producto	tamaño:	250	180	125	100	75	63	45	32	
	Rechazo acum(%):	3,015	17,976	49,155	66,369	79,135	84,510	91,173	94,705	
	Pasante acum(%):	96,985	82,024	50,845	33,631	20,865	15,490	8,827	5,295	
	Pasante acum (g):	675,86	571,60	354,32	234,37	145,41	107,95	61,52	36,90	
Corte a 500 micras	> 500 (g)	21,01	104,26	217,28	119,96	0,00	0,00	0,00	0,00	462,51
	< 500 (g)	0,00	0,00	0,00	88,96	37,46	46,43	24,61	36,90	234,37
Alimentación siguiente ciclo										
Recirculado (g)		21,01	104,26	217,28	119,96	0,00	0,00	0,00	0,00	
Fresco (g)		116,65	35,37	28,27	4,52	6,02	2,47	2,76	1,08	197,14
Total (g)		137,66	139,64	245,55	124,48	6,02	2,47	2,76	1,08	659,65
Total (g)/Peso 700 cm3 (%)		19,75%	20,04%	35,24%	17,86%	0,86%	0,35%	0,40%	0,15%	94,66%

Tamaño	Retenido Ac. (%)	
250	19,75%	
180	39,79%	
125	75,03%	W(500,0)
100	92,89%	0,9289
75	93,75%	
63	94,11%	
45	94,50%	
32	94,66%	

3º Ciclo	nº vueltas	t (min)	Rechazo (%)	Rechazo (g)	Pasante (g)	Finos netos	Gbp			
	367,4	5,248	68,819	479,58	217,30	201,94	0,5497			
Granulometría producto	tamaño:	250	180	125	100	75	63	45	32	
	Rechazo acum(%):	1,668	11,348	41,550	63,982	76,311	81,518	87,964	91,359	
	Pasante acum(%):	98,332	88,652	58,450	36,018	23,689	18,482	12,036	8,641	
	Pasante acum (g):	685,26	617,79	407,33	251,00	165,08	128,80	83,87	60,21	
Corte a 500 micras	> 500 (g)	11,62	67,46	210,47	156,32	0,00	0,00	0,00	0,00	445,87
	< 500 (g)	0,00	0,00	0,00	85,92	36,28	44,93	23,66	60,21	251,00
Alimentación siguiente ciclo										
Recirculado (g)		11,62	67,46	210,47	156,32	0,00	0,00	0,00	0,00	
Fresco (g)		127,77	38,75	30,96	4,95	6,60	2,71	3,02	1,18	215,92
Total (g)		139,39	106,21	241,43	161,27	6,60	2,71	3,02	1,18	661,80
Total (g)/Peso 700 cm3 (%)		20,00%	15,24%	34,64%	23,14%	0,95%	0,39%	0,43%	0,17%	94,97%

Tamaño	Retenido Ac. (%)	
250	20,00%	
180	35,24%	
125	69,89%	W(500,0)
100	93,03%	0,9303
75	93,97%	
63	94,36%	
45	94,80%	
32	94,97%	



Capítulo 5: Verificación de resultados.

4º Ciclo	nº vueltas	t (min)	Rechazo (%)	Rechazo (g)	Pasante (g)	Finos netos	Gbp			
	336,3	4,805	70,692	492,63	204,24	187,80	0,5584			
Granulometría producto	tamaño:	250	180	125	100	75	63	45	32	
	Rechazo acum(%):	2,081	11,175	40,685	66,129	77,834	82,737	88,774	91,932	
	Pasante acum(%):	97,919	88,825	59,315	33,871	22,166	17,263	11,226	8,068	
	Pasante acum (g):	682,38	619,00	413,35	236,04	154,47	120,30	78,23	56,22	
Corte a 500 micras	> 500 (g)	14,50	63,38	205,65	177,31	0,00	0,00	0,00	0,00	460,84
	< 500 (g)	0,00	0,00	0,00	81,57	34,17	42,07	22,01	56,22	236,04
Alimentación siguiente ciclo										
Recirculado (g)		14,50	63,38	205,65	177,31	0,00	0,00	0,00	0,00	
Fresco (g)		120,09	36,42	29,10	4,65	6,20	2,54	2,84	1,11	202,95
Total (g)		134,59	99,80	234,75	181,96	6,20	2,54	2,84	1,11	663,79
Total (g)/Peso 700 cm3 (%)		19,31%	14,32%	33,69%	26,11%	0,89%	0,37%	0,41%	0,16%	95,25%

Tamaño	Retenido Ac. (%)	
250	19,31%	
180	33,63%	
125	67,32%	W(500,0)
100	93,43%	0,9343
75	94,32%	
63	94,69%	
45	95,09%	
32	95,25%	

5º Ciclo	nº vueltas	t (min)	Rechazo (%)	Rechazo (g)	Pasante (g)	Finos netos	Gbp			
	332,6	4,752	71,213	496,27	200,61	185,15	0,5566			
Granulometría producto	tamaño:	250	180	125	100	75	63	45	32	
	Rechazo acum(%):	2,060	10,802	39,426	66,666	78,283	83,141	89,116	92,242	
	Pasante acum(%):	97,940	89,198	60,574	33,334	21,717	16,859	10,884	7,758	
	Pasante acum (g):	682,52	621,60	422,13	232,30	151,34	117,49	75,85	54,06	
Corte a 500 micras	> 500 (g)	14,36	60,92	199,48	189,83	0,00	0,00	0,00	0,00	464,58
	< 500 (g)	0,00	0,00	0,00	80,96	33,85	41,64	21,79	54,06	232,30
Alimentación siguiente ciclo										
Recirculado (g)		14,36	60,92	199,48	189,83	0,00	0,00	0,00	0,00	
Fresco (g)		117,96	35,77	28,58	4,57	6,09	2,50	2,79	1,09	199,34
Total (g)		132,31	96,69	228,06	194,40	6,09	2,50	2,79	1,09	663,92
Total (g)/Peso 700 cm3 (%)		18,99%	13,87%	32,73%	27,90%	0,87%	0,36%	0,40%	0,16%	95,27%

Tamaño	Retenido Ac. (%)	
250	18,99%	
180	32,86%	
125	65,59%	W(500,0)
100	93,48%	0,9348
75	94,36%	
63	94,71%	
45	95,11%	
32	95,27%	



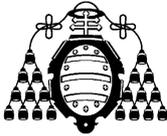
Capítulo 5: Verificación de resultados.

6º Ciclo	nº vueltas	t (min)	Rechazo (%)	Rechazo (g)	Pasante (g)	Finos netos	GBP			
	334,1	4,773	71,166	495,94	200,93	185,72	0,5559			
Granulometría producto	tamaño:	250	180	125	100	75	63	45	32	
	Rechazo acum(%):	2,005	10,500	38,320	66,603	78,248	83,118	89,110	92,247	
	Pasante acum(%):	97,995	89,500	61,680	33,397	21,752	16,882	10,890	7,753	
	Pasante acum (g):	682,90	623,70	429,84	232,74	151,59	117,65	75,89	54,03	
Corte a 500 micras	> 500 (g)	13,97	59,20	193,87	197,10	0,00	0,00	0,00	0,00	464,14
	< 500 (g)	0,00	0,00	0,00	81,15	33,94	41,76	21,86	54,03	232,74
										696,88

Intervalo	Peso (g)	Peso (%)	Luz malla	Pasante (%)
500 / 400	81,2	34,87	100	100,00
400 / 200	33,9	14,58	75	65,13
200 / 160	41,8	17,94	63	50,55
160 / 100	21,9	9,39	45	32,61
<100	54,0	23,21	32	23,21
	232,7	100,00		

LOG(LUZ MALLA)	1,8751	Pasante (%)	65,13
LOG(LUZ MALLA)	1,7993	Pasante (%)	50,55

LOG(d80)	1,8751
d80	75
GBP	0,5570
Wi	48,91



5.3.3.- Magnetita.

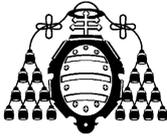
Las muestras de magnetita utilizadas han sido obtenidas del Laboratorio de Mineralurgia de la Escuela Politécnica de Mieres. Obteniéndose los siguientes resultados de la simulación:

Modelo:	$W(x,t) = W(x,0) \cdot \exp(-C \cdot x^n \cdot t)$					x en micras				
						t en minutos				
Parámetros:	C		n							
	2,01E-05		1,78434075							
Simulación:	P100	Peso 700 cm ³		F80	Finos en alimentación (%)					
	70	1.732,57	250	10,20%						
Tamices:	355	250	180	125	100	75	63	45	32	0
Alimentación (%rechazo ac.):	0,1944	0,5277	0,7708	0,8411	0,8980	0,9304	0,9513	0,9704	0,9877	0,0123

Tamaño	Pasante ac. (%)	Rechazo ac. (%)
355	80,56%	19,44%
250	47,23%	52,77%
180	22,92%	77,08%
125	15,89%	84,11%
100	10,20%	89,80%
75	6,96%	93,04%
63	4,87%	95,13%
45	2,96%	97,04%
32	1,23%	98,77%

1º Ciclo	nº vueltas	t (min)	Rechazo (%)	Rechazo (g)	Pasante (g)	Finos netos	Gbp			
	100	1,429	84,881	1470,62	261,95	85,21	0,8521			
Granulometría producto	tamaño:	250	180	125	100	75	63	45	32	
Rechazo acum(%):		30,569	56,883	71,784	80,732	87,300	90,788	94,591	97,401	
Pasante acum(%):		69,431	43,117	28,216	19,268	12,700	9,212	5,409	2,599	
Pasante acum (g):		1202,94	747,03	488,87	333,84	220,03	159,61	93,71	45,03	
Corte a 500 micras	> 500 (g)	529,63	455,91	258,16	155,03	0,00	0,00	0,00	0,00	1398,73
	< 500 (g)	0,00	0,00	0,00	113,81	60,42	65,90	48,68	45,03	333,84
Alimentación siguiente ciclo										
Recirculado (g)		529,63	455,91	258,16	155,03	0,00	0,00	0,00	0,00	1398,73
Fresco (g)		136,53	62,89	18,20	14,71	8,39	5,39	4,96	4,46	255,54
Total (g)		666,16	518,80	276,36	169,74	8,39	5,39	4,96	4,46	1654,27
Total (g)/Peso 700 cm ³ (%)		38,45%	29,94%	15,95%	9,80%	0,48%	0,31%	0,29%	0,26%	95,48%

Tamaño	Retenido Ac. (%)	
250	38,45%	
180	68,39%	
125	84,34%	W(500,0)
100	94,14%	0,9414
75	94,63%	
63	94,94%	
45	95,22%	
32	95,48%	



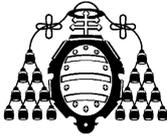
Capítulo 5: Verificación de resultados.

2º Ciclo	nº vueltas	t (min)	Rechazo (%)	Rechazo (g)	Pasante (g)	Finos netos	Gbp			
	549,6	7,851	69,079	1196,84	535,74	501,68	0,9129			
Granulometría producto	tamaño:	250	180	125	100	75	63	45	32	
	Rechazo acum(%):	1,913	12,879	35,298	52,448	66,675	73,458	82,724	88,441	
	Pasante acum(%):	98,087	87,121	64,702	47,552	33,325	26,542	17,276	11,559	
	Pasante acum (g):	1699,42	1509,43	1121,00	823,87	577,39	459,86	299,32	200,27	
Corte a 500 micras	> 500 (g)	33,15	189,99	388,43	297,14	0,00	0,00	0,00	0,00	908,71
	< 500 (g)	0,00	0,00	0,00	246,48	117,52	160,54	99,06	200,27	823,87
Alimentación siguiente ciclo										
Recirculado (g)	33,15	189,99	388,43	297,14	0,00	0,00	0,00	0,00		
Fresco (g)	279,23	128,61	37,22	30,09	17,17	11,02	10,15	9,12	522,61	
Total (g)	312,38	318,61	425,65	327,22	17,17	11,02	10,15	9,12	1431,32	
Total (g)/Peso 700 cm3 (%)	18,03%	18,39%	24,57%	18,89%	0,99%	0,64%	0,59%	0,53%	82,61%	

Tamaño	Retenido Ac. (%)	
250	18,03%	
180	36,42%	
125	60,99%	W(500,0)
100	79,87%	0,7987
75	80,86%	
63	81,50%	
45	82,09%	
32	82,61%	

3º Ciclo	nº vueltas	t (min)	Rechazo (%)	Rechazo (g)	Pasante (g)	Finos netos	Gbp			
	482,4	6,891	60,869	1054,60	677,98	593,93	1,2312			
Granulometría producto	tamaño:	250	180	125	100	75	63	45	32	
	Rechazo acum(%):	1,295	8,411	28,390	47,797	59,469	65,069	72,548	77,241	
	Pasante acum(%):	98,705	91,589	71,610	52,203	40,531	34,931	27,452	22,759	
	Pasante acum (g):	1710,14	1586,85	1240,69	904,45	702,23	605,20	475,62	394,31	
Corte a 500 micras	> 500 (g)	22,43	123,29	346,16	336,24	0,00	0,00	0,00	0,00	828,12
	< 500 (g)	0,00	0,00	0,00	202,22	97,03	129,58	81,31	394,31	904,45
Alimentación siguiente ciclo										
Recirculado (g)	22,43	123,29	346,16	336,24	0,00	0,00	0,00	0,00		
Fresco (g)	353,37	162,76	47,11	38,08	21,72	13,95	12,85	11,54	661,37	
Total (g)	375,80	286,05	393,27	374,31	21,72	13,95	12,85	11,54	1489,49	
Total (g)/Peso 700 cm3 (%)	21,69%	16,51%	22,70%	21,60%	1,25%	0,80%	0,74%	0,67%	85,97%	

Tamaño	Retenido Ac. (%)	
250	21,69%	
180	38,20%	
125	60,90%	W(500,0)
100	82,50%	0,8250
75	83,76%	
63	84,56%	
45	85,30%	
32	85,97%	



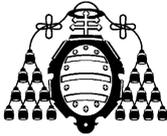
Capítulo 5: Verificación de resultados.

4º Ciclo	nº vueltas	t (min)	Rechazo (%)	Rechazo (g)	Pasante (g)	Finos netos	Gbp			
	345,9	4,941	67,898	1176,39	556,18	463,92	1,3413			
Granulometría producto	tamaño:	250	180	125	100	75	63	45	32	
	Rechazo acum(%):	3,282	13,356	35,198	57,092	67,193	71,956	78,074	81,924	
	Pasante acum(%):	96,718	86,644	64,802	42,908	32,807	28,044	21,926	18,076	
	Pasante acum (g):	1675,71	1501,16	1122,75	743,41	568,40	485,89	379,89	313,18	
Corte a 500 micras	> 500 (g)	56,86	174,55	378,41	379,34	0,00	0,00	0,00	0,00	989,16
	< 500 (g)	0,00	0,00	0,00	175,00	82,51	106,00	66,71	313,18	743,41
Alimentación siguiente ciclo										
Recirculado (g)		56,86	174,55	378,41	379,34	0,00	0,00	0,00	0,00	
Fresco (g)		289,89	133,52	38,64	31,24	17,82	11,44	10,54	9,47	542,56
Total (g)		346,75	308,07	417,06	410,58	17,82	11,44	10,54	9,47	1531,73
Total (g)/Peso 700 cm3 (%)		20,01%	17,78%	24,07%	23,70%	1,03%	0,66%	0,61%	0,55%	88,41%

Tamaño	Retenido Ac. (%)	
250	20,01%	
180	37,79%	
125	61,87%	W(500,0)
100	85,56%	0,8556
75	86,59%	
63	87,25%	
45	87,86%	
32	88,41%	

5º Ciclo	nº vueltas	t (min)	Rechazo (%)	Rechazo (g)	Pasante (g)	Finos netos	Gbp			
	326,8	4,668	71,179	1233,23	499,34	423,50	1,2960			
Granulometría producto	tamaño:	250	180	125	100	75	63	45	32	
	Rechazo acum(%):	3,361	14,005	36,857	60,427	70,319	74,910	80,809	84,472	
	Pasante acum(%):	96,639	85,995	63,143	39,573	29,681	25,090	19,191	15,528	
	Pasante acum (g):	1674,34	1489,93	1094,01	685,63	514,25	434,69	332,50	269,04	
Corte a 500 micras	> 500 (g)	58,23	184,40	395,93	408,38	0,00	0,00	0,00	0,00	1046,94
	< 500 (g)	0,00	0,00	0,00	171,38	79,55	102,20	63,46	269,04	685,63
Alimentación siguiente ciclo										
Recirculado (g)		58,23	184,40	395,93	408,38	0,00	0,00	0,00	0,00	
Fresco (g)		260,26	119,88	34,70	28,04	16,00	10,27	9,46	8,50	487,11
Total (g)		318,50	304,28	430,62	436,42	16,00	10,27	9,46	8,50	1534,05
Total (g)/Peso 700 cm3 (%)		18,38%	17,56%	24,85%	25,19%	0,92%	0,59%	0,55%	0,49%	88,54%

Tamaño	Retenido Ac. (%)	
250	18,38%	
180	35,95%	
125	60,80%	W(500,0)
100	85,99%	0,8599
75	86,91%	
63	87,51%	
45	88,05%	
32	88,54%	



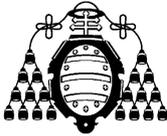
Capítulo 5: Verificación de resultados.

6º Ciclo	nº vueltas	t (min)	Rechazo (%)	Rechazo (g)	Pasante (g)	Finos netos	Gbp			
	342,6	4,895	70,896	1228,32	504,25	434,31	1,2675			
Granulometría producto	tamaño:	250	180	125	100	75	63	45	32	
	Rechazo acum(%):	2,831	12,692	35,321	59,709	69,868	74,572	80,655	84,413	
	Pasante acum(%):	97,169	87,308	64,679	40,291	30,132	25,428	19,345	15,587	
	Pasante acum (g):	1683,52	1512,67	1120,61	698,06	522,06	440,55	335,16	270,05	
Corte a 500 micras	> 500 (g)	49,05	170,85	392,06	422,55	0,00	0,00	0,00	0,00	1034,51
	< 500 (g)	0,00	0,00	0,00	176,01	81,51	105,39	65,11	270,05	698,06
										1732,57

Intervalo	Peso (g)	Peso (%)	Luz malla	Pasante (%)
500 / 400	176,0	25,21	100	100,00
400 / 200	81,5	11,68	75	74,79
200 / 160	105,4	15,10	63	63,11
160 / 100	65,1	9,33	45	48,01
<100	270,1	38,69	32	38,69
	698,1	100,00		

LOG(LUZ MALLA)	1,8751	Pasante (%)	74,79
LOG(LUZ MALLA)	1,7993	Pasante (%)	63,11

LOG(d80)	1,8751
d80	75
Gbp	1,3016
Wi	25,84



5.3.4.- Scheelita.

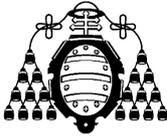
Las muestras de scheelita utilizadas han sido obtenidas del Laboratorio de Mineralurgia de la Escuela Politécnica de Mieres. Obteniéndose los siguientes resultados de la simulación:

Modelo:	$W(x,t) = W(x,0) \cdot \exp(-C \cdot x^n \cdot t)$				x en micras					
Parámetros:	C	n			t en minutos					
	0,00164	0,944008								
Simulación:	P100	Peso 700 cm ³	F80	Finos en alimentación (%)						
	100	1.373,28	6528	12,96%						
Tamices:	355	250	180	125	100	75	63	45	32	0
Alimentación (%rechazo ac.):	0,6680	0,7244	0,7763	0,8401	0,8704	0,9134	0,9373	0,9637	0,9818	0,0182

Tamaño	Pasante ac. (%)	Rechazo ac. (%)
355	33,20%	66,80%
250	27,56%	72,44%
180	22,37%	77,63%
125	15,99%	84,01%
100	12,96%	87,04%
75	8,66%	91,34%
63	6,27%	93,73%
45	3,63%	96,37%
32	1,82%	98,18%

1º Ciclo	nº vueltas	t (min)	Rechazo (%)	Rechazo (g)	Pasante (g)	Finos netos	Gbp			
	100	1,429	72,586	996,81	376,47	198,42	1,9842			
Granulometría producto	tamaño:	250	180	125	100	75	63	45	32	
	Rechazo acum(%):	47,066	56,586	67,144	72,586	79,537	83,348	88,477	92,289	
	Pasante acum(%):	52,934	43,414	32,856	27,414	20,463	16,652	11,523	7,711	
	Pasante acum (g):	726,93	596,19	451,20	376,47	281,01	228,68	158,24	105,89	
Corte a 500 micras	> 500 (g)	646,35	130,74	144,99	74,73	0,00	0,00	0,00	0,00	996,81
	< 500 (g)	0,00	0,00	0,00	95,46	52,33	70,44	52,34	105,89	376,47
Alimentación siguiente ciclo										
	Recirculado (g)	646,35	130,74	144,99	74,73	0,00	0,00	0,00	0,00	996,81
	Fresco (g)	267,74	19,20	23,59	11,18	15,91	8,82	9,76	6,71	362,92
	Total (g)	914,09	149,94	168,58	85,91	15,91	8,82	9,76	6,71	1359,73
	Total (g)/Peso 700 cm ³ (%)	66,56%	10,92%	12,28%	6,26%	1,16%	0,64%	0,71%	0,49%	99,01%

Tamaño	Retenido Ac. (%)	
250	66,56%	
180	77,48%	
125	89,76%	W(500,0)
100	96,01%	0,9601
75	97,17%	
63	97,81%	
45	98,52%	
32	99,01%	



Capítulo 5: Verificación de resultados.

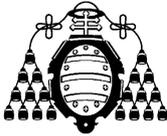
2º Ciclo	nº vueltas	t (min)	Rechazo (%)	Rechazo (g)	Pasante (g)	Finos netos	Gbp			
	173,1	2,473	70,117	962,90	410,38	361,57	2,0883			
Granulometría producto	tamaño:	250	180	125	100	75	63	45	32	
	Rechazo acum(%):	31,552	44,817	60,891	70,117	76,471	79,827	84,978	88,948	
	Pasante acum(%):	68,448	55,183	39,109	29,883	23,529	20,173	15,022	11,052	
	Pasante acum (g):	939,98	757,82	537,08	410,38	323,12	277,04	206,29	151,78	
Corte a 500 micras	> 500 (g)	433,30	182,16	220,75	126,70	0,00	0,00	0,00	0,00	962,90
	< 500 (g)	0,00	0,00	0,00	87,26	46,08	70,75	54,51	151,78	410,38
Alimentación siguiente ciclo										
Recirculado (g)	433,30	182,16	220,75	126,70	0,00	0,00	0,00	0,00		
Fresco (g)	291,86	20,93	25,71	12,19	17,35	9,62	10,64	7,32	395,61	
Total (g)	725,16	203,09	246,46	138,88	17,35	9,62	10,64	7,32	1358,51	
Total (g)/Peso 700 cm3 (%)	52,81%	14,79%	17,95%	10,11%	1,26%	0,70%	0,77%	0,53%	98,92%	

Tamaño	Retenido Ac. (%)	
250	52,81%	
180	67,59%	
125	85,54%	W(500,0)
100	95,65%	0,9565
75	96,92%	
63	97,62%	
45	98,39%	
32	98,92%	

3º Ciclo	nº vueltas	t (min)	Rechazo (%)	Rechazo (g)	Pasante (g)	Finos netos	Gbp			
	162,4	2,320	71,229	978,17	395,11	341,90	2,1052			
Granulometría producto	tamaño:	250	180	125	100	75	63	45	32	
	Rechazo acum(%):	26,216	40,447	59,443	71,229	77,411	80,676	85,645	89,460	
	Pasante acum(%):	73,784	59,553	40,557	28,771	22,589	19,324	14,355	10,540	
	Pasante acum (g):	1013,26	817,83	556,96	395,11	310,21	265,38	197,13	144,74	
Corte a 500 micras	> 500 (g)	360,02	195,43	260,87	161,85	0,00	0,00	0,00	0,00	978,17
	< 500 (g)	0,00	0,00	0,00	84,90	44,83	68,25	52,39	144,74	395,11
Alimentación siguiente ciclo										
Recirculado (g)	360,02	195,43	260,87	161,85	0,00	0,00	0,00	0,00		
Fresco (g)	281,00	20,15	24,75	11,73	16,70	9,26	10,24	7,04	380,89	
Total (g)	641,03	215,58	285,62	173,58	16,70	9,26	10,24	7,04	1359,06	
Total (g)/Peso 700 cm3 (%)	46,68%	15,70%	20,80%	12,64%	1,22%	0,67%	0,75%	0,51%	98,96%	

Tamaño	Retenido Ac. (%)	
250	46,68%	
180	62,38%	
125	83,18%	W(500,0)
100	95,82%	0,9582
75	97,03%	
63	97,71%	
45	98,45%	
32	98,96%	

4º Ciclo	nº	t (min)	Rechazo	Rechazo	Pasante (g)	Finos netos	Gbp			
----------	----	---------	---------	---------	-------------	-------------	-----	--	--	--



Capítulo 5: Verificación de resultados.

		vueltas	(%)	(g)						
		162,0	2,315	71,396	980,47	392,81	341,58	2,1079		
Granulometría producto	tamaño:	250	180	125	100	75	63	45	32	
	Rechazo acum(%):	23,211	37,368	57,847	71,396	77,542	80,783	85,724	89,517	
		Pasante acum(%):	76,789	62,632	42,153	28,604	22,458	19,217	14,276	10,483
		Pasante acum (g):	1054,53	860,11	578,88	392,81	308,41	263,90	196,05	143,97
Corte a 500 micras	> 500 (g)	318,75	194,42	281,23	186,07	0,00	0,00	0,00	0,00	980,47
	< 500 (g)	0,00	0,00	0,00	84,40	44,52	67,85	52,08	143,97	392,81
Alimentación siguiente ciclo										
Recirculado (g)		318,75	194,42	281,23	186,07	0,00	0,00	0,00	0,00	
Fresco (g)		279,37	20,03	24,61	11,66	16,60	9,21	10,18	7,00	378,67
Total (g)		598,12	214,45	305,84	197,74	16,60	9,21	10,18	7,00	1359,14
Total (g)/Peso 700 cm3 (%)		43,55%	15,62%	22,27%	14,40%	1,21%	0,67%	0,74%	0,51%	98,97%

Tamaño	Retenido Ac. (%)	
250	43,55%	
180	59,17%	
125	81,44%	W(500,0)
100	95,84%	0,9584
75	97,05%	
63	97,72%	
45	98,46%	
32	98,97%	

5º Ciclo	nº vueltas	t (min)	Rechazo (%)	Rechazo (g)	Pasante (g)	Finos netos	Gbp			
	162,0	2,314	71,423	980,84	392,44	341,51	2,1084			
Granulometría producto	tamaño:	250	180	125	100	75	63	45	32	
	Rechazo acum(%):	21,664	35,455	56,649	71,423	77,563	80,801	85,737	89,526	
		Pasante acum(%):	78,336	64,545	43,351	28,577	22,437	19,199	14,263	10,474
		Pasante acum (g):	1075,78	886,39	595,33	392,44	308,12	263,66	195,87	143,84
Corte a 500 micras	> 500 (g)	297,50	189,39	291,06	202,89	0,00	0,00	0,00	0,00	980,84
	< 500 (g)	0,00	0,00	0,00	84,32	44,47	67,78	52,03	143,84	392,44
Alimentación siguiente ciclo										
Recirculado (g)		297,50	189,39	291,06	202,89	0,00	0,00	0,00	0,00	
Fresco (g)		279,10	20,02	24,59	11,65	16,59	9,20	10,17	7,00	378,31
Total (g)		576,60	209,41	315,64	214,54	16,59	9,20	10,17	7,00	1359,16
Total (g)/Peso 700 cm3 (%)		41,99%	15,25%	22,98%	15,62%	1,21%	0,67%	0,74%	0,51%	98,97%

Tamaño	Retenido Ac. (%)	
250	41,99%	
180	57,24%	
125	80,22%	W(500,0)
100	95,84%	0,9584
75	97,05%	
63	97,72%	
45	98,46%	
32	98,97%	

6º Ciclo	nº vueltas	t (min)	Rechazo (%)	Rechazo (g)	Pasante (g)	Finos netos	Gbp			
	162,0	2,314	71,428	980,90	392,38	341,50	2,1084			



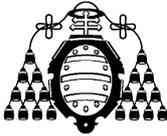
Capítulo 5: Verificación de resultados.

Granulometría producto	tamaño:	250	180	125	100	75	63	45	32	
		Rechazo acum(%):	20,886	34,297	55,802	71,428	77,567	80,804	85,739	89,527
Pasante acum(%):	79,114	65,703	44,198	28,572	22,433	19,196	14,261	10,473		
Pasante acum (g):	1086,46	902,28	606,96	392,38	308,07	263,62	195,84	143,82		
Corte a 500 micras	> 500 (g)	286,82	184,18	295,32	214,59	0,00	0,00	0,00	0,00	980,90
	< 500 (g)	0,00	0,00	0,00	84,30	44,46	67,77	52,03	143,82	392,38
										1373,28

Intervalo	Peso (g)	Peso (%)	Luz malla	Pasante (%)
500 / 400	84,3	21,49	100	100,00
400 / 200	44,5	11,33	75	78,51
200 / 160	67,8	17,27	63	67,18
160 / 100	52,0	13,26	45	49,91
<100	143,8	36,65	32	36,65
	392,4	100,00		

LOG(LUZ MALLA)	1,8751	Pasante (%)	78,51
LOG(LUZ MALLA)	1,7993	Pasante (%)	67,18

LOG(d80)	1,8751
d80	75
Gbp	2,1083
Wi	8,12



5.3.5.- Sílice.

Las muestras de sílice utilizadas han sido obtenidas del Laboratorio de Mineralurgia de la Escuela Politécnica de Mieres. Obteniéndose los siguientes resultados de la simulación:

Modelo:	$W(x,t) = W(x,0) \cdot \exp(-C \cdot x^n \cdot t)$				x en micras					
					t en minutos					
Parámetros:	C		n							
	2,74E-07		2,59389							
Simulación:	P100	Peso 700 cm ³	F80	Finos en alimentación (%)						
	80	1.186,48	250	3,84%						
Tamices:	355	250	180	125	100	75	63	45	32	0
Alimentación (%rechazo ac.):	0,2022	0,5941	0,8650	0,9483	0,9616	0,9813	0,9885	0,9967	0,9998	0,0002

Tamaño	Pasante ac. (%)	Rechazo ac. (%)
355	79,78%	20,22%
250	40,59%	59,41%
180	13,50%	86,50%
125	5,17%	94,83%
100	3,84%	96,16%
75	1,87%	98,13%
63	1,15%	98,85%
45	0,33%	99,67%
32	0,02%	99,98%

1º Ciclo	nº vueltas	t (min)	Rechazo (%)	Rechazo (g)	Pasante (g)	Finos netos	Gbp			
	100	1,429	92,961	1102,96	83,52	37,95	0,3795			
Granulometría producto	tamaño:	250	180	125	100	75	63	45	32	
Rechazo acum(%):		31,016	65,560	85,150	90,528	95,358	97,070	98,910	99,670	
Pasante acum(%):		68,984	34,440	14,850	9,472	4,642	2,930	1,090	0,330	
Pasante acum (g):		818,48	408,62	176,19	112,38	55,08	34,76	12,93	3,92	
Corte a 500 micras	> 500 (g)	368,00	409,86	232,43	63,80	0,00	0,00	0,00	0,00	1074,10
	< 500 (g)	0,00	0,00	0,00	57,30	20,32	21,83	9,01	3,92	112,38
Alimentación siguiente ciclo										
Recirculado (g)		368,00	409,86	232,43	63,80	0,00	0,00	0,00	0,00	1074,10
Fresco (g)		49,61	22,62	6,95	1,11	1,64	0,61	0,68	0,27	83,49
Total (g)		417,61	432,48	239,38	64,91	1,64	0,61	0,68	0,27	1157,59
Total (g)/Peso 700 cm ³ (%)		35,20%	36,45%	20,18%	5,47%	0,14%	0,05%	0,06%	0,02%	97,56%

Tamaño	Retenido Ac. (%)	
250	35,20%	
180	71,65%	
125	91,82%	W(500,0)
100	97,30%	0,9730
75	97,43%	
63	97,49%	
45	97,54%	
32	97,56%	



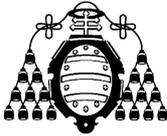
Capítulo 5: Verificación de resultados.

2º Ciclo	nº vueltas	t (min)	Rechazo (%)	Rechazo (g)	Pasante (g)	Finos netos	GBP			
	884,8	12,640	72,127	855,78	330,70	326,39	0,3689			
Granulometría producto	tamaño:	250	180	125	100	75	63	45	32	
	Rechazo acum(%):	0,112	6,166	35,422	57,042	75,641	82,982	91,194	94,891	
	Pasante acum(%):	99,888	93,834	64,578	42,958	24,359	17,018	8,806	5,109	
	Pasante acum (g):	1185,15	1113,33	766,20	509,68	289,02	201,91	104,48	60,62	
Corte a 500 micras	> 500 (g)	1,33	71,83	347,12	256,52	0,00	0,00	0,00	0,00	676,80
	< 500 (g)	0,00	0,00	0,00	220,67	87,11	97,43	43,86	60,62	509,68
Alimentación siguiente ciclo										
Recirculado (g)	1,33	71,83	347,12	256,52	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Fresco (g)	196,44	89,59	27,53	4,40	6,50	2,41	2,68	1,05	330,59	
Total (g)	197,76	161,41	374,65	260,92	6,50	2,41	2,68	1,05	1007,39	
Total (g)/Peso 700 cm3 (%)	16,67%	13,60%	31,58%	21,99%	0,55%	0,20%	0,23%	0,09%	84,91%	

Tamaño	Retenido Ac. (%)	
250	16,67%	
180	30,27%	
125	61,85%	W(500,0)
100	83,84%	0,8384
75	84,39%	
63	84,59%	
45	84,82%	
32	84,91%	

3º Ciclo	nº vueltas	t (min)	Rechazo (%)	Rechazo (g)	Pasante (g)	Finos netos	GBP			
	884,6	12,637	62,158	737,49	448,99	429,42	0,4855			
Granulometría producto	tamaño:	250	180	125	100	75	63	45	32	
	Rechazo acum(%):	0,053	2,607	23,865	49,161	65,517	72,009	79,299	82,579	
	Pasante acum(%):	99,947	97,393	76,135	50,839	34,483	27,991	20,701	17,421	
	Pasante acum (g):	1185,85	1155,55	903,32	603,20	409,13	332,10	245,62	206,70	
Corte a 500 micras	> 500 (g)	0,63	30,30	252,23	300,13	0,00	0,00	0,00	0,00	583,28
	< 500 (g)	0,00	0,00	0,00	194,06	77,03	86,48	38,92	206,70	603,20
Alimentación siguiente ciclo										
Recirculado (g)	0,63	30,30	252,23	300,13	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Fresco (g)	266,70	121,63	37,38	5,97	8,83	3,27	3,64	1,43	448,84	
Total (g)	267,33	151,93	289,60	306,10	8,83	3,27	3,64	1,43	1032,13	
Total (g)/Peso 700 cm3 (%)	22,53%	12,81%	24,41%	25,80%	0,74%	0,28%	0,31%	0,12%	86,99%	

Tamaño	Retenido Ac. (%)	
250	22,53%	
180	35,34%	
125	59,74%	W(500,0)
100	85,54%	0,8554
75	86,29%	
63	86,56%	
45	86,87%	
32	86,99%	



Capítulo 5: Verificación de resultados.

4º Ciclo	nº vueltas	t (min)	Rechazo (%)	Rechazo (g)	Pasante (g)	Finos netos	GBP			
	662,8	9,468	68,362	811,10	375,38	352,21	0,5314			
Granulometría producto	tamaño:	250	180	125	100	75	63	45	32	
	Rechazo acum(%):	0,303	5,627	29,270	57,344	71,382	76,725	82,600	85,198	
	Pasante acum(%):	99,697	94,373	70,730	42,656	28,618	23,275	17,400	14,802	
	Pasante acum (g):	1182,88	1119,71	839,19	506,11	339,55	276,16	206,45	175,62	
Corte a 500 micras	> 500 (g)	3,60	63,17	280,52	333,08	0,00	0,00	0,00	0,00	680,37
	< 500 (g)	0,00	0,00	0,00	166,56	63,39	69,71	30,83	175,62	506,11
Alimentación siguiente ciclo										
Recirculado (g)	3,60	63,17	280,52	333,08	0,00	0,00	0,00	0,00		
Fresco (g)	222,97	101,69	31,25	4,99	7,38	2,73	3,05	1,19		375,25
Total (g)	226,57	164,85	311,77	338,08	7,38	2,73	3,05	1,19		1055,62
Total (g)/Peso 700 cm3 (%)	19,10%	13,89%	26,28%	28,49%	0,62%	0,23%	0,26%	0,10%		88,97%

Tamaño	Retenido Ac. (%)	
250	19,10%	
180	32,99%	
125	59,27%	W(500,0)
100	87,76%	0,8776
75	88,38%	
63	88,61%	
45	88,87%	
32	88,97%	

5º Ciclo	nº vueltas	t (min)	Rechazo (%)	Rechazo (g)	Pasante (g)	Finos netos	GBP			
	610,8	8,725	71,379	846,89	339,59	320,15	0,5242			
Granulometría producto	tamaño:	250	180	125	100	75	63	45	32	
	Rechazo acum(%):	0,361	6,068	30,708	60,705	74,211	79,289	84,836	87,280	
	Pasante acum(%):	99,639	93,932	69,292	39,295	25,789	20,711	15,164	12,720	
	Pasante acum (g):	1182,20	1114,48	822,14	466,23	305,98	245,74	179,91	150,92	
Corte a 500 micras	> 500 (g)	4,28	67,72	292,34	355,91	0,00	0,00	0,00	0,00	720,25
	< 500 (g)	0,00	0,00	0,00	160,24	60,25	65,82	29,00	150,92	466,23
Alimentación siguiente ciclo										
Recirculado (g)	4,28	67,72	292,34	355,91	0,00	0,00	0,00	0,00		
Fresco (g)	201,71	91,99	28,27	4,52	6,68	2,47	2,76	1,08		339,47
Total (g)	205,99	159,71	320,61	360,43	6,68	2,47	2,76	1,08		1059,73
Total (g)/Peso 700 cm3 (%)	17,36%	13,46%	27,02%	30,38%	0,56%	0,21%	0,23%	0,09%		89,32%

Tamaño	Retenido Ac. (%)	
250	17,36%	
180	30,82%	
125	57,84%	W(500,0)
100	88,22%	0,8822
75	88,79%	
63	88,99%	
45	89,23%	
32	89,32%	

6º Ciclo	nº vueltas	t (min)	Rechazo (%)	Rechazo (g)	Pasante (g)	Finos netos	GBP			
----------	------------	---------	-------------	-------------	-------------	-------------	-----	--	--	--



Capítulo 5: Verificación de resultados.

	621,9	8,884	71,486	848,16	338,32	320,41	0,5153			
Granulometría producto	tamaño:	250	180	125	100	75	63	45	32	
	Rechazo acum(%):	0,305	5,498	29,616	60,618	74,313	79,469	85,104	87,589	
	Pasante acum(%):	99,695	94,502	70,384	39,382	25,687	20,531	14,896	12,411	
	Pasante acum (g):	1182,86	1121,25	835,09	467,26	304,77	243,60	176,74	147,25	
Corte a 500 micras	> 500 (g)	3,62	61,62	286,15	367,83	0,00	0,00	0,00	0,00	719,22
	< 500 (g)	0,00	0,00	0,00	162,49	61,17	66,87	29,48	147,25	467,26
										1186,48

Intervalo	Peso (g)	Peso (%)	Luz malla	Pasante (%)
500 / 400	162,5	34,77	100	100,00
400 / 200	61,2	13,09	75	65,23
200 / 160	66,9	14,31	63	52,13
160 / 100	29,5	6,31	45	37,82
<100	147,3	31,51	32	31,51
	467,3	100,00		

LOG(LUZ MALLA)	1,8751	Pasante (%)	65,23
LOG(LUZ MALLA)	1,7993	Pasante (%)	52,13

LOG(d80)	1,8751
d80	75
Gbp	0,5236
Wi	52,87



5.3.6.- Zeolita.

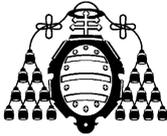
Las muestras de zeolita utilizadas han sido obtenidas del Laboratorio de Mineralurgia de la Escuela Politécnica de Mieres. Obteniéndose los siguientes resultados de la simulación:

Modelo:	$W(x,t) = W(x,0) \cdot \exp(-C \cdot x^n \cdot t)$				x en micras					
Parámetros:	C		n		t en minutos					
	6,7E-07		2,468574							
Simulación:	P100		Peso 700 cm ³		F80		Finos en alimentación (%)			
	100		737,67		250		6,68%			
Tamices:	355	250	180	125	100	75	63	45	32	0
Alimentación (%rechazo ac.):	0,2522	0,5441	0,7980	0,9039	0,9332	0,9601	0,9755	0,9894	0,9970	0,0030

Tamaño	Pasante ac. (%)	Rechazo ac. (%)
355	74,78%	25,22%
250	45,59%	54,41%
180	20,20%	79,80%
125	9,61%	90,39%
100	6,68%	93,32%
75	3,99%	96,01%
63	2,45%	97,55%
45	1,06%	98,94%
32	0,30%	99,70%

1º Ciclo	nº vueltas	t (min)	Rechazo (%)	Rechazo (g)	Pasante (g)	Finos netos	Gbp			
	100	1,429	85,907	633,71	103,96	54,70	0,5470			
Granulometría producto	tamaño:	250	180	125	100	75	63	45	32	
Rechazo acum(%):		24,571	56,044	78,300	85,907	92,183	95,005	97,807	99,208	
Pasante acum(%):		75,429	43,956	21,700	14,093	7,817	4,995	2,193	0,792	
Pasante acum (g):		556,42	324,25	160,08	103,96	57,66	36,85	16,18	5,84	
Corte a 500 micras	> 500 (g)	181,25	232,17	164,17	56,12	0,00	0,00	0,00	0,00	633,71
< 500 (g)	0,00	0,00	0,00	46,30	20,82	20,67	10,33	5,84	103,96	
Alimentación siguiente ciclo										
Recirculado (g)		181,25	232,17	164,17	56,12	0,00	0,00	0,00	0,00	633,71
Fresco (g)		56,40	26,31	10,99	3,04	2,79	1,60	1,44	0,79	103,34
Total (g)		237,65	258,48	175,16	59,15	2,79	1,60	1,44	0,79	737,05
Total (g)/Peso 700 cm ³ (%)		32,22%	35,04%	23,75%	8,02%	0,38%	0,22%	0,20%	0,11%	99,92%

Tamaño	Retenido Ac. (%)	
250	32,22%	
180	67,26%	
125	91,00%	W(500,0)
100	99,02%	0,9902
75	99,40%	
63	99,61%	
45	99,81%	
32	99,92%	



Capítulo 5: Verificación de resultados.

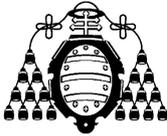
2º Ciclo	nº vueltas	t (min)	Rechazo (%)	Rechazo (g)	Pasante (g)	Finos netos	Gbp			
	372,6	5,323	72,735	536,54	201,13	194,19	0,5212			
Granulometría producto	tamaño:	250	180	125	100	75	63	45	32	
	Rechazo acum(%):	1,666	18,030	53,288	72,735	85,412	90,260	95,611	98,083	
	Pasante acum(%):	98,334	81,970	46,712	27,265	14,588	9,740	4,389	1,917	
	Pasante acum (g):	725,38	604,67	344,58	201,13	107,61	71,85	32,38	14,14	
Corte a 500 micras	> 500 (g)	12,29	120,71	260,09	143,46	0,00	0,00	0,00	0,00	536,54
	< 500 (g)	0,00	0,00	0,00	93,51	35,77	39,47	18,23	14,14	201,13
Alimentación siguiente ciclo										
Recirculado (g)	12,29	120,71	260,09	143,46	0,00	0,00	0,00	0,00		
Fresco (g)	109,11	50,90	21,25	5,87	5,39	3,09	2,78	1,53	199,93	
Total (g)	121,40	171,61	281,34	149,33	5,39	3,09	2,78	1,53	736,47	
Total (g)/Peso 700 cm3 (%)	16,46%	23,26%	38,14%	20,24%	0,73%	0,42%	0,38%	0,21%	99,84%	

Tamaño	Retenido Ac. (%)	
250	16,46%	
180	39,72%	
125	77,86%	W(500,0)
100	98,10%	0,9810
75	98,83%	
63	99,25%	
45	99,63%	
32	99,84%	

3º Ciclo	nº vueltas	t (min)	Rechazo (%)	Rechazo (g)	Pasante (g)	Finos netos	Gbp			
	378,6	5,409	71,702	528,93	208,74	195,31	0,5159			
Granulometría producto	tamaño:	250	180	125	100	75	63	45	32	
	Rechazo acum(%):	0,811	10,424	45,199	71,702	84,719	89,790	95,374	97,976	
	Pasante acum(%):	99,189	89,576	54,801	28,298	15,281	10,210	4,626	2,024	
	Pasante acum (g):	731,69	660,78	404,25	208,74	112,72	75,32	34,12	14,93	
Corte a 500 micras	> 500 (g)	5,98	70,91	256,53	195,51	0,00	0,00	0,00	0,00	528,93
	< 500 (g)	0,00	0,00	0,00	96,02	37,40	41,19	19,20	14,93	208,74
Alimentación siguiente ciclo										
Recirculado (g)	5,98	70,91	256,53	195,51	0,00	0,00	0,00	0,00		
Fresco (g)	113,24	52,83	22,06	6,10	5,60	3,21	2,89	1,58	207,50	
Total (g)	119,22	123,74	278,59	201,60	5,60	3,21	2,89	1,58	736,43	
Total (g)/Peso 700 cm3 (%)	16,16%	16,77%	37,77%	27,33%	0,76%	0,43%	0,39%	0,21%	99,83%	

Tamaño	Retenido Ac. (%)	
250	16,16%	
180	32,94%	
125	70,70%	W(500,0)
100	98,03%	0,9803
75	98,79%	
63	99,23%	
45	99,62%	
32	99,83%	

4º Ciclo	nº vueltas	t (min)	Rechazo (%)	Rechazo (g)	Pasante (g)	Finos netos	Gbp			
----------	------------	---------	-------------	-------------	-------------	-------------	-----	--	--	--



Capítulo 5: Verificación de resultados.

		381,6	5,451	71,476	527,26	210,41	196,47	0,5149		
Granulometría producto	tamaño:	250	180	125	100	75	63	45	32	
	Rechazo acum(%):	0,778	8,554	40,872	71,476	84,581	89,695	95,328	97,956	
	Pasante acum(%):	99,222	91,446	59,128	28,524	15,419	10,305	4,672	2,044	
	Pasante acum (g):	731,93	674,57	436,17	210,41	113,74	76,02	34,46	15,08	
Corte a 500 micras	> 500 (g)	5,74	57,36	238,40	225,76	0,00	0,00	0,00	0,00	527,26
	< 500 (g)	0,00	0,00	0,00	96,67	37,72	41,56	19,38	15,08	210,41
Alimentación siguiente ciclo										
	Recirculado (g)	5,74	57,36	238,40	225,76	0,00	0,00	0,00	0,00	
	Fresco (g)	114,15	53,25	22,23	6,14	5,64	3,23	2,91	1,60	209,16
	Total (g)	119,89	110,61	260,63	231,91	5,64	3,23	2,91	1,60	736,42
	Total (g)/Peso 700 cm3 (%)	16,25%	14,99%	35,33%	31,44%	0,76%	0,44%	0,39%	0,22%	99,83%

Tamaño	Retenido Ac. (%)	
250	16,25%	
180	31,25%	
125	66,58%	W(500,0)
100	98,02%	0,9802
75	98,78%	
63	99,22%	
45	99,61%	
32	99,83%	

5º Ciclo	nº vueltas	t (min)	Rechazo (%)	Rechazo (g)	Pasante (g)	Finos netos	Gbp			
	382,0	5,457	71,437	526,97	210,70	196,65	0,5148			
Granulometría producto	tamaño:	250	180	125	100	75	63	45	32	
	Rechazo acum(%):	0,780	8,102	38,462	71,437	84,556	89,678	95,320	97,952	
	Pasante acum(%):	99,220	91,898	61,538	28,563	15,444	10,322	4,680	2,048	
	Pasante acum (g):	731,92	677,90	453,95	210,70	113,92	76,14	34,52	15,10	
Corte a 500 micras	> 500 (g)	5,75	54,01	223,96	243,25	0,00	0,00	0,00	0,00	526,97
	< 500 (g)	0,00	0,00	0,00	96,78	37,78	41,62	19,42	15,10	210,70
Alimentación siguiente ciclo										
	Recirculado (g)	5,75	54,01	223,96	243,25	0,00	0,00	0,00	0,00	
	Fresco (g)	114,30	53,33	22,26	6,15	5,65	3,24	2,92	1,60	209,45
	Total (g)	120,05	107,34	246,22	249,40	5,65	3,24	2,92	1,60	736,42
	Total (g)/Peso 700 cm3 (%)	16,27%	14,55%	33,38%	33,81%	0,77%	0,44%	0,40%	0,22%	99,83%

Tamaño	Retenido Ac. (%)	
250	16,27%	
180	30,83%	
125	64,20%	W(500,0)
100	98,01%	0,9801
75	98,78%	
63	99,22%	
45	99,61%	
32	99,83%	

6º Ciclo	nº vueltas	t (min)	Rechazo (%)	Rechazo (g)	Pasante (g)	Finos netos	Gbp		
	382,1	5,459	71,430	526,92	210,75	196,68	0,5147		



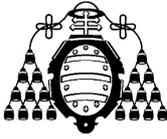
Capítulo 5: Verificación de resultados.

Granulometría producto	tamaño:	250	180	125	100	75	63	45	32	
	Rechazo acum(%):	0,780	7,990	37,085	71,430	84,552	89,675	95,319	97,952	
Pasante acum(%):	99,220	92,010	62,915	28,570	15,448	10,325	4,681	2,048		
Pasante acum (g):	731,91	678,73	464,10	210,75	113,96	76,16	34,53	15,11		
Corte a 500 micras	> 500 (g)	5,76	53,19	214,63	253,35	0,00	0,00	0,00	0,00	526,92
	< 500 (g)	0,00	0,00	0,00	96,80	37,79	41,63	19,42	15,11	210,75
										737,67

Intervalo	Peso (g)	Peso (%)	Luz malla	Pasante (%)
500 / 400	96,8	45,93	100	100,00
400 / 200	37,8	17,93	75	54,07
200 / 160	41,6	19,75	63	36,14
160 / 100	19,4	9,22	45	16,38
<100	15,1	7,17	32	7,17
	210,8	100,00		

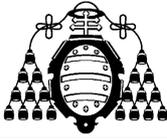
LOG(LUZ MALLA)	1,8751	Pasante (%)	54,07
LOG(LUZ MALLA)	1,7993	Pasante (%)	36,14

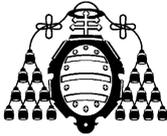
LOG(d80)	1,8751
d80	75
Gbp	0,5148
Wi	50,93



Capítulo 6

Conclusiones

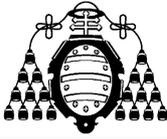




Al finalizar los ensayos realizados, se comprueba que:

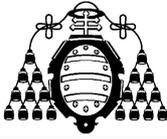
- Las simulaciones construidas a partir de modelos matemáticos, como el cinético acumulativo, permiten predecir el comportamiento de los materiales a tratar, siempre y cuando las muestras ensayadas sean preparadas en la alimentación de un modo conveniente (mismas cantidades para los diferentes intervalos ensayados).
- Los sucesivos ejemplos de simulaciones numéricas (MatLab) se mostraron como instrumentos convenientes y eficaces en la simulación del proceso de molienda.
- Conociendo las características del material a moler y los parámetros del circuito, se comprobó que se podía controlar y mejorar la eficiencia energética del proceso y aumentar la calidad de producto final.
- Los resultados simulados se mostraron muy próximos a los obtenidos experimentalmente, dentro de un rango de valores que variaba desde materiales muy blandos a muy duros.
- Los materiales ensayados más duros (y frágiles) daban índices de Bond más bajos que los materiales más blandos (debido a la dificultad que éstos tienen en reducir su tamaño por sus características de plasticidad, exfoliación, aglomeración, etc).
- Los materiales en las diferentes fases de reducciones de tamaño cuanto más homogéneos eran más constante se mantenía su índice de Bond durante las etapas analizadas. Para tamaños más pequeños y materiales no homogéneos el índice de Bond aumentaba a medida que disminuía el tamaño de partícula tratado.
- La aglomeración de partículas finas, por humedad o fenómenos electrostáticos, produce el denominado efecto “anzuelo de pescador”, para mejorar la recuperación de finos ha de evitarse esta aglomeración. El efecto comentado, pese a haber sido ensayados todos los materiales en las mismas condiciones ambientales, solo fue claramente observado en los ensayos realizados con scheelita.
- En cada caso hay que valorar si es necesario un determinado gasto en molienda, ya que para posteriores etapas en el proceso (por ejemplo para procesos de flotación) de una planta real las partículas menores de 5 micras pueden ser difíciles de concentrar (sucede lo mismo con las mayores a 300 micras).

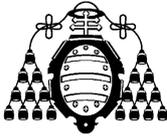
Como **conclusión final**, se propone que los modelos predictivos sean utilizados para verificar los resultados esperados en los ensayos de laboratorio para su futura implementación en plantas de producción reales, ya que el índice de trabajo de Bond para todos los materiales ensayados nunca tenía un valor fijo sino que se situaba entre un rango de valores que variaban desde propiedades de un material muy blando a muy duro.



Capítulo 7

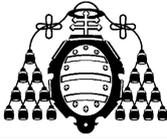
Líneas de Investigación Futuras





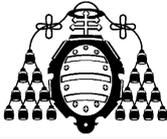
Como líneas de investigación futuras se proponen las siguientes:

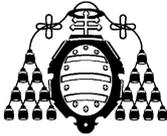
- Estudio de los parámetros de diseño de los equipos utilizados que influyen en la exactitud de los datos obtenidos para tamaños de partícula ultrafinos.
- Estudio para la mejora de la eficacia del proceso de molienda mediante la minimización de las pérdidas por ruido dentro del molino.
- Influencia de variables externas (humedad, temperatura, presión, etc.) dentro del proceso de molienda para tamaños ultrafinos.
- Análisis de la transición de las partículas de los materiales a moler entre tamaños micrométricos y nanométricos.
- Creación de nuevos programas de simulación del índice de Bond, más exactos, para todo tipo de tamaño de partículas mediante modelos matemáticos.



Capítulo 8

Bibliografía

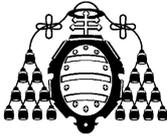




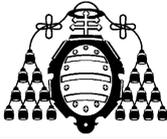
1. Afifi A., and S. Azen, *Statistical Analysis: A Computer Oriented Approach*, Acad. Press, New York, 1979.
2. Afifi A., and V. Clark, *Computer-Aided Multivariate Analysis*, CRC Press, 1996.
3. Aitchison J., *Statistical Prediction Analysis*, Chapman and Hall, 1975.
4. Aitchison J., and Dunsmore, I., *Statistical Prediction Analysis*, Cambridge University Press, 1975.
5. Albert A., and L. Gardner Jr., *Stochastic Approximation and Nonlinear Regression*, The MIT Press, 1967.
6. Alder H., and E. Roessler, *Introduction to Probability and Statistics*, Freeman, 1962.
7. Austin, L.G., Klimpel, R.R., Luckie, P.T., "Process engineering of size reduction", Society of Mining Engineers, New York (1984).
8. Balakrishnan N., and C. Clifford, *Order Statistics and Inference: Estimation Methods*, Academic Press, 1991.
9. Bechhofer R., T. Santner, and D. Goldsman, *The Design and Analysis of Experiments for Ranking and Selection*, Wiley, 1995.
10. Bond, F. C., (1961) "Crushing and Grinding Calculations", Allis Chalmers Manufacturing Co., Milwaukee, Wisconsin.
11. Box G., Hunter W., and J. Hunter, *Statistics for Experimenters: An Introduction to Design, Data Analysis and Model Building*, John Wiley & Sons, Inc., New York, NY, 1978.
12. Box G., and Tiao, *Bayesian Inference in Statistical Analysis*, Wiley, New York, 1992.
13. Buckley J., *Large Deviation Techniques in Decision, Simulation, and Estimation*, John Wiley, 1990.
14. Bunday B., *Statistical Methods in Reliability Theory and Practice*, New York, E. Horwood, 1991.
15. Burnham K, D. Anderson, *Model Selection and Interference: A Practical Information-Theoretic Approach*, Springer-Verlag, New York, 1998.
16. Chambers J., Cleveland, B. Kleiner, and P. Tukey, *Graphical Methods for Data Analysis*, Duxbury Press, Boston, 1983.
17. Chapman D., and R. Schaufele, *Elementary Probability Models and Statistical Inference*, Ginn, 1970.
18. Charles R., *Fundamental Concepts in the Design of Experiments*, Oxford University Press, 1993.
19. Chatfield C., *The Analysis of Time Series*, Chapman and Hall, 1996.
20. Christensen R., *Linear Models for Multivariate, Time Series and Spatial Data*, Springer, 1991.
21. Cody R., and J. Smith, *Applied Statistics and the SAS Programming*, Prentice Hall, 1997.
22. Coello Velázquez, A.L. "Mejoramiento de la tecnología de la molienda seca de la laterita". Tesis doctoral. Rusia: Instituto de Minas de San Petersburgo, (1993).
23. Coello Velázquez, A.L., Menéndez-Aguado, J.M., Brown, R.L., (2008), "Grindability of lateritic nickel ores in Cuba", *Powder Technology* 182 (1), pp. 113-115.
24. Cormen T., *Introduction to Algorithms*, McGraw-Hill, 1994.
25. De Finetti B., *Theory of Probability: A Critical Introductory Treatment*, Vol 1. Wiley, New York, 1974.
26. DeGroot M., *Probability and Statistics*, Addison-Wesley, 1986.
27. Del Castillo E., *Statistical Process and Adjustment Methods for Quality Control*, Wiley, 2002.
28. Del Villar, R. G., Thibaultb, J., (1996), Development of a softsensor for particle size monitoring, *Minerals Engineering*, 9, pp. 55-72.
29. Durbin J., and S. Koopman, *Time Series Analysis by State Space Models*, Oxford University Press, 2001.



30. Evans J., and D. Olson, *Statistics, Data Analysis, and Decision Modeling*, Prentice Hall, 2002.
31. Evans M., N. Hastings, and B. Peacock, *Statistical Distributions*, Wiley, 2000.
32. Fishman G., *Monte Carlo: Concepts, Algorithms, and Applications*, Springer, New Yorker, 1996.
33. Ghosh S., *Multivariate Analysis, Design of Experiments, and Survey Sampling*, Marcel Dekker, 1999.
34. Gilchrist W., *Statistical Modelling with Quantile Functions*, Chapman & Hall/CRC, 2000.
35. Guyot, O., Monredon, T., LaRosa, D., Broussaud, A., (2004), VisioRock, an integrated vision technology for advanced control of comminution circuits, *Minerals Engineering*, 17, pp. 1227-1235.
36. Harrell F, *Regression Modeling Strategies: With Applications to Linear Models, Logistic Regression, and Survival Analysis*, Springer Verlag, 2001.
37. Horst, W.E., Freeh, E.J., (1970) "Mathematical modelling applied to analysis and control of grinding circuits" AIME Annu. Meet., Denver.
38. Hoyle R., *Statistical Strategies for Small Sample Research*, Thousand Oaks, CA, Sage, 1999.
39. Kallenberg, O. *Probabilistic Symmetries and Invariance Principles*. Springer-Verlag, New York (2005).
40. Kannan D., and V. Lakshmikantham, (eds.), *Handbook of Stochastic Analysis and Applications*, Dekker, 2002.
41. Kapur, P.C., (1970) "Analysis of the Bond grindability test", Trans IMM, C-103/108
42. Karra, V.K., (1981) "Simulation of the Bond grindability test", CIM Bulletin.
43. Lynch, A.J., Lees, M.J. (1985) Simulation and Modelling, in Weiss, N.L., Ed., SME Mineral Processing Handbook, American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers, New York 3A:28-53.
44. Menéndez Álvarez, M., et al (1998) "Selección de materias primas en la fabricación de cemento", Ingeopres.
45. Menéndez Aguado, J.M., (1999), "Aplicación de la Simulación Matemática a la Determinación del Índice de Bond para molinos de Bolas", Memoria de Investigación, Departamento de Explotación y Prospección de Minas, Universidad de Oviedo.
46. Menéndez Aguado, J.M., (2001), "Aplicación de la Simulación Matemática a la Determinación de Consumos Energéticos en Fragmentación", PhD Thesis, published digitally by the University of Oviedo.
47. Napier-Munn, T. J., Morrel, S., Morrison, R. D., Kojovic, T., (1999), *Mineral Comminution Circuits: Their Operation and Optimisation*, JKMRRC, Queensland.
48. Niemi, A. J., Tian, L., Ylinen, R., (1997), Model predictive control for grinding system, *Control Engineering Practice*, 5, pp. 271-8.
49. Rose, H.E. y Sullivan, R.M., (1958), "Ball, Tube and Rod Mills", London, Constable.
50. O'Hagan A., *Kendall's Advanced Theory of Statistics*, Wiley, 1994.
51. Opoczky, L., (1981), "Ways of influencing the particle size distribution of ground product in dry ball mills", *Interceram*, 4, 327-389, 403.
52. Prasher. C. L., "Crushing and Grinding Process Handbook", John Wiley & Sons, Great Britain, 1987.
53. Schuhmann, R. Jr, (1960) "Energy input and size distribution in comminution" *Mining Engineering*.

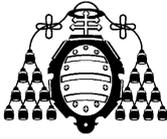


54. Schuhmann, R. Jr, (1940), "Principles of Comminution, I-Size Distribution and Surface Calculations" American Institute of Mining and Metallurgical Engineers, Technical Publication No.1189.
55. Tanaka K., *Time Series Analysis: Nonstationary and Noninvertible Distribution Theory*, John Wiley & Sons, New York, 1996.
56. Tanner M., *Tools for Statistical Inference: Methods for the Exploration of Posterior Distribution Functions*, Springer, New York, 1996.
57. Tarbouriech S., and G. Garcia, (Editors), *Control of Uncertain Systems with Bounded Inputs*, Springer, 1997.
58. Tatsuoka M., *Multivariate Analysis*, 1987, Wiley.
59. Taylor J., *Statistical Techniques for Data Analysis*, Springer, 1990.
60. Ramasamy, M., Narayanan, S. S., Rao, Ch. D. P.,(2005), Control of ball mill grinding circuit using model predictive control scheme, *Journal of Process Control*, 15, pp. 273-283.
61. Walpole R.E., Myers R.H., Myers S.L.: "Probabilidad y estadística para ingenieros", Ed. Prentice Hall, 1998, 6ª edición.
62. Xie M., T. Goh, and V. Kuralmani, *Statistical Models and Control Charts for High Quality Processes*, Kluwer, 2002.
63. Yandell B, *Practical Data Analysis for Designed Experiments*, CRC Press, 1997.

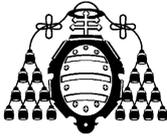


Anexo I

Ensayos de Bond realizados



Anexo I: Ensayos de Bond realizados.



1.- RELACIÓN DE ENSAYOS.

En la tabla que se muestra a continuación se indican los materiales con el número de ensayo y el tamaño de corte (P_{100}) al que se realizaron (para partículas no ultrafinas):

Material	P_{100} (μm)	Nº de ensayo
Caliza	75	1
	63	2
Carbón	75	3
	63	4
Magnetita	75	5
	63	6
Scheelita	75	7
	63	8
Sílice	75	9
	63	10
Zeolita	75	11
	63	12

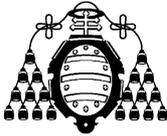
Tabla 1.- Relación de ensayos y materiales.

1.1.- Ensayo nº 1.

La granulometría de alimentación de la Caliza para la realización del ensayo de Bond es la siguiente:

Intervalo (μm)	Peso (g)	Peso (%)	Tamaño (μm)	Pasante acumulado (%)	
350/250	134	12,15%	350	100,00%	
250/200	213	19,31%	250	87,85%	F80
200/125	123	11,15%	200	68,54%	277
125/100	91	8,25%	125	57,39%	
100/75	98	8,88%	100	49,14%	
75/63	69	6,26%	75	40,25%	
63/45	87	7,89%	63	34,00%	
45/32	123	11,15%	45	26,11%	
<32	165	14,96%	32	14,96%	
	1103	100,00%			

Tabla 2.- Granulometría de la alimentación.



Los datos de partida fueron los siguientes:

- Tamaño de corte de malla: $P_{100} = 75 \mu\text{m}$
- Peso de 700 cm^3 : 1.103,0 g.
- Peso ideal de finos: 315,1 g
- Porcentaje de finos en la alimentación: 26,11%

Para cada ciclo se han ido obteniendo los siguientes resultados para así poder obtener un valor final del índice de molturabilidad (Gbp). En la siguiente tabla se muestran los resultados:

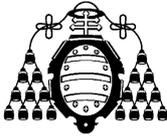
CICLO	Nº rev	Finos ya presentes	Finos producidos	Finos netos	Gbpi	
1	100,0	288,00	398	110,0	1,1	
2	192,0	103,92	444	340,1	1,77	Gbp
3	112,5	115,93	400	284,1	2,53	5,1949
4	83,4	104,44	399	294,6	3,53	
5	59,8	104,18	366	261,8	4,38	
6	50,1	95,56	358	262,4	5,24	
7	42,3	93,48	346	252,5	5,97	

Tabla 3.- Resumen de los resultados obtenidos.

El índice de molturabilidad resulta ser:

$$\mathbf{Gbp = 5,1949 \text{ g/rev}}$$

F80	P100	Gbp	P80		HGI
1103	32	5,1949	165		36,2377
					1,7134
					51,6849
	wi [kWh/sht]	wi [kWh/t]			
	10,89	12,00			



1.2.- Ensayo nº2.

La granulometría de alimentación de la Caliza para la realización del ensayo de Bond es la siguiente:

Intervalo (µm)	Peso (g)	Peso (%)	Tamaño (µm)	Pasante acumulado (%)	
350/250	87	8,06%	350	100,00%	
250/200	99	9,18%	250	91,94%	F80
200/125	67	6,21%	200	82,76%	167
125/100	125	11,58%	125	76,55%	
100/75	124	11,49%	100	64,97%	
75/63	154	14,27%	75	53,48%	
63/45	112	10,38%	63	39,20%	
45/32	133	12,33%	45	28,82%	
<32	178	16,50%	32	16,50%	
	1079	100,00%			

Tabla 5.- Granulometría de la alimentación.

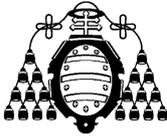
Los datos de partida fueron los siguientes:

- Tamaño de corte de malla: $P_{100} = 63 \mu\text{m}$
- Peso de 700 cm^3 : 1.079,0 g.
- Peso ideal de finos: 308,3 g
- Porcentaje de finos en la alimentación: 28,82%

Para cada ciclo se han ido obteniendo los siguientes resultados para así poder obtener un valor final del índice de molturabilidad (Gbp). En la siguiente tabla se muestran los resultados:

CICLO	Nº rev	Finos ya presentes	Finos producidos	Finos netos	Gbpi	
1	100,0	311,00	398	87,0	0,87	
2	222,5	114,72	444	329,3	1,48	Gbp
3	121,8	127,97	400	272,0	2,23	5,2842
4	86,4	115,29	399	283,7	3,28	
5	58,9	115,00	366	251,0	4,26	
6	47,6	105,49	358	252,5	5,31	
7	38,6	103,19	346	242,8	6,28	

Tabla 6.- Resumen de los resultados obtenidos.



El índice de molturabilidad resulta ser:

$$Gbp = 5,2842 \text{ g/rev}$$

F80	P100	Gbp	P80		HGI
1079	32	5,2842	165		36,4911
					1,7167
					52,0822
	wi [kWh/sht]	wi [kWh/t]			
	10,82	11,92			

1.3.- Ensayo nº3.

La granulometría de alimentación de la Carbón para la realización del ensayo de Bond es la siguiente:

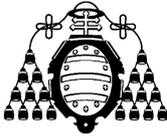
Intervalo (µm)	Peso (g)	Peso (%)	Tamaño (µm)	Pasante acumulado (%)	
350/250	23	3,43%	350	100,00%	
250/200	50	7,46%	250	96,57%	F80
200/125	40	5,97%	200	89,10%	86
125/100	80	11,94%	125	83,13%	
100/75	84	12,54%	100	71,19%	
75/63	75	11,19%	75	58,66%	
63/45	60	8,96%	63	47,46%	
45/32	98	14,63%	45	38,51%	
<32	160	23,88%	32	23,88%	
	670	100,00%			

Tabla 7.- Granulometría de la alimentación.

Los datos de partida fueron los siguientes:

- Tamaño de corte de malla: $P_{100} = 75 \mu\text{m}$
- Peso de 700 cm^3 : 670,0 g.
- Peso ideal de finos: 191,4 g.
- Porcentaje de finos en la alimentación: 38,51%

Para cada ciclo se han ido obteniendo los siguientes resultados para así poder obtener un valor final del índice de molturabilidad (Gbp). En la siguiente tabla se muestran los resultados:



CICLO	Nº rev	Finos ya presentes	Finos producidos	Finos netos	Gbpi	
1	100,0	258,00	259	1,0	0,01	
2	9.169,4	99,73	269	169,3	0,02	Gbp
3	4.758,6	103,59	269	165,4	0,03	1,0173
4	2.527,1	103,59	299	195,4	0,08	
5	986,6	115,14	321	205,9	0,21	
6	325,0	123,61	338	214,4	0,66	
7	92,9	130,16	333	202,8	2,18	

Tabla 8.- Resumen de los resultados obtenidos.

El índice de molturabilidad resulta ser:

$$\mathbf{Gbp = 1,0173 \text{ g/rev}}$$

F80	P100	Gbp	P80		HGI
670	32	1,0173	166		7,7907
					0,9798
					9,5445
	wi [kWh/sht]	wi [kWh/t]			
	50,67	55,84			

1.4.- Ensayo nº4.

La granulometría de alimentación de la Carbón para la realización del ensayo de Bond es la siguiente:

Intervalo (µm)	Peso (g)	Peso (%)	Tamaño (µm)	Pasante acumulado (%)	
350/250	19	2,72%	350	100,00%	
250/200	48	6,88%	250	97,28%	F80
200/125	38	5,44%	200	90,40%	57
125/100	67	9,60%	125	84,96%	
100/75	92	13,18%	100	75,36%	
75/63	86	12,32%	75	62,18%	
63/45	95	13,61%	63	49,86%	
45/32	113	16,19%	45	36,25%	
<32	140	20,06%	32	20,06%	
	698	100,00%			

Tabla 9.- Granulometría de la alimentación.



Los datos de partida fueron los siguientes:

- Tamaño de corte de malla: $P_{100} = 63 \mu\text{m}$
- Peso de 700 cm^3 : 698,0 g.
- Peso ideal de finos: 199,4 g.
- Porcentaje de finos en la alimentación: 36,25%

Para cada ciclo se han ido obteniendo los siguientes resultados para así poder obtener un valor final del índice de molturabilidad (Gbp). En la siguiente tabla se muestran los resultados:

CICLO	Nº rev	Finos ya presentes	Finos producidos	Finos netos	Gbpi	
1	100,0	253,00	259	6,0	0,06	
2	1.759,2	93,88	269	175,1	0,1	Gbp
3	1.023,9	97,50	269	171,5	0,17	2,8272
4	608,5	97,50	299	201,5	0,33	
5	275,0	108,38	321	212,6	0,77	
6	107,4	116,35	338	221,6	2,06	
7	37,3	122,51	333	210,5	5,65	

Tabla 10.- Resumen de los resultados obtenidos.

El índice de molturabilidad resulta ser:

$$\mathbf{Gbp = 2,8272 \text{ g/rev}}$$

F80	P100	Gbp	P80		HGI
698	32	2,8272	166		18,3741
					1,3892
					24,5041
	wi [kWh/sht]	wi [kWh/t]			
	21,48	23,67			



1.5.- Ensayo nº5.

La granulometría de alimentación de la Magnetita para la realización del ensayo de Bond es la siguiente:

Intervalo (µm)	Peso (g)	Peso (%)	Tamaño (µm)	Pasante acumulado (%)	
350/250	69	3,88%	350	100,00%	
250/200	89	5,01%	250	96,12%	F80
200/125	198	11,14%	200	91,11%	125
125/100	192	10,80%	125	79,97%	
100/75	231	13,00%	100	69,16%	
75/63	269	15,14%	75	56,16%	
63/45	153	8,61%	63	41,02%	
45/32	231	13,00%	45	32,41%	
<32	345	19,41%	32	19,41%	
	1777	100,00%			

Tabla 11.- Granulometría de la alimentación.

Los datos de partida fueron los siguientes:

- Tamaño de corte de malla: $P_{100} = 75 \mu\text{m}$
- Peso de 700 cm^3 : 1.777,0 g.
- Peso ideal de finos: 507,7 g.
- Porcentaje de finos en la alimentación: 32,41%

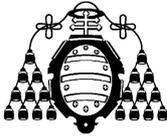
Para cada ciclo se han ido obteniendo los siguientes resultados para así poder obtener un valor final del índice de molturabilidad (Gbp). En la siguiente tabla se muestran los resultados:

CICLO	Nº rev	Finos ya presentes	Finos producidos	Finos netos	Gbpi	
1	100,0	576,00	722	146,0	1,46	
2	187,5	234,03	600	366,0	1,95	Gbp
3	160,4	194,49	569	374,5	2,33	2,5391
4	138,5	184,44	599	414,6	2,99	
5	104,7	194,16	496	301,8	2,88	
6	120,4	160,77	499	338,2	2,81	
7	123,2	161,75	399	237,3	1,93	

Tabla 12.- Resumen de los resultados obtenidos.

El índice de molturabilidad resulta ser:

$$\text{Gbp} = 2,5391$$



F80	P100	Gbp	P80		HGI
1777	32	2,5391	134		26,5019
					1,5640
					36,6472
	wi [kWh/sht]	wi [kWh/t]			
	14,89	16,41			

1.6.- Ensayo nº6.

La granulometría de alimentación de la Magnetita para la realización del ensayo de Bond es la siguiente:

Intervalo (µm)	Peso (g)	Peso (%)	Tamaño (µm)	Pasante acumulado (%)	
350/250	59	3,32%	350	100,00%	
250/200	79	4,45%	250	96,68%	F80
200/125	199	11,20%	200	92,23%	118
125/100	201	11,32%	125	81,02%	
100/75	243	13,68%	100	69,71%	
75/63	273	15,37%	75	56,02%	
63/45	161	9,07%	63	40,65%	
45/32	229	12,89%	45	31,59%	
<32	332	18,69%	32	18,69%	
	1776	100,00%			

Tabla 13.- Granulometría de la alimentación.

Los datos de partida fueron los siguientes:

- Tamaño de corte de malla: $P_{100} = 63 \mu\text{m}$
- Peso de 700 cm^3 : 1.776,0 g.
- Peso ideal de finos: 507,4 g.
- Porcentaje de finos en la alimentación: 31,59%

Para cada ciclo se han ido obteniendo los siguientes resultados para así poder obtener un valor final del índice de molturabilidad (Gbp). En la siguiente tabla se muestran los resultados:

CICLO	Nº rev	Finos ya presentes	Finos producidos	Finos netos	Gbpi	
1	100,0	561,00	722	161,0	1,61	



2	173,5	228,06	600	371,9	2,14	Gbp
3	148,3	189,53	569	379,5	2,56	2,7873
4	128,1	179,73	599	419,3	3,27	
5	97,2	189,21	496	306,8	3,16	
6	111,1	156,68	499	342,3	3,08	
7	113,6	157,62	399	241,4	2,13	

Tabla 14.- Resumen de los resultados obtenidos.

El índice de molturabilidad resulta ser:

$$\mathbf{Gbp = 2,7873}$$

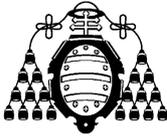
F80	P100	Gbp	P80	HGI
1776	32	2,7873	134	28,6047
				1,6005
				39,8548
	wi [kWh/sht]	wi [kWh/t]		
	13,80	15,21		

1.7.- Ensayo nº7.

La granulometría de alimentación de la Scheelita para la realización del ensayo de Bond es la siguiente:

Intervalo (µm)	Peso (g)	Peso (%)	Tamaño (µm)	Pasante acumulado (%)	
350/250	57	3,20%	350	100,00%	
250/200	87	4,89%	250	96,80%	F80
200/125	91	5,12%	200	91,91%	25
125/100	154	8,66%	125	86,79%	
100/75	223	12,54%	100	78,13%	
75/63	267	15,01%	75	65,60%	
63/45	266	14,95%	63	50,59%	
45/32	332	18,66%	45	35,64%	
<32	302	16,98%	32	16,98%	
	1779	100,00%			

Tabla 15.- Granulometría de la alimentación.



Los datos de partida fueron los siguientes:

- Tamaño de corte de malla: $P_{100} = 75 \mu\text{m}$
- Peso de 700 cm^3 : 1.779,0 g.
- Peso ideal de finos: 508,3 g.
- Porcentaje de finos en la alimentación: 35,64%

Para cada ciclo se han ido obteniendo los siguientes resultados para así poder obtener un valor final del índice de molturabilidad (Gbp). En la siguiente tabla se muestran los resultados:

CICLO	Nº rev	Finos ya presentes	Finos producidos	Finos netos	Gbpi	
1	100,0	634,00	698	64,0	0,64	
2	405,5	248,75	711	462,2	1,14	Gbp
3	223,6	253,39	625	371,6	1,66	4,2840
4	171,8	222,74	600	377,3	2,2	
5	134,1	213,83	655	441,2	3,29	
6	83,6	233,43	599	365,6	4,38	
7	67,4	213,47	563	349,5	5,19	

Tabla 16.- Resumen de los resultados obtenidos.

El índice de molturabilidad resulta ser:

$$\mathbf{Gbp = 4,284 \text{ g/rev}}$$

F80	P100	Gbp	P80		HGI
1779	32	4,2840	50		76,6152
					2,0707
					117,6727
	wi [kWh/sht]	wi [kWh/t]			
	5,15	5,68			



1.8.- Ensayo nº8.

La granulometría de alimentación de la Scheelita para la realización del ensayo de Bond es la siguiente:

Intervalo (µm)	Peso (g)	Peso (%)	Tamaño (µm)	Pasante acumulado (%)	
350/250	65	3,55%	350	100,00%	
250/200	145	7,93%	250	96,45%	F80
200/125	189	10,33%	200	88,52%	138
125/100	199	10,88%	125	78,18%	
100/75	221	12,08%	100	67,30%	
75/63	159	8,69%	75	55,22%	
63/45	255	13,94%	63	46,53%	
45/32	265	14,49%	45	32,59%	
<32	331	18,10%	32	18,10%	
	1829	100,00%			

Tabla 17.- Granulometría de la alimentación.

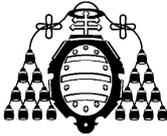
Los datos de partida fueron los siguientes:

- Tamaño de corte de malla: $P_{100} = 63 \mu\text{m}$
- Peso de 700 cm^3 : 1.829,0 g.
- Peso ideal de finos: 522,6 g.
- Porcentaje de finos en la alimentación: 32,59%

Para cada ciclo se han ido obteniendo los siguientes resultados para así poder obtener un valor final del índice de molturabilidad (Gbp). En la siguiente tabla se muestran los resultados:

CICLO	Nº rev	Finos ya presentes	Finos producidos	Finos netos	Gbpi	
1	100,0	596,00	698	102,0	1,02	
2	289,3	227,45	711	483,5	1,67	Gbp
3	174,1	231,69	625	393,3	2,26	4,7984
4	141,1	203,66	600	396,3	2,81	
5	116,5	195,52	655	459,5	3,95	
6	78,3	213,44	599	385,6	4,92	
7	66,5	195,19	563	367,8	5,53	

Tabla 18.- Resumen de los resultados obtenidos.



El índice de molturabilidad resulta ser:

$$\text{Gbp} = 4,7984 \text{ g/rev}$$

F80	P100	Gbp	P80		HGI
1829	32	4,7984	50		84,3141
					2,1164
					130,7295
	wi [kWh/sht]	wi [kWh/t]			
	4,68	5,16			

1.9.- Ensayo nº9.

La granulometría de alimentación de la Sílice para la realización del ensayo de Bond es la siguiente:

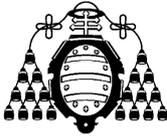
Intervalo (µm)	Peso (g)	Peso (%)	Tamaño (µm)	Pasante acumulado (%)	
350/250	20	2,08%	350	100,00%	
250/200	30	3,12%	250	97,92%	F80
200/125	112	11,64%	200	94,80%	105
125/100	123	12,79%	125	83,16%	
100/75	112	11,64%	100	70,37%	
75/63	150	15,59%	75	58,73%	
63/45	104	10,81%	63	43,14%	
45/32	112	11,64%	45	32,33%	
<32	199	20,69%	32	20,69%	
	962	100,00%			

Tabla 19.- Granulometría de la alimentación.

Los datos de partida fueron los siguientes:

- Tamaño de corte de malla: $P_{100} = 75 \mu\text{m}$
- Peso de 700 cm^3 : 962,0 g.
- Peso ideal de finos: 274,9 g.
- Porcentaje de finos en la alimentación: 32,33%

Para cada ciclo se han ido obteniendo los siguientes resultados para así poder obtener un valor final del índice de molturabilidad (Gbp). En la siguiente tabla se muestran los resultados:



CICLO	Nº rev	Finos ya presentes	Finos producidos	Finos netos	Gbpi	
1	100,0	311,00	322	11,0	0,11	
2	1.552,4	104,10	365	260,9	0,17	Gbp
3	933,3	118,00	325	207,0	0,22	1,4519
4	765,5	105,07	478	372,9	0,49	
5	247,0	154,53	359	204,5	0,83	
6	191,8	116,06	399	282,9	1,47	
7	98,9	128,99	332	203,0	2,05	

Tabla 20.- Resumen de los resultados obtenidos.

El índice de molturabilidad resulta ser:

$$\text{Gbp} = 1,4519 \text{ g/rev}$$

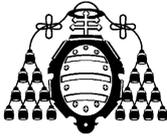
F80	P100	Gbp	P80		HGI
962	32	1,4519	55		27,4192
					1,5803
					38,0435
	wi [kWh/sht]	wi [kWh/t]			
	14,40	15,86			

1.10.- Ensayo nº 10.

La granulometría de alimentación de la Sílice para la realización del ensayo de Bond es la siguiente:

Intervalo (µm)	Peso (g)	Peso (%)	Tamaño (µm)	Pasante acumulado (%)	
350/250	79	7,89%	350	100,00%	
250/200	165	16,48%	250	92,11%	F80
200/125	112	11,19%	200	75,62%	229
125/100	102	10,19%	125	64,44%	
100/75	79	7,89%	100	54,25%	
75/63	50	5,00%	75	46,35%	
63/45	111	11,09%	63	41,36%	
45/32	180	17,98%	45	30,27%	
<32	123	12,29%	32	12,29%	
	1001	100,00%			

Tabla 21.- Granulometría de la alimentación.



Los datos de partida fueron los siguientes:

- Tamaño de corte de malla: $P_{100} = 63 \mu\text{m}$
- Peso de 700 cm^3 : 1.001,0 g.
- Peso ideal de finos: 286,0 g.
- Porcentaje de finos en la alimentación: 30,27%

Para cada ciclo se han ido obteniendo los siguientes resultados para así poder obtener un valor final del índice de molturabilidad (Gbp). En la siguiente tabla se muestran los resultados:

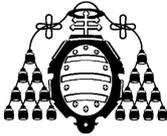
CICLO	Nº rev	Finos ya presentes	Finos producidos	Finos netos	Gbpi	
1	100,0	303,00	322	19,0	0,19	
2	992,3	97,47	365	267,5	0,27	Gbp
3	651,0	110,48	325	214,5	0,33	1,5944
4	569,4	98,38	478	379,6	0,67	
5	211,9	144,69	359	214,3	1,01	
6	175,4	108,67	399	290,3	1,66	
7	99,8	120,78	332	211,2	2,12	

Tabla 22.- Resumen de los resultados obtenidos.

El índice de molturabilidad resulta ser:

$$\text{Gbp} = 1,5944 \text{ g/rev}$$

F80	P100	Gbp	P80		HGI
1001	32	1,5944	55		29,7901
					1,6199
					41,6735
	wi [kWh/sht]	wi [kWh/t]			
	13,25	14,60			



1.11.- Ensayo nº 11.

La granulometría de alimentación de la Zeolita para la realización del ensayo de Bond es la siguiente:

Intervalo (µm)	Peso (g)	Peso (%)	Tamaño (µm)	Pasante acumulado (%)	
350/250	30	3,42%	350	100,00%	
250/200	60	6,83%	250	96,58%	F80
200/125	75	8,54%	200	89,75%	114
125/100	98	11,16%	125	81,21%	
100/75	98	11,16%	100	70,05%	
75/63	100	11,39%	75	58,88%	
63/45	101	11,50%	63	47,49%	
45/32	112	12,76%	45	35,99%	
<32	204	23,23%	32	23,23%	
	878	100,00%			

Tabla 23.- Granulometría de la alimentación.

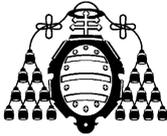
Los datos de partida fueron los siguientes:

- Tamaño de corte de malla: $P_{100} = 75 \mu\text{m}$
- Peso de 700 cm^3 : 878,0 g.
- Peso ideal de finos: 250,9 g.
- Porcentaje de finos en la alimentación: 35,99%

Para cada ciclo se han ido obteniendo los siguientes resultados para así poder obtener un valor final del índice de molturabilidad (Gbp). En la siguiente tabla se muestran los resultados:

CICLO	Nº rev	Finos ya presentes	Finos producidos	Finos netos	Gbpi	
1	100,0	316,00	322	6,0	0,06	
2	2.249,4	115,89	344	228,1	0,1	Gbp
3	1.252,9	123,81	312	188,2	0,15	1,1273
4	922,5	112,29	399	286,7	0,31	
5	345,1	143,60	321	177,4	0,51	
6	263,2	115,53	399	283,5	1,08	
7	99,6	143,60	322	178,4	1,79	

Tabla 24.- Resumen de los resultados obtenidos.



El índice de molturabilidad resulta ser:

$$G_{bp} = 1,1273 \text{ g/rev}$$

F80	P100	G _{bp}	P80		HGI
878	32	1,1273	112		13,1653
					1,2301
					16,9881
	wi [kWh/sht]	wi [kWh/t]			
	29,98	33,04			

1.12.- Ensayo nº 12.

La granulometría de alimentación de la Zeolita para la realización del ensayo de Bond es la siguiente:

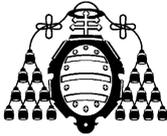
Intervalo (µm)	Peso (g)	Peso (%)	Tamaño (µm)	Pasante acumulado (%)	
350/250	36	4,38%	350	100,00%	
250/200	58	7,06%	250	95,62%	F80
200/125	78	9,49%	200	88,56%	132
125/100	91	11,07%	125	79,08%	
100/75	56	6,81%	100	68,00%	
75/63	91	11,07%	75	61,19%	
63/45	92	11,19%	63	50,12%	
45/32	98	11,92%	45	38,93%	
<32	222	27,01%	32	27,01%	
	822	100,00%			

Tabla 25.- Granulometría de la alimentación.

Los datos de partida fueron los siguientes:

- Tamaño de corte de malla: $P_{100} = 63 \mu\text{m}$
- Peso de 700 cm^3 : 822,0 g.
- Peso ideal de finos: 234,9 g.
- Porcentaje de finos en la alimentación: 38,93%

Para cada ciclo se han ido obteniendo los siguientes resultados para así poder obtener un valor final del índice de molturabilidad (G_{bp}). En la siguiente tabla se muestran los resultados:



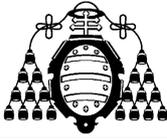
CICLO	Nº rev	Finos ya presentes	Finos producidos	Finos netos	Gbpi	
1	100,0	320,00	322	2,0	0,02	
2	5.475,2	125,35	344	218,6	0,04	Gbp
3	2.527,7	133,92	312	178,1	0,07	1,0441
4	1.609,5	121,46	399	277,5	0,17	
5	461,2	155,33	321	165,7	0,36	
6	305,9	124,96	399	274,0	0,9	
7	88,8	155,33	322	166,7	1,88	

Tabla 26.- Resumen de los resultados obtenidos.

El índice de molturabilidad resulta ser:

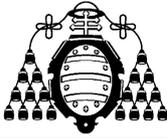
$$\mathbf{Gbp = 1,0441 \text{ g/rev}}$$

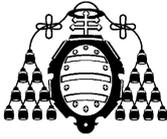
F80	P100	Gbp	P80		HGI
822	32	1,0441	112		12,1320
					1,1911
					15,5287
	wi [kWh/sht]	wi [kWh/t]			
	32,54	35,86			



Anexo II

Equipos Utilizados





1.- INTRODUCCIÓN.

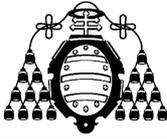
En este anexo se describen, someramente, las características de los equipos utilizados en los diferentes ensayos realizados.

2.- PROBETA.

Probeta de laboratorio fabricada en vidrio de capacidad de 1000 cm³, con la que se midió los 700 cm³ de material necesario para los ensayos realizados.



Foto 1.- Probeta de 1000cm³.



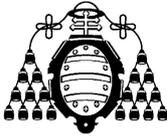
3.- MOLINO DE BOLAS.

Se utilizó un molino de bolas (marca BICO), con las siguientes características técnicas:

- Potencia del motor: 0,75 kW
- Velocidad de giro: 70 r.p.m.
- Longitud (interna) del molino: 12 pulgadas (30,5 cm aprox.)
- Diámetro (interno) del molino: 12 pulgadas (30,5 cm aprox.)
- Dimensión de la boca de admisión: 28x10 cm aprox.



Foto 2.- Molino de bolas utilizado en el Laboratorio de Tecnología Mineralúrgica de la Escuela Politécnica de Mieres.



4.- TAMIZADORA Y TAMICES.

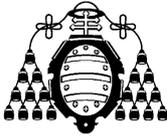
Las tamizadoras usadas fueron las de tipo AS200 y AS450 (marca RETSCH), utilizadas tanto para el análisis granulométrico y como cierre de circuito del ensayo de Bond. Los tamices utilizados son del mismo fabricante (RETSCH).

Características de la tamizadora AS200:

- Rango de medida: 20 μm - 25 mm
- Movimiento del producto a tamizar: proyección con impulso rotatorio
- Amplitud: analógico, 0 - 3 mm
- Indicación de tiempos: analógico, 1 - 60 min
- Diámetros de tamices apropiados: 100 mm / 150 mm / 200 mm / 203 mm (8")



Foto 3.- Tamizadora AS200 y tamices.

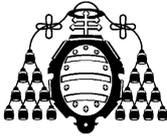


Características de la tamizadora AS450:

- Rango de medida: 20 μm - 125 mm
- Movimiento del producto a tamizar: proyección por impulso de rotación - movimiento tridimensional
- Amplitud: digital, 0,2 - > 2,2 mm
- Diámetros de tamices apropiados: 400 mm / 450 mm



Foto 4.- Tamizadora AS450 y tamices.



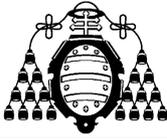
5.- BALANZA.

Utilizada para el cálculo del peso de los 700 cm³ de material inicial necesario y los pesos de los finos y alimentación nueva, también se usó para el análisis granulométrico del material.

La balanza es de la marca A&D, modelo EK-6000 H. Permite pesar hasta 6.000 gramos con un desvío de $\pm 0,1$ g.



Foto 5.- Balanza EK-6000H (A&D)



6.- DESMUESTREADOR

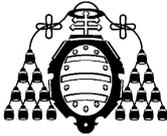
Se han utilizado dos desmuestreadores de canales (tipo Jones), uno de tamaño intermedio y otro de tamaño grande.



Foto 6.- Desmuestreador "intermedio" de canal tipo Jones.



Foto 7.- Desmuestreador "grande" de canal tipo Jones.



7.- ANALIZADOR DE TAMAÑO DE PARTÍCULAS

El equipo LS 13 320 de Beckman Coulter consistente en un banco óptico y tres módulos de muestreo: un módulo de líquido universal, un sistema tornado para polvo seco y un módulo de microlíquidos para cantidades pequeñas de muestra.

El sistema permite analizar distribuciones de tamaño de partícula desde 0,04 hasta 2000 micras

La medida de la distribución del tamaño de partícula de una muestra se basa en el análisis del patrón de dispersión generado al interactuar la luz con la muestra. Este patrón de dispersión está formado por la intensidad de la luz como función del ángulo de dispersión.

Para poder calcular la distribución de tamaño, el patrón de dispersión compuesto es transformado en un número de funciones individuales pero aditivas, una por cada clasificación de tamaño y la amplitud relativa de cada patrón se usa para medir el volumen relativo de partículas esféricas de ese tamaño. Esta descomposición está basada en las teorías de dispersión de la luz de Fraunhofer o de Mie.

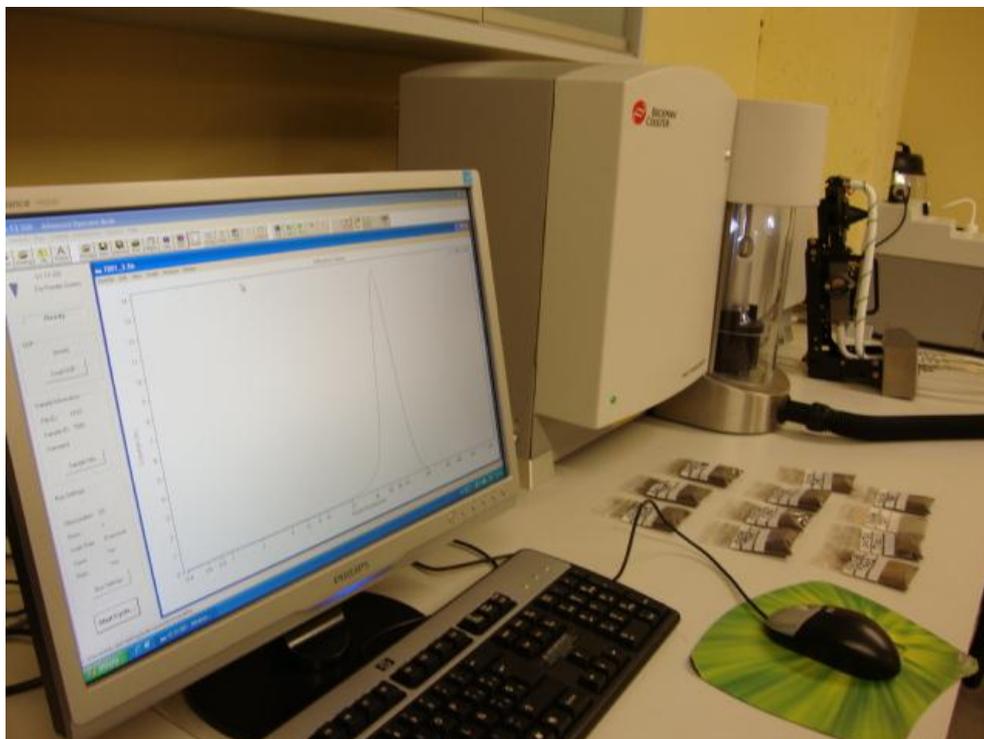


Foto 8.- Módulo DPS.

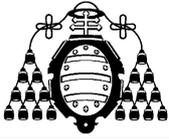


Foto 9.- Módulo DPS.

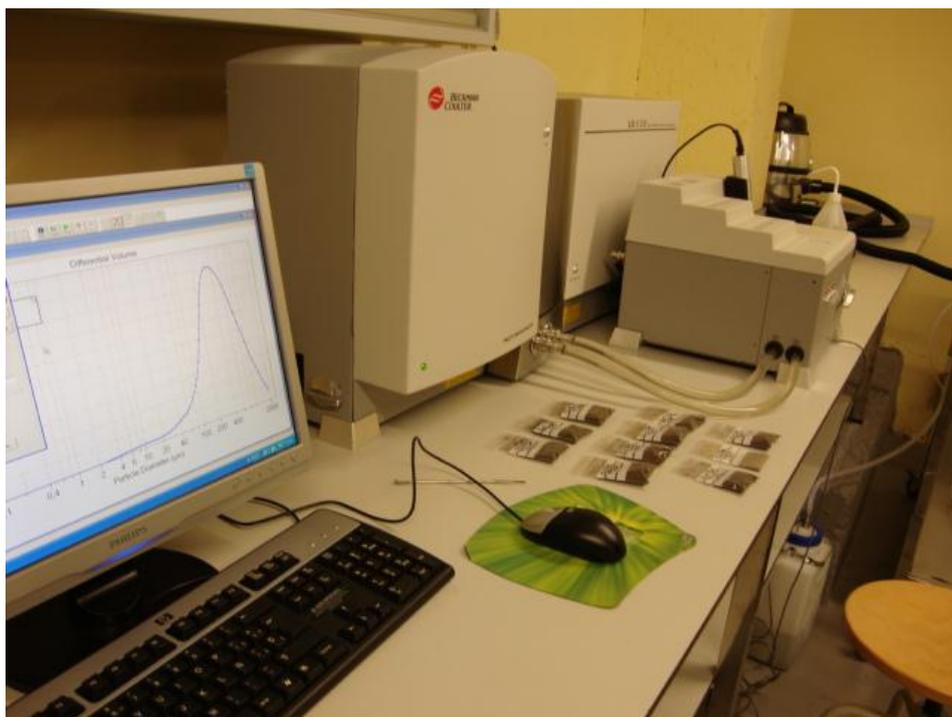


Foto 10.- Módulo ALM.

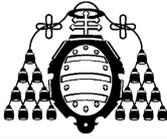


Foto 11.- Módulo ALM.

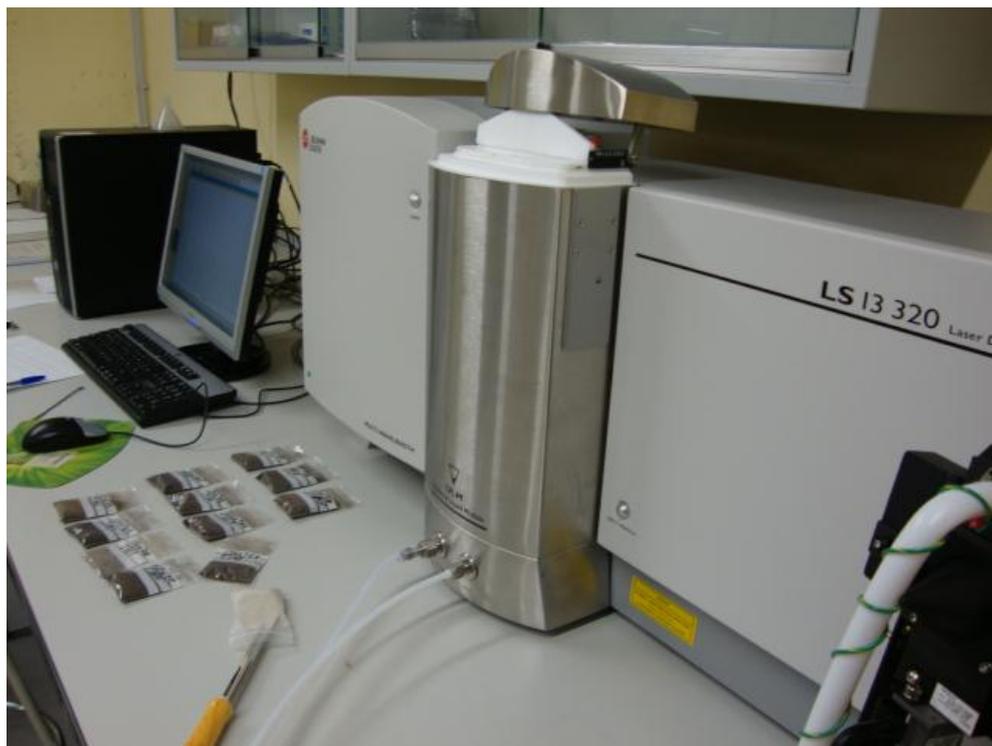
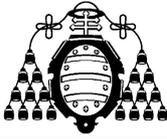
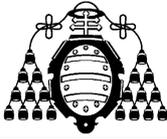


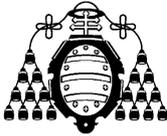
Foto 10.- Módulo ULM.



Anexo III

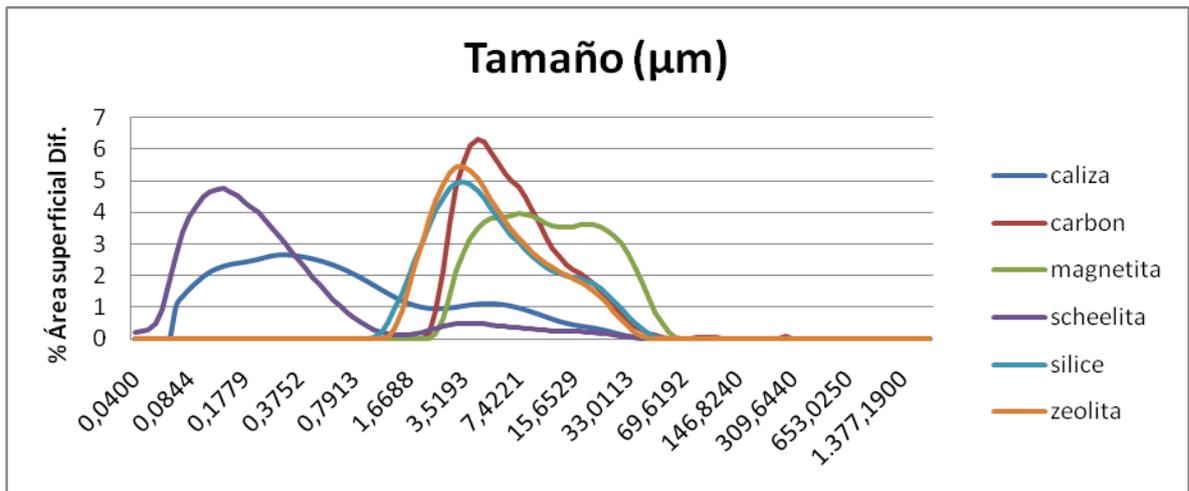
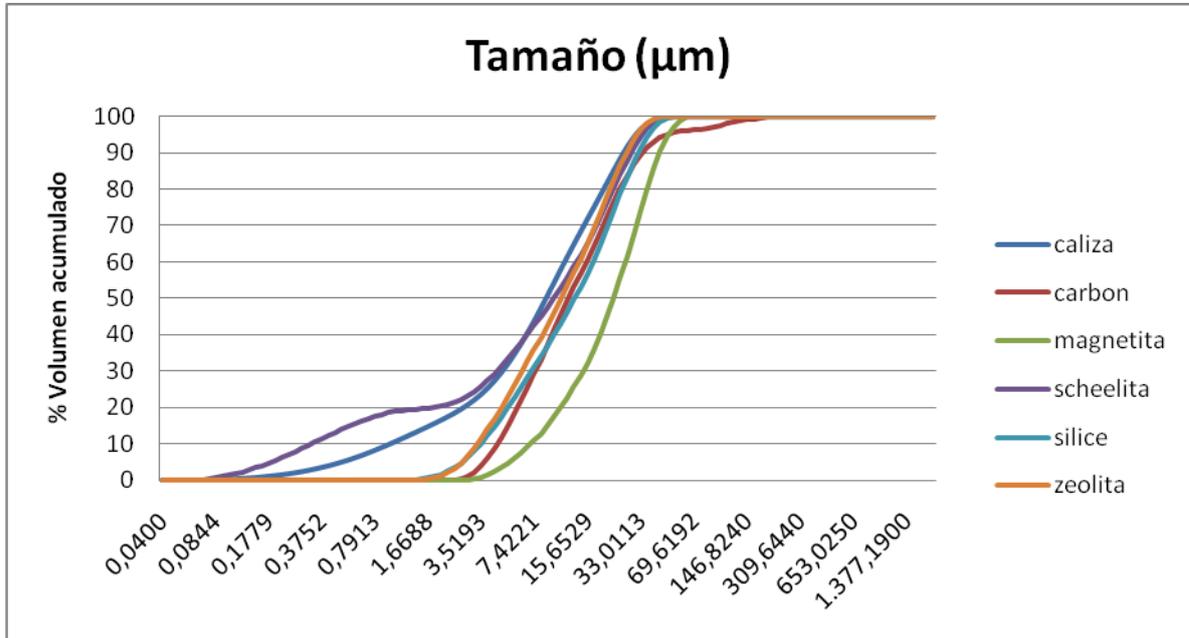
Gráficos y cálculos





1.- GRÁFICOS (ALM).

Gráficos obtenidos utilizando el módulo líquido acuoso (ALM):



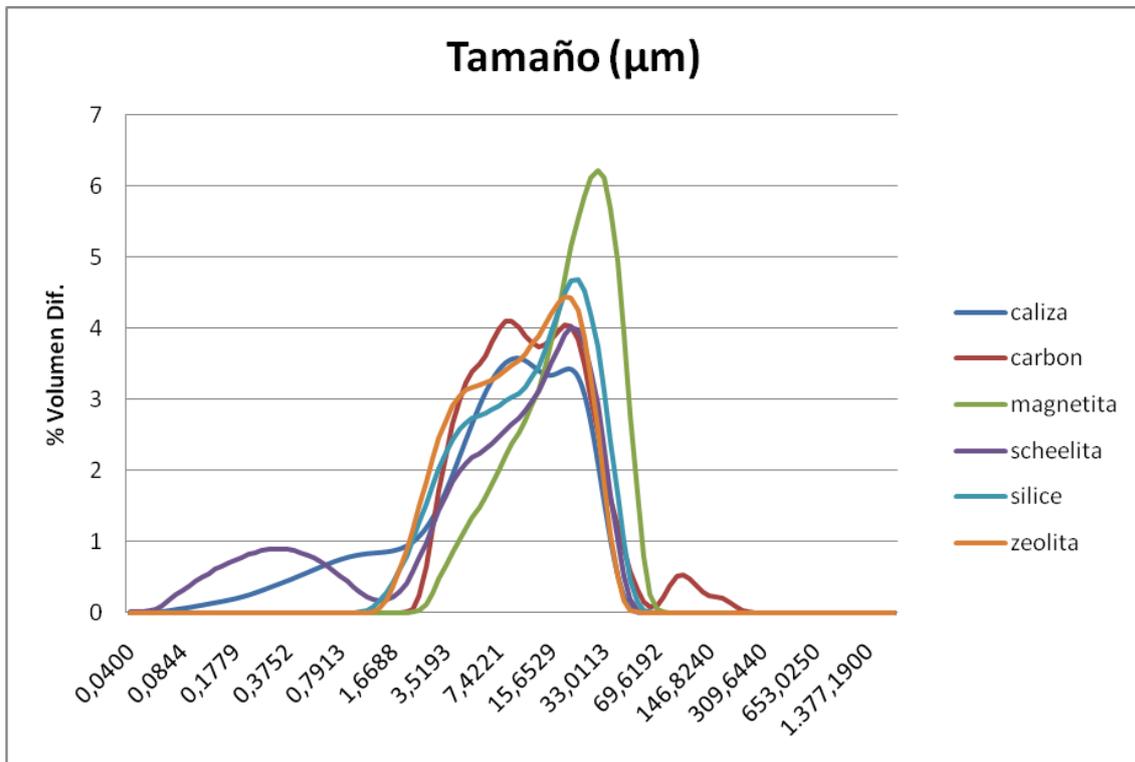
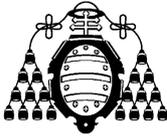
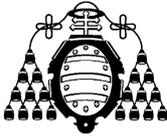


Tabla de datos obtenida con el analizador Coulter-Beckman para la sílice:

Diámetro canal (µm)	% Volumen Dif.	% Área sup. Dif.	% Volumen acumulado
0,0400	0,0015	0.0814641	0,0000
0,0439	0,0018	0.088816	0,0015
0,0482	0,0026	0.116669	0,0033
0,0529	0,0047	0.193322	0,0059
0,0581	0,0100	0.373089	0,0106
0,0638	0,0202	0.683852	0,0207
0,0700	0,0346	1,0684	0,0409
0,0768	0,0490	1,3784	0,0755
0,0844	0,0630	1,6136	0,1245
0,0926	0,0776	1,8112	0,1875
0,1017	0,0941	2,0006	0,2651
0,1116	0,1109	2,1466	0,3592
0,1225	0,1274	2,2473	0,4701
0,1345	0,1447	2,3255	0,5975
0,1476	0,1627	2,3806	0,7422
0,1621	0,1814	2,4182	0,9049
0,1779	0,2017	2,4500	1,0863



0,1953	0,2251	2,4903	1,2880
0,2144	0,2521	2,5412	1,5131
0,2354	0,2830	2,5978	1,7652
0,2584	0,3165	2,6469	2,0482
0,2836	0,3515	2,6780	2,3647
0,3113	0,3863	2,6809	2,7162
0,3418	0,4215	2,6646	3,1025
0,3752	0,4572	2,6329	3,5239
0,4119	0,4946	2,5949	3,9811
0,4521	0,5330	2,5474	4,4757
0,4963	0,5724	2,4919	5,0088
0,5449	0,6116	2,4252	5,5812
0,5981	0,6503	2,3492	6,1927
0,6566	0,6875	2,2625	6,8430
0,7208	0,7226	2,1661	7,5306
0,7913	0,7543	2,0597	8,2532
0,8686	0,7818	1,9448	9,0074
0,9536	0,8043	1,8225	9,7892
1,0468	0,8213	1,6954	10,5935
1,1491	0,8335	1,5674	11,4148
1,2615	0,8423	1,4428	12,2484
1,3848	0,8503	1,3268	13,0907
1,5202	0,8603	1,2229	13,9410
1,6688	0,8762	1,1345	14,8013
1,8319	0,9019	1,0638	15,6775
2,0110	0,9428	1,0130	16,5793
2,2076	1,0040	0,9827	17,5221
2,4234	1,0905	0,9723	18,5261
2,6603	1,2055	0,9792	19,6166
2,9204	1,3510	0,9996	20,8222
3,2059	1,5268	1,0290	22,1731
3,5193	1,7307	1,0626	23,6999
3,8634	1,9575	1,0948	25,4306
4,2411	2,1986	1,1202	27,3881
4,6557	2,4442	1,1344	29,5867
5,1109	2,6841	1,1348	32,0309
5,6105	2,9098	1,1207	34,7150
6,1590	3,1130	1,0921	37,6248
6,7611	3,2866	1,0504	40,7378
7,4221	3,4241	0,9969	44,0244
8,1477	3,5210	0,9338	47,4485
8,9443	3,5742	0,8635	50,9696



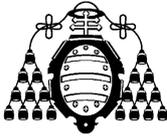
Anexo III: Gráficos y cálculos.

9,8187	3,5824	0,7884	54,5438
10,7786	3,5484	0,7113	58,1262
11,8323	3,4831	0,6361	61,6746
12,9891	3,4095	0,5672	65,1577
14,2589	3,3559	0,5085	68,5672
15,6529	3,3454	0,4618	71,9231
17,1832	3,3780	0,4248	75,2685
18,8630	3,4232	0,3921	78,6465
20,7071	3,4250	0,3574	82,0696
22,7315	3,3184	0,3154	85,4946
24,9538	3,0606	0,2650	88,8131
27,3934	2,6471	0,2088	91,8736
30,0714	2,1148	0,1520	94,5207
33,0113	1,5349	0,1005	96,6355
36,2385	0,9876	0,0589	98,1704
39,7813	0,5389	0,0293	99,1580
43,6704	0,2277	0,0113	99,6969
47,9397	0,0652	0,0029	99,9246
52,6264	0,0097	0,0004	99,9898
57,7713	0,0052	0,0002	99,9995
63,4192	0,0000	0,0000	100,0000
69,6192	0,0000	0,0000	100,0000
76,4253	0,0000	0,0000	100,0000
83,8969	0,0000	0,0000	100,0000
92,0988	0,0000	0,0000	100,0000
101,1030	0,0000	0,0000	100,0000
110,9870	0,0000	0,0000	100,0000
121,8370	0,0000	0,0000	100,0000
133,7480	0,0000	0,0000	100,0000
146,8240	0,0000	0,0000	100,0000
161,1770	0,0000	0,0000	100,0000
176,9350	0,0000	0,0000	100,0000
194,2320	0,0000	0,0000	100,0000
213,2210	0,0000	0,0000	100,0000
234,0660	0,0000	0,0000	100,0000
256,9480	0,0000	0,0000	100,0000
282,0680	0,0000	0,0000	100,0000
309,6440	0,0000	0,0000	100,0000
339,9160	0,0000	0,0000	100,0000
373,1470	0,0000	0,0000	100,0000
409,6260	0,0000	0,0000	100,0000
449,6720	0,0000	0,0000	100,0000



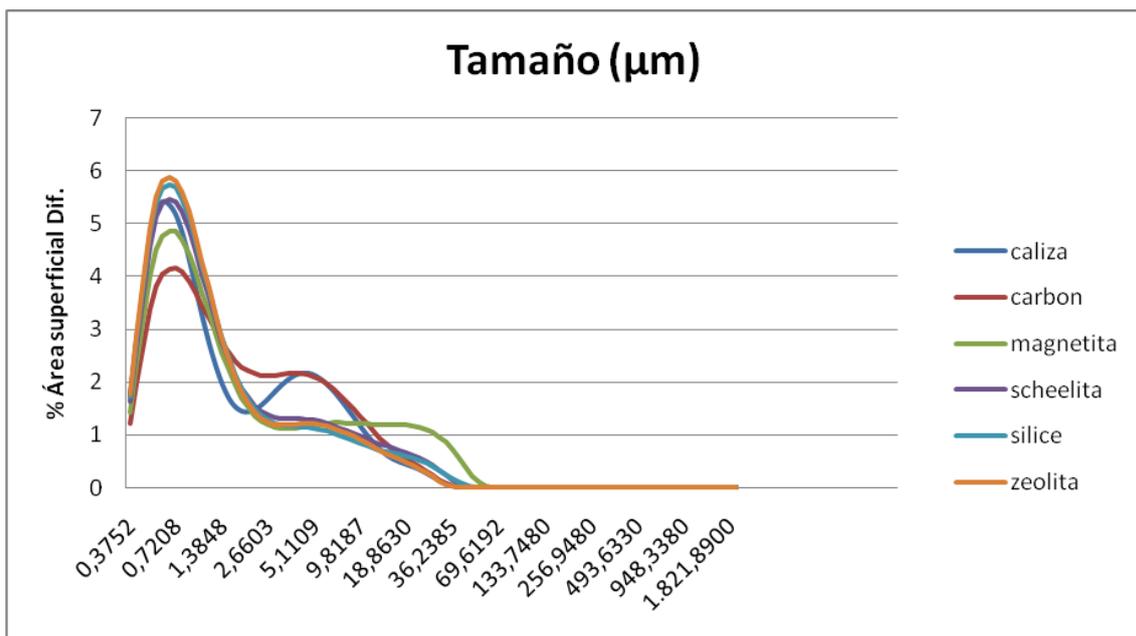
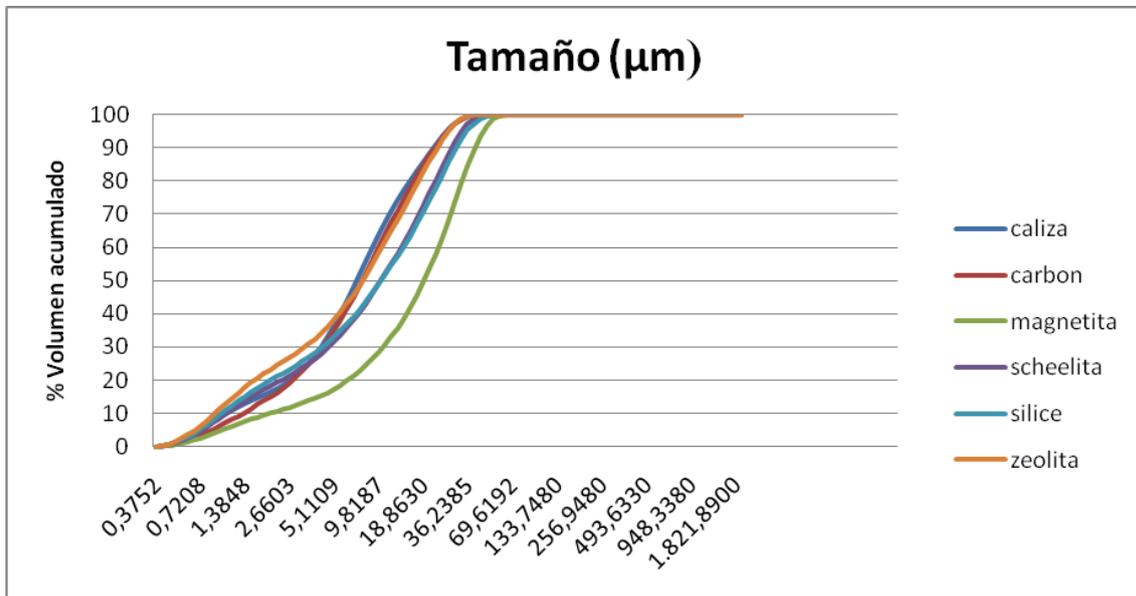
Anexo III: Gráficos y cálculos.

493,6330	0,0000	0,0000	100,0000
541,8920	0,0000	0,0000	100,0000
594,8690	0,0000	0,0000	100,0000
653,0250	0,0000	0,0000	100,0000
716,8660	0,0000	0,0000	100,0000
786,9490	0,0000	0,0000	100,0000
863,8830	0,0000	0,0000	100,0000
948,3380	0,0000	0,0000	100,0000
1.041,0500	0,0000	0,0000	100,0000
1.142,8300	0,0000	0,0000	100,0000
1.254,5500	0,0000	0,0000	100,0000
1.377,1900	0,0000	0,0000	100,0000
1.511,8400	0,0000	0,0000	100,0000
1.659,6400	0,0000	0,0000	100,0000
1.821,8900	0,0000	0,0000	100,0000
2.000,0000	0,0000	0,0000	100,0000



2.- GRÁFICOS (DPS).

Gráficos obtenidos utilizando el módulo de polvo seco (DPS):



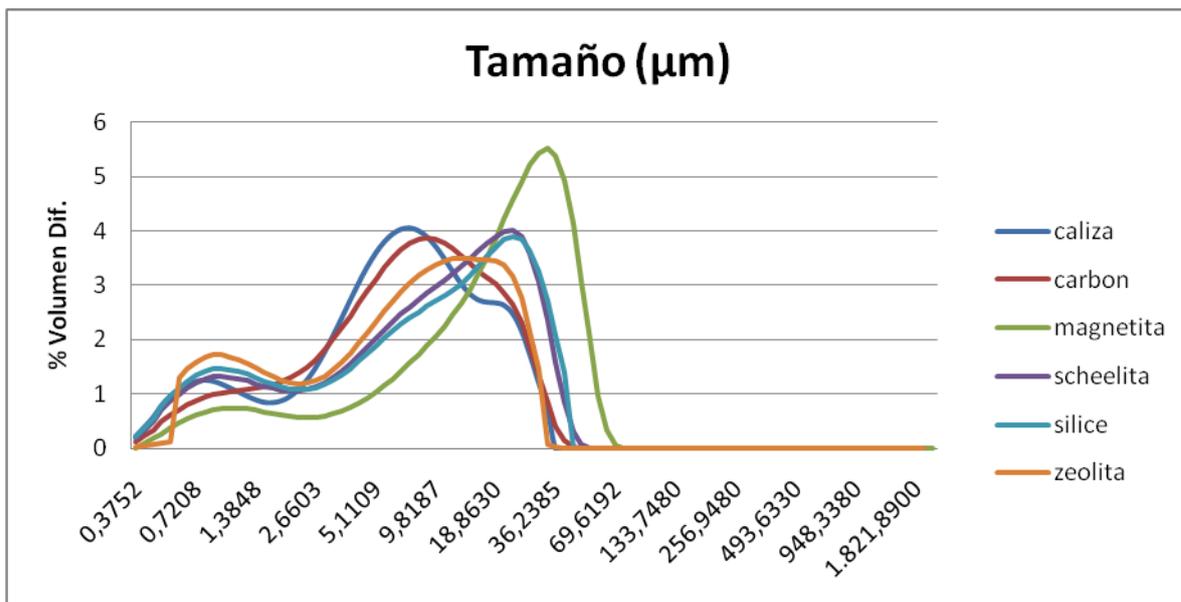


Tabla de datos obtenida con el analizador Coulter-Beckman para la sílice:

Diámetro canal (µm)	% Volumen Dif.	% Área sup. Dif.	% Volumen acumulado
0,3752	0,2178	1,7558	0,0000
0,4119	0,3860	2,8346	0,2178
0,4521	0,5610	3,7531	0,6037
0,4963	0,7838	4,7769	1,1648
0,5449	0,9506	5,2771	1,9486
0,5981	1,0742	5,4324	2,8991
0,6566	1,1635	5,3597	3,9733
0,7208	1,2292	5,1584	5,1368
0,7913	1,2552	4,7985	6,3660
0,8686	1,2369	4,3074	7,6212
0,9536	1,1850	3,7592	8,8581
1,0468	1,1132	3,2168	10,0432
1,1491	1,0378	2,7318	11,1564
1,2615	0,9601	2,3022	12,1941
1,3848	0,8930	1,9506	13,1542
1,5202	0,8474	1,6862	14,0472
1,6688	0,8396	1,5218	14,8946
1,8319	0,8733	1,4420	15,7341
2,0110	0,9529	1,4333	16,6074
2,2076	1,0802	1,4801	17,5603
2,4234	1,2577	1,5698	18,6405
2,6603	1,4848	1,6883	19,8982
2,9204	1,7551	1,8179	21,3830



3,2059	2,0592	1,9429	23,1381
3,5193	2,3831	2,0483	25,1973
3,8634	2,7144	2,1253	27,5804
4,2411	3,0374	2,1663	30,2949
4,6557	3,3357	2,1673	33,3322
5,1109	3,5939	2,1271	36,6679
5,6105	3,8014	2,0495	40,2618
6,1590	3,9515	1,9407	44,0632
6,7611	4,0391	1,8071	48,0148
7,4221	4,0603	1,6548	52,0538
8,1477	4,0126	1,4897	56,1141
8,9443	3,8981	1,3183	60,1266
9,8187	3,7235	1,1471	64,0247
10,7786	3,5036	0,9832	67,7482
11,8323	3,2617	0,8338	71,2518
12,9891	3,0302	0,7057	74,5135
14,2589	2,8461	0,6038	77,5436
15,6529	2,7336	0,5283	80,3897
17,1832	2,6914	0,4738	83,1233
18,8630	2,6817	0,4300	85,8147
20,7071	2,6356	0,3850	88,4964
22,7315	2,4821	0,3303	91,1321
24,9538	2,1782	0,2640	93,6142
27,3934	1,7370	0,1918	95,7924
30,0714	1,2289	0,1236	97,5293
33,0113	0,7463	0,0684	98,7583
36,2385	0,0000	0,0296	99,5045
39,7813	0,0000	0,0090	99,8593
43,6704	0,0000	0,0014	99,9780
47,9397	0,0000	0,0093	99,9985
52,6264	0,0000	0,0000	100,0000
57,7713	0,0000	0,0000	100,0000
63,4192	0,0000	0,0000	100,0000
69,6192	0,0000	0,0000	100,0000
76,4253	0,0000	0,0000	100,0000
83,8969	0,0000	0,0000	100,0000
92,0988	0,0000	0,0000	100,0000
101,1030	0,0000	0,0000	100,0000
110,9870	0,0000	0,0000	100,0000
121,8370	0,0000	0,0000	100,0000
133,7480	0,0000	0,0000	100,0000
146,8240	0,0000	0,0000	100,0000



Anexo III: Gráficos y cálculos.

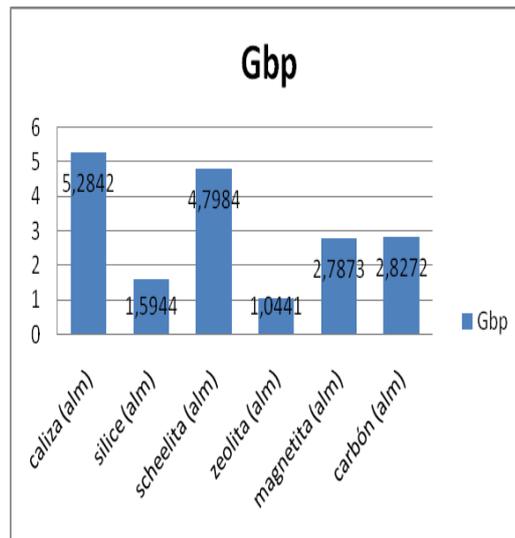
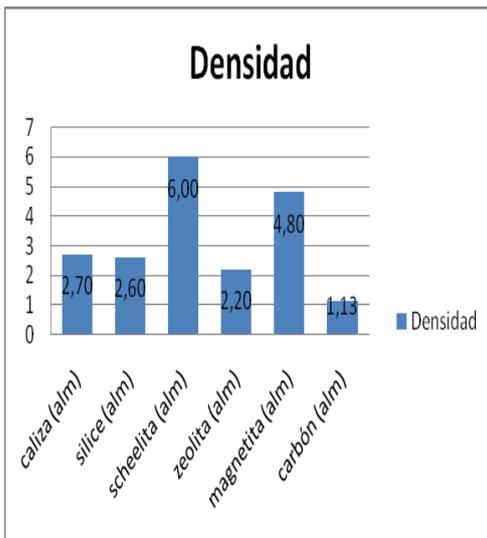
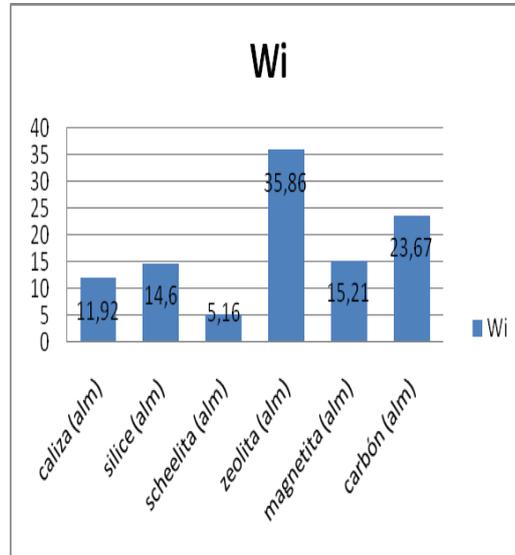
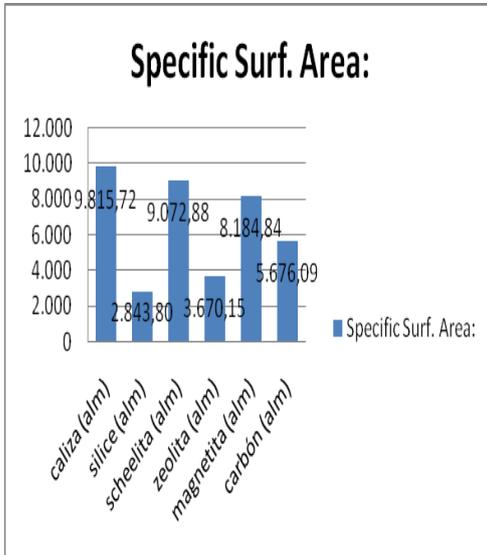
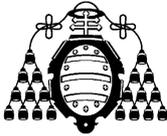
161,1770	0,0000	0,0000	100,0000
176,9350	0,0000	0,0000	100,0000
194,2320	0,0000	0,0000	100,0000
213,2210	0,0000	0,0000	100,0000
234,0660	0,0000	0,0000	100,0000
256,9480	0,0000	0,0000	100,0000
282,0680	0,0000	0,0000	100,0000
309,6440	0,0000	0,0000	100,0000
339,9160	0,0000	0,0000	100,0000
373,1470	0,0000	0,0000	100,0000
409,6260	0,0000	0,0000	100,0000
449,6720	0,0000	0,0000	100,0000
493,6330	0,0000	0,0000	100,0000
541,8920	0,0000	0,0000	100,0000
594,8690	0,0000	0,0000	100,0000
653,0250	0,0000	0,0000	100,0000
716,8660	0,0000	0,0000	100,0000
786,9490	0,0000	0,0000	100,0000
863,8830	0,0000	0,0000	100,0000
948,3380	0,0000	0,0000	100,0000
1.041,0500	0,0000	0,0000	100,0000
1.142,8300	0,0000	0,0000	100,0000
1.254,5500	0,0000	0,0000	100,0000
1.377,2000	0,0000	0,0000	100,0000
1.511,8400	0,0000	0,0000	100,0000
1.659,6400	0,0000	0,0000	100,0000
1.821,8900	0,0000	0,0000	100,0000
2.000,0000	0,0000	0,0000	100,0000



3.- DATOS ALM.

Datos obtenidos utilizando el módulo líquido acuoso (ALM), diagrama de barras del área específica superficial, W_i , densidad y G_{bp} de cada material ensayado:

	caliza	sílice	scheelita	zeolita	magnetita	carbón
From	0,03999	0,03999	0,03999	0,03999	0,03999	0,03999
To	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000
Volume	100	100	100	100	100	100
Mean:	11,3854	15,7095	12,5898	13,2915	24,1470	18,9652
Median:	8,7249	13,1458	9,7711	10,8746	22,7121	12,0381
D(0,0):	0,1062	254,1860	0,0986	280,2450	50,5370	427,1960
Mean/Median ratio:	1,305	1,195	1,288	1,222	1,063	1,575
Mode:	10,287	23,814	21,694	19,762	31,504	9,370
S.D.:	9,660	11,202	11,098	9,301	13,650	24,572
Variance:	93,319	125,474	123,172	86,510	186,317	603,795
C.V.:	0,848	0,713	0,882	0,700	0,565	1,296
Skewness:	102.351	0.824035	0.824819	0.867565	0.505501	434.972
Kurtosis:	0.498882	-0.01339	-0.082019	0.027469	-0.409098	235.841
d10:	0,98	3,52	0,32	3,36	7,11	4,42
d50:	8,72	13,15	9,77	10,87	22,71	12,04
d90:	25,90	32,07	28,99	27,06	43,26	34,00
Specific Surf. Area:	9.815,72	2.843,80	9.072,88	3.670,15	8.184,84	5.676,09
Densidad	2,70	2,60	6,00	2,20	4,80	1,13
Wi	11,92	14,6	5,16	35,86	15,21	23,67
G_{bp}	5,2842	1,5944	4,7984	1,0441	2,7873	2,8272

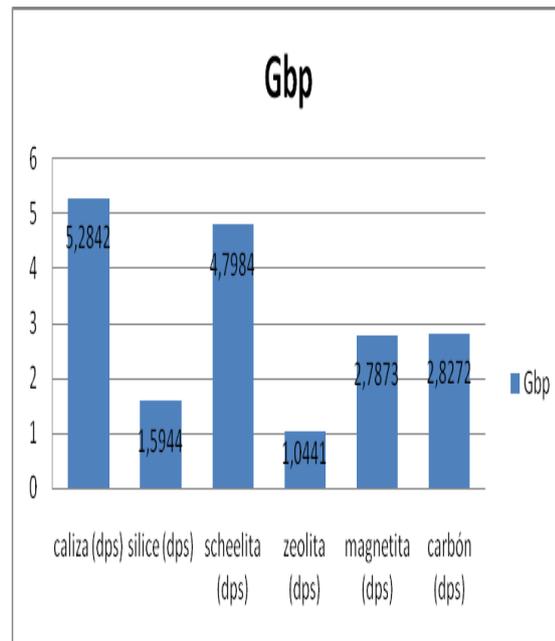
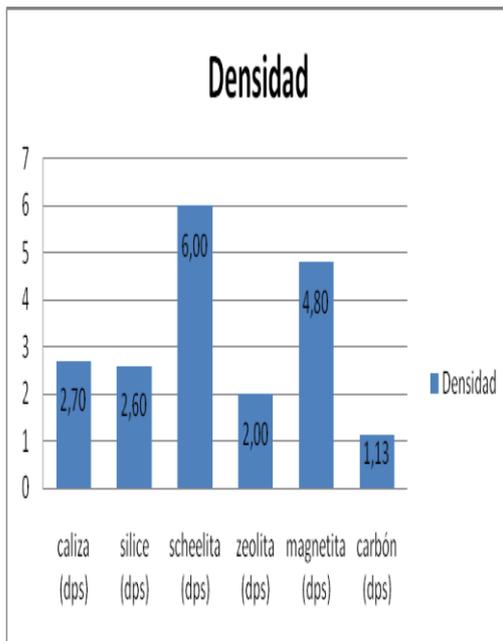
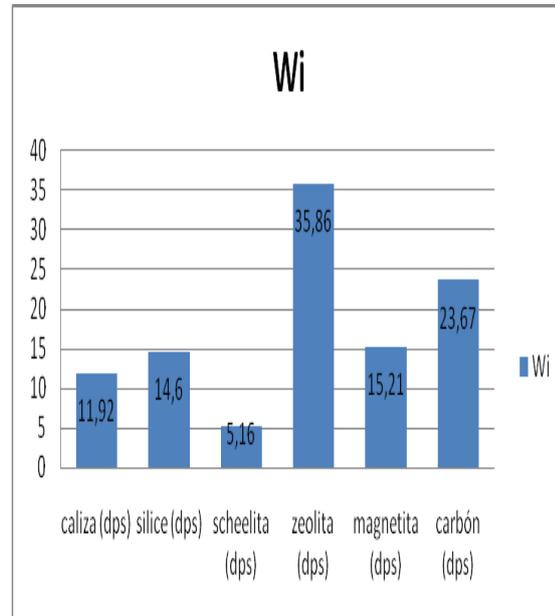
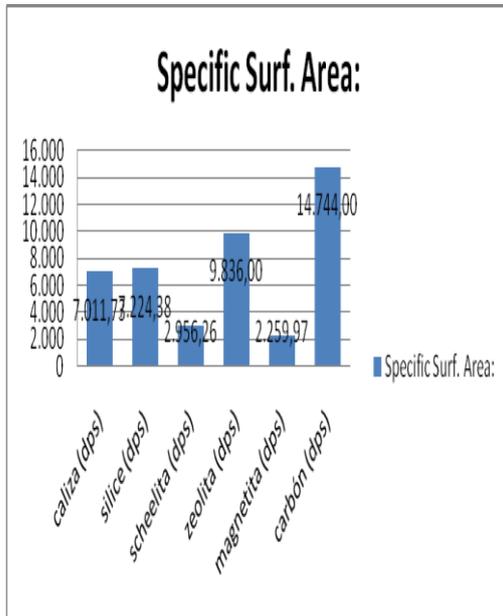
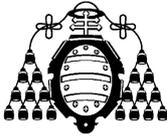


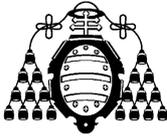


4.- DATOS DPS.

Datos obtenidos utilizando el módulo polvo seco (DPS), diagramas de barras del área específica superficial, W_i , densidad y G_{bp} de cada material ensayado:

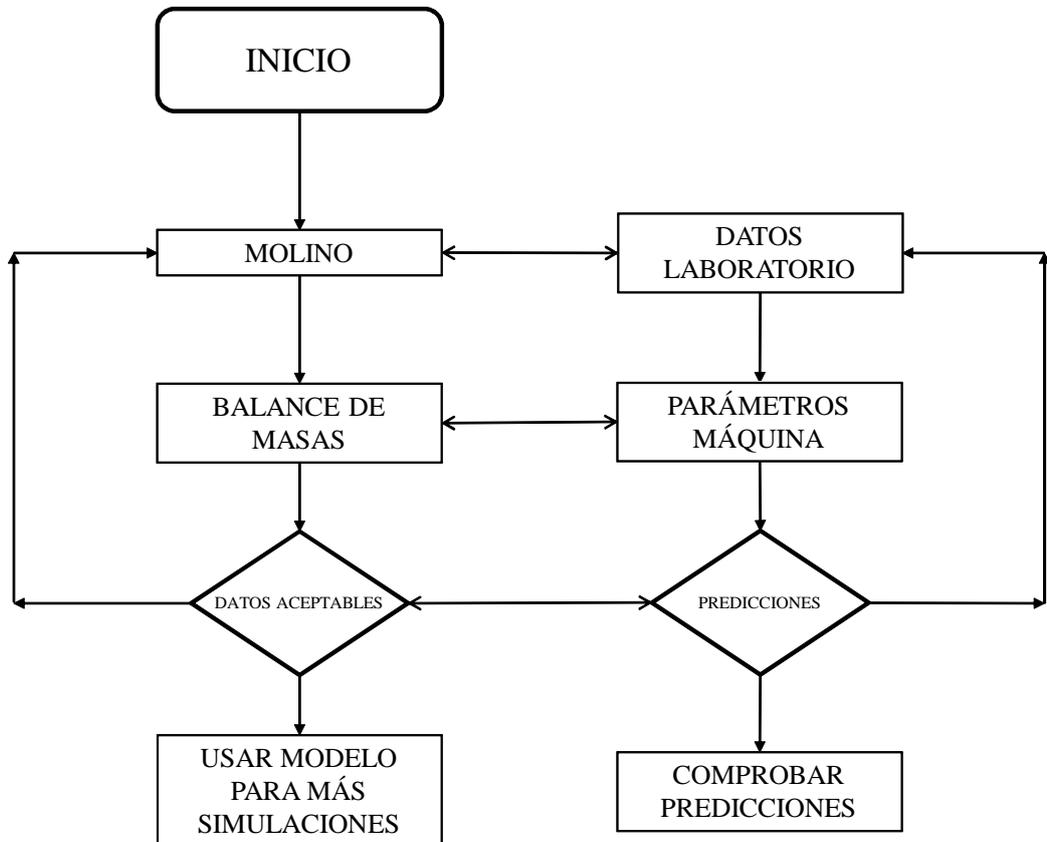
	caliza	sílice	scheelita	zeolita	magnetita	carbón
From	0.375198	0.375198	0.375198	0.375198	0.375198	0.375198
To	2000	2000	2000	2000	2000	2000
Volume	100	100	100	100	100	100
Mean:	9,4389	13,3245	12,8057	10,0215	20,4803	9,9985
Median:	7,0860	10,2205	10,2094	7,7440	19,1928	7,7213
D(0,0):	0,616227	0,628705	0,631409	0,627584	0,635324	0,65848
Mean/Median ratio:	1,332	1,304	1,254	1,294	1,067	1,295
Mode:	7,776	23,817	23,817	13,609	31,507	9,371
S.D.:	8,073	11,629	10,661	8,733	14,133	8,250
Variance:	65,171	135,222	113,648	76,268	199,742	68,068
C.V.:	0,855	0,873	0,832	0,871	0,690	0,825
Skewness:	123,1970	0,8615	0,7884	0,9272	0,4283	112,4950
Kurtosis:	108,5110	-0,0553	-0,2237	0,1030	-0,6363	0,7971
d10:	1,04	0,99	1,06	0,90	1,99	1,35
d50:	7,09	10,22	10,21	7,74	19,19	7,72
d90:	21,86	30,67	28,78	23,31	40,33	22,43
Specific Surf. Area:	7.011,73	7.224,38	2.956,26	9.836,00	2.259,97	14.744,00
Densidad	2,70	2,60	6,00	2,00	4,80	1,13
Wi	11,92	14,6	5,16	35,86	15,21	23,67
Gbp	5,2842	1,5944	4,7984	1,0441	2,7873	2,8272





5.- ESQUEMA DE ALGORITMO PREDICTIVO.

Gráfico del algoritmo predictivo que determina de manera indirecta el W_i para tamaños de partícula ultrafinos ($\leq 20 \mu\text{m}$);





6.- ESTIMACIÓN DEL ÍNDICE DE BOND DE UNA PLANTA INDUSTRIAL.

Datos obtenidos para un molino de diámetro 2,5 metros y longitud 5,4 metros:

	CALIZA	ZEOLITA	SCHEELITA	CARBÓN	SÍLICE	MAGNETITA
Wi, kWh/ton	11,93	35,13	5,10	23,29	14,36	15,39
F80 (µm)	17	19	21	25	26	32
P80 (µm)	12,65	17,00	10,50	20,70	19,20	23,40
Rendimiento de la planta, ton/h	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

	CALIZA	ZEOLITA	SCHEELITA	CARBÓN	SÍLICE	MAGNETITA
Wi, kWh/ton	11,96	35,96	5,15	23,71	14,58	15,29
F80 (µm)	17	19	21	25	26	32
P80 (µm)	13,9	17,66	13,0	22,05	21,2	25,8
Rendimiento de la planta, ton/h	150,00	150,00	150,00	150,00	150,00	150,00

	CALIZA	ZEOLITA	SCHEELITA	CARBÓN	SÍLICE	MAGNETITA
Wi, kWh/ton	11,74	35,91	5,11	23,64	14,6	15,22
F80 (µm)	17	19	21	25	26	32
P80 (µm)	14,55	17,98	14,42	22,73	22,27	27,15
Rendimiento de la planta, ton/h	200,00	200,00	200,00	200,00	200,00	200,00

	CALIZA	ZEOLITA	SCHEELITA	CARBÓN	SÍLICE	MAGNETITA
Wi, kWh/ton	11,94	35,88	5,17	23,62	14,6	15,19
F80 (µm)	17	19	21	25	26	32
P80 (µm)	15,33	18,31	16,27	23,45	23,42	28,63
Rendimiento de la planta, ton/h	300,00	300,00	300,00	300,00	300,00	300,00



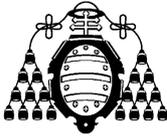
Datos obtenidos para un molino de diámetro 3,5 metros y longitud 8,4 metros:

	CALIZA	ZEOLITA	SCHEELITA	CARBÓN	SÍLICE	MAGNETITA
Wi, kWh/ton	11,95	35,86	5,15	23,66	14,62	15,27
F80 (µm)	17	19	21	25	26	32
P80 (µm)	7,05	13,31	3,57	13,95	10,67	12,60
Rendimiento de la planta, ton/h	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

	CALIZA	ZEOLITA	SCHEELITA	CARBÓN	SÍLICE	MAGNETITA
Wi, kWh/ton	11,96	35,82	5,13	23,7	14,62	15,23
F80 (µm)	17	19	21	25	26	32
P80 (µm)	9,08	14,88	5,50	16,65	13,80	16,40
Rendimiento de la planta, ton/h	150,00	150,00	150,00	150,00	150,00	150,00

	CALIZA	ZEOLITA	SCHEELITA	CARBÓN	SÍLICE	MAGNETITA
Wi, kWh/ton	11,91	35,89	5,19	23,64	14,66	15,22
F80 (µm)	17	19	21	25	26	32
P80 (µm)	10,42	15,78	7,20	18,28	15,90	19,00
Rendimiento de la planta, ton/h	200,00	200,00	200,00	200,00	200,00	200,00

	CALIZA	ZEOLITA	SCHEELITA	CARBÓN	SÍLICE	MAGNETITA
Wi, kWh/ton	11,95	35,97	5,19	23,74	14,68	15,27
F80 (µm)	17	19	21	25	26	32
P80 (µm)	12,12	16,76	9,70	20,20	18,50	22,30
Rendimiento de la planta, ton/h	300,00	300,00	300,00	300,00	300,00	1,00



7.- CÁLCULOS DE AJUSTES DE GRÁFICOS.

Ajustes utilizados, para las diferentes simulaciones:

Ajuste lineal

x	y	x ²	xy	yaju	(y – yaju) ²	y ²
0,0	0,52500	0,000	0,002	1,1471	0,3871	0,276
0,0	0,84478	0,001	0,027	1,1979	0,1247	0,714
0,2	1,28068	0,040	0,256	1,5027	0,0493	1,640
0,6	1,86340	0,360	1,118	2,2282	0,1331	3,472
1,0	2,63260	1,000	2,633	2,9537	0,1031	6,931
2,0	3,63856	4,000	7,277	4,7676	1,2747	13,239
3,0	4,94400	9,000	14,832	6,5814	2,6812	24,443
4,0	6,62580	16,000	26,503	8,3953	3,1311	43,901
5,0	8,77679	25,000	43,884	10,2092	2,0517	77,032
6,0	11,50759	36,000	69,046	12,0230	0,2657	132,425
3,0	14,94844	9,000	44,845	6,5814	70,0065	223,456
24,8	57,58764	100,401	210,423	57,58764	80,208	527,528

a0 =	1,1399
a1 =	1,8139
r ² =	0,645

$$y = 1,1399 + 1,813853 * x$$

Ajuste exponencial

x	y' = ln y	x ²	xy'	y'aju	(y' – y'aju) ²	y' ²
0,004	-0,6444	0,000	-0,0026	0,1599	0,6468	0,415
0,032	-0,1687	0,001	-0,0054	0,1727	0,1165	0,028
0,200	0,2474	0,040	0,0495	0,2497	0,0000	0,061
0,600	0,6224	0,360	0,3734	0,4331	0,0358	0,387
1,000	0,9680	1,000	0,9680	0,6165	0,1235	0,937
2,000	1,2916	4,000	2,5832	1,0750	0,0469	1,668
3,000	1,5982	9,000	4,7945	1,5335	0,0042	2,554
4,000	1,8910	16,000	7,5639	1,9920	0,0102	3,576
5,000	2,1721	25,000	10,8606	2,4504	0,0775	4,718
6,000	2,4430	36,000	14,6580	2,9089	0,2171	5,968
3,000	2,7046	9,000	8,1138	1,5335	1,3715	7,315
24,836	13,1252	100,401	49,9569	13,1252	2,650	27,629

a0 =	0,1580		a =	1,1712
a1 =	0,4585		b =	0,4585
r ² =	0,779			

$$y = 1,1712 * \exp(0,4585 * x)$$



Ajuste logaritmo

$x' = \ln x$	y	x'^2	$x'y$	y_{aju}	$(y - y_{aju})^2$	y'^2
-5,521	0,5250	30,487	-2,8988	-2,1252	7,0233	0,276
-3,442	0,8448	11,847	-2,9077	0,8115	0,0011	0,714
-1,609	1,2807	2,590	-2,0612	3,3996	4,4898	1,640
-0,511	1,8634	0,261	-0,9519	4,9511	9,5339	3,472
0,000	2,6326	0,000	0,0000	5,6725	9,2410	6,931
0,693	3,6386	0,480	2,5221	6,6514	9,0772	13,239
1,099	4,9440	1,207	5,4315	7,2240	5,1985	24,443
1,386	6,6258	1,922	9,1853	7,6303	1,0090	43,901
1,609	8,7768	2,590	14,1257	7,9454	0,6912	77,032
1,792	11,5076	3,210	20,6188	8,2029	10,9209	132,425
1,099	14,9484	1,207	16,4225	7,2240	59,6667	223,456
-3,406	57,5876	55,802	59,4864	57,5876	116,853	527,528

$a_0 =$	5,6725		$a =$	5,6725
$a_1 =$	1,4122		$b =$	1,4122
$r^2 =$	0,483			

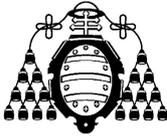
$y = 5,6725 + 1,412246 \cdot \ln x$

Ajuste potencial

$x' = \ln x$	$y' = \ln y$	x'^2	$x'y'$	y'_{aju}	$(y' - y'_{aju})^2$	y'^2
-5,521	-0,6444	30,487	3,5578	-1,0538	0,1676	0,415
-3,442	-0,1687	11,847	0,5806	-0,1573	0,0001	0,028
-1,609	0,2474	2,590	-0,3982	0,6328	0,1486	0,061
-0,511	0,6224	0,261	-0,3179	1,1065	0,2343	0,387
0,000	0,9680	0,000	0,0000	1,3267	0,1287	0,937
0,693	1,2916	0,480	0,8953	1,6255	0,1115	1,668
1,099	1,5982	1,207	1,7558	1,8003	0,0409	2,554
1,386	1,8910	1,922	2,6214	1,9244	0,0011	3,576
1,609	2,1721	2,590	3,4959	2,0206	0,0230	4,718
1,792	2,4430	3,210	4,3773	2,0992	0,1182	5,968
1,099	2,7046	1,207	2,9713	1,8003	0,8177	7,315
-3,406	13,1252	55,802	19,5392	13,1252	1,792	27,629

$a_0 =$	1,3267		$a =$	3,7685
$a_1 =$	0,4311		$b =$	0,4311
$r^2 =$	0,850			

$y = 3,7685 \cdot x^{0,4311}$



Ajuste hiperbólico

$x' = 1/x$	y	x'^2	$x'y$	$yaju$	$(y - yaju)^2$	y^2
250,000	0,5250	62500,000	131,2500	-0,1247	0,4221	0,276
31,250	0,8448	976,563	26,3994	5,1196	18,2743	0,714
5,000	1,2807	25,000	6,4034	5,7489	19,9653	1,640
1,667	1,8634	2,778	3,1057	5,8289	15,7248	3,472
1,000	2,6326	1,000	2,6326	5,8448	10,3184	6,931
0,500	3,6386	0,250	1,8193	5,8568	4,9207	13,239
0,333	4,9440	0,111	1,6480	5,8608	0,8406	24,443
0,250	6,6258	0,063	1,6565	5,8628	0,5821	43,901
0,200	8,7768	0,040	1,7554	5,8640	8,4843	77,032
0,167	11,5076	0,028	1,9179	5,8648	31,8409	132,425
0,333	14,9484	0,111	4,9828	5,8608	82,5849	223,456
290,700	57,5876	63505,943	183,5709	57,5876	193,958	527,528

$a_0 =$	5,8688
$a_1 =$	-0,0240
$r^2 =$	0,142

$a =$	5,8688
$b =$	-0,0240

$$y = 5,8688 - 0,0240 / x$$

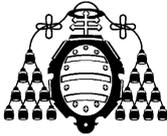
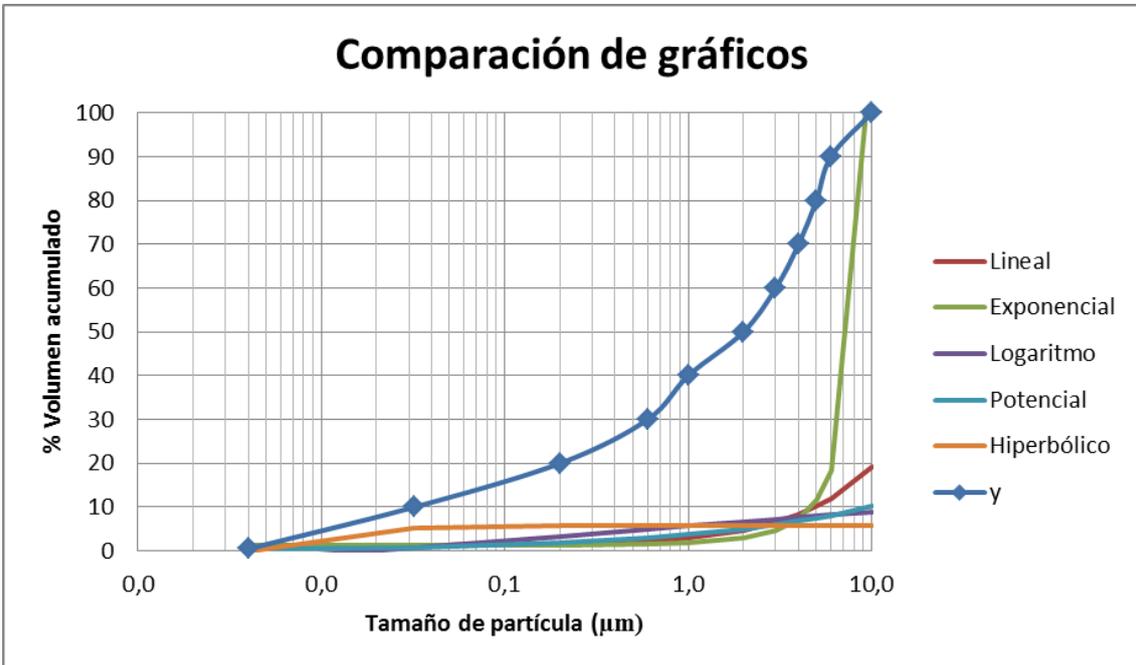
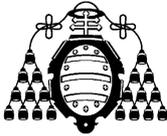


Gráfico comparativo de los ajustes

x	y	Lineal	Exponencial	Logaritmo	Potencial	Hiperbólico
0,0040	0,5000	1,1471	1,1734	-2,1252	0,3486	-0,1247
0,0320	10,0000	1,1979	1,1885	0,8115	0,8545	5,1196
0,2000	20,0000	1,5027	1,2837	3,3996	1,8829	5,7489
0,6000	30,0000	2,2282	1,5421	4,9511	3,0236	5,8289
1,0000	40,0000	2,9537	1,8525	5,6725	3,7685	5,8448
2,0000	50,0000	4,7676	2,9300	6,6514	5,0811	5,8568
3,0000	60,0000	6,5814	4,6343	7,2240	6,0516	5,8608
4,0000	70,0000	8,3953	7,3299	7,6303	6,8507	5,8628
5,0000	80,0000	10,2092	11,5935	7,9454	7,5425	5,8640
6,0000	90,0000	12,0230	18,3370	8,2029	8,1593	5,8648
10,0000	100,0000	19,2784	114,7611	8,9243	10,1695	5,8664





8.- PROGRAMAS UTILIZADOS.

Código utilizado, en MatLab, para las diferentes simulaciones.

%CÓDIGO DE MATLAB PARA INTERPOLACIÓN, TAMIZADO Y MOLIENDA DE LOS MATERIALES ENSAYADOS

```
clear,clc
```

```
%Datos de entrada del ensayo
```

```
disp ('A: datos de entrada del ensayo, pulse cualquier tecla para continuar');
```

```
A=xlsread('CALIZA_C_A_2.xls');
```

```
pause
```

```
A
```

```
pause
```

```
b=A(:,1);
```

```
c=A(:,2);
```

```
d=A(:,3);
```

```
f=A(:,4);
```

```
g=A(:,5);
```

```
sb=sum(b);
```

```
sc=sum(c);
```

```
sd=sum(d);
```

```
sf=sum(f);
```

```
sg=sum(g);
```

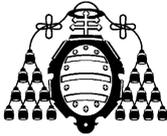
```
% Suma total de pesos por columnas
```

```
PT=[sb sc sd sf sg];
```

```
% Peso medio de las muestras analizadas
```

```
disp ('Pm: peso medio de las muestras analizadas (g), pulse cualquier tecla para continuar ');
```

```
Pm=mean(PT)
```



pause

% Peso fracción (tanto por uno)

disp ('B: peso fracción (tanto por uno), pulse cualquier tecla para continuar ');

B=[A(1,1)/sb A(1,2)/sc A(1,3)/sd A(1,4)/sf A(1,5)/sg;...

A(2,1)/sb A(2,2)/sc A(2,3)/sd A(2,4)/sf A(2,5)/sg;...

A(3,1)/sb A(3,2)/sc A(3,3)/sd A(3,4)/sf A(3,5)/sg;...

A(4,1)/sb A(4,2)/sc A(4,3)/sd A(4,4)/sf A(4,5)/sg;...

A(5,1)/sb A(5,2)/sc A(5,3)/sd A(5,4)/sf A(5,5)/sg;...

A(6,1)/sb A(6,2)/sc A(6,3)/sd A(6,4)/sf A(6,5)/sg;...

A(7,1)/sb A(7,2)/sc A(7,3)/sd A(7,4)/sf A(7,5)/sg;...

A(8,1)/sb A(8,2)/sc A(8,3)/sd A(8,4)/sf A(8,5)/sg;...

A(9,1)/sb A(9,2)/sc A(9,3)/sd A(9,4)/sf A(9,5)/sg;...

A(10,1)/sb A(10,2)/sc A(10,3)/sd A(10,4)/sf A(10,5)/sg]

pause

%Pasante acumulado (%)

disp ('Cm: Pasante acumulado (%), pulse cualquier tecla para continuar ');

Cm=[B(10,1)*100+B(9,1)*100+B(8,1)*100+B(7,1)*100+B(6,1)*100+B(5,1)*100+B(4,1)*100+B(3,1)*100+B(2,1)*100

B(10,2)*100+B(9,2)*100+B(8,2)*100+B(7,2)*100+B(6,2)*100+B(5,2)*100+B(4,2)*100+B(3,2)*100+B(2,2)*100

B(10,3)*100+B(9,3)*100+B(8,3)*100+B(7,3)*100+B(6,3)*100+B(5,3)*100+B(4,3)*100+B(3,3)*100+B(2,3)*100

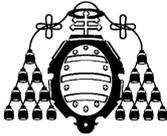
B(10,4)*100+B(9,4)*100+B(8,4)*100+B(7,4)*100+B(6,4)*100+B(5,4)*100+B(4,4)*100+B(3,4)*100+B(2,4)*100

B(10,5)*100+B(9,5)*100+B(8,5)*100+B(7,5)*100+B(6,5)*100+B(5,5)*100+B(4,5)*100+B(3,5)*100+B(2,5)*100

B(10,1)*100+B(9,1)*100+B(8,1)*100+B(7,1)*100+B(6,1)*100+B(5,1)*100+B(4,1)*100+B(3,1)*100

B(10,2)*100+B(9,2)*100+B(8,2)*100+B(7,2)*100+B(6,2)*100+B(5,2)*100+B(4,2)*100+B(3,2)*100

B(10,3)*100+B(9,3)*100+B(8,3)*100+B(7,3)*100+B(6,3)*100+B(5,3)*100+B(4,3)*100+B(3,3)*100



00
B(10,4)*100+B(9,4)*100+B(8,4)*100+B(7,4)*100+B(6,4)*100+B(5,4)*100+B(4,4)*100+B(3,4)*100
00
B(10,5)*100+B(9,5)*100+B(8,5)*100+B(7,5)*100+B(6,5)*100+B(5,5)*100+B(4,5)*100+B(3,5)*100
00

B(10,1)*100+B(9,1)*100+B(8,1)*100+B(7,1)*100+B(6,1)*100+B(5,1)*100+B(4,1)*100
B(10,2)*100+B(9,2)*100+B(8,2)*100+B(7,2)*100+B(6,2)*100+B(5,2)*100+B(4,2)*100
B(10,3)*100+B(9,3)*100+B(8,3)*100+B(7,3)*100+B(6,3)*100+B(5,3)*100+B(4,3)*100
B(10,4)*100+B(9,4)*100+B(8,4)*100+B(7,4)*100+B(6,4)*100+B(5,4)*100+B(4,4)*100
B(10,5)*100+B(9,5)*100+B(8,5)*100+B(7,5)*100+B(6,5)*100+B(5,5)*100+B(4,5)*100

B(10,1)*100+B(9,1)*100+B(8,1)*100+B(7,1)*100+B(6,1)*100+B(5,1)*100
B(10,2)*100+B(9,2)*100+B(8,2)*100+B(7,2)*100+B(6,2)*100+B(5,2)*100
B(10,3)*100+B(9,3)*100+B(8,3)*100+B(7,3)*100+B(6,3)*100+B(5,3)*100
B(10,4)*100+B(9,4)*100+B(8,4)*100+B(7,4)*100+B(6,4)*100+B(5,4)*100
B(10,5)*100+B(9,5)*100+B(8,5)*100+B(7,5)*100+B(6,5)*100+B(5,5)*100

B(10,1)*100+B(9,1)*100+B(8,1)*100+B(7,1)*100+B(6,1)*100
B(10,2)*100+B(9,2)*100+B(8,2)*100+B(7,2)*100+B(6,2)*100
B(10,3)*100+B(9,3)*100+B(8,3)*100+B(7,3)*100+B(6,3)*100
B(10,4)*100+B(9,4)*100+B(8,4)*100+B(7,4)*100+B(6,4)*100
B(10,5)*100+B(9,5)*100+B(8,5)*100+B(7,5)*100+B(6,5)*100

B(10,1)*100+B(9,1)*100+B(8,1)*100+B(7,1)*100
B(10,2)*100+B(9,2)*100+B(8,2)*100+B(7,2)*100
B(10,3)*100+B(9,3)*100+B(8,3)*100+B(7,3)*100
B(10,4)*100+B(9,4)*100+B(8,4)*100+B(7,4)*100
B(10,5)*100+B(9,5)*100+B(8,5)*100+B(7,5)*100

B(10,1)*100+B(9,1)*100+B(8,1)*100 B(10,2)*100+B(9,2)*100+B(8,2)*100
B(10,3)*100+B(9,3)*100+B(8,3)*100 B(10,4)*100+B(9,4)*100+B(8,4)*100
B(10,5)*100+B(9,5)*100+B(8,5)*100

B(10,1)*100+B(9,1)*100 B(10,2)*100+B(9,2)*100 B(10,3)*100+B(9,3)*100
B(10,4)*100+B(9,4)*100 B(10,5)*100+B(9,5)*100

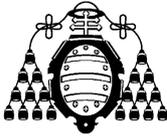
B(10,1)*100 B(10,2)*100 B(10,3)*100 B(10,4)*100 B(10,5)*100]

pause

% Rechazo acumulado (%)

disp ('D: rechazo acumulado (%), pulse cualquier tecla para continuar ');

D=100-Cm



```
pause

% W(x,t): porcentaje acumulado de material de tamaño superior a un x dado (rechazo
acumulado) en un tiempo t

disp ('E: W (x,t)= porcentaje acumulado de material de tamaño superior a un x dado (rechazo
acumulado) en un tiempo t, pulse cualquier tecla para continuar');

E=D/100

pause

% Ln W(x,t)

disp ('F: Ln W (x,t), pulse cualquier tecla para continuar');

F=log(E)

pause

% LnW(x,t)- LnW(x,0)

disp('G: Ln W (x,t)- LnW(x,0), pulse cualquier tecla para continuar');

G=[F(1,1)-F(1,1) F(1,2)-F(1,1) F(1,3)-F(1,1) F(1,4)-F(1,1) F(1,5)-F(1,1); F(2,1)-F(2,1) F(2,2)-F(2,1)
F(2,3)-F(2,1) F(2,4)-F(2,1) F(2,5)-F(2,1); F(3,1)-F(3,1) F(3,2)-F(3,1) F(3,3)-F(3,1) F(3,4)-F(3,1)
F(3,5)-F(3,1); F(4,1)-F(4,1) F(4,2)-F(4,1) F(4,3)-F(4,1) F(4,4)-F(4,1) F(4,5)-F(4,1); F(5,1)-F(5,1)
F(5,2)-F(5,1) F(5,3)-F(5,1) F(5,4)-F(5,1) F(5,5)-F(5,1); F(6,1)-F(6,1) F(6,2)-F(6,1) F(6,3)-F(6,1)
F(6,4)-F(6,1) F(6,5)-F(6,1); F(7,1)-F(7,1) F(7,2)-F(7,1) F(7,3)-F(7,1) F(7,4)-F(7,1) F(7,5)-F(7,1);
F(8,1)-F(8,1) F(8,2)-F(8,1) F(8,3)-F(8,1) F(8,4)-F(8,1) F(8,5)-F(8,1); F(9,1)-F(9,1) F(9,2)-F(9,1)
F(9,3)-F(9,1) F(9,4)-F(9,1) F(9,5)-F(9,1)]

pause

% Cinco tiempos (en minutos) utilizados en el ensayo

disp ('t: tiempos usados (en minutos), pulse cualquier tecla para continuar');

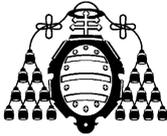
t=[0 0.5 1 1.5 2]

pause

y1=G(1,:); y2=G(2,:); y3=G(3,:); y4=G(4,:); y5=G(5,:); y6=G(6,:); y7=G(7,:); y8=G(8,:);
y9=G(9,:);

n0=length(t);

k1=(-1)*(n0*sum(t.*y1)-sum(t)*sum(y1))/(n0*sum(t.^2)-(sum(t))^2);
```



```
k2=(-1)*(n0*sum(t.*y2)-sum(t)*sum(y2))/(n0*sum(t.^2)-(sum(t))^2);
k3=(-1)*(n0*sum(t.*y3)-sum(t)*sum(y3))/(n0*sum(t.^2)-(sum(t))^2);
k4=(-1)*(n0*sum(t.*y4)-sum(t)*sum(y4))/(n0*sum(t.^2)-(sum(t))^2);
k5=(-1)*(n0*sum(t.*y5)-sum(t)*sum(y5))/(n0*sum(t.^2)-(sum(t))^2);
k6=(-1)*(n0*sum(t.*y6)-sum(t)*sum(y6))/(n0*sum(t.^2)-(sum(t))^2);
k7=(-1)*(n0*sum(t.*y7)-sum(t)*sum(y7))/(n0*sum(t.^2)-(sum(t))^2);
k8=(-1)*(n0*sum(t.*y8)-sum(t)*sum(y8))/(n0*sum(t.^2)-(sum(t))^2);
k9=(-1)*(n0*sum(t.*y9)-sum(t)*sum(y9))/(n0*sum(t.^2)-(sum(t))^2);
k=[k1 k2 k3 k4 k5 k6 k7 k8 k9];

% Nueve tamaños (en micras) utilizados en el ensayo
disp('x: tamaños usados (en micras), pulse cualquier tecla para continuar');
x=[355 250 180 125 100 75 63 45 32]

pause

LX=log(x);
LK=log(k);
n1=length(LX);

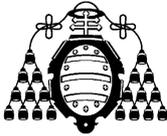
%Constante n dependiente del material ensayado
disp('Constante n, pulse cualquier tecla para continuar');
n=(n1*sum(LX.*LK)-sum(LX)*sum(LK))/(n1*sum(LX.^2)-(sum(LX))^2)

pause

LCt=LK-n*LX;
LC=sum(LCt)/n1;

%Constante C dependiente del Molino utilizado
disp('Constante C, pulse cualquier tecla para continuar');
C=exp(LC)

pause
```



%Porcentaje retenido para cada tamaño x, tras un tiempo de molienda t, con la ecuación
 $W(x,t)=W(x,0).\exp(-C*x^n*t)$

disp ('H: $W(x,t)=W(x,0).\exp(-C*x^n*t)$, pulse cualquier tecla para continuar');

```
H=[D(1,1)/100 D(1,1)*exp(-C*x(1,1)^n*t(1,2))/100 D(1,1)*exp(-C*x(1,1)^n*t(1,3))/100
D(1,1)*exp(-C*x(1,1)^n*t(1,4))/100 D(1,1)*exp(-C*x(1,1)^n*t(1,5))/100; D(2,1)/100
D(2,1)*exp(-C*x(1,2)^n*t(1,2))/100 D(2,1)*exp(-C*x(1,2)^n*t(1,3))/100 D(2,1)*exp(-
C*x(1,2)^n*t(1,4))/100 D(2,1)*exp(-C*x(1,2)^n*t(1,5))/100; D(3,1)/100 D(3,1)*exp(-
C*x(1,3)^n*t(1,2))/100 D(3,1)*exp(-C*x(1,3)^n*t(1,3))/100 D(3,1)*exp(-C*x(1,3)^n*t(1,4))/100
D(3,1)*exp(-C*x(1,3)^n*t(1,5))/100; D(4,1)/100 D(4,1)*exp(-C*x(1,4)^n*t(1,2))/100
D(4,1)*exp(-C*x(1,4)^n*t(1,3))/100 D(4,1)*exp(-C*x(1,4)^n*t(1,4))/100 D(4,1)*exp(-
C*x(1,4)^n*t(1,5))/100; D(5,1)/100 D(5,1)*exp(-C*x(1,5)^n*t(1,2))/100 D(5,1)*exp(-
C*x(1,5)^n*t(1,3))/100 D(5,1)*exp(-C*x(1,5)^n*t(1,4))/100 D(5,1)*exp(-C*x(1,5)^n*t(1,5))/100;
D(6,1)/100 D(6,1)*exp(-C*x(1,6)^n*t(1,2))/100 D(6,1)*exp(-C*x(1,6)^n*t(1,3))/100
D(6,1)*exp(-C*x(1,6)^n*t(1,4))/100 D(6,1)*exp(-C*x(1,6)^n*t(1,5))/100; D(7,1)/100
D(7,1)*exp(-C*x(1,7)^n*t(1,2))/100 D(7,1)*exp(-C*x(1,7)^n*t(1,3))/100 D(7,1)*exp(-
C*x(1,7)^n*t(1,4))/100 D(7,1)*exp(-C*x(1,7)^n*t(1,5))/100; D(8,1)/100 D(8,1)*exp(-
C*x(1,8)^n*t(1,2))/100 D(8,1)*exp(-C*x(1,8)^n*t(1,3))/100 D(8,1)*exp(-C*x(1,8)^n*t(1,4))/100
D(8,1)*exp(-C*x(1,8)^n*t(1,5))/100; D(9,1)/100 D(9,1)*exp(-C*x(1,9)^n*t(1,2))/100
D(9,1)*exp(-C*x(1,9)^n*t(1,3))/100 D(9,1)*exp(-C*x(1,9)^n*t(1,4))/100 D(9,1)*exp(-
C*x(1,9)^n*t(1,5))/100]
```

pause

%Cálculo de la F80 mediante interpolación

```
ly1=log10(x(1,1));
```

```
ly2=log10(x(1,2));
```

```
Cm1=Cm(1,1)/100;
```

```
Cm2=Cm(2,1)/100;
```

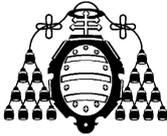
```
Cmm=[Cm1 Cm2];
```

```
lyy=[ly1 ly2];
```

```
ny=length(Cmm);
```

```
TEND=1.08632*(ny*sum(Cmm.*lyy)-sum(Cmm)*sum(lyy))/(ny*sum(Cmm.^2)-(sum(Cmm))^2);
```

% Alimentación F80: tamaño de partícula correspondiente a un 80% de pasante en la alimentación expresado en micras



disp ('F80 tamaño de partícula correspondiente a un 80% de pasante en la alimentación expresado en micras , pulse cualquier tecla para continuar');

F80=10^{TEND}

pause

% Simulación del ensayo mediante el modelo definido, con parámetros de entrada: Peso 700 cm³= 1000 g; tamiz de corte=50 micras; finos presentes en la alimentación=0%;

tamices=(250,180,125,100,75,63,45,32); granulometría de la alimentación: tamiz 250=0,2 rechazo acumulado, tamiz 180=0,4 rechazo acumulado, tamiz 125=0,6 rechazo acumulado, tamiz 100=0,8 rechazo acumulado, tamiz 75=1 rechazo acumulado hasta el final todos los tamices 1; C y n calculados con $W(x,t)=W(x,0).exp(-C*x^n*t)$

disp ('Primer ciclo de molienda, pulse cualquier tecla para continuar');

pause

disp ('nv1=Número de vueltas del primer ciclo de molienda, pulse cualquier tecla para continuar');

nv1=100

pause

disp ('ti1=tiempo en minutos del primer ciclo de molienda, pulse cualquier tecla para continuar');

ti1=nv1/70

pause

disp ('El valor de P100 es de 10, pulse cualquier tecla para continuar');

P100=10

pause

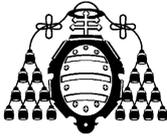
disp ('re1=porcentaje de rechazo del primer ciclo de molienda, pulse cualquier tecla para continuar');

re1=E(5,1)*exp(-C*P100ⁿ*ti1)*100

pause

disp ('reg1=rechazo del primer ciclo de molienda(g), pulse cualquier tecla para continuar');

reg1=re1/100*Pm



pause

disp('pas1=pasante del primer ciclo de molienda(g), pulse cualquier tecla para continuar');

pas1=Pm-reg1

pause

%finos en la alimentación: 1-rechazo acumulado en el tamaño de corte, en nuestro caso 100

fal=1-E(5,1);

disp('fi1=finos netos del primer ciclo de molienda(g), pulse cualquier tecla para continuar');

fi1=pas1-fal*Pm

pause

disp('Gbp1=molturabilidad del primer ciclo de molienda(g), pulse cualquier tecla para continuar');

Gbp1=fi1/nv1

pause

% Porcentaje de rechazo acumulado en el primer ciclo de molienda

disp('RecAcu1= rechazo acumulado del primer ciclo de molienda(%), pulse cualquier tecla para continuar');

$$\text{RecAcu1}=[E(2,1)*\exp(-C*x(1,2)^n*ti1)*100 \ E(3,1)*\exp(-C*x(1,3)^n*ti1)*100 \ E(4,1)*\exp(-C*x(1,4)^n*ti1)*100 \ E(5,1)*\exp(-C*x(1,5)^n*ti1)*100 \ E(6,1)*\exp(-C*x(1,6)^n*ti1)*100 \ E(7,1)*\exp(-C*x(1,7)^n*ti1)*100 \ E(8,1)*\exp(-C*x(1,8)^n*ti1)*100 \ E(9,1)*\exp(-C*x(1,9)^n*ti1)*100]$$

pause

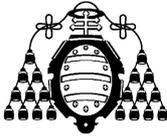
% Porcentaje de pasante acumulado en el primer ciclo de molienda

disp('PasAcu1= pasante acumulado del primer ciclo de molienda(%), pulse cualquier tecla para continuar');

PasAcu1=100-RecAcu1

pause

% Pasante acumulado (en gramos) en el primer ciclo de molienda



disp('PasAcug1= pasante acumulado del primer ciclo de molienda(g), pulse cualquier tecla para continuar');

PasAcug1=(PasAcu1/100)*Pm

pause

% Realizamos el corte a 100 micras, en el primer ciclo de molienda

disp('CorSUP1= pesos (g) de cada tamaño SUPERIORES al tamaño de corte del primer ciclo de molienda(g), pulse cualquier tecla para continuar');

CorSUP1=[RecAcu1(1,1) RecAcu1(1,2)-RecAcu1(1,1) RecAcu1(1,3)-RecAcu1(1,2) RecAcu1(1,4)-
RecAcu1(1,3) 0 0 0 0]/100*Pm

pause

% Peso total del tamaño SUPERIOR al corte de 100 micras, en el primer ciclo de molienda

SumCorSUP1= sum(CorSUP1);

disp('Corinf1= pesos (g) de cada tamaño inferiores al tamaño de corte del primer ciclo de molienda(g), pulse cualquier tecla para continuar');

Corinf1=[0 0 0 PasAcug1(1,4)-PasAcug1(1,5) PasAcug1(1,5)-PasAcug1(1,6) PasAcug1(1,6)-
PasAcug1(1,7) PasAcug1(1,7)-PasAcug1(1,8) PasAcug1(1,8)]

pause

% Peso total del tamaño inferior al corte de 100 micras, en el primer ciclo de molienda

SumCorinf1= sum(Corinf1);

% En la alimentación del siguiente ciclo el RECIRCULADO es el total de los tamaños superiores al tamaño de corte.

disp('Fre1= fresco (g) del primer ciclo de molienda(g), pulse cualquier tecla para continuar');

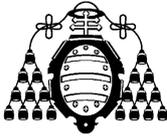
Fre1=[E(2,1) E(3,1)-E(2,1) E(4,1)-E(3,1) E(5,1)-E(4,1) E(6,1)-E(5,1) E(7,1)-E(6,1) E(8,1)-E(7,1)
E(9,1)-E(8,1)]*pas1*E(9,1)

pause

% Peso total del fresco, en el primer ciclo de molienda

SumFre1=sum(Fre1);

% Peso total en gramos, en el primer ciclo de molienda



disp('Totg1= peso total en gramos del primer ciclo de molienda(g), pulse cualquier tecla para continuar');

Totg1= CorSUP1+Fre1

pause

% SumTotg1: es el peso total en gramos.

SumTotg1=sum(Totg1);

% Tot1= Peso total en porcentaje para un peso de 700 cm³ de material, en el primer ciclo de molienda.

disp('Tot1= peso total en % del primer ciclo de molienda(g), pulse cualquier tecla para continuar');

Tot1=Totg1/Pm*100

pause

% Totf1=Suma total del peso, en porcentaje,

Totf1=SumTotg1/Pm*100;

% RAC1= Retenido acumulado, en porcentaje, en el primer ciclo de molienda.

disp('RAC1= Retenido acumulado, en porcentaje, en el primer ciclo de molienda, pulse cualquier tecla para continuar');

RAC1=[Tot1(1,1) Tot1(1,1)+Tot1(1,2) Tot1(1,1)+Tot1(1,2)+Tot1(1,3)

Tot1(1,1)+Tot1(1,2)+Tot1(1,3)+Tot1(1,4) Tot1(1,1)+Tot1(1,2)+Tot1(1,3)+Tot1(1,4)+Tot1(1,5)

Tot1(1,1)+Tot1(1,2)+Tot1(1,3)+Tot1(1,4)+Tot1(1,5)+Tot1(1,6)

Tot1(1,1)+Tot1(1,2)+Tot1(1,3)+Tot1(1,4)+Tot1(1,5)+Tot1(1,6)+Tot1(1,7)

Tot1(1,1)+Tot1(1,2)+Tot1(1,3)+Tot1(1,4)+Tot1(1,5)+Tot1(1,6)+Tot1(1,7)+Tot1(1,8)]

pause

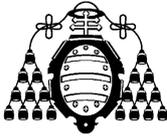
disp('nv2=Número de vueltas del segundo ciclo de molienda, pulse cualquier tecla para continuar');

nv2=(Pm/3.5-pas1*fal)/Gbp1

pause

disp('ti2=tiempo en minutos del segundo ciclo de molienda, pulse cualquier tecla para continuar');

ti2=nv2/70



```
pause

disp ('re2=porcentaje de rechazo del segundo ciclo de molienda, pulse cualquier tecla para
continuar');

re2=RAC1(1,4)*exp(-C*P100^n*ti2)

pause

disp ('reg2=rechazo del segundo ciclo de molienda(g), pulse cualquier tecla para continuar');

reg2=re2/100*Pm

pause

disp ('pas2=pasante del segundo ciclo de molienda(g), pulse cualquier tecla para continuar');

pas2=Pm-reg2

pause

disp ('fi2=finos netos del segundo ciclo de molienda(g), pulse cualquier tecla para continuar');

fi2=pas2-fal*SumCorinf1

pause

disp ('Gbp2=molturabilidad del segundo ciclo de molienda(g), pulse cualquier tecla para
continuar');

Gbp2=fi2/nv2

pause

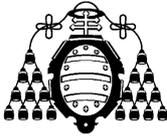
% Porcentaje de rechazo acumulado en el segundo ciclo de molienda

disp('RecAcu2= rechazo acumulado del segundo ciclo de molienda(%), pulse cualquier tecla
para continuar');

RecAcu2=[RAC1(1,1)*exp(-C*x(1,2)^n*ti2) RAC1(1,2)*exp(-C*x(1,3)^n*ti2) RAC1(1,3)*exp(-
C*x(1,4)^n*ti2) RAC1(1,4)*exp(-C*x(1,5)^n*ti2) RAC1(1,5)*exp(-C*x(1,6)^n*ti2)
RAC1(1,6)*exp(-C*x(1,7)^n*ti2) RAC1(1,7)*exp(-C*x(1,8)^n*ti2) RAC1(1,8)*exp(-
C*x(1,9)^n*ti2)]

pause

% Porcentaje de pasante acumulado en el segundo ciclo de molienda
```



disp('PasAcu2= pasante acumulado del segundo ciclo de molienda(%), pulse cualquier tecla para continuar');

PasAcu2=100-RecAcu2

pause

% Pasante acumulado (en gramos) en el segundo ciclo de molienda

disp('PasAcug2= pasante acumulado del segundo ciclo de molienda(g), pulse cualquier tecla para continuar');

PasAcug2=(PasAcu2/100)*Pm

pause

% Realizamos el corte a 100 micras, en el segundo ciclo de molienda

disp('CorSUP2= pesos (g) de cada tamaño SUPERIORES al tamaño de corte del segundo ciclo de molienda(g), pulse cualquier tecla para continuar');

CorSUP2=[RecAcu2(1,1) RecAcu2(1,2)-RecAcu2(1,1) RecAcu2(1,3)-RecAcu2(1,2) RecAcu2(1,4)-
RecAcu2(1,3) 0 0 0 0]/100*Pm

pause

% Peso total del tamaño SUPERIOR al corte de 100 micras, en el segundo ciclo de molienda

SumCorSUP2= sum(CorSUP2);

disp('Corinf2= pesos (g) de cada tamaño inferiores al tamaño de corte del segundo ciclo de molienda(g), pulse cualquier tecla para continuar');

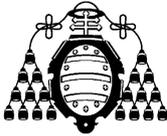
Corinf2=[0 0 0 PasAcug2(1,4)-PasAcug2(1,5) PasAcug2(1,5)-PasAcug2(1,6) PasAcug2(1,6)-
PasAcug2(1,7) PasAcug2(1,7)-PasAcug2(1,8) PasAcug2(1,8)]

pause

% Peso total del tamaño inferior al corte de 100 micras, en el segundo ciclo de molienda

SumCorinf2= sum(Corinf2);

% En la alimentación del siguiente ciclo el RECIRCULADO es el total de los tamaños superiores al tamaño de corte.



disp('Fre2= fresco (g) del segundo ciclo de molienda(g), pulse cualquier tecla para continuar');

Fre2=[E(2,1) E(3,1)-E(2,1) E(4,1)-E(3,1) E(5,1)-E(4,1) E(6,1)-E(5,1) E(7,1)-E(6,1) E(8,1)-E(7,1)
E(9,1)-E(8,1)]*pas2*E(9,1)

pause

% Peso total del fresco, en el segundo ciclo de molienda

SumFre2=sum(Fre2);

% Peso total en gramos, en el segundo ciclo de molienda

disp('Totg2= peso total en gramos del segundo ciclo de molienda(g), pulse cualquier tecla para continuar');

Totg2= CorSUP2+Fre2

pause

% SumTotg2: es el peso total en gramos.

SumTotg2=sum(Totg2);

% Tot2= Peso total en porcentaje para un peso de 700 cm³ de material, en el segundo ciclo de molienda.

disp('Tot2= peso total en % del segundo ciclo de molienda(g), pulse cualquier tecla para continuar');

Tot2=Totg2/Pm*100

pause

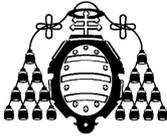
% Totf2=Suma total del peso, en porcentaje

Totf2=SumTotg2/Pm*100;

% RAC2= Retenido acumulado, en porcentaje, en el segundo ciclo de molienda.

disp('RAC2= Retenido acumulado, en porcentaje, en el segundo ciclo de molienda, pulse cualquier tecla para continuar');

RAC2=[Tot2(1,1) Tot2(1,1)+Tot2(1,2) Tot2(1,1)+Tot2(1,2)+Tot2(1,3)
Tot2(1,1)+Tot2(1,2)+Tot2(1,3)+Tot2(1,4) Tot2(1,1)+Tot2(1,2)+Tot2(1,3)+Tot2(1,4)+Tot2(1,5)
Tot2(1,1)+Tot2(1,2)+Tot2(1,3)+Tot2(1,4)+Tot2(1,5)+Tot2(1,6)
Tot2(1,1)+Tot2(1,2)+Tot2(1,3)+Tot2(1,4)+Tot2(1,5)+Tot2(1,6)+Tot2(1,7)
Tot2(1,1)+Tot2(1,2)+Tot2(1,3)+Tot2(1,4)+Tot2(1,5)+Tot2(1,6)+Tot2(1,7)+Tot2(1,8)]



pause

disp ('nv3=Número de vueltas del tercer ciclo de molienda, pulse cualquier tecla para continuar');

$$nv3=(Pm/3.5-pas2*fal)/Gbp2$$

pause

disp ('ti3=tiempo en minutos del tercer ciclo de molienda, pulse cualquier tecla para continuar');

$$ti3=nv3/70$$

pause

disp ('re3=porcentaje de rechazo del tercer ciclo de molienda, pulse cualquier tecla para continuar');

$$re3=RAC2(1,4)*exp(-C*P100^n*ti3)$$

pause

disp ('reg3=rechazo del tercer ciclo de molienda(g), pulse cualquier tecla para continuar');

$$reg3=re3/100*Pm$$

pause

disp ('pas3=pasante del tercer ciclo de molienda(g), pulse cualquier tecla para continuar');

$$pas3=Pm-reg3$$

pause

disp ('fi3=finos netos del tercer ciclo de molienda(g), pulse cualquier tecla para continuar');

$$fi3=pas3-fal*SumCorinf2$$

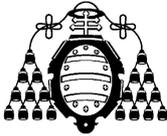
pause

disp ('Gbp3=molturabilidad del tercer ciclo de molienda(g), pulse cualquier tecla para continuar');

$$Gbp3=fi3/nv3$$

pause

% Porcentaje de rechazo acumulado en el tercer ciclo de molienda



disp('RecAcu3= rechazo acumulado del tercer ciclo de molienda(%), pulse cualquier tecla para continuar');

$$\text{RecAcu3} = [\text{RAC2}(1,1) \cdot \exp(-C \cdot x(1,2)^n \cdot t_i^3) \text{ RAC2}(1,2) \cdot \exp(-C \cdot x(1,3)^n \cdot t_i^3) \text{ RAC2}(1,3) \cdot \exp(-C \cdot x(1,4)^n \cdot t_i^3) \text{ RAC2}(1,4) \cdot \exp(-C \cdot x(1,5)^n \cdot t_i^3) \text{ RAC2}(1,5) \cdot \exp(-C \cdot x(1,6)^n \cdot t_i^3) \text{ RAC2}(1,6) \cdot \exp(-C \cdot x(1,7)^n \cdot t_i^3) \text{ RAC2}(1,7) \cdot \exp(-C \cdot x(1,8)^n \cdot t_i^3) \text{ RAC2}(1,8) \cdot \exp(-C \cdot x(1,9)^n \cdot t_i^3)]$$

pause

% Porcentaje de pasante acumulado en el tercer ciclo de molienda

disp('PasAcu3= pasante acumulado del tercer ciclo de molienda(%), pulse cualquier tecla para continuar');

$$\text{PasAcu3} = 100 - \text{RecAcu3}$$

pause

% Pasante acumulado (en gramos) en el tercer ciclo de molienda

disp('PasAcug3= pasante acumulado del tercer ciclo de molienda(g), pulse cualquier tecla para continuar');

$$\text{PasAcug3} = (\text{PasAcu3}/100) \cdot P_m$$

pause

% Realizamos el corte a 100 micras, en el tercer ciclo de molienda

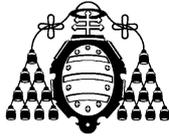
disp('CorSUP3= pesos (g) de cada tamaño SUPERIORES al tamaño de corte del tercer ciclo de molienda(g), pulse cualquier tecla para continuar');

$$\text{CorSUP3} = [\text{RecAcu3}(1,1) \text{ RecAcu3}(1,2) - \text{RecAcu3}(1,1) \text{ RecAcu3}(1,3) - \text{RecAcu3}(1,2) \text{ RecAcu3}(1,4) - \text{RecAcu3}(1,3) \text{ 0 0 0 0}] / 100 \cdot P_m$$

pause

% Peso total del tamaño SUPERIOR al corte de 100 micras, en el tercer ciclo de molienda

$$\text{SumCorSUP3} = \text{sum}(\text{CorSUP3});$$



disp('Corinf3= pesos (g) de cada tamaño inferiores al tamaño de corte del tercer ciclo de molienda(g), pulse cualquier tecla para continuar');

Corinf3=[0 0 0 PasAcug3(1,4)-PasAcug3(1,5) PasAcug3(1,5)-PasAcug3(1,6) PasAcug3(1,6)-PasAcug3(1,7) PasAcug3(1,7)-PasAcug3(1,8) PasAcug3(1,8)]

pause

% Peso total del tamaño inferior al corte de 100 micras, en el tercer ciclo de molienda

SumCorinf3= sum(Corinf3);

% En la alimentación del siguiente ciclo el RECIRCULADO es el total de los tamaños superiores al tamaño de corte.

disp('Fre3= fresco (g) del tercer ciclo de molienda(g), pulse cualquier tecla para continuar');

Fre3=[E(2,1) E(3,1)-E(2,1) E(4,1)-E(3,1) E(5,1)-E(4,1) E(6,1)-E(5,1) E(7,1)-E(6,1) E(8,1)-E(7,1) E(9,1)-E(8,1)]*pas3*E(9,1)

pause

% Peso total del fresco, en el tercer ciclo de molienda

SumFre3=sum(Fre3);

% Peso total en gramos, en el tercer ciclo de molienda

disp('Totg3= peso total en gramos del tercer ciclo de molienda(g), pulse cualquier tecla para continuar');

Totg3= CorSUP3+Fre3

pause

% SumTotg3: es el peso total en gramos.

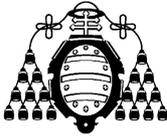
SumTotg3=sum(Totg3);

% Tot3= Peso total en porcentaje para un peso de 700 cm³ de material, en el tercer ciclo de molienda.

disp('Tot3= peso total en % del tercer ciclo de molienda(g), pulse cualquier tecla para continuar');

Tot3=SumTotg3/Pm*100

pause



% Totf3=Suma total del peso, en porcentaje

Totf3=SumTotg3/Pm*100;

% RAC3= Retenido acumulado, en porcentaje, en el tercer ciclo de molienda.

disp('RAC3= Retenido acumulado, en porcentaje, en el tercer ciclo de molienda, pulse cualquier tecla para continuar');

RAC3=[Tot3(1,1) Tot3(1,1)+Tot3(1,2) Tot3(1,1)+Tot3(1,2)+Tot3(1,3)

Tot3(1,1)+Tot3(1,2)+Tot3(1,3)+Tot3(1,4) Tot3(1,1)+Tot3(1,2)+Tot3(1,3)+Tot3(1,4)+Tot3(1,5)

Tot3(1,1)+Tot3(1,2)+Tot3(1,3)+Tot3(1,4)+Tot3(1,5)+Tot3(1,6)

Tot3(1,1)+Tot3(1,2)+Tot3(1,3)+Tot3(1,4)+Tot3(1,5)+Tot3(1,6)+Tot3(1,7)

Tot3(1,1)+Tot3(1,2)+Tot3(1,3)+Tot3(1,4)+Tot3(1,5)+Tot3(1,6)+Tot3(1,7)+Tot3(1,8)]

pause

disp ('nv4=Número de vueltas del cuarto ciclo de molienda, pulse cualquier tecla para continuar');

nv4=(Pm/3.5-pas3*fal)/Gbp3

pause

disp ('ti4=tiempo en minutos del cuarto ciclo de molienda, pulse cualquier tecla para continuar');

ti4=nv4/70

pause

disp ('re4=porcentaje de rechazo del cuarto ciclo de molienda, pulse cualquier tecla para continuar');

re4=RAC3(1,4)*exp(-C*P100^n*ti4)

pause

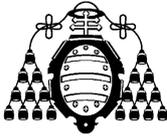
disp ('reg4=rechazo del cuarto ciclo de molienda(g), pulse cualquier tecla para continuar');

reg4=re4/100*Pm

pause

disp ('pas4=pasante del cuarto ciclo de molienda(g), pulse cualquier tecla para continuar');

pas4=Pm-reg4



```
pause

disp ('fi4=finos netos del cuarto ciclo de molienda(g), pulse cualquier tecla para continuar');

fi4=pas4-fal*SumCorinf3

pause

disp ('Gbp4=molturabilidad del cuarto ciclo de molienda(g), pulse cualquier tecla para
continuar');

Gbp4=fi4/nv4

pause

% Porcentaje de rechazo acumulado en el cuarto ciclo de molienda

disp('RecAcu4= rechazo acumulado del cuarto ciclo de molienda(%), pulse cualquier tecla para
continuar');

RecAcu4=[RAC3(1,1)*exp(-C*x(1,2)^n*ti4) RAC3(1,2)*exp(-C*x(1,3)^n*ti4) RAC3(1,3)*exp(-
C*x(1,4)^n*ti4) RAC3(1,4)*exp(-C*x(1,5)^n*ti4) RAC3(1,5)*exp(-C*x(1,6)^n*ti4)
RAC3(1,6)*exp(-C*x(1,7)^n*ti4) RAC3(1,7)*exp(-C*x(1,8)^n*ti4) RAC3(1,8)*exp(-
C*x(1,9)^n*ti4)]

pause

% Porcentaje de pasante acumulado en el cuarto ciclo de molienda

disp('PasAcu4= pasante acumulado del cuarto ciclo de molienda(%), pulse cualquier tecla para
continuar');

PasAcu4=100-RecAcu4

pause

% Pasante acumulado (en gramos) en el cuarto ciclo de molienda

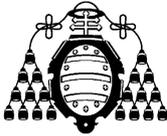
disp('PasAcug4= pasante acumulado del cuarto ciclo de molienda(g), pulse cualquier tecla para
continuar');

PasAcug4=(PasAcu4/100)*Pm

pause

% Realizamos el corte a 100 micras, en el cuarto ciclo de molienda

disp('CorSUP4= pesos (g) de cada tamaño SUPERIORES al tamaño de corte del cuarto ciclo de
molienda(g), pulse cualquier tecla para continuar');
```



$CorSUP4 = [RecAcu4(1,1) RecAcu4(1,2) - RecAcu4(1,1) RecAcu4(1,3) - RecAcu4(1,2) RecAcu4(1,4) - RecAcu4(1,3) 0 0 0 0] / 100 * Pm$

pause

% Peso total del tamaño SUPERIOR al corte de 100 micras, en el cuarto ciclo de molienda

$SumCorSUP4 = sum(CorSUP4);$

disp('Corinf4= pesos (g) de cada tamaño inferiores al tamaño de corte del cuarto ciclo de molienda(g), pulse cualquier tecla para continuar');

$Corinf4 = [0 0 0 PasAcug4(1,4) - PasAcug4(1,5) PasAcug4(1,5) - PasAcug4(1,6) PasAcug4(1,6) - PasAcug4(1,7) PasAcug4(1,7) - PasAcug4(1,8) PasAcug4(1,8)]$

pause

% Peso total del tamaño inferior al corte de 100 micras, en el cuarto ciclo de molienda

$SumCorinf4 = sum(Corinf4);$

% En la alimentación del siguiente ciclo el RECIRCULADO es el total de los tamaños superiores al tamaño de corte.

disp('Fre4= fresco (g) del cuarto ciclo de molienda(g), pulse cualquier tecla para continuar');

$Fre4 = [E(2,1) E(3,1) - E(2,1) E(4,1) - E(3,1) E(5,1) - E(4,1) E(6,1) - E(5,1) E(7,1) - E(6,1) E(8,1) - E(7,1) E(9,1) - E(8,1)] * pas4 * E(9,1)$

pause

% Peso total del fresco, en el cuarto ciclo de molienda

$SumFre4 = sum(Fre4);$

% Peso total en gramos, en el cuarto ciclo de molienda

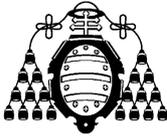
disp('Totg4= peso total en gramos del cuarto ciclo de molienda(g), pulse cualquier tecla para continuar');

$Totg4 = CorSUP4 + Fre4$

pause

% SumTotg4: es el peso total en gramos.

$SumTotg4 = sum(Totg4);$



% Tot4= Peso total en porcentaje para un peso de 700 cm³ de material, en el cuarto ciclo de molienda.

disp('Tot4= peso total en % del cuarto ciclo de molienda(g), pulse cualquier tecla para continuar');

$$\text{Tot4}=\text{Totg4}/\text{Pm}*100$$

pause

% Totf4=Suma total del peso, en porcentaje

$$\text{Totf4}=\text{SumTotg4}/\text{Pm}*100;$$

% RAC4= Retenido acumulado, en porcentaje, en el cuarto ciclo de molienda.

disp('RAC4= Retenido acumulado, en porcentaje, en el cuarto ciclo de molienda, pulse cualquier tecla para continuar');

$$\text{RAC4}=[\text{Tot4}(1,1) \text{ Tot4}(1,1)+\text{Tot4}(1,2) \text{ Tot4}(1,1)+\text{Tot4}(1,2)+\text{Tot4}(1,3)$$

$$\text{Tot4}(1,1)+\text{Tot4}(1,2)+\text{Tot4}(1,3)+\text{Tot4}(1,4) \text{ Tot4}(1,1)+\text{Tot4}(1,2)+\text{Tot4}(1,3)+\text{Tot4}(1,4)+\text{Tot4}(1,5)$$

$$\text{Tot4}(1,1)+\text{Tot4}(1,2)+\text{Tot4}(1,3)+\text{Tot4}(1,4)+\text{Tot4}(1,5)+\text{Tot4}(1,6)$$

$$\text{Tot4}(1,1)+\text{Tot4}(1,2)+\text{Tot4}(1,3)+\text{Tot4}(1,4)+\text{Tot4}(1,5)+\text{Tot4}(1,6)+\text{Tot4}(1,7)$$

$$\text{Tot4}(1,1)+\text{Tot4}(1,2)+\text{Tot4}(1,3)+\text{Tot4}(1,4)+\text{Tot4}(1,5)+\text{Tot4}(1,6)+\text{Tot4}(1,7)+\text{Tot4}(1,8)]$$

pause

disp ('nv5=Número de vueltas del quinto ciclo de molienda, pulse cualquier tecla para continuar');

$$\text{nv5}=(\text{Pm}/3.5-\text{pas4}*\text{fal})/\text{Gbp4}$$

pause

disp ('ti5=tiempo en minutos del quinto ciclo de molienda, pulse cualquier tecla para continuar');

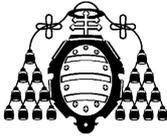
$$\text{ti5}=\text{nv5}/70$$

pause

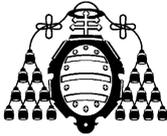
disp ('re5=porcentaje de rechazo del quinto ciclo de molienda, pulse cualquier tecla para continuar');

$$\text{re5}=\text{RAC4}(1,4)*\exp(-\text{C}*\text{P}100^{\text{n}}*\text{ti5})$$

pause



```
disp ('reg5=rechazo del quinto ciclo de molienda(g), pulse cualquier tecla para continuar');  
reg5=re5/100*Pm  
  
pause  
  
disp ('pas5=pasante del quinto ciclo de molienda(g), pulse cualquier tecla para continuar');  
pas5=Pm-reg5  
  
pause  
  
disp ('fi5=finos netos del quinto ciclo de molienda(g), pulse cualquier tecla para continuar');  
fi5=pas5-fal*SumCorinf4  
  
pause  
  
disp ('Gbp5=molturabilidad del quinto ciclo de molienda(g), pulse cualquier tecla para  
continuar');  
Gbp5=fi5/nv5  
  
pause  
  
% Porcentaje de rechazo acumulado en el quinto ciclo de molienda  
  
disp('RecAcu5= rechazo acumulado del quinto ciclo de molienda(%), pulse cualquier tecla para  
continuar');  
  
RecAcu5=[RAC4(1,1)*exp(-C*x(1,2)^n*ti5) RAC4(1,2)*exp(-C*x(1,3)^n*ti5) RAC4(1,3)*exp(-  
C*x(1,4)^n*ti5) RAC4(1,4)*exp(-C*x(1,5)^n*ti5) RAC4(1,5)*exp(-C*x(1,6)^n*ti5)  
RAC4(1,6)*exp(-C*x(1,7)^n*ti5) RAC4(1,7)*exp(-C*x(1,8)^n*ti5) RAC4(1,8)*exp(-  
C*x(1,9)^n*ti5)]  
  
pause  
  
% Porcentaje de pasante acumulado en el quinto ciclo de molienda  
  
disp('PasAcu5= pasante acumulado del quinto ciclo de molienda(%), pulse cualquier tecla para  
continuar');  
  
PasAcu5=100-RecAcu5  
  
pause  
  
% Pasante acumulado (en gramos) en el quinto ciclo de molienda
```



disp('PasAcug5= pasante acumulado del quinto ciclo de molienda(g), pulse cualquier tecla para continuar');

PasAcug5=(PasAcu5/100)*Pm

pause

% Realizamos el corte a 100 micras, en el quinto ciclo de molienda

disp('CorSUP5= pesos (g) de cada tamaño SUPERIORES al tamaño de corte del quinto ciclo de molienda(g), pulse cualquier tecla para continuar');

CorSUP5=[RecAcu5(1,1) RecAcu5(1,2)-RecAcu5(1,1) RecAcu5(1,3)-RecAcu5(1,2) RecAcu5(1,4)-
RecAcu5(1,3) 0 0 0 0]/100*Pm

pause

% Peso total del tamaño SUPERIOR al corte de 100 micras, en el quinto ciclo de molienda

SumCorSUP5= sum(CorSUP5);

disp('Corinf5= pesos (g) de cada tamaño inferiores al tamaño de corte del quinto ciclo de molienda(g), pulse cualquier tecla para continuar');

Corinf5=[0 0 0 PasAcug5(1,4)-PasAcug5(1,5) PasAcug5(1,5)-PasAcug5(1,6) PasAcug5(1,6)-
PasAcug5(1,7) PasAcug5(1,7)-PasAcug5(1,8) PasAcug5(1,8)]

pause

% Peso total del tamaño inferior al corte de 100 micras, en el quinto ciclo de molienda

SumCorinf5= sum(Corinf5);

% En la alimentación del siguiente ciclo el RECIRCULADO es el total de los tamaños superiores al tamaño de corte.

disp('Fre5= fresco (g) del quinto ciclo de molienda(g), pulse cualquier tecla para continuar');

Fre5=[E(2,1) E(3,1)-E(2,1) E(4,1)-E(3,1) E(5,1)-E(4,1) E(6,1)-E(5,1) E(7,1)-E(6,1) E(8,1)-E(7,1)
E(9,1)-E(8,1)]*pas5*E(9,1)

pause

% Peso total del fresco, en el quinto ciclo de molienda

SumFre5=sum(Fre5);

% Peso total en gramos, en el quinto ciclo de molienda



disp('Totg5= peso total en gramos del quinto ciclo de molienda(g), pulse cualquier tecla para continuar');

Totg5= CorSUP5+Fre5

pause

% SumTotg5: es el peso total en gramos.

SumTotg5=sum(Totg5);

% Tot5= Peso total en porcentaje para un peso de 700 cm³ de material, en el quinto ciclo de molienda.

disp('Tot5= peso total en % del quinto ciclo de molienda(g), pulse cualquier tecla para continuar');

Tot5=Totg5/Pm*100

pause

% Totf5=Suma total del peso, en porcentaje

Totf5=SumTotg5/Pm*100;

% RAC5= Retenido acumulado, en porcentaje, en el quinto ciclo de molienda.

disp('RAC5= Retenido acumulado, en porcentaje, en el quinto ciclo de molienda, pulse cualquier tecla para continuar');

RAC5=[Tot5(1,1) Tot5(1,1)+Tot5(1,2) Tot5(1,1)+Tot5(1,2)+Tot5(1,3)

Tot5(1,1)+Tot5(1,2)+Tot5(1,3)+Tot5(1,4) Tot5(1,1)+Tot5(1,2)+Tot5(1,3)+Tot5(1,4)+Tot5(1,5)

Tot5(1,1)+Tot5(1,2)+Tot5(1,3)+Tot5(1,4)+Tot5(1,5)+Tot5(1,6)

Tot5(1,1)+Tot5(1,2)+Tot5(1,3)+Tot5(1,4)+Tot5(1,5)+Tot5(1,6)+Tot5(1,7)

Tot5(1,1)+Tot5(1,2)+Tot5(1,3)+Tot5(1,4)+Tot5(1,5)+Tot5(1,6)+Tot5(1,7)+Tot5(1,8)]

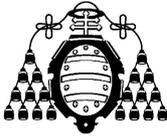
pause

disp('nv6=Número de vueltas del sexto ciclo de molienda, pulse cualquier tecla para continuar');

nv6=(Pm/3.5-pas5*fal)/Gbp5

pause

disp('ti6=tiempo en minutos del sexto ciclo de molienda, pulse cualquier tecla para continuar');



ti6=nv6/70

pause

disp('re6=porcentaje de rechazo del sexto ciclo de molienda, pulse cualquier tecla para continuar');

re6=RAC5(1,4)*exp(-C*P100^n*ti6)

pause

disp('reg6=rechazo del sexto ciclo de molienda(g), pulse cualquier tecla para continuar');

reg6=re6/100*Pm

pause

disp('pas6=pasante del sexto ciclo de molienda(g), pulse cualquier tecla para continuar');

pas6=Pm-reg6

pause

disp('fi6=finos netos del sexto ciclo de molienda(g), pulse cualquier tecla para continuar');

fi6=pas6-fal*SumCorinf5

pause

disp('Gbp6=molturabilidad del sexto ciclo de molienda(g), pulse cualquier tecla para continuar');

Gbp6=fi6/nv6

pause

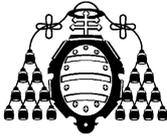
% Porcentaje de rechazo acumulado en el sexto ciclo de molienda

disp('RecAcu6= rechazo acumulado del sexto ciclo de molienda(%), pulse cualquier tecla para continuar');

RecAcu6=[RAC5(1,1)*exp(-C*x(1,2)^n*ti6) RAC5(1,2)*exp(-C*x(1,3)^n*ti6) RAC5(1,3)*exp(-C*x(1,4)^n*ti6) RAC5(1,4)*exp(-C*x(1,5)^n*ti6) RAC5(1,5)*exp(-C*x(1,6)^n*ti6) RAC5(1,6)*exp(-C*x(1,7)^n*ti6) RAC5(1,7)*exp(-C*x(1,8)^n*ti6) RAC5(1,8)*exp(-C*x(1,9)^n*ti6)]

pause

% Porcentaje de pasante acumulado en el sexto ciclo de molienda



disp('PasAcu6= pasante acumulado del sexto ciclo de molienda(%), pulse cualquier tecla para continuar');

PasAcu6=100-RecAcu6

pause

% Pasante acumulado (en gramos) en el sexto ciclo de molienda

disp('PasAcug6= pasante acumulado del sexto ciclo de molienda(g), pulse cualquier tecla para continuar');

PasAcug6=(PasAcu6/100)*Pm

pause

% Realizamos el corte a 100 micras, en el sexto ciclo de molienda

disp('CorSUP6= pesos (g) de cada tamaño SUPERIORES al tamaño de corte del sexto ciclo de molienda(g), pulse cualquier tecla para continuar');

CorSUP6=[RecAcu6(1,1) RecAcu6(1,2)-RecAcu6(1,1) RecAcu6(1,3)-RecAcu6(1,2) RecAcu6(1,4)-
RecAcu6(1,3) 0 0 0 0]/100*Pm

pause

% Peso total del tamaño SUPERIOR al corte de 100 micras, en el sexto ciclo de molienda

SumCorSUP6= sum(CorSUP6);

disp('Corinf6= pesos (g) de cada tamaño inferiores al tamaño de corte del sexto ciclo de molienda(g), pulse cualquier tecla para continuar');

Corinf6=[0 0 0 PasAcug6(1,4)-PasAcug6(1,5) PasAcug6(1,5)-PasAcug6(1,6) PasAcug6(1,6)-
PasAcug6(1,7) PasAcug6(1,7)-PasAcug6(1,8) PasAcug6(1,8)]

pause

% Peso total del tamaño inferior al corte de 100 micras, en el sexto ciclo de molienda

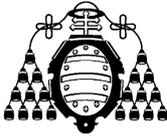
SumCorinf6= sum(Corinf6);

% Con el vector alimentación se puede obtener el tamaño F80 mediante interpolación

%Pasfin: Pasante final peso en gramos

Pasfin=[Corinf6(1,4) Corinf6(1,5) Corinf6(1,6) Corinf6(1,7) Corinf6(1,8)];

SumPasfin=sum(Pasfin);



%PasfinP: Pasante final peso en porcentaje

```
disp('PasfinP= Peso del pasante final en porcentaje, pulse cualquier tecla para continuar');
```

```
PasfinP=[Corinf6(1,4) Corinf6(1,5) Corinf6(1,6) Corinf6(1,7) Corinf6(1,8)]/ SumPasfin*100
```

```
pause
```

%Lum=Luz de malla, tamaño en micras de las cribas a partir de la de corte

```
Lum=[x(1,5) x(1,6) x(1,7) x(1,8) x(1,9)]
```

%Pasante: pasante en porcentaje

```
disp('Pasante= Pasante en porcentaje, pulse cualquier tecla para continuar');
```

```
Pasante=[PasfinP(1,1)+PasfinP(1,2)+PasfinP(1,3)+PasfinP(1,4)+ PasfinP(1,5)
```

```
PasfinP(1,2)+PasfinP(1,3)+PasfinP(1,4)+ PasfinP(1,5) PasfinP(1,3)+PasfinP(1,4)+ PasfinP(1,5)
```

```
PasfinP(1,4)+ PasfinP(1,5) PasfinP(1,5)]
```

```
pause
```

%Cálculo de la P80 mediante interpolación

```
lyp1=log10(Lum(1,2));
```

```
lyp2=log10(Lum(1,3));
```

```
Pmm=[Pasante(1,2) Pasante(1,3)];
```

```
lyyp=[lyp1 lyp2];
```

```
nyp=length(Pmm);
```

```
TENDENCIA= 339.2321*(nyp*sum(Pmm.*lyyp)-sum(Pmm)*sum(lyyp))/(nyp*sum(Pmm.^2)-  
(sum(Pmm))^2);
```

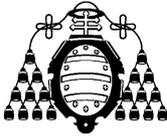
% P80: tamaño de partícula correspondiente a un 80% de pasante en el producto expresado en micras

```
disp('P80 tamaño de partícula correspondiente a un 80% de pasante en el producto expresado  
en micras , pulse cualquier tecla para continuar');
```

```
P80=10^TENDENCIA
```

```
pause
```

%Gbpf: Cálculo de los tres últimos ciclos del Gbp



$$G_{bpf} = (G_{bp4} + G_{bp5} + G_{bp6}) / 3;$$

%Wi: Cálculo del índice de BOND del material ensayado

disp ('Wi: índice de BOND , pulse cualquier tecla para continuar');

$$W_i = 44.5 / (P_{100}^{0.23} * G_{bpf}^{0.82} * 10 * ((1 / (P_{80}^{0.5})) - (1 / (F_{80}^{0.5}))))$$

pause