

**UNIVERSIDAD DE ORIENTE
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA**



**DESARROLLO DE TÉCNICAS DE EXPERIMENTACIÓN CON UN EQUIPO DE
MANEJO DE SÓLIDOS A ESCALA PILOTO, EN EL LABORATORIO DE
OPERACIONES UNITARIAS DE LA UNIVERSIDAD DE ORIENTE, NÚCLEO
ANZOÁTEGUI**

Realizado por:

Daniela Nazaret Figueroa Del Corral

Trabajo de Grado presentado ante la Universidad de Oriente como requisito parcial
para optar al título de:

Ingeniero Químico

Puerto la Cruz, junio de 2011

**UNIVERSIDAD DE ORIENTE
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA**



**DESARROLLO DE TÉCNICAS DE EXPERIMENTACIÓN CON UN EQUIPO DE
MANEJO DE SÓLIDOS A ESCALA PILOTO, EN EL LABORATORIO DE
OPERACIONES UNITARIAS DE LA UNIVERSIDAD DE ORIENTE, NÚCLEO
ANZOÁTEGUI**

Asesor:

Ing. Arturo Rodulfo M.Sc.

Asesor académico

Puerto la Cruz, junio de 2011

UNIVERSIDAD DE ORIENTE
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA



**DESARROLLO DE TÉCNICAS DE EXPERIMENTACIÓN CON UN EQUIPO DE
MANEJO DE SÓLIDOS A ESCALA PILOTO, EN EL LABORATORIO DE
OPERACIONES UNITARIAS DE LA UNIVERSIDAD DE ORIENTE, NÚCLEO
ANZOÁTEGUI**

Jurado calificador:

Ing. Arturo Rodulfo M.Sc.

Asesor académico

Ing. Héctor Silva M.Sc.

Jurado principal

Ing. Alexis Cova M.Sc.

Jurado principal

Puerto la Cruz, junio de 2011

RESOLUCIÓN

DE ACUERDO AL ARTÍCULO 41 DEL REGLAMENTO DE TRABAJOS DE GRADO DE LA UNIVERSIDAD DE ORIENTE: “LOS TRABAJOS DE GRADO SON DE EXCLUSIVA PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD DE ORIENTE Y SOLO PODRÍAN SER UTILIZADOS A OTROS FINES CON EL CONSENTIMIENTO DEL CONSEJO DE NÚCLEO RESPECTIVO, QUIEN LO PARTICIPARÁ AL CONSEJO UNIVERSITARIO”

DEDICATORIA

Este trabajo se lo dedico a JESUCRISTO, que me acompaña en todo momento y que sin Él nada me es posible.

A mi padre Víctor Manuel Figueroa, por ser el principal motivo que me impulsa a lograr todas mis metas.

A mi madre Trinidad Del Corral, que es en todo momento mi primer apoyo y mi fuerza para seguir adelante.

A mi novio Carlos Javier, por ser mi gran ayuda incondicional, mi soporte y mi compañía siempre.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a JESUCRISTO por ayudarme siempre, por darme tantas bendiciones y porque siempre me demuestra que Él todo lo puede.

A mi madre Trinidad Del Corral, porque sus consejos y aliento estuvieron siempre a mi disposición para continuar adelante.

A mi novio Carlos Javier por estar siempre dedicado y dispuesto a apoyarme y ayudarme en todo.

A mis suegros Lucas Álvarez y Oly Guerra por su ayuda y sus valiosas recomendaciones.

A mi tutor Arturo Rodolfo, quien con paciencia y comprensión me ayudo mucho en la realización de esta investigación.

RESUMEN

En el presente trabajo se logró la puesta en marcha del equipo de manejo de sólidos marca Armfield, estudiándose detalladamente el funcionamiento de cada componente de este equipo y realizándose una guía de prácticas de laboratorio para experimentar a las mejores condiciones de operación de cada componente. El equipo cuenta con un molino de bolas, un tamizador, un cilindro horizontal para la medición de ángulo de reposo, una tolva, un mezclador de volteo de tambores gemelos y un ciclón con transporte neumático. En el molino de bolas se experimentó con yeso, *clinker* y ladrillo, encontrándose que las mejores condiciones de molienda son con combinaciones de cuerpos moledores donde las bolas de 25 mm de diámetro estén en mayor proporción, el grado de llenado del molino de 35%, la velocidad de 47 rpm y el tiempo de 20 min. Los mejores resultados para el tamizado se obtuvieron con 200 g de una muestra durante 20 min al 100% de intensidad de vibración. Se midió el ángulo de reposo de urea granulada resultando de 33,5°, característico de materiales cohesivos. En la tolva se usó *clinker* y urea para estudiar la descarga a los distintos diámetros de orificio resultando que el mayor flujo másico fue para el orificio de 15 mm y en el ciclón con transporte neumático se transportó *clinker* molido verificándose un flujo de 0,0255 g/s en promedio. La experimentación en el mezclador, arrojó que las condiciones más eficientes de mezclado son a la velocidad de 38 rpm y a los 210 s. El estudio en el equipo Armfield no presentó complejidad en el área de manejos de sólidos.

CONTENIDO

RESOLUCIÓN	ii
DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTOS	iv
RESUMEN.....	v
CONTENIDO	vi
LISTA DE FIGURAS.....	x
LISTA DE TABLAS	xii
CAPÍTULO 1.....	1
INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Laboratorio de Operaciones Unitarias	1
1.2 Planteamiento del problema	2
1.3 Objetivos	5
CAPÍTULO 2.....	6
MARCO TEÓRICO	6
2.1 Antecedentes.....	6
2.2 Materiales sólidos	8
2.2.1 Inercia	8
2.2.2 Dureza	8
2.2.3 Forma de las partículas	9
2.2.4 Tamaño de las partículas	10
2.3 Sólidos particulados.....	10
2.3.1 Propiedades de masa de sólidos particulados	10
2.3.2 Tamaño de partículas sólidas mezcladas.....	11
2.3.3 Superficie específica de una mezcla de sólidos	12

2.3.4	Tamaño medio de partículas	12
2.4	Triturado de sólidos	13
2.5	Molienda	14
2.5.1	Cereales y otros productos vegetales	15
2.5.2	Minerales	15
2.5.3	Fertilizantes y fosfatos	15
2.5.4	Cemento, cal y yeso	16
2.5.5	Carbón, coque y otros productos del carbono.....	16
2.5.6	Compuestos químicos, pigmentos y jabones	17
2.5.7	Polímeros orgánicos	17
2.5.8	Molienda criogénica.....	17
2.6	Molino de bolas.....	17
2.6.1	Funcionamiento de los molinos de bolas.....	19
2.6.2	Grado de llenado de un molino.....	21
2.6.3	Características de los productos molidos	22
2.6.4	Requerimientos de energía y potencia en la desintegración.....	23
2.7	Tamizado	24
2.7.1	Análisis de tamaños y distribución de tamaños.....	25
2.7.2	Análisis de distribución de tamaños de Rosin-Rammler-Bennett-Sperling.....	26
2.8	Mezclado de sólidos	30
2.8.1	Propiedades que afectan al mezclado de sólidos	30
2.8.2	Evaluación de un mezclado de sólidos.....	31
2.8.3	Mezcladores de volteo de tambores gemelos	32
2.9	Separaciones gas-sólido	32
2.9.1	Separadores de ciclón	33
2.10	Ángulo de fricción interna y ángulo de reposo de masa de partículas ..	35
2.11	Almacenamiento de sólidos.....	36
2.11.1	Flujo de descarga en tolvas de almacenamiento	36

2.11.2	Características de las tolvas de flujo de masa	37
2.12	Transporte neumático.....	38
2.12.1	Transporte neumático de presión	38
2.12.2	Transporte neumático de vacío	39
2.13	Descripción del equipo de manejo de sólidos marca Armfield	39
2.13.1	Molino de bolas.....	39
2.13.2	Tamices y agitador.....	40
2.13.3	Cilindro horizontal	40
2.13.4	Tolva cilíndrica con orificios	40
2.13.5	Mezclador de volteo de tambores gemelos	40
2.13.6	Ciclón y transporte neumático	41
CAPÍTULO 3.....		43
DESARROLLO DEL TRABAJO		43
3.1	Escogencia de uno o varios materiales que puedan ser usados en el desarrollo de una práctica de manejo de sólidos.....	43
3.2	Selección de correlaciones de manejo de sólidos que mejor se adapten a cada uno de los procesos estudiados en el banco de pruebas	45
3.2.1	Molino de bolas.....	45
3.2.2	Tamizador	47
3.2.3	Mezclador	47
3.2.4	Ciclón.....	47
3.2.5	Ángulo de reposo.....	47
3.2.6	Tolva	47
3.3	Demostración de la reproducibilidad de los resultados obtenidos en los distintos equipos del banco de pruebas.....	47
3.3.1	Tamizador	48
3.3.2	Molino de bolas.....	54
3.3.3	Mezclador	71
3.3.4	Ciclón y transporte neumático	74
3.3.5	Ángulo de reposo.....	75

3.3.6	Tolva	75
3.3.7	Análisis estadístico de resultados	78
3.4	Preparación de la guía-instructivo para cada uno de los procesos de manejo de sólidos estudiados.....	79
CAPÍTULO 4	80
DISCUSIÓN DE RESULTADOS,	80
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	80
4.1	Escogencia de los materiales	80
4.2	Correlaciones de manejo de sólidos que mejor se adapten a cada uno de los procesos estudiados en el banco de pruebas.....	82
4.3	Demostración de la reproducibilidad de los resultados obtenidos en los distintos equipos del banco de pruebas.....	84
4.3.1	Pruebas para la obtención del mejor tamizado	84
4.3.2	Molino de bolas.....	86
4.4	Guía-instructivo para cada uno de los procesos de manejo de sólidos estudiados.....	103
4.5	CONCLUSIONES	104
4.6	RECOMENDACIONES	106
BIBLIOGRAFIA.....		107
Anexo A		109
Anexo B		113
Anexo C		127
Anexo D		148
Anexo E		157
Anexo F		171

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Triturador de mandíbulas de Blake. (McCabe, Smith, Harriot 1991).....	14
Figura 2.2. Molino cónico de bolas. (McCabe, Smith, Harriot 1991)	18
Figura 2.3. Fuerzas que actúan sobre un cuerpo moedor. (Silva, 2002)	20
Figura 2.4. Distribución de tamaños de partículas en polvo: (a) análisis diferencial; (b) análisis acumulativo. (McCabe, Smith, Harriot, 1991)	25
Figura 2.5. Representación gráfica de la distribución granulométrica de partículas según Sperling y Bennett.	27
Figura 2.6. Porcentaje en peso acumulado en función del tamaño de partículas según Rosin-Rammler. (Chopey, 2004)	28
Figura 2.7. Mezclador de volteo de tambores gemelos. (Perry y Green, 2001).	32
Figura 2.8. Separador de ciclón. (Silva, 2009)	34
Figura 2.9. Log de la tasa de descarga en función del log del diámetro de orificio de la salida de la tolva. (Compañía Armfield, 2005)	37
Figura 2.10. Banco de estudio para la manipulación de sólidos. (Compañía Armfield, 2005)	42
Figura 3.1. Análisis para el tamizado de 5 min a las diferentes intensidades de vibración del tamizador.	52
Figura 3.2. Análisis para el tamizado a los diferentes grados de llenado del molino.	61
Figura 3.3. Cuerpos moedores de acero y de cerámica.	68
Figura 3.4. Mezclado de grava de colores.	72
Figura 3.5. Tolva con urea.	76
Figura 3.6. Tolva con <i>clinker</i>	77
Figura 4.1. Diámetros promedios de partículas en función de la intensidad de vibración para diferentes tiempos de tamizado, calculadas tanto por Sperling como por Bennett.	85
Figura 4.2. Análisis para el tamizado de la molienda de yeso con cuerpos moedores de 25 mm de diámetro.	88
Figura 4.3. Análisis para el tamizado de las moliendas de yeso y <i>clinker</i> a 30 min.	94
Figura 4.4. Análisis para el tamizado de las moliendas de ladrillo con los dos molinos.	95
Figura 4.5. Histograma para el diámetro de partícula de Bennett de las moliendas de yeso.	96

Figura 4.6. Flujo másico de descarga de <i>clinker</i> en la tolva en función del diámetro de orificio de salida.....	100
Figura 4.7. Cilindro de medición de ángulo de reposo con urea.....	102
Figura A.1 Yeso mineral.....	110
Figura A.2 <i>Clinker</i>	110
Figura A.3. Urea granulada.....	111
Figura A.4. Gráfica del grado de llenado.....	111
Figura A.5. Tamizado de yeso.....	112
Figura D.1. Análisis para el tamizado de 10 min a las diferentes intensidades de vibración del tamizador.....	149
Figura D.2. Análisis para el tamizado de 15 min a las diferentes intensidades de vibración del tamizador.....	149
Figura D.3. Análisis para el tamizado de 20 min a las diferentes intensidades de vibración del tamizador.....	150
Figura D.4. Análisis para el tamizado de la molienda de yeso con cuerpos moledores de 20 mm de diámetro.....	150
Figura D.5. Análisis para el tamizado de la molienda de yeso con cuerpos moledores de 13 mm de diámetro.....	151
Figura D.6. Análisis para el tamizado de la molienda de yeso con la combinación I de cuerpos moledores.....	151
Figura D.7. Análisis para el tamizado de la molienda de yeso con la combinación II de cuerpos moledores.....	152
Figura D.8. Análisis para el tamizado de la molienda de yeso con la combinación III de cuerpos moledores.....	152
Figura D.9. Análisis para el tamizado de la molienda de yeso a distintas velocidades del molino.....	153
Figura D.10. Análisis para el tamizado de la molienda de <i>clinker</i> con cuerpos moledores de 25 mm de diámetro.....	153
Figura D.11. Análisis para el tamizado de la molienda de <i>clinker</i> con cuerpos moledores de 20 mm de diámetro.....	154
Figura D.12. Análisis para el tamizado de la molienda de <i>clinker</i> con cuerpos moledores de 13 mm de diámetro.....	154
Figura D.13. Análisis para el tamizado de la molienda de <i>clinker</i> con la combinación I de cuerpos moledores.....	155
Figura D.14. Análisis para el tamizado de la molienda de <i>clinker</i> con la combinación II de cuerpos moledores.....	155
Figura D.15. Análisis para el tamizado de la molienda de <i>clinker</i> con la combinación III de cuerpos moledores.....	156

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1 Escala de Mohs de dureza de materiales sólidos. (Perry y Green, 2001)...	8
Tabla 3.1 Pesos de los tamices vacíos y de la bandeja vacía.....	48
Tabla 3.2 Pesos de tamices llenos en el tamizado para cada intensidad de vibración en un tiempo de 5 min de tamizado.	49
Tabla 3.3 Masa retenida de una muestra de 200 g de yeso en cada tamiz, para cada intensidad de vibración en un tiempo de 5 min de tamizado.	49
Tabla 3.4 Diámetros promedios de partículas, porcentajes retenidos y retenidos acumulados en cada tamiz para cada intensidad de vibración de la corrida a 5 min de tamizado.....	51
Tabla 3.5 Diámetros promedios de partículas según Sperling y Bennett para las pruebas de tamizados.	53
Tabla 3.6 Masa y volumen ocupado por la carga de cuerpos moledores de cada diámetro.	55
Tabla 3.7 Masas de cada carga de cuerpos moledores, porcentajes máxicos y masa total de las combinaciones usadas para las moliendas con un 25, 30 y 35% de grados de llenado del molino.	56
Tabla 3.8 Velocidad de rotación y potencia para cada grado de llenado de las moliendas.	59
Tabla 3.9 Pesos retenidos de las muestras molidas de yeso en cada tamiz según el grado de llenado del molino.	60
Tabla 3.10 Masas disponibles de cada tamaño de cuerpo molidor.	61
Tabla 3.11 Masas de cuerpos moledores disponibles y grado de llenado del molino para cada diámetro de cuerpos moledores.....	62
Tabla 3.12 Porcentajes máxicos para cada tamaño de cuerpo molidor en cada combinación.	63
Tabla 3.13 Pesos y porcentajes máxicos para cada tamaño de cuerpos moledores, masa total en cada combinación de cuerpos moledores para las moliendas de yeso.	64
Tabla 3.14 Densidades aparentes y grados de llenado para cada combinación de cuerpos moledores.	65
Tabla 3.15 Pesos retenidos en los tamices para la molienda de yeso a diferentes velocidades del molino.	66
Tabla 3.16 Pesos retenidos en los tamices de las moliendas de yeso y <i>clinker</i> a 30 min.....	67

Tabla 3.17 Diámetros y masas de los cuerpos moledores de acero para la molienda de ladrillo.....	69
Tabla 3.18 Porcentajes máxicos de los cuerpos moledores usados para la comparación de ambos molinos, usando ladrillo como material a moler.....	70
Tabla 3.19 Pesos retenidos en los tamices de las moliendas de ladrillo en los dos molinos.....	71
Tabla 3.20 Masa de las gravas mezcladas para cada velocidad y tiempo de mezclado.....	72
Tabla 3.21 Masa de <i>clinker</i> transferida por el sistema de transporte neumático y tiempo de transferencia.....	74
Tabla 3.22 Diámetro de orificio de la tolva, masa y altura de <i>clinker</i> para cada tiempo de descarga.....	77
Tabla 4.1 Alturas calculadas y observadas de los cuerpos moledores en el molino, para cada grado de llenado del molino.....	83
Tabla 4.2 Análisis de varianza de las pruebas de tamizado a distintos porcentajes vibración y tiempo según el ajuste de diámetro de partícula de Sperling.....	84
Tabla 4.3 Diámetros promedios de partículas según Sperling y Bennet para las moliendas a diferentes grados de llenado del molino.....	86
Tabla 4.4 Diámetros promedios de partículas según Sperling y Bennett para cada combinación de las moliendas de yeso a los diferentes tiempos.....	89
Tabla 4.5 Diámetros promedios de partículas según Sperling y Bennet para las moliendas a diferentes velocidades del molino.....	90
Tabla 4.6 Diámetros promedios de partículas según Sperling y Bennett para cada combinación de las moliendas de <i>clinker</i> a los diferentes tiempos.....	90
Tabla 4.7 Análisis de varianza de la molienda de yeso a distintas combinaciones de cuerpos moledores y tiempo según el ajuste de diámetro de partícula de Bennett.....	92
Tabla 4.8 Análisis de varianza de la molienda de <i>clinker</i> a distintas combinaciones de cuerpos moledores y tiempo según el ajuste de diámetro de partícula de Bennett.....	92
Tabla 4.9 Diámetros promedios de partículas según Sperling y Bennett para las moliendas de yeso y <i>clinker</i> de 30 min.....	93
Tabla 4.10 Diámetros promedios de partículas según Sperling y Bennett para las moliendas en los dos molinos de bolas.....	94
Tabla 4.11 Desviación de las muestras tomadas con respecto a una mezcla perfecta.....	98
Tabla 4.12 Análisis de varianza de las mezclas de gravas azul y rosada a distintas velocidades del mezclador y tiempos de mezclado.....	99
Tabla 4.13 Diámetros de orificio de descarga de la tolva y flujos máxicos de descarga de <i>clinker</i>	101

Tabla 4.14 Altura de urea y flujos máxicos de descarga en la tolva usando un orificio de 15 mm.	101
Tabla 4.15 Flujo de <i>clinker</i> para las tres corridas con el transporte neumático.	102
Tabla B.1 Pesos de tamices llenos en el tamizado para cada intensidad de vibración en un tiempo de 10 min de tamizado.	114
Tabla B.2 Pesos de tamices llenos en el tamizado para cada intensidad de vibración en un tiempo de 15 min de tamizado.	115
Tabla B.3 Pesos de tamices llenos en el tamizado para cada intensidad de vibración en un tiempo de 20 min de tamizado.	115
Tabla B.4 Pesos de los tamices llenos en las corridas de molienda según el grado de llenado del molino.	116
Tabla B.5 Comparación de distintas series de tamices. (Couper, Penney, Fair y Walas, 2005).	117
Tabla B.6 Pesos de los tamices llenos en la molienda de yeso a diferentes tiempos con cuerpos moledores de 25 mm de diámetro.	118
Tabla B.7 Pesos de los tamices llenos en la molienda de yeso a diferentes tiempos con cuerpos moledores de 20 mm de diámetro.	118
Tabla B.8 Pesos de los tamices llenos en la molienda de yeso a diferentes tiempos con cuerpos moledores de 13 mm de diámetro.	119
Tabla B.9 Pesos de los tamices llenos en la molienda de yeso a diferentes tiempos con la combinación I de cuerpos moledores.	119
Tabla B.10 Pesos de los tamices llenos en la molienda de yeso a diferentes tiempos con la combinación II de cuerpos moledores.	120
Tabla B.11 Pesos de los tamices llenos en la molienda de yeso a diferentes tiempos con la combinación III de cuerpos moledores.	120
Tabla B.12 Pesos de los tamices llenos en la molienda de yeso a diferentes velocidades del molino.	121
Tabla B.13 Pesos de los tamices llenos en la molienda de clinker a diferentes tiempos con cuerpos moledores de 25 mm de diámetro.	122
Tabla B.14 Pesos de los tamices llenos en la molienda de clinker a diferentes tiempos con cuerpos moledores de 20 mm de diámetro.	122
Tabla B.15 Pesos de los tamices llenos en la molienda de clinker a diferentes tiempos con cuerpos moledores de 13 mm de diámetro.	123
Tabla B.16 Pesos de los tamices llenos en la molienda de clinker a diferentes tiempos con la combinación I de cuerpos moledores.	124
Tabla B.17 Pesos de los tamices llenos en la molienda de clinker a diferentes tiempos con la combinación II de cuerpos moledores.	124
Tabla B.18 Pesos de los tamices llenos en la molienda de clinker a diferentes tiempos con la combinación III de cuerpos moledores.	125

Tabla B.19 Pesos de los tamices llenos en la molienda de clinker y yeso a 30 min con la combinación III de cuerpos moledores.....	125
Tabla B.20 Pesos de los tamices llenos en las moliendas de ladrillo en los dos molinos.....	126
Tabla B.21 Masa y altura de urea en la tolva y cada tiempo de descarga del orificio de 15 mm.....	126
Tabla C.1 Masa retenida de una muestra de 200 g de yeso en cada tamiz, para cada intensidad de vibración en un tiempo de 10 min de tamizado.....	128
Tabla C.2 Diámetros promedios de partículas, porcentajes retenidos y retenidos acumulados en cada tamiz para cada intensidad de vibración de la corrida a 10 min de tamizado.....	129
Tabla C.3 Masa retenida de una muestra de 200 g de yeso en cada tamiz, para cada intensidad de vibración en un tiempo de 15 min de tamizado.....	129
Tabla C.4 Diámetros promedios de partículas, porcentajes retenidos y retenidos acumulados en cada tamiz para cada intensidad de vibración de la corrida a 15 min de tamizado.....	130
Tabla C.5 Masa retenida de una muestra de 200 g de yeso en cada tamiz, para cada intensidad de vibración en un tiempo de 20 min de tamizado.....	130
Tabla C.6 Diámetros promedios de partículas, porcentajes retenidos y retenidos acumulados en cada tamiz para cada intensidad de vibración de la corrida a 20 min de tamizado.....	131
Tabla C.7 Diámetros promedios de partículas, porcentajes retenidos y retenidos acumulados en cada tamiz para cada grado de llenado del molino.....	131
Tabla C.8 Masa retenida en los tamices de yeso a diferentes tiempos con cuerpos moledores de 25 mm de diámetro.....	132
Tabla C.9 Diámetros promedios de partículas, porcentajes retenidos y retenidos acumulados en cada tamiz para tiempo de molienda con cuerpos moledores de 25 mm de diámetro.....	132
Tabla C.10 Masa retenida en los tamices de yeso a diferentes tiempos con cuerpos moledores de 20 mm de diámetro.....	133
Tabla C.11 Diámetros promedios de partículas, porcentajes retenidos y retenidos acumulados en cada tamiz para tiempo de molienda con cuerpos moledores de 20 mm de diámetro.....	133
Tabla C.12 Masa retenida en los tamices de yeso a diferentes tiempos con cuerpos moledores de 13 mm de diámetro.....	134
Tabla C.13 Diámetros promedios de partículas, porcentajes retenidos y retenidos acumulados en cada tamiz para tiempo de molienda con cuerpos moledores de 13 mm de diámetro.....	134

Tabla C.14 Pesos retenidos en los tamices en la molienda de yeso a diferentes tiempos con la combinación I de cuerpos moledores.....	135
Tabla C.15 Diámetros promedios de partículas, porcentajes retenidos y retenidos acumulados en cada tamiz para tiempo de molienda con la combinación I de cuerpos moledores.	135
Tabla C.16 Pesos de los tamices llenos en la molienda de yeso a diferentes tiempos con la combinación II de cuerpos moledores.....	136
Tabla C.17 Diámetros promedios de partículas, porcentajes retenidos y retenidos acumulados en cada tamiz para tiempo de molienda con la combinación II de cuerpos moledores.	137
Tabla C.18 Pesos de los tamices llenos en la molienda de yeso a diferentes tiempos con la combinación III de cuerpos moledores.....	137
Tabla C.19 Diámetros promedios de partículas, porcentajes retenidos y retenidos acumulados en cada tamiz para tiempo de molienda con la combinación III de cuerpos moledores.	138
Tabla C.20 Diámetros promedios de partículas, porcentajes retenidos y retenidos acumulados en la molienda a diferentes velocidades del molino.....	138
Tabla C.21 Masa retenida en los tamices de clinker a diferentes tiempos con cuerpos moledores de 25 mm de diámetro.....	139
Tabla C.22 Diámetros promedios de partículas, porcentajes retenidos y retenidos acumulados en cada tamiz para tiempo de molienda con cuerpos moledores de 25 mm de diámetro.....	139
Tabla C.23 Masa retenida en los tamices de clinker a diferentes tiempos con cuerpos moledores de 20 mm de diámetro.....	140
Tabla C.24 Diámetros promedios de partículas, porcentajes retenidos y retenidos acumulados en cada tamiz para tiempo de molienda con cuerpos moledores de 20 mm de diámetro.....	140
Tabla C.25 Masa retenida en los tamices de clinker a diferentes tiempos con cuerpos moledores de 13 mm de diámetro.....	141
Tabla C.26 Diámetros promedios de partículas, porcentajes retenidos y retenidos acumulados en cada tamiz para tiempo de molienda con cuerpos moledores de 13 mm de diámetro.....	141
Tabla C.27 Pesos retenidos en los tamices en la molienda de clinker a diferentes tiempos con la combinación I de cuerpos moledores.....	142
Tabla C.28 Diámetros promedios de partículas, porcentajes retenidos y retenidos acumulados en cada tamiz para tiempo de molienda con la combinación I de cuerpos moledores.	143
Tabla C.29 Pesos de los tamices llenos en la molienda de clinker a diferentes tiempos con la combinación II de cuerpos moledores.....	143

Tabla C.30 Diámetros promedios de partículas, porcentajes retenidos y retenidos acumulados en cada tamiz para tiempo de molienda con la combinación II de cuerpos moledores.	144
Tabla C.31 Pesos de los tamices llenos en la molienda de clinker a diferentes tiempos con la combinación III de cuerpos moledores.....	144
Tabla C.32 Diámetros promedios de partículas, porcentajes retenidos y retenidos acumulados en cada tamiz para tiempo de molienda de clinker con la combinación III de cuerpos moledores.....	145
Tabla C.33 Diámetros promedios, porcentajes retenidos y retenidos acumulados de los tamices de las moliendas de yeso y clinker a 30 min.....	145
Tabla C.34 Diámetros promedios, porcentajes retenidos y retenidos acumulados de los tamices de las moliendas de ladrillo en los dos molinos.....	146
Tabla C.35 Fracciones de las partículas azules en las muestras de cada corrida.	147
Tabla E.1 Análisis de varianza de las pruebas de tamizado a distintos porcentajes vibración y tiempo según el ajuste de diámetro de partícula de Bennett.....	158
Tabla E.2 Análisis de varianza de la molienda de yeso a distintas combinaciones de cuerpos moledores y tiempo según el ajuste de diámetro de partícula de Sperling.	158
Tabla E.3 Análisis de varianza de la molienda de <i>clinker</i> a distintas combinaciones de cuerpos moledores y tiempo según el ajuste de diámetro de partícula de Sperling.	159

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 Laboratorio de Operaciones Unitarias

La Universidad de Oriente (UDO) fue creada el 21 de noviembre de 1958, mediante el Decreto Ley Nro. 459 dictado por la Junta de Gobierno presidida por el Dr. Edgard Sanabria, siendo Ministro de Educación el Dr. Rafael Pizani. El 20 de febrero de 1960, se creó en Barcelona, el Núcleo de Anzoátegui de la Universidad de Oriente, respondiendo a las exigencias regionales de profesionales y técnicos. Este núcleo inició sus actividades docentes el 12 de febrero de 1963, con la apertura de las carreras de Ingeniería Eléctrica, Ingeniería Mecánica, Ingeniería Industrial e Ingeniería Química.

El departamento de Ingeniería Química cuenta con el Laboratorio de Operaciones Unitarias, en el cual se refuerzan los conocimientos adquiridos en los cursos dictados según el pensum de Ingeniería Química y además, se realizan trabajos de investigación e innovación. En este laboratorio se realizan las prácticas de secado discontinuo, filtración, enfriamiento de líquidos y molienda de sólidos. Además se encuentran equipos de destilación y absorción de gases, en los que no se realizan prácticas, sino que son solo para proyectos de investigación.

En este laboratorio la práctica de molienda actualmente se enfoca en estudiar la distribución del tamaño de partículas sólidas y el efecto de los cuerpos moledores del molino utilizado. El estudio de los materiales sólidos es de mucha importancia en diversas industrias de proceso, especialmente para el manejo de polvos, gránulos, cristales y agregados.

1.2 Planteamiento del problema

En la industria, gran número de productos son sometidos a una reducción de tamaño, siendo la operación unitaria de molienda la que abarca desde la pulverización de materias primas sólidas, sobretodo en la industria alimenticia, hasta la minera, del cemento y muchas otras. Cuando se trabaja en la reducción de tamaño de sólidos a través de la molienda, los factores de control que regulan la eficiencia de esta operación son muchos, por lo que se debe tener un conocimiento experimental importante como soporte de las bases teóricas.

El Laboratorio de Operaciones Unitarias del Departamento de Ingeniería Química de la Universidad de Oriente, Núcleo Anzoátegui, dispone de un equipo de molienda conformado por un triturador de mandíbula, un molino de bolas y un tamizador con un conjunto de tamices y bandeja. Con los equipos mencionados los estudiantes del noveno semestre de ingeniería química realizan la práctica de molienda de sólidos, de suprema importancia en cuanto al estudio de la distribución del tamaño de partículas de las muestras sólidas y del efecto de cuerpos moledores sobre el tamaño de partículas.

Estos equipos utilizados para la molienda se encuentran en un estado poco favorable para la realización de la práctica y es difícil la obtención de resultados reproducibles, ya que el molino de bolas presenta cuerpos moledores defectuosos con superficies no esféricas, sin mencionar la dificultad que existe para retirar el producto del molino, por lo cual resulta imposible evitar la pérdida de muestra. En lo que respecta al tamizador, debe mencionarse que éste actualmente está deteriorado, debido a que la fuerte agitación en este equipo ha provocado un daño considerable en las abrazaderas de la pila de tamices, por lo que es necesario valerse del ingenio para mantener dicha pila estable en el tamizador, de manera que no se desarme y se pierda lo recolectado en cada tamiz.

Cabe destacar que en la actualidad el material utilizado para la molienda es ladrillo, el cual es desechado luego de la experiencia sin darle algún uso posterior, lo que hace más difícil la estancia en el cuarto de molienda del laboratorio, por el polvo de ladrillo suspendido en el aire que se genera a medida que es ejecutada la práctica. Estos inconvenientes con los equipos provocan retraso durante la realización de la experiencia, y también por la incomodidad que se presenta al momento del pesaje de muestras con una balanza que debe ser compartida con otros grupos de estudiantes que realizan prácticas en la misma área de laboratorio.

En este laboratorio también se dispone de un banco de estudio para la manipulación de sólidos, fabricado por Armfield Company donado por Metor bajo la LOCTI en 2008, en el cual están incorporados un molino de bolas, una pila de tamices con agitador, una tolva cilíndrica, una mezcladora de sólidos, un ciclón y un sistema de transporte neumático, entre otros componentes. Lamentablemente a este equipo aún no se le ha dado uso, a pesar de que constituye una fuente diversa y provechosa de experimentación en lo que respecta a molienda y manejo de sólidos.

La puesta en marcha del banco de estudio para la manipulación de sólidos es una afortunada y beneficiosa iniciativa para los estudiantes, pues aumenta el aprendizaje y la eficacia en la toma de datos experimentales, y además profundiza el estudio, se ahorra el tiempo de experimentación y se evita totalmente la pérdida de muestras de sólidos. Adicionalmente, este equipo está dotado de su propia balanza digital que permite agilizar la recopilación de los datos gravimétricos pertinentes.

El alcance de este proyecto comprendió la puesta en marcha del banco de estudio para manipulación de sólidos antes mencionado, a partir del manual instructivo específico del mismo. Seguidamente se propuso seleccionar uno o varios materiales para la operación, que sean de fácil manejo, que no ocasionen

complicaciones en cuanto a la conservación de dicho equipo, que no presenten problemas para la salud de los usuarios a causa de su manipulación y que al finalizar la experiencia pudieran reutilizarse en algo para el beneficio del recinto universitario.

Una vez seleccionados los materiales apropiados, se estudió la reducción de tamaño de una muestra de éstos con el uso del molino de bolas del banco de estudio, con el propósito de determinar una correcta combinación de cuerpos moledores por medio de la experimentación. Seguidamente, la muestra molida fue llevada a la pila de tamices para estudiar su distribución de tamaños de partículas. De la misma forma se determinó el ángulo natural de reposo de una muestra sólida, se estudió la tasa de descarga de una tolva y se verificó el funcionamiento del sistema de transporte neumático del equipo que está combinado al proceso de separación de sólidos en un ciclón. Finalmente se examinó la eficiencia de mezclado de sólidos con el equipo mezclador de volteo de tambores gemelos del banco de estudio.

El estudio aquí propuesto pretendió ser bastante completo, por su gran importancia, pues involucra la puesta en marcha del banco de manipulación de sólidos. De esta manera el Laboratorio de Operaciones Unitarias puede contar con un equipo donde realizar diversas investigaciones en el campo del manejo de sólidos, para así contribuir a incrementar y profundizar el conocimiento en esta rama de la ingeniería.

1.3 Objetivos

Objetivo general

Desarrollar técnicas de experimentación con un equipo de manejo de sólidos a escala piloto, en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad de Oriente, Núcleo Anzoátegui.

Objetivos específicos

1. Escoger uno o varios materiales que puedan ser usados en el desarrollo de las prácticas de manejo de sólidos.
2. Seleccionar las correlaciones de manejo de sólidos que mejor se adapten para cada uno de los procesos estudiados en el banco de pruebas.
3. Demostrar la reproducibilidad de los resultados obtenidos en los distintos equipos del banco de pruebas.
4. Preparar la guía-instructivo para cada uno de los procesos de manejo de sólidos estudiados.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes

Sánchez (2007) trabajó en una unidad complementaria de clasificación de partículas en la planta N° 2 de Micronizados Caribe, para la producción de carbonato de calcio micronizado. En este trabajo se realizó la reducción de tamaño de partículas con un molino rotatorio y se estudió la clasificación de partículas a la salida del molino por difracción con láser, concluyendo que la clasificación de partículas es diferente al variar la velocidad del rotor del molino. Al igual que Sánchez en el trabajo propuesto se trabajará con diferentes velocidades de operación del molino para la pulverización de materiales sólidos, pero en lugar de una difracción laser para conocer la distribución de tamaños se hará un tamizado.

La compañía Armfield (2005) describe los componentes del banco de manejo de sólidos que se desean utilizar para la experimentación y la manera en que se debe proceder para la puesta en marcha de este banco de estudio. Este manual instructivo proporcionado por dicha compañía sugiere el uso de materiales como sal, azúcar, rocas y arena. Armfield no suministra correlaciones para el manejo de sólidos referentes a cada tópico estudiado en el banco, de manera que se hará la selección de correlaciones para el estudio de manejo de sólidos. Además los materiales sugeridos no satisfacen preliminarmente la premisa que el material molido podría tener un uso posterior, por lo que se realizará una guía-instructivo de experimentación en el banco donde se utilicen los materiales que se propongan como mejor opción.

Contreras (2001) estudió en la planta antiguamente llamada Cemex Pertigalete, ahora llamada Cementos de Venezuela, los molinos rotatorios para la molienda de *clinker* y yeso para transformarlos en cemento. Contreras

determinó que los cuerpos moledores metálicos en el molino eran eficientes para la molienda según los requerimientos de la empresa y que la utilización de un aditivo ayudante de molienda no presentaba cambios en la producción del molino. A diferencia de Contreras, en el trabajo propuesto se realizará la molienda utilizando cuerpos moledores de cerámica y no en un molino rotatorio industrial sino en uno a escala de laboratorio.

Pinto (1998) evaluó el proceso de clasificación de alúmina hidratada utilizando hidrociclones en CVG Bauxilum, para garantizar una mejor precipitación de la alúmina y así obtener un producto de calidad. Se realizaron pruebas en la batería de hidrociclones de la planta, estudiándose las boquillas de alimentación, de descarga y el vórtice de los ciclones. El parámetro más determinante fue la variación en el diámetro de vórtice. Resultó que el incremento en el diámetro del vórtice del ciclón aumenta los contenidos de sólidos en la corriente de descarga de los ciclones aumentando la recuperación másica de sólidos. Esta información es relevante para el trabajo propuesto al trabajar con el separador de ciclón, con la diferencia de que las experiencias que se desean realizar serán con sólidos secos y con equipos a una menor escala.

Ortiz (1990) estudió el sistema de molienda de cemento en la planta Cementos de Venezuela con curvas de fineza y moliendabilidad, resultando como punto más resaltante que la fineza del producto de la molienda es directamente proporcional a la temperatura de trabajo. A diferencia de Ortiz en el trabajo propuesto no se trabajará con variaciones de temperatura durante la experimentación pero según el trabajo de Ortiz se conoce que se deberá trabajar a temperatura constante al estudiar cualquier otro parámetro de molienda para obtener resultados reproducibles.

A continuación se presentan algunos conceptos utilizados en el manejo de sólidos, que serán útiles para entender la potencialidad del equipo de laboratorio que se quiere poner en operación.

2.2 Materiales sólidos

Un cuerpo sólido, es uno de los cuatro estados de agregación de la materia, caracterizándose porque opone resistencia a cambios de forma y de volumen. Las moléculas de un material sólido tienen una gran cohesión y adoptan formas bien definidas. A los sólidos que se someten a reducciones de tamaño se les realizan estudios de las siguientes características:

2.2.1 Inercia

Es la dificultad o resistencia que opone un sistema físico a posibles cambios; en el caso de los sólidos es cuando ponen resistencia a cambiar su estado de reposo.

2.2.2 Dureza

Es una medida según la escala de Mohs, siendo ésta un criterio de la resistencia de un material a la trituración. Se trata de las indicaciones más acertadas del carácter abrasivo del mineral, factor que determina el desgaste de los medios de molienda. La escala Mohs, según el orden creciente de dureza, se observa en la tabla 2.1.

(Perry y Green, 2001).

Tabla 2.1 Escala de Mohs de dureza de materiales sólidos. (Perry y Green, 2001)

Dureza	Materiales
Materiales blandos	Talco, tortas secas de filtro prensa, yeso, sal de roca, sales cristalinas en general, carbón blando, caliza blanda, barita, tiza, azufre.

Dureza intermedia	Piedra caliza, apatito, fosfato duro, piedra caliza dura, cromita, bauxita, feldespato.
Materiales duros	Cuarzo, granito, topacio, corindón, zafiro, esmeril, diamante.

2.2.3 Forma de las partículas

La forma de una partícula sólida individual se puede expresar convenientemente en función de la esfericidad Φ_s , que es independiente del tamaño de la partícula. Para una partícula esférica de diámetro D_p , $\Phi_s=1$; para una partícula no esférica, la esfericidad se define por la relación:

$$\Phi_s \equiv \frac{6V_p}{D_p S_p} \quad (\text{Ec. 2.1})$$

donde:

D_p = diámetro equivalente o diámetro nominal de una partícula

S_p = área superficial de una partícula

V_p = volumen de una partícula.

El diámetro equivalente se define como el diámetro de una esfera de igual volumen. Sin embargo, para materiales granulares finos resulta difícil determinar con exactitud el volumen y el área de la superficie de una partícula y generalmente D_p se toma como el tamaño nominal basado en análisis por tamizado o en examen microscópico.

El área de la superficie se obtiene a partir de medidas de absorción o de la caída de presión en un lecho de partículas y después se utiliza la ecuación 2.1 para calcular Φ_s . Para muchos materiales triturados Φ_s está comprendida entre 0,6 y 0,8. En el caso de partículas redondeadas obtenidas por abrasión Φ_s puede tener un valor de hasta 0,95. (McCabe, Smith, Harriot, 1991).

2.2.4 Tamaño de las partículas

En general, se pueden especificar diámetros para cualquier partícula equidimensional. Las partículas que no son equidimensionales, es decir, que son más largas en una dirección que en otras, con frecuencia se caracterizan por la segunda dimensión de mayor longitud. Por ejemplo, en el caso de partículas aciculares, D_p deberá referirse al espesor de la partícula y no a su longitud. (McCabe, Smith, Harriot, 1991).

2.3 Sólidos particulados

En los procesos, los sólidos pueden presentarse en diversas formas: grandes piezas angulares, anchas láminas continuas o polvos finamente divididos. Los tamaños de las partículas se expresan en diferentes unidades dependiendo del intervalo de tamaños que intervienen. Las partículas gruesas se miden en pulgadas o milímetros, las partículas finas en función de la luz del tamiz y las partículas muy finas en micrómetros o manómetros. (McCabe, Smith, Harriot, 1991).

2.3.1 Propiedades de masa de sólidos particulados

Las masas de partículas sólidas, especialmente cuando las partículas están secas y no se pegan, poseen muchas de las propiedades de un fluido. Ejercen presión sobre las paredes de un contenedor, fluyen a través de un orificio o descienden por una tolva. Sin embargo, se diferencian de los líquidos y gases en varios aspectos.

Las masas de sólidos tienen las siguientes propiedades distintivas:

- La presión laminar no es la misma en todas las direcciones
- Un esfuerzo cortante aplicado en la superficie de una masa se transmite a través de toda la masa estática de partículas mientras no se produzca rotura
- La densidad de la masa puede variar, dependiendo del grado de empaquetamiento de los granos. La densidad global es mínima cuando la masa

esta suelta y alcanza un máximo cuando la masa se somete a vibración o apisonamiento.

Dependiendo de sus propiedades de flujo, los sólidos en forma de partículas se dividen en dos clases: cohesivos y no cohesivos. Los sólidos cohesivos suelen ser húmedos y se caracterizan por dificultad para fluir a través de orificios y los no cohesivos fluyen fácilmente desde depósitos. (McCabe, Smith, Harriot, 1991).

2.3.2 Tamaño de partículas sólidas mezcladas

En una muestra de partículas uniformes de diámetro D_p , el volumen total de las partículas es m/ρ_p , donde m y ρ_p son la masa total de la muestra y la densidad de las partículas, respectivamente. Puesto que el volumen de una partícula es V_p , el número N de partículas en la muestra es:

$$N = \frac{m}{\rho_p V_p} \quad (\text{Ec. 2.2})$$

De acuerdo con las ecuaciones 2.1 y 2.2 el área de la superficie total de las partículas es:

$$A = N s_p = \frac{6 m}{\Phi_p \rho_p D_p} \quad (\text{Ec. 2.3})$$

Para aplicar las ecuaciones 2.2 y 2.3 a mezclas de partículas que tienen varios tamaños y densidades, la mezcla se divide en fracciones cada una de ellas de densidad constante y tamaño aproximadamente constante. Cada fracción se puede entonces pesar o bien las partículas individuales se pueden contar o medir por numerosos métodos.

Después se pueden aplicar las ecuaciones 2.2 y 2.3 a cada fracción y sumar los resultados. La información obtenida de este análisis del tamaño de partículas se tabula expresando la fracción de tamaño de tamaño o de número en cada incremento de tamaño en función del tamaño medio de las partículas (o del intervalo de tamaños) en el incremento. (McCabe, Smith, Harriot, 1991)

2.3.3 Superficie específica de una mezcla de sólidos

Si se conoce la densidad ρ_p y la esfericidad Φ_s de las partículas se puede calcular el área de la superficie de las partículas en cada fracción a partir de la ecuación 2.3 y sumar los resultados de todas las fracciones para obtener A_w , la superficie específica (el área de la superficie total de una unidad de masa de partículas). Si ρ_p y Φ_s son constantes, A_w viene dada por: (McCabe, Smith, Harriot, 1991).

$$A_w = \frac{6 x_1}{\Phi_s \rho_p \bar{D}_{p1}} + \frac{6 x_2}{\Phi_s \rho_p \bar{D}_{p2}} + \dots + \frac{6 x_n}{\Phi_s \rho_p \bar{D}_{pn}} = \frac{6}{\Phi_s \rho_p} \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{\bar{D}_{pi}} \quad (\text{Ec.2.4})$$

donde:

X_i = fracción másica en un determinado incremento

n = numero de incrementos

\bar{D}_{pi} = diámetro medio de las partículas, tomado como media aritmética de los diámetros mayor y menor en el incremento.

2.3.4 Tamaño medio de partículas

El tamaño medio de las partículas para una mezcla de las mismas se identifica de varias formas diferentes. El método más usado es probablemente el diámetro medio volumen-superficie \bar{D}_s , que está relacionado con el área de la superficie específica A_w .

$$\bar{D}_s \equiv \frac{6}{\Phi_s A_w \rho_p} \quad (\text{Ec. 2.5})$$

Sustituyendo la ecuación 2.4 en la ecuación 2.5 se obtiene:

$$\bar{D}_v = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i}{\bar{D}_{pi}} \right)} \quad (\text{Ec. 2.6})$$

Este sería el tamaño medio de las partículas de una mezcla. (McCabe, Smith, Harriot, 1991).

2.4 Triturado de sólidos

El equipo para la reducción de tamaño no muy fina de grandes cantidades de sólidos, consiste en una unidad de baja velocidad llamada triturador. En el triturador de mandíbula (figura 2.1) la alimentación se hace pasar entre dos mandíbulas; una es fija y la otra móvil y recíproca con respecto al punto de pivote en la parte inferior. La mandíbula oscila pivoteando en el fondo de la V. El material va pasando con lentitud hacia un espacio cada vez más pequeño, triturándose al desplazarse.

El triturador de mandíbula se aplica a la trituración primaria de materiales duros y generalmente van seguidas de otros tipos de trituradores. El triturador de mandíbulas se clasifica generalmente por las dimensiones de su área de alimentación, que depende de la anchura de las mandíbulas de la trituradora y de la apertura, que es la distancia máxima entre las mandíbulas fija y móvil a la entrada de la alimentación.

Las especificaciones están basadas en el ajuste que es el cierre o el espacio libre que queda entre las mandíbulas, que puede variarse.

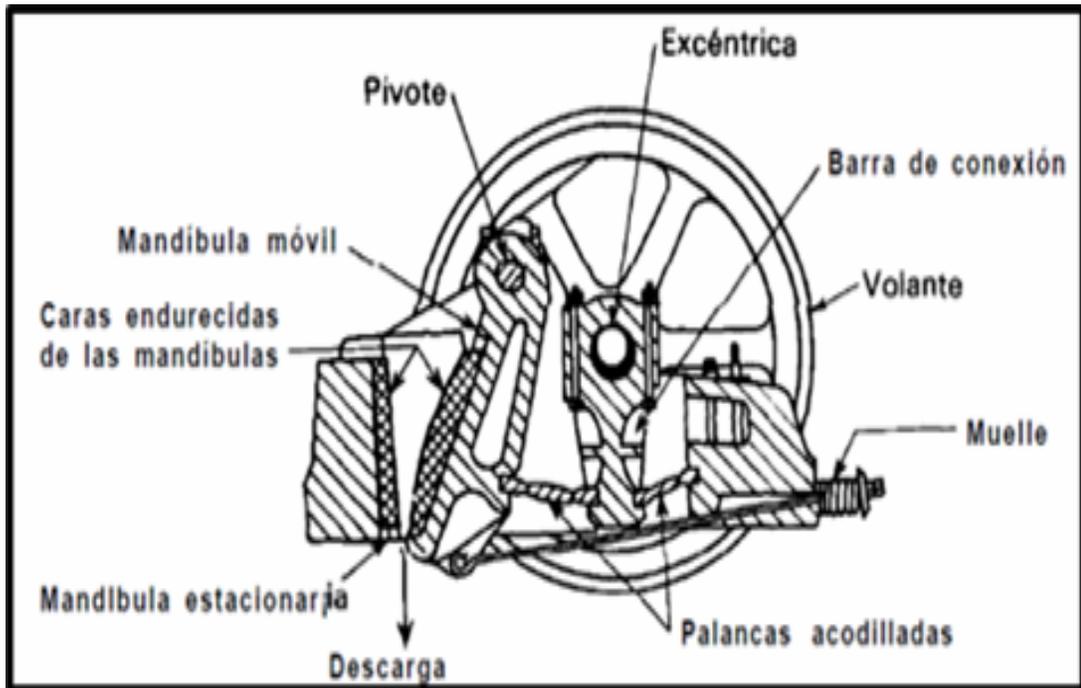


Figura 2.1. Triturador de mandíbulas de Blake. (McCabe, Smith, Harriot 1991)

Es muy común que el producto de una trituradora pase a una unidad de molienda para continuar reduciendo el tamaño de los sólidos. (Geankoplis, 1998).

2.5 Molienda

Es la operación de reducción de tamaño de sólidos donde se utilizan diversos equipos llamados molinos. El termino molino se utiliza para describir una gran variedad de maquinas de reducción de tamaño para servicio intermedio, capaces de proporcionar un producto que pase por el tamiz de 200 mallas. El producto procedente de un triturador con frecuencia se introduce como alimentación de un molino, en el que se reduce a polvo gracias a los efectos de compresión, impacto, frotación ó rozamiento. En la práctica, la molienda es ampliamente utilizada en las industrias que se detallan a continuación. (McCabe, Smith, Harriot, 1991).

2.5.1 Cereales y otros productos vegetales

En la industria alimenticia se aplica la molienda para la obtención de harinas y alimentos; se muelen alimentos como trigo, centeno y maíz para convertirlos en harinas de grano fino. También la soja, tortas de soja y otras tortas prensadas para convertirlos en harina. La molienda de almidón no es particularmente difícil pero se deben tomar precauciones para evitar explosiones, ya que los polvos de almidones pueden entrar en contacto con superficies calientes, chispas o llamas cuando están suspendidos en el aire. Para productos más finos como harinas de patata, tapioca, plátano y otras similares, se acostumbra recurrir a molinos de impacto de alta velocidad. (Perry y Green, 2001).

2.5.2 Minerales

Las operaciones de molienda más generalizadas son las que se realizan en el procesamiento de minerales y en la industria del cemento. Los minerales no metálicos requieren de procesamientos de molienda húmeda en molinos de bolas, ya que aprovechan de una manera más eficaz la clasificación mediante agua de los minerales molidos. Las arcillas y caolines necesitan ser molidos en procesos industriales para separarlos de impurezas gruesas.

También se realiza la molienda en minerales carbonatos tales como piedra caliza, calcita, mármol, arcillas calcáreas o margas, greda, dolomita y magnesita. También se muelen minerales sulfatos siendo los más importantes, la barita, celestita, anhidrita y el yeso; estos se emplean como cargas en pintura, papel y caucho. El yeso y la anhidrita se emplean también en la industria del cemento. (Perry y Green, 2001).

2.5.3 Fertilizantes y fosfatos

Muchos de los materiales que sirven como fuentes de calcio, fósforo, potasio y nitrógeno, en la industria de los fertilizantes se pulverizan. Los que se emplean con mayor frecuencia, debido a su contenido de cal, son la piedra caliza, las

conchas de ostra, margas, cal y en menor grado, yeso. La piedra caliza se muele normalmente en molinos de martillo, de anillo y de bolas.

Entre los fosfatos, la roca fosfórica se tritura, por lo general, para dos fines primordiales: para su aplicación directa al suelo o para la acidulación con ácidos minerales en la elaboración de fertilizantes. (Perry y Green, 2001).

2.5.4 Cemento, cal y yeso

La elaboración de cemento Portland requiere de molienda a gran escala, lo que implica un gran consumo de energía eléctrica. Las materias primas consisten en fuentes de cal, alúmina y sílice. Hay un amplio espectro en las propiedades de estos materiales, desde la caliza cristalina con incrustaciones de silicio a la arcilla húmeda.

En la molienda de las materias primas se utilizan dos procedimientos: el de vía seca, en el que los materiales se secan hasta un contenido de humedad inferior al 1 por 100, y posteriormente, se muelen hasta obtener un polvo fino, mientras que en el procedimiento por vía húmeda la molienda se realiza añadiendo agua a los molinos para obtener una suspensión. Esta suspensión generalmente es de arcilla junto con cantidades más o menos proporcionadas de piedra caliza y otros componentes. (Perry y Green, 2001).

2.5.5 Carbón, coque y otros productos del carbono

Para la molienda del carbón bituminoso se deben realizar estudios de molturabilidad para determinar que molino es el adecuado para pulverizarlo. También se toman en cuenta las impurezas contenidas en el carbón, ya que afectan la molienda, por ejemplo, cenizas inherentes, pizarra, grava, arena y bolas de azufre. El coque de petróleo se pulveriza casi siempre para la elaboración de electrodos. El alquitrán se pulveriza para combustible u otros fines comerciales.

También se pulveriza el grafito natural, el carbón animal o de hueso, el carbón vegetal, el negro mineral, llamado a veces erróneamente “piedra

podrida”, que contiene grandes cantidades de carbono y se utiliza como carga para pinturas y para otras operaciones químicas. (Perry y Green, 2001).

2.5.6 Compuestos químicos, pigmentos y jabones

Los colores secos y los tintes o colorantes se pulverizan, así como óxidos de plomo y azufre. El dióxido de titanio es uno de los pigmentos blancos que se pulveriza en grandes cantidades, así como el azufre para luego ser utilizados como aditivos en pinturas. (Perry y Green, 2001).

2.5.7 Polímeros orgánicos

Las características de molienda de diversas resinas, gomas, ceras, cauchos duros y polvos de moldeado dependen enormemente de sus temperaturas de ablandamiento. Cuando se utilizan la mayor parte de las gomas y las resinas, ya sean naturales o artificiales, en la industria de pintura, de barnices o plástico, no se muelen a grados muy finos y los molinos de martillos o jaula suministran un producto adecuado. (Perry y Green, 2001).

2.5.8 Molienda criogénica

Este proceso se emplea en la recuperación de materiales reciclados. Permite separaciones eficientes siempre y cuando las mezclas se convierten en frágiles a baja temperatura, permitiendo reducir los requerimientos energéticos. Algunos ejemplos de estos materiales son: caucho en trocitos, recuperado en estado puro a partir de neumáticos de desecho, que puede emplearse en superficies para carreteras, recintos deportivos y rellenos de polímeros. Existe un proceso llamado *Inchscrap* que tritura automóviles aplastados refrigerados, separando de forma magnética el acero puro del resto de los componentes. (Perry y Green, 2001).

2.6 Molino de bolas

Es amplio el uso a nivel industrial de la operación unitaria de molienda, siendo uno de los molinos de mayor aplicación el molino de bolas. Estos molinos tienen

una carcasa cónica o cilíndrica que gira sobre un eje horizontal y se cargan con un medio de molienda, por ejemplo bolas de acero o porcelana (figura 2.2). El tamaño promedio del material que se alimenta a los molinos de bolas puede ser de 2,5 a 4 cm (1 a 1 1/2 pulg) para materiales muy frágiles aunque por lo general el tamaño máximo es de 1 cm (1/2 pulg). La mayor parte de los molinos de bolas operan con una razón de reducción de 20 a 200:1. El tamaño usual de las bolas más grandes es de 13 cm (5 pulg) de diámetro. En un molino de bolas la mayor parte de la reducción se produce por el impacto de la caída de las bolas desde cerca de la parte superior de la carcasa. (Perry y Green, 2001).

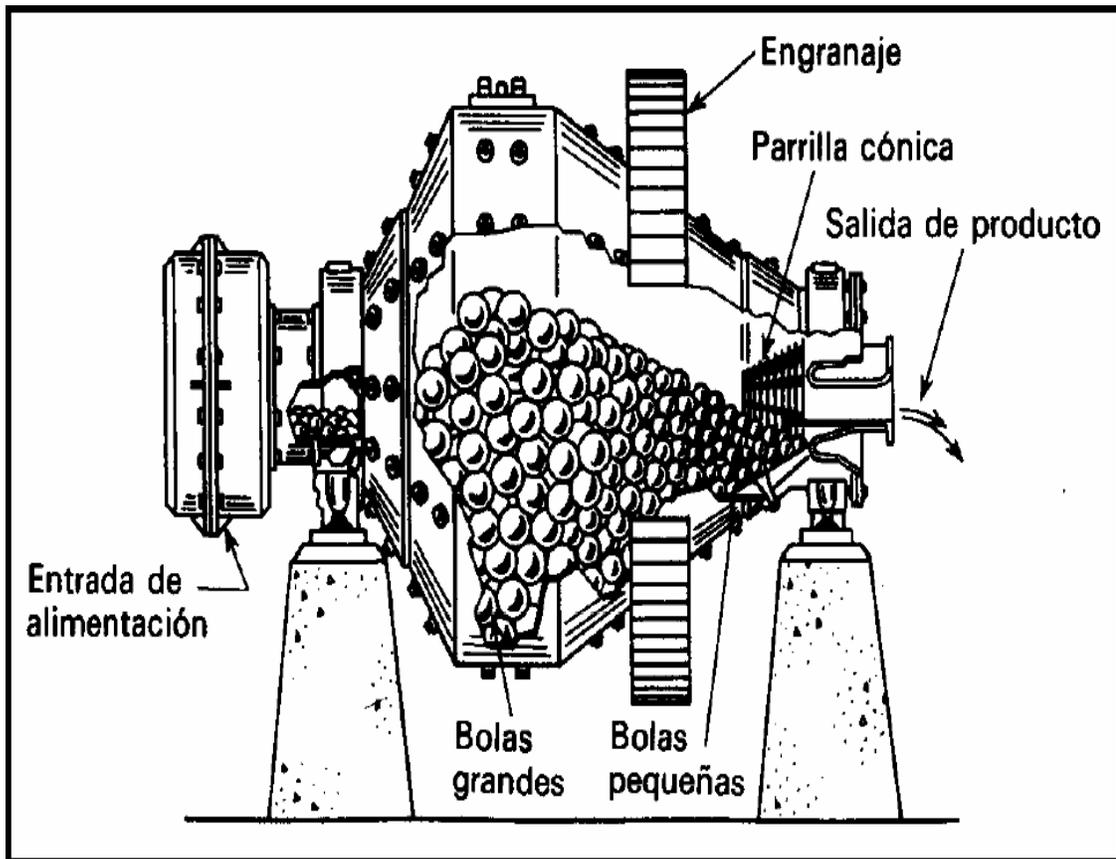


Figura 2.2. Molino cónico de bolas. (McCabe, Smith, Harriot 1991)

2.6.1 Funcionamiento de los molinos de bolas

La carga de bolas en un molino es tal que cuando el molino está parado las bolas ocupan aproximadamente la mitad del volumen del molino. La fracción de huecos en la masa de bolas, cuando están en reposo, es normalmente de 0,40. Al girar el molino las bolas se adhieren a la pared del molino y son llevadas hasta cerca de la parte superior, donde despegan de la pared y caen al fondo para ser de nuevo elevadas.

La fuerza centrífuga mantiene las bolas en contacto con la pared y entre ellas durante la etapa del ascenso. Mientras están en contacto con la pared, las bolas realizan algo de molienda deslizándose y rodando entre ellas, pero la mayor parte de la molienda ocurre en la zona de impacto en la que las bolas que caen libremente, chocan contra el fondo del molino.

Cuanto más rápidamente gira el molino a mayor distancia son elevadas las bolas en el interior del mismo y mayor es el consumo de energía. La energía comunicada es provechosamente utilizada debido a que las bolas caen desde mayor altura, con lo que aumenta la intensidad del impacto y la capacidad del molino. Sin embargo, si la velocidad de giro es tan grande que las bolas se mueven adheridas siempre a la pared se dice que hay centrifugación. La velocidad para la que ocurre la centrifugación recibe el nombre de velocidad crítica. Cuando un molino está centrifugando poco o nada de molienda se produce, de forma que la velocidad de operación ha de ser inferior a la crítica. (McCabe, Smith, Harriot, 1991).

La velocidad para la cual las bolas más exteriores pierden el contacto con la pared del molino depende del balance entre las fuerzas gravitacional y centrífuga, Esto puede apreciarse con la ayuda de la figura 2.3.

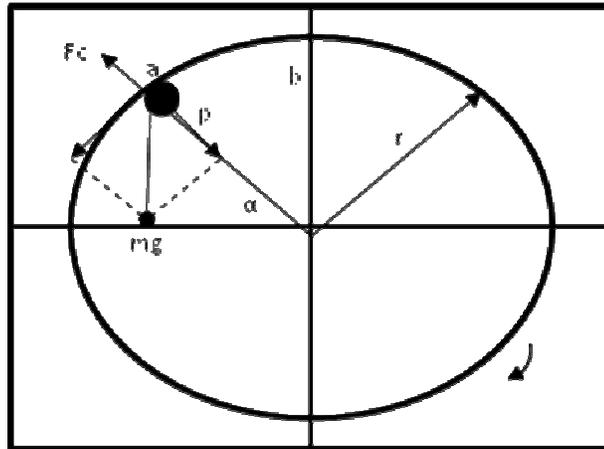


Figura 2.3. Fuerzas que actúan sobre un cuerpo molidor. (Silva, 2002)

Los términos indicados en la figura 2.3 se definen a continuación.

m: peso de una bola (kg)

Fc: fuerza centrífuga (kg.m/s²)

r: radio interno del molino (m)

g: aceleración de la gravedad (9,81 m/s²)

p: acción resultante de la fuerza de gravedad (kg.m/s²)

Suponiéndose que uno de los cuerpos molidores está en el punto a, entonces está sometido a dos fuerzas de sentido contrario Fc y p:

$$F_c = mw^2r \quad (\text{Ec. 2.7})$$

Donde w es la velocidad angular del molino,(radianes/s).

$$P = mg \text{ sen } \alpha \quad (\text{Ec. 2.8})$$

Para que el cuerpo molidor no caiga y se mantenga pegado a la pared interna del molino $F_c \geq p$; suponiendo que sean iguales entonces,

$$mw^2r = mg \text{ sen } \alpha \quad (\text{Ec.2.9})$$

Cuando el cuerpo molidor esté en el punto b, $\alpha = 90^\circ$, por lo tanto, $\text{sen } \alpha = 1$, de esta manera la ecuación 2.9 queda así:

$$w^2 r = g \quad (\text{Ec. 2.10})$$

Como la velocidad angular está relacionada con las vueltas por minuto por la siguiente ecuación:

$$w = \frac{2\pi n}{60} \quad (\text{Ec. 2.11})$$

Entonces:

$$(2\pi n_c/60)^2 \cdot (D/2) = g = 9,81 \quad (\text{Ec. 2.12})$$

$$n_c = \frac{42,3}{\sqrt{D}} \quad (\text{Ec. 2.13})$$

donde:

D es el diámetro interno del molino (m)

n_c es la velocidad crítica de rotación (rpm).

La velocidad óptima debe estar entre el 73 y 78% de la velocidad crítica. (Silva, 2002).

2.6.2 Grado de llenado de un molino

El grado de llenado de un molino (Φ) está definido como el cociente entre el volumen ocupado por los cuerpos moledores (V_c) y el volumen total de la cámara del molino (V_t). Por lo general el porcentaje o grado de llenado puede variar entre 25 y 35%; por debajo del 25% de llenado, los cuerpos moledores se deslizan sobre el blindaje y por encima del 40% se presentan problemas de trayectoria de caída de los mismos.

El volumen del recinto de molienda se obtiene de la ecuación del volumen para un cilindro de diámetro interno D y longitud L:

$$V_t = \pi D^2 L/4 \quad (\text{Ec. 2.14})$$

Por lo tanto,

$$V_c = (\pi D^2 L/4) \Phi \quad (\text{Ec. 2.15})$$

La cantidad de cuerpos moledores, G, se puede obtener por la ecuación

$$G = V_c \rho_c = \left(\frac{\pi D^2 L \Phi}{4} \right) \rho_c \quad (\text{Ec. 2.16})$$

donde ρ_c es la densidad aparente de la carga de cuerpos moledores apilada. La densidad aparente es igual a:

$$\rho_c = \frac{M_{CM}}{V_{CM}} \quad (\text{Ec. 2.17})$$

donde:

M_{CM} es la masa de cuerpos moledores (g)

V_{CM} es el volumen ocupado por la masa de cuerpos moledores (cm³).

También se puede calcular la altura de cuerpos moledores, según la grafica A-4, donde se intercepta el grado de llenado para obtener el cociente de la altura de espacios vacios entre el diámetro interno del molino. (Silva, 2002).

2.6.3 Características de los productos molidos

El objetivo de la trituración y molienda es producir pequeñas partículas a partir de otras más grandes. Las partículas más pequeñas son deseables por su gran superficie o bien por su forma, tamaño y número. Una medida de la eficacia de la operación se basa en la energía que se requiere para crear nueva superficie, ya que, el área superficial de una unidad de masa de partículas aumenta mucho cuando las partículas disminuyen de tamaño.

Contrariamente a un triturador o molino ideal, una unidad real no da lugar a un producto uniforme. El producto siempre consta de una mezcla de partículas, con tamaño variable desde un máximo definido hasta un mínimo submicroscópico. Si la alimentación es homogénea, tanto por lo que se refiere al tamaño de las partículas como a su estructura física y química, las formas de las distintas partículas de los productos pueden ser bastante uniformes; en caso contrario, las proporciones de los granos en los distintos tamaños de un solo producto pueden variar considerablemente.

La relación de diámetros entre las partículas más grandes y más pequeñas en un material triturado es del orden de 10^4 . Debido a esta enorme variación de tamaños de las partículas individuales, las relaciones que son adecuadas para tamaños uniformes han de modificarse cuando se aplican a tales mezclas. Por ejemplo, el término “tamaño medio” carece de sentido mientras no se defina el método utilizado para promediar y obtener el tamaño medio de partículas.

Excepto que sean alisadas por abrasión después de la trituración, las partículas trituradas se parecen a poliedros, con caras casi planas y bordes y picos escarpados. Las partículas pueden ser compactas, con longitud, anchura y espesor aproximadamente iguales, o bien tener forma de láminas o agujas. Para granos compactos, la dimensión mayor o diámetro aparente, generalmente se toma para caracterizar el tamaño de la partícula. Para partículas con forma de láminas o agujas, deberán especificarse dos dimensiones para caracterizar su tamaño. (McCabe, Smith, Harriot, 1991).

2.6.4 Requerimientos de energía y potencia en la desintegración

El coste energético es el de mayor importancia en trituración y molienda, de forma que los factores que controlan este coste son de gran interés. Durante la reducción de tamaño, las partículas del material de alimentación son primeramente distorsionadas y forzadas. El trabajo necesario para forzarlas se almacena temporalmente en el sólido como energía mecánica de tensión, de la misma forma que la energía mecánica se puede almacenar en un muelle.

Al aplicar una fuerza adicional a las partículas tensionadas, éstas se distorsionan más allá de su resistencia final y bruscamente se rompen en fragmentos, generándose nuevas superficies. Puesto que una unidad de área de sólido posee una cantidad definida de energía superficial, la creación de nuevas superficies requiere un trabajo, que es suministrado por la liberación de energía de tensión cuando la partícula se rompe. De acuerdo con el principio de conservación de la energía, toda la energía en exceso sobre la energía de la nueva superficie creada ha de desaparecer en forma de calor. (McCabe, Smith, Harriot, 1991).

Para un molino que utilice bolas como cuerpos moledores, con el grado de llenado correcto y velocidad de rotación óptima, la potencia exigida se puede obtener por la siguiente fórmula empírica:

$$P = 12,5 G \quad (\text{Ec. 2.18})$$

donde:

P es la potencia necesaria (CV)

G es la carga de cuerpos moledores (ton). (Silva, 2002).

2.7 Tamizado

El tamizado consiste en hacer pasar una muestra sólida que en la mayoría de los casos proviene de un molino, por un conjunto de tamices con mallas que tienen una abertura mayor en el tamiz superior y una abertura menor en el tamiz inferior y quedan retenidas las partículas con un tamaño superior a las aberturas de las mallas de cada tamiz. Para medir el tamaño (y la distribución de tamaños) de las partículas en el intervalo de tamaños comprendidos entre 76 mm y 38 μm (3 y 0,0015 pulg), se utilizan tamices normalizados. Las aberturas son cuadradas. Cada tamiz se identifica por mallas por pulgada. Sin embargo, las aberturas reales son menores que las correspondientes al número de mallas, debido al espesor de los alambres.

Para realizar un análisis se coloca un conjunto de tamices acoplados verticalmente, colocándose la muestra en el tamiz superior y el conjunto se somete a sacudidas mecánicas. Las partículas retenidas en cada tamiz se convierten en fracciones másicas. Las partículas que pasan a través del tamiz más fino se recogen en una bandeja situada en el fondo de la columna de tamices. Los resultados de un análisis por tamizado se tabulan ya sea con un análisis diferencial ó acumulativo. (McCabe, Smith, Harriot, 1991).

2.7.1 Análisis de tamaños y distribución de tamaños

Hay formas efectivas de presentar información del análisis del tamaño de partículas luego de un tamizado.

2.7.1.1 Análisis diferencial

La información que se obtiene en este análisis del tamaño de partículas luego del tamizado, se tabula expresando la fracción del tamaño ó de número en cada incremento de tamaño en función del tamaño medio de partículas (o del intervalo de tamaños) en el incremento. Los resultados se presentan con una curva continua. (figura 2.4).

2.7.1.2 Análisis acumulativo

Se obtiene sumando consecutivamente, los incrementos individuales, comenzando con el que tiene las partículas más pequeñas y tabulando o representando las sumas acumulativas frente al diámetro máximo de las partículas en el incremento (figura 2.4). (McCabe, Smith, Harriot, 1991).

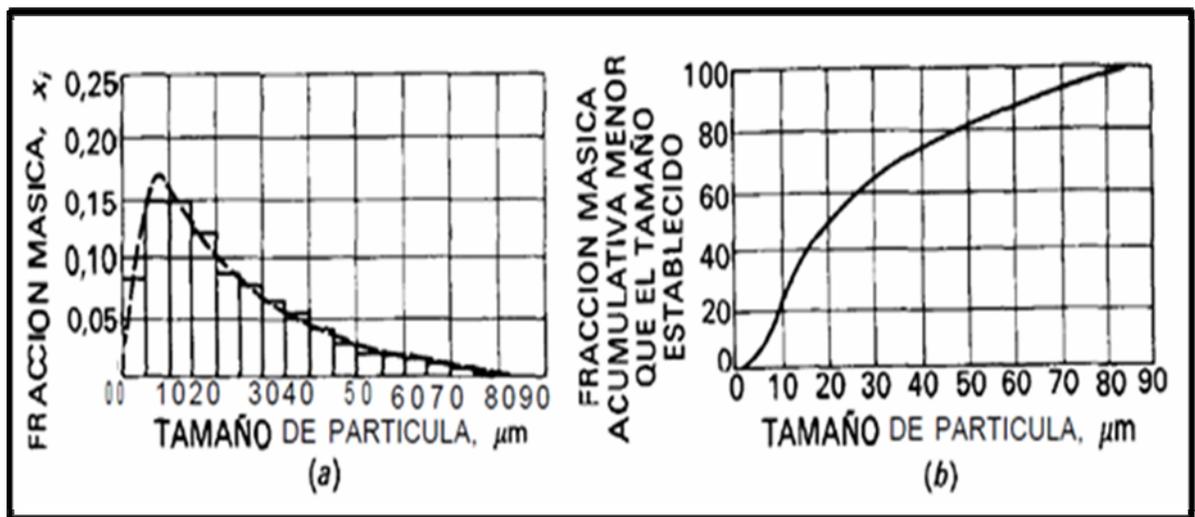


Figura 2.4. Distribución de tamaños de partículas en polvo: (a) análisis diferencial; (b) análisis acumulativo. (McCabe, Smith, Harriot, 1991)

2.7.2 Análisis de distribución de tamaños de Rosin-Rammler-Bennett-Sperling

Esta fórmula fue derivada originalmente para el carbón triturado y ha sido aplicada desde entonces a muchos otros materiales. Esta ecuación según Sperling puede ser escrita como:

$$R = 100e^{-bx^n} \quad (\text{Ec. 2.19})$$

donde:

R es el porcentaje en peso retenido en acumulado en un tamiz de apertura x.

b corresponde al tamaño promedio de las partículas

n es la constante de caracterización del tipo de distribución.

Esta ecuación puede ser expresada como una línea recta tal como se muestra a continuación:

$$\begin{aligned} \ln \frac{100}{R} &= bx^n \\ \ln \left[\ln \frac{100}{R} \right] &= \ln x^n + \ln b \\ \ln \left[\ln \frac{100}{R} \right] &= n \ln x + \ln b \end{aligned} \quad (\text{Ec. 2.20})$$

En el caso de la ecuación de Rosin Rammler y Bennett:

$$R = 100e^{-\left(\frac{X}{X_m}\right)^n} \quad (\text{Ec. 2.21})$$

donde:

X es el tamaño promedio de las partículas retenidas en los tamices y bandeja.

X_m corresponde al tamaño promedio de partículas

n es la constante de caracterización del tipo de distribución.

Aplicando logaritmo natural a ambos miembros de la ecuación:

$$\ln \frac{100}{R} = \left(\frac{X}{X_m}\right)^n$$

$$\ln \left[\ln \frac{100}{R} \right] = n \ln \left(\frac{X}{X_m} \right)$$

$$\ln \left[\ln \frac{100}{R} \right] = n \ln X - n \ln X_m \quad (\text{Ec. 2.22})$$

Graficando el $\ln \ln (100/R)$ versus $\ln x$ y si la población de partículas sigue una distribución de tamaños de acuerdo a lo propuesto por Sperling y Bennett, entonces debería obtenerse una línea recta con las siguientes características:

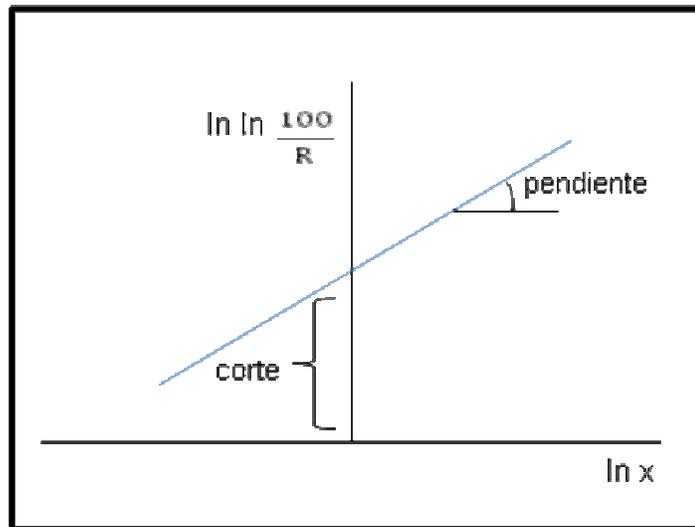


Figura 2.5. Representación gráfica de la distribución granulométrica de partículas según Sperling y Bennett.

Para conocer el diámetro promedio de la población “b” según Sperling, se usa el corte obtenido de la recta con el eje de las ordenadas.

$$\text{corte} = \ln b$$

$$b = e^{\text{corte}} \quad (\text{Ec. 2.23})$$

Para conocer el diámetro promedio de la población “Xm” según Bennett, se usa tanto la pendiente de la recta como el corte con el eje de las ordenadas.

$$\text{corte} = n \ln X_m$$

$$\text{Pendiente} = n$$

$$\frac{\text{corte}}{n} = \ln X_m \quad (\text{Ec. 2.24})$$

Por lo tanto el diámetro promedio de la población X_m según Bennett es:

$$\frac{\text{corte}}{\text{pendiente}} = \ln X_m$$

$$X_m = e^{\left(\frac{\text{corte}}{\text{pendiente}}\right)} \quad (\text{Ec.2.25})$$

Se observa que el factor de caracterización “n”, es común para ambos modelos. Al graficar el logaritmo natural del logaritmo natural del porcentaje inverso del peso retenido en función del logaritmo natural del tamaño de partículas, se genera una recta como se observa en la figura 2.6.

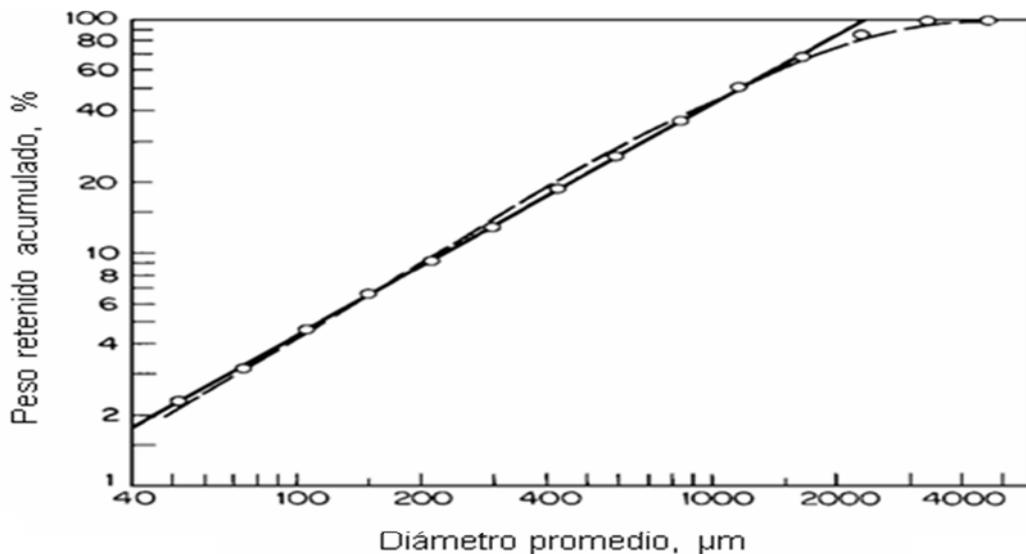


Figura 2.6. Porcentaje en peso acumulado en función del tamaño de partículas según Rosin-Rammler. (Chopey, 2004)

El porcentaje retenido se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$\%Ret = \frac{m_n}{m_t} \times 100 \quad (\text{Ec. 2.26})$$

donde:

m_n es la masa retenida en un tamiz (g)

m_t es la masa total tamizada (g).

De esta forma el porcentaje retenido acumulado (R) que es el necesario para graficar se tiene por la siguiente ecuación:

$$R = \frac{m_n + m_{n+1}}{m_t} \times 100 \quad (\text{Ec. 2.27})$$

Siendo m_{n+1} la masa en gramos retenida en el siguiente tamiz inferior.

En el caso del diámetro promedio de las partículas retenidas en cada tamiz se define con la siguiente fórmula:

$$D_{pi} = \frac{D_{pi} + D_{pi-1}}{2} \quad (\text{Ec. 2.28})$$

donde:

D_{pi} es el diámetro de apertura del tamiz i (μm)

D_{pi-1} es el diámetro de apertura del tamiz inmediato superior (μm).

Para el caso del tamiz superior de una pila de tamices, se toma la referencia del diámetro de apertura del tamiz superior a éste, según la serie de tamices utilizada.

Para la bandeja de retención de los finos el diámetro promedio de partículas allí retenidas sería, la apertura del tamiz inmediato superior a la bandeja entre dos.

Estas ecuaciones son útiles para estudiar operaciones de trituración para grandes distribuciones, pero debe ser usada con cuidado debido a que la función logaritmo siempre reduce los valores, y calcular nuevamente el logaritmo no es recomendable. (Allen, 1997).

2.8 Mezclado de sólidos

El mezclado es una operación cuyo objetivo fundamental es conseguir una distribución lo más homogénea posible entre varios componentes. Cuando existen grandes diferencias en los valores de algunas propiedades, como distribución de tamaño de partícula, densidad, forma y características superficiales, el mezclado puede hacerse realmente difícil. Hay varios mecanismos básicos involucrados en la mezcla de partículas sólidas. Entre ellos están el movimiento aleatorio a pequeña escala (difusión), el movimiento aleatorio a gran escala (convección) y la cizalladura. La agitación que incrementa la movilidad de las partículas individuales fomenta el mezclado por difusión. El mecanismo de difusión transcurre fácilmente para materiales en polvo con flujo libre, en el que las partículas individuales son altamente móviles. (Perry y Green, 2001).

2.8.1 Propiedades que afectan al mezclado de sólidos

Las características de los sólidos que más comúnmente afectan su mezclado son:

2.8.1.1 Distribución del tamaño de partícula

Indica los porcentajes del material para cada rango de tamaño.

2.8.1.2 Densidad del sólido a granel

Es el peso por unidad de volumen de una cantidad dada de partículas de sólido, expresado normalmente como kilogramos por metro cúbico (o libras por pie cúbico). No es constante, pudiendo descender mediante aireación e incrementarse por vibración o compactación mecánica.

2.8.1.3 Densidad real

La densidad real del material sólido se expresa normalmente en kilogramos por metro cúbico (o libras por pie cúbico). Ésto dividido por la densidad del agua, proporciona el peso específico.

2.8.1.4 Forma de las partículas

Algunas clases posibles son *pellets*, grumos ovalados, bloques, esferas, copos, obleas, varillas, cristales o formas irregulares.

2.8.1.5 Características superficiales

Se incluye el área superficial y la tendencia a adquirir carga estática.

2.8.1.6 Características del flujo

El ángulo de reposo y la fluidez son dos de las características del flujo para las que existen pruebas normalizadas. Un ángulo de reposo muy pronunciado indica baja fluidez. A veces se ha empleado el término “lubricidad” para caracterizar un flujo de partículas sólidas, correspondiendo toscamente al término de “viscosidad” de un fluido.

2.8.1.7 Friabilidad

Es la tendencia del material a romperse en partículas de menor tamaño durante el manejo. Igualmente, debe considerarse la abrasividad de unos materiales sobre otros.

2.8.1.8 Estado de aglomeración

Se refiere a si las partículas se presentan independientes unas de otras o por el contrario se adhieren formando agregados. El tipo y grado de energía empleada durante el mezclado y la friabilidad de los aglomerados afectarán la extensión de su rotura y la dispersión de las partículas.

2.8.1.9 Humedad o contenido de líquido de los sólidos

A menudo se añade una pequeña porción de líquido a los sólidos para reducir la cantidad de polvo o para requerimientos especiales.

El material resultante puede seguir teniendo el aspecto de un sólido seco y no el de una pasta. (Perry y Green, 2001).

2.8.2 Evaluación de un mezclado de sólidos

Para evaluar la homogeneidad relativa de una muestra pueden realizarse pruebas estadísticas basadas en las variaciones de composición observadas en una muestra.

2.8.3 Mezcladores de volteo de tambores gemelos

Muchos materiales se mezclan volteándolos en un contenedor parcialmente lleno que gira alrededor de un eje horizontal. Estos equipos mezclan eficazmente suspensiones de sólidos densos y polvos secos pesados. El mezclador de tambores gemelos está formado por dos cilindros unidos en V (figura 2.7) y gira alrededor de un eje horizontal. Como otros tipos de mezcladores puede contener pulverizadores internos para introducir pequeñas cantidades de líquido en el mezclador ó también dispositivos accionados mecánicamente para desmenuzar los aglomerados de sólidos. (McCabe, Smith, Harriot, 1991).

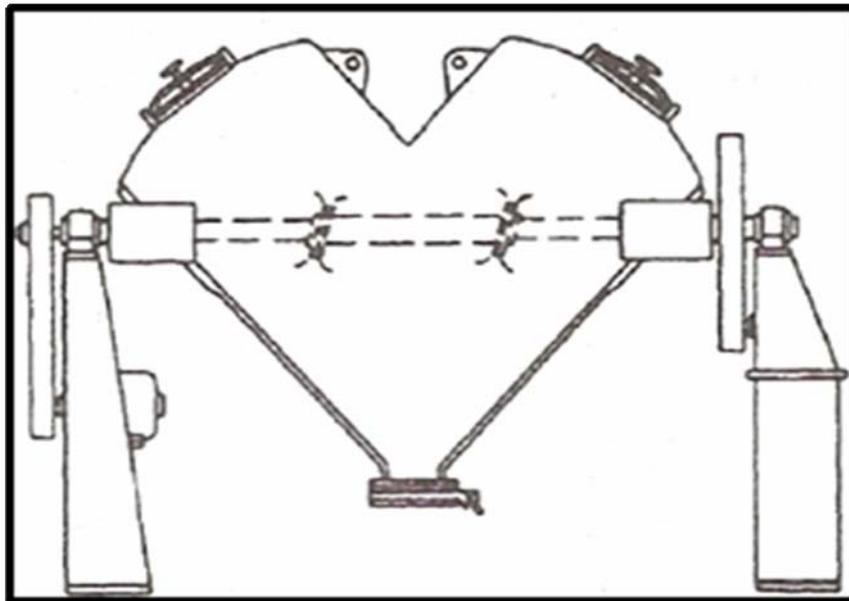


Figura 2.7. Mezclador de volteo de tambores gemelos. (Perry y Green, 2001).

2.9 Separaciones gas-sólido

La eliminación de los sólidos de una corriente de gas o aire es de gran importancia industrial. En la recolección de polvo, el propósito en el proceso de desmontaje y recogida de sólidos en una fase de gas es:

- Control de la contaminación del aire de diversas plantas industriales
- Eliminar riesgos a la salud por sólidos suspendidos sobre todo cuando existen operaciones de molienda
- Recuperar productos valiosos

El equipo más comúnmente usado para la separación de partículas sólidas de una corriente de aire/gas es el separador de ciclón. (Couper, Penney, Fair y Walas, 2005).

2.9.1 Separadores de ciclón

El equipo de recolección de polvo que más se emplea es el ciclón (figura 2.8), en el cual el gas cargado de polvo penetra tangencialmente a una cámara cilíndrica o cónica, en uno o más puntos y sale a través de una abertura central. El ciclón, es esencialmente una cámara de sedimentación en que la aceleración gravitacional es sustituida por la aceleración centrífuga. (Perry y Green, 2001).

Detalladamente se puede decir que en el eje de entrada tangencial de la corriente de flujo gaseosa, la fuerza centrífuga hace que las partículas de polvo se depositen sobre la pared del ciclón y luego por la acción de la gravedad se dirigen hacia la parte inferior (figura 2.8). Los recolectores de polvo tipo ciclón son económicos, no tienen partes móviles, pueden soportar temperaturas altas y la pérdida de carga va de 10 a 165 mm de columna de agua (dependiendo de la temperatura del gas, tamaño del ciclón y la velocidad del gas).

Su mayor limitación radica en que la eficiencia de recolección es baja para partículas inferiores a 10 μm , no obstante su efectividad es alta para partículas mayores a 200 μm . En general, la eficiencia va de 57 hasta 96,5% y en la práctica se utilizan para remover partículas con diámetro mayor a 100 μm .

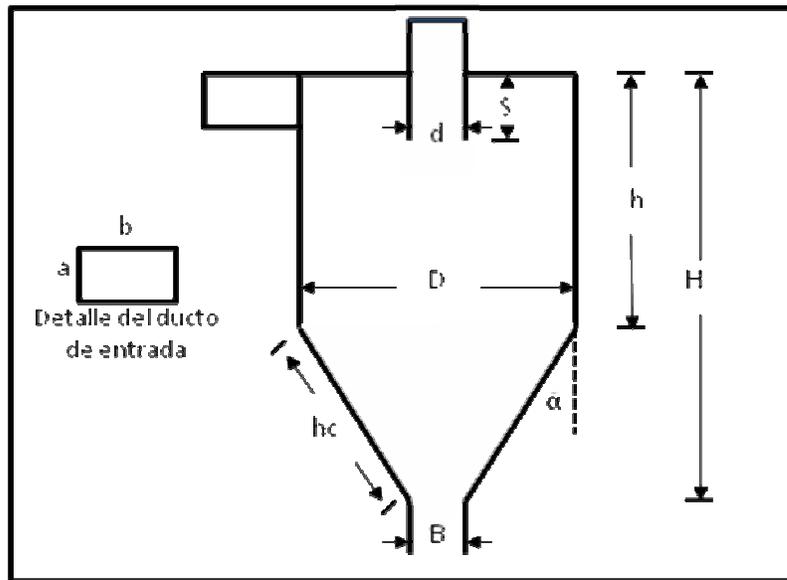


Figura 2.8. Separador de ciclón. (Silva, 2009)

La figura 2.8 presenta una nomenclatura para el diseño de un ciclón, donde:

a es la altura de entrada (pulg)

b el ancho de entrada (pulg)

H la altura total del ciclón (pies)

hc la altura de la porción cónica (pies)

D es diámetro de la parte cilíndrica (pulg)

h la altura de la porción cilíndrica (pies)

d el diámetro del tubo de salida de gases (pulg)

α el ángulo de la parte cónica, 15°

B el diámetro del tubo de salida de polvos (pulg).

A continuación se indica un procedimiento para el diseño de ciclones. Siguiendo la nomenclatura de la figura 2.8 se tiene que:

$$\Delta P = 0,192 N_H \rho_g V^2 / 2 g_c \quad (\text{Ec. 2.29})$$

donde:

ρ_g : densidad de gas a las condiciones reales, lbm/pies³

V: velocidad del gas entrando al ciclón, pies/s

g_c : 32,174 pies.lbm/s²lbf

ΔP : caída de presión del ciclón, pulg agua

N_H es un parámetro adimensional que se calcula de la siguiente forma:

$$N_H = 4ab/(D - 2b)^2 \quad (\text{Ec. 2.30})$$

El tiempo de residencia en el ciclón, en segundos viene dado por: (Silva, 2009).

$$t = 9\pi(D/12)/100 \quad (\text{Ec. 2.31})$$

2.10 Ángulo de fricción interna y ángulo de reposo de masa de partículas

El ángulo α_m es el ángulo de fricción interna del material. La tangente de este ángulo es el coeficiente de fricción entre las dos capas de partículas. Cuando se apilan sólidos granulares sobre una superficie plana, los lados de la pila forman un ángulo definido reproducible con la horizontal. Este ángulo α_r es el ángulo de reposo del material. Idealmente, si la masa fuese totalmente homogénea el ángulo de fricción interna α_m , sería igual al ángulo de reposo α_r .

En la práctica el ángulo de reposo es menor que el ángulo de fricción interna debido a que los granos de la superficie exterior están menos empaquetados que los de la masa interior y con frecuencia están más secos y presentan una menor adherencia. El ángulo de reposo es menor cuando los granos son lisos y redondeados y es grande cuando se trata de partículas muy finas, angulares o adherentes.

Para sólidos cohesivos el coeficiente de la ley de Mohr (K') tiende hacia cero. Para materiales granulares que fluyen libremente K' con frecuencia está comprendido entre 0,35 y 0,6 lo que indica que α_m varía entre 15 y 30°. K' se define según la ley de los esfuerzos de Mohr con la siguiente ecuación:

$$K' = \frac{1 - \text{sen } \alpha_m}{1 + \text{sen } \alpha_m} \quad (\text{Ec. 2.32})$$

El ángulo de reposo es un parámetro determinante en el caso de almacenamiento de sólidos en depósitos a gran escala. (McCabe, Smith, Harriot, 1991).

2.11 Almacenamiento de sólidos

Los sólidos que son demasiado valiosos o demasiado solubles para estar expuestos a la intemperie, se almacenan en depósitos, tolvas o silos, que son recipientes cilíndricos o rectangulares de hormigón o metal. Una tolva es un pequeño depósito con fondo oblicuo, que se utiliza para el almacenamiento temporal antes de introducir los sólidos como alimentación del proceso. Este contenedor se carga por la parte superior utilizando algún tipo de elevador, mientras que la descarga se realiza generalmente por el fondo. El principal problema de diseño de un depósito es conseguir una descarga satisfactoria. (McCabe, Smith, Harriot, 1991).

2.11.1 Flujo de descarga en tolvas de almacenamiento

Un recipiente de almacenamiento está formado por un depósito y una tolva. El depósito es la sección superior del recipiente, con lados verticales. La tolva, que tiene por lo menos un lado inclinado, es la sección entre el depósito y la salida del recipiente. Dos de las características de flujo en un recipiente de almacenamiento son el flujo de masa y el flujo de embudo. El flujo de masa, significa que todos los materiales en el recipiente se desplazan cuando se retira una parte. El flujo del embudo, se produce cuando fluye solo una porción del material al retirarse una cantidad de éste comúnmente por un canal ó agujero en el centro del sistema. (Perry y Green, 2001).

Cuando los sólidos fluyen en una tolva a través de un orificio, las partículas tienden a rodar en capas, moviéndose más rápido en las capas centrales a través del orificio. Según Armfield, 2005, la tasa de descarga de sólidos en una tolva se ajusta a:

$$Q = kD^n \quad (\text{Ec. 2.33})$$

donde:

Q es la tasa de descarga

D diámetro de orificio

k es una constante de proporcionalidad

n es una potencia aproximadamente 2,5-3.

Entonces graficando el logaritmo de Q versus el logaritmo de D, resulta la grafica mostrada en la figura 2.9.

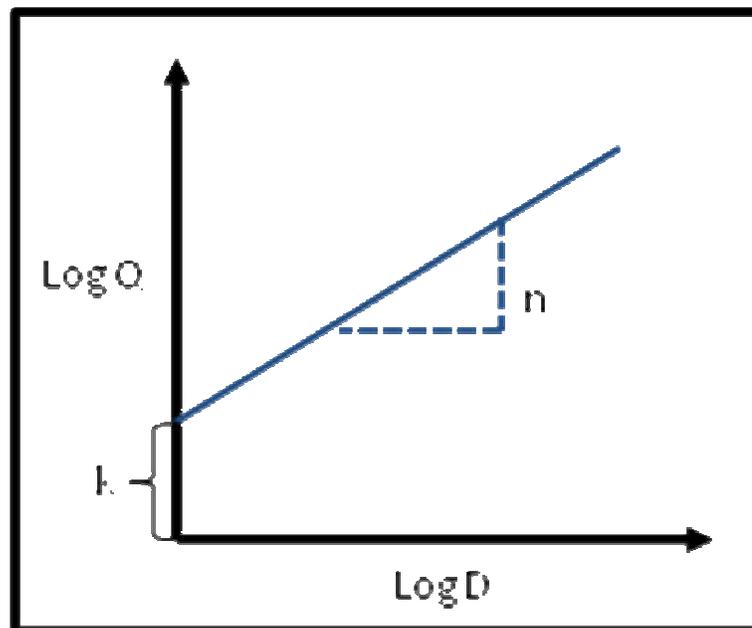


Figura 2.9. Log de la tasa de descarga en función del log del diámetro de orificio de la salida de la tolva. (Compañía Armfield, 2005)

2.11.2 Características de las tolvas de flujo de masa

- Las partículas se segregan, pero se reúnen en la descarga
- Los polvos se desairean y no fluyen cuando se descarga el sistema
- El flujo es uniforme

- La densidad de flujo es constante
- No quedan productos en zonas muertas. (Perry y Green, 2001).

2.12 Transporte neumático

Los sólidos granulares de naturaleza libre pueden transmitirse a través de conductos en cualquier dirección con corrientes de aire de alta velocidad. El rendimiento del transporte neumático es sensible a varias características de los sólidos, de las cuales las más pertinentes son:

- Densidad aparente
- Densidad real
- Coeficiente de fricción
- Angulo de reposo
- Distribución de tamaño de partícula
- Forma de las partículas
- Contenido de humedad
- Características como abrasividad, inflamabilidad etc.

A diferencia de otros métodos de transporte, el transporte neumático exige más de potencia de entrada, por unidad de peso transferido. Se logra una capacidad mínima cuando la energía del aire de transporte es apenas suficiente para hacer que el producto se desplace a lo largo de la línea sin detenerse. (Mills, 2004).

2.12.1 Transporte neumático de presión

Es cuando se deja caer el material en una corriente de aire (por encima de la presión atmosférica) mediante un alimentador de exclusa giratorio. La velocidad de la corriente mantiene al material a granel en suspensión hasta que llegue a un recipiente receptor, donde se separa del aire mediante un filtro o un separador de ciclón. Se usan sistemas de presión para materiales de flujo libre

de casi todos los tamaños de partículas, hasta gránulos de 6,35 mm ($1/4$ pulg). (Perry y Green, 2001).

2.12.2 Transporte neumático de vacío

Se caracterizan por el desplazamiento de materiales en una corriente de aire de presión menor que la ambiental. Las ventajas de este equipo son las de que toda la energía de bombeo se usa para mover el producto y se puede absorber material en la línea del transportador sin necesidad de un alimentador giratorio o un sello similar entre el recipiente de almacenamiento y el transportador. El material permanece suspendido en la corriente de aire hasta que llega a un receptor. Allí un filtro ó un separador de ciclón, separa el material del aire, haciendo pasar este último por el separador y por el lado de succión del ventilador de desplazamiento positivo ó de alguna otra fuente de potencia. (Perry y Green, 2001).

2.13 Descripción del equipo de manejo de sólidos marca Armfield

El equipo suministrado en este banco se compone de una serie de elementos diseñados para estudiar diferentes aspectos del comportamiento de sólidos. Observando la numeración en la figura 2.10, el equipo consta de un tablero de montaje con un marco de apoyo sobre los cuales van montados los diversos componentes experimentales. Una balanza digital (20) proporciona el mecanismo para facilitar el peso de un material, ya que el banco está dotado de corredores (18) para situar la bandeja de la balanza (19) bajo la tolva (17) ó bajo el molino de bolas (15). Los componentes individuales experimentales son los siguientes:

2.13.1 Molino de bolas

El molino de bolas (15) está compuesto por un cilindro de acero inoxidable que gira por un motor eléctrico de velocidad variable. El molino incorpora las esferas cerámicas de diferentes tamaños con el propósito de moler. Una cubierta de acceso (14) en la periferia del cilindro puede encontrarse en tres posiciones

alternativas, para la carga (abierto), moliendo (cerrado) ó muestreo de cada revolución (perforada). Una cubierta de acrílico claro en la parte frontal del molino permite la visualización del proceso. El molino se enciende accionando el interruptor (13) y la velocidad se regula mediante el ajuste de la perilla de control (12) en el panel de control del molino.

2.13.2 Tamices y agitador

El agitador del tamiz (21) está situado en la parte posterior del equipo sobre el basamento horizontal. Un sistema de abrazaderas (22) conserva los tamices (23), la bandeja receptora y la tapa en la posición para la agitación. La velocidad de agitación se puede variar ajustando la perilla (24) en el cuadro de control. El agitador se enciende accionando el interruptor (7) en el tablero y el interruptor (25) en el cuadro de control.

2.13.3 Cilindro horizontal

El cilindro (4) está hecho de acrílico claro, está montado en el tablero y es libre de rotar. Una escala de 0-360° detrás del cilindro permite la medición del ángulo de reposo del material según la cantidad de rotación. Un agujero en la pared del cilindro facilita el llenado y el vaciado, (el conjunto transportador neumático / ciclón puede utilizarse para transferir material hacia ó desde el cilindro).

2.13.4 Tolva cilíndrica con orificios

Una tolva cilíndrica (17) hecha de acrílico claro, está montada en el tablero. Una escala en la tolva proporciona la medición de contenido. La base de la tolva es cónica é incorpora una placa (16) que puede girarse para proporcionar diferentes tamaños de orificio. La salida también puede ser sellada para permitir el llenado de la tolva. La bandeja de la balanza (19) se utiliza para atrapar la descarga a la salida de la tolva.

2.13.5 Mezclador de volteo de tambores gemelos

El mezclador (2) está conformado por dos cilindros con una tapa de acceso (3) en el vértice. El mezclador gira por un motor eléctrico de velocidad variable y está hecho en acrílico claro para permitir la visualización del proceso. La tapa de

acceso está protegida mediante dos tornillos. Los tubos de muestreo (1) en cada cilindro del mezclador proporcionan una pequeña muestra de material sobre cada revolución para facilitar el análisis de la mezcla. El mezclador se enciende accionando el interruptor (6) y la velocidad se regula mediante el ajuste de la perilla de control (5) en el panel de control del mezclador.

2.13.6 Ciclón y transporte neumático

Un compresor (29), ubicado en la parte trasera del equipo proporciona aire a un eyector con el propósito de transmisión neumática. El brazo de succión del eyector está conectado a un tubo flexible (11), que forma la ingesta del material. La salida desde el eyector se pasa a un ciclón de vidrio (9) que separa el material del aire. El aire es expulsado de la parte superior del ciclón, mientras que el material es expulsado en la base. Un tubo flexible (10) está conectado a la base de las formas del ciclón a la salida del material. El compresor incorpora una válvula de alivio (28), manómetro (27) y la válvula de control de flujo (26) sobre la línea de descarga del compresor.

(Compañía Armfield, 2005)

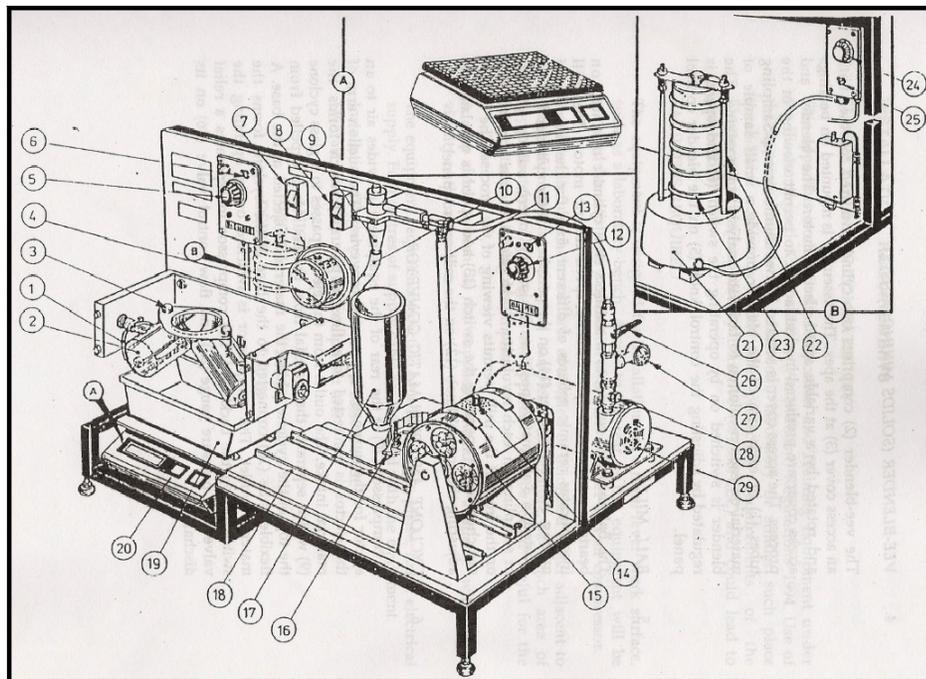


Figura 2.10. Banco de estudio para la manipulación de sólidos. (Compañía Armfield, 2005)

CAPÍTULO 3

DESARROLLO DEL TRABAJO

3.1 Escogencia de uno o varios materiales que puedan ser usados en el desarrollo de una práctica de manejo de sólidos

Se realizó un estudio para seleccionar el material a utilizar en el equipo Armfield, enfocado en el criterio de que los materiales debían ser inofensivos para la salud, que no dañaran el equipo y de fácil manejo. Primeramente se estudiaron las recomendaciones dadas por el manual del equipo Armfield. Dicho manual incentiva al uso de sólidos como sal, azúcar, arena o rocas. Con estos materiales se hubiese aprendido a utilizar el equipo, pero la sal es corrosiva y el azúcar acaba absorbiendo humedad, apelmazándose (además de ser atractivo para los insectos). La arena o roca pudieran ser materiales candidatos a emplear en el equipo.

Seguidamente se contempló el uso del mismo material usado para la molienda de sólidos de las prácticas realizadas en el Laboratorio de Operaciones Unitarias, ya que uno de los componentes del equipo Armfield es un molino de bolas al igual que el molino utilizado para las experiencias de molienda en este laboratorio. El material usado en estas prácticas es ladrillo, sin embargo éste material molido no presenta una aplicación inmediata en la industria química y al terminar la experiencia de molienda se desecha porque es un material al que no se le puede dar uso alguno. El ladrillo no fue considerado como un material de interés para las prácticas; a pesar de ello se decidió utilizarlo en este trabajo para establecer comparaciones entre el comportamiento del molino del equipo Armfield y el del molino utilizado en el Laboratorio de Operaciones Unitarias.

Luego de esto, se realizó una investigación de las industrias cercanas a la Universidad de Oriente en Puerto la Cruz, estado Anzoátegui. Esto con la

intención de conocer los sólidos que se manejan en estas industrias, para así verificar que estos materiales no sean perjudiciales para la salud ni para la vida útil del equipo Armfield.

En el área cercana a Puerto la Cruz una de las industrias de manejo de sólidos es; primeramente la planta ubicada en el municipio Guanta del estado Anzoátegui, llamada Cementos de Venezuela donde se manejan sólidos como yeso y *clinker*, para la obtención de cemento. Otra planta de interés en el tema de manejo de sólidos es la planta Fertinitro, ubicada en el Complejo Industrial Petroquímico General de División Jose Antonio Anzoátegui, la cual produce urea granulada.

Entonces se decidió usar yeso, que es un mineral compuesto de sulfato de calcio hidratado, que se presenta en cristales, a veces grandes en forma de punta de flecha o en punta de lanza, y *clinker* que es roca caliza cocida y principal materia prima del cemento. Estos materiales se eligieron para estudiar la molienda de manera de recrear lo que se realiza en la industria cementera, ya que es de gran interés para la formación de ingenieros químicos y además dichos materiales no son perjudiciales para el equipo Armfield, y tampoco para la salud si se tratan con las medidas de seguridad necesarias como el uso de tapa bocas y guantes.

Otro aspecto de interés en el estudio fue que en la planta Fertinitro donde se maneja urea, se realizan mediciones de ángulos de reposo de este material granular para determinar la cantidad de urea existente en los depósitos y de esta manera tener contabilidad de su producción. De manera que la medición del ángulo de reposo de urea granulada tiene especial interés en la industria petroquímica, por lo que este material debía añadirse a las prácticas en el equipo de manejo de sólidos Armfield, ya que éste equipo está dotado con un cilindro especial para la medición de ángulos de reposo. Se consideró también que el utilizar urea no era perjudicial para la salud y tampoco para el equipo.

El equipo Armfield cuenta con un mezclador de tambores gemelos en el cual no se podrán realizar mezclados de partículas sólidas muy finas por no contar

con un método para determinar la calidad de la operación de mezcla. En vista de esto se escogió un material con el que se pudiera tener dos tamaños de partículas distintos y también dos colores diferentes, para así poder evaluar fácilmente la calidad de la mezcla. Para ello el material seleccionado fue grava ornamental de los colores azul y rosado.

En resumen se decidió usar yeso (figura A-1) y *clinker* (figura A-2), para estudiar el manejo de sólidos de la industria cementera y urea granulada (figura A-3), para realizar las mediciones de ángulo de reposo, ya que es de gran importancia en la industria de producción de urea. Además se decidió usar el ladrillo para comparar la eficiencia del molino utilizado en las prácticas del laboratorio y el molino del equipo Armfield, y también grava de colores para evaluar el mezclado.

3.2 Selección de correlaciones de manejo de sólidos que mejor se adapten a cada uno de los procesos estudiados en el banco de pruebas

3.2.1 Molino de bolas

Para el molino de bolas se seleccionaron las ecuaciones que serán presentadas en el siguiente orden:

3.2.1.1 Cálculo de la velocidad de rotación del molino

Este cálculo se hará según la ecuación 2.13, para así tener la velocidad crítica de rotación y poder compararla con valores experimentales, sabiendo que la velocidad óptima debe estar entre el 73 y 78% de la velocidad crítica.

3.2.1.2 Cálculo de la cantidad de cuerpos moledores para realizar la molienda

Primero fue necesario calcular el volumen ocupado por los cuerpos moledores con la ecuación 2.15. Luego de tener el volumen ocupado por los cuerpos moledores, se debe obtener la densidad aparente de la carga de cuerpos moledores, para finalmente hacer el cálculo de la masa de cuerpos moledores a usar mediante la ecuación 2.16.

La densidad aparente se calcula colocando los cuerpos moledores en un cilindro graduado para obtener el volumen ocupado por cierta masa de cuerpos moledores y así poder dividir la masa de éstos entre el volumen que ocupan. Para el caso de combinaciones de cuerpos moledores donde se trabajarán distintos porcentajes en masa de cada tamaño de cuerpos moledores se hará de la siguiente manera:

$$\rho_c = \left(\frac{\%M_{25}}{100} \times \rho_{25} \right) + \left(\frac{\%M_{20}}{100} \times \rho_{20} \right) + \left(\frac{\%M_{13}}{100} \times \rho_{13} \right) \quad (\text{Ec. 3.1})$$

Donde $\%M_{25}$, $\%M_{20}$ y $\%M_{13}$ son los porcentajes en masa de cuerpos moledores de cada diámetro, según sea la combinación de cuerpos moledores, y ρ_{25} , ρ_{20} y ρ_{13} son las densidades aparentes que fueron calculadas para cada grupo de cuerpos moledores puros, es decir el grupo de solo cuerpos moledores de 25 mm de diámetro tiene una densidad aparente y así el grupo de 20 mm y el de 13 mm. Luego se hace la sumatoria y se obtiene la densidad aparente de la combinación con varios tamaños de cuerpos moledores. De esta manera se tendrá un valor más acertado de la densidad aparente cuando se trabaja con combinaciones de cuerpos moledores.

De acuerdo al grado de llenado y por medio de la figura A-4 se puede obtener la altura teórica que ocupan los cuerpos moledores dentro del molino. Durante la experimentación se midió la altura de bolas en el molino para comparar con la altura teórica calculada.

3.2.1.3 Cálculo de potencia

Se realizará usando la ecuación 2.18, para obtenerla en unidades de caballos de vapor y así luego se hará el cambio a las unidades de potencia que se deseen. Esa potencia calculada se obtiene en función de la carga de cuerpos moledores.

3.2.2 Tamizador

Se decidió trabajar con los análisis de distribución de tamaño de Rosin-Rammler para la obtención de graficas logarítmicas de pesos acumulados en función de tamaños de partículas. Esto con la intención de establecer comparaciones entre moliendas a distintas condiciones de trabajo, para así poder concluir acerca de las condiciones de molienda que resulten más efectivas para realizar una práctica de laboratorio en el equipo Armfield.

3.2.3 Mezclador

La efectividad del mezclado se determinó por medio del porcentaje de desviación entre la proporción de la masa de grava azul en una muestra y el 50% característico de una mezcla perfecta, evaluando la eficiencia al variar la velocidad del mezclador a distintos tiempos de mezclado.

3.2.4 Ciclón

En cuanto al ciclón se escogió la ecuación 2.28 para el cálculo del tiempo de residencia. Aparte de esto también se evaluó el flujo másico con el que trabaja el transporte neumático.

3.2.5 Ángulo de reposo

Se decidió trabajar mediante la ley de Mohr, utilizando la ecuación 2.32.

3.2.6 Tolva

Se eligió trabajar con la ecuación 2.33 para obtener gráficas de flujo de descarga en función del diámetro de orificio de descarga de la tolva.

3.3 Demostración de la reproducibilidad de los resultados obtenidos en los distintos equipos del banco de pruebas

Para demostrar la reproducibilidad de los resultados se decidió experimentar con cada componente del equipo Armfield para determinar cuáles condiciones eran las más favorables para desarrollar una práctica de laboratorio.

3.3.1 Tamizador

Con la intención de encontrar las condiciones más favorables para el tamizado, se tomó en cuenta que en el tamizador se puede variar la intensidad de vibración en términos de porcentajes. De acuerdo con esto se decidió experimentar a las intensidades de vibración de 25, 50, 75 y 100% a los tiempos de 5, 10, 15 y 20 min. Se tamizó una muestra de yeso molido (figura A-5) con solo cuerpos molidores de 25 mm. La bandeja y los tamices del tamizador fueron pesados para obtener su masa vacía y estos datos fueron representados en la tabla 3.1.

Tabla 3.1 Pesos de los tamices vacíos y de la bandeja vacía.

Tamiz (μm)	Pesos vacíos (g)
2.000	146
1.000	134
710	135
500	125
355	123
250	116
Bandeja	89

Para cada corrida se pesaron los tamices llenos, en el caso de las corridas a 5 min de tamizado se tiene la tabla de datos 3.2.

En el caso de las corridas de 10, 15 y 20 min se obtuvieron los datos presentados en las tablas B-1, B-2 y B-3, respectivamente. Los datos de estas tablas son de pesos de tamices llenos y para obtener la masa retenida se les restó el peso vacío de cada tamiz y bandeja. Los pesos retenidos resultantes para las corridas de 5 min se muestran en la tabla 3.3 y para las corridas a 10,

15 y 20 min los pesos retenidos se observan en las tablas C-1, C-3 y C-5, respectivamente.

Tabla 3.2 Pesos de tamices llenos en el tamizado para cada intensidad de vibración en un tiempo de 5 min de tamizado.

Tamiz (µm)	Intensidad de vibración (%)			
	25	50	75	100
	Peso del tamiz lleno (g)	Peso del tamiz lleno (g)	Peso del tamiz lleno (g)	Peso del tamiz lleno (g)
2.000	341	279	258	249
1.000	137	189	187	187
710	135	141	154	156
500	125	128	133	137
355	124	124	129	130
250	117	117	117	119
Bandeja	89	90	90	90

Tabla 3.3 Masa retenida de una muestra de 200 g de yeso en cada tamiz, para cada intensidad de vibración en un tiempo de 5 min de tamizado.

Tamiz (µm)	25%	50%	75%	100%
	Masa retenida (g)	Masa retenida (g)	Masa retenida (g)	Masa retenida (g)
2.000	195	133	112	103
1.000	3	55	53	53
710	0	6	19	21
500	0	3	8	12
355	1	1	6	7

250	1	1	1	3
Bandeja	0	1	1	1
Total	200	200	200	200

Para realizar el análisis de distribución de tamaños de Rosin-Rammler-Bennett-Sperling, se calculó el porcentaje retenido, el diámetro promedio de partículas y el porcentaje retenido acumulado.

Para el primer tamiz, el porcentaje retenido para 5 min y 25% de intensidad se obtiene sustituyendo en la ecuación 2.26 los datos de la primera columna de la tabla 3.3.

$$\%Ret = \frac{195 \text{ g}}{200 \text{ g}} \times 100 \% = 97,5 \%$$

El mismo cálculo se repite para cada tamiz y también para la bandeja.

En la tabla B-5 se observa que el tamiz superior al 2.000 μm (2 mm) según el estándar británico, corresponde a uno cuya apertura es 2.400 μm (2.4 mm), por lo tanto, el diámetro promedio de las partículas retenidas en el primer tamiz de la pila, según la ecuación 2.28 es:

$$D_p = \frac{2.400 + 2.000}{2} = 2.200 \mu\text{m} \times \frac{1 \text{ mm}}{1.000 \mu\text{m}} = 2,20 \text{ mm}$$

De la misma forma se hace el cálculo para los demás tamices. Para la bandeja es el diámetro promedio del tamiz superior, entre dos y luego se realiza el mismo cambio de unidades de micrómetros a milímetros.

Se debe calcular también el porcentaje retenido acumulado. Para el primer tamiz, el porcentaje retenido es igual al porcentaje retenido acumulado, a partir del segundo tamiz se realiza el cálculo sustituyendo en la ecuación 2.27, los datos de la tabla 3.3.

$$R = \frac{195 \text{ g} + 3 \text{ g}}{200 \text{ g}} \times 100\% = 99,0\%$$

Así se obtienen los datos reflejados en la tabla 3.4, para la corrida con un tamizado de 5 min y con 25% de intensidad de vibración.

Tabla 3.4 Diámetros promedios de partículas, porcentajes retenidos y retenidos acumulados en cada tamiz para cada intensidad de vibración de la corrida a 5 min de tamizado.

Tamiz (μm)	Dp (mm)	Intensidad de vibración (%)							
		25		50		75		100	
		Porc. Ret. (%)	Ret. Acu (%)	Porc. Ret. (%)	Ret. Acu (%)	Porc. Ret. (%)	Ret. Acu (%)	Porc. Ret. (%)	Ret. Acu (%)
2.000	2,2000	97,5	97,5	66,5	66,5	56,0	56,0	51,5	51,5
1.000	1,5000	1,5	99,0	27,5	94,0	26,5	82,5	26,5	78,0
710	0,8550	0,0	99,0	3,0	97,0	9,5	92,0	10,5	88,5
500	0,6050	0,0	99,0	1,5	98,5	4,0	96,0	6,0	94,5
355	0,4275	0,5	99,5	0,5	99,0	3,0	99,0	3,5	98,0
250	0,3025	0,5	100,0	0,5	99,5	0,5	99,5	1,5	99,5
Bandeja	0,1250	0,0	100,0	0,5	100,0	0,5	100,0	0,5	100,0
Total	--	100,0	--	100,0	--	100,0	--	100,0	--

De la misma forma se repiten los cálculos para todos los tamices en las corridas a los diferentes tiempos de tamizado. Los resultados se observan en la tabla C-2, C-4 y C-6 para las corridas a 10, 15 y 20 min, respectivamente.

Para realizar el análisis de distribución de tamaños de Rosin-Rammler-Bennett-Sperling se grafica el logaritmo natural del logaritmo natural del porcentaje inverso del peso retenido acumulado en función del logaritmo del tamaño de partículas. Estos logaritmos se calculan usando los datos de peso retenido acumulado y tamaño de partículas representados en las tablas 3.4, C-2, C-4 y C-6 para las corridas de 5, 10, 15 y 20 min, respectivamente. La grafica para las corridas a 5 min está representada en la figura 3.1, mientras que para

las corridas a 10, 15 y 20 min, se representan las graficas en las figuras D-1, D-2 y D-3, respectivamente.

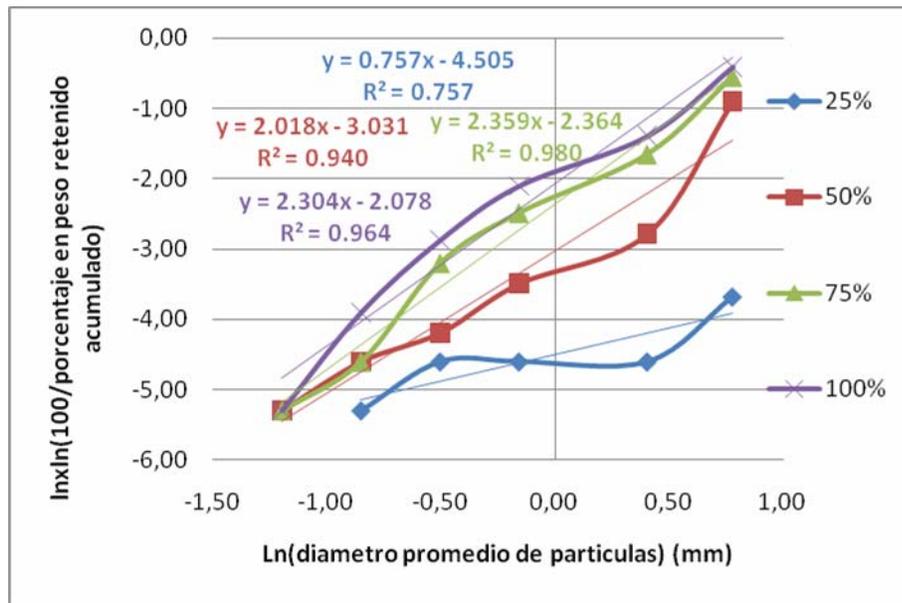


Figura 3.1. Análisis para el tamizado de 5 min a las diferentes intensidades de vibración del tamizador.

Luego de graficar se deben comparar los diámetros promedios de partículas según Sperling y según Bennett. Según Sperling, el diámetro promedio de partículas (ecuación 2.23), es el exponencial del corte de la línea recta formada. Tomando los resultados de la correlación de los puntos usando mínimos cuadrados reflejados en la figura 3.1, del intercepto de la recta para la corrida de 5 min al 25% de intensidad de vibración se calcula el diámetro promedio de partículas según la ecuación 2.23.

$$b = e^{-4.505} = 0,01 \text{ mm}$$

Según Bennett, a partir de la ecuación 2.25, se obtiene que el diámetro promedio de partículas equivale al exponencial del cociente entre el intercepto y la pendiente de la recta. Entonces, de la figura 3.1 se toman los valores de la

pendiente y del intercepto para la corrida de 5 min y 25% de intensidad de vibración, obteniéndose lo siguiente:

$$X_m = e^{\frac{(-4,505)}{0,757}} = 384,18 \text{ mm}$$

De esta manera se realizó el mismo procedimiento para las demás corridas de tamizado, obteniéndose las figuras D-1, D-2 y D-3, para las corridas a 10, 15 y 20 min respectivamente. Con estas figuras se obtuvieron los resultados de los diámetros promedios según Sperling y Bennett para cada tamizado, resultados que se muestran en la tabla 3.5.

Tabla 3.5 Diámetros promedios de partículas según Sperling y Bennett para las pruebas de tamizados.

Tiempo (min)	Intensidad de vibración (%)	Diámetro promedio (mm)	
		Rosin Rammler y Sperling	Rosin Rammler y Bennett
5	25	0,01	384,18
	50	0,05	4,49
	75	0,09	2,72
	100	0,13	2,46
10	25	0,01	96,96
	50	0,05	4,67
	75	0,12	2,55
	100	0,12	2,55
15	25	0,01	195,24
	50	0,04	4,15
	75	0,14	2,50
	100	0,18	2,43
20	25	0,02	206,95
	50	0,07	3,38
	75	0,18	2,33

	100	0,19	2,32
--	-----	------	------

Se debe mencionar que el mejor tamizado se observa a las condiciones de 100% de intensidad de vibración y en el tiempo de 20 minutos, por lo que fueron escogidos como condiciones para analizar las siguientes moliendas.

Luego de seleccionar las condiciones para los futuros tamizados, se procedió a estudiar más a fondo la molienda, ya que cada una se evalúa con los datos que se obtienen luego del tamizado de la muestra molida, es por esto que fue primordial estudiar primero las condiciones de tamizado.

3.3.2 Molino de bolas

Para demostrar la reproducibilidad de los resultados en el molino de bolas del equipo Armfield, se procedió a realizar varias moliendas para determinar cuáles condiciones de trabajo son las mejores para la realización de la práctica de laboratorio.

Los factores que se estudiaron en la molienda son la masa de muestra a moler, la cantidad de cuerpos moledores, la velocidad de rotación del molino y el tiempo de molienda.

La masa a moler quedó determinada por la cantidad de masa que acepta el conjunto de tamices para el tamizado, en vista de que la molienda se evalúa con los valores arrojados en el tamizado. Entonces la masa a tamizar fue de 200 g, ya que si se tamiza más de 200 g los tamices estarían sobrecargados. Por esto la masa a moler fue de 205 g para tomar la previsión en caso de alguna pérdida de material durante la extracción de muestra del molino.

La cantidad de cuerpos moledores está íntimamente ligada al grado de llenado del molino, por lo que para estudiar la influencia del grado de llenado en el molino, se decidió realizar tres corridas de molienda a tres grados diferentes de llenado del molino. Se trabajó con masas iguales de los tres tamaños de cuerpos moledores, es decir, se hicieron corridas con igual masa de bolas de 25, 20 y de 13 mm, para las pruebas a diferentes grados de llenado. Se decidió experimentar con los grados de llenado de 25, 30 y 35%, tomando en cuenta lo

extraído del marco teórico referente a que el grado de llenado de un molino de bolas debe estar entre 25 y 35%, porque por encima de 40% las bolas presentan problemas de trayectoria. Para determinar la cantidad de masa de cuerpos moledores a 25% de grado de llenado se hizo lo siguiente:

Se sustituyeron los valores en la ecuación 2.15 para obtener el volumen ocupado por los cuerpos moledores en el molino al 25% de grado de llenado, sabiendo que el molino del equipo Armfield tiene un diámetro de 21,3 cm y una longitud de 15,5 cm.

$$V_c = [(\pi \times 21,3 \text{ cm}^2 \times 15,5 \text{ cm}) / 4] \times 0,25 = 1.380,8 \text{ cm}^3$$

Teniendo este valor, fue necesario tener las densidades aparentes de cada tamaño de cuerpos moledores. Para los cuerpos moledores de 25 mm de diámetro, se peso una cierta cantidad y luego se introdujeron en un cilindro graduado, midiéndose el volumen ocupado; dichos datos se encuentran en la tabla 3.6. Sustituyendo los valores de peso y volumen en la ecuación 2.17, se obtuvo la densidad aparente para la carga de cuerpos moledores de 25 mm:

$$\rho_{25} = \frac{873,07 \text{ g}}{520 \text{ cm}^3} = 1,679 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$$

De esta misma forma se realizó el cálculo de las densidades aparentes para la carga de los cuerpos moledores de 20 y 13 mm de diámetro, resultando los valores encontrados en la tabla 3.6.

Tabla 3.6 Masa y volumen ocupado por la carga de cuerpos moledores de cada diámetro.

Diámetros de cuerpos moledores	Masa de la carga de cuerpos moledores (g)	Volumen ocupado por la carga de cuerpos	Densidad aparente
--------------------------------	---	---	-------------------

(mm)		moledores (cm ³)	(g/cm ³)
25	873,07	520	1,679
20	461,01	270	1,707
13	317,10	150	2,114

Se debe mencionar que se quiere estudiar la influencia del grado de llenado del molino en la molienda, para esto se va a moler con una combinación de cuerpos moledores donde cada tamaño de cuerpos estén en la misma proporción másica, es decir que cada uno esté en un 33,33% de porcentaje másico. Ahora teniendo las densidades para cada tamaño de bolas, se procede a sustituir en la ecuación 3.1 las densidades aparentes de los cuerpos moledores recién calculados (tabla 3.6) para obtener la densidad aparente de la combinación.

$$\rho_c = (0,3333 \times 1,679) + (0,3333 \times 1,707) + (0,3333 \times 2,114) = 1,833 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$$

Sustituyendo en la ecuación 2.16, el volumen ocupado por los cuerpos moledores en el molino y la densidad aparente de la combinación de bolas, se calcula la masa de cuerpos moledores a usar al 25% de llenado del molino.

$$G = 1.380,8 \text{ cm}^3 \times 1,833 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} = 2.530,95 \text{ g} \approx 2.531 \text{ g}$$

De la misma forma se calcula la masa de cuerpos moledores para los grados de llenado de 30 y 35%, recordando que la densidad aparente es la misma para una dada combinación de cuerpos moledores, lo que cambia es el volumen ocupado por los cuerpos moledores. En la tabla 3.7 se encuentran los datos de las combinaciones de cuerpos moledores para las corridas a 25, 30 y 35% de grado de llenado.

Tabla 3.7 Masas de cada carga de cuerpos moledores, porcentajes másicos y masa total de las combinaciones usadas para las moliendas con un 25, 30 y 35% de grados de llenado del molino.

Grado de llenado (%)	Diámetros de cuerpos moledores (mm)	Masa de cuerpos moledores en la combinación (g)	Masa total de la combinación (g)	Porcentaje en masa (%)
25	25	848	2.531	33,50
	20	842		33,27
	13	841		33,23
30	25	1.016	3.037	33,45
	20	1.010		33,26
	13	1.011		33,29
35	25	1.194	3.543	33,70
	20	1.179		33,28
	13	1.170		33,02

Se debe tomar en cuenta que los pesos no resultan exactamente el 33,33% de la masa total para cada cuerpo molidor, porque cada cuerpo molidor tiene un peso específico y se trató de que la suma de ellos diera lo más cercano posible a la proporción de masa requerida.

A cada combinación se le calculó una altura de cuerpos moledores en el molino según el grado de llenado, con la grafica A-4 ubicada en anexos. Según esta grafica, a un 25% de grado de llenado:

$$\frac{h}{D_i} = 0,704$$

donde:

D_i es el diámetro interno del molino

h se tiene la altura de espacio vacío del molino.

$$h = 0,704 \times 21,3 \text{ cm} = 14,99 \text{ cm}$$

De manera que la altura de cuerpos moledores dentro del molino sería la diferencia de la altura total del molino, menos la altura del espacio vacío:

$$h_{cm} = 21,3 \text{ cm} - 14,99 \text{ cm} = 6,31 \text{ cm} \approx 6,3 \text{ cm}$$

Se trabaja la altura con un solo decimal para poder compararla con la altura medida en el laboratorio con una regla donde no se aprecian dos o más decimales. Se comparó la altura teórica calculada de cuerpos moledores en el molino y la altura experimental observada en el laboratorio, ubicando estas alturas en la tabla 4.1. Cada grado de llenado presentó distintas velocidades de rotación del molino y distintas potencias. La velocidad de rotación fue medida durante la experimentación en cada corrida, contando las vueltas que daba el molino en un minuto. No fue posible utilizar un medidor de rpm porque el tacómetro disponible en el laboratorio no era el adecuado para medir los rpm del equipo Armfield. La velocidad del molino tomada en el laboratorio durante la experimentación fue comparada con la velocidad crítica de rotación calculada mediante la ecuación 2.13. Esta velocidad crítica es constante pues depende solo del diámetro interno del molino. Sustituyendo el diámetro interno del molino (21,3 cm) en la ecuación 2.13, se tiene que la velocidad crítica es:

$$n_c = \frac{42,3}{\sqrt{0,213 \text{ m}}} = 91,65 \text{ rpm}$$

La potencia se calculó sustituyendo la carga de cuerpos moledores (G) en la ecuación 2.18, para cada grado de llenado usado. Según los datos de la tabla 3.7 se tiene que para la molienda con un grado de llenado a 25%; la potencia consumida es:

$$P = 12,5 \times 0,002531 \text{ ton} = 0,0316 \text{ CV} \times \frac{735,498 \text{ W}}{1 \text{ CV}} = 23,24 \text{ W}$$

Como se puede observar la masa de cuerpos moledores se sustituye en toneladas y el resultado es en caballos de vapor, pero luego se cambia esa unidad a vatios. De la misma manera se repite el cálculo para las moliendas a 30 y 35% de llenado del molino. Estos datos mencionados se encuentran en la tabla 3.8.

Tabla 3.8 Velocidad de rotación y potencia para cada grado de llenado de las moliendas.

Grado de llenado (%)	Velocidad de rotación del molino (rpm)	Potencia calculada (W)
25	46	23,24
30	44	27,92
35	44	32,57

Se comparó la velocidad de rotación de 46 rpm con la velocidad crítica de rotación, resultando en un 50,19% de la velocidad crítica y 44 rpm un 48%. Luego de moler yeso con cada combinación a un distinto grado de llenado por 15 min en el molino, se tamizaron las tres muestras molidas, con las condiciones resultantes del mejor tamizado, que fueron un tiempo de 20 min y una intensidad de vibración de 100%. Los datos de estos tamizados se reflejan en la tabla B-4.

Para verificar cual corrida fue la mejor se trabajó con los análisis de distribución de tamaños de Rosin-Rammler-Bennett-Sperling partiendo de la tabla 3.9 que contiene los pesos retenidos de las muestras molidas de yeso en cada tamiz según el grado de llenado del molino. Se realizó el análisis de distribución de tamaños de Rosin-Rammler-Bennett-Sperling, así como se hizo anteriormente.

Tabla 3.9 Pesos retenidos de las muestras molidas de yeso en cada tamiz según el grado de llenado del molino.

Tamiz (μm)	Grado de llenado		
	25%	30%	35%
	Peso retenido (g)	Peso retenido (g)	Peso retenido (g)
2.000	147	140	103
1.000	29	36	39
710	7	9	28
500	6	7	20
355	7	4	5
250	2	2	2
Bandeja	2	2	3
Total	200	200	200

Los diámetros promedios de partículas, porcentajes retenidos y retenidos acumulados en cada tamiz para cada grado de llenado del molino se reportan en la tabla C-7. Las gráficas para el análisis de Rosin-Rammler-Bennett-Sperling se representan en la figura 3.2.

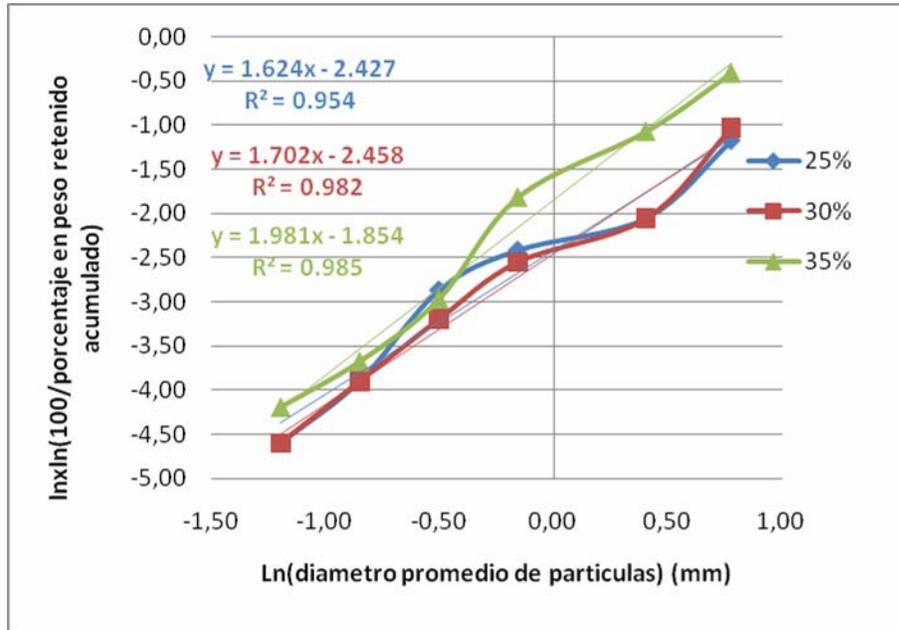


Figura 3.2. Análisis para el tamizado a los diferentes grados de llenado del molino.

También se experimentó con distintos diámetros de cuerpos molidores a diferentes tiempos para establecer comparaciones y concluir cual resultaría en una mejor molienda. Para ello se realizaron primeramente tres moliendas con cuerpos molidores del mismo diámetro, es decir una molienda con solo cuerpos molidores de 25 mm, otra con solo bolas de 20 mm y otra con cuerpos molidores de 13 mm. Cada molienda a los tiempos de 10, 15 y 20 min.

El grado de llenado del molino depende de la masa de cuerpos molidores disponible (tabla 3.10).

Tabla 3.10 Masas disponibles de cada tamaño de cuerpo molidor.

Diámetro de cuerpos molidores (mm)	Masa de cuerpos molidores disponibles (g)
25	2.861
20	1.973
13	1.995

Con estos valores se calculó qué grado de llenado se alcanzaría utilizando todos los cuerpos moledores. Sabiendo que la masa disponible de bolas de 25 mm es de 2.861 g según la tabla 3.10, y conocida la densidad aparente de la carga de cuerpos moledores de 25 mm de la tabla 3.6, de la ecuación 2.16 se despeja el grado de llenado, resultando:

$$2.861 \text{ g} = \left(5.523,086 \text{ cm}^3 \times \frac{\Phi}{100} \right) \times 1,679 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$$

$$\Phi = \frac{2.861 \text{ g}}{1,679 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \times 5.523,086 \text{ cm}^3} \times 100 = 30,85\%$$

El resultado anterior indica que utilizando todos los cuerpos moledores de 25 mm se alcanza a un grado de llenado de 30,85%. El mismo cálculo se hizo para las combinaciones de cuerpos moledores de 20 mm y 13 mm de diámetro, apreciándose los resultados en la tabla 3.11.

Tabla 3.11 Masas de cuerpos moledores disponibles y grado de llenado del molino para cada diámetro de cuerpos moledores.

Diámetro de cuerpos moledores (mm)	Grado de llenado del molino (%)
25	30,85
20	20,92
13	17,09

Las tablas de datos de estas moliendas son las B-6, B-7 y B-8, para las corridas de cuerpos moledores de 25, 20 y 13 mm, respectivamente.

Con estas tablas de datos se realizan los análisis de tamizado, procedimiento que ya fue descrito en párrafos anteriores. Las tablas C-8, C-10 y C-12 son las tablas de pesos retenidos en las moliendas con cuerpos moledores de 25, 20 y 13 mm, respectivamente. Las tablas para el análisis son las C-9, C-11 y C-13, para la molienda con las bolas de 25, 20 y 13 mm, respectivamente.

Las tablas se nombran de forma intercalada porque se colocaron para cada molienda, primero la tabla de peso retenido y seguidamente la tabla de porcentajes retenidos y retenidos acumulados. Las graficas del análisis de Rosin-Rammler-Bennett-Sperling para estas tres moliendas son las 4.2, D-4 y D-5, para las moliendas con cuerpos moledores de 25, 20 y 13 mm, respectivamente.

Concluidas las moliendas con cuerpos moledores de diámetro único, se realizaron experiencias con distintas proporciones de los tres tamaños de los cuerpos moledores, es decir combinaciones mixtas. Se planificó experimentar con las combinaciones indicadas en la tabla 3.12.

Tabla 3.12 Porcentajes máxicos para cada tamaño de cuerpo molidor en cada combinación.

Diámetros de cuerpos moledores (mm)	Combinación I	Combinación II	Combinación III
	Porcentaje máxico (%)	Porcentaje máxico (%)	Porcentaje máxico (%)
25	33,33	40,00	50,00
20	33,33	30,00	30,00
13	33,33	30,00	20,00

Esas combinaciones fueron las planificadas, pero al momento de pesar los cuerpos moledores variaba un poco el porcentaje en peso, ya que no se podían lograr los pesos exactos de cada carga de cuerpos moledores para tener los porcentajes máxicos esperados. Esto se debió a que cada cuerpo molidor cuenta con un peso específico que solo permitía acercarse a los pesos requeridos para cada combinación. Los pesos de los cuerpos moledores para cada combinación se observan en la tabla 3.13.

Tabla 3.13 Pesos y porcentajes máxicos para cada tamaño de cuerpos moledores, masa total en cada combinación de cuerpos moledores para las moliendas de yeso.

Combinación	Diámetros de cuerpos moledores (mm)	Pesos de cuerpos moledores (g)	Masa total (g)	Porcentaje máxico (%)
I	25	1.183	3.509	33,71
	20	1.168		33,28
	13	1.158		33,01
II	25	1.425	3.509	40,61
	20	1.042		29,69
	13	1.042		29,69
III	25	1.761	3.504	50,26
	20	1.048		29,91
	13	695		19,83

Para las corridas con mezclas de cuerpos moledores de distinto diámetro, ya no se presenta la limitante de escases de cuerpos moledores, como se presentó en las moliendas utilizando cuerpos moledores de diámetro único. Se decidió trabajar cada corrida con una masa total de 3.500 gramos aproximadamente, atendiendo la sugerencia del manual del equipo.

El grado de llenado para cada combinación con distintos tamaños de cuerpos moledores se obtuvo calculando primeramente, la densidad aparente sustituyendo en la ecuación 3.1 los porcentajes máxicos mostrados en la tabla 3.13. Las densidades aparentes de cada tamaño de cuerpo molidor están contenidas en la tabla 3.6. Con esto se tienen las densidades de cada combinación y se muestran en la tabla 3.14.

Conocida la densidad aparente de cada combinación de cuerpos moledores, la masa total de cuerpos moledores y el volumen total del molino (5.523,086

cm³) se despeja el grado de llenado del molino de la ecuación 2.16. Por ejemplo el grado de llenado de la combinación I, se calculó tomando los datos de la tabla 3.13 donde la masa total de cuerpos moledores es 3.509 g:

$$\Phi = \frac{3.509 \text{ g}}{1,8319 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \times 5.523,086 \text{ cm}^3} \times 100 = 34,68 \%$$

De la misma forma se calcula los grados de llenado para cada combinación, resultando la tabla 3.14:

Tabla 3.14 Densidades aparentes y grados de llenado para cada combinación de cuerpos moledores.

Combinación	Densidad aparente de la carga de cuerpos moledores (g/cm ³)	Grado de llenado del molino (%)
I	1,8319	34,68
II	1,8163	34,98
III	1,7736	35,77

Conocidas las masas de cuerpos moledores a utilizar en cada combinación, se procedió a moler cada combinación a 10, 15 y 20 min. Los resultados de los tamizados de cada molienda se reflejan en las tablas B-9, B-10 y B-11, para las combinaciones I, II y III, respectivamente.

Para cada molienda de las tres combinaciones se realizaron las tablas de los análisis de tamizado. Las tablas con los resultados necesarios para cada análisis son las tablas desde la C-14 hasta la C-19. Las graficas del análisis de

Rosin-Rammler-Bennett-Sperling son las D-6, D-7 y D-8, para las moliendas de las combinaciones I, II y III respectivamente.

Cabe mencionar que la molienda de la combinación III fue claramente más eficiente que las demás, por lo que se decidió estudiar el efecto de la velocidad del molino en esta molienda.

Para esto se decidió moler yeso con la combinación III a tres velocidades del molino en un tiempo de 15 min. La tabla de estos datos es la B-12, en la cual se reflejan las revoluciones por minuto de cada nivel de velocidad y los datos del tamizado.

El molino del equipo Armfield cuenta con un control de velocidades de rotación del molino de bolas, donde se puede variar en 10 niveles. Se experimentó con los niveles 4, 7 y 10, ya que a una velocidad menor a la del nivel 4 el molino escasamente rotaba.

Las tablas de resultados son la 3.15 y la tabla C-20 donde en esta última se encuentran los porcentajes retenidos y acumulados. La grafica del análisis de Rosin-Rammler-Bennett-Sperling se muestra en la figura D-9.

Tabla 3.15 Pesos retenidos en los tamices para la molienda de yeso a diferentes velocidades del molino.

Tamiz (µm)	Nivel de velocidad del molino		
	4	7	10
	9 rpm	24 rpm	47 rpm
	Pesos retenidos (g)	Pesos retenidos (g)	Pesos retenidos (g)
2.000	149	152	117
1.000	29	26	37
710	11	9	9
500	6	5	20
355	3	4	10
250	1	2	1
Bandeja	1	2	6
Total	200	200	200

De igual manera como se experimentó con el yeso, se trabajó con el *clinker*. Se realizaron las mismas corridas de las seis combinaciones de cuerpos moledores, tres moliendas con iguales tamaños de bolas y tres combinaciones de tamaños variados. Estas corridas para el *clinker* fueron a las mismas condiciones de molienda del yeso para poder establecer comparaciones. Las tablas de datos para el *clinker* van desde la tabla B-13 hasta la tabla B-18, y las tablas de resultados para los análisis de tamizado van desde la C-21 hasta la C-32. Las graficas del análisis de Rosin-Rammler-Bennett-Sperling son las D-10, D-11, D-12, D-13, D-14 y D-15, para las combinaciones de cuerpos moledores de 25 mm, 20 mm, 13 mm, combinación I, combinación II y combinación III, respectivamente.

La última combinación III fue escogida para comparar la molienda de *clinker* y yeso a 30 min y así observar la tendencia; para esta experiencia la tabla de datos es la B-19, la tabla de resultados es la 3.16 y C-33, resultando la gráfica representada en la figura 4.3.

Tabla 3.16 Pesos retenidos en los tamices de las moliendas de yeso y *clinker* a 30 min.

Tamiz (μm)	Pesos retenidos (g)	
	Yeso	<i>Clinker</i>
2.000	77	49
1.000	21	11
710	14	19
500	37	11
355	26	22
250	13	30
Bandeja	12	58
Total	200	200

Se realizó también una corrida para la comparación de la molienda de ladrillo en el molino del Laboratorio de Operaciones Unitarias y el molino del equipo

Armfield. Para poder establecer comparaciones se igualaron las condiciones de molienda en ambos molinos:

- Se molió en 10 min como se hace en las prácticas de este laboratorio.
- Se trabajó en ambos molinos con la combinación III de cuerpos moledores.
- Se trabajó con un grado de llenado de 35,82% que fue lo más cercano que se pudo obtener luego de pesar los cuerpos moledores (35,77%, es el grado de llenado que indica la tabla 3.14 para la combinación III).

Los cuerpos moledores del molino del laboratorio son de acero inoxidable, así que se trató de trabajar con los mismos tamaños de cuerpos moledores que los del molino del equipo Armfield (figura 3.3).



Figura 3.3. Cuerpos moledores de acero y de cerámica.

Los cuerpos moledores de acero disponibles actualmente en el Laboratorio de Operaciones Unitarias abarcan una amplia gama de diámetros, por lo que fueron seleccionadas aquellas bolas con los diámetros más cercanos a los de las de cerámica. Esta selección se muestra en la tabla 3.17, donde se observa que

fueron escogidas bolas de acero en tres distintas categorías. Cada categoría es un conjunto de bolas de aproximadamente el mismo diámetro, que posteriormente fueron promediadas para tener un diámetro único de cuerpos molidores por categoría.

Tabla 3.17 Diámetros y masas de los cuerpos molidores de acero para la molienda de ladrillo.

Diámetros de las bolas de acero (mm)	Diámetro promedio de las bolas de acero (mm)	Masa de bolas de acero (g)
28	27,7	3.522
29		
26		
23	21,7	2.060
20		
22		
17	16,3	1.384
15		
17		

En la tabla 3.18 se indican los porcentajes máxicos de los distintos diámetros de bolas (tanto de cerámica como de acero) usadas a efectos de la comparación entre los dos molinos. Se usó la combinación III de las bolas de cerámica por ser la más eficiente.

Tabla 3.18 Porcentajes máxicos de los cuerpos moledores usados para la comparación de ambos molinos, usando ladrillo como material a moler.

Diámetro promedio de las bolas de acero (mm)	Porcentaje máxico de bolas de acero (%)	Diámetro promedio de las bolas de cerámica (mm)	Porcentaje máxico de bolas de cerámica (%)
27,7	50,56	25	50,26
21,7	29,57	20	29,91
16,3	19,87	13	19,83

Como el molino del laboratorio trabaja a 39 revoluciones por minuto, se trabajó en el molino del equipo Armfield con la velocidad 9, obteniéndose 39 revoluciones por minuto, para igualar aun más las condiciones de experimentación.

En el molino Armfield se molió una muestra de 200 g, pero como el otro molino tiene otras dimensiones se realizaron los siguientes cálculos para moler en los dos molinos con la misma relación entre la masa y el volumen total del molino, entonces:

Se tomaron las dimensiones del molino del Laboratorio de Operaciones Unitarias, resultando una longitud de 14,5 cm y un diámetro de 31 cm, dimensiones aproximadas, ya que el molino no es cilíndrico sino ovalado. Se calculó el volumen total del molino con la ecuación 2.14:

$$V_t = \frac{\pi \times (31 \text{ cm})^2 \times 14,5 \text{ cm}}{4} = 10.944,16 \text{ cm}^3$$

Se calculó la relación entre la masa de muestra a moler (200 g) y el volumen del molino del equipo Armafield (5.523,09 cm³) y se multiplicó por el volumen del molino del Laboratorio de Operaciones Unitarias.

$$M = 10.944,16 \text{ cm}^3 \times \frac{200 \text{ g}}{5.523,09 \text{ cm}^3} = 396,31 \text{ g}$$

donde:

M es la masa a moler en el molino del laboratorio.

Así los dos molinos tendrían la misma relación entre la masa a moler y su tamaño.

Finalmente se molieron 400 g para tamizar 200 g de la muestra molida en dos tandas y luego se calculó el promedio de los dos tamizados para poder compararlo con el tamizado del molino Armfield. Los datos de estas corridas se encuentran en la tabla B-20. Los resultados para el análisis de tamizado se observan en la tabla 3.19 y C-34. La grafica del análisis de Rosin-Rammler-Bennett-Sperling es la 4.4 donde se comparan las moliendas en ambos molinos.

Tabla 3.19 Pesos retenidos en los tamices de las moliendas de ladrillo en los dos molinos.

Tamiz (μm)	Molino del laboratorio	Molino Armfield
	Pesos retenidos promedios (g)	Pesos retenidos (g)
2.000	74	107
1.000	70	13
710	31	60
500	19	7
355	3	2
250	1	8
Bandeja	2	3
Total	200	200

3.3.3 Mezclador

Se trabajó con grava de dos colores diferentes, azul y rosada. Se colocaron 300 g de grava de color azul en el tambor izquierdo del mezclador y 300 g de grava

de color rosada en el tambor derecho (figura 3.4). Se mezcló la grava a cinco velocidades diferentes del mezclador para observar la tendencia para cuatro intervalos de tiempo.



Figura 3.4. Mezclado de grava de colores.

Luego de mezclar, se tomó la masa estacionada en el tambor izquierdo y se pesó la cantidad de grava azul y rosada presente en este tambor. La tabla de datos es la 3.20.

Tabla 3.20 Masa de las gravas mezcladas para cada velocidad y tiempo de mezclado.

Nivel de velocidad	Velocidad de mezclado	Tiempo de mezclado (s)	Masa de grava azul (g)	Masa de grava rosada (g)
--------------------	-----------------------	------------------------	------------------------	--------------------------

	(rpm)			
2	6	30	280	20
		90	253	44
		150	238	56
		210	222	77
4	13	30	270	38
		90	246	59
		150	211	86
		210	183	113
6	27	30	246	59
		90	189	105
		150	162	123
		210	157	134
8	38	30	213	77
		90	161	123
		150	148	137
		210	148	141
10	53	30	211	73
		90	164	116
		150	148	134
		210	145	138

Con los datos de la tabla 3.20 se calculó el porcentaje de la grava azul en cada muestra tomada. Por ejemplo para 6 rpm el porcentaje de grava azul (inicialmente 100% en el tambor izquierdo) pasa a ser el 93,3% al cabo de 30 s.

$$\%Azul = \frac{280 \text{ g}}{280 \text{ g} + 20 \text{ g}} = 0,933$$

Los resultados de las fracciones de grava azul para cada corrida se observan en la tabla C-35. Teniendo en cuenta que la mezcla perfecta sería cuando el porcentaje de la grava azul en cada muestra sea del 50%, se calculó la

desviación para cada muestra tomada. Esta desviación se calculó de la siguiente forma:

$$\%Desviacion = \frac{0,933 - 0,5}{0,5} \times 100 = 86,6$$

El cálculo se repite igual en cada corrida para las partículas azules. Los resultados se observan en la tabla 4.11.

3.3.4 Ciclón y transporte neumático

Se tomó una muestra de *clinker* molido y se transportó a un deposito, verificando la separación por ciclón y el transporte neumático, luego se pesaron las muestras retenidas en el depósito, así se observó el funcionamiento del ciclón y la masa transferida por segundos por medio del transporte neumático. Las masas transferidas y el tiempo de transferencia se muestran en la tabla 3.21.

Tabla 3.21 Masa de *clinker* transferida por el sistema de transporte neumático y tiempo de transferencia.

Masa transferida (g)	Tiempo de transferencia (s)
4 g	192
5 g	214
7 g	217

Con la masa transferida y el tiempo de transferencia se calculó la tasa de flujo de sólidos tomando los datos de la tabla 3.21, de la siguiente manera:

$$Q = \frac{4 \text{ g}}{192 \text{ s}} = 0,0208 \frac{\text{g}}{\text{s}}$$

Así se repite para las otras corridas, resultando la tabla 4.15.

Se utilizó *clinker* porque este material no presenta mucha adherencia. Se realizó también el cálculo del tiempo de residencia de las partículas en el ciclón. Sabiendo que el diámetro de la parte cilíndrica es 2,9 cm, se sustituyó este valor en pulgadas en la ecuación 2.31 obteniéndose:

$$t = \frac{9\pi(1,142 \text{ pulg}/12)}{100} = 0,0269 \text{ min}$$

3.3.5 Ángulo de reposo

Con ayuda de un embudo se colocó urea granulada dentro del cilindro de medición de ángulo de reposo. Se utilizaron 62 g de urea, se llenó el cilindro hasta la línea horizontal marcada, se observó y midió el ángulo de reposo. Este procedimiento se repitió tres veces y presentó el mismo resultado de 33,5° el ángulo de reposo y 42° el ángulo máximo que alcanzó luego de mover el cilindro. Se calculó la constante de la ley de esfuerzos de Mohr, según la ecuación 2.32.

Para el ángulo de reposo tomado durante experimentación, se tiene que:

$$K' = \frac{1 - \text{sen } 33,5}{1 + \text{sen } 33,5} = 0,2887$$

Con este cálculo fue posible concluir si los ángulos obtenidos definían las características de la urea.

No se estudiaron los ángulos de reposo de los materiales yeso y *clinker* por la dificultad que presentan estos materiales al adherirse y compactarse estando en reposo. Por esto se evitó introducir estos materiales en el cilindro de medición de ángulo de reposo, para no dañar el equipo dejando restos de material dentro del cilindro. La grava tampoco se utilizó porque las partículas eran muy grandes en comparación con la entrada de material al cilindro.

3.3.6 Tolva

En la tolva se trabajó con urea granulada (figura 3.5), llenándose la tolva hasta una altura de 185 cm.

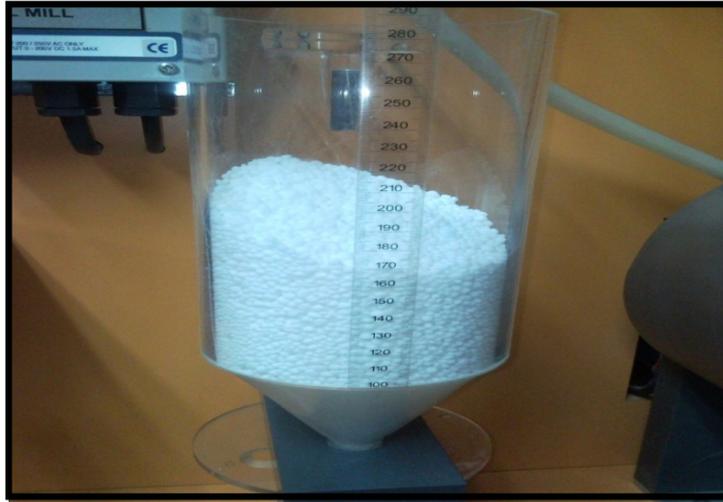


Figura 3.5. Tolva con urea.

El yeso no presentó resultados reproducibles en la tolva porque se adhería a las paredes de la tolva. Con el *clinker* (figura 3.6), se trabajó con los diámetros de orificio de 9 mm, 12 mm y 15 mm. Este *clinker* fue previamente tamizado y se tomó la porción pasante del tamiz de 1.000 μm .

A pesar de que fue difícil trabajar con el *clinker* porque se compactaba rápido, se pudieron obtener dos corridas para cada diámetro de orificio de la salida de la tolva. Los datos para las corridas con *clinker* se presentaron en la tabla 3.22.



Figura 3.6. Tolva con *clinker*.

Tabla 3.22 Diámetro de orificio de la tolva, masa y altura de *clinker* para cada tiempo de descarga.

Diámetro de orificio (mm)	Altura del material en la tolva (cm)	Masa (g)	Tiempo (s)
9	130	401	42
	120	367	33
12	133	423	17
	124	391	14
15	135	441	07
	120	415	06

Con la urea hubo buen flujo de material en el orificio de 15 mm y se presentaron los datos en la tabla B-21. Como la urea solo pudo fluir en el orificio de 15 mm no se puede graficar el flujo másico de descarga en función del diámetro de orificio, lo que se puede observar de la urea es el flujo que presentó y ver las diferencias con respecto al *clinker*. El *clinker* si se pudo graficar porque se obtuvieron los datos de tres diámetros de orificios. La gráfica para el *clinker* de flujo másico en función del diámetro de orificio de la tolva es la 4.6.

Se calculó el flujo másico de descarga de la tolva, de la siguiente manera; para el orificio de 9 mm y una altura de llenado de la tolva de 130 cm, el flujo másico se calcula con los datos de la tabla 3.22.

$$Q_t = \frac{401 \text{ g}}{42 \text{ s}} = 9,548 \frac{\text{g}}{\text{s}}$$

Así se calculó para las otras corridas del *clinker* y también para la urea. Los resultados están reflejados en la tabla 4.13 y 4.14, respectivamente.

3.3.7 Análisis estadístico de resultados

Una vez finalizada la experimentación se procedió a realizar los análisis estadísticos a cada corrida realizada para verificar la significancia de las variables manipuladas en cada experiencia. Se trabajó con análisis de varianza de dos factores, con un 95% de confianza en los resultados, basando el estudio en que la significancia estadística de una variable se confirma si el valor de P (grado de significancia) de dicha variable es menor a 0,05. Estos análisis se realizaron con el programa de estadística práctica Statgraphics Centurion XV y las conclusiones arrojadas por este programa se muestran en los anexos E, en el mismo formato que lo emite el programa.

Debe mencionarse que en el análisis de varianza para las combinaciones de molienda fue necesario utilizar un diámetro promedio de cuerpos molidores calculado según el porcentaje másico de cada tipo de cuerpo molidor en cada combinación, debido a que era la única manera posible para normalizar las combinaciones en una misma escala.

También se realizó el análisis de distribución normal para las pruebas de mezclado de grava, molienda de yeso y de *clinker*. Esto con el fin de comprobar la reproducibilidad de los resultados obtenidos, ya que al demostrarse una distribución normal de dichos resultados y un factor de correlación de ajuste superior al 90%, significaría que existe una alta probabilidad de que dichos resultados sean reproducibles. El análisis de distribución normal se realizó con el programa de estadística práctica Statgraphics Centurion XV. Los resultados de estos análisis se ubican en el anexo E.

3.4 Preparación de la guía-instructivo para cada uno de los procesos de manejo de sólidos estudiados

Se preparó la guía describiendo lo referente a las prácticas de molienda y tamizado, descarga de una tolva, mezclado de sólidos, ciclón con transporte neumático y medición de ángulo de reposo. El objetivo general de cada práctica se enfoca en estudiar el funcionamiento de cada componente del equipo Armfield y los objetivos específicos fueron realizados de manera tal que, los cálculos que se necesiten realizar se hagan en el orden más adecuado, para que así se entienda fácilmente lo que se está estudiando y no haya confusión.

Los materiales y equipos a usar fueron especificados para cada práctica en el instructivo. Además se incorporó una explicación detallada acerca de cómo es el uso correcto de cada componente del equipo Armfield, con el fin de cuidar el equipo para extender su vida útil. Es importante acotar que es un equipo delicado y que el estudiante a experimentar en este equipo debe estar bien informado de cómo opera y de las medidas de seguridad que tienen que seguirse.

Además de esto, el uso correcto del equipo asegura que los datos obtenidos durante la experimentación sean los deseados según las bases teóricas. Para hacer esta guía se estudiaron las mejores condiciones de operación de cada equipo con el fin de ofrecer un procedimiento experimental en cada práctica donde el estudiante no pierda tiempo ni esfuerzo, sino que trabaje a condiciones adecuadas de operación de cada componente del equipo.

Se debe mencionar que se recomendó trabajar con los materiales *clinker* y yeso, los cuales no son fáciles de obtener. Por esto se consiguió la dotación del laboratorio con estos materiales por parte de la empresa Cementos de Venezuela. De esta manera el estudiante podrá tener fácil acceso a estos sólidos para realizar las prácticas. La guía-instructivo está ubicada en el anexo F, tal cual la recibirán los estudiantes.

CAPÍTULO 4

DISCUSIÓN DE RESULTADOS,

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Escogencia de los materiales

El uso de yeso y *clinker* en el molino presentó la ventaja de que se estaban moliendo materiales con los que la industria local suele trabajar, representando esto un gran incentivo para estudiar a fondo su comportamiento.

El yeso molido presentó mucha adherencia a las paredes del molino y a los cuerpos moledores, por lo que ocasionaba pérdidas de muestra molida. Además, las partículas de yeso que quedaban con mayor tamaño luego de moler, tenían una forma muy irregular presentando formas de láminas, como se observa en la figura A-5. Para cada molienda, el mayor peso de partículas de yeso fue retenido en el tamiz de 2 mm porque era muy difícil el paso de estas partículas debido a su tamaño y forma. En los demás tamices se observaba buena cantidad de polvos finos, pero no presentaban mucho peso, es decir, visualmente parecía retener bastante producto fino a pesar de que la balanza no lo respaldaba. Dichos problemas en el manejo de yeso al molerlo son útiles para conocer un poco más acerca de los problemas industriales que se presentan al realizar la molienda de yeso en grandes cantidades.

La molienda con *clinker* fue más fácil que con el yeso, ya que el *clinker* no se adhería ni a las paredes del molino ni a las bolas. La pérdida de muestra era menor a 2 g, y el tamizado también resultó más fácil porque no era difícil retirar el *clinker* de los tamices mientras que con el yeso si lo fue. Sin embargo, con el *clinker* se produjo más cantidad de partículas finas, por lo que para abrir el molino luego de las moliendas de *clinker* se tenía que esperar unos minutos

para que el polvo dentro del molino reposara y no saliera suspendido con el movimiento del aire al ambiente del laboratorio. Se debe mencionar que las moliendas de *clinker* fueron mucho más prácticas y rápidas que las moliendas de yeso.

La molienda de ladrillo mostró comportamiento similar al yeso, debido a que el ladrillo se quedaba en las paredes del molino y las bolas. También resultó difícil impedir la pérdida de muestra puesto que era complicado retirar la muestra pegada a las paredes del molino. El ladrillo tampoco fue una buena opción para la molienda con cuerpos molidores de cerámica ya que retirarlo de las bolas es una tarea de mucha dificultad. Sin embargo, la ventaja al moler ladrillo radicó en la comparación de la operación de molienda entre el molino del laboratorio y el nuevo molino del equipo Armfield, además de que el ladrillo es un material que se consigue fácilmente.

En vista de esto, el *clinker* fue el material seleccionado para realizar las prácticas de molienda que se quieren diseñar en el molino de bolas del equipo Armfield. Fue elegido tanto por su fácil manejo como por su amplio uso en la industria cementera.

La grava fue una excelente elección para el estudio del mezclado en el equipo estudiado, ya que se seleccionó una grava azul y otra rosada para facilitar la visualización del mezclado mientras se realizaba la operación en el mezclador. Además de esto, la grava azul tenía un mayor tamaño de partículas, las cuales eran retenidas en el tamiz de mesh 5 de la serie ASTM, mientras que la grava rosada era pasante de este tamiz. En vista de esto, resultó muy fácil la separación de las gravas de la muestra que se tomó para saber cuánto de la grava de un tambor del mezclador pasó al otro tambor en cada corrida.

El uso de urea en el cilindro de medición de ángulo de reposo resultó un procedimiento sencillo, ya que se introducía y se retiraba fácilmente del cilindro. El ángulo de reposo fue medido sin inconvenientes. El yeso y el *clinker* no fueron usados para medir el ángulo de reposo por su difícil extracción del cilindro, ya que se podía realizar con el sistema de transporte neumático. Sin

embargo, este sistema no es lo suficientemente eficiente como para sacar las partículas que se adhieren a las paredes del cilindro.

La urea y el *clinker* se usaron también para estudiar la descarga de la tolva, resultando de gran utilidad en este componente del equipo de manejo de sólidos. A pesar de que la urea solo pudo descargarse mediante el orificio de 15 mm, sirvió de referencia comparativa con el *clinker* a las mismas condiciones. Cabe destacar que fue difícil que los materiales seleccionados presentaran la cualidad de fluir mediante todos los diámetros de orificio de salida de la tolva de almacenamiento del equipo Armfield, es por ello que para el caso del *clinker* no se obtuvieron datos utilizando el orificio de 6 mm de diámetro, al no existir descarga de material con dicho orificio.

4.2 Correlaciones de manejo de sólidos que mejor se adapten a cada uno de los procesos estudiados en el banco de pruebas

Se seleccionaron las correlaciones para cada componente según su facilidad y practicidad para cada una de las operaciones bajo estudio. En la molienda se calculó la velocidad crítica de rotación del molino, lo que sirvió para verificar si las velocidades adoptadas por el molino estaban en el rango deseado, es decir, ni muy altas ni muy bajas. Esto sirvió para comprobar que la velocidad más alta de este molino era de un 51,28% de la velocidad crítica, por lo que en ninguna de las condiciones experimentadas se alcanzaron las velocidades ideales de operación, las cuales radican entre 73 y 78% de la velocidad crítica. Sin embargo, la falta de velocidad de rotación se pudo contrarrestar en gran medida con las combinaciones de cuerpos molidores utilizadas.

Se calculó la masa de cuerpos molidores, verificándose que la ecuación para el cálculo del grado de llenado del molino según la masa de cuerpos molidores, se adaptaba correctamente a este molino, ya que la altura de bolas que debía tener el molino según lo calculado era aproximadamente igual a lo que resultaba experimentalmente.

Tabla 4.1 Alturas calculadas y observadas de los cuerpos molidores en el molino, para cada grado de llenado del molino.

Grado de llenado (%)	Altura de cuerpos molidores calculada (cm)	Altura de cuerpos molidores observada (cm)
25	6,3	6,1
30	7,3	6,9
35	12,7	12,2

Como se observa en la tabla 4.1 las diferencias entre las alturas de cuerpos molidores calculadas y observadas son de 0,4 mm en promedio, lo que representa una diferencia aceptable. En el caso del tamizado, fue utilizado el análisis de distribución de tamaño de Rosin-Rammler, pues este es el que se ha venido usando en los estudios de molienda del Laboratorio de Operaciones Unitarias. Presentó buenos resultados como se observan en las graficas del anexo D. De manera que se pudo comparar los diámetros promedios de partículas según Sperling y según Bennett, siendo Bennett el que arrojó los resultados que definieron de mejor forma el comportamiento de cada molienda. Esto porque Sperling reflejó que a menores partículas retenidas en la bandeja, menor era el diámetro de promedio de partícula, es decir Sperling arrojaba resultados describiendo un comportamiento contrario al observado y a lo esperado.

Para evaluar el mezclado de gravas se pudo calcular fácilmente el porcentaje de desviación de las muestras tomadas con respecto al porcentaje de 50%, característico de una mezcla perfecta.

En cuanto al ciclón, el cilindro de medición de ángulo de reposo y en la tolva no se utilizó cálculos complejos. Adicionalmente, en el ciclón se pudo observar el recorrido de los materiales en su interior.

4.3 Demostración de la reproducibilidad de los resultados obtenidos en los distintos equipos del banco de pruebas

4.3.1 Pruebas para la obtención del mejor tamizado

Al realizar el análisis de varianza con Statgraphics se obtuvieron los resultados mostrados en la tabla 4.2. Según el ajuste de diámetros de partículas de Sperling, resultando que la intensidad de vibración es la variable con más significancia estadísticamente. Esto porque mientras menor resulte el valor P, mas significativa es esa variable. Igual comportamiento se obtuvo con el análisis de varianza según el ajuste de diámetro de partículas de Bennett, el cual se muestra en la tabla E-1.

Tabla 4.2 Análisis de varianza de las pruebas de tamizado a distintas porcentajes vibración y tiempo según el ajuste de diámetro de partícula de Sperling.

Fuente	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado verdadero	Relación F	Grado de significancia P
Efectos principales					
A:Porcentaje de vibración	0,0537188	3	0,0179063	45,32	0,0000
B:Tiempo	0,00496875	3	0.00165625	4,19	0,0410
Residual	0,00355625	9	0,000395139		
Total (corregido)	0,0622438	15			

Según lo observado es más conveniente aumentar la intensidad de vibración que aumentar el tiempo de tamizado para obtener el mismo efecto.

Graficando los valores de la tabla 3.5 se obtuvieron las curvas mostradas en la figura 4.1.

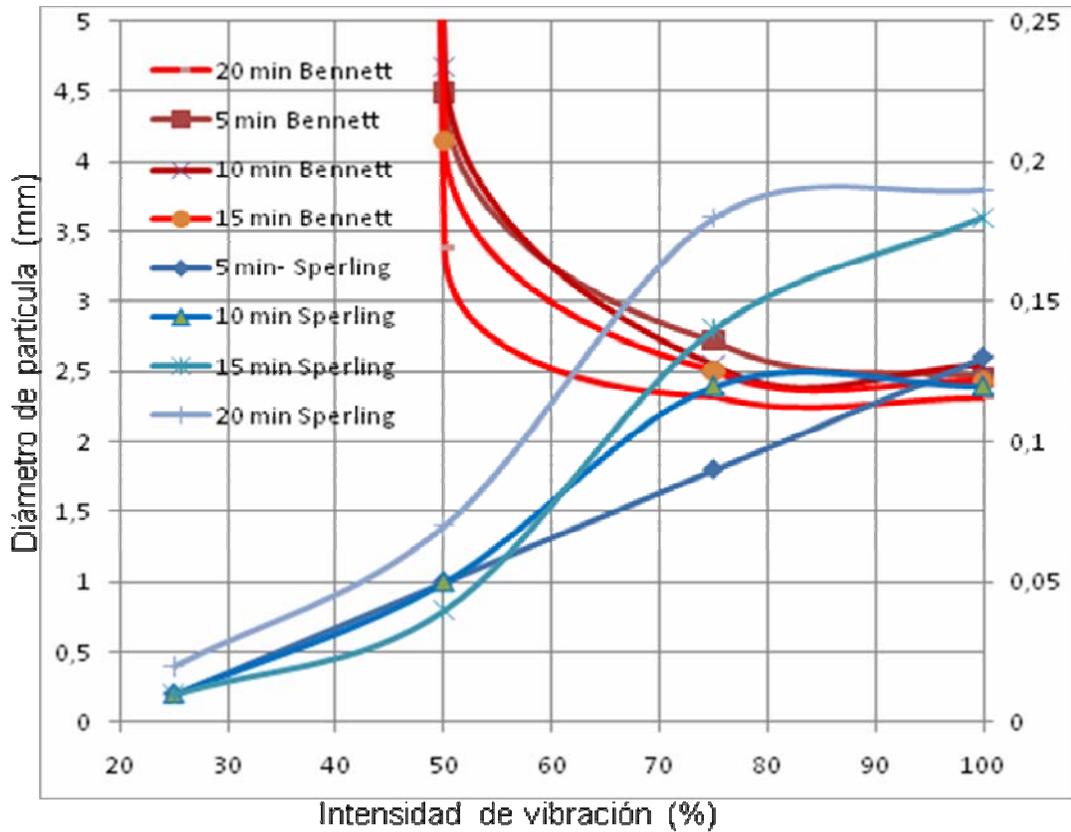


Figura 4.1. Diámetros promedios de partículas en función de la intensidad de vibración para diferentes tiempos de tamizado, calculadas tanto por Sperling como por Bennett.

Lo más resaltante de esta figura es que al intensificar la vibración en el tamizador se reportan menores diámetros promedios calculados en la población de partículas según la ecuación de Bennett, mientras que ocurre todo lo contrario con los diámetros de partículas calculados por Sperling. En otras palabras los diámetros promedios calculados según la ecuación de Sperling tienden a ser mayores a medida que se intensifica la vibración, lo cual es contrario al comportamiento observado experimentalmente, donde se espera que al intensificar la vibración se obtenga progresivamente partículas mas finas en los tamices inferiores de la pila de tamices, con lo cual el diámetro promedio de la población de partículas disminuirá.

Este análisis respalda lo dicho en el punto 4.1, en relación a que la ecuación de Bennett predice diámetros promedios del material molido consistente con lo observado en la realidad.

Comparando los diámetros promedios de partículas de todas las corridas, según Bennett el menor fue a 100% de vibración a los 20 minutos de tamizado.

El análisis anterior demuestra lo que es evidente por el uso del sentido común y que la mayor intensidad de vibración como un mayor tiempo de tamizado resultaron las mejores condiciones a utilizar en los posteriores tamizados.

4.3.2 Molino de bolas

4.3.2.1 Determinación del grado de llenado del molino

En la figura 3.2 fueron graficados el $\ln \ln (100/R)$ versus \ln del diámetro promedio de las partículas retenidas en cada tamiz, con la finalidad de obtener el diámetro promedio del material molido para distintos grados de llenado del molino. Estas corridas fueron realizadas con yeso, con un tiempo de molienda de 15 min. Los puntos graficados se acercan satisfactoriamente a una línea recta como lo muestran sus porcentajes de correlación. Este comportamiento casi lineal asegura en buena medida una credibilidad a los diámetros promedios de partículas obtenidos de dichas rectas.

En la tabla 4.3 se observan los diámetros promedios obtenidos tanto con la correlación de Sperling como la de Bennett. Habiendo previamente establecido que los diámetros promedios obtenidos por Sperling no se ajustan a la realidad, se observa que los diámetros promedios obtenidos por Bennett indican inequívocamente que a mayor grado de llenado de cuerpos moledores, se producen partículas más finas, o dicho de otro modo el molino muele mejor.

Tabla 4.3 Diámetros promedios de partículas según Sperling y Bennet para las moliendas a diferentes grados de llenado del molino.

Grado de llenado (%)	Diámetro promedio (mm)	
	Rosin Rammler y Spering	Rosin Rammler y Bennett
25	0,09	4,46
30	0,09	4,24
35	0,16	2,55

Se utilizaron los grados de llenado de 25, 30 y 35 %, porque a un grado de llenado menor a 25% no es recomendable, ya que los cuerpos moledores deslizarían sin presentar impacto. Además de esto, un grado de llenado superior al 35 % ocasiona que los cuerpos moledores presenten problemas de trayectoria dentro del molino. Por esta razón, se determinó que el 35 % de llenado del molino fue la mejor opción para realizar las siguientes moliendas. Otro factor que confirmó que el 35 % era el mejor grado de llenado a utilizar, fue la masa de cuerpos moledores calculada a dicho grado de llenado, resultando 3.543 g aproximadamente (tabla 3.7), cumpliendo con la recomendación del manual del equipo de emplear aproximadamente 3.500 g de cuerpos moledores.

4.3.2.2 Molienda de yeso

En la molienda de yeso utilizando solamente cuerpos moledores de 25 mm, se observa en la figura 4.2 la tendencia a mejorar el ajuste de la recta a medida que aumenta el tiempo de molienda.

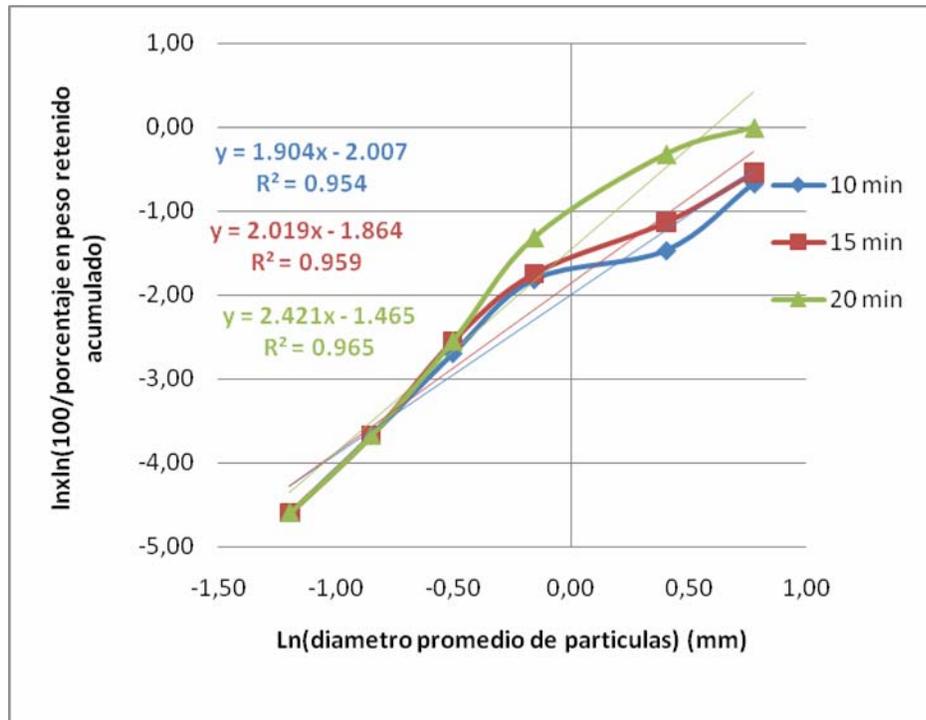


Figura 4.2. Análisis para el tamizado de la molienda de yeso con cuerpos molidores de 25 mm de diámetro.

Este comportamiento se explica porque, a mayor tiempo de molienda, mayor era la cantidad de partículas molidas, debido a la mayor frotación e impacto entre la muestra y los componentes del molino. Esto asegura un menor tamaño de partículas promedio, como se observa en la tabla 4.4 para el análisis según Bennett.

De igual manera se observó dicha tendencia en las demás combinaciones experimentadas, ilustradas en las figuras D-4 a D-8 a excepción de algunas combinaciones donde pudieron haber influido errores en la eficiencia de separación de la muestra en el tamizado. Observando la tabla 4.4, los menores diámetros de partículas fueron los de las corridas con los cuerpos molidores de 20 y 13 mm a 10 min, según Sperling, mientras que según Bennett, el menor diámetro de partícula fue para la combinación de solo cuerpos molidores de 25 mm y la combinación III a los 20 min.

El resultado de Bennett es el que se observó acertado durante la experimentación, y se puede explicar sabiendo que la combinación III es la que presenta mayor masa de cuerpos molidores de 25 mm, que son los que produjeron una mejor molienda.

Tabla 4.4 Diámetros promedios de partículas según Sperling y Bennett para cada combinación de las moliendas de yeso a los diferentes tiempos.

Combinación	Tiempo (min)	Diámetro promedio (mm)	
		Rosin Rammler y Sperling	Rosin Rammler y Bennett
Todas las bolas de 25 mm (2.861 g)	10	0,13	2,84
	15	0,16	2,52
	20	0,23	1,83
Todas las bolas de 20 mm (1.973 g)	10	0,05	6,79
	15	0,08	4,83
	20	0,09	3,32
Todas las bolas de 13 mm (1.995 g)	10	0,05	5,77
	15	0,06	5,70
	20	0,06	7,50
I (3.509 g)	10	0,07	4,28
	15	0,11	2,71
	20	0,16	2,55
II (3.509 g)	10	0,12	2,94
	15	0,13	3,25
	20	0,16	2,78
III (3.504 g)	10	0,11	4,26
	15	0,17	3,24
	20	0,32	2,22

4.3.2.3 Comprobación de la influencia de la velocidad del molino

Como se observa en la tabla 4.5 a mayor velocidad de giro menor el diámetro promedio de partículas. Según Sperling se presenta un comportamiento inverso.

Tabla 4.5 Diámetros promedios de partículas según Sperling y Bennet para las moliendas a diferentes velocidades del molino.

Velocidad del molino	rpm	Diámetro promedio (mm)	
		Rosin Rammler y Sperling	Rosin Rammler y Bennett
4	9	0,06	3,97
7	24	0,08	5,10
10	47	0,17	3,24

Como ya se ha visto en otras moliendas, la ecuación de Bennett es la que mejor se ajusta a lo observado experimentalmente. En la figura D-9 se muestran las rectas obtenidas para estas corridas.

La velocidad de giro más alta del molino es de 47 rpm y es apenas el 51,28% de la velocidad crítica, mientras que debería estar en el rango entre 73 y 78 % de la velocidad crítica.

4.3.2.4 Molienda de *clinker*

La molienda de *clinker* resultó tener un comportamiento diferente al yeso, como se observa en la tabla 4.6, ya que este material origina menores diámetros promedios de partículas (en comparación al yeso) según Bennett, así como se verificó experimentalmente. Se debe mencionar que para el *clinker* las corridas que originaron los menores diámetros de partículas, según Bennett, fueron para la combinación de solo bolas de 25 mm y para las de las combinaciones II y III a los 20 min.

Tabla 4.6 Diámetros promedios de partículas según Sperling y Bennett para cada combinación de las moliendas de *clinker* a los diferentes tiempos.

Combinación	Tiempo (min)	Diámetro promedio (mm)	
		Rosin Rammler y Spering	Rosin Rammler y Bennett
Todas las bolas de 25 mm (2.861 g)	10	0,94	1,09
	15	1,20	0,59
	20	1,29	0,48
Todas las bolas de 20 mm (1.973 g)	10	0,25	4,11
	15	0,40	2,04
	20	0,63	2,39
Todas las bolas de 13 mm (1.995 g)	10	0,22	3,28
	15	0,26	3,10
	20	0,34	2,55
I (3.509 g)	10	0,33	2,54
	15	0,53	2,11
	20	0,74	1,87
II (3.509 g)	10	0,18	7,59
	15	0,34	2,73
	20	1,06	0,86
III (3.504 g)	10	0,63	6,43
	15	0,67	2,96
	20	0,88	1,23

En la tabla 4.6 se observa que la mejor molienda fue la de la combinación de solo cuerpos moledores de 25 mm pero en las grafica (figura D-10) estas corridas presentan los menores ajustes de las rectas. El menor diámetro promedio de partícula en las moliendas con tamaños variados de cuerpos moledores resultó de 0,86 mm para la combinación II.

El análisis estadístico para la molienda de yeso según Bennett (tabla 4.7) indicó que las combinaciones de cuerpos moledores tienen más significancia

estadística que el tiempo de molienda ya que el valor del grado de significancia P fue menor para el efecto de las combinaciones.

Tabla 4.7 Análisis de varianza de la molienda de yeso a distintas combinaciones de cuerpos moledores y tiempo según el ajuste de diámetro de partícula de Bennett.

Fuente	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado verdadero	Relación F	Grado de significancia P
Efectos principales					
A: Combinación	33,2011	5	6,64022	7,56	0,0035
B:Tiempo	3,90343	2	1,95172	2,22	0,1591
Residual	8,7857	10	0,87857		
Total (corregido)	45,8903	17			

Por otro lado el análisis estadístico para la molienda de *clinker* según Bennett (tabla 4.8) indicó que el tiempo de molienda es de mas significancia que el efecto de las combinaciones de dos cuerpos moledores, porque el grado de significancia P fue menor para el tiempo.

Tabla 4.8 Análisis de varianza de la molienda de *clinker* a distintas combinaciones de cuerpos moledores y tiempo según el ajuste de diámetro de partícula de Bennett.

Fuente	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado verdadero	Relación F	Grado de significancia P
Efectos principales					
A:Combinación	18,143	5	3,62859	1,87	0,1869
B:Tiempo	21,941	2	10,9705	5,65	0,0228
Residual	19,4065	10	1,94065		
Total (corregido)	59,4904	17			

Este análisis estadístico para los dos materiales sugiere que para mejorar la operación de molienda se requiere una buena selección de los cuerpos moledores para el yeso, mientras que se debe aumentar el tiempo de molienda para el clinker.

4.3.2.5 Molienda de yeso y *clinker* a 30 min

Comparando el resultado de la molienda para yeso y *clinker* para iguales condiciones de operación del molino de bolas (tiempos de 30 min, 47 revoluciones por minuto de rotación del molino y combinación III de cuerpos moledores), se observa que los menores diámetros de partículas los presenta el *clinker* (tabla 4.9) según Bennett.

Tabla 4.9 Diámetros promedios de partículas según Sperling y Bennett para las moliendas de yeso y *clinker* de 30 min.

Material	Diámetro promedio (mm)	
	Rosin Rammler y Sperling	Rosin Rammler y Bennett
Yeso	0,44	1,83
<i>Clinker</i>	0,94	1,10

También la mejor correlación para las rectas fue para el *clinker* (figura 4.3). Nótese en la tabla 4.9 que el yeso presentó menor tamaño promedio de partícula según Sperling, pero nuevamente se descarta este comportamiento y se le da credibilidad a la correlación de Bennett por todas las evidencias demostradas en los experimentos previos. Lo observado en el laboratorio también fue que para el *clinker* las partículas eran más finas y había una mejor distribución en los tamices.

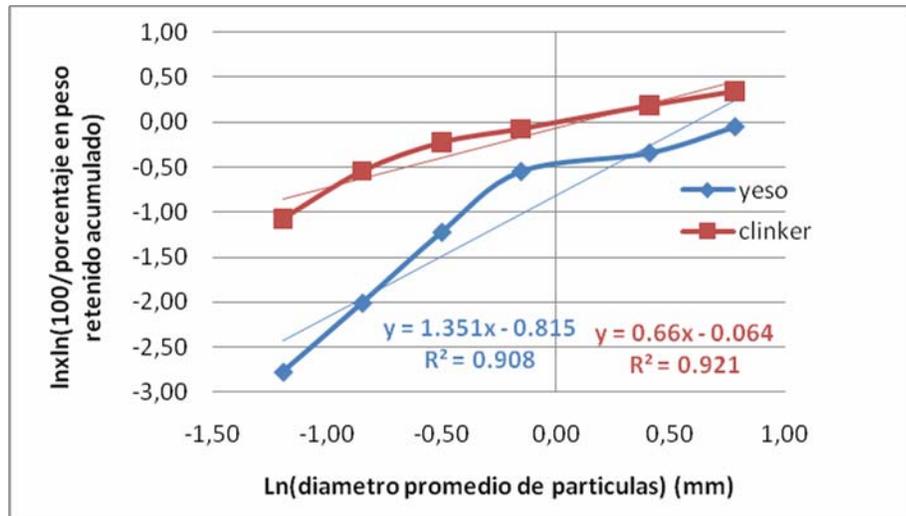


Figura 4.3. Análisis para el tamizado de las moliendas de yeso y *clinker* a 30 min.

4.3.2.6 Molienda de ladrillo

Esta corrida se hizo para comparar la molienda entre el equipo de molienda actual del Laboratorio de Operaciones Unitarias que usa cuerpos moledores de acero, frente al equipo nuevo que trabajará con bolas de cerámica. El análisis del diámetro promedio de partícula del material molido para ambas experiencias, evidenció que tanto la ecuación de Sperling como la de Bennett predicen una tendencia que soporta que el molino Armfield presentó los menores tamaños promedios de partículas (tabla 4.10).

Tabla 4.10 Diámetros promedios de partículas según Sperling y Bennett para las moliendas en los dos molinos de bolas.

Equipo	Diámetro promedio (mm)	
	Rosin Rammler y Sperling	Rosin Rammler y Bennett
Molino del Laboratorio	0,18	2,55
Molino Armfield	0,16	2,25

En la figura 4.4 se observa que las rectas de las moliendas en ambos molinos son muy parecidas, aunque el mejor ajuste de la recta sea para el molino del laboratorio, los menores diámetros resultaron para el molino Armfield.

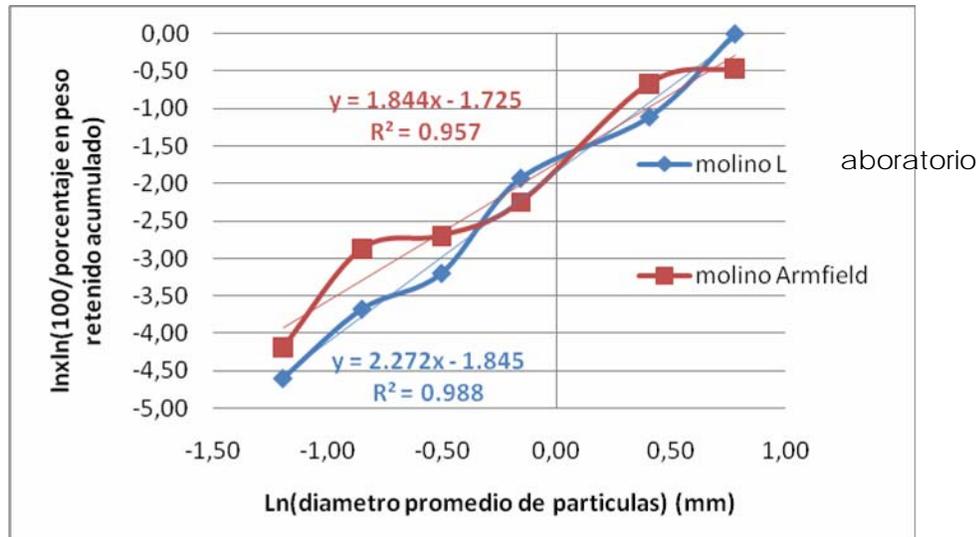


Figura 4.4. Análisis para el tamizado de las moliendas de ladrillo con los dos molinos.

La reproducibilidad de los resultados obtenidos para la molienda, se reflejó en la tendencia resultante en cada una de las experiencias. Dichas tendencias estuvieron mejor apoyadas por la ecuación de diámetro promedio de partículas de Bennett. Es de considerar que las condiciones establecidas para cada corrida son difíciles de repetir de manera exacta, ya que nunca se tuvo una muestra a moler con la misma granulometría que otra, como tampoco se pudo asegurar que durante la extracción de la muestra molida del molino se pierda la misma cantidad de finos que quedan adheridas en las paredes del molino o en las bolas. Debido a esto, se certificó la reproducibilidad de los resultados guiándose por el modelo estadístico de análisis de varianza, donde las variables en cada molienda fueron la combinación de cuerpos molidores y el tiempo.

En la matriz del diseño del experimento se tuvieron seis combinaciones estudiadas a tres tiempos cada una, para obtener las tendencias de operación del molino, obteniéndose los resultados esperados para cada una de las condiciones estudiadas y así demostrando la reproducibilidad del componente de molienda en el banco de estudio. Esta reproducibilidad se pudo comprobar también con el estudio estadístico de distribución normal, donde todas las poblaciones de datos correspondieron a distribuciones normales o Gaussianas, a pesar de parecer a una distribución bimodal, el programa Statgraphics respaldó la hipótesis de que la población de datos representó una distribución normal con un 95% de confianza; por lo que se ratifican las gráficas correspondientes (anexos E) en formas de curvas acampanadas y los valores estadísticos P que resultaron ser mayores que los mínimos para no ser aceptados como pertenecientes a sus poblaciones normales.

Por ejemplo para las moliendas de yeso según Bennett el análisis estadístico arrojó la figura 4.5.

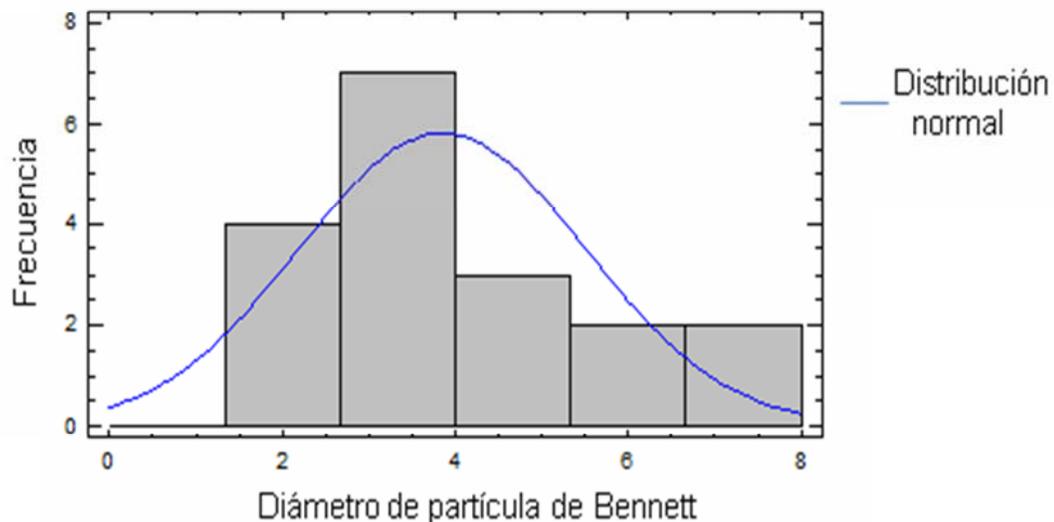


Figura 4.5. Histograma para el diámetro de partícula de Bennett de las moliendas de yeso.

El hecho de que estos valores resultantes de las variables dependientes constituyan distribuciones normales de población (sin sesgos importantes), es un buen indicio que apunta a que en estos equipos del banco de pruebas, no hubo ningún evento asociado al malfuncionamiento o desperfecto de los equipos, o a su manejo al momento de tomar los datos, que arrojara desviaciones respecto a la distribución normal de los resultados en cada caso examinado. Además para las pruebas sin repeticiones se obtuvieron factores de correlación del ajuste de la recta superior al 90%. Esto es un buen argumento para concluir que se lograron las bases para afirmar que se obtuvo la reproducibilidad esperada.

4.3.2.7 Mezclado

El mezclador de tambores gemelos presentó un comportamiento muy eficiente, ya que a los pocos segundos ya se observaba la mezcla, aunque para algunas condiciones de mezclado fue mejor el resultado que para otras. En la tabla 4.11 se observa la desviación de las mezclas con respecto a una mezcla perfecta de 50% de partículas de grava azul, es decir a menor desviación mejor fue el mezclado. Los mejores mezclados fueron en la velocidad 8 y 10 del mezclador a los 210 s con una desviación de 2,4%.

Tabla 4.11 Desviación de las muestras tomadas con respecto a una mezcla perfecta.

Posición del dial	Velocidad de mezclado (rpm)	Tiempo de mezclado (s)	Desviación (%)
2	6	30	86,6
		90	70,4
		150	61,8
		210	48,4
4	13	30	75,4
		90	61,4
		150	42,0
		210	23,6
6	27	30	61,4
		90	28,6
		150	13,6
		210	8,0
8	38	30	46,8
		90	13,4
		150	3,8
		210	2,4
10	53	30	48,6
		90	17,2
		150	5,0
		210	2,4

Estos fueron los mejores mezclados aunque a la velocidad de 27 rpm y tiempo de 210 s también hubo buen mezclado, así como a las velocidades 38 y 53 rpm al tiempo de 150 s. Debido a que a la velocidad 38 y 53 rpm a los 210 s se

obtuvo el mismo porcentaje de desviación, la mejor condición de operación del mezclado sería a la velocidad 38 rpm para evitar el gasto de más potencia del equipo. El análisis estadístico mostró (tabla 4.12), que tanto el tiempo como la velocidad de mezclado tienen significancia estadística en la experiencia, por lo que ambas variables deben considerarse al momento de perseguir cierta calidad de mezcla.

Tabla 4.12 Análisis de varianza de las mezclas de gravas azul y rosada a distintas velocidades del mezclador y tiempos de mezclado.

Fuente	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado verdadero	Relación F	Grado de significancia P
Efectos principales					
A:Velocidad	7.668,21	4	1.917,05	58,32	0.0000
B:Tiempo	6.268,75	3	2.089,58	63,57	0.0000
Residual	394,448	12	32,8707		
Total (corregido)	14.331,4	19			

Cabe destacar que otro factor que no permitió aproximarse aun más a la mezcla perfecta es que los tamaños de partícula de la grava azul y grava rosada eran apreciablemente diferentes, por lo que debe considerarse que el proceso de mezclado se puede mejorar al existir similitud en los tamaños de partículas de los sólidos que se mezclan.

La reproducibilidad de los resultados es evidente al observar que la tendencia de la desviación de las mezclas es que a mayor tiempo y mayores revoluciones por minuto la desviación disminuye, lo que quiere decir que el equipo de mezclado presenta resultados reproducibles y concordantes con lo esperado.

4.3.2.8 Descarga de la tolva

A pesar de que el manejo con *clinker* fue difícil para que fluyera por el orificio de descarga, ya que se compactaba, se pudieron realizar dos corridas para cada uno de los tres orificios. Cada corrida mostró la misma tendencia como se ve en la figura 4.6 de que al aumentar el orificio de salida de la tolva, aumenta el flujo másico.

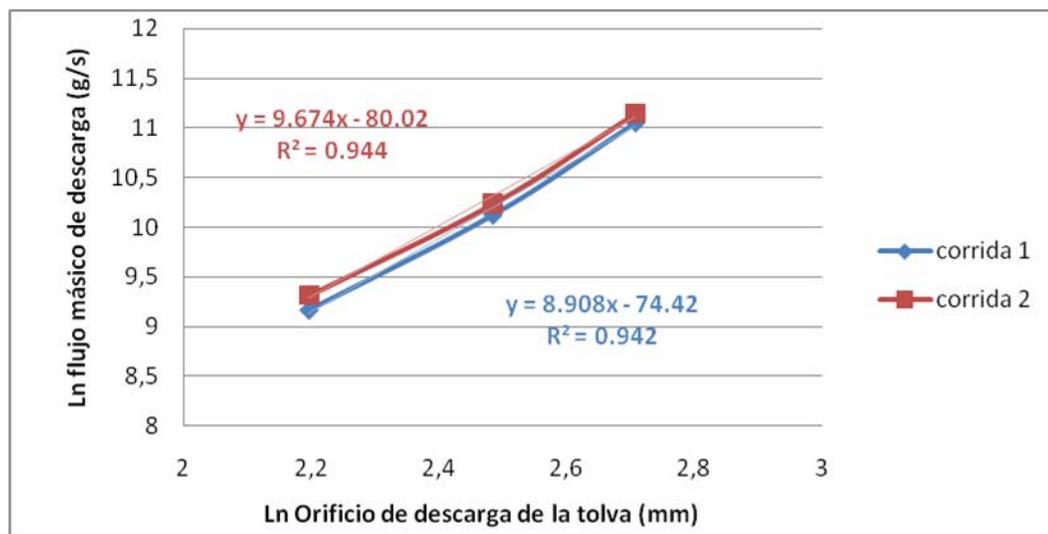


Figura 4.6. Flujo másico de descarga de *clinker* en la tolva en función del diámetro de orificio de salida.

Con las tablas 4.13 y 4.14 se pueden comparar el comportamiento entre el *clinker* y la urea para el diámetro de orificio de la tolva de 15 mm. El *clinker* tuvo un flujo másico mucho mayor que la urea (diámetro promedio de 2 a 5 mm), esto porque las partículas de *clinker* eran mucho más pequeñas (pasantes del tamiz de 1.000 μm) y al ser más pequeñas tienen un comportamiento más fluido.

Tabla 4.13 Diámetros de orificio de descarga de la tolva y flujos máxicos de descarga de *clinker*.

Diámetro de orificio (mm)	Flujo máxico (g/s)
9	9,548
	11,121
12	24,882
	27,929
15	63,000
	69,167

Tabla 4.14 Altura de urea y flujos máxicos de descarga en la tolva usando un orificio de 15 mm.

Altura (cm)	Flujos máxicos (g/s)
185	22,6
175	23,3
165	21,3
155	20,1
145	22,5
135	19,8
125	25,2
115	20,6
Promedio	21,9

4.3.2.9 Ciclón y transporte neumático

Como se observa en la tabla 4.15 el flujo máxico del sistema de transporte neumático fue muy bajo; a pesar de que se usó una muestra de *clinker* con partículas muy finas, estas partículas se transportaron muy lentamente. Lo que si representó una ventaja fue que se pudo observar el movimiento de las

partículas dentro del ciclón, lo cual permite estudiar el funcionamiento de los ciclones.

Tabla 4.15 Flujo de *clinker* para las tres corridas con el transporte neumático.

Corrida	Flujo de <i>clinker</i> (g/s)
1	0,0208
2	0,0234
3	0,0323

4.3.2.10 Ángulo de reposo

El ángulo de reposo medido para la urea fue de $33,5^\circ$ (figura 4.7), que según la constante de la ley de Mohr resultó en un K' de 0,2887, característico de los materiales cohesivos. La urea efectivamente es altamente higroscópica lo que la hace cohesiva.



Figura 4.7. Cilindro de medición de ángulo de reposo con urea.

4.4 Guía-instructivo para cada uno de los procesos de manejo de sólidos estudiados

Se elaboró una guía con procedimientos experimentales bien detallados como se ve en anexos F, donde se explica bien como operar cada componente del equipo Armfield. También se expone la selección de los materiales que presentaron mejor comportamiento durante la experimentación. Se pudo observar que las prácticas más completas y de mayores factores a estudiar de esta guía son la práctica de molienda y la de mezclado, ya que los componentes con mejor desempeño del equipo Armfield son el molino de bolas, el tamizador y el mezclador. Los otros componentes del equipo Armfield no son de mucha complejidad y tienen varias limitaciones, como por ejemplo el ciclón de tamaño muy pequeño con una entrada muy reducida, unido a un transporte neumático con poca capacidad para mover las partículas. Es decir, transporta las partículas en tiempos muy largos y el cilindro medidor del ángulo de reposo tiene una entrada del material muy pequeña lo que limita las posibilidades de usar diversos materiales por ser difícil su extracción del cilindro.

A pesar de estas limitaciones se logró hacer las prácticas para cada componente del equipo Armfield, resultando cinco prácticas de: molienda y tamizado de sólidos, descarga de una tolva de almacenamiento, mezclado de sólidos, ciclón y transporte neumático y medición de ángulo de reposo.

4.5 CONCLUSIONES

- 1- Los materiales escogidos para ser usados en las prácticas de manejo de sólidos fueron yeso y *clinker* para molienda y tamizado, urea y *clinker* para la demostración de vaciado de una tolva, grava para el mezclador y urea para estudiar el ángulo de reposo.
- 2- El modelo de distribución granulométrica que mejor se adaptó a la predicción del diámetro de partículas fue el de Rosin-Rammler-Bennett.
- 3- Se corroboró que el flujo másico de vaciado (Q) de un material granular en una tolva de almacenamiento a través de un orificio de diámetro d situado en la parte inferior de la tolva, obedece cercanamente a una relación del tipo $Q=Kd^n$, donde K y n son constantes.
- 4- El equipo de mezclado de sólidos alcanzó un mezclado casi ideal de grava (de aproximadamente 4 mm de diámetro) a una velocidad de 38 rpm y a un tiempo de 210 segundos.
- 5- El molino de bolas opera mejor con combinaciones de tamaños de cuerpos moledores que presenten proporción predominante de cuerpos moledores grandes, a 35% de grado de llenado, y a una velocidad 47 rpm con 20 minutos de molienda.
- 6- El tamaño de cuerpos moledores de 25 mm del molino de bolas Armfield muele mejor el yeso y el *clinker* que los tamaños de 20 mm y 13 mm.
- 7- El mejor tamizado se obtiene con a 100% de potencia de vibración y un tiempo de 20 minutos.
- 8- El flujo másico del sólido en la tolva cilíndrica aumenta en función del diámetro de orificio.
- 9- El mezclador de volteo de tambores gemelos opera mejor a la velocidad 38 rpm y a un tiempo de 210 s.

- 10-** La medición del ángulo de reposo de la urea y el posterior cálculo de K' basada en la ley de Mohr, confirma que la urea es un material cohesivo.
- 11-** Los equipos involucrados en el transporte neumático (compresor, eyector y ciclón) demostraron poco poder de aspiración, logrando solamente transportar partículas muy finas, tales como la fracción obtenida en la bandeja después de tamizar muestras de *clinker*.
- 12-** El material de experimentación diseñado consta de cinco prácticas que involucran a cada componente del equipo Armfield.

4.6 RECOMENDACIONES

- 1-** No tamizar más de 200 g en el tamizador del equipo Armfield.
- 2-** No moler con una masa de cuerpos moledores mayor a 3.500 g.
- 3-** Evitar perder algunos de los cuerpos moledores del molino de bolas del equipo Armfield, ya que son difícilmente reemplazables.
- 4-** No dejar encendido mucho tiempo el mezclador para evitar que se sobrecaliente su motor.
- 5-** Se debe usar un embudo para introducir muestras en el cilindro medidor del ángulo de reposo.
- 6-** No utilizar el transporte neumático sin tapa bocas, porque se libera mucho polvo.
- 7-** Siempre que se deje de usar el equipo Armfield, dejar presionado el botón de parada de emergencia.
- 8-** Determinar la potencia real consumida por el motor del molino de bolas.
- 9-** Evaluar el desgaste de los cuerpos moledores al cabo de cierto tiempo en función de las moliendas realizadas.

BIBLIOGRAFIA

ALLEN T.; **“Particule size reduction and applications”** Chapman and Hall, fifth edition, USA. **(1997)**.

ARMPFIELD COMPANY; **“Engineering teaching & research equipment”**. Solids handling study bench, registered firm RM TRADA, England, **(2005)**.

CONTRERAS A.; **“Evaluación del sistema de molienda de clinker en una empresa cementera”** Trabajo de grado Dpto. de Ingeniería Química, UDO-Anzoátegui, Puerto la Cruz. **(2001)**.

CHOPEY N.; **“Handbook of chemical engineering calculations”** McGraw Hill, Third edition, **(2004)**.

COUPER J., PENNEY W., FAIR J., WALAS S.; **“Chemical process equipment”**. Elsevier, Second Edition, USA, **(2005)**.

GEANKOPOLIS C.; **“Procesos de transporte y operaciones unitarias”**. Compañía editorial continental, Tercera edición, México, **(1998)**.

MCCABE W., SMITH J., HARRIOT P.; **“Operaciones básicas de ingeniería química”**. Mc Graw Hill, Cuarta Edición, España, **(1991)**.

MILLS D.; **“Pneumatic Conveying”**. Elsevier, Second Edition, USA, **(2004)**.

ORTIZ A.; **“Implementación de un programa de evaluación al sistema de molienda de cemento en la planta Pertigalete II”** Trabajo de grado Dpto. de Ingeniería Química, UDO-Anzoátegui, Puerto la Cruz. **(1990)**.

PÉREZ C.; **“Estadística práctica con Statgraphics”**, Prentice Hall, España, **(2001)**.

PERRY R., GREEN D.; **“Manual del Ingeniero Químico”**. Séptima Edición, Mc Graw Hill, España, **(2001)**.

PINTO O.; **“Evaluación del proceso de clasificación de alúmina hidratada utilizando hidrociclones, en CVG Bauxilum”** Trabajo de grado Dpto. de Ingeniería Química, UDO-Anzoátegui, Puerto la Cruz. **(1998)**.

SANCHEZ J.; **“Evaluación de una unidad complementaria de clasificación de partículas en la planta de molienda de minerales no metálicos”** Trabajo de grado Dpto. de Ingeniería Química, UDO-Anzoátegui, Puerto la Cruz. **(2007)**.

SILVA H.; **“Operaciones de separación Gas-Sólido”** Material de apoyo. Dpto. de Ingeniería Química, UDO-Anzoátegui, Puerto la Cruz. **(2009)**.

SILVA H.; **“Tecnología del cemento”** Dpto. de Ingeniería Química, UDO-Anzoátegui, Puerto la Cruz. **(2002)**.

Anexo A

FIGURAS



Figura A.1 Yeso mineral.



Figura A.2 *Clinker.*



Figura A.3. Urea granulada.

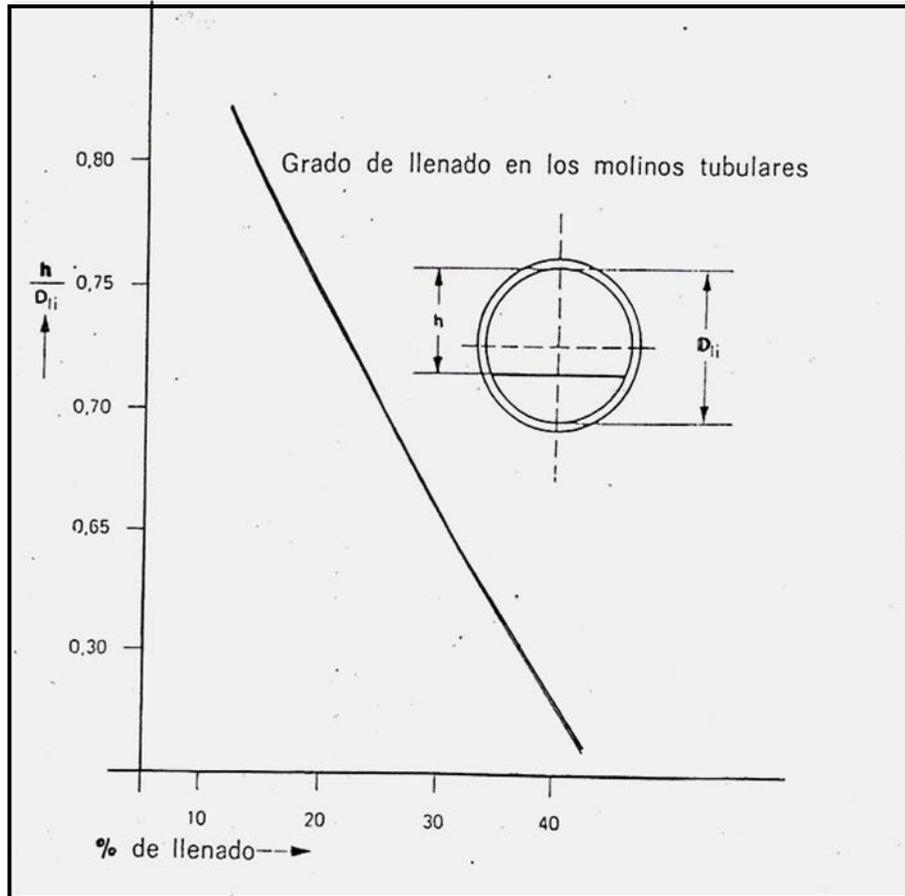


Figura A.4. Gráfica del grado de llenado.



Figura A.5. Tamizado de yeso.

Anexo B

TABLAS DE DATOS

Tabla B.1 Pesos de tamices llenos en el tamizado para cada intensidad de vibración en un tiempo de 10 min de tamizado.

Tamiz (μm)	Intensidad de vibración (%)			
	25	50	75	100
	Peso del tamiz lleno (g)	Peso del tamiz lleno (g)	Peso del tamiz lleno (g)	Peso del tamiz lleno (g)
2.000	340	281	246	248
1.000	137	188	195	192
710	136	140	155	154
500	125	127	134	135
355	124	125	129	129
250	117	117	119	120
Bandeja	89	90	90	90

Tabla B.2 Pesos de tamices llenos en el tamizado para cada intensidad de vibración en un tiempo de 15 min de tamizado.

Tamiz (μm)	Intensidad de vibración (%)			
	25	50	75	100
	Peso del tamiz lleno (g)	Peso del tamiz lleno (g)	Peso del tamiz lleno (g)	Peso del tamiz lleno (g)
2.000	340	266	247	245
1.000	138	200	184	176
710	135	131	159	160
500	125	131	138	141
355	124	126	132	135
250	117	117	117	119
Bandeja	89	89	91	92

Tabla B.3 Pesos de tamices llenos en el tamizado para cada intensidad de vibración en un tiempo de 20 min de tamizado.

Tamiz (μm)	Intensidad de vibración (%)			
	25	50	75	100
	Peso del tamiz lleno (g)	Peso del tamiz lleno (g)	Peso del tamiz lleno (g)	Peso del tamiz lleno (g)
2.000	339	260	244	243
1.000	138	201	166	168
710	135	145	172	168
500	125	130	145	147
355	124	125	131	131
250	117	117	118	119
Bandeja	90	90	92	92

Tabla B.4 Pesos de los tamices llenos en las corridas de molienda según el grado de llenado del molino.

Tamiz (μm)	Grado de llenado		
	25%	30%	35%
	Peso del tamiz lleno (g)	Peso del tamiz lleno (g)	Peso del tamiz lleno (g)
2.000	293	286	249
1.000	163	170	173
710	142	144	163
500	131	132	145
355	130	127	128
250	118	118	118
Bandeja	91	91	92

Tabla B.5 Comparación de distintas series de tamices. (Couper, Penney, Fair y Walas, 2005).

U.S.A. (1)		TYLER (2)	CANADIAN (3)		BRITISH (4)		FRENCH (5)		GERMAN (6)
Standard	Alternate	Mesh Designation	Standard	Alternate	Nominal Aperture	Nominal Mesh No.	Opg. M.M.	No.	Opg.
125 mm	5"		125 mm	5"					
106 mm	4.24"		106 mm	4.24"					
100 mm	4"		100 mm	4"					
90 mm	3 1/2"		90 mm	3 1/2"					
75 mm	3"		75 mm	3"					
63 mm	2 1/2"		63 mm	2 1/2"					
53 mm	2.12"		53 mm	2.12"					
50 mm	2"		50 mm	2"					
45 mm	1 2/4"		45 mm	1 2/4"					
37.5 mm	1 1/2"		37.5 mm	1 1/2"					
31.5 mm	1 1/4"		31.5 mm	1 1/4"					
26.5 mm	1.06"	1.05"	26.5 mm	1.06"					25.0 mm
25.0 mm	1"		25.0 mm	1"					
22.4 mm	7/8"	.883"	22.4 mm	7/8"					20.0 mm
19.0 mm	2/4"	.742"	19.0 mm	2/4"					
16.0 mm	5/8"	.624"	16.0 mm	5/8"					18.0 mm
13.2 mm	.530"	.525"	13.2 mm	.530"					16.0 mm
12.5 mm	1/2"		12.5 mm	1/2"					12.5 mm
11.2 mm	7/16"	.441"	11.2 mm	7/16"					10.0 mm
9.5 mm	2/8"	.371"	9.5 mm	2/8"					
8.0 mm	3/16"	2 1/2	8.0 mm	3/16"					8.0 mm
6.7 mm	.265"	3	6.7 mm	.265"					
6.3 mm	1/4"		6.3 mm	1/4"					6.3 mm
5.6 mm	No. 3 1/2	3 1/2	5.6 mm	No. 3 1/2					
4.75 mm	4	4	4.75 mm	4			5.000	38	5.0 mm
4.00 mm	5	5	4.00 mm	5			4.000	37	4.0 mm
3.35 mm	6	6	3.35 mm	6	3.35 mm	5			
2.80 mm	7	7	2.80 mm	7	2.80 mm	6	3.150	36	3.15 mm
2.36 mm	8	8	2.36 mm	8	2.40 mm	7	2.500	35	2.5 mm
2.00 mm	10	9	2.00 mm	10	2.00 mm	8	2.000	34	2.0 mm
1.70 mm	12	10	1.70 mm	12	1.68 mm	10	1.600	33	1.6 mm
1.40 mm	14	12	1.40 mm	14	1.40 mm	12	1.250	32	1.25 mm
1.18 mm	16	14	1.18 mm	16	1.20 mm	14	1.000	31	1.0 mm
1.00 mm	18	16	1.00 mm	18	1.00 mm	16			
850 μm	20	20	850 μm	20	850 μm	18			
710 μm	25	24	710 μm	25	710 μm	22	.800	30	800 μm
600 μm	30	28	600 μm	30	600 μm	25	.630	29	630 μm
500 μm	35	32	500 μm	35	500 μm	30	.500	28	500 μm
425 μm	40	35	425 μm	40	420 μm	36	.400	27	400 μm
355 μm	45	42	355 μm	45	355 μm	44	.315	26	315 μm
300 μm	50	48	300 μm	50	300 μm	52			
250 μm	60	60	250 μm	60	250 μm	60	.250	25	250 μm
212 μm	70	65	212 μm	70	210 μm	72	.200	24	200 μm
180 μm	80	80	180 μm	80	180 μm	85	.160	23	160 μm
150 μm	100	100	150 μm	100	150 μm	100			
125 μm	120	115	125 μm	120	125 μm	120	.125	22	125 μm
106 μm	140	150	106 μm	140	105 μm	150	.100	21	100 μm
90 μm	170	170	90 μm	170	90 μm	170			90 μm
75 μm	200	200	75 μm	200	75 μm	200	.080	20	80 μm
63 μm	230	250	63 μm	230	63 μm	240	.063	19	71 μm
									63 μm
									56 μm
53 μm	270	270	53 μm	270	53 μm	300	.050	18	50 μm
45 μm	325	325	45 μm	325	45 μm	350	.040	17	45 μm
38 μm	400	400	38 μm	400					40 μm

(1) U.S.A. Sieve Series—ASTM Specification E-11-70

(2) Tyler Standard Screen Scale Sieve Series.

(3) Canadian Standard Sieve Series 8-GP-1d.

(4) British Standards Institution, London BS-410-62.

(5) French Standard Specifications, AFNOR X-11-501.

(6) German Standard Specification D1N 4188.

*These sieves correspond to those recommended by ISO (International Standards Organization) as an International Standard and this designation should be used when reporting sieve analysis intended for international publication.

Datos obtenidos en la molienda de yeso con diferentes combinaciones de cuerpos molidores:

Tabla B.6 Pesos de los tamices llenos en la molienda de yeso a diferentes tiempos con cuerpos molidores de 25 mm de diámetro.

Tamiz (μm)	Tiempos de molienda (min)		
	10	15	20
	Peso del tamiz lleno (g)	Peso del tamiz lleno (g)	Peso del tamiz lleno (g)
2.000	266	258	220
1.000	173	167	157
710	146	158	191
500	142	142	157
355	131	133	133
250	119	119	119
Bandeja	91	91	91

Tabla B.7 Pesos de los tamices llenos en la molienda de yeso a diferentes tiempos con cuerpos molidores de 20 mm de diámetro.

Tamiz (μm)	Tiempos de molienda (min)		
	10	15	20
	Peso del tamiz lleno (g)	Peso del tamiz lleno (g)	Peso del tamiz lleno (g)
2.000	315	289	285
1.000	152	171	167
710	139	143	144
500	128	130	136
355	126	126	128
250	118	118	118
Bandeja	90	91	90

Tabla B.8 Pesos de los tamices llenos en la molienda de yeso a diferentes tiempos con cuerpos molidores de 13 mm de diámetro.

Tamiz (μm)	Tiempos de molienda (min)		
	10	15	20
	Peso del tamiz lleno (g)	Peso del tamiz lleno (g)	Peso del tamiz lleno (g)
2.000	307	311	297
1.000	161	153	167
710	139	139	141
500	128	129	129
355	126	127	126
250	117	118	117
Bandeja	90	91	91

Datos obtenidos en la molienda de yeso con combinaciones de cuerpos molidores de varios tamaños:

Tabla B.9 Pesos de los tamices llenos en la molienda de yeso a diferentes tiempos con la combinación I de cuerpos molidores.

Tamiz (μm)	Tiempos de molienda (min)		
	10	15	20
	Peso del tamiz lleno (g)	Peso del tamiz lleno (g)	Peso del tamiz lleno (g)
2.000	300	272	249
1.000	158	165	173
710	145	151	163
500	130	144	145
355	127	127	128
250	118	119	118
Bandeja	90	90	92

Tabla B.10 Pesos de los tamices llenos en la molienda de yeso a diferentes tiempos con la combinación II de cuerpos moledores.

Tamiz (μm)	Tiempos de molienda (min)		
	10	15	20
	Peso del tamiz lleno (g)	Peso del tamiz lleno (g)	Peso del tamiz lleno (g)
2.000	268	274	262
1.000	166	164	164
710	161	149	160
500	137	144	140
355	127	127	131
250	118	118	119
Bandeja	91	92	92

Tabla B.11 Pesos de los tamices llenos en la molienda de yeso a diferentes tiempos con la combinación III de cuerpos moledores.

Tamiz (μm)	Tiempos de molienda (min)		
	10	15	20
	Peso del tamiz lleno (g)	Peso del tamiz lleno (g)	Peso del tamiz lleno (g)
2.000	284	263	246
1.000	168	171	154
710	143	144	143
500	131	145	157
355	132	133	146
250	118	117	126
Bandeja	92	95	96

Datos de la molienda para observar la influencia de la velocidad del molino:

Tabla B.12 Pesos de los tamices llenos en la molienda de yeso a diferentes velocidades del molino.

Tamiz (μm)	Nivel de velocidad del molino		
	4	7	10
	9 RPM	24 RPM	47 RPM
	Peso del tamiz lleno (g)	Peso del tamiz lleno (g)	Peso del tamiz lleno (g)
2.000	295	298	263
1.000	163	160	171
710	146	144	144
500	131	130	145
355	126	127	133
250	117	118	117
Bandeja	90	91	95

Datos obtenidos en la molienda de *clinker* con diferentes combinaciones de cuerpos moledores:

Tabla B.13 Pesos de los tamices llenos en la molienda de clinker a diferentes tiempos con cuerpos moledores de 25 mm de diámetro.

Tamiz (μm)	Tiempos de molienda (min)		
	10	15	20
	Peso del tamiz lleno (g)	Peso del tamiz lleno (g)	Peso del tamiz lleno (g)
2.000	199	191	184
1.000	145	142	146
710	143	142	141
500	133	129	129
355	143	132	137
250	172	148	135
Bandeja	133	184	196

Tabla B.14 Pesos de los tamices llenos en la molienda de clinker a diferentes tiempos con cuerpos moledores de 20 mm de diámetro.

Tamiz (μm)	Tiempos de molienda (min)		
	10	15	20
	Peso del tamiz lleno (g)	Peso del tamiz lleno (g)	Peso del tamiz lleno (g)
2.000	274	230	227
1.000	149	160	149
710	147	152	147
500	132	142	130
355	135	152	142
250	133	132	135
Bandeja	98	100	138

Tabla B.15 Pesos de los tamices llenos en la molienda de clinker a diferentes tiempos con cuerpos moledores de 13 mm de diámetro.

Tamiz (μm)	Tiempos de molienda (min)		
	10	15	20
	Peso del tamiz lleno (g)	Peso del tamiz lleno (g)	Peso del tamiz lleno (g)
2.000	269	256	242
1.000	152	157	160
710	151	156	154
500	138	144	142
355	138	133	142
250	124	122	126
Bandeja	96	100	102

Datos obtenidos en la molienda de *clinker* con combinaciones de cuerpos moledores de varios tamaños:

Tabla B.16 Pesos de los tamices llenos en la molienda de clinker a diferentes tiempos con la combinación I de cuerpos moledores.

Tamiz (μm)	Tiempos de molienda (min)		
	10	15	20
	Peso del tamiz lleno (g)	Peso del tamiz lleno (g)	Peso del tamiz lleno (g)
2.000	250	238	221
1.000	151	147	145
710	151	145	143
500	136	129	127
355	156	153	144
250	123	135	143
Bandeja	101	121	145

Tabla B.17 Pesos de los tamices llenos en la molienda de clinker a diferentes tiempos con la combinación II de cuerpos moledores.

Tamiz (μm)	Tiempos de molienda (min)		
	10	15	20
	Peso del tamiz lleno (g)	Peso del tamiz lleno (g)	Peso del tamiz lleno (g)
2.000	290	251	195
1.000	147	153	146
710	145	147	143
500	133	137	134
355	130	153	135
250	123	124	137
Bandeja	100	103	178

Tabla B.18 Pesos de los tamices llenos en la molienda de clinker a diferentes tiempos con la combinación III de cuerpos moledores.

Tamiz (μm)	Tiempos de molienda (min)		
	10	15	20
	Peso del tamiz lleno (g)	Peso del tamiz lleno (g)	Peso del tamiz lleno (g)
2.000	240	226	201
1.000	143	154	148
710	139	140	146
500	127	128	134
355	128	131	152
250	134	138	144
Bandeja	157	151	143

Tabla B.19 Pesos de los tamices llenos en la molienda de clinker y yeso a 30 min con la combinación III de cuerpos moledores.

Tamiz (μm)	Peso del tamiz lleno de yeso (g)	Peso del tamiz lleno de <i>clinker</i> (g)
2.000	223	195
1.000	155	145
710	149	154
500	162	136
355	149	145
250	129	146
Bandeja	101	147

Datos para la comparación de los molinos de bolas.

Tabla B.20 Pesos de los tamices llenos en las moliendas de ladrillo en los dos molinos.

Tamiz (μm)	Molino del laboratorio		Molino Armfield
	Pesos de tamices llenos (g)	Pesos de tamices llenos (g)	Pesos de tamices llenos (g)
2.000	243	196	253
1.000	224	185	147
710	140	192	195
500	128	159	132
355	126	127	125
250	117	117	124
Bandeja	90	92	92

Tablas de datos de la tolva.

Tabla B.21 Masa y altura de urea en la tolva y cada tiempo de descarga del orificio de 15 mm.

Altura (cm)	Masa (g)	Tiempo (s)
185	452	20
175	419	18
165	362	17
155	302	15
145	270	12
135	218	11
125	151	6

Anexo C

TABLAS DE RESULTADOS

Resultados del cálculo de las masas retenidas en los tamices para cada tamizado:

Tabla C.1 Masa retenida de una muestra de 200 g de yeso en cada tamiz, para cada intensidad de vibración en un tiempo de 10 min de tamizado.

Tamiz (µm)	25%	50%	75%	100%
	Masa retenida (g)	Masa retenida (g)	Masa retenida (g)	Masa retenida (g)
2.000	194	135	100	102
1.000	3	54	61	58
710	1	5	20	19
500	0	2	9	10
355	1	2	6	6
250	1	1	3	4
Bandeja	0	1	1	1
Total	200	200	200	200

Tabla C.2 Diámetros promedios de partículas, porcentajes retenidos y retenidos acumulados en cada tamiz para cada intensidad de vibración de la corrida a 10 min de tamizado.

Tamiz (μm)	Dp (mm)	Intensidad de vibración (%)							
		25		50		75		100	
		Porc. Ret. (%)	Ret. Acu (%)	Porc. Ret. (%)	Ret. Acu (%)	Porc. Ret. (%)	Ret. Acu (%)	Porc. Ret. (%)	Ret. Acu (%)
2.000	2,2000	97,0	97,0	67,5	67,5	50,0	50,0	51,0	51,0
1.000	1,5000	1,5	98,5	27,0	94,5	30,5	80,5	29,0	80,0
710	0,8550	0,5	99,0	2,5	97,0	10,0	90,5	9,5	89,5
500	0,6050	0,0	99,0	1,0	98,0	4,5	95,0	5,0	94,5
355	0,4275	0,5	99,5	1,0	99,0	3,0	98,0	3,0	97,5
250	0,3025	0,5	100,0	0,5	99,5	1,5	99,5	2,0	99,5
Bandeja	0,1250	0,0	100,0	0,5	100,0	0,5	100,0	0,5	100,0
Total	--	100,0	--	100,0	--	100,0	--	100,0	--

Tabla C.3 Masa retenida de una muestra de 200 g de yeso en cada tamiz, para cada intensidad de vibración en un tiempo de 15 min de tamizado.

Tamiz (μm)	25%	50%	75%	100%
	Masa retenida (g)	Masa retenida (g)	Masa retenida (g)	Masa retenida (g)
2.000	194	120	101	99
1.000	4	66	50	42
710	0	4	24	25
500	0	6	13	16
355	1	3	9	12
250	1	1	1	3
Bandeja	0	0	2	3
Total	200	200	200	200

Tabla C.4 Diámetros promedios de partículas, porcentajes retenidos y retenidos acumulados en cada tamiz para cada intensidad de vibración de la corrida a 15 min de tamizado.

Tamiz (μm)	Dp (mm)	Intensidad de vibración (%)							
		25		50		75		100	
		Porc. Ret. (%)	Ret. Acu (%)	Porc. Ret. (%)	Ret. Acu (%)	Porc. Ret. (%)	Ret. Acu (%)	Porc. Ret. (%)	Ret. Acu (%)
2.000	2,2000	97,0	97,0	60,0	60,0	50,5	50,5	49,5	49,5
1.000	1,5000	2,0	99,0	33,0	93,0	25,0	75,5	21,0	70,5
710	0,8550	0,0	99,0	2,0	95,0	12,0	87,5	12,5	83,0
500	0,6050	0,0	99,0	3,0	98,0	6,5	94,0	8,0	91,0
355	0,4275	0,5	99,5	1,5	99,5	4,5	98,5	6,0	97,0
250	0,3025	0,5	100,0	0,5	100,0	0,5	99,0	1,5	98,5
Bandeja	0,1250	0,0	100,0	0,0	100,0	1,0	100,0	1,5	100,0
Total	--	100,0	--	100,0	--	100,0	--	100,0	--

Tabla C.5 Masa retenida de una muestra de 200 g de yeso en cada tamiz, para cada intensidad de vibración en un tiempo de 20 min de tamizado.

Tamiz (μm)	25%	50%	75%	100%
	Masa retenida (g)	Masa retenida (g)	Masa retenida (g)	Masa retenida (g)
2.000	193	114	98	97
1.000	4	67	32	34
710	0	10	37	33
500	0	5	20	22
355	1	2	8	8
250	1	1	2	3
Bandeja	1	1	3	3
Total	200	200	200	200

Tabla C.6 Diámetros promedios de partículas, porcentajes retenidos y retenidos acumulados en cada tamiz para cada intensidad de vibración de la corrida a 20 min de tamizado.

Tamiz (μm)	Dp (mm)	Intensidad de vibración (%)							
		25		50		75		100	
		Porc. Ret. (%)	Ret. Acu (%)	Porc. Ret. (%)	Ret. Acu (%)	Porc. Ret. (%)	Ret. Acu (%)	Porc. Ret. (%)	Ret. Acu (%)
2.000	2,2000	96,5	96,5	57,0	57,0	49,0	49,0	48,5	48,5
1.000	1,5000	2,0	98,5	33,5	90,5	16,0	65,0	17,0	65,5
710	0,8550	0,0	98,5	5,0	95,5	18,5	83,5	16,5	82,0
500	0,6050	0,0	98,5	2,5	98,0	10,0	93,5	11,0	93,0
355	0,4275	0,5	99,0	1,0	99,0	4,0	97,5	4,0	97,0
250	0,3025	0,5	99,5	0,5	99,5	1,0	98,5	1,5	98,5
Bandeja	0,1250	0,5	100,0	0,5	100,0	1,5	100,0	1,5	100,0
Total	--	100,0	--	100,0	--	100,0	--	100,0	--

Resultados obtenidos en las corridas a varios grados de llenado del molino.

Tabla C.7 Diámetros promedios de partículas, porcentajes retenidos y retenidos acumulados en cada tamiz para cada grado de llenado del molino.

Tamiz (μm)	Dp (mm)	Grado de llenado (%)					
		25		30		35	
		Porc. Ret. (%)	Ret. Acu (%)	Porc. Ret. (%)	Ret. Acu (%)	Porc. Ret. (%)	Ret. Acu (%)
2.000	2,2000	73,5	73,5	70,0	70,0	51,5	51,5
1.000	1,5000	14,5	88,0	18,0	88,0	19,5	71,0
710	0,8550	3,5	91,5	4,5	92,5	14,0	85,0
500	0,6050	3,0	94,5	3,5	96,0	10,0	95,0
355	0,4275	3,5	98,0	2,0	98,0	2,5	97,5
250	0,3025	1,0	99,0	1,0	99,0	1,0	98,5
Bandeja	0,1250	1,0	100,0	1,0	100,0	1,5	100,0
Total	--	100,0	--	100,0	--	100,0	--

Resultados de las moliendas de yeso con distintas combinaciones de cuerpos moledores:

Tabla C.8 Masa retenida en los tamices de yeso a diferentes tiempos con cuerpos moledores de 25 mm de diámetro.

Tamiz (μm)	Tiempos de molienda (min)		
	10	15	20
	Peso retenido (g)	Peso retenido (g)	Peso retenido (g)
2.000	120	112	74
1.000	39	33	23
710	11	23	56
500	17	17	32
355	8	10	10
250	3	3	3
Bandeja	2	2	2
Total	200	200	200

Tabla C.9 Diámetros promedios de partículas, porcentajes retenidos y retenidos acumulados en cada tamiz para tiempo de molienda con cuerpos moledores de 25 mm de diámetro.

Tamiz (μm)	Dp (mm)	Tiempos de molienda (min)					
		10		15		20	
		Porc. Ret. (%)	Ret. Acu (%)	Porc. Ret. (%)	Ret. Acu (%)	Porc. Ret. (%)	Ret. Acu (%)
2.000	2,2000	60,0	60,0	56,0	56,0	37,0	37,0
1.000	1,5000	19,5	79,5	16,5	72,5	11,5	48,5
710	0,8550	5,5	85,0	11,5	84,0	28,0	76,5
500	0,6050	8,5	93,5	8,5	92,5	16,0	92,5
355	0,4275	4,0	97,5	5,0	97,5	5,0	97,5
250	0,3025	1,5	99,0	1,5	99,0	1,5	99,0
Bandeja	0,1250	1,0	100,0	1,0	100,0	1,0	100,0
Total	--	100,0	--	100,0	--	100,0	--

Tabla C.10 Masa retenida en los tamices de yeso a diferentes tiempos con cuerpos molidores de 20 mm de diámetro.

Tamiz (μm)	Tiempos de molienda (min)		
	10	15	20
	Peso retenido (g)	Peso retenido (g)	Peso retenido (g)
2.000	169	143	139
1.000	18	37	33
710	4	8	9
500	3	5	11
355	3	3	5
250	2	2	2
Bandeja	1	2	1
Total	200	200	200

Tabla C.11 Diámetros promedios de partículas, porcentajes retenidos y retenidos acumulados en cada tamiz para tiempo de molienda con cuerpos molidores de 20 mm de diámetro.

Tamiz (μm)	Dp (mm)	Tiempos de molienda (min)					
		10		15		20	
		Porc. Ret. (%)	Ret. Acu (%)	Porc. Ret. (%)	Ret. Acu (%)	Porc. Ret. (%)	Ret. Acu (%)
2.000	2,2000	84,5	84,5	71,5	71,5	69,5	69,5
1.000	1,5000	9,0	93,5	18,5	90,0	16,5	86,0
710	0,8550	2,0	95,5	4,0	94,0	4,5	90,5
500	0,6050	1,5	97,0	2,5	96,5	5,5	96,0
355	0,4275	1,5	98,5	1,5	98,0	2,5	98,5
250	0,3025	1,0	99,5	1,0	99,0	1,0	99,5
Bandeja	0,1250	0,5	100,0	1,0	100,0	0,5	100,0
Total	--	100,0	--	100,0	--	100,0	--

Tabla C.12 Masa retenida en los tamices de yeso a diferentes tiempos con cuerpos molidores de 13 mm de diámetro.

Tamiz (μm)	Tiempos de molienda (min)		
	10	15	20
	Peso retenido (g)	Peso retenido (g)	Peso retenido (g)
2.000	161	165	151
1.000	27	19	33
710	4	4	6
500	3	4	4
355	3	4	3
250	1	2	1
Bandeja	1	2	2
Total	200	200	200

Tabla C.13 Diámetros promedios de partículas, porcentajes retenidos y retenidos acumulados en cada tamiz para tiempo de molienda con cuerpos molidores de 13 mm de diámetro.

Tamiz (μm)	Dp (mm)	Tiempos de molienda (min)					
		10		15		20	
		Porc. Ret. (%)	Ret. Acu (%)	Porc. Ret. (%)	Ret. Acu (%)	Porc. Ret. (%)	Ret. Acu (%)
2.000	2,2000	80,5	80,5	82,5	82,5	75,5	75,5
1.000	1,5000	13,5	94,0	9,5	92,0	16,5	92,0
710	0,8550	2,0	96,0	2,0	94,0	3,0	95,0
500	0,6050	1,5	97,5	2,0	96,0	2,0	97,0
355	0,4275	1,5	99,0	2,0	98,0	1,5	98,5
250	0,3025	0,5	99,5	1,0	99,0	0,5	99,0
Bandeja	0,1250	0,5	100,0	1,0	100,0	1,0	100,0
Total	--	100,0	--	100,0	--	100,0	--

Resultados de la molienda de yeso con combinaciones de cuerpos moledores de varios tamaños:

Tabla C.14 Pesos retenidos en los tamices en la molienda de yeso a diferentes tiempos con la combinación I de cuerpos moledores.

Tamiz (μm)	Tiempos de molienda (min)		
	10	15	20
	Pesos retenidos (g)	Pesos retenidos (g)	Pesos retenidos (g)
2.000	154	126	103
1.000	24	31	39
710	10	16	28
500	5	19	20
355	4	4	5
250	2	3	2
Bandeja	1	1	3
Total	200	200	200

Tabla C.15 Diámetros promedios de partículas, porcentajes retenidos y retenidos acumulados en cada tamiz para tiempo de molienda con la combinación I de cuerpos moledores.

Tamiz (μm)	Dp (mm)	Tiempos de molienda (min)					
		10		15		20	
		Porc. Ret. (%)	Ret. Acu (%)	Porc. Ret. (%)	Ret. Acu (%)	Porc. Ret. (%)	Ret. Acu (%)
2.000	2,2000	77,0	77,0	63,0	63,0	51,5	51,5
1.000	1,5000	12,0	89,0	15,5	78,5	19,5	71,0
710	0,8550	5,0	94,0	8,0	86,5	14,0	85,0
500	0,6050	2,5	96,5	9,5	96,0	10,0	95,0
355	0,4275	2,0	98,5	2,0	98,0	2,5	97,5
250	0,3025	1,0	99,5	1,5	99,5	1,0	98,5
Bandeja	0,1250	0,5	100,0	0,5	100,0	1,5	100,0
Total	--	100,0	--	100,0	--	100,0	--

Tabla C.16 Pesos de los tamices llenos en la molienda de yeso a diferentes tiempos con la combinación II de cuerpos moledores.

Tamiz (μm)	Tiempos de molienda (min)		
	10	15	20
	Pesos retenidos (g)	Pesos retenidos (g)	Pesos retenidos (g)
2.000	122	128	116
1.000	32	30	30
710	26	14	25
500	12	19	15
355	4	4	8
250	2	2	3
Bandeja	2	3	3
Total	200	200	200

Tabla C.17 Diámetros promedios de partículas, porcentajes retenidos y retenidos acumulados en cada tamiz para tiempo de molienda con la combinación II de cuerpos moledores.

Tamiz (µm)	Dp (mm)	Tiempos de molienda (min)					
		10		15		20	
		Porc. Ret. (%)	Ret. Acu (%)	Porc. Ret. (%)	Ret. Acu (%)	Porc. Ret. (%)	Ret. Acu (%)
2.000	2,2000	61,0	61,0	64,0	64,0	58,0	58,0
1.000	1,5000	16,0	77,0	15,0	79,0	15,0	73,0
710	0,8550	13,0	90,0	7,0	86,0	12,5	85,5
500	0,6050	6,0	96,0	9,5	95,5	7,5	93,0
355	0,4275	2,0	98,0	2,0	97,5	4,0	97,0
250	0,3025	1,0	99,0	1,0	98,5	1,5	98,5
Bandeja	0,1250	1,0	100,0	1,5	100,0	1,5	100,0
Total	--	100,0	--	100,0	--	100,0	--

Tabla C.18 Pesos de los tamices llenos en la molienda de yeso a diferentes tiempos con la combinación III de cuerpos moledores.

Tamiz (µm)	Tiempos de molienda (min)		
	10	15	20
	Pesos retenidos (g)	Pesos retenidos (g)	Pesos retenidos (g)
2.000	138	117	100
1.000	34	37	20
710	8	9	8
500	6	20	32
355	9	10	23
250	2	1	10
Bandeja	3	6	7
Total	200	200	200

Tabla C.19 Diámetros promedios de partículas, porcentajes retenidos y retenidos acumulados en cada tamiz para tiempo de molienda con la combinación III de cuerpos moledores.

Tamiz (μm)	Dp (mm)	Tiempos de molienda (min)					
		10		15		20	
		Porc. Ret. (%)	Ret. Acu (%)	Porc. Ret. (%)	Ret. Acu (%)	Porc. Ret. (%)	Ret. Acu (%)
2.000	2,2000	69,0	69,0	58,5	58,5	50,0	50,0
1.000	1,5000	17,0	86,0	18,5	77,0	10,0	60,0
710	0,8550	4,0	90,0	4,5	81,5	4,0	64,0
500	0,6050	3,0	93,0	10,0	91,5	16,0	80,0
355	0,4275	4,5	97,5	5,0	96,5	11,5	91,5
250	0,3025	1,0	98,5	0,5	97,0	5,0	96,5
Bandeja	0,1250	1,5	100,0	3,0	100,0	3,5	100,0
Total	--	100,0	--	100,0	--	100,0	--

Resultados de la molienda para observar la influencia de la velocidad del molino:

Tabla C.20 Diámetros promedios de partículas, porcentajes retenidos y retenidos acumulados en la molienda a diferentes velocidades del molino.

Tamiz (μm)	Dp (mm)	Velocidad del molino (rpm)					
		9		24		47	
		Porc. Ret. (%)	Ret. Acu (%)	Porc. Ret. (%)	Ret. Acu (%)	Porc. Ret. (%)	Ret. Acu (%)
2.000	2,2000	74,5	74,5	76,0	76,0	58,5	58,5
1.000	1,5000	14,5	89,0	13,0	89,0	18,5	77,0
710	0,8550	5,5	94,5	4,5	93,5	4,5	81,5
500	0,6050	3,0	97,5	2,5	96,0	10,0	91,5
355	0,4275	1,5	99,0	2,0	98,0	5,0	96,5
250	0,3025	0,5	99,5	1,0	99,0	0,5	97,0
Bandeja	0,1250	0,5	100,0	1,0	100,0	3,0	100,0
Total	--	100,0	--	100,0	--	100,0	--

Resultados de las moliendas de *clinker* con distintas combinaciones de cuerpos moledores:

Tabla C.21 Masa retenida en los tamices de clinker a diferentes tiempos con cuerpos moledores de 25 mm de diámetro.

Tamiz (μm)	Tiempos de molienda (min)		
	10	15	20
	Peso retenido (g)	Peso retenido (g)	Peso retenido (g)
2.000	53	45	38
1.000	11	8	12
710	8	7	6
500	8	4	4
355	20	9	14
250	56	32	19
Bandeja	44	95	107
Total	200	200	200

Tabla C.22 Diámetros promedios de partículas, porcentajes retenidos y retenidos acumulados en cada tamiz para tiempo de molienda con cuerpos moledores de 25 mm de diámetro.

Tamiz (μm)	Dp (mm)	Tiempos de molienda (min)					
		10		15		20	
		Porc. Ret. (%)	Ret. Acu (%)	Porc. Ret. (%)	Ret. Acu (%)	Porc. Ret. (%)	Ret. Acu (%)
2.000	2,2000	26,5	26,5	22,5	22,5	19,0	19,0
1.000	1,5000	5,5	32,0	4,0	26,5	6,0	25,0
710	0,8550	4,0	36,0	3,5	30,0	3,0	28,0
500	0,6050	4,0	40,0	2,0	32,0	2,0	30,0
355	0,4275	10,0	50,0	4,5	36,5	7,0	37,0
250	0,3025	28,0	78,0	16,0	52,5	9,5	46,5
Bandeja	0,1250	22,0	100,0	47,5	100,0	53,5	100,0
Total	--	100,0	--	100,0	--	100,0	--

Tabla C.23 Masa retenida en los tamices de clinker a diferentes tiempos con cuerpos molidores de 20 mm de diámetro.

Tamiz (μm)	Tiempos de molienda (min)		
	10	15	20
	Peso retenido (g)	Peso retenido (g)	Peso retenido (g)
2.000	128	84	81
1.000	15	26	15
710	12	17	12
500	7	17	5
355	12	29	19
250	17	16	19
Bandeja	9	11	49
Total	200	200	200

Tabla C.24 Diámetros promedios de partículas, porcentajes retenidos y retenidos acumulados en cada tamiz para tiempo de molienda con cuerpos molidores de 20 mm de diámetro.

Tamiz (μm)	Dp (mm)	Tiempos de molienda (min)					
		10		15		20	
		Porc. Ret. (%)	Ret. Acu (%)	Porc. Ret. (%)	Ret. Acu (%)	Porc. Ret. (%)	Ret. Acu (%)
2.000	2,2000	64,0	64,0	42,0	42,0	40,5	40,5
1.000	1,5000	7,5	71,5	13,0	55,0	7,5	48,0
710	0,8550	6,0	77,5	8,5	63,5	6,0	54,0
500	0,6050	3,5	81,0	8,5	72,0	2,5	56,5
355	0,4275	6,0	87,0	14,5	86,5	9,5	66,0
250	0,3025	8,5	95,5	8,0	94,5	9,5	75,5
Bandeja	0,1250	4,5	100,0	5,5	100,0	24,5	100,0
Total	--	100,0	--	100,0	--	100,0	--

Tabla C.25 Masa retenida en los tamices de clinker a diferentes tiempos con cuerpos molidores de 13 mm de diámetro.

Tamiz (μm)	Tiempos de molienda (min)		
	10	15	20
	Peso retenido (g)	Peso retenido (g)	Peso retenido (g)
2.000	123	110	96
1.000	18	23	26
710	16	21	19
500	13	19	17
355	15	10	19
250	8	6	10
Bandeja	7	11	13
Total	200	200	200

Tabla C.26 Diámetros promedios de partículas, porcentajes retenidos y retenidos acumulados en cada tamiz para tiempo de molienda con cuerpos molidores de 13 mm de diámetro.

Tamiz (μm)	Dp (mm)	Tiempos de molienda (min)					
		10		15		20	
		Porc. Ret. (%)	Ret. Acu (%)	Porc. Ret. (%)	Ret. Acu (%)	Porc. Ret. (%)	Ret. Acu (%)
2.000	2,2000	61,5	61,5	55,0	55,0	48,0	48,0
1.000	1,5000	9,0	70,5	11,5	66,5	13,0	61,0
710	0,8550	8,0	78,5	10,5	77,0	9,5	70,5
500	0,6050	6,5	85,0	9,5	86,5	8,5	79,0
355	0,4275	7,5	92,5	5,0	91,5	9,5	88,5
250	0,3025	4,0	96,5	3,0	94,5	5,0	93,5
Bandeja	0,1250	3,5	100,0	5,5	100,0	6,5	100,0
Total	--	100,0	--	100,0	--	100,0	--

Resultados de la molienda de *clinker* con combinaciones de cuerpos molidores de varios tamaños:

Tabla C.27 Pesos retenidos en los tamices en la molienda de clinker a diferentes tiempos con la combinación I de cuerpos moledores.

Tamiz (μm)	Tiempos de molienda (min)		
	10	15	20
	Pesos retenidos (g)	Pesos retenidos (g)	Pesos retenidos (g)
2.000	104	92	75
1.000	17	13	11
710	16	10	8
500	11	4	2
355	33	30	21
250	7	19	27
Bandeja	12	32	56
Total	200	200	200

Tabla C.28 Diámetros promedios de partículas, porcentajes retenidos y retenidos acumulados en cada tamiz para tiempo de molienda con la combinación I de cuerpos moledores.

Tamiz (µm)	Dp (mm)	Tiempos de molienda (min)					
		10		15		20	
		Porc. Ret. (%)	Ret. Acu (%)	Porc. Ret. (%)	Ret. Acu (%)	Porc. Ret. (%)	Ret. Acu (%)
2.000	2,2000	52,0	52,0	46,0	46,0	37,5	37,5
1.000	1,5000	8,5	60,5	6,5	52,5	5,5	43,0
710	0,8550	8,0	68,5	5,0	57,5	4,0	47,0
500	0,6050	5,5	74,0	2,0	59,5	1,0	48,0
355	0,4275	16,5	90,5	15,0	74,5	10,5	58,5
250	0,3025	3,5	94,0	9,5	84,0	13,5	72,0
Bandeja	0,1250	6,0	100,0	16,0	100,0	28,0	100,0
Total	--	100,0	--	100,0	--	100,0	--

Tabla C.29 Pesos de los tamices llenos en la molienda de clinker a diferentes tiempos con la combinación II de cuerpos moledores.

Tamiz (µm)	Tiempos de molienda (min)		
	10	15	20
	Pesos retenidos (g)	Pesos retenidos (g)	Pesos retenidos (g)
2.000	144	105	49
1.000	13	19	12
710	10	12	8
500	8	12	9
355	7	30	12
250	7	8	21
Bandeja	11	14	89
Total	200	200	200

Tabla C.30 Diámetros promedios de partículas, porcentajes retenidos y retenidos acumulados en cada tamiz para tiempo de molienda con la combinación II de cuerpos moledores.

Tamiz (μm)	Dp (mm)	Tiempos de molienda (min)					
		10		15		20	
		Porc. Ret. (%)	Ret. Acu (%)	Porc. Ret. (%)	Ret. Acu (%)	Porc. Ret. (%)	Ret. Acu (%)
2.000	2,2000	72,0	72,0	52,5	52,5	24,5	24,5
1.000	1,5000	6,5	78,5	9,5	62,0	6,0	30,5
710	0,8550	5,0	83,5	6,0	68,0	4,0	34,5
500	0,6050	4,0	87,5	6,0	74,0	4,5	39,0
355	0,4275	3,5	91,0	15,0	89,0	6,0	45,0
250	0,3025	3,5	94,5	4,0	93,0	10,5	55,5
Bandeja	0,1250	5,5	100,0	7,0	100,0	44,5	100,0
Total	--	100,0	--	100,0	--	100,0	--

Tabla C.31 Pesos de los tamices llenos en la molienda de clinker a diferentes tiempos con la combinación III de cuerpos moledores.

Tamiz (μm)	Tiempos de molienda (min)		
	10	15	20
	Pesos retenidos (g)	Pesos retenidos (g)	Pesos retenidos (g)
2.000	101	80	54
1.000	9	25	18
710	4	5	12
500	2	3	9
355	5	8	28
250	16	26	27
Bandeja	63	53	52
Total	200	200	200

Tabla C.32 Diámetros promedios de partículas, porcentajes retenidos y retenidos acumulados en cada tamiz para tiempo de molienda de clinker con la combinación III de cuerpos moledores.

Tamiz (μm)	Dp (mm)	Tiempos de molienda (min)					
		10		15		20	
		Porc. Ret. (%)	Ret. Acu (%)	Porc. Ret. (%)	Ret. Acu (%)	Porc. Ret. (%)	Ret. Acu (%)
2.000	2,2000	50,5	50,5	40,0	40,0	27,0	27,0
1.000	1,5000	4,5	55,0	12,5	52,5	9,0	36,0
710	0,8550	2,0	57,0	2,5	55,0	6,0	42,0
500	0,6050	1,0	58,0	1,5	56,5	4,5	46,5
355	0,4275	2,5	60,5	4,0	60,5	14,0	60,5
250	0,3025	8,0	68,5	13,0	73,5	13,5	74,0
Bandeja	0,1250	31,5	100,0	26,5	100,0	26,0	100,0
Total	--	100,0	--	100,0	--	100,0	--

Tabla C.33 Diámetros promedios, porcentajes retenidos y retenidos acumulados de los tamices de las moliendas de yeso y clinker a 30 min.

Tamiz (μm)	Dp (mm)	Yeso		Clinker	
		Porc. Ret. (%)	Ret. Acu (%)	Porc. Ret. (%)	Ret. Acu (%)
2.000	2,2000	38,5	38,5	24,5	24,5
1.000	1,5000	10,5	49,0	5,5	30,0
710	0,8550	7,0	56,0	9,5	39,5
500	0,6050	18,5	74,5	5,5	45,0
355	0,4275	13,0	87,5	11,0	56,0
250	0,3025	6,5	94,0	15,0	71,0
Bandeja	0,1250	6,0	100,0	29,0	100,0
Total	--	100,0	--	100,0	--

Resultados para la comparación de los molinos de bolas:

Tabla C.34 Diámetros promedios, porcentajes retenidos y retenidos acumulados de los tamices de las moliendas de ladrillo en los dos molinos.

Tamiz (μm)	Dp (mm)	Molino del laboratorio		Molino Armfield	
		Porc. Ret. (%)	Ret. Acu (%)	Porc. Ret. (%)	Ret. Acu (%)
2.000	2,2000	37,0	37,0	53,5	53,5
1.000	1,5000	35,0	72,0	6,5	60,0
710	0,8550	14,5	86,5	30,0	90,0
500	0,6050	9,5	96,0	3,5	93,5
355	0,4275	1,5	97,5	1,0	94,5
250	0,3025	1,5	99,0	4,0	98,5
Bandeja	0,1250	1,0	100,0	1,5	100,0
Total	--	100,0	--	100,0	--

Resultados del mezclado:

Tabla C.35 Fracciones de las partículas azules en las muestras de cada corrida.

Posición del dial	Velocidad de mezclado (rpm)	Tiempo de mezclado (s)	Fracción de grava azul (g)
2	6	30	0,933
		90	0,852
		150	0,809
		210	0,742
4	13	30	0,877
		90	0,807
		150	0,710
		210	0,618
6	27	30	0,807
		90	0,643
		150	0,568
		210	0,540
8	38	30	0,734
		90	0,567
		150	0,519
		210	0,512
10	53	30	0,743
		90	0,586
		150	0,525
		210	0,512

Anexo D

Gráficas de los análisis de tamizado para las corridas de tamizados a diferentes tiempos e intensidades de vibración.

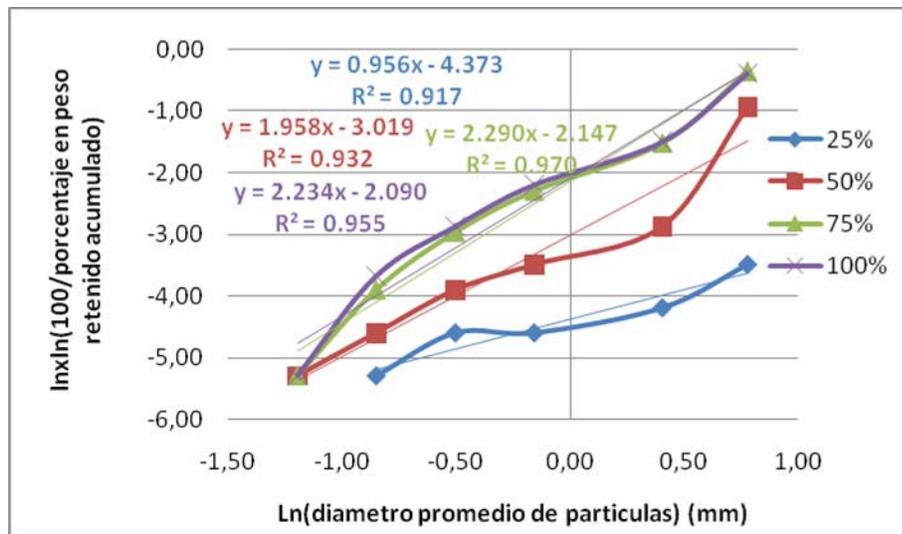


Figura D.1. Análisis para el tamizado de 10 min a las diferentes intensidades de vibración del tamizador.

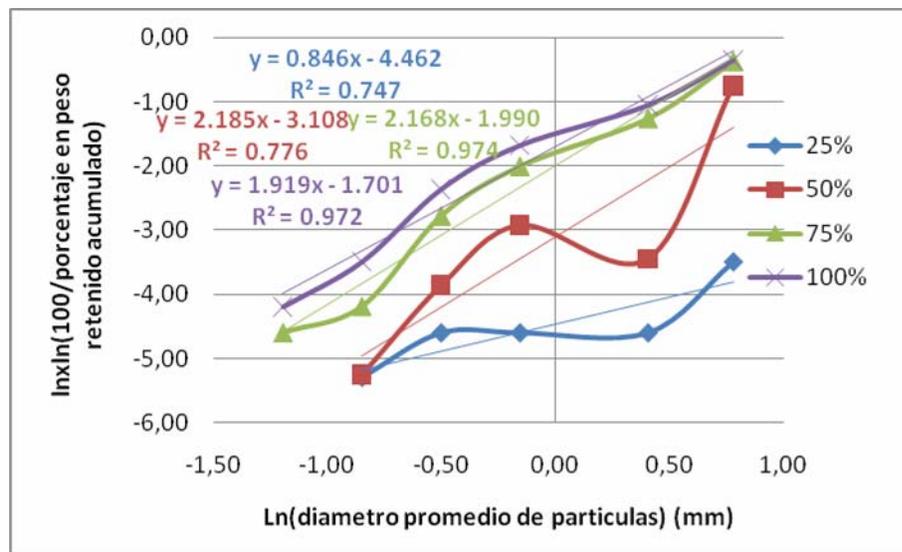


Figura D.2. Análisis para el tamizado de 15 min a las diferentes intensidades de vibración del tamizador.

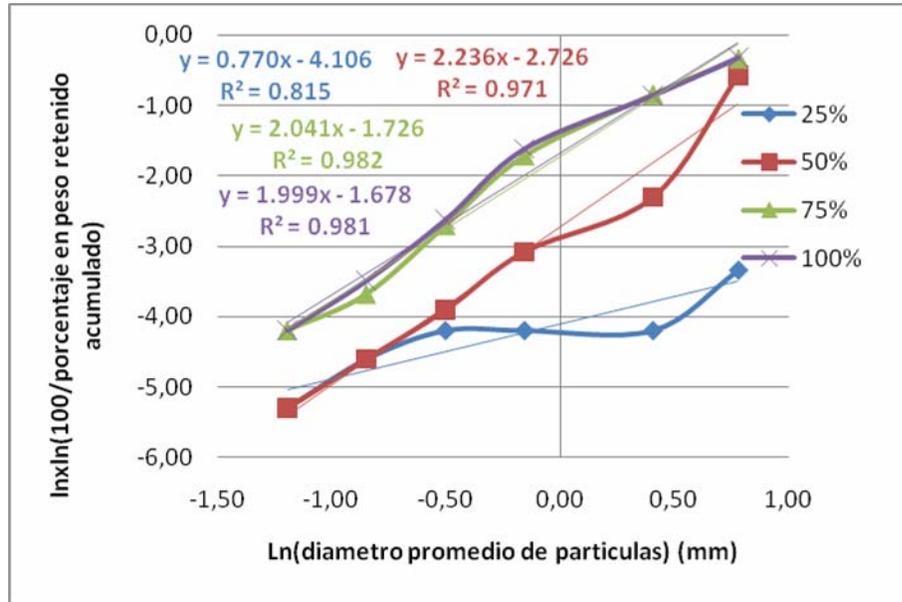


Figura D.3. Análisis para el tamizado de 20 min a las diferentes intensidades de vibración del tamizador.

Gráficas de los análisis de tamizado para las corridas de tamizados a diferentes combinaciones de cuerpos moledores:

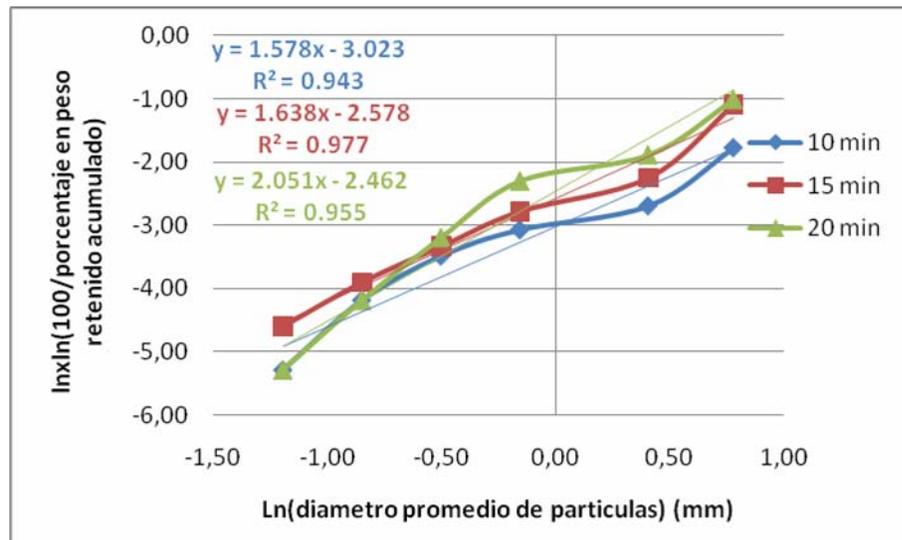


Figura D.4. Análisis para el tamizado de la molienda de yeso con cuerpos moledores de 20 mm de diámetro.

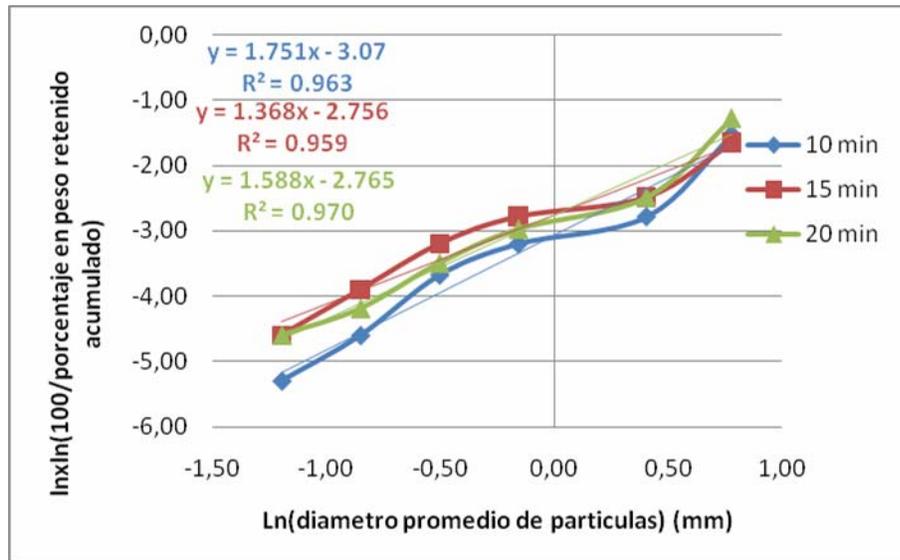


Figura D.5. Análisis para el tamizado de la molienda de yeso con cuerpos molidores de 13 mm de diámetro.

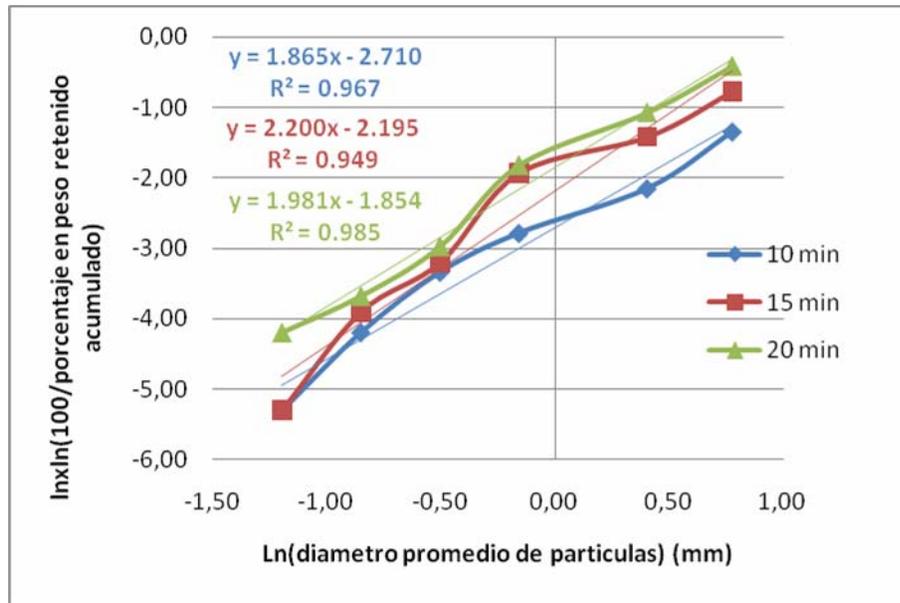


Figura D.6. Análisis para el tamizado de la molienda de yeso con la combinación I de cuerpos molidores.

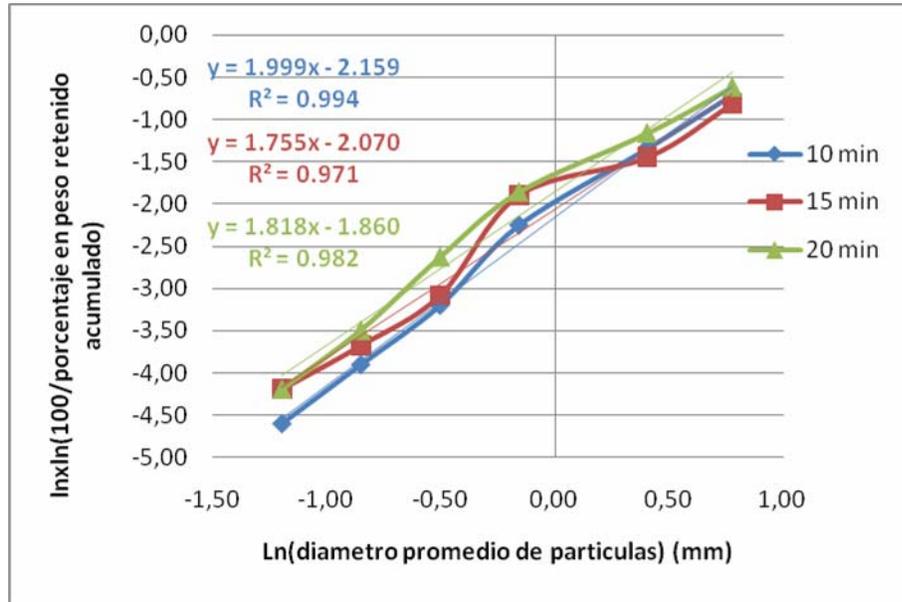


Figura D.7. Análisis para el tamizado de la molienda de yeso con la combinación II de cuerpos molidores.

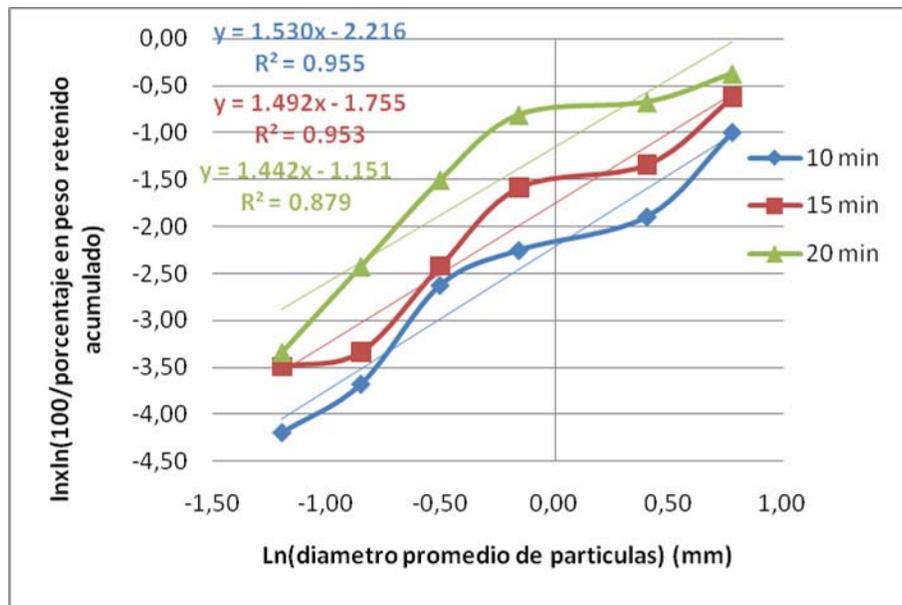


Figura D.8. Análisis para el tamizado de la molienda de yeso con la combinación III de cuerpos molidores.

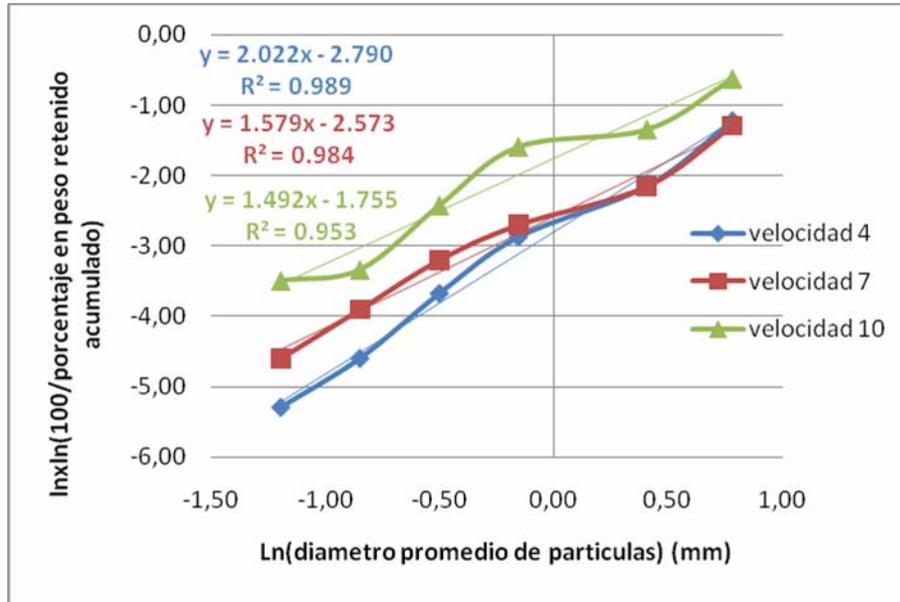


Figura D.9. Análisis para el tamizado de la molienda de yeso a distintas velocidades del molino.

Gráficas de los análisis de tamizado para las moliendas de *clinker* con distintas combinaciones de cuerpos molidores:

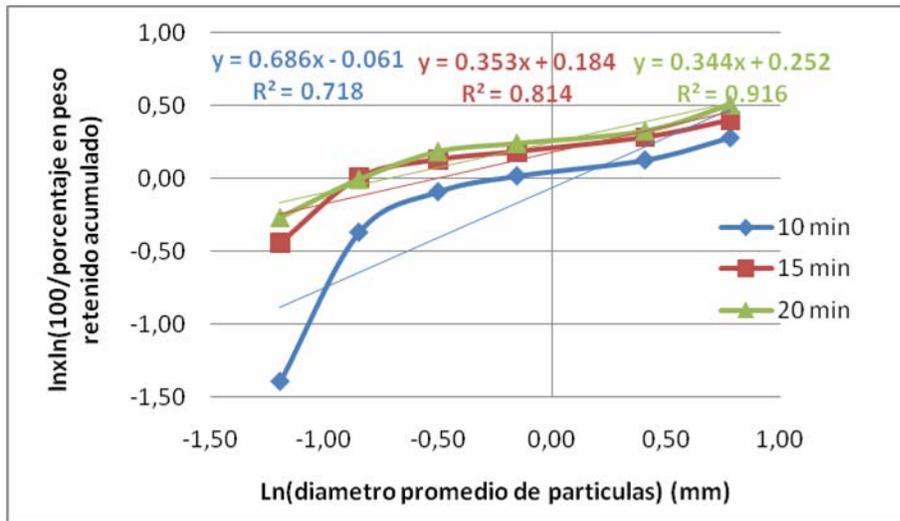


Figura D.10. Análisis para el tamizado de la molienda de *clinker* con cuerpos molidores de 25 mm de diámetro.

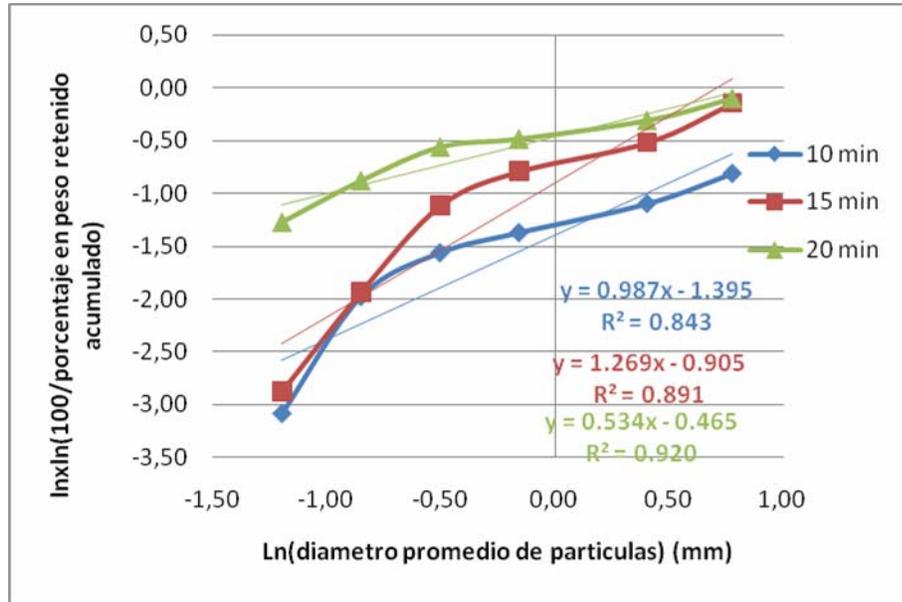


Figura D.11. Análisis para el tamizado de la molienda de *clinker* con cuerpos molidores de 20 mm de diámetro.

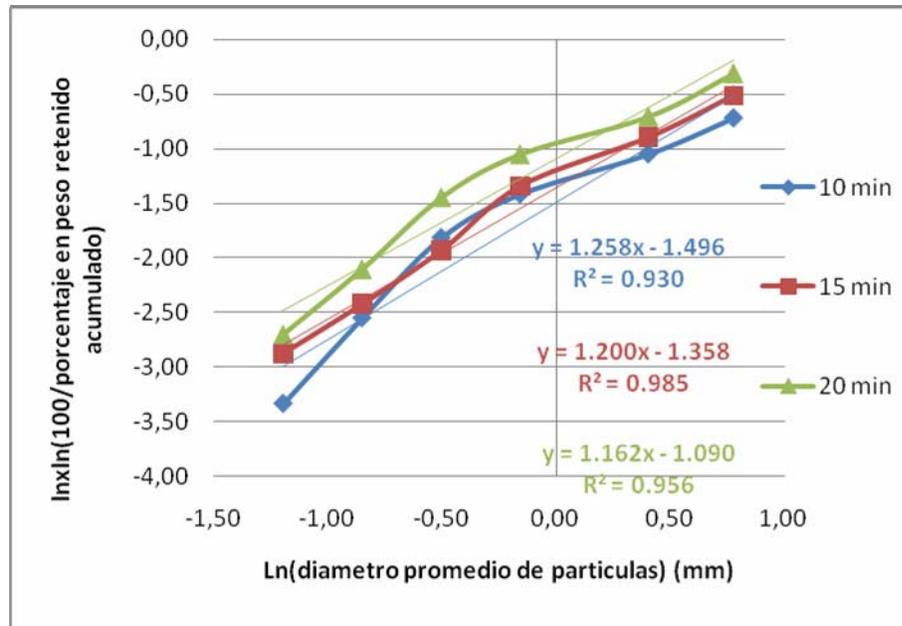


Figura D.12. Análisis para el tamizado de la molienda de *clinker* con cuerpos molidores de 13 mm de diámetro.

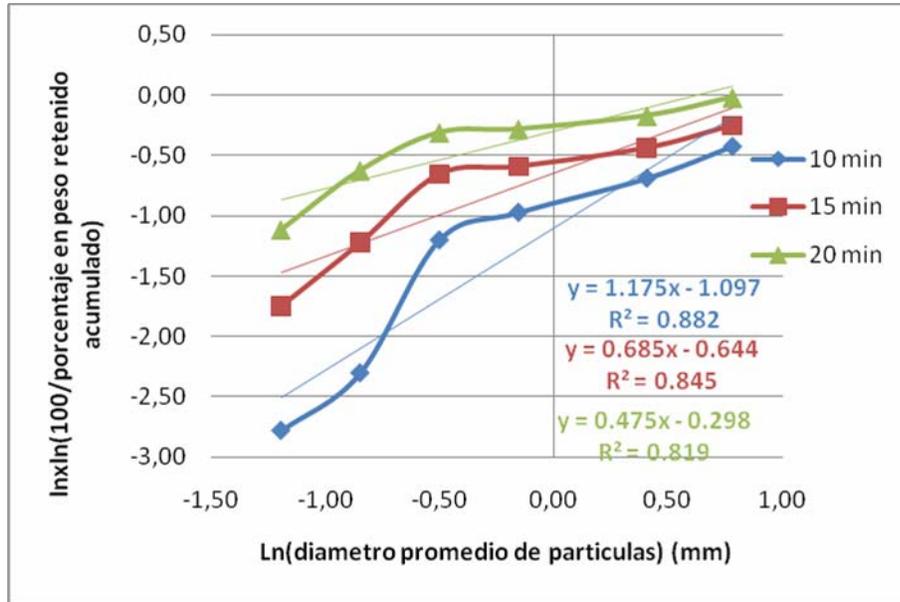


Figura D.13. Análisis para el tamizado de la molienda de clinker con la combinación I de cuerpos moledores.

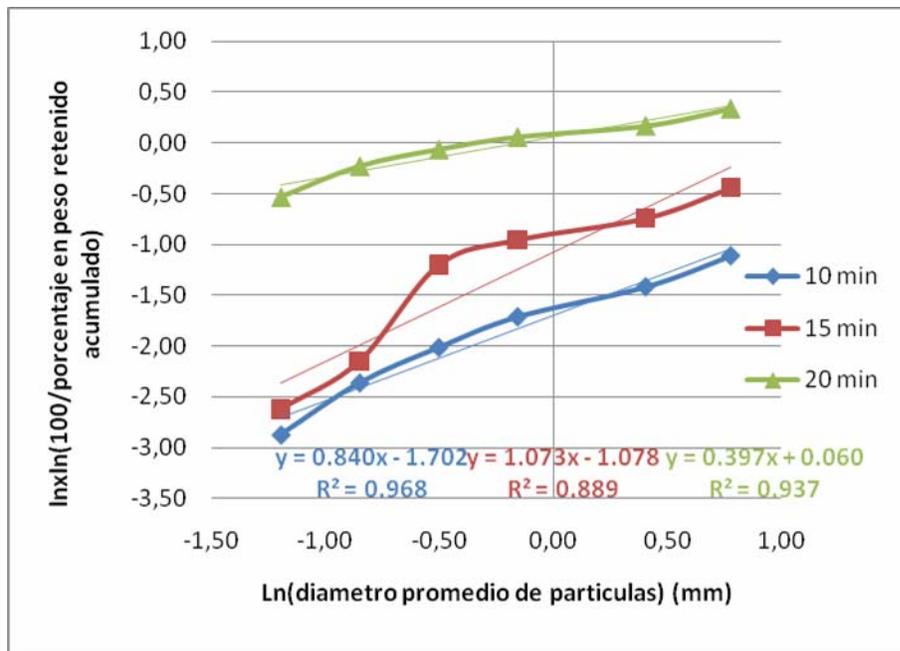


Figura D.14. Análisis para el tamizado de la molienda de *clinker* con la combinación II de cuerpos moledores.

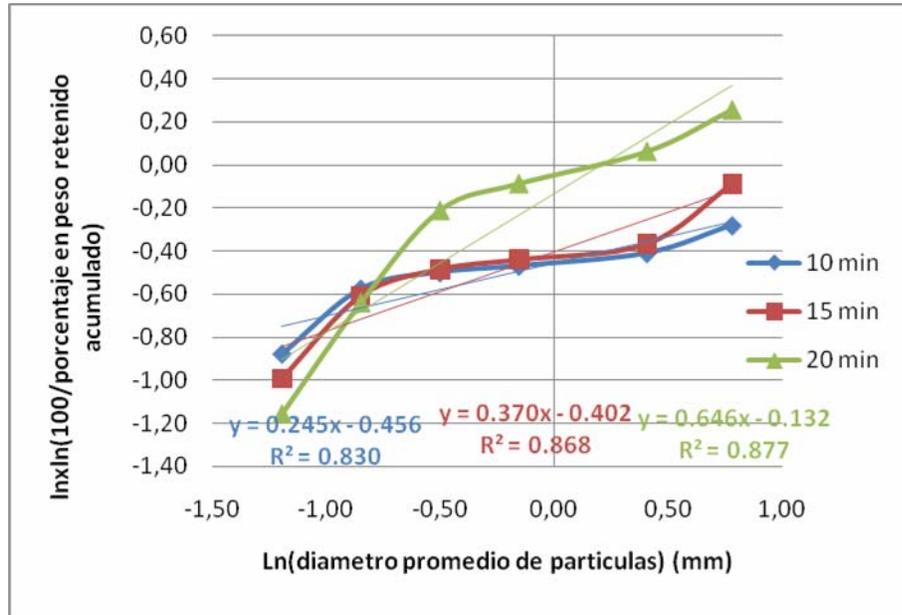


Figura D.15. Análisis para el tamizado de la molienda de *clinker* con la combinación III de cuerpos moledores.

Anexo E

RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS ESTADÍSTICOS

Tabla E.1 Análisis de varianza de las pruebas de tamizado a distintas porcentajes vibración y tiempo según el ajuste de diámetro de partícula de Bennett.

Analysis of Variance for Diam promedio Bennet - Type III Sums of Squares

<i>Source</i>	<i>Sum of Squares</i>	<i>Df</i>	<i>Mean Square</i>	<i>F-Ratio</i>	<i>P-Value</i>
MAIN EFFECTS					
A:Porcentaje de Vibracion	142301.	3	47433.6	13.28	0.0012
B:Tiempo	10731.8	3	3577.28	1.00	0.4356
RESIDUAL	32143.7	9	3571.53		
TOTAL (CORRECTED)	185176.	15			

Tabla E.2 Análisis de varianza de la molienda de yeso a distintas combinaciones de cuerpos moledores y tiempo según el ajuste de diámetro de partícula de Sperling.

Analysis of Variance for Diametro de Particula Sperling - Type III Sums of Squares

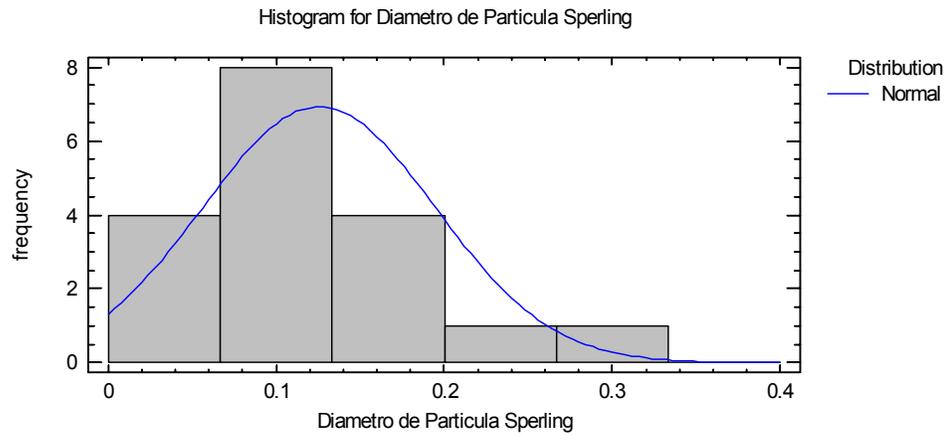
<i>Source</i>	<i>Sum of Squares</i>	<i>Df</i>	<i>Mean Square</i>	<i>F-Ratio</i>	<i>P-Value</i>
MAIN EFFECTS					
A:Combinaciones	0.0467111	5	0.00934222	6.65	0.0056
B:Tiempo	0.0204778	2	0.0102389	7.28	0.0112
RESIDUAL	0.0140556	10	0.00140556		
TOTAL (CORRECTED)	0.0812444	17			

Tabla E.3 Análisis de varianza de la molienda de *clinker* a distintas combinaciones de cuerpos moledores y tiempo según el ajuste de diámetro de partícula de Sperlíng.

Analysis of Variance for Diametro Sperlíng - Type III Sums of Squares

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:Combinacion	1.37305	5	0.27461	12.65	0.0005
B:Tiempo	0.489233	2	0.244617	11.26	0.0027
RESIDUAL	0.217167	10	0.0217167		
TOTAL (CORRECTED)	2.07945	17			

Análisis estadísticos de la distribución normal para las moliendas de yeso según Sperlíng



Uncensored Data – Diámetro de Particula Sperling (Combinación)

Data variable: Diametro de Particula Sperling

Selection variable: Combinación

18 values ranging from 0.05 to 0.32

Fitted Distributions

<i>Normal</i>
mean = 0.125556
standard deviation = 0.0691309

The StatAdvisor

This analysis shows the results of fitting a normal distribution to the data on Diametro de Particula Sperling. The estimated parameters of the fitted distribution are shown above. You can test whether the normal distribution fits the data adequately by selecting Goodness-of-Fit Tests from the list of Tabular Options. You can also assess visually how well the normal distribution fits by selecting Frequency Histogram from the list of Graphical Options. Other options within the procedure allow you to compute and display tail areas and critical values for the distribution. To select a different distribution, press the alternate mouse button and select Analysis Options.

Goodness-of-Fit Tests for Diámetro de Particula Sperling

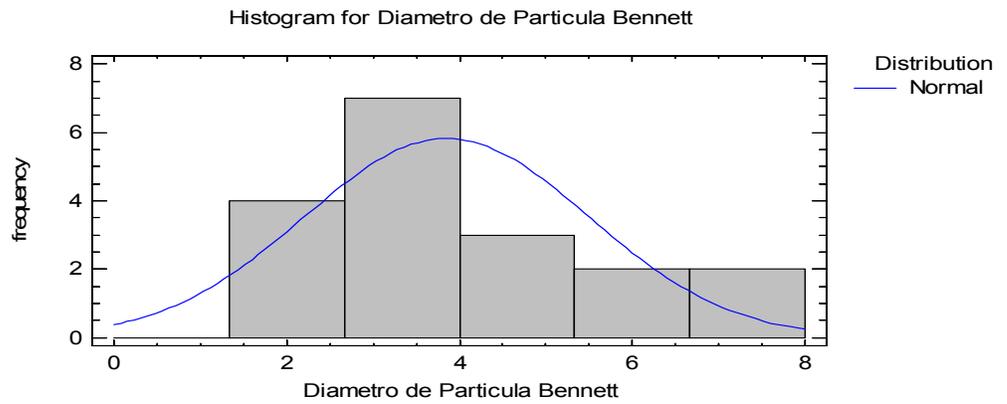
Kolmogorov-Smirnov Test

	<i>Normal</i>
DPLUS	0.14903 1
DMINUS	0.13721 1
DN	0.14903 1
P-Value	0.81887 2

The StatAdvisor

This pane shows the results of tests run to determine whether Diametro de Particula Sperling can be adequately modeled by a normal distribution. Since the smallest P-value amongst the tests performed is greater than or equal to 0.05, we can not reject the idea that Diametro de Particula Sperling comes from a normal distribution with 95% confidence.

Análisis estadísticos de la distribución normal para las moliendas de yeso según Bennett



[Uncensored Data - Diámetro de Particula Bennett \(Combinación\)](#)

Data variable: Diámetro de Partícula Bennett

Selection variable: Combinación

18 values ranging from 1.83 to 7.5

Fitted Distributions

<i>Normal</i>	
mean = 3.85167	
standard	deviation
=1.64299	

The StatAdvisor

This analysis shows the results of fitting a normal distribution to the data on Diametro de Particula Bennett. The estimated parameters of the fitted distribution are shown above. You can test whether the normal distribution fits the data adequately by selecting Goodness-of-Fit Tests from the list of Tabular Options. You can also assess visually how well the normal distribution fits by selecting Frequency Histogram from the list of Graphical Options. Other options within the procedure allow you to compute and display tail areas and critical values for the distribution. To select a different distribution, press the alternate mouse button and select Analysis Options.

Goodness-of-Fit Tests for Diámetro de Partícula Bennett

Kolmogorov-Smirnov Test

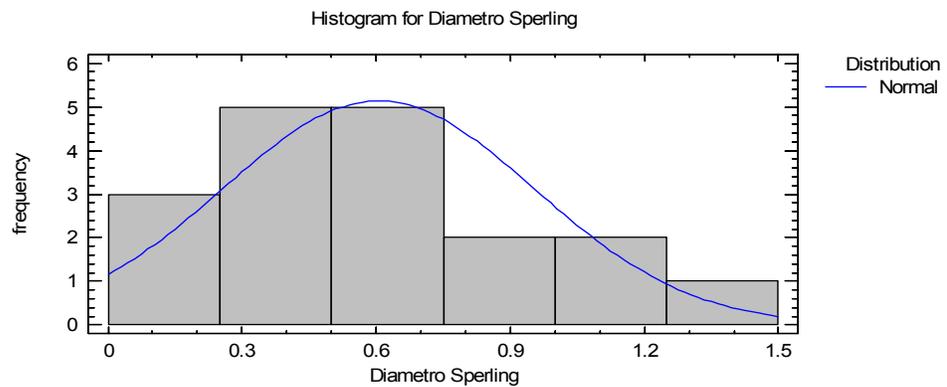
	<i>Normal</i>
DPLUS	0.23799 1
DMINUS	0.10925 9
DN	0.23799 1
P-Value	0.26059 6

The StatAdvisor

This pane shows the results of tests run to determine whether Diametro de Particula Bennett can be adequately modeled by a normal distribution.

Since the smallest P-value amongst the tests performed is greater than or equal to 0.05, we can not reject the idea that Diametro de Particula Bennett comes from a normal distribution with 95% confidence.

Análisis estadísticos de la distribución normal para las moliendas de *clinker* según Sperling



[Uncensored Data - Diametro Sperling \(Combinación\)](#)

Data variable: Diametro Sperling

Selection variable: Combinación

18 values ranging from 0.18 to 1.29

Fitted Distributions

<i>Normal</i>		
mean = 0.605		
standard deviation =		
0.349744		

The StatAdvisor

This analysis shows the results of fitting a normal distribution to the data on Diametro Sperling. The estimated parameters of the fitted distribution are shown above. You can test whether the normal distribution fits the data adequately by selecting Goodness-of-Fit Tests from the list of Tabular Options. You can also assess visually how well the normal distribution fits by selecting Frequency Histogram from the list of Graphical Options. Other options within the procedure allow you to compute and display tail areas and critical values for the distribution. To select a different distribution, press the alternate mouse button and select Analysis Options.

Goodness-of-Fit Tests for Diametro Sperling

Kolmogorov-Smirnov Test

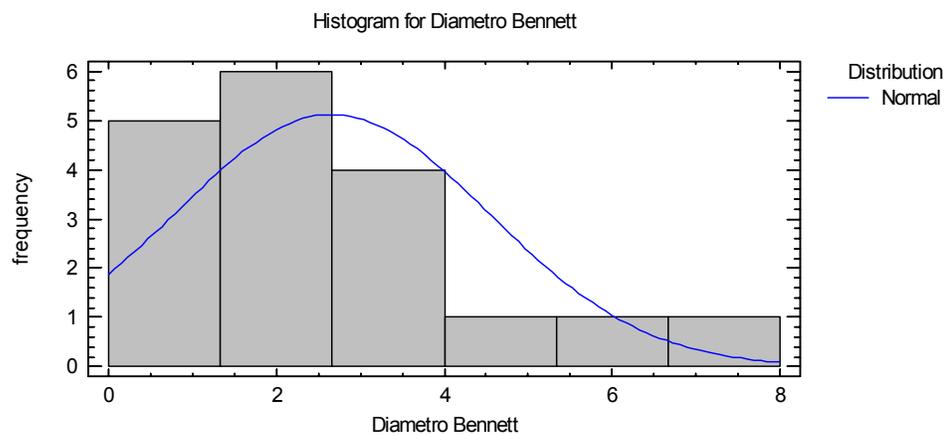
	<i>Normal</i>
DPLUS	0.16555 6
DMINUS	0.11214 9
DN	0.16555 6
P-Value	0.70724 3

The StatAdvisor

This pane shows the results of tests run to determine whether Diametro Sperling can be adequately modeled by a normal distribution.

Since the smallest P-value amongst the tests performed is greater than or equal to 0.05, we can not reject the idea that Diametro Sperling comes from a normal distribution with 95% confidence.

Análisis estadísticos de la distribución normal para las moliendas de *clinker* según Bennett



Uncensored Data - Diámetro Bennett (Tiempo)

Data variable: Diámetro Bennett

Selection variable: Tiempo

18 values ranging from 0.48 to 7.59

Fitted Distributions

<i>Normal</i>	
mean = 2.66389	
standard deviation =	1.87068

The StatAdvisor

This analysis shows the results of fitting a normal distribution to the data on Diametro Bennett. The estimated parameters of the fitted distribution are shown above. You can test whether the normal distribution fits the data adequately by selecting Goodness-of-Fit Tests from the list of Tabular Options. You can also assess visually how well the normal distribution fits by selecting Frequency Histogram from the list of Graphical Options. Other options within the procedure allow you to compute and display tail areas and critical values for the distribution. To select a different distribution, press the alternate mouse button and select Analysis Options.

Goodness-of-Fit Tests for Diametro Bennett

Kolmogorov-Smirnov Test

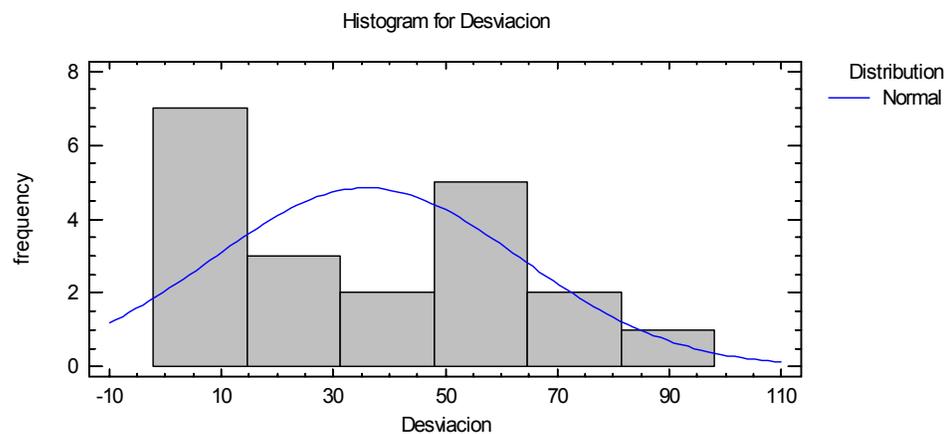
	<i>Normal</i>
DPLUS	0.20427 6
DMINUS	0.12151 8
DN	0.20427 6
P-Value	0.44771 8

The StatAdvisor

This pane shows the results of tests run to determine whether Diametro Bennett can be adequately modeled by a normal distribution.

Since the smallest P-value amongst the tests performed is greater than or equal to 0.05, we can not reject the idea that Diametro Bennett comes from a normal distribution with 95% confidence.

Análisis estadístico de la distribución normal para el mezclado de gravas



Uncensored Data - Desviacion (Nivel de Velocidad)

Data variable: Desviacion

Selection variable: Nivel de Velocidad

20 values ranging from 2.4 to 86.6

Fitted Distributions

<i>Normal</i>
mean = 36.04
standard deviation = 27.4642

The StatAdvisor

This analysis shows the results of fitting a normal distribution to the data on Desviacion. The estimated parameters of the fitted distribution are shown above. You can test whether the normal distribution fits the data adequately by selecting Goodness-of-Fit Tests from the list of Tabular Options. You can also assess visually how well the normal distribution fits by selecting Frequency Histogram from the list of Graphical Options. Other options within the procedure allow you to compute and display tail areas and critical values for the distribution. To select a different distribution, press the alternate mouse button and select Analysis Options.

Goodness-of-Fit Tests for Desviacion

Kolmogorov-Smirnov Test

	Normal
DPLUS	0.15363 9
DMINUS	0.12209 7
DN	0.15363 9
P-Value	0.73259 6

The StatAdvisor

This pane shows the results of tests run to determine whether Desviacion can be adequately modeled by a normal distribution.

Since the smallest P-value amongst the tests performed is greater than or equal to 0.05, we can not reject the idea that Desviacion comes from a normal distribution with 95% confidence.

Anexo F

Universidad de oriente
Núcleo de Anzoátegui
Escuela de Ingeniería y Ciencias Aplicadas
Departamento de Ingeniería Química



GUIA DE EXPERIMENTACION EN EL EQUIPO ARMFIELD DE MANEJO DE SÓLIDOS

Profesor:
Arturo, Rodolfo

Preparadora:
Daniela, Figueroa

Mayo de 2011

Contenido:

Normas de seguridad y de uso del equipo

Práctica 1: Molienda y tamizado de sólidos

Práctica 2: Descarga de una tolva de almacenamiento

Práctica 3: Mezclado de sólidos

Práctica 4: Ciclón y transporte neumático

Práctica 5: Medición de ángulo de reposo

Normas de seguridad y de uso del equipo

1. Antes de usar cualquier componente del equipo Armfield, asegurarse de que el botón de parada de emergencia no esté presionado.
2. Utilizar guantes y tapa bocas al manipular los materiales. Tapa oídos si se va a usar el molino de bolas.
3. Antes de encender los componentes rotatorios del equipo verificar primero que su velocidad este en cero para que no se encienda bruscamente.
4. Al experimentar en el molino de bolas, cuide que el molino no rote con la compuerta abierta para evitar la salida de las bolas que puedan lastimarlo.
5. Evitar perder algunos de los cuerpos moledores del molino de bolas del equipo Armfield, ya que son difícilmente reemplazables.
6. No permanecer cerca de los equipos rotatorios mientras están encendidos.
7. Al apagar algún componente rotatorio del equipo se debe colocar su velocidad en cero y luego apagar el interruptor.
8. Para ingresar o desalojar muestra de algún componente rotatorio, asegúrese de que la velocidad este en cero y el interruptor de encendido, este apagado.
9. Al trabajar con el sistema de transporte neumático, prevea que el sólido a transportar esté seco.

10. En caso de algún problema durante una experimentación, presione el botón de parada de emergencia.

Práctica 1: Molienda en un molino de bolas

Objetivo general:

Estudiar la distribución del tamaño de partículas de una muestra sólida de *Clinker*.

Objetivos específicos:

1. Estudiar el efecto de los cuerpos moledores sobre la distribución del tamaño de producto en un molino de bolas.
2. Calcular el grado de llenado del molino, con la siguiente ecuación:

$$\Phi = \frac{G}{\rho_{CM} \times V_t} \times 100$$

Donde, G es la masa de cuerpos moledores, ρ_{CM} es la densidad de cuerpos moledores y V_t es el volumen total del molino.

3. Determinar el diámetro promedio de la población de partículas para cada combinación de cuerpos moledores, y el factor de caracterización "n", usando:

La distribución de Rosin Ramler y Sperling

$$R = 100e^{-bx^n}$$

Y la distribución propuesta por Rosim, Ramler y Bennett

$$R = 100e^{-\left(\frac{X}{X_m}\right)^n}$$

Donde:

R es el porcentaje en peso retenido acumulado en cada uno de los tamices utilizados

X es el tamaño promedio de las partículas retenidas en los tamices y bandeja.

B y X_m corresponden al tamaño promedio de las partículas

N es la constante de caracterización del tipo de distribución

4. Construir la curva de granulometría del sólido. $[(\ln \ln(100/R)) \text{ vs } \ln X]$, para cada una de las combinaciones de los cuerpos molidores.

Materiales y equipos:

- 615 g de material a moler
- Trituradora de mandíbula
- Molino de bolas del equipo Armfield
- Tamizador
- Balanza
- Bandeja de recolección de sólidos
- Cronómetro
- Vernier
- Conjunto de tamices y bandeja
- Cuerpos molidores de distintos tamaños

Procedimiento experimental:

1. Triturar *clinker*, para obtener tres muestras de 205 g.
2. Pesar las bolas de 25 mm, 20 mm y 13 mm según lo requiera la combinación de cuerpos molidores hasta tener un total de 3500 g.
3. Abrir la compuerta del molino.
4. Colocar la muestra de *clinker* dentro del molino.
5. Introducir la combinación de cuerpos molidores en el molino.
6. Cerrar la compuerta del molino.
7. Encender el interruptor del molino.

8. Colocar el molino en la velocidad deseada.
9. Contar las revoluciones por minuto del molino.
10. Moler por 15 min.
11. Colocar la velocidad en cero, tratando de que la compuerta del molino quede en la parte de arriba.
12. Apagar el interruptor del molino.
13. Abrir la compuerta del molino.
14. Encender el interruptor del molino.
15. Colocar la bandeja de recolección de muestra bajo el molino.
16. Ajustar la perilla en la velocidad 2 y dejar que las bolas y la muestra caigan lentamente en la bandeja de recolección.
17. Separar la muestra de las bolas.
18. Pesar los tamices vacíos.
19. Colocar la muestra molida en la pila de tamices.
20. Encender el interruptor del tamizador.
21. Ajustar la perilla de intensidad de vibración en 100%.
22. Tamizar durante 20 min.
23. Anotar el peso retenido en cada tamiz y en la bandeja.
24. Repetir todo el procedimiento desde el paso 2, dos veces hasta moler con tres combinaciones diferentes.

En esta práctica el alumno debe traer:

- Hoja de recolección de datos
- Guantes de goma
- Mascarilla

Práctica 2: Descarga de una tolva de almacenamiento

Objetivo general:

Estudiar las variables involucradas en la descarga de una tolva de almacenamiento.

Objetivos específicos:

1. Analizar la descarga de dos materiales granulares distintos.
2. Estudiar el efecto de los distintos diámetros de orificio de descarga de la tolva.
3. Graficar flujo másico de descarga en función del diámetro de orificio.

Materiales y equipos:

- 600 g de urea granulada
- 600 g de *clinker*
- Tolva de almacenamiento del equipo Armfield
- Bandeja de recolección de sólidos
- Balanza
- Cronómetro

Procedimiento experimental:

1. Pesar la bandeja de recolección de sólidos
2. Colocarla en el sitio de descarga de la tolva.

3. Agregar los 600 g urea granulada en la tolva manteniendo cerrado el orificio de descarga.
4. Anotar la altura de urea en la tolva.
5. Abrir el orificio de 15 mm de diámetro cronometrando el tiempo que tarda la urea en descender hasta la altura de 100 mm.
6. Cerrar el orificio exactamente al alcanzar la altura de 100 mm
7. Pesar la masa de urea recolectada en la bandeja
8. Repetir todo el procedimiento para tres masas distintas de urea, variando el orificio de descarga de la tolva.
9. Repetir todo para el *clinker*.

En esta práctica el alumno debe traer:

- Hoja de recolección de datos
- Guantes de goma
- Tapa boca

Práctica 3: Mezclado de sólidos

Objetivo general:

Determinar el efecto del tiempo de mezclado y la velocidad de rotación en la mezcla de sólidos.

Objetivos específicos:

1. Estudiar el desempeño del mezclador de tambores gemelos.
2. Analizar el mezclado de grava con dos tamaños de partículas distintos.
3. Discutir las propiedades que afectan al mezclado de sólidos.
4. Evaluar el mezclado en cada muestra obtenida al variar el tiempo y velocidad de rotación según la ecuación:

$$\%Desviacion = \frac{\text{fraccion de grava 1} - 0.50}{0.50} \times 100$$

Materiales y equipos:

- 300 g de grava color azul
- 300 g de grava color rosado
- Mezclador de sólidos del equipo Armfield
- Tamiz de mesh 5 ASTM con su respectiva bandeja
- Bandeja de recolección de sólidos
- 2 envases plásticos
- Balanza

- Cronómetro

Procedimiento experimental:

1. Pesar los envases plásticos colocando un número a cada envase para distinguirlos.
2. Agregar 300 g de grava azul y 300 g de grava rosada al lado izquierdo y derecho del mezclador de sólidos, respectivamente.
3. Cerrar la compuerta del mezclador cerciorándose de que el mismo se encuentre en posición completamente vertical.
4. Fijar en 2 la perilla de velocidad de rotación del mezclador.
5. Encender el mezclador a la velocidad fijada cronometrando un tiempo de mezclado de 30 seg.
6. Contar las revoluciones por minuto a la velocidad fijada.
7. Retirar la muestra del lado izquierdo colocando un tapón del lado derecho para evitar pérdidas o mezclado adicional.
8. Colocar la muestra retirada sobre el tamiz de mesh 5 ASTM con su bandeja agitando los mismos para separar ambas gravas.
9. Recopilar la grava azul en un envase plástico asegurándose de que no quede alguna en la grava rosada.
10. Pesar el envase plástico lleno obteniendo la masa de grava azul por diferencia con respecto al peso del envase vacío.
11. Repetir los pasos 9 y 10 con la grava rosada
12. Repetir los pasos 7, 8 y 9 con la muestra del lado derecho del mezclador.
13. Repetir desde los pasos 2 al 12 para los tiempos de 90, 150 y 210 seg.
14. Repetir el paso 13 a velocidades de rotación fijadas en 4, 6, 8 y 10.

En esta práctica el alumno debe traer:

- Hoja de recolección de datos
- 300 g de grava color azul
- 300 g de grava color rosado

Notas:

- Las gravas deben ser de colores y tamaños de partículas distintos para facilitar la observación del mezclado y la separación de la grava finalizada cada corrida.
- Siempre tomar la muestra de un mismo tambor del mezclador para cada corrida.

Práctica 4: Ciclón y transporte neumático**Objetivo general:**

Analizar el comportamiento de un ciclón con un sistema de transporte neumático.

Objetivos específicos:

1. Medir las dimensiones del ciclón.
2. Calcular el tiempo de residencia de los sólidos dentro del ciclón mediante la siguiente ecuación: $t = 9\pi(D/12)/100$, siendo D el diametro de la parte cilíndrica del ciclón en pulgadas.
3. Calcular el flujo másico de las partículas solidas que pasan por el ciclón.

Materiales y equipos:

- 15 g de *clinker* de diferentes tamaños de partículas.
- Ciclón del equipo Armfield
- 2 envases plásticos
- 2 bolsas plásticas
- Balanza
- Cronómetro

Procedimiento experimental:

1. Medir las dimensiones del ciclón.
2. Colocar en un envase plástico 5 g de *clinker*.
3. Colocar sobre el envase la bolsa plástica con un orificio por donde se introduzca la manguera de succión del transporte neumático.
4. Colocar sobre el envase vacío otra bolsa plástica con un orificio donde se introduzca la manguera de descarga del transporte neumático.
5. Abrir la válvula de entrada de aire al compresor.
6. Encender el compresor.
7. Transportar el *clinker* de un envase a otro con el transporte neumático por 5 min.
8. Observar el comportamiento del ciclón.
9. Pesar la masa que se transportó.
10. Repetir todo el procedimiento tres veces desde el paso 2.

En esta práctica el alumno debe traer:

- Hoja de recolección de datos
- 2 envases plásticos
- 2 bolsas plásticas
- Guantes
- Tapa boca

Práctica 5: Medición de ángulo de reposo

Objetivo general:

Estudiar la medición del ángulo de reposo de urea granulada.

Objetivos específicos:

1. Estudiar los factores que afectan al ángulo de reposo de los materiales sólidos.
2. Medir el ángulo de reposo de la urea.
3. Calcular la constante de la ley de Mohr para ángulos de reposo, que es igual a:

$$K' = \frac{1 - \text{sen } \alpha_m}{1 + \text{sen } \alpha_m}$$

4. Medir el ángulo dinámico máximo alcanzado por la urea.
5. Discutir si el ángulo de reposo define algunas características de la urea.

Procedimiento experimental:

1. Colocar un embudo en la entrada del cilindro de medición de ángulo de reposo.
2. Agregar la urea hasta que llegue a la mitad del cilindro donde esta marcada una línea horizontal.
3. Mover el cilindro cuidadosamente.
4. Esperar que la urea este en reposo.
5. Medir el ángulo formado.
6. Mover rápidamente el cilindro y observar el ángulo máximo alcanzado por la urea.
7. Anotar.
8. Repetir tres veces desde el paso 4.

En esta práctica el alumno debe traer:

- Hoja de recolección de datos
- Guantes

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

TÍTULO	Desarrollo de técnicas de experimentación con un equipo de manejo de sólidos a escala piloto, en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad de Oriente, Núcleo Anzoátegui.
SUBTÍTULO	

AUTOR (ES):

APELLIDOS Y NOMBRES	CÓDIGO CULAC / E MAIL
	CVLAC: V-19.100.770 E MAIL: dany.nfd@hotmail.com
	CVLAC: E MAIL:
	CVLAC: E MAIL:
	CVLAC: E MAIL:

PALÁBRAS O FRASES CLAVES:

Molienda

Tamiz

Clinker

Armfield

Bennett

Mezclador

Tolva

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

ÁREA	SUBÁREA
Ingeniería y ciencias aplicadas	Ingeniería Química

RESUMEN (ABSTRACT):

En el presente trabajo se logró la puesta en marcha del equipo de manejo de sólidos marca Armfield, estudiándose el funcionamiento de cada componente de este equipo y realizándose una guía de prácticas de laboratorio para experimentar a las mejores condiciones de operación. El equipo cuenta con un molino de bolas donde se experimentó con yeso, *clinker* y ladrillo, encontrándose que las mejores condiciones de molienda son con combinaciones de cuerpos moledores donde las bolas de 25 mm de diámetro estén en mayor proporción, el grado de llenado del molino de 35%, la velocidad de 47 rpm y 20 min. Los mejores resultados para el tamizado se obtuvieron con 200 g de una muestra en 20 min al 100% de intensidad de vibración. Se midió el ángulo de reposo de urea granulada resultando de 33,5°. En la tolva se usó *clinker* y urea para estudiar la descarga de sólidos y en el ciclón con transporte neumático se transportó *clinker* molido verificándose un flujo de 0,0255 g/s en

promedio. La experimentación en el mezclador, arrojó que las condiciones más eficientes de mezclado son a la velocidad de 38 rpm y a los 210 s.

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

CONTRIBUIDORES:

APELLIDOS Y NOMBRES	ROL / CÓDIGO CVLAC / E_MAIL				
	ROL	CA	AS X	TU	JU
Rodulfo, Arturo	CVLAC:	V-8.300.709			
	E_MAIL	rodulfo99@hotmail.com			
	E_MAIL				
Silva, Héctor	ROL	CA	AS	TU	JU X
	CVLAC:	V-3.955.146			
	E_MAIL	hectorisu@yahoo.es			
	E_MAIL				
Cova, Alexis	ROL	CA	AS	TU	JU X
	CVLAC:	V-11.905.328			
	E_MAIL	alexiscovab@gmail.com			
	E_MAIL				
	ROL	CA	AS	TU	JU
	CVLAC:				
	E_MAIL				
	E_MAIL				

FECHA DE DISCUSIÓN Y APROBACIÓN:

2011	06	16
AÑO	MES	DÍA

LENGUAJE. SPA

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

ARCHIVO (S):

NOMBRE DE ARCHIVO	TIPO MIME
TESIS.equipo_manejo_de_solidos_Armfield.doc	Application/msword

CARACTERES EN LOS NOMBRES DE LOS ARCHIVOS: A B C D E F G H I J K L
M N O P Q R S T U V W X Y Z . a b c d e f g h i j k l m n o p q r s t u v w x y z . 0 1 2 3 4 5
6 7 8 9 .

ALCANCE

ESPACIAL: _____ (OPCIONAL)

TEMPORAL: _____ (OPCIONAL)

TÍTULO O GRADO ASOCIADO CON EL TRABAJO:

Ingeniero Químico

NIVEL ASOCIADO CON EL TRABAJO:

Pregrado

ÁREA DE ESTUDIO:

Ingeniería de procesos

INSTITUCIÓN:

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

DERECHOS

De acuerdo con el artículo 41 del reglamento de Trabajo de Grado de la Universidad de Oriente: “Los Trabajos de Grado son de exclusiva propiedad de la Universidad de Oriente y sólo podrán ser utilizados por otros fines con el consentimiento del consejo de núcleo respectivo, quien lo participará al consejo universitario”.

Figuroa D., Daniela N.

AUTOR

Rodulfo, Arturo

TUTOR

Silva, Héctor

JURADO

Cova, Alexis

JURADO

POR LA SUBCOMISION DE TESIS