



UNIVERSIDAD DEL AZUAY
FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA EN MINAS

**“Análisis de la cinética de molienda entre molino chileno,
molino de bolas de la planta de tratamiento FIRSTMETAL
y molino SAG a escala de laboratorio, variando el
porcentaje de humedad”**

Trabajo de graduación previo a la obtención del título de:

INGENIERO EN MINAS

Autores:

PAULINA PATRICIA PARRA SUMBA

ISMAEL FAVIO TAPIA RUILOVA

Director:

ING. EDUARDO ANDRÉS LUNA MÉNDEZ

CUENCA – ECUADOR

2022

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mis padres, por ser mis pilares y motivación para cumplir con mis objetivos.

A mis hermanas, Diana y Marcia, por ser mis consejeras y guías en mi camino y por enseñarme con su ejemplo.

A mi mami Mari, por siempre mostrarme su apoyo incondicional y confiar en mí.

Paulina Patricia Parra Sumba

Este proyecto de grado va dedicado para mis padres Teresa y Segundo, quienes con su arduo esfuerzo me han guiado por el camino correcto y me han permitido obtener una carrera.

A mi hermana Lorena, quien ha sabido estar apoyándome y aconsejándome en todo ámbito, en cada etapa de mi vida.

Ismael Favio Tapia Ruilova

AGRADECIMIENTO

Agradezco a mis padres por brindarme las herramientas necesarias para cumplir esta meta

A mis docentes Leonardo Núñez, Patricio Feijoo y Federico Auquilla por brindarnos sus conocimientos durante todos estos años de estudio.

A mi director de tesis, Ing. Eduardo Luna, por brindarnos siempre su apoyo, conocimiento y motivación para la realización de este trabajo de titulación.

Al ingeniero Jhonny Castillo por su ayuda en el presente trabajo de titulación.

Paulina Patricia Parra Sumba

Agradezco a la Universidad del Azuay y a la Escuela de Ingeniería en Minas por haberme acogido durante toda una etapa de formación académica de excelencia.

A los docentes Patricio Feijoo, Leonardo Núñez y Federico Auquilla quienes brindaron su tiempo y conocimientos para formarme como profesional.

Al ingeniero Eduardo Luna por su calidad como docente y su apoyo en el desarrollo de la presente tesis.

Al ingeniero Jhonny Castillo por brindarnos toda la información necesaria para el desarrollo de nuestro proyecto de titulación.

Ismael Favio Tapia Ruilova

ÍNDICE DE CONTENIDOS

DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTO	iii
ÍNDICE DE FIGURAS	vii
ÍNDICE DE TABLAS	x
ÍNDICE DE ANEXOS	xi
RESUMEN	xiv
ABSTRACT	xv
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1	3
1. MARCO TEÓRICO	3
1.1. Antecedentes.....	3
1.2. Georreferenciación y geología general	3
1.2.1. Formación Piñón	4
1.2.2. Formación Tarqui	5
1.2.3. Formación Saraguro	5
1.3. Molienda	6
1.4. Molinos	7
1.4.1. Partes del molino	8
1.5. Tipos de molienda.....	9
1.5.1. Molienda convencional	9
1.5.2. Molienda no convencional	10
1.6. Tipos de Fractura en Molienda	10
1.6.1. Impacto	10
1.6.2. Compresión.....	11
1.6.3. Cizalle y Fricción	11
1.6.4. Abrasión	11

1.7.	Variables de operación del molino	11
1.7.1.	Fracción de llenado.....	11
1.7.2.	Carga de medios moledores.....	12
1.7.3.	Velocidad de giro	13
1.7.4.	Velocidad crítica.....	14
1.7.5.	Velocidad de Fractura.....	15
1.7.6.	Cinética de molienda	16
1.7.7.	Humedad de los productos a moler	17
1.7.8.	Densidad de Pulpas.....	17
1.8.	Tipos de molinos.....	18
1.8.1.	Molinos Chilenos.....	18
1.8.2.	Molinos de Bolas	19
1.8.3.	Molinos SAG.....	22
1.9.	Granulometría	23
1.10.	Modelo de distribución de Rosin- Rammler	24
CAPÍTULO 2.....		25
2. EXPERIMENTACIÓN EN CAMPO: MOLINO DE BOLAS Y MOLINO CHILENO		25
2.1.	Caracterización y preparación del material	25
2.2.	Condiciones de operación del molino de bolas.	27
2.3.	Desarrollo y resultados de los ensayos en el molino de bolas de planta .	28
2.4.	Condiciones de operación del molino chileno.....	33
2.5.	Ejecución y resultados de los ensayos en el molino chileno	34
CAPÍTULO 3.....		38
3. DISEÑO EXPERIMENTAL A ESCALA DE LABORATORIO: MOLINO SAG Y MOLINO DE BOLAS.....		38
3.1.	Condicionamiento del molino SAG y de bolas en el laboratorio.	38

3.2. Realización de ensayos en condiciones similares a las de planta en el molino SAG.....	40
3.3. Resultados de los ensayos en el molino SAG.....	44
3.4. Desarrollo de ensayos en laboratorio variando el tamaño de los medios moledores en el molino de bolas.....	49
3.5. Resultados de las distintas pruebas con diferentes tamaños de medios moledores.....	52
CAPÍTULO 4.....	66
4. ANÁLISIS Y RESULTADOS	66
4.1. Interpretación y tabla de resultados.	66
4.2. Análisis y comparación de los resultados de cinética de fractura.....	68
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	72
Conclusiones	72
Recomendaciones	73
BIBLIOGRAFÍA.....	74
ANEXOS	77

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Ubicación satelital de FIRSTMETAL.	3
Figura 1.2 Geología en el cantón Camilo Ponce Enríquez.	6
Figura 1.3 Escalones de la fragmentación.	7
Figura 1.4 Esquema de las partes de un molino.	9
Figura 1.5 Tipos de molienda.	10
Figura 1.6 Mecánica de fractura.	11
Figura 1.7 Perfil de carga en el molino de bolas en un evento de molienda.	14
Figura 1.8 Ejemplo de gráfico de primer orden.	16
Figura 1.9 Molino Chileno.	19
Figura 1.10 Molino de bolas.	20
Figura 1.11 Tipos de descarga.	21
Figura 1.12 Molino SAG.	23
Figura 1.13 Tamices.	24
Figura 2.1 Basalto.	26
Figura 2.2 Probeta con basalto.	26
Figura 2.3 Diagrama de planta.	27
Figura 2.4 Molino de bolas de planta.	28
Figura 2.5 Resultados granulométricos para las tres densidades a los 3 minutos del molino de bolas de planta.	29
Figura 2.6 Resultados granulométricos para las tres densidades a los 9 minutos del molino de bolas de planta.	30
Figura 2.7 Resultados granulométricos para las tres densidades a los 15 minutos del molino de bolas de planta.	31
Figura 2.8 Resultados velocidad de fractura para las tres densidades en el molino de bolas de planta.	32
Figura 2.9 Molino chileno en planta.	34
Figura 2.10 Toma y recolección de muestras del molino chileno en planta.	35
Figura 2.11 Resultados granulométricos para los cinco tiempos en el molino chileno de planta.	36

Figura 2.12 Resultados velocidad de fractura con una densidad de 1.150 kg/l en el molino chileno de planta.	37
Figura 3.1 Molino SAG del laboratorio.	39
Figura 3.2 Molino de bolas de laboratorio de la escuela de Ingeniería en Minas.	40
Figura 3.3 Trituración de material en el laboratorio de la Escuela de Ingeniería en Minas de la Universidad del Azuay.	41
Figura 3.4 Carga de bolas para el molino SAG.	42
Figura 3.5 Tamizadora de la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad del Azuay.	44
Figura 3.6 Tamizaje de muestras.	44
Figura 3.7 Resultados granulométricos de las tres densidades a los 3 minutos en el molino SAG.	45
Figura 3.8 Resultados granulométricos de las tres densidades a los 9 minutos en el molino SAG.	46
Figura 3.9 Resultados granulométricos de las tres densidades a los 15 minutos en el molino SAG.	47
Figura 3.10 Resultados velocidad de fractura para las tres densidades en el molino SAG.	48
Figura 3.11 Carga del molino de bolas de laboratorio.	51
Figura 3.12 Molino de bolas de laboratorio cargado.	52
Figura 3.13 Resultados granulométricos de las tres distribuciones a los 3 minutos de la densidad de 1.5 kg/l en el molino de bolas.	53
Figura 3.14 Resultados granulométricos de las tres distribuciones a los 9 minutos de la densidad de 1.5 kg/l en el molino de bolas.	54
Figura 3.15 Resultados granulométricos de las tres distribuciones a los 15 minutos de la densidad de 1.5 kg/l en el molino de bolas.	55
Figura 3.16 Resultados granulométricos de las tres distribuciones a los 3 minutos de la densidad de 1.7 kg/l en el molino de bolas.	56
Figura 3.17 Resultados granulométricos de las tres distribuciones a los 9 minutos de la densidad de 1.7 kg/l en el molino de bolas.	57
Figura 3.18 Resultados granulométricos de las tres distribuciones a los 15 minutos de la densidad de 1.7 kg/l en el molino de bolas.	58
Figura 3.19 Resultados granulométricos de las tres distribuciones a los 3 minutos de la densidad de 1.9 kg/l en el molino de bolas.	59

Figura 3.20 Resultados granulométricos de las tres distribuciones a los 3 minutos de la densidad de 1.9 kg/l en el molino de bolas.	60
Figura 3.21 Resultados granulométricos de las tres distribuciones a los 15 minutos de la densidad de 1.9 kg/l en el molino de bolas.	61
Figura 3.22 Resultados velocidad de fractura para las tres densidades en el molino de bolas con mayor porcentaje de bolas pequeñas.....	62
Figura 3.23 Resultados velocidad de fractura para las tres densidades en el molino de bolas con mayor porcentaje de bolas grandes.	64
Figura 3.24 Resultados velocidad de fractura para las tres densidades en el molino de bolas con un porcentaje equitativo de bolas.....	65
Figura 4.1 Comparación de la velocidad de fractura para los cuatro molinos a una densidad de 1.5 kg/l.....	69
Figura 4.2 Comparación de la velocidad de fractura para los cuatro molinos a una densidad de 1.7 kg/l.....	70
Figura 4.3 Comparación de la velocidad de fractura para los cuatro molinos a una densidad de 1.9 kg/l.....	71

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Coordenadas de la concesión “San Sebastián”	4
Tabla 1.2 Comparación entre molienda húmeda y molienda seca.....	17
Tabla 2.1 Datos de la velocidad de fractura del molino de bolas de planta	32
Tabla 2.2 Datos de la velocidad de fractura del molino chileno.	37
Tabla 3.1 Distribución de bolas para el molino SAG.	42
Tabla 3.2 Carga de material en el molino SAG.	43
Tabla 3.3 Datos de la velocidad de fractura para el molino SAG.	48
Tabla 3.4 Distribución del mayor porcentaje de bolas pequeñas.....	49
Tabla 3.5 Distribución del mayor porcentaje de bolas grandes.	50
Tabla 3.6 Distribución de un porcentaje equitativo de bolas.	50
Tabla 3.7 Carga de material en el molino de bolas.	51
Tabla 3.8 Datos de la velocidad de fractura para la distribución con mayor porcentaje de bolas pequeñas para el molino de bolas de laboratorio.	62
Tabla 3.9 Datos de la velocidad de fractura para una distribución de bolas con mayor porcentaje de bolas grandes para el molino de bolas de laboratorio.....	63
Tabla 3.10 Datos de la velocidad de fractura para una distribución con un porcentaje equitativo de bolas para el molino de bolas de laboratorio.....	65
Tabla 4.1 Tabla de comparación de resultados.	66

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Molino de bolas de planta: tablas peso retenido, granulometría Rossin-Rammler ensayo 1.9 kg/l.....	77
Anexo 2. Molino de bolas de planta: tablas peso retenido, granulometría Rossin-Rammler ensayo 1.5 kg/l.....	78
Anexo 3. Molino de bolas de planta: tablas peso retenido, granulometría Rossin-Rammler ensayo 1.7 kg/l.....	79
Anexo 4. Gráficas para el cálculo de la velocidad específica de fractura del ensayo de 1.9 kg/l del molino de bolas de planta.....	80
Anexo 5. Gráficas para el cálculo de la velocidad específica de fractura del ensayo de 1.7 kg/l del molino de bolas de planta.....	81
Anexo 6. Gráficas para el cálculo de la velocidad específica de fractura del ensayo de 1.5 kg/l del molino de bolas de planta.....	82
Anexo 7. Molino chileno: tablas peso retenido, granulometría Rossin-Rammler ensayo 1.15 kg/l.	83
Anexo 8. Gráficas para el cálculo de la velocidad específica de fractura del ensayo de 1.15 kg/l del molino chileno.....	84
Anexo 9. Molino SAG: tablas peso retenido, granulometría Rossin-Rammler ensayo 1.7 kg/l.....	85
Anexo 10. Molino SAG: tablas peso retenido, granulometría Rossin-Rammler ensayo 1.9 kg/l.....	86
Anexo 11. Molino SAG: tablas peso retenido, granulometría Rossin-Rammler ensayo 1.5 kg/l.....	87
Anexo 12. Gráficas para el cálculo de la velocidad específica de fractura del ensayo de 1.7 kg/l del molino SAG.....	88
Anexo 13. Gráficas para el cálculo de la velocidad específica de fractura del ensayo de 1.9 kg/l del molino SAG.....	89
Anexo 14. Gráficas para el cálculo de la velocidad específica de fractura del ensayo de 1.5 kg/l del molino SAG.....	90
Anexo 15. Molino de bolas de laboratorio: tablas peso retenido, granulometría Rossin-Rammler ensayo 1.9 kg/l con carga de distribución 10% de bolas grandes, 10% de bolas medianas y 80% pequeñas.	91

Anexo 16. Molino de bolas de laboratorio: tablas peso retenido, granulometría Rossin-Rammler ensayo 1.5 kg/l con carga de distribución 10% de bolas grandes, 10% de bolas medianas y 80% pequeñas.	92
Anexo 17. Molino de bolas de laboratorio: tablas peso retenido, granulometría Rossin-Rammler ensayo 1.7 kg/l con carga de distribución 10% de bolas grandes, 10% de bolas medianas y 80% pequeñas.	93
Anexo 18. Molino de bolas de laboratorio: tablas peso retenido, granulometría Rossin-Rammler ensayo 1.5 kg/l con carga de distribución 80% de bolas grandes, 10% de bolas medianas y 10% pequeñas.	94
Anexo 19. Molino de bolas de laboratorio: tablas peso retenido, granulometría Rossin-Rammler ensayo 1.9 kg/l con carga de distribución 80% de bolas grandes, 10% de bolas medianas y 10% pequeñas.	95
Anexo 20. Molino de bolas de laboratorio: tablas peso retenido, granulometría Rossin-Rammler ensayo 1.7 kg/l con carga de distribución 80% de bolas grandes, 10% de bolas medianas y 10% pequeñas.	96
Anexo 21. Molino de bolas de laboratorio: tablas peso retenido, granulometría Rossin-Rammler ensayo 1.9 kg/l con carga de distribución 60% de bolas grandes, 30% de bolas medianas y 10% pequeñas.	97
Anexo 22. Molino de bolas de laboratorio: tablas peso retenido, granulometría Rossin-Rammler ensayo 1.5 kg/l con carga de distribución 60% de bolas grandes, 30% de bolas medianas y 10% pequeñas.	98
Anexo 23. Molino de bolas de laboratorio: tablas peso retenido, granulometría Rossin-Rammler ensayo 1.7 kg/l con carga de distribución 60% de bolas grandes, 30% de bolas medianas y 10% pequeñas.	99
Anexo 24. Gráficas para el cálculo de la velocidad específica de fractura del ensayo de 1.9 kg/l del molino de bolas de laboratorio con carga de distribución 10% de bolas grandes, 10% de bolas medianas y 80% pequeñas.	100
Anexo 25. Gráficas para el cálculo de la velocidad específica de fractura del ensayo de 1.5 kg/l del molino de bolas de laboratorio con carga de distribución 10% de bolas grandes, 10% de bolas medianas y 80% pequeñas.	101
Anexo 26. Gráficas para el cálculo de la velocidad específica de fractura del ensayo de 1.7 kg/l del molino de bolas de laboratorio con carga de distribución 10% de bolas grandes, 10% de bolas medianas y 80% pequeñas.	102

Anexo 27. Gráficas para el cálculo de la velocidad específica de fractura del ensayo de 1.5 kg/l del molino de bolas de laboratorio con carga de distribución 80% de bolas grandes, 10% de bolas medianas y 10% pequeñas.	103
Anexo 28. Gráficas para el cálculo de la velocidad específica de fractura del ensayo de 1.9 kg/l del molino de bolas de laboratorio con carga de distribución 80% de bolas grandes, 10% de bolas medianas y 10% pequeñas.	104
Anexo 29. Gráficas para el cálculo de la velocidad específica de fractura del ensayo de 1.7 kg/l del molino de bolas de laboratorio con carga de distribución 80% de bolas grandes, 10% de bolas medianas y 10% pequeñas.	105
Anexo 30. Gráficas para el cálculo de la velocidad específica de fractura del ensayo de 1.9 kg/l del molino de bolas de laboratorio con carga de distribución 60% de bolas grandes, 30% de bolas medianas y 10% pequeñas.	106
Anexo 31. Gráficas para el cálculo de la velocidad específica de fractura del ensayo de 1.5 kg/l del molino de bolas de laboratorio con carga de distribución 60% de bolas grandes, 30% de bolas medianas y 10% pequeñas.	107
Anexo 32. Gráficas para el cálculo de la velocidad específica de fractura del ensayo de 1.7 kg/l del molino de bolas de laboratorio con carga de distribución 60% de bolas grandes, 30% de bolas medianas y 10% pequeñas.	108
Anexo 33. Velocidad de fractura para las distintas densidades.	109

**ANÁLISIS DE LA CINÉTICA DE MOLIENDA ENTRE MOLINO
CHILENO, MOLINO DE BOLAS DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO
FIRSTMETAL Y MOLINO SAG A ESCALA DE LABORATORIO,
VARIANDO EL PORCENTAJE DE HUMEDAD**

RESUMEN

El presente trabajo tuvo como finalidad identificar el equipo de molienda más idóneo para la planta de tratamiento FIRSTMETAL, mediante la determinación de la cinética de fractura en los molinos chileno, de bolas y SAG, utilizando material estéril de mina. Inicialmente, se desarrollaron ensayos de velocidad de fractura variando el porcentaje de humedad en los molinos chilenos y de bolas pertenecientes a la planta, para luego desarrollar a escala de laboratorio un experimento semejante para un molino SAG y un molino de bolas, al cual adicionalmente se procedió a variar el tamaño de los medios moledores.

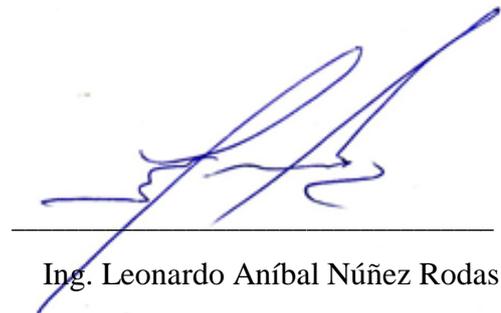
La conclusión final de la investigación fue que el molino ideal para este material es el molino de bolas de planta, con una distribución del 55% de bolas de 4 pulgadas, 32.5% de 3 pulgadas y el 12.5% de 2 pulgadas, y una densidad de pulpa de 1.7 kg/l ya que presenta la menor velocidad de fractura.

Palabras clave: Cinética de fractura, molino chileno, molino de bolas, molino SAG.



Ing. Eduardo Andrés Luna Méndez

Director del Trabajo de Titulación



Ing. Leonardo Aníbal Núñez Rodas

Coordinador de Escuela



Paulina Patricia Parra Sumba

Autora



Ismael Favio Tapia Ruilova

Autor

**ANALYSIS OF THE GRINDING KINETICS BETWEEN CHILEAN MILL,
FIRSTMETAL TREATMENT PLANT'S BALL MILL AND LABORATORY
SCALE'S SAG MILL, VARYING THE MOISTURE PERCENTAGE**

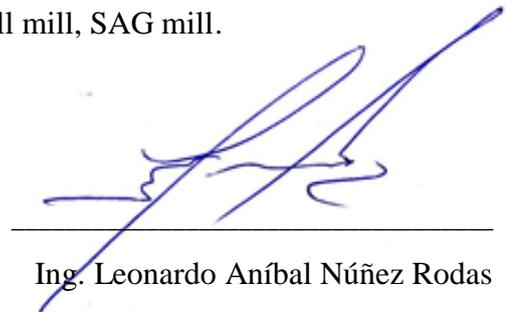
ABSTRACT

The purpose of this work was to identify the most suitable grinding equipment for the FIRSTMETAL treatment plant by determining the fracture kinetics in the chilean, ball and SAG mills through tailing material. Initially, fracture rate tests were developed by varying the percentage of humidity in the chilean and ball mills belonging to the plant. Then a similar experiment was developed at a laboratory scale for a SAG mill and a ball mill, to which the size of the grinding media was additionally varied. The final conclusion of the research was that the ideal mill for this type of material is the plant ball mill, with a distribution of 55% 4-inch balls, 32.5% 3-inch balls and 12.5% 2-inch balls, and a pulp density of 1.7 kg/l since it has the lowest fracture rate.

Key words: Fracture kinetics, chilean mill, ball mill, SAG mill.



Ing. Eduardo Andrés Luna Méndez
Director of the Degree Project



Ing. Leonardo Aníbal Núñez Rodas
Coordinator of the School



Paulina Patricia Parra Sumba
Author



Ismael Favio Tapia Ruilova
Author

Translated by



Ismael Tapia

Paulina Patricia Parra Sumba

Ismael Favio Tapia Ruilova

Trabajo de Titulación

Ing. Eduardo Luna Méndez

Marzo, 2022

**ANÁLISIS DE LA CINÉTICA DE MOLIENDA ENTRE MOLINO
CHILENO, MOLINO DE BOLAS DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO
FIRSTMETAL Y MOLINO SAG A ESCALA DE LABORATORIO,
VARIANDO EL PORCENTAJE DE HUMEDAD**

INTRODUCCIÓN

La molienda es uno de los procesos fundamentales e indispensables en el beneficio mineral, es por ello que un buen proceso de conminución es de vital importancia ya que este no solo afectará la fragmentación del material de interés sino también la economía de la empresa que lleva a cabo dicho proyecto, y podría retrasar procesos posteriores del tratamiento mineral como la concentración gravimétrica, para la obtención de los minerales de interés. Para ello, es necesario conocer y analizar las variables de funcionamiento más adecuadas de dicho proceso, es así que, en el presente trabajo investigativo se ha decidido analizar variables poco estudiadas de los molinos, que son la cinética de fractura y la variación del porcentaje de humedad.

El factor fundamental para llevar a cabo un adecuado proceso de molienda es el tipo de maquinaria empleada, es por esto que, en la presente investigación, además de las variables de la velocidad de fractura y humedad, se ha decidido analizar los molinos de uso más común en nuestra región que son: molino SAG, de bolas y chileno, con el afán de evitar que exista un proceso de fragmentación inadecuado en la planta y conocer el tipo de maquinaria más adecuada. Para ello se realizaron ensayos con basalto, proveniente de la roca de caja de la concesión minera “San Sebastián”, la cual contrata los servicios de la planta de tratamiento FIRSTMETAL.

Los ensayos se desarrollaron con tres diferentes porcentajes de humedad (1.5, 1.7 y 1.9 kg/l) tomándose muestras a cinco tiempos distintos (3, 6, 9, 12 y 15 minutos), salvo

en el caso del molino chileno en donde la densidad no tiene mayor influencia en los resultados finales, por lo que se trabajó con solo una densidad (1.15 kg/l) para los cinco tiempos mencionados anteriormente, dando como resultado un total de 80 ensayos.

Los ensayos se llevaron a cabo tanto en la planta de tratamiento como en laboratorio, con el objetivo de poder analizar más variables de funcionamiento, tales como la distribución de los medios moledores, en el caso del molino de bolas, para así observar cómo influye este factor en la conminución y poder mejorar este proceso en planta, determinándose así que el molino más eficiente para este tipo de material es el molino de bolas de planta con una distribución de bolas que corresponden al 50% de bolas de 4 pulgadas, 32.5% de 3 pulgadas y el 12.5% de 2 pulgadas y una densidad de pulpa de 1.7 kg/l ya que presenta una menor velocidad de fractura denotando una mayor zona de impacto.

CAPÍTULO 1

MARCO TEÓRICO

1.1. Antecedentes

La planta de tratamiento FIRSTMETAL es una empresa prestadora de servicios especializada en la conminución y beneficio de minerales, la misma carece de estudios a profundidad sobre la cinética de molienda, razón por la cual se ha permitido el ingreso a sus instalaciones, para ahondar en este tema y así mejorar su proceso de molienda. Esta planta labora con varias empresas aledañas a la zona, razón por la cual se contactó con la concesión “San Sebastián” para poder acceder a su material estéril de mina y así desarrollar los ensayos pertinentes para el presente trabajo de titulación.

En sus instalaciones cuentan con 2 molinos de bolas de 6 pies de diámetro y 8 pies de largo, además de 8 molinos chilenos de 4 metros de diámetro con cuatro ruedas giratorias de 1.2 metros de diámetro cada una. Su producción no es constante debido a que depende del material enviado por sus contratistas mineros, por lo que, existen temporadas en las que procesan una mayor cantidad de material que en otras.

1.2. Georreferenciación y geología general

La empresa FIRSMETAL S.A. se encuentra localizada en el cantón Camilo Ponce Enríquez de la provincia del Azuay, en la parroquia Shumiral, a treinta minutos del centro parroquial, accediéndose a la misma por medio de una vía de tercer orden.



Figura 1.1 Ubicación satelital de FIRSTMETAL.

Fuente: Google Earth.

Por otro lado, la empresa de la cual se obtuvo el material para los ensayos y que utiliza los servicios de FIRSTMETAL, se encuentra ubicada en el sector Río Villa, cantón Camilo Ponce Enríquez, en la concesión minera “San Sebastián” (Cód. 101455) cuyas coordenadas PSAD 56 son:

Tabla 1.1 Coordenadas de la concesión “San Sebastián”

CONCESIÓN “SAN SEBASTIÁN”	
X	Y
641 000	9 662 590
642 000	9 662 590
642 000	9 662 740
642 340	9 662 740
642 340	9 662 350
641 000	9 662 350

Fuente: Título minero de la concesión “San Sebastián”

El cantón Camilo Ponce Enríquez se encuentra dentro de las formaciones geológicas Piñón, Saraguro y Tarqui, según los estudios realizados en el Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial del cantón.

1.2.1. Formación Piñón

Esta formación debe su nombre al Río Piñón, forma parte de Cretácico Inferior y parte del Cretácico Superior. Se encuentra conformada mayormente por rocas extrusivas como basaltos o andesitas basálticas y presenta elevaciones de 50 a 200 m de altura con vertientes de forma convexas o rectilíneas y cimas redondeadas.

Dentro del cantón Camilo Ponce Enríquez, la formación se extiende desde el Sur, centro y Norte del mismo, alcanzando alturas de 1800 a 3200 m.s.n.m en los asentamientos de Lagunas, Campanas, Pijilí Chico, Palmas y Naranjos, comprendiendo así más del 50% del área total del cantón. (Guerrero, 2015)

1.2.2. Formación Tarqui

La formación se divide en tres unidades estratigráficas: composiciones de tobas andesíticas, una secuencia de tobas de composición dacíticas y otra secuencia de tobas riolíticas; estos piroclastos alternan con flujos delgados de composición similar. La unidad superior contiene flujos de riolita homogénea de grano medio que afloran en la parte alta de los valles formando colinas bajas. Las rocas presentan alteraciones como consecuencia de procesos metasomáticos e hidrotermales.

Esta formación se presenta en la zona alta del cantón Camilo Ponce Enríquez, en la comunidad de Pichilcay a una altura de 3200 a 3800 m.s.n.m., conformando el 0,2 % del área total del cantón. (Guerrero, 2015)

1.2.3. Formación Saraguro

Esta formación comprende un volcanismo calco-alcalino del periodo oligoceno, asociado con un arco continental formado por la subducción de la placa Nazca bajo la placa Sudamericana. Son predominantes las composiciones andesíticas o dactílicas y también son comunes rocas riolíticas. Las rocas dacíticas denotan una textura porfirítica, con fenocristales de cuarzo y plagioclasas, mientras que las lavas andesíticas, las brechas y las tobas muestran un mayor fracturamiento y fuertes procesos de meteorización.

En el cantón Camilo Ponce Enríquez, esta formación se encuentra al sureste conformado por las comunidades de La Rica, Moras, Guena y San Vicente de Cachi, correspondiente al 10% del total del área del cantón. (Guerrero, 2015)

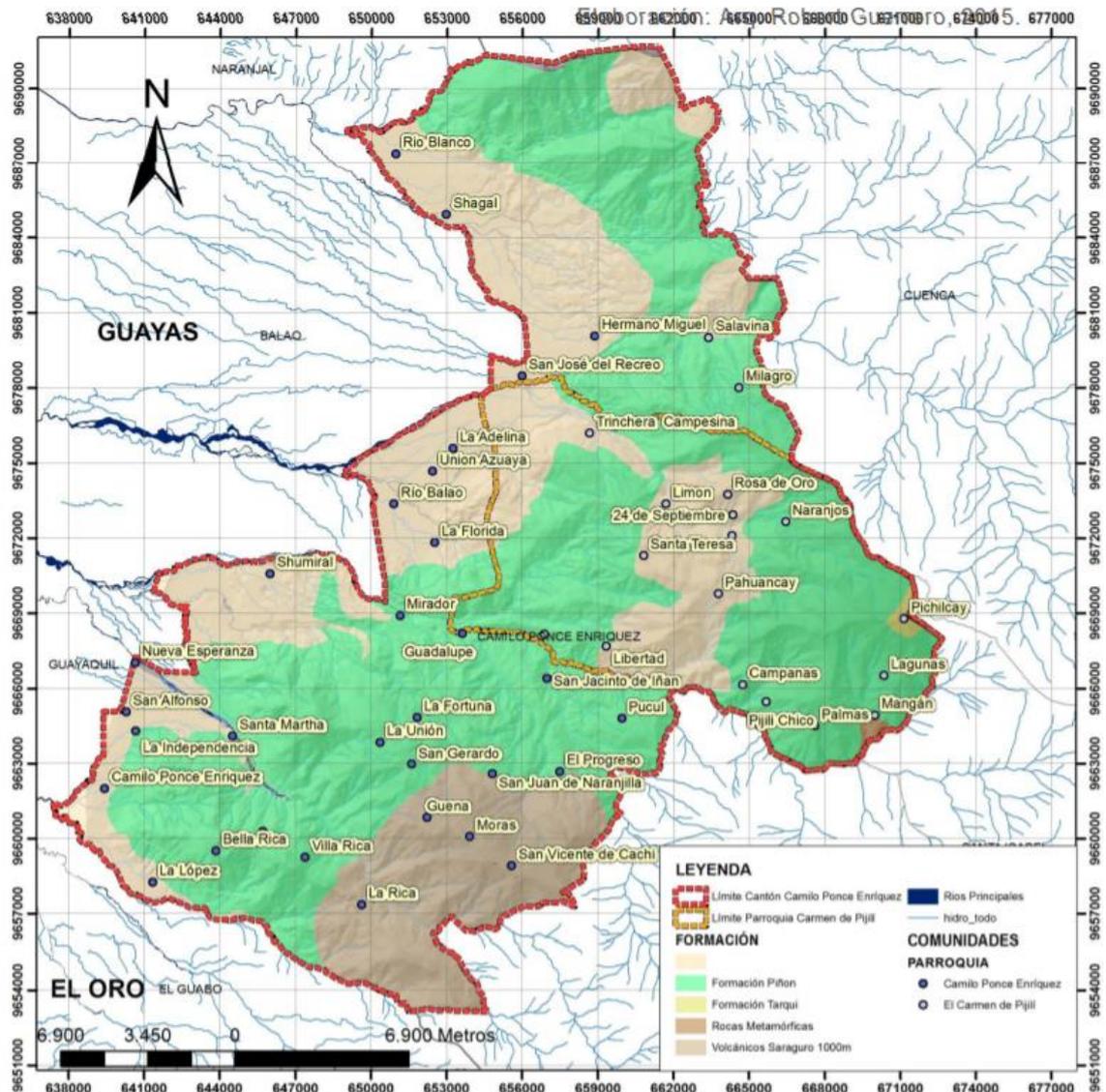


Figura 1.2 Geología del cantón Camilo Ponce Enríquez.

Fuente: (Guerrero, 2015)

1.3. Molienda

El proceso de molienda es una de las fases más importantes dentro de cualquier operación minera, dado que, junto con la operación de chancado, es donde se genera el mayor consumo energético, lo que influye considerablemente en los costos unitarios y, por lo tanto, en la rentabilidad de la operación. Este proceso consiste en la separación (ruptura de la unión) de los granos de distintos minerales contenidos en las rocas, fuertemente entremezclados; cuanto más se liberan unos de otros más exitoso resultará el proceso de beneficio posterior. (Leyva, Fernández, González,

Sánchez, & Ferreiro, 2009) Esta separación se produce principalmente por una combinación de fuerzas de impacto, cizalla y abrasión.

La molienda se desarrolla a través de maquinaria conocida como molinos, los cuales pueden operar en húmedo (pulpas) o en seco. La molienda húmeda se caracteriza por unos elevados porcentajes de humedad (del 40% al 70 %), lo que provoca, como principal característica, que el material que ingresa posea una notable adherencia y un consumo menor de energía, debido a que la humedad disminuye la resistencia de los fragmentos del material, dentro de los equipos de molienda. Se trabaja en seco cuando la humedad es menor al 8 % (humedad superficial), prefiriendo que la humedad no sobrepase del 3% al 4 %. (Blanco, 2014)

En general, la molienda se desarrolla en húmedo debido a que no produce polvo, es más eficaz, permite un contacto mayor con los reactivos de flotación y facilita el transporte de los productos en procesos posteriores. (Cárcamo, 2003)

A continuación, se detalla las etapas de fragmentación ya que dentro de las mismas se encuentra el proceso de molienda, asimismo se especifica cada fase y la maquinaria utilizada.

Proceso	Etapas	Escalón	Humedad	Tipo de equipo
Fragmentación (Reducción de un bloque a tamaños menores)	Trituración (Etapa de la fragm. para tamaños gruesos)	Primaria Secundaria Terciaria	Seco o Húmedo	Trituradoras (Mandíbulas, conos, rodillos, martillos, etc.)
	Molienda (Etapa de la fragm. para tamaños finos)	Gruesa Media Fina Ultrafina	Seco o Húmedo	Molinos (Barras, bolas, SAG, autógenos y de guijarros)

Figura 1.3 Escalones de la fragmentación.

Fuente: (Blanco, 2014)

1.4. Molinos

Los molinos son grandes cilindros que giran sobre su propio eje y que albergan en su interior una mezcla del material junto con cuerpos moledores. Estos cuerpos permiten desarrollar la operación de conminución y pueden ser, en su gran mayoría, bolas de acero, barras de acero, guijarros, bolas de porcelana y el mismo mineral grueso. Además, el grado de fractura de la carga del molino será determinado por los

elementos anteriormente nombrados y la velocidad de rotación del mismo, dado que esta velocidad provoca la energía necesaria para la operación. Sin embargo, un porcentaje de energía se disipa como calor y ruido. (Cárcamo, 2003)

Existen dos tipos de operaciones según el tipo de alimentación y el tipo de descarga, estas se denominan batch y continua. La primera hace referencia cuando el proceso es interrumpido, teniendo que reiniciarlo y finalizarlo manualmente, cargando y descargando el material. Por otro lado, la operación continua se da cuando el diseño está desarrollado para que la carga y descarga se realice de manera ininterrumpida. (Cárcamo, 2003)

En cuanto a la operación del molino, esta comienza con el cilindro girando sobre ejes o extremos huecos. A continuación, se procede a la alimentación del molino introduciendo el material a moler mezclado con agua. Se debe analizar las distintas operaciones, por ejemplo, si hay que ajustar el contenido de sólidos en peso o volumen por el espacio hueco del eje, y también revisar la vida útil de los cuerpos molidores. Finalmente, por el otro extremo (según el tipo de vertido: de rebose, lateral, central, otro) se produce una salida continua de material molido, normalmente arrastrado por una corriente de agua (molienda en húmedo) o de aire (molienda en seco). (Blanco, 2014)

“El tiempo de residencia viene afectado por el tamaño del cilindro, volumen útil, y el caudal circulado.” (Blanco, 2014)

1.4.1. Partes del molino

Las partes fundamentales de un molino consisten en:

- **Coraza:** es generalmente de forma cilíndrica, muy resistente con anclaje de revestimientos interiores.
- **Cabezas laterales:** zonas con curvaturas que soportan grandes esfuerzos, por un axial ingresa la carga y por el axial opuesto se extrae el material fragmentado.
- **Boca de carga y descarga:** hendiduras donde se encuentran los rodamientos, la carga se la puede realizar por admisión directa, tambor de alimentación o alimentador de cuchara.

- **Rodamientos:** dinamizan el movimiento de giro disminuyendo significativamente los rozamientos.
- **Bancadas:** generalmente de hormigón armado, deben soportar el peso del molino.
- **Piñón de ataque:** corresponde al sistema de accionamiento, el cual debe estar correctamente protegido.
- **Rejilla:** componente de clasificación interna.
- **Blindaje o protecciones interiores:** material que resguarda la carcasa del molino, asiste en el efecto de molienda y disminuye el ruido.
- **Rejilla de salida:** se encuentra en la boca de descarga para impedir la entrada de cuerpos voluminosos en el clasificador. (Blanco, 2014)

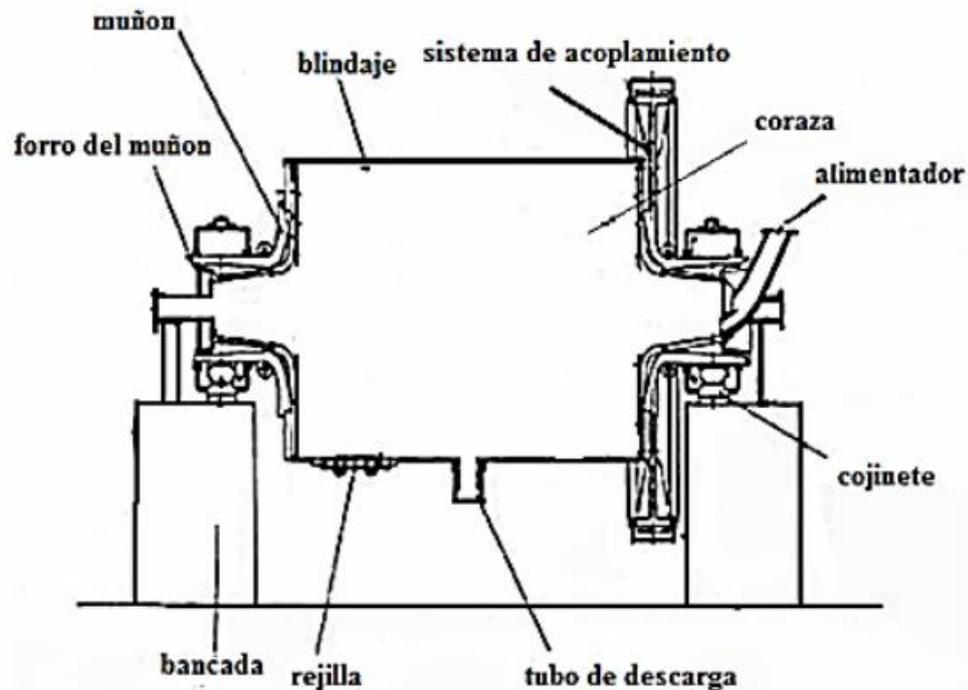


Figura 1.4 Esquema de las partes de un molino

Fuente: (Cabezas, 2017)

1.5. Tipos de molienda

1.5.1. Molienda convencional

Este tipo de molienda se la realiza en dos etapas, en la primera se utiliza un molino de barras y en la segunda un molino de bolas; sin embargo, en la actualidad se ha optado

por usar solo el molino de bolas dado que se obtienen buenos resultados. Dentro de estos molinos el material se mezcla con agua para obtener una molienda homogénea y eficiente. La pulpa que se obtiene pasa a la siguiente etapa que en la mayoría de los casos es la flotación. (Codelco , 2018)

1.5.2. Molienda no convencional

En este tipo de molienda un molino SAG reemplaza el chancado secundario y terciario, es así que el material pasa directamente del chancador primario al molino SAG, en donde es reducido por la acción de las mismas rocas que chocan entre sí, sumado a el impacto provocado por las bolas de acero presentes en el molino. Este efecto se produce debido a la forma y tamaño del molino SAG. (Arriagada, 2013)

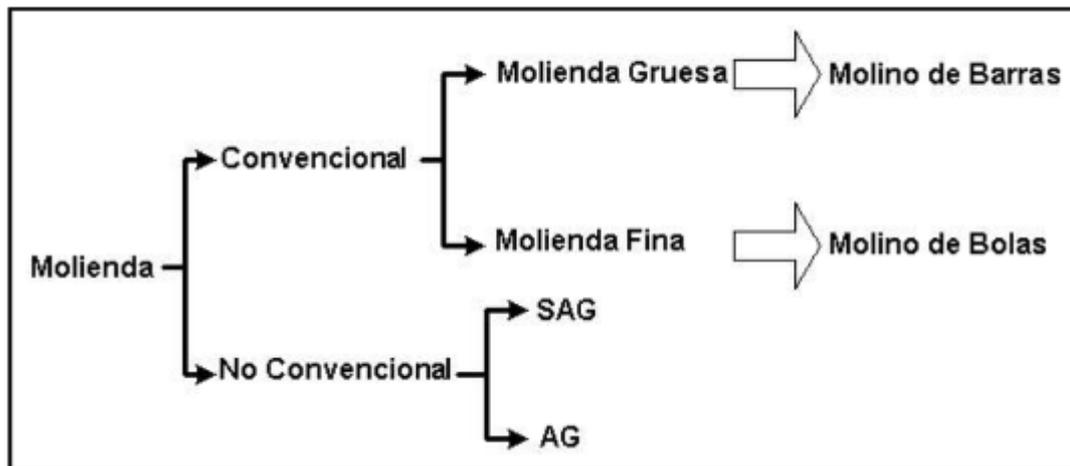


Figura 1.5 Tipos de molienda.

Fuente: (Arriagada, 2013)

1.6. Tipos de fractura en molienda

1.6.1. Impacto

Esto ocurre cuando las bolas de gran tamaño y algunas partículas de material de tamaño grande son levantadas por los lifters ganando energía potencial y posteriormente transformándola en energía cinética. Esto produce un impacto masivo que desintegra las partículas. Sucede cuando la energía se aplica directamente sobre la partícula y es mayor a la energía requerida para romper el material. (Austin & Concha, 1994)

1.6.2. Compresión

Este tipo de fractura se produce cuando un impacto masivo originado por los medios molidores y material de gran tamaño, desintegra las partículas. Es decir, la energía aplicada directamente sobre la partícula es mayor a la energía requerida para fracturar el material. (Austin & Concha, 1994)

1.6.3. Cizalle y fricción

Este mecanismo provoca que rocas irregulares tiendan a formar partículas aproximadamente esféricas en la molienda autógena. (Austin & Concha, 1994)

1.6.4. Abrasión

Esta fractura ocurre cuando la fricción produce un desgaste de las superficies, de esta manera rocas esféricas anteriormente formadas por cizalle, se desgastan a tal punto de formar rocas suaves, similares a los cantos rodados de los ríos. La abrasión y la cizalle conducen a la producción de material fino, denominando a este efecto, atrición. (Austin & Concha, 1994)

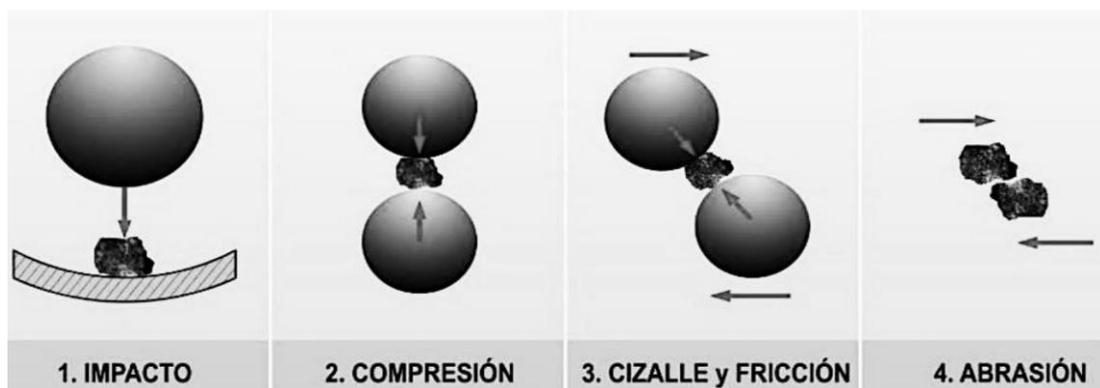


Figura 1.6 Mecánica de fractura.

Fuente: (Manuales de Tecsup, 2015)

1.7. Variables de operación del molino

1.7.1. Fracción de llenado

El grado de llenado es el porcentaje del volumen interno del molino que ocupa la carga, conformada por la mena a moler y los medios molidores. Este factor tiene repercusiones directas en el funcionamiento del molino, razón por la cual se suele trabajar con fracciones de llenado que se encuentran en el rango del 50% al 55% de

la carga del molino, ya que superior a estos porcentajes el grado de llenado aportará una masa que se opone al movimiento (Blanco, 2014) ocasionando que este incremento en el llenado total del molino vuelva la molienda nula. Sin embargo, en la práctica, la carga del molino suele estar entre el 40% al 55 %, del volumen, optando mayormente por el 45 % de llenado.

Entre los medios moledores quedan espacios que son llenados por el material a moler, por la geometría de los mismos, estos espacios representan el 20% de llenado en caso de que los elementos sean barras y el 40% de llenado en caso de que los medios moledores sean bolas.

Matemáticamente, el factor de llenado se puede calcular mediante la siguiente formula:

$$J = \frac{\text{masa de bolas/densidad de bolas}}{\text{volumen del molino}} * \frac{1}{0.6} \quad (1)$$

1.7.2. Carga de medios moledores

La carga de bolas representa la fracción o porcentaje del volumen que ocupan dichos elementos dentro del molino. El tamaño del material más grande de alimentación que se tenga, tiene que ser fragmentado por el medio moedor de mayor tamaño, es decir, los medios moledores de un mayor tamaño serán requeridos para fragmentar un material grueso, mientras que para un material de menor grosor (fino) serán necesarios medios moledores de un menor tamaño (Martinez & Diaz, 2016). Se calcula a través de la siguiente ecuación:

$$Vb = \text{fracción de llenado de bolas} * Vt * (1 - \text{porosidad}) \quad (2)$$

Donde:

- Vb : carga de medios moledores
- Vt : volumen del molino

La fracción de llenado de bolas varía de acuerdo al tipo de molino, es así que para un molino SAG se encuentra entre el 4% y el 15% y para un molino de bolas entre el 25% y 40% (Alcántara, 2008)

1.7.3. Velocidad de giro

Es un parámetro de gran importancia tanto para la misma operación como para el consumo, puesto que esta gobierna la naturaleza del producto y la cantidad de desgaste sobre los revestimientos de la coraza, (Cárcamo, 2003) y si es que, se implementa una velocidad ideal, las bolas ascenden e impactarán sobre el pie de la carga y no sobre el revestimiento. Esto viene determinado por el conocimiento práctico de la trayectoria de las bolas.

La velocidad de rotación del molino producirá los siguientes efectos:

- **Efecto cascada:** este se produce cuando las velocidades son relativamente bajas, lo que ocasiona que los elementos del molino rueden hacia la parte inferior, hasta el pie del molino, y la pulverización se dé por un efecto de abrasión, por lo que la molienda es más fina, con una considerable producción de lamas y mayor desgaste del revestimiento. (Cárcamo, 2003)
- **Efecto catarata:** este se produce cuando las velocidades son relativamente altas, lo que produce que los elementos del molino sean proyectados de la carga para seguir una serie de parábolas antes de caer al pie de la carga, lo que ocasiona que la molienda se dé por un efecto de impacto y que el producto final sea más grueso, así como que el desgaste del revestimiento sea menor. (Cárcamo, 2003)

El recorrido que siguen los medios moledores y la carga comprende dos recorridos: el primero consiste en la sección ascendente continua al revestimiento de la coraza, donde el movimiento es circular, y el segundo consiste en la sección de caída hacia el pie de la carga en donde el movimiento es parabólico. La función de la velocidad de rotación es, por lo tanto, que los medios moledores caigan sobre el pie de la carga y no sobre el revestimiento. (Cárcamo, 2003)

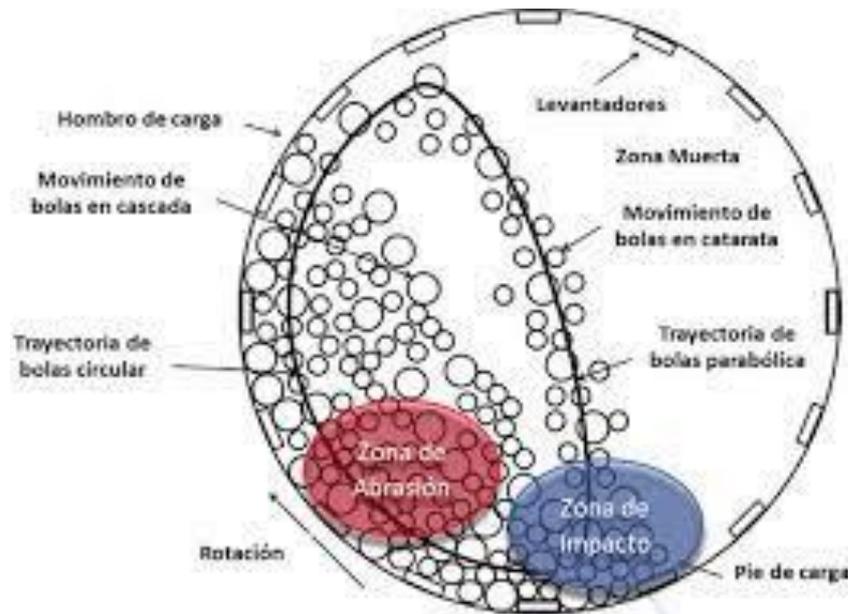


Figura 1.7 Perfil de carga en el molino de bolas en un evento de molienda.

Fuente: (Rosales , Andrade, Alvarado, Espinosa, & Nava, 2020)

1.7.4. Velocidad crítica

La velocidad crítica hace referencia a la fuerza centrífuga que se ejerce sobre los elementos moledores, equilibrando el peso de los mismos en todo momento, es así que estos quedan adheridos a las paredes internas del molino y no producen ningún efecto de rozamiento necesario para que el material sea molido. Es por ello que el molino debe trabajar a velocidades por debajo de la crítica. (Universidad de Buenos Aires, 2015)

El valor de la velocidad crítica corresponde a la inversa de la raíz cuadrada del diámetro del molino y viene dada por:

$$V_{crit} = \frac{42.2}{\sqrt{D - d}} \quad (3)$$

En donde

- V_c : Velocidad crítica en r.p.m
- D : Diámetro interno del molino en m
- d : Diámetro del medio molidor más grande en m

El diámetro interno se lo puede calcular mediante la siguiente expresión:

$$D = Dn - 2Ef - \frac{Db}{2} \quad (4)$$

En donde:

- *Dn*: Diámetro nominal del molino, indicado normalmente en catálogo
- *Ef*: Espesor medio de los forros
- *Db*: Diámetro medio de las bolas/barras

Se puede aseverar, entonces, que la velocidad crítica depende directamente del diámetro interno y no se ve afectada por el tipo de material a moler. “La velocidad real del molino se suele fijar en un porcentaje de esta velocidad crítica y varía entre el 60% y el 80% normalmente.” (Blanco, 2014)

1.7.5. Velocidad de fractura

La velocidad específica de fractura es una medida concluyente para la conducta cinética de la molienda debido a la relación inversa que tiene con el consumo energético del proceso. (Colorado, Llano, & Osorio, 2020) Las velocidades máximas de fractura se alcanzan aproximadamente a la velocidad de máximo consumo de potencia, normalmente cerca de un 75% de la velocidad crítica, dependiendo de la carga de bolas y del tipo de barras levantadoras. (Austin & Concha, 1994)

La velocidad específica de ruptura es el efecto neto de la suma de los mecanismos de fractura como: impacto, compresión, cizalle y atrición que se producen dentro de un molino, y para definirlos se puede considerar al molino como una caja con un volumen que contiene una masa de polvo. Si se observa un intervalo de un tamaño particular, que comprende una fracción de polvo con un tamaño y masa determinada, la velocidad específica de ruptura de este tamaño es la velocidad fraccionaria de ruptura. (Austin & Concha, 1994)

El proceso de molienda más eficiente se suscita en condiciones en las cuales los valores de la velocidad de ruptura de un tamaño son máximos. Si la geometría del molino o las condiciones de carga de bolas cambian, también lo harán la intensidad de fractura y por ende la velocidad de ruptura variará. (Austin & Concha, 1994)

Cuando la masa retenida (*w*) en el molino es constante, se obtiene:

$$\log[w_1(t)] = \log[w_1(0)] - S_i t / 2.3 \quad (5)$$

Donde:

- S_i : velocidad específica de fractura

En base a la suposición de cinética de orden uno $n=1$, se obtiene el siguiente gráfico:

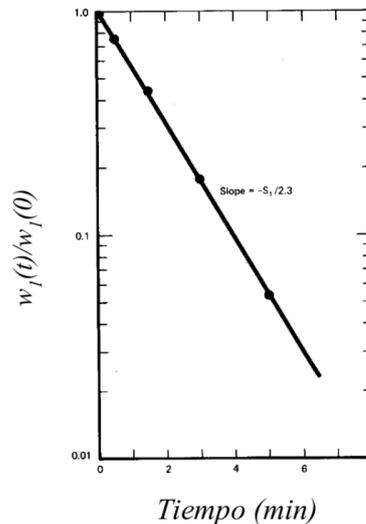


Figura 1.8 Ejemplo de gráfico de primer orden.

Fuente: (Austin & Concha, 1994)

Cuando se obtiene el valor de la pendiente se procede a multiplicarlo por un valor de 2.3 calculándose así la velocidad específica de fractura.

1.7.6. Cinética de molienda

Se denomina cinética de molienda a la variación de la composición granulométrica del material que se somete a la molienda, es decir, es la regularidad de la disminución del tamaño grueso en el proceso de molienda. El conocimiento de esta cinética es esencial para guiar la operación de molienda en los molinos de bolas y para seleccionar las condiciones de trabajo más eficientes, es así que resulta indispensable conocer cómo se desarrolla este proceso en el tiempo. (Coello, 1993)

Para ello se realizan ensayos en un molino de acción periódica que comprende la toma de muestras a intervalos de tiempos, para luego determinar el porcentaje de gruesos y representarlos en un gráfico en donde se indica la masa gruesa retenida en el tamiz vs el tiempo de duración de la molienda. Estos gráficos indican el descenso normal de la

cantidad de gruesos en el material molido y dependen de las características del material a moler y de las condiciones de molienda. (Leyva et al., 2009)

1.7.7. Humedad de los productos a moler

En general, la molienda se la desarrolla con un pequeño porcentaje de humedad, cerca del 1%, lo que facilita la ruptura de los granos. Sin embargo, si la humedad se encuentra en 8% o 9% la productividad de la molienda aumenta logrando alcanzar un porcentaje de hasta el 55% o 60% de sólidos en peso dentro del molino. Por otro lado, si el contenido de agua sobrepasa estos valores el rendimiento disminuye produciéndose un material viscoso que recubre los elementos, lo que impide los efectos de abrasión e impacto. (Blanco, 2014)

Resulta preferible el desarrollo de una molienda húmeda, debido a las siguientes ventajas operacionales.

Tabla 1.2 Comparación entre molienda húmeda y molienda seca.

Molienda Húmeda	Molienda Seca
Requiere menos potencia por tonelada tratada.	Requiere mas potencia por tonelada tratada.
Emite poca cantidad de polvo y ruido, por lo que no requiere equipos adicionales para su tratamiento.	Emite considerable cantidad de polvo y ruido, por lo que requiere equipos adicionales para su tratamiento.
Consume más revestimiento (por corrosión).	Consume menos revestimiento.
Presenta mayor facilidad de transporte	Presenta mayor dificultad de transporte

Fuente: Elaboración propia.

1.7.8. Densidad de pulpas

La pulpa es una mezcla matemática de un porcentaje de sólidos de una granulometría casi uniforme y otra constituida generalmente por agua y se comporta como un fluido.

Posee sus propias características como gravedad específica o densidad, peso y volumen, que suelen ser referidos en porcentajes del peso o volumen de sus materiales constituyentes. La densidad de pulpa se mide bajo el empleo de densímetros o picnómetros. (Alderete, 2012)

$$Densidad\ de\ Pulpa = \frac{(Peso\ Sólido) + (Peso\ Líquido)(ton)}{(Volumen\ Sólido) + (Volumen\ Líquido)(m^3)} \quad (6)$$

1.8. Tipos de molinos

1.8.1. Molinos chilenos

Los molinos chilenos destacan por las ventajas económicas que brindan, tales como: su facilidad de utilización, construcción y mantenimiento. Estos equipos procesan poca cantidad de tonelaje, por lo que se los ocupa principalmente en pequeña minería.

De acuerdo a su capacidad de procesamiento, pueden llegar a ser de varias ruedas y su labor se fundamenta en el uso de un eje principal con brazos, que mueven las ruedas en círculos a una velocidad angular de 30 a 35 rpm. Estas están constituidas por secciones encementadas que les brindan un peso considerable. En cuanto al exterior, este ha sido revestido por forros metálicos soldados denominados calces, en donde se apresan y fragmentan el material contra el piso, que se encuentra recubierto por planchones metálicos, conocidos como quesos. El mantenimiento de los calces y quesos debe ser constante, debido a que sufren un continuo desgaste al realizar su recorrido y al momento de fragmentar la roca, su tiempo de vida es aproximadamente tres meses. (León, 1999)

La pulpa resultante suele ser del 3% al 4% de sólido en peso, con un alto porcentaje de retención del mineral de interés dentro del molino, ya que en las compuertas del mismo se tiene una malla que da paso a los granos de material más reducidos hacia los canales.

Como una gran cantidad del mineral se queda retenido dentro del molino sin posibilidad de salir, es indispensable detener el equipo hasta lavar y recuperar todo lo que permanece en el interior. Cuando se realiza el lavado del molino, se obtienen dos productos, “la olla” que constituye todo el material fino que pasa la malla, y la “alverjilla” que comprende el material que no la pasó. Este último se lo emplea junto

con arena para resguardar los quesos evitando que se levanten y ocasionen un deterioro en el molino. (León, 1999)



Figura 1.9 Molino Chileno.

Fuente: (Rodríguez, 2019)

1.8.2. Molinos de bolas

El molino de bolas destaca por la utilización de bolas de acero en conjunto con el material a moler, en su interior se genera un giro a una velocidad determinada, que arrastra los medios moledores y el mineral hacia arriba, pegados a la pared, para que luego caigan por su propio peso, girando sobre sí y golpeándose entre ellos y contra los revestimientos interiores, produciéndose una fuerza de impacto que es responsable de la pulverización. (Cabezas, 2017) Otra característica de este tipo de molinos es que tiene una razón de largo a diámetro de 1.5 a 1 o menor y no existe un criterio para elegir una razón L/D determinada.



Figura 1.10 Molino de bolas.

Fuente: (Cosmos, 2020)

Los molinos forman parte de los circuitos de molienda, los cuales pueden ser circuitos abiertos y cerrados y es necesario considerar estos dos factores simultáneamente.

Dentro de los circuitos abiertos existen uno o dos molinos con o sin clasificación por tamaño, pero sin recirculación del material molido. Este tipo de circuito no es muy utilizado en el proceso de minerales debido a que no se tiene un control puntual sobre la distribución del tamaño de las partículas en el producto. La velocidad a la que el material a ser tratado ingresa en el circuito debe ser considerablemente baja, para que de esta manera cada partícula resida el tiempo suficiente en el molino y poder conseguir un tamaño del producto ideal. Como consecuencia, mucho material queda sobre molido, lo que significa que existe un consumo energético que sobrepasa lo requerido. Por otro lado, los circuitos cerrados son los más utilizados en el tratamiento de minerales y están constituidos por uno o más molinos y clasificadores. El material descargado por el molino es separado en gruesos y finos, siendo este último el producto final, el cual avanza a la siguiente etapa del tratamiento, por el contrario, el grueso regresa al molino (carga circulante). De esta manera es posible controlar la sobre molienda y el desperdicio energético. (Cárcamo, 2003)

Existen diferentes tipos de descarga en el molino de bolas, que se especifican en el siguiente cuadro:

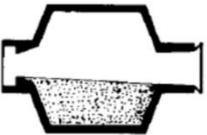
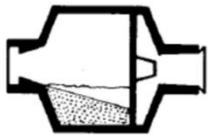
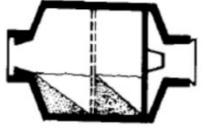
Tipos de Descarga			
	Rebalse	Diafragma	Compartimentado
Tipos de Molienda	Húmeda	Seca o Húmeda	Seca o Húmeda
Tipos de Circuitos	Cerrado	Cerrado	Cerrado o Abierto
Tamaño de Molienda	Fino – Malla 200	Intermedio (Vía Húmeda) – Malla 65-100; Fino (Vía Seca) – Malla 325	Fino – Malla 150-325
Tamaño Máximo de Alimentación	Malla 10-14	< 1/2"	< 1/2"
Relación L/D	1-1,5:1	1-1,5:1	C. Abierto: 3,5-5:1 C. Cerrado: 2,5-3,5:1
% Típico de Vel. Crítica	65-70 %	68-78%	C. Abierto: 65-75 % C. Cerrado: 70-78 %
% de Carga	40-45 %	35-50 %	30-50 %

Figura 1.11 Tipos de descarga.

Fuente: (Universidad de Buenos Aires, 2015)

1.8.2.1. Bolas como medios moledores

Las bolas utilizadas en el molino pueden estar constituidas de acero forjado, acero fundido o hierro colado. Las bolas de acero forjado son sometidas a un procedimiento térmico que les brinda una propiedad óptima de desgaste. Las bolas suaves poseen una dureza Brinell entre valores de 350 y 450, así mismo, las bolas duras alcanzan unos valores que superan los 700 de dureza. (Alcántara, 2008)

Los principales parámetros que influyen en el tamaño de los medios moledores son la finura del material a moler y el precio de mantenimiento para la carga de las bolas. Un material grueso que ingrese de alimento va a necesitar una bola de un mayor tamaño que para un material fino. (Alcántara, 2008)

El tamaño de bola mayor, y de reposición con la alimentación, se puede calcular mediante la siguiente fórmula propuesta por Bond:

$$D_{bola}(mm) = 25,4 * \sqrt{\frac{D_{80}}{K}} * \sqrt[3]{\frac{W_i * \rho}{fVc * \sqrt{3,281 * D_{molino}}}} \quad (7)$$

En donde:

- D_{bola} : el diámetro de la bola de acero en mm
- W_i : el índice de Bond relacionado a tonelada corta
- fV : es la velocidad de giro en porcentaje de la velocidad crítica
- D_{molino} : es el diámetro interior del molino en metros
- K : es una constante que toma los valores siguientes:
 - 350: molinos de rebose en circuito abierto y cerrado, con pulpa
 - 330: molinos de diafragma en circuito abierto y cerrado, en pulpa
 - 335: molinos de diafragma en circuito abierto y cerrado, en seco
- Cuando se utilicen bolas de otro material distinto al del acero se debe corregir el diámetro máximo de alimentación de los medios moledores para conseguir similares efectos de molienda mediante la expresión:

$$D_{bola}(silice, otro) = D_{bola} * \sqrt[3]{\frac{7,8}{\rho_b}} \quad (8)$$

1.8.3. Molinos SAG

Los molinos SAG constituyen maquinaria de gran tamaño, llegando a alcanzar 40 pies de diámetro por 25 pies de largo y funcionan con potencias de 28000 kW. Están diseñados para moler altos tonelajes y cuentan con parrillas de descarga en la parte de la salida del material, que sirve para su pre-clasificación. El mineral ingresa con un tamaño aproximado de 8 pulgadas y es mezclado con agua (y en ocasiones también con reactivos como cal). La conminución se ejerce por la acción combinada del impacto generado por los minerales y las bolas de acero de entre 4 y 6 pulgadas ya añadidas. La carga es precipitada en caída libre, lo que produce una fuerza de impacto y abrasión más efectiva y con menos consumo energético que una molienda convencional, evitando fases de chancado secundario y terciario. (Silva, 2013)

La parrilla de descarga hace posible que el material grueso no se salga del molino, hasta que haya alcanzado un tamaño menor o igual que las rendijas de la parrilla. Esto condiciona el flujo de alimentación al molino ya que va a depender de cuanto material queda retenido en el interior. Asimismo, el flujo de alimentación y la tasa de molienda deben estar en equilibrio, puesto que, si la tasa de molienda disminuye, el molino se

llenará apresuradamente y esto a su vez generará que la potencia consumida por el motor sea mucho más alta. (Cárcamo, 2003)

En el molino SAG se puede llegar a formar una partícula con tamaño “crítico” entre 1 y 3 pulgadas, llamada pebbles. Esto se ocasiona por efectos de astillamiento y abrasión del material con tamaños superiores a las 3 pulgadas, presentando un alto nivel de resistencia a la molienda por lo que es necesario desarrollar su conminución en chancadores de pebbles que suelen ser de tipo cónico de cabeza corta, impidiendo así una posible sobrecarga de material crítico. (Silva, 2013)



Figura 1.12 Molino SAG.

Fuente: (Energiminas, 2019)

1.9. Granulometría

La granulometría indica los variados tamaños que presenta la muestra, se lo representa en un porcentaje de peso parcial de cada tamaño que quedó retenido o que atravesó un determinado tamiz, utilizado para su medición. Esta proporción se indica de mayor a menor tamaño y se representa mediante tablas y curvas que ayudan a su evaluación y comprensión. La granulometría no comprende una característica fija en el tiempo, varía por la influencia de factores tales como:

- Mineralogía
- Forma de obtención en la mina
- Tipo y graduación de los molinos

- Velocidad de las correas
- Clasificación en las zarandas

Para determinar la granulometría de un material en específico es necesario la utilización de tamices con diferente abertura de malla, dichas aberturas están normalizadas por un estándar internacional. (Corral, 2012)

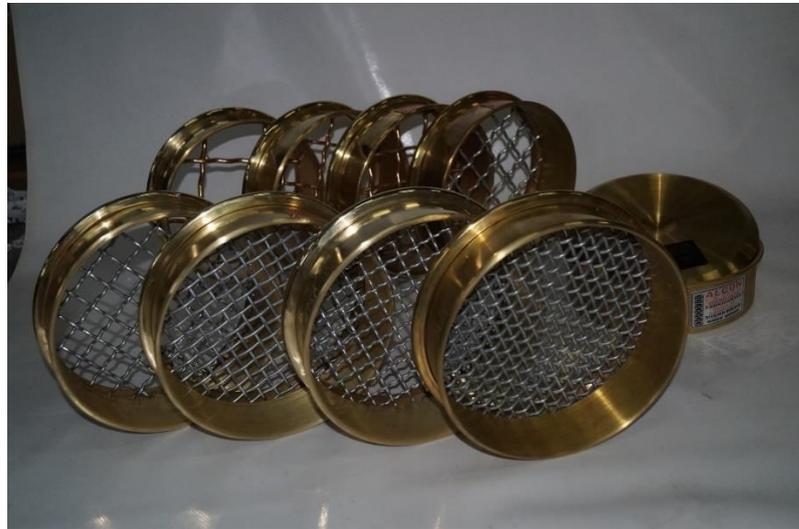


Figura 1.13 Tamices

Fuente: (Alcon, 2020)

1.10. Modelo de distribución de Rosin- Rammler

Compara o relaciona los valores del porcentaje acumulado pasante $F(x)$ con el tamaño de partícula o abertura de malla de la serie empleada, la ecuación del modelo matemático es:

$$F(x) = 100 * e^{-\left(\frac{x}{k}\right)^m} \quad (9)$$

Donde:

- $F(x)$ = porcentaje de retenido acumulado
- e = base natural de log
- x = tamaño de abertura de malla
- k = módulo de tamaño
- m = módulo de distribución

CAPÍTULO 2

EXPERIMENTACIÓN EN CAMPO: MOLINO DE BOLAS Y MOLINO CHILENO

2.1. Caracterización y preparación del material

El material utilizado para la realización de los ensayos es roca de caja y no comprende un mono tamaño, proviene de la concesión “San Sebastián”, la misma que contrata servicios de conminución en la planta de tratamiento “FIRSTMETAL”. El material corresponde a un basalto, esto se determinó en base a la geología local donde se aprecian rocas volcánicas de tipo andesítico, andesito-basáltico, brecha andesítica, basaltos, tobas y pillow lavas. Además, para corroborar esta información, se realizó el cálculo de la densidad, a través del método de sedimentación, el cual consiste en pesar una fracción fina del material para luego colocarlo en una probeta con una determinada cantidad de agua, dejarlo precipitar completamente y así, según el volumen del líquido desplazado, determinar la densidad del material; obteniéndose así los siguientes valores:

- Peso del material= 83 g
- Volumen de agua en la probeta= 50 ml
- Volumen de agua desplazado= 23 ml

$$Densidad = \frac{masa}{volumen} = \frac{83 \text{ g}}{23 \text{ cm}^3} = 2.86 \text{ g/cm}^3$$

La densidad del basalto se encuentra en el rango de valores de 2.8 a 2.9 g/cm³, además de que sus características físicas coinciden plenamente con las del mismo, por lo que se concluye que el material es, en efecto, un basalto.



Figura 2.1 Basalto

Fuente: Elaboración propia.

El basalto es una roca ígnea volcánica de color negro, gris o azulado. Está formada por el rápido enfriamiento del magma al llegar a la superficie y es rico en silicatos de magnesio y hierro. Posee una dureza de 6 en la escala de Mohs. (Morales, 2004)



Figura 2.2 Probeta con basalto.

Fuente: Elaboración propia.

El material proveniente de la mina ingresa en una tolva de alimentación primaria, posteriormente, pasa a una zaranda de clasificación y luego a una trituradora primaria de mandíbulas, a continuación, por medio de una banda transportadora, ingresa a una zaranda de clasificación secundaria y luego a una trituradora secundaria de mandíbulas con las paredes más ajustadas, alcanzándose un tamaño de partícula pasante malla $\frac{3}{4}$ de pulgada, llegando así a una tolva de alimentación secundaria para finalmente dirigir el material, ya sea al molino chileno o al molino de bolas.

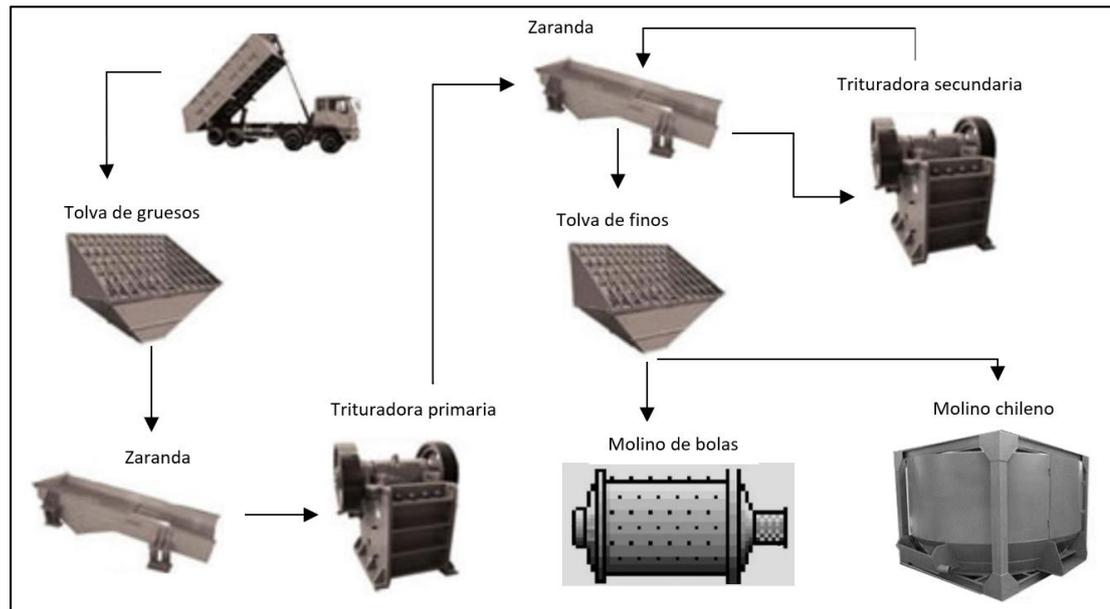


Figura 2.3 Diagrama de planta.

Fuente: Elaboración propia.

2.2. Condiciones de operación del molino de bolas

El molino de bolas perteneciente a la planta consta con las siguientes características:

- Longitud= 8 ft
- Diámetro= 6 ft
- Volumen= 226.194 ft³
- Velocidad del molino= 24 rpm
- Circuito cerrado

Estas características son las que se han determinado en planta en base a los conocimientos de los técnicos que laboran en la misma, asimismo, han optado por fijar valores como el porcentaje de humedad de la pulpa y la velocidad de rotación del molino para ciertos tipos de material. Empíricamente se ha determinado que la densidad del material puede variar entre 1.5 a 1.9 kg/l, puesto que, si no se encuentra dentro de este rango de valores, la molienda se torna ineficiente. Por consiguiente, se eligió para los ensayos, tanto en planta como en laboratorio, las densidades experimentales de 1.5; 1.7 y 1.9 kg/l tomándose los valores extremos e intermedios para mejores resultados.

La carga de bolas calculada en planta es de 8 toneladas, de las cuales, el 55% comprende 4 toneladas de 4 pulgadas de diámetro, el 32.5% representa 3 toneladas de 3 pulgadas y el 12.5% es 1 tonelada de 2 pulgadas. Asimismo, el factor de llenado es del 45%, el tiempo de residencia estimado es de 6 minutos y la cantidad de material con la que se carga el molino es de 5 toneladas, procesando así un total de 110 toneladas por día.



Figura 2.4 Molino de bolas de planta.

Fuente: Elaboración propia.

2.3.Desarrollo y resultados de los ensayos en el molino de bolas de planta

Se solicitó al personal técnico de planta llevar a cabo tres ensayos de molienda variando la humedad de la pulpa, en donde se tomaron muestras significativas de molienda para los tiempos 3, 6, 9, 12 y 15 minutos para las densidades de 1.5; 1.7 y 1.9 kg/l, dando un total de 15 pruebas. Las muestras extraídas fueron debidamente secadas y tamizadas para la realización de las curvas granulométricas en base al método de Rossin- Rammler.

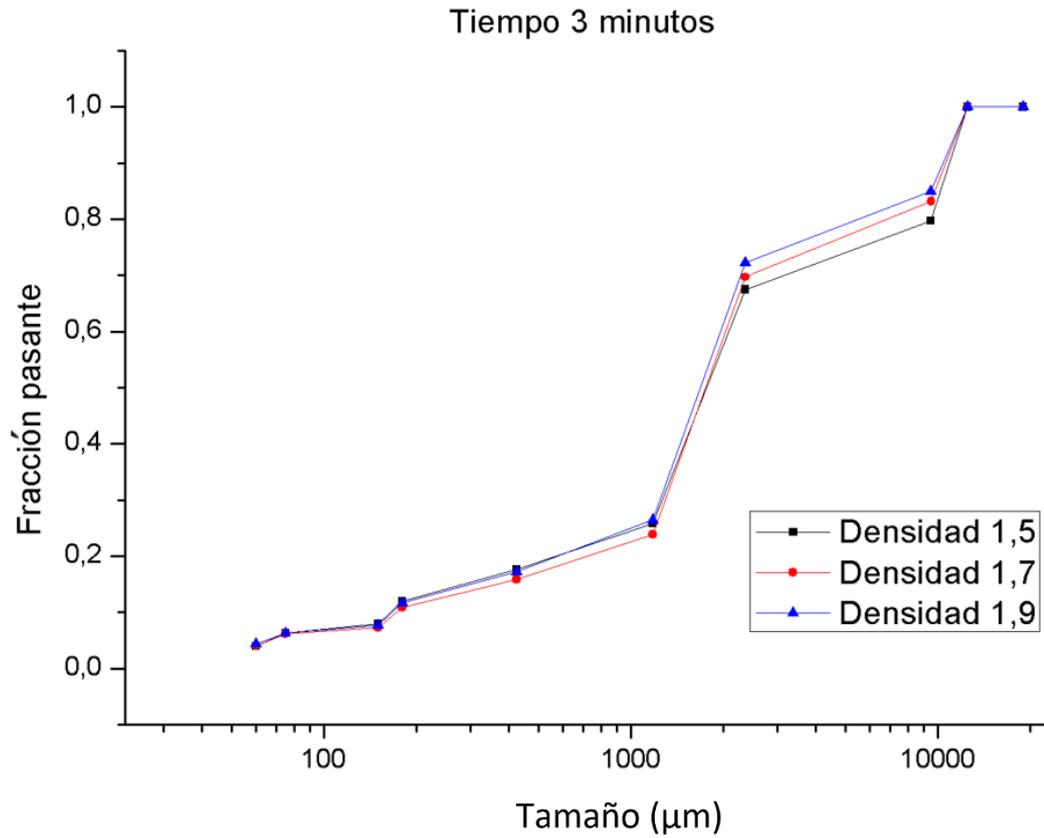


Figura 2.5 Resultados granulométricos para las tres densidades a los 3 minutos del molino de bolas de planta.

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 2.5 se puede evidenciar que las curvas granulométricas de las tres densidades con las que se llevó a cabo los ensayos tienen un comportamiento similar; sin embargo, en la densidad de 1.5 kg/l, la pulpa que mayor cantidad de agua contiene, posee una mayor fracción pasante de partículas finas en comparación con las otras densidades.

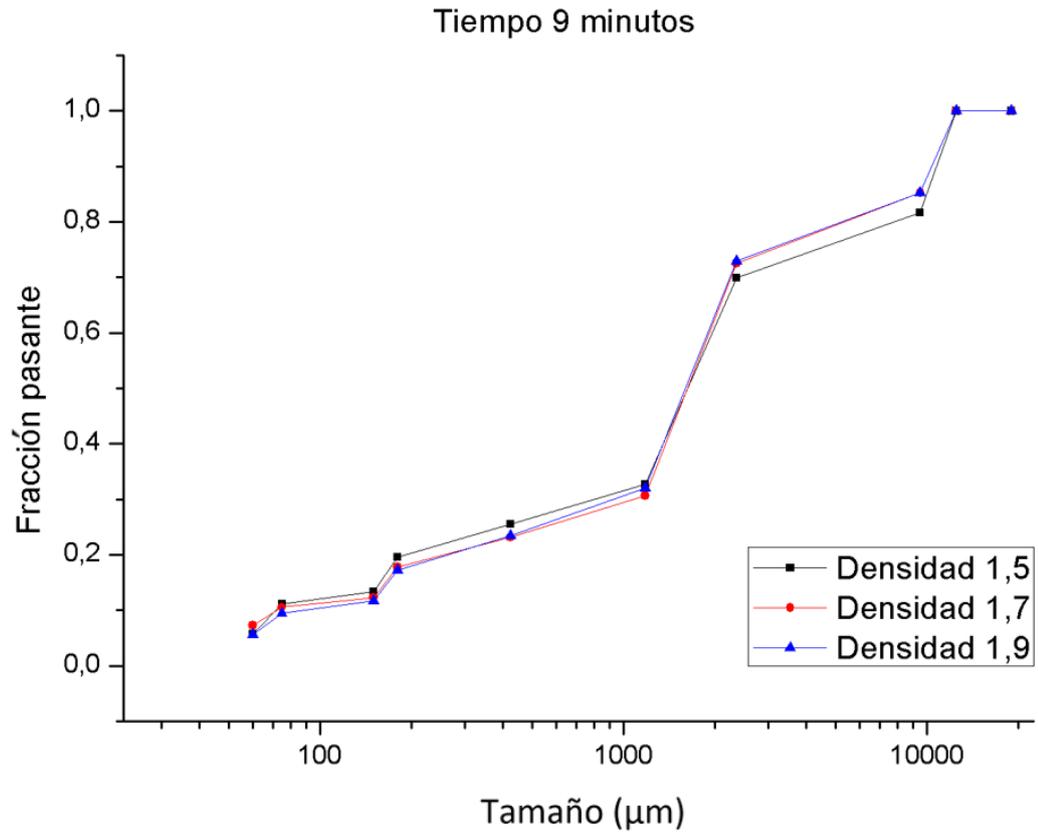


Figura 2.6 Resultados granulométricos para las tres densidades a los 9 minutos del molino de bolas de planta.

Fuente: Elaboración propia.

A los 9 minutos de molienda se puede apreciar que las curvas granulométricas mantienen su tendencia, resultando así que la densidad de 1.5 kg/l posee una mayor fracción pasante de partículas finas en comparación con las otras densidades, como se visualiza en la figura 2.6.

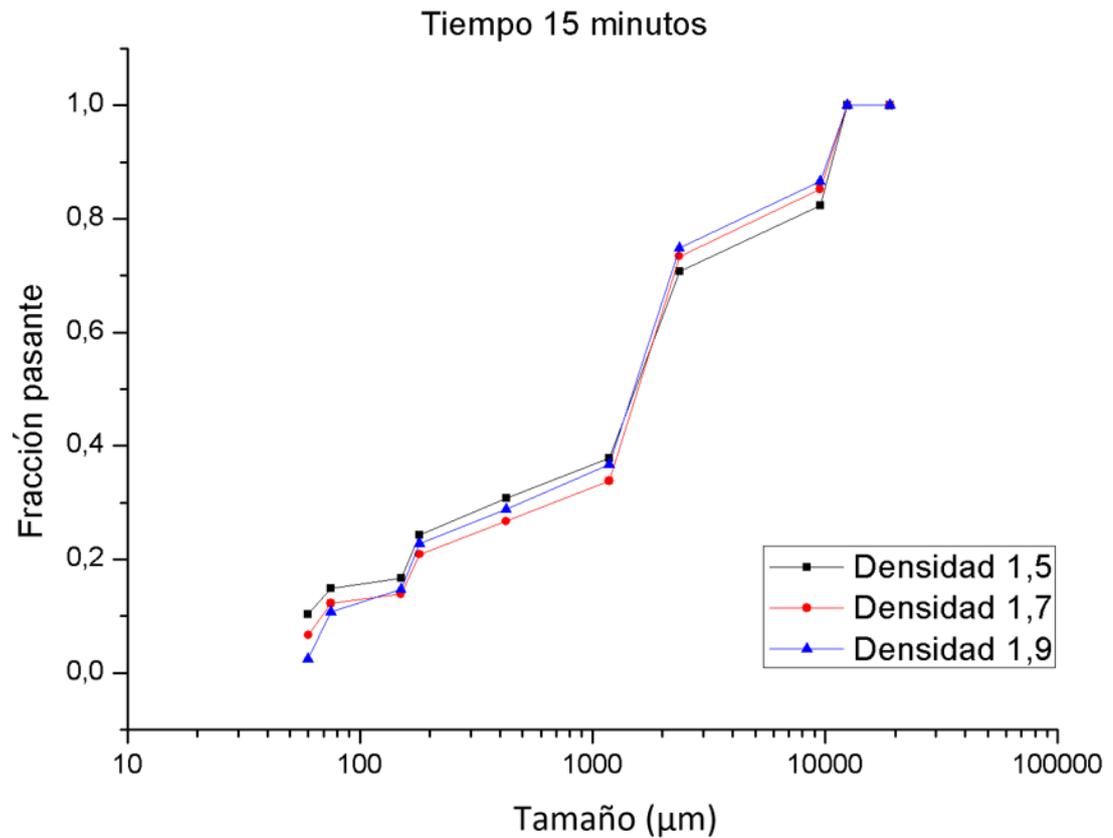


Figura 2.7 Resultados granulométricos para las tres densidades a los 15 minutos del molino de bolas de planta.

Fuente: Elaboración propia.

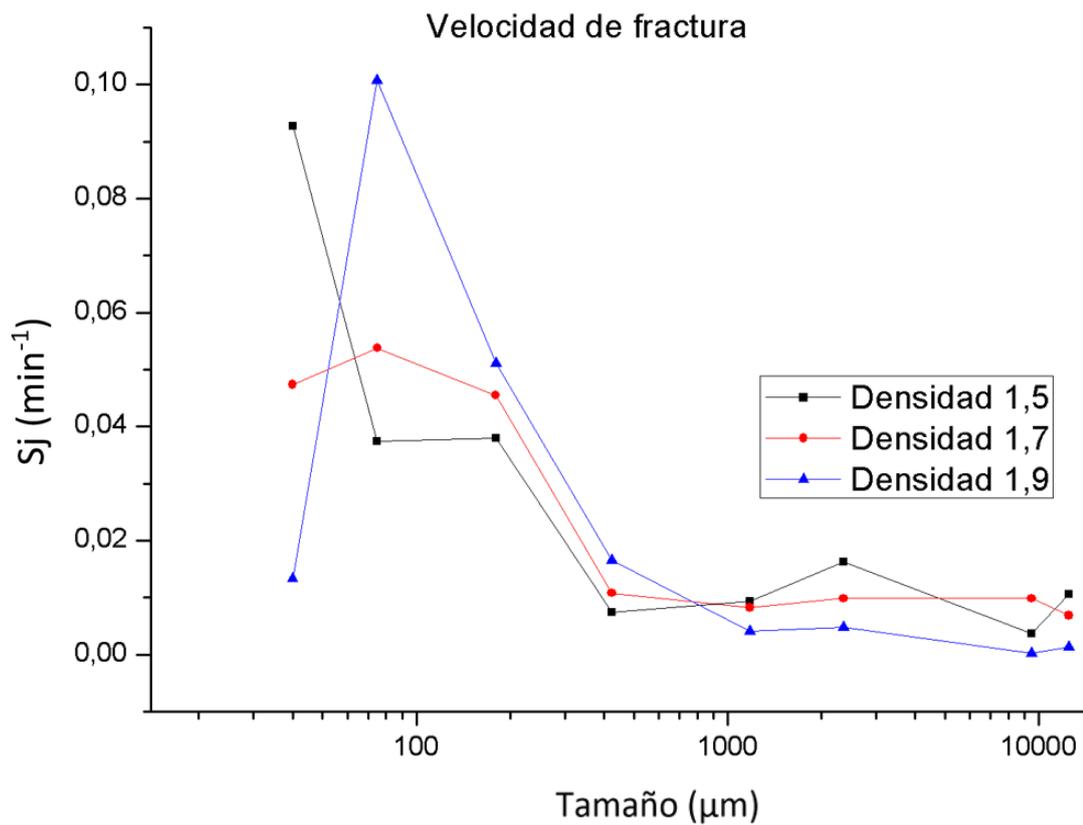
A los 15 minutos de molienda se puede observar que la densidad de 1.5 kg/l sigue siendo la que mayor fracción pasante de finos tiene, reteniendo una mayor cantidad de material fino que en los tiempos anteriores.

Por otro lado, con los valores obtenidos en los tamizajes de cada tiempo (3, 6, 9, 12 y 15 minutos), se realizó la curva granulométrica para cada tamaño de tamiz, obteniéndose el valor de la pendiente de cada curva realizada, es decir, de cada tamaño. Con el valor de la pendiente y con fundamento en la fórmula (5) ($\log[w_1(t)] = \log[w_1(0)] - S_i t / 2.3$) se realizó el cálculo pertinente de la velocidad de fractura con su respectiva gráfica.

Tabla 2.1 Datos de la velocidad de fractura del molino de bolas de planta

Velocidad de fractura			
Tamaño	Densidad 1.9	Densidad 1.5	Densidad 1.7
12500	0.00138	0.01058	0.0069
9500	0.00023	0.00368	0.00989
2360	0.00483	0.01633	0.00989
1180	0.00414	0.00943	0.00828
425	0.01656	0.00736	0.01081
180	0.05106	0.03795	0.04554
75	0.10074	0.03749	0.05382
40	0.01334	0.09269	0.04738

Fuente: Elaboración propia.

**Figura 2.8** Resultados velocidad de fractura para las tres densidades en el molino de bolas de planta.

Fuente: Elaboración propia.

En las gráficas de velocidad de fractura, se optó por analizar los puntos en donde coinciden las colpas, tomándose como mejor opción aquella que requiere una menor velocidad de fractura para alcanzar un determinado tamaño de partícula.

En la figura 2.8 se observa que la densidad de 1.9 kg/l es la que mayor velocidad de fractura necesita para romper el material a un determinado tamaño, obteniendo una pronunciada zona de impacto y astillamiento. Por otro lado, la densidad de 1.7 kg/l requiere una velocidad de fractura menor y su zona de impacto y astillamiento son moderadas. Asimismo, la densidad 1.5 kg/l es la que menor velocidad de fractura requiere; sin embargo, presenta únicamente una zona amplia de astillamiento y no muestra impacto.

Es necesario resaltar que en planta se trabaja con una densidad de 1.8 kg/l, siendo este un valor promedio establecido empíricamente debido a que presenta los mejores resultados de molienda. Es así que, resulta congruente que la densidad de 1.7 kg/l del ensayo realizado demuestre mejores resultados.

2.4. Condiciones de operación del molino chileno

El molino chileno perteneciente a la planta, es utilizado para moler cualquier tipo de material siempre y cuando no se trabaje en grandes cantidades. Este molino cuenta con las siguientes características:

- Diámetro= 4 m
- Número de ruedas= 4
- Diámetro de ruedas= 1.2 m
- Peso de la rueda= 1.25 t
- Circuito cerrado

El funcionamiento de este tipo de molino varía en comparación a los otros equipos de molienda utilizados en este ámbito, tales como el molino de bolas y SAG, ya que no utiliza bolas de acero como medios moledores, sino grandes ruedas de acero que antes que impactar, abrasan el material. Es por ello que se establece un valor determinado para la cantidad de agua con la que se trabaja, dicho valor depende del tipo del material y no se puede modificar significativamente ya que esto puede provocar retrasos en la molienda por embancamientos del material debajo y entre las planchas metálicas que recubren el piso del molino. De acuerdo al material con el que se realizaron los ensayos, en la planta se ha llegado a determinar empíricamente que la densidad necesaria para no presentar los fallos mencionados anteriormente es de 1.150 kg/l.



Figura 2.9 Molino chileno en planta.

Fuente: Elaboración propia.

2.5.Ejecución y resultados de los ensayos en el molino chileno

El material de muestra no fue tomado del interior del molino debido a que esto significaría un riesgo a la seguridad e integridad de los trabajadores encargados del molino, además de representar un elevado gasto energético y desgaste mecánico del equipo, por lo que fueron tomadas del material resultante del proceso de molienda, es decir, el material que ingresa a los canalones, los cuales son los encargados de retener el material de interés.



Figura 2.10 Toma y recolección de muestras del molino chileno en planta.

Fuente: Elaboración propia.

Dichas muestras corresponden a la fracción de finos pasante malla ASTM #70 y se tomaron a los tiempos de 3, 6, 9, 12 y 15 minutos para una única densidad de 1.150 kg/l, resultando así un total de cinco muestras, las cuales fueron trasladadas al laboratorio de Ingeniería en Minas de la Universidad del Azuay para su correspondiente secado y tamizaje, del cual se obtuvo la siguiente gráfica granulométrica en base al modelo de Rossin- Rammler:

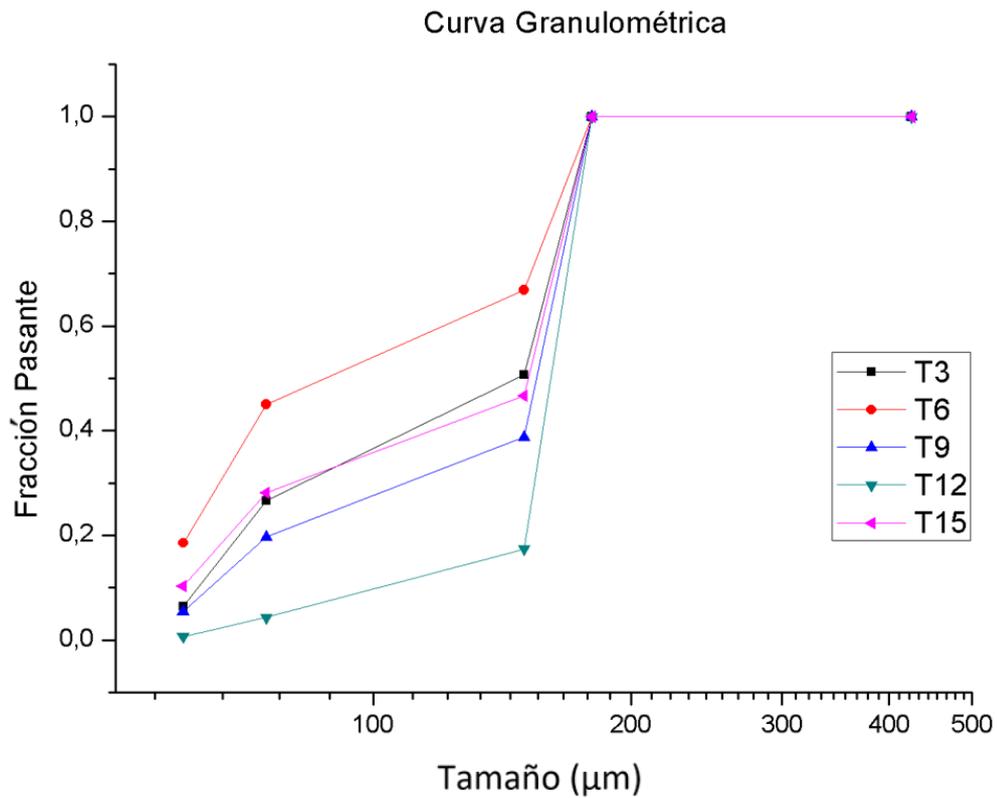


Figura 2.11 Resultados granulométricos para los cinco tiempos en el molino chileno de planta.

Fuente: Elaboración propia.

En base a los resultados evidenciados en la gráfica de la curva granulométrica (figura 2.11) se puede deducir que el tiempo de 6 minutos es en el cual se consigue una mayor fracción pasante para un tamaño determinado, denotando así que existe un mayor porcentaje de finos al cabo de dicho tiempo.

En cuanto a los cálculos de la velocidad de fractura, se trabajó con los datos obtenidos en los tamizajes de cada tiempo (3, 6, 9, 12 y 15 minutos), para realizar la curva granulométrica pertinente para cada tamaño de tamiz, obteniéndose el valor de la pendiente de cada curva y conforme a la fórmula (5) ($\log[w_1(t)] = \log[w_1(0)] - S_i t / 2.3$) se realizó la figura 2.12, en donde se pudo apreciar que durante el tiempo de molienda la fuerza predominante es de cizallamiento, debido a que las ruedas del molino giran sobre el material asentado en la base generando abrasión, mas no impacto, lo cual es representado en la pendiente negativa de la gráfica, lo que significa un mayor consumo de energía y un mayor esfuerzo para moler, desgastándose así el equipo.

Tabla 2.2 Datos de la velocidad de fractura del molino chileno.

Velocidad de fractura	
Tamaño	Densidad 1.15 kg/l
1180	0.000
425	0.000
180	0.107
150	0.104
75	0.224
40	0.230

Fuente: Elaboración propia.

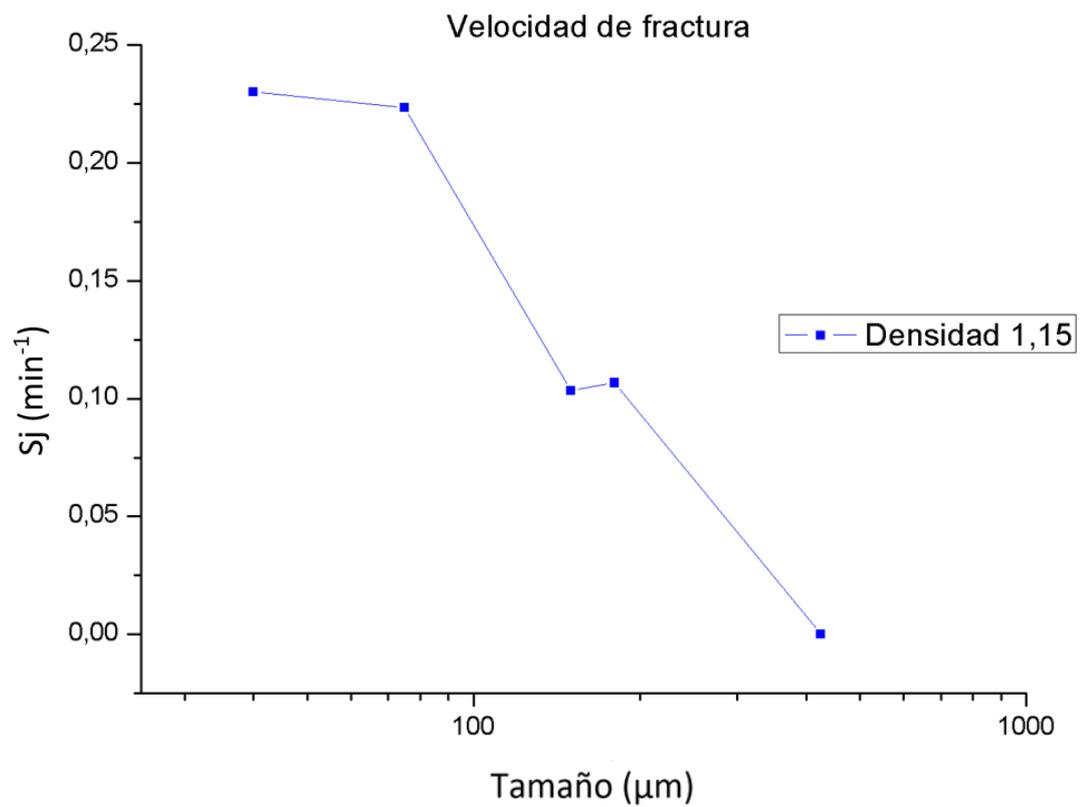


Figura 2.12 Resultados velocidad de fractura con una densidad de 1.150 kg/l en el molino chileno de planta.

Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO 3

DISEÑO EXPERIMENTAL A ESCALA DE LABORATORIO: MOLINO SAG Y MOLINO DE BOLAS

3.1. Condicionamiento del molino SAG y de bolas en el laboratorio

Previo a la realización de los ensayos en el molino SAG, se realizó el respectivo mantenimiento del equipo para así asegurar el óptimo desarrollo del mismo. Puesto que se lo encontró con cauchos deteriorados y presentando filtraciones de agua por los costados, es así que se utilizó soldadura en frío para tapan las filtraciones y se cambiaron los cauchos. Este molino consta de las siguientes características:

- Diámetro= 60 cm
- Largo= 22 cm
- Volumen= 62203.68 cm³
- Velocidad del molino= 40 rpm
- Carga y descarga manual
- Circuito abierto

La velocidad del molino es controlada mediante un panel electrónico y se fijó en 40 rpm que equivale al 70% de la velocidad crítica, encontrándose dentro del rango óptimo correspondiente al 65% a 90 %. Estos valores se los obtuvieron a partir de los ensayos realizados en el proyecto de titulación de (Álvarez & Sánchez, 2021) puesto que a esta velocidad se obtuvieron los mejores resultados para una andesita con densidad 2.64 g/cm³, similar a la del basalto.



Figura 3.1 Molino SAG del laboratorio.

Fuente: Elaboración propia.

En cuanto al molino de bolas, se procedió a su debida limpieza y verificación de funcionamiento. Cuenta con las siguientes características:

- Longitud= 22 cm
- Diámetro= 21 cm
- Volumen= 7619.93 cm³
- Velocidad del molino= 92 rpm
- Carga y descarga manual
- Circuito abierto

La velocidad del molino es constante y representa el 87% de la velocidad crítica, teniendo 0.05 mm como el diámetro de bola mayor. Significando así que la velocidad se encuentra dentro del rango óptimo, que es de 65% a 90%. Además, esta velocidad de 92 rpm ha sido utilizada en otros ensayos tales como los de (Altamirano & Sacoto, 2017), obteniéndose buenos resultados.

$$V_{crit} = \frac{42.2}{\sqrt{D - d}}$$

$$V_{crit} = \frac{42.2}{\sqrt{0.21 - 0.05}}$$

$$V_{crit} = 105.5 \text{ rpm}$$



Figura 3.2 Molino de bolas de laboratorio de la escuela de Ingeniería en Minas.

Fuente: Elaboración propia.

3.2.Realización de ensayos en condiciones similares a las de planta en el molino SAG

Se planteó realizar tres ensayos de molienda variando el porcentaje de humedad, estableciendo valores de 1.5; 1.7 y 1.9 kg/l y manteniendo constante la carga de bolas de acero, el material de alimento y la velocidad del molino; tomándose muestras significativas a los tiempos 3, 6, 9, 12 y 15 minutos, dando un total de 15 pruebas. Para ello fue necesario fragmentar las rocas en una trituradora de mandíbulas, obteniendo un material pasante malla $\frac{3}{4}$ de pulgada semejante a la trituración en planta.



Figura 3.3 Trituración de material en el laboratorio de la Escuela de Ingeniería en Minas de la Universidad del Azuay.

Fuente: Elaboración propia.

Se desarrolló el cálculo del factor de llenado, para un factor del 40%, incluyendo carga de bolas (12%) y material, esto debido a la relación de Taggart aplicada para este molino, lo cual consta en el proyecto de (Álvarez & Sánchez, 2021).

Es así que se obtuvieron los siguientes resultados:

$$V_b = \text{fracción de llenado de bolas} * V_t * (1 - \text{porosidad})$$

$$V_b = 0.12 * 62203.68 * (1 - 0.48)$$

$$V_b = 3881.5 \text{ cm}^3$$

$$\text{masa de bolas} = v_b * \text{densidad de bolas}$$

$$\text{masa de bolas} = 3881.5 * 7.85$$

$$\text{masa de bolas} = 30469.85 \text{ g}$$

- **Densidad de medios moledores:** 7.85 g/cm³
- **Volumen de bolas:** 3881.51 cm³
- **Masa de bolas:** 30469.85 g

Para la distribución de bolas se estableció un porcentaje equitativo de bolas asemejando las condiciones de planta, obteniendo:

Tabla 3.1 Distribución de bolas para el molino SAG.

Distribución de bolas (cm)	Porcentaje de distribución	Peso unitario (kg)	Peso total (kg)	N° bolas
7.8	60%	2.10	18.28	9
5	30%	0.59	9.14	16
4.2	10%	0.31	3.05	10
			30.4699	34

Fuente: Elaboración propia.



Figura 3.4 Carga de bolas para el molino SAG.

Fuente: Elaboración propia.

Para calcular la cantidad de alimento entrante al molino se calculó la masa de material que comprende el agua y el material propiamente dicho, se aplica la siguiente formula.

$$Fc = \frac{\text{masa material}}{\frac{\text{densidad material}}{\text{Volumen molino}}} * \left(\frac{1}{0.55} \right)$$

$$0.28 = \frac{\text{masa material}}{\frac{2.87}{62203.68}} * \left(\frac{1}{0.55} \right)$$

$$\text{masa material} = 27492.78 \text{ g}$$

Luego se procedió a calcular únicamente la cantidad de material entrante, para lo que se recurrió a multiplicar la masa de material por 65.48%, valor que se tomó debido a que es el porcentaje de relación de sólidos utilizado en la planta y se encuentra dentro del rango de la relación de sólido en peso permisible para una molienda húmeda, que está entre 55% y 80%. (Blanco, 2014)

$$\text{masa de alimento} = \frac{65.48}{100} * \text{masa material}$$

$$\text{masa de alimento} = 18000 \text{ g}$$

Finalmente, para los cálculos de la carga de agua se dividió el material de alimento para cada una de las densidades, siguiendo el principio de una regla de tres simple.

Tabla 3.2 Carga de material en el molino SAG.

Carga de material según densidades		
Densidad (kg/l)	Material de alimento (kg)	Carga de agua (litros)
1.5	18	12
1.7	18	10.58
1.9	18	9.474

Fuente: Elaboración propia.

Se secó el material, para luego tamizarlo por 3 minutos, previo a los ensayos de molienda. El mismo procedimiento se efectuó para las muestras tomadas a los tiempos de 3, 6, 9, 12 y 15 minutos. El material tomado para las muestras fue de entre 1 kg y

1.5 kg y el peso exacto que se extraía era repuesto durante los ensayos para mantener la carga del molino constante.



Figura 3.5 Tamizadora de la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad del Azuay.

Fuente: Elaboración propia.



Figura 3.6 Tamizaje de muestras.

Fuente: Elaboración propia.

3.3.Resultados de los ensayos en el molino SAG

Tras la realización de los ensayos se procedió a desarrollar curvas granulométricas con el modelo de Rossin- Rammler para cada densidad a cada tiempo, utilizándose mallas N° 3/4, 1/2, 3/8, 8, 16, 40, 80, 100 y 200.

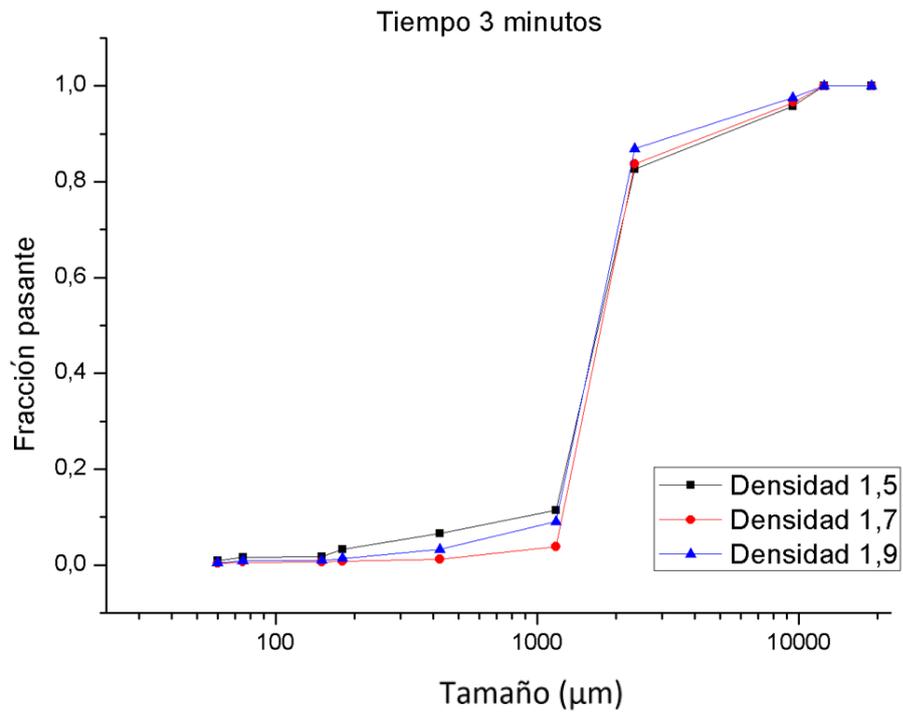


Figura 3.7 Resultados granulométricos de las tres densidades a los 3 minutos en el molino SAG.

Fuente: Elaboración propia.

A los 3 minutos de molienda se obtuvo la curva granulométrica plasmada en la figura 3.7 en donde se puede observar que la densidad de 1.5 kg/l es la que posee mayor fracción pasante de material fino en comparación con las otras densidades.

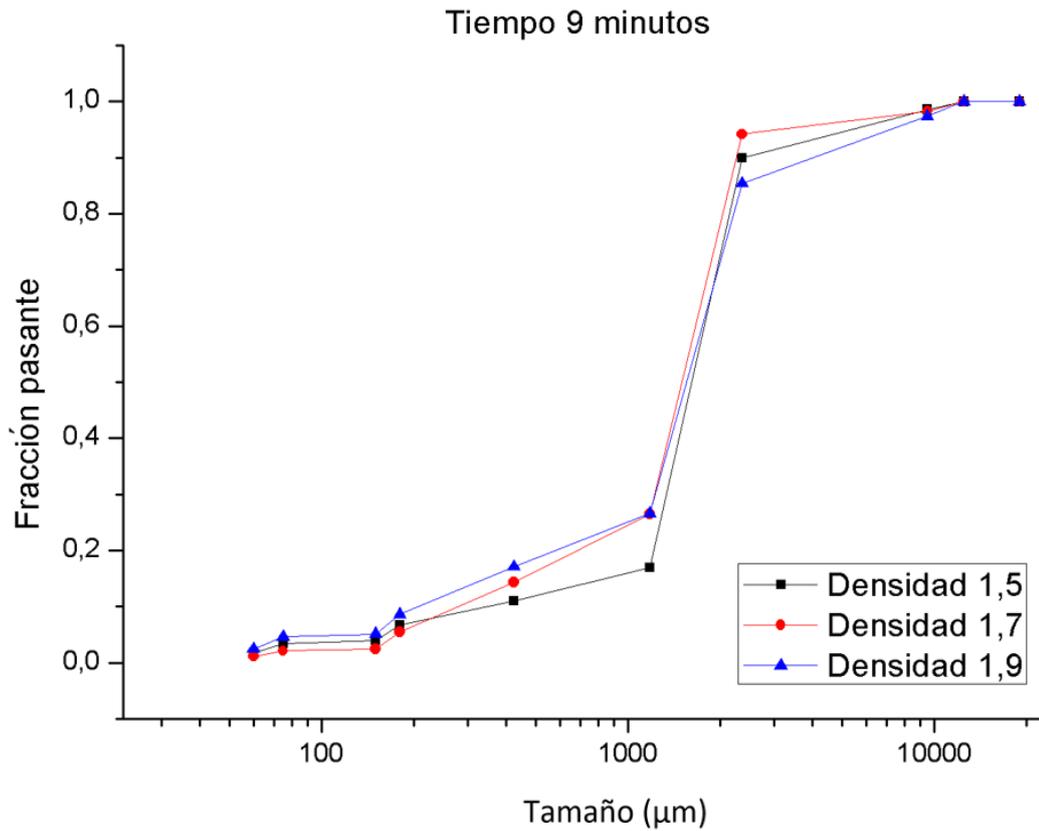


Figura 3.8 Resultados granulométricos de las tres densidades a los 9 minutos en el molino SAG.

Fuente: Elaboración propia.

Para los 9 minutos de molienda se puede evidenciar, en la figura 3.8, que la densidad de 1.9 kg/l es la que mayor fracción pasante de partículas finas posee; sin embargo, la tendencia de las tres densidades es similar.

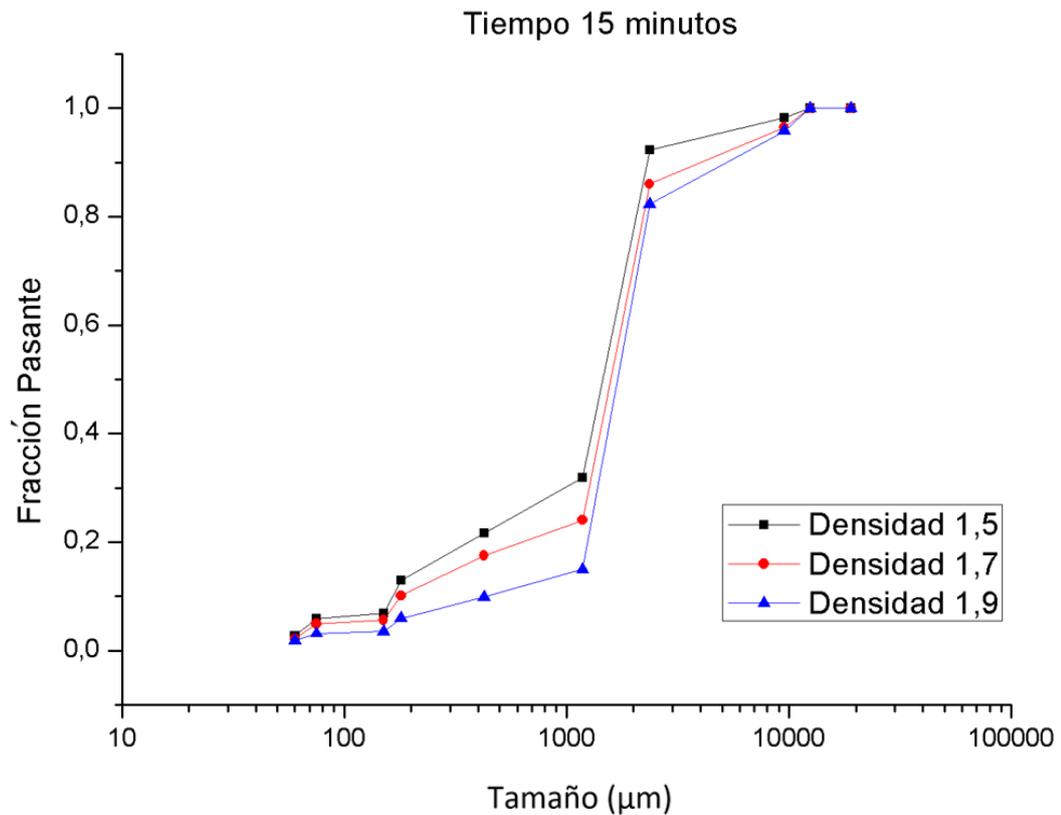


Figura 3.9 Resultados granulométricos de las tres densidades a los 15 minutos en el molino SAG.

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, a los 15 minutos de molienda se puede apreciar (figura 3.9) que la densidad de 1.5 kg/l es la que presenta una mayor fracción pasante de material fino en comparación con las otras densidades, continuando así con la tendencia inicial.

A partir de los valores retenidos en cada malla para cada tiempo, que se obtuvo mediante tamizajes, se procedió a realizar los cálculos de la pendiente de las curvas granulométricas, y a partir de estos valores y en base a la ecuación (5) ($\log[w_1(t)] = \log[w_1(0)] - S_i t / 2.3$), se calculó la velocidad de fractura, teniéndose como resultado que el ensayo con mayor cantidad de agua, correspondiente a la densidad 1.5 kg/l, fractura el material hasta el mismo tamaño que los otros ensayos, pero a una velocidad menor, como se vislumbra en la figura 3.10. Asimismo, la densidad de 1.7 kg/l alcanza los valores más altos en velocidad de fractura, obteniendo una zona de impacto y astillamiento más pronunciados. Finalmente, la densidad de 1.9 kg/l alcanza valores intermedios entre la densidad de 1.5 kg/l y 1.7 kg/l.

Tabla 3.3 Datos de la velocidad de fractura para el molino SAG.

Velocidad de fractura			
Tamaño	Densidad 1.7	Densidad 1.9	Densidad 1.5
12500	0.01357	0.12512	0.03772
9500	0.00736	0.02852	0.03795
2360	0.01541	0.00782	0.00897
1180	0.0345	0.02185	0.03427
425	0.1242	0.03128	0.04554
180	0.19573	0.09844	0.06785
75	0.15778	0.04853	0.008326
40	0.11615	0.07245	0.05221

Fuente: Elaboración propia.

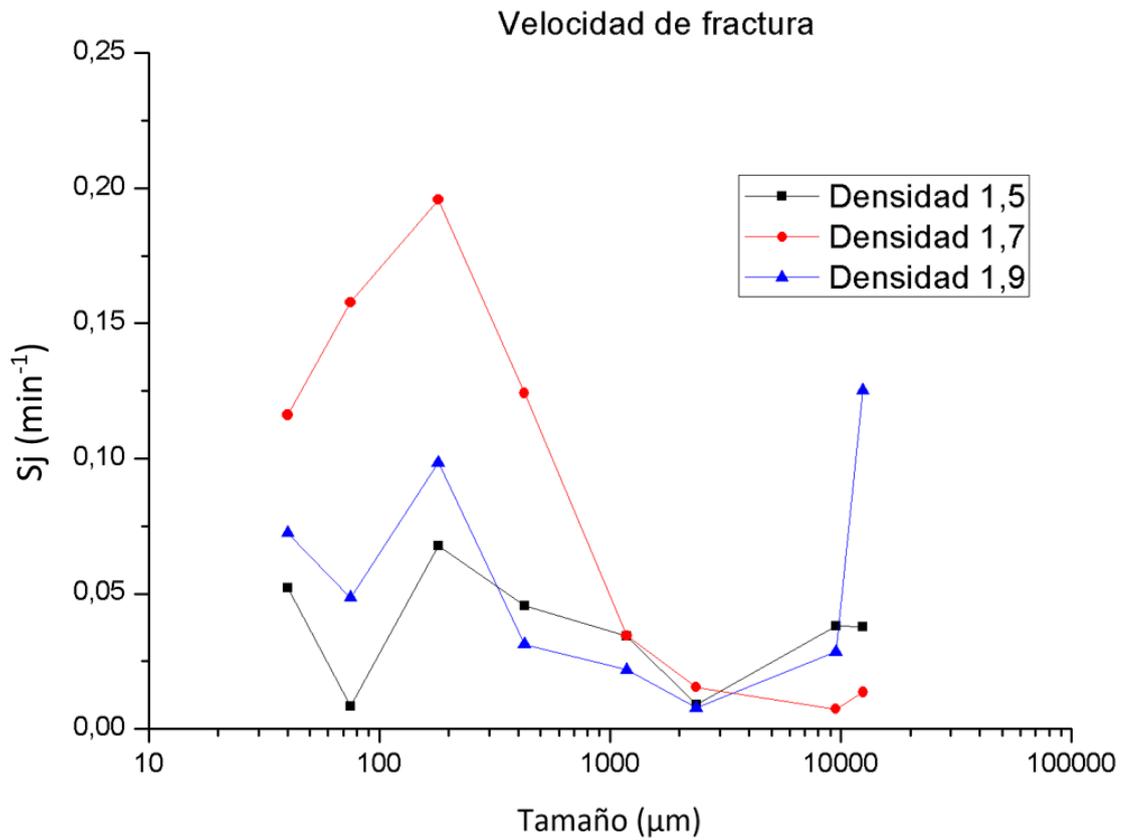


Figura 3.10 Resultados velocidad de fractura para las tres densidades en el molino SAG.

Fuente: Elaboración propia.

3.4. Desarrollo de ensayos en laboratorio variando el tamaño de los medios molidores en el molino de bolas

Se realizaron los ensayos con las mismas densidades planteadas para el molino SAG; sin embargo, se modificó la distribución de bolas optándose por desarrollar las pruebas con un porcentaje mayor de bolas pequeñas, con un porcentaje mayor de bolas grandes y con un porcentaje equitativo similar al de planta. Cada una de estas distribuciones de bolas se aplicó para cada una de las tres densidades, tomando muestras a los tiempos 3, 6, 9, 12, 15 minutos, obteniendo así un total de 45 pruebas.

Se fijó un factor de llenado del 48% y una carga de bolas del 25%, en base a la teoría que establece un factor de llenado en un rango del 40% al 55%. (Blanco, 2014)

Además, en base a la siguiente ecuación, se determinaron los siguientes resultados:

$$Vb = \text{fracción de llenado de bolas} * Vt * (1 - \text{porosidad})$$

$$Vb = 0.25 * 7619.93 * (1 - 0.48)$$

$$Vb = 990.59 \text{ cm}^3$$

$$\text{masa de bolas} = vb * \text{densidad de bolas}$$

$$\text{masa de bolas} = 990.59 * 7.85$$

$$\text{masa de bolas} = 7776.138 \text{ g}$$

- **Densidad de medios molidores:** 7.85 g/cm³
- **Volumen de bolas (Vb):** 990.59 cm³
- **Masa de bolas:** 7776.138 g

Para un porcentaje mayor de bolas pequeñas se estableció la siguiente distribución:

Tabla 3.4 Distribución del mayor porcentaje de bolas pequeñas.

Distribución de bolas (cm)	Porcentaje de distribución	Peso unitario (kg)	Peso total (kg)	Nº bolas
5	10.00%	0.68	0.78	1
3.5	10.00%	0.202	0.78	4
2.7	80.00%	0.104	6.22	60
			7.776	65

Fuente: Elaboración propia.

Para un porcentaje mayor de bolas grandes se estableció la siguiente distribución:

Tabla 3.5 Distribución del mayor porcentaje de bolas grandes.

Distribución de bolas (cm)	Porcentaje de distribución	Peso unitario (kg)	Peso total (kg)	N° bolas
5	80.00%	0.68	6.22	9
3.5	10.00%	0.202	0.78	4
2.7	10.00%	0.104	0.78	7
			7.776	20

Fuente: Elaboración propia.

Para un porcentaje equitativo de bolas se estableció la siguiente distribución:

Tabla 3.6 Distribución de un porcentaje equitativo de bolas.

Distribución de bolas (cm)	Porcentaje de distribución	Peso unitario (kg)	Peso total (kg)	N° bolas
5	60.00%	0.68	4.67	7
3.5	30.00%	0.202	2.33	12
2.7	10.00%	0.104	0.78	7
			7.776	26

Fuente: Elaboración propia.

Para calcular la cantidad de alimento que ingresa al molino se calculó la masa de material que comprende el agua y el material propiamente dicho.

$$Fc = \frac{\text{masa material}}{\frac{\text{densidad material}}{\text{Volumen molino}}} * \left(\frac{1}{0.55} \right)$$

$$0.23 = \frac{\text{masa material}}{\frac{2.87}{7619.93}} * \left(\frac{1}{0.55} \right)$$

$$\text{masa material} = 2832.608 \text{ g}$$

Luego se procedió a calcular únicamente la cantidad de material entrante, para lo que se recurrió a multiplicar la masa de material por 65%, valor que se tomó debido a que es el porcentaje de relación de sólidos utilizado en la planta y se encuentra dentro del rango de la relación de sólido en peso permisible para una molienda húmeda, que está entre 55% y 80%. (Blanco, 2014)

$$\text{masa de alimento} = \frac{65}{100} * \text{masa material}$$

$$\text{masa de alimento} = 1841 \text{ g}$$

Finalmente, para los cálculos de la carga de agua se dividió el material de alimento para cada una de las densidades, siguiendo el principio de una regla de tres simple.

Tabla 3.7 Carga de material en el molino de bolas.

Carga de material según densidades		
Densidad (kg/l)	Material de alimento (kg)	Carga de agua (litros)
1.5	1.841	1.23
1.7	1.841	1.08
1.9	1.841	0.97

Fuente: Elaboración propia.



Figura 3.11 Carga del molino de bolas de laboratorio.

Fuente: Elaboración propia.



Figura 3.12 Molino de bolas de laboratorio cargado.

Fuente: Elaboración propia.

Las muestras tomadas para cada ensayo comprendieron todo el material que ingresó al molino (1841 g) y fueron debidamente secadas a 150 °C en el horno del laboratorio de la Escuela de Ingeniería en Minas, para su posterior tamizaje y elaboración de curvas granulométricas mediante el método de Rossin- Rammler y el posterior cálculo de cinética de fractura.

3.5.Resultados de las distintas pruebas con diferentes tamaños de medios molidores

En base a los ensayos realizados con variación en la distribución de carga de bolas se obtuvieron las siguientes gráficas para la densidad de 1.5 kg/l:

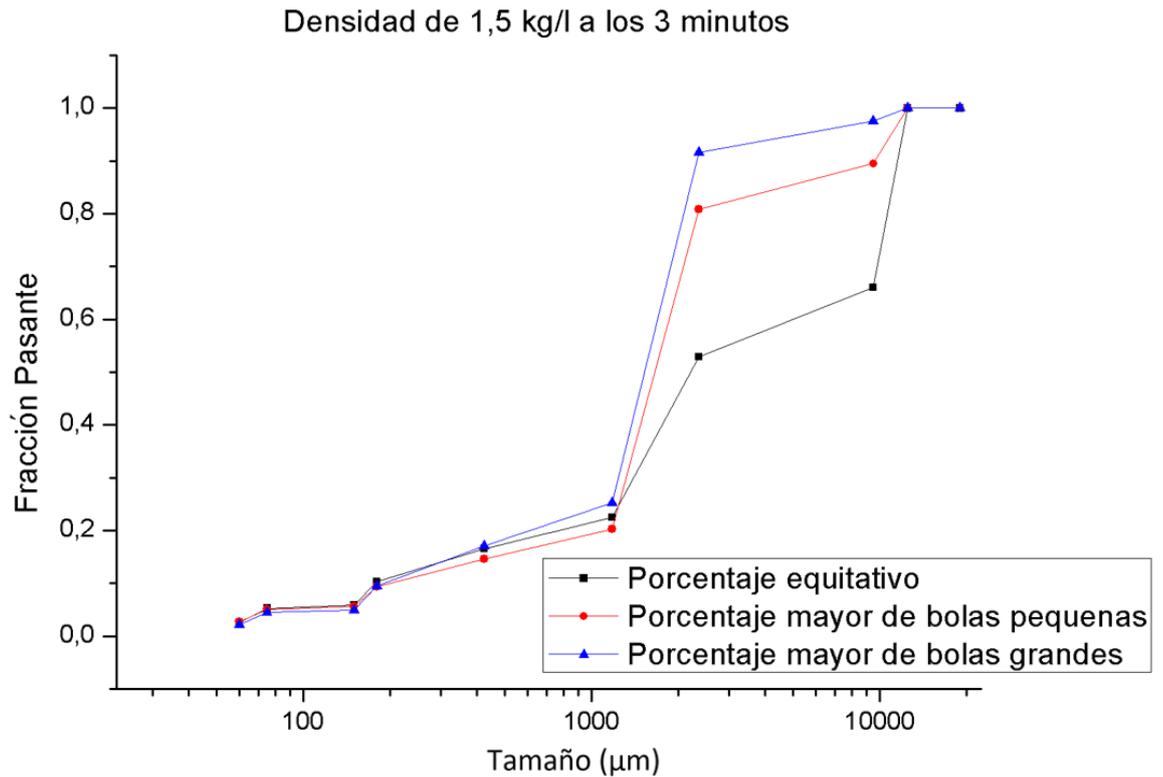


Figura 3.13 Resultados granulométricos de las tres distribuciones a los 3 minutos de la densidad de 1.5 kg/l en el molino de bolas.

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 3.13 se puede observar que a los 3 minutos de molienda se presenta una fracción pasante similar para las tres distribuciones de bolas; sin embargo, el porcentaje mayor de bolas grandes, que posee un 80% de bolas de 5 cm, 10% de bolas de 3.5 cm y 10% de bolas de 2.7 cm presenta, levemente, una mayor fracción pasante respecto a las otras distribuciones.

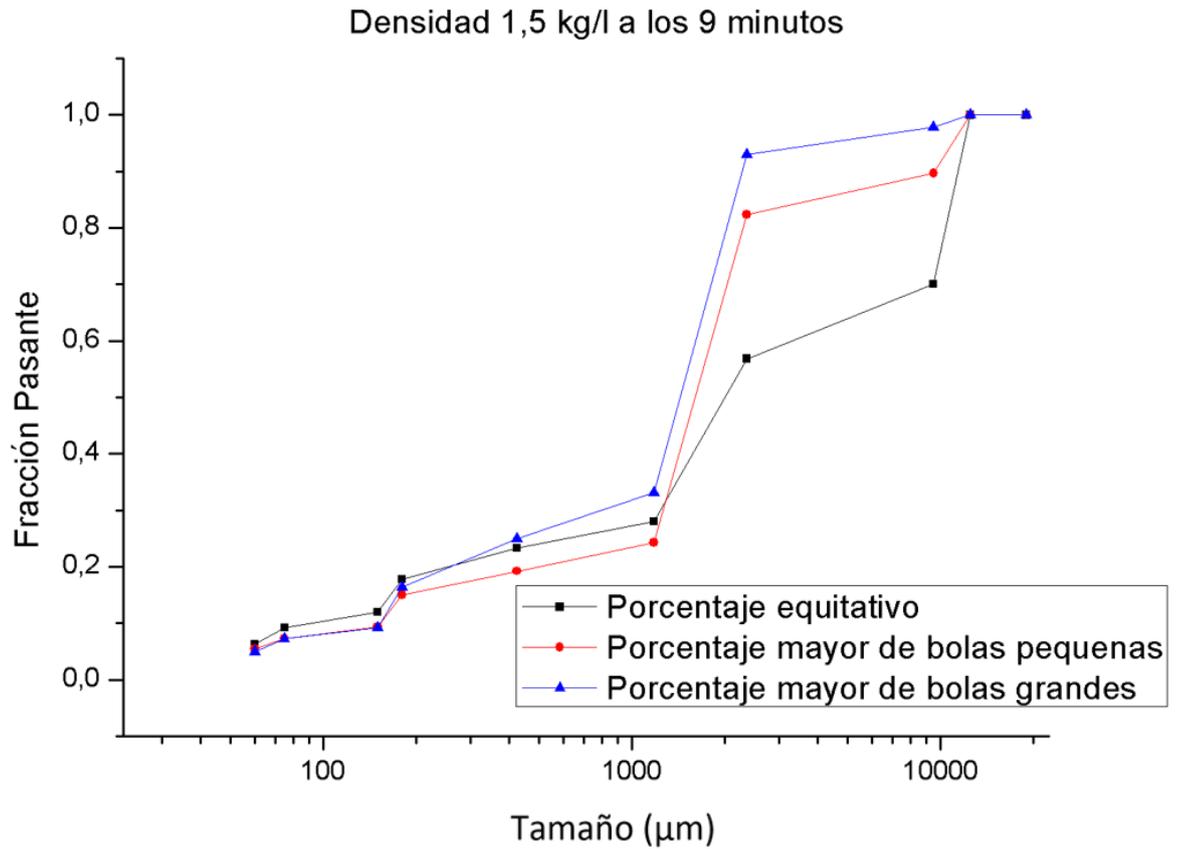


Figura 3.14 Resultados granulométricos de las tres distribuciones a los 9 minutos de la densidad de 1.5 kg/l en el molino de bolas.

Fuente: Elaboración propia.

En cuanto a los 9 minutos de molienda, se puede observar que el porcentaje mayor de bolas grandes, que comprende un 80% de bolas de 5 cm, 10% de bolas de 3.5 cm y 10% de bolas de 2.7 cm presenta una fracción pasante de partículas finas un tanto mayor que a las otras distribuciones (figura 3.14).

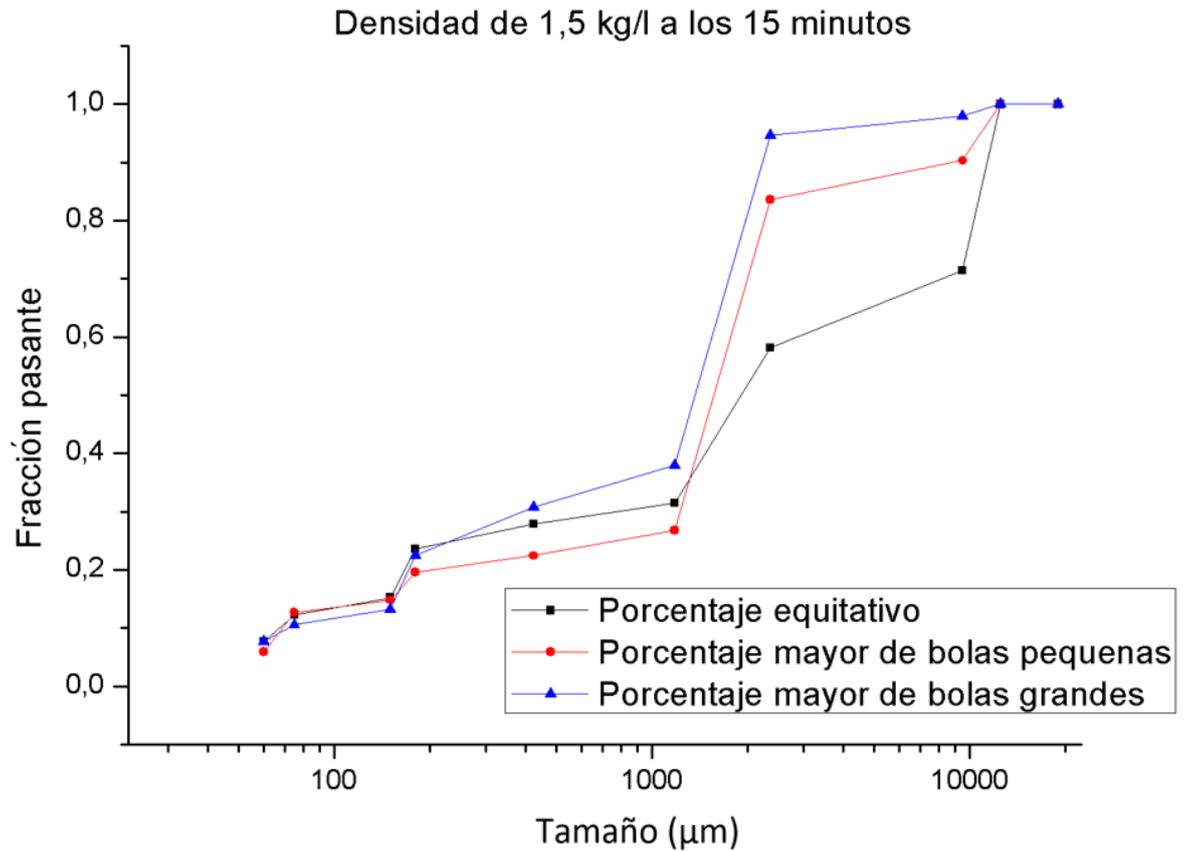


Figura 3.15 Resultados granulométricos de las tres distribuciones a los 15 minutos de la densidad de 1.5 kg/l en el molino de bolas.

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, a los 15 minutos de molienda, se evidencia que el porcentaje mayor de bolas grandes, que comprende un 80% de bolas de 5 cm, 10% de bolas de 3.5 cm y 10% de bolas de 2.7 cm presenta una fracción pasante de partículas finas un tanto mayor en comparación a las otras distribuciones. Además, la tendencia de las curvas granulométricas es similar a las de los tiempos anteriores.

En cuanto a la densidad de 1.7 kg/l se obtuvieron las siguientes gráficas:

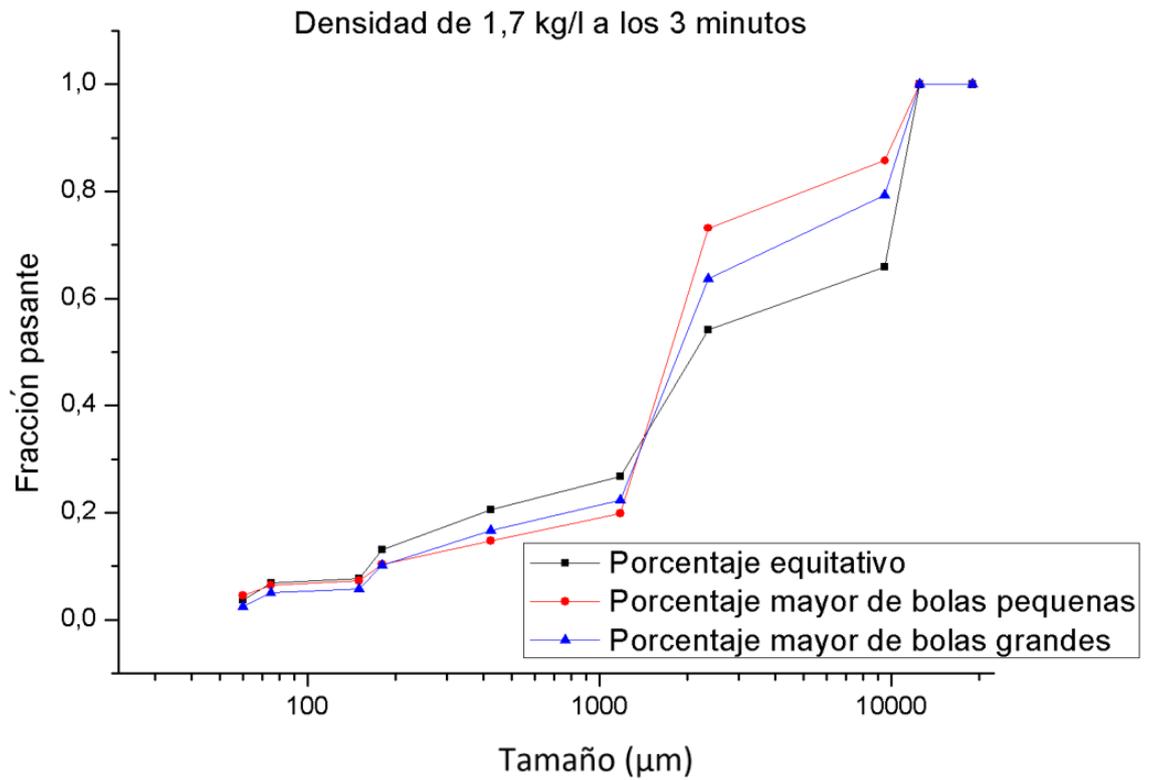


Figura 3.16 Resultados granulométricos de las tres distribuciones a los 3 minutos de la densidad de 1.7 kg/l en el molino de bolas.

Fuente: Elaboración propia.

A los 3 minutos de molienda se puede apreciar que el porcentaje equitativo de bolas, que contiene 60% de bolas de 5 cm, 30% de bolas de 3.5 cm y 10% de bolas de 2.7 cm, es el que presenta una mayor fracción pasante de finos en comparación a las otras distribuciones (figura 3.16).

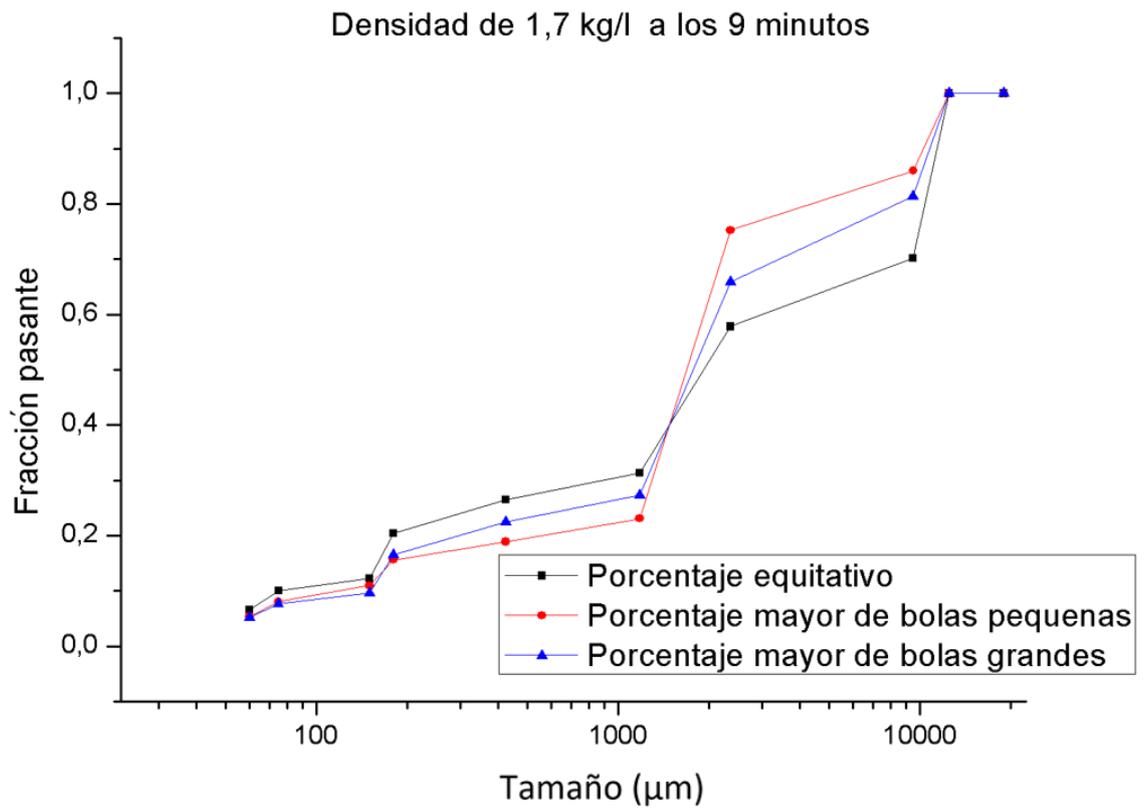


Figura 3.17 Resultados granulométricos de las tres distribuciones a los 9 minutos de la densidad de 1.7 kg/l en el molino de bolas.

Fuente: Elaboración propia.

Tal como se evidencia en la figura 3.17, para los 9 minutos de molienda se sigue manteniendo la tendencia, es así que el porcentaje equitativo de bolas, con 60% de bolas de 5 cm, 30% de bolas de 3.5 cm y 10% de bolas de 2.7 cm, sigue presentando una mayor fracción pasante de finos respecto a las demás distribuciones.

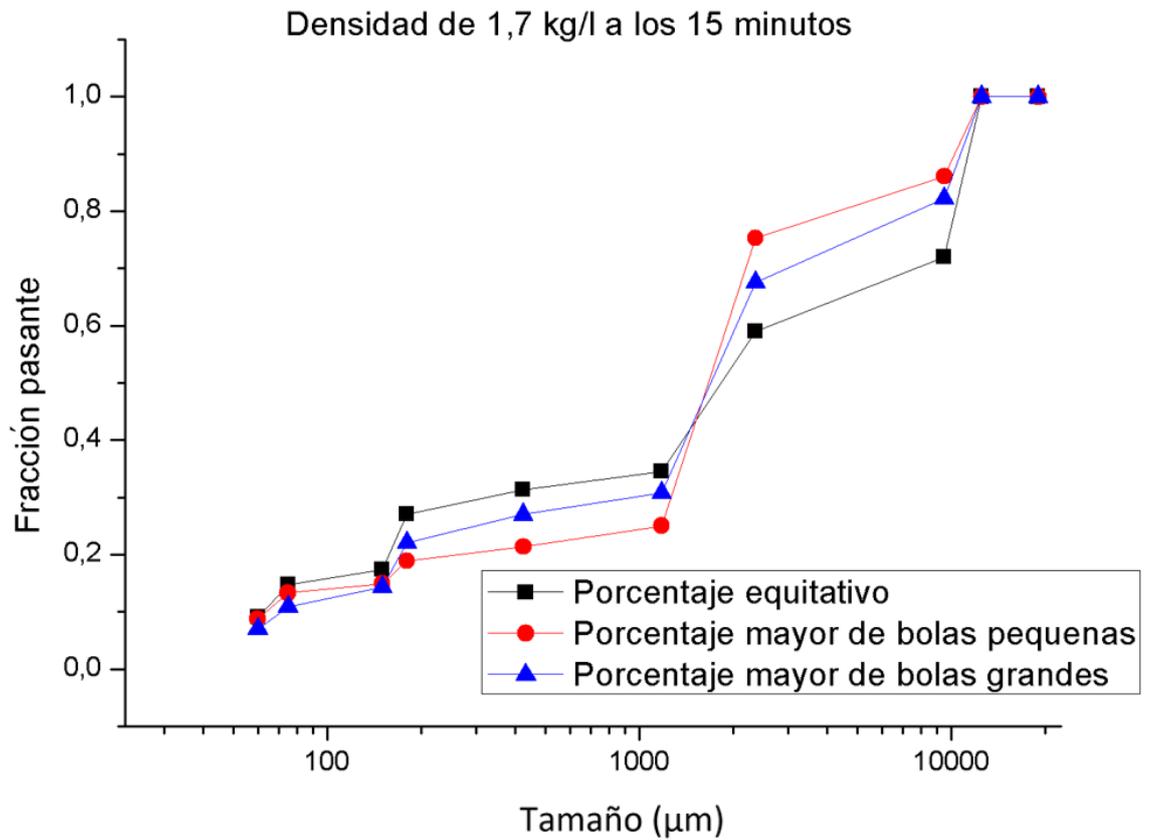


Figura 3.18 Resultados granulométricos de las tres distribuciones a los 15 minutos de la densidad de 1.7 kg/l en el molino de bolas.

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, a los 15 minutos de molienda la tendencia es la misma, manteniéndose así el porcentaje equitativo de bolas, con 60% de bolas de 5 cm, 30% de bolas de 3.5 cm y 10% de bolas de 2.7 cm, como el que una mayor fracción pasante de finos tiene (figura 3.18).

Por otro lado, la densidad de 1.9 kg/l presenta los siguientes resultados:

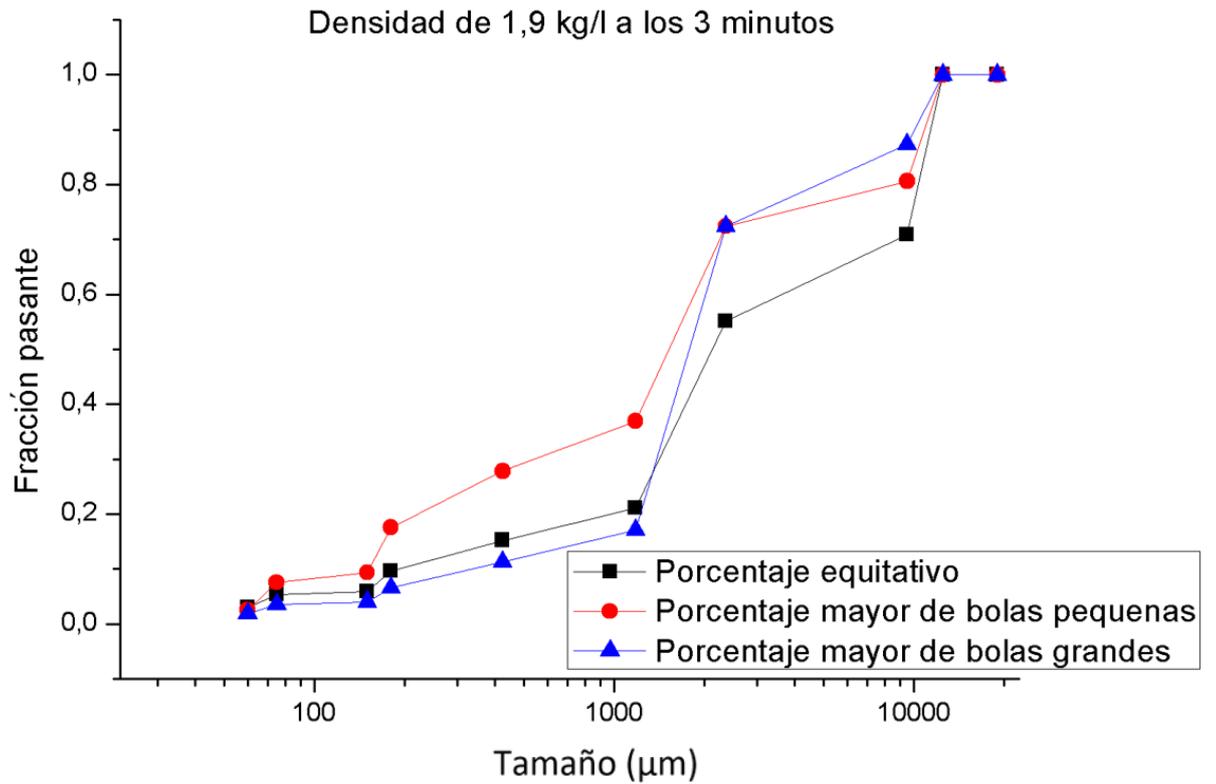


Figura 3.19 Resultados granulométricos de las tres distribuciones a los 3 minutos de la densidad de 1.9 kg/l en el molino de bolas.

Fuente: Elaboración propia.

A los 3 minutos de molienda, el porcentaje mayor de bolas pequeñas, que comprende 10% de bolas de 5 cm, 10% de bolas de 3.5 cm y 80% de bolas de 2.7 cm, es el que denota una mayor fracción pasante de finos en comparación a las demás distribuciones (figura 3.19).

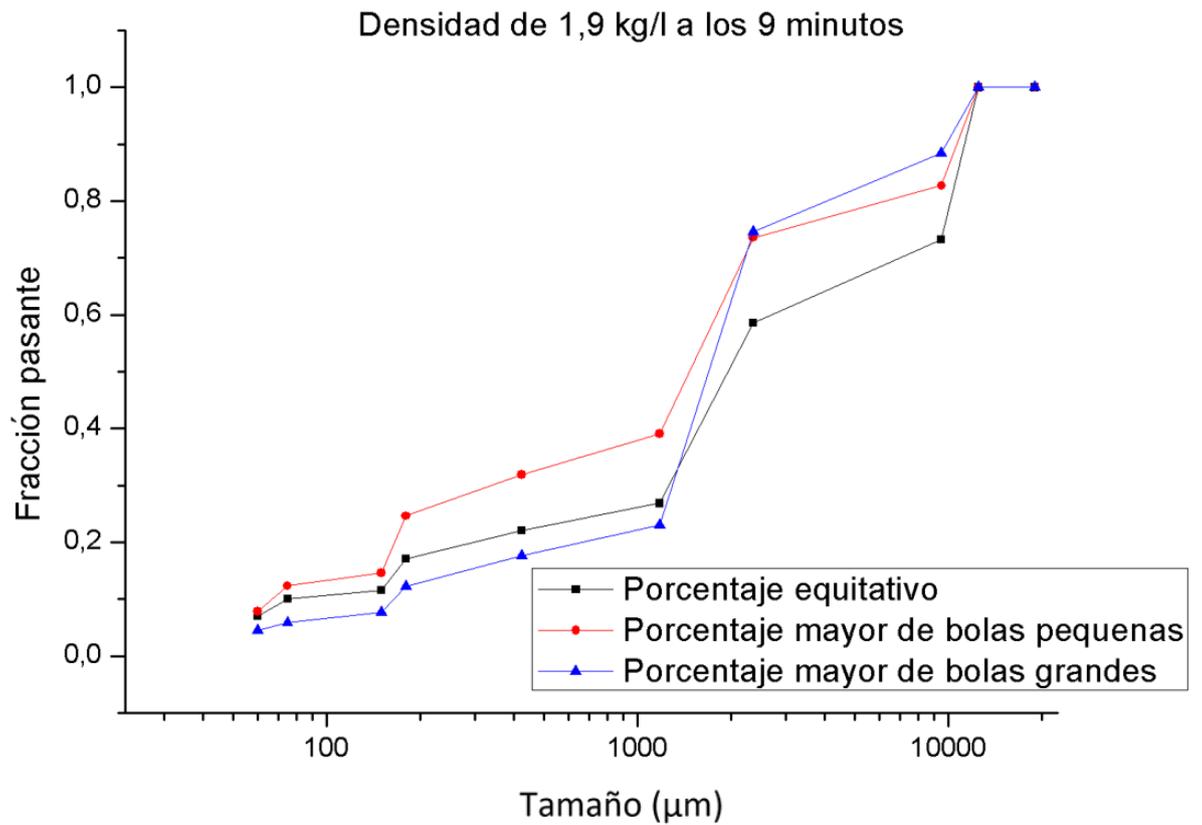


Figura 3.20 Resultados granulométricos de las tres distribuciones a los 3 minutos de la densidad de 1.9 kg/l en el molino de bolas.

Fuente: Elaboración propia.

En cuanto a los 9 minutos de molienda, tal como se aprecia en la figura 3.20, se mantiene la tendencia de que el porcentaje mayor de bolas pequeñas, que comprende 10% de bolas de 5 cm, 10% de bolas de 3.5 cm y 80% de bolas de 2.7 cm, es el que muestra una mayor fracción pasante de finos respecto a las demás distribuciones.

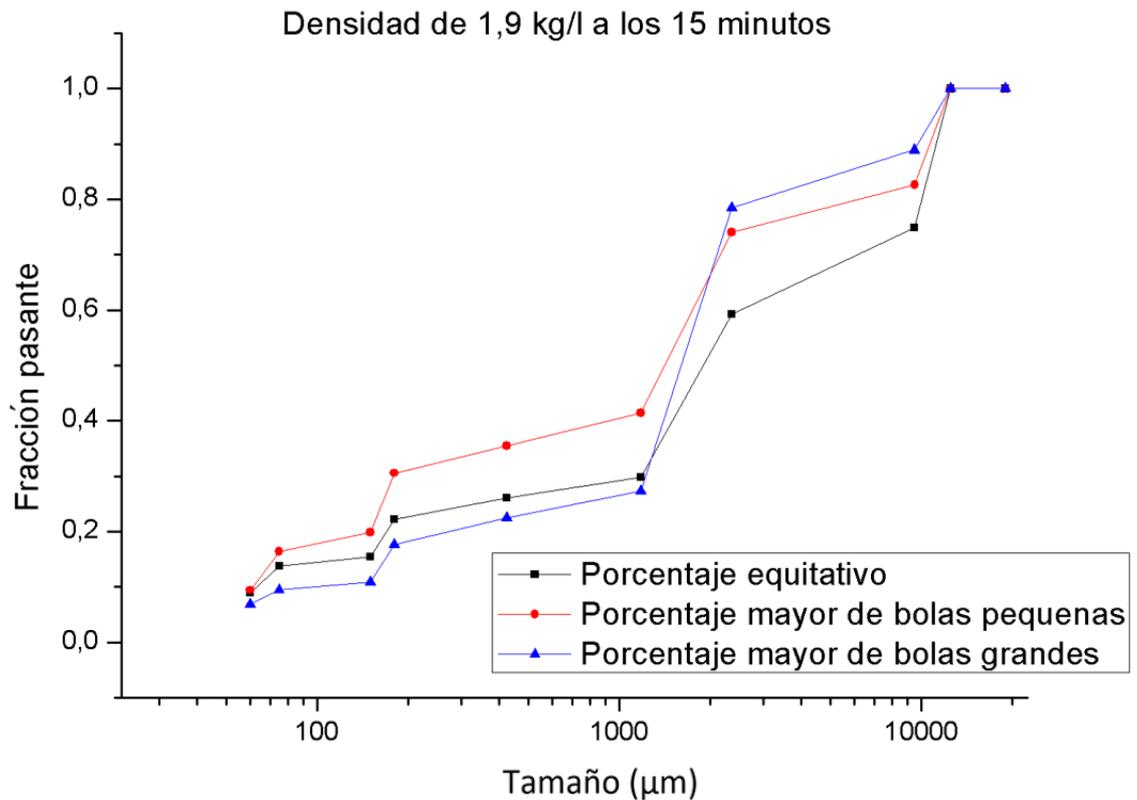


Figura 3.21 Resultados granulométricos de las tres distribuciones a los 15 minutos de la densidad de 1.9 kg/l en el molino de bolas.

Fuente: Elaboración propia.

Por último, a los 15 minutos de molienda, la tendencia prevalece, resultando así que el porcentaje mayor de bolas pequeñas, que comprende 10% de bolas de 5 cm, 10% de bolas de 3.5 cm y 80% de bolas de 2.7 cm, es el que posee una mayor fracción pasante de finos (figura 3.21).

En base a los resultados evidenciados en el tamizaje de muestras se procedió a realizar los cálculos para la velocidad de fractura, apoyándose en la ecuación (5) ($\log[w_1(t)] = \log[w_1(0)] - S_i t / 2.3$), de las tres distribuciones de bolas para cada una de las tres densidades, llegándose así al resultado de que para la distribución con mayor porcentaje de bolas pequeñas (10% de bolas de 5 cm, 10% de bolas de 3.5 cm y 80% de bolas de 2.7 cm) la densidad de 1.5 kg/l es la que mayor velocidad de fractura requiere ocupando una zona de impacto y astillamiento pronunciada, mientras que la densidad de 1.7 kg/l requiere una velocidad de fractura menor y posee una zona de impacto y astillamiento más suave, siendo así la más adecuada para la distribución con mayor porcentaje de bolas pequeñas, tal como se puede observar en la figura 3.22. Por

otro lado, la densidad de 1.9 kg/l presenta la velocidad más baja en comparación a las demás densidades, pero solo se distingue una fuerza de astillamiento.

Tabla 3.8 Datos de la velocidad de fractura para la distribución con mayor porcentaje de bolas pequeñas para el molino de bolas de laboratorio.

Velocidad de fractura			
Tamaño	Densidad 1.9	Densidad 1.5	Densidad 1.7
12500	0.00368	0.0046	0.00115
9500	0.00667	0.01909	0.00874
2360	0.00414	0.00253	0.00345
1180	0.02484	0.01702	0.02346
425	0.04715	0.03818	0.04002
180	0.02645	0.02438	0.00667
75	0.02691	0.08073	0.06187
40	0.05129	0.03358	0.05083

Fuente: Elaboración propia.

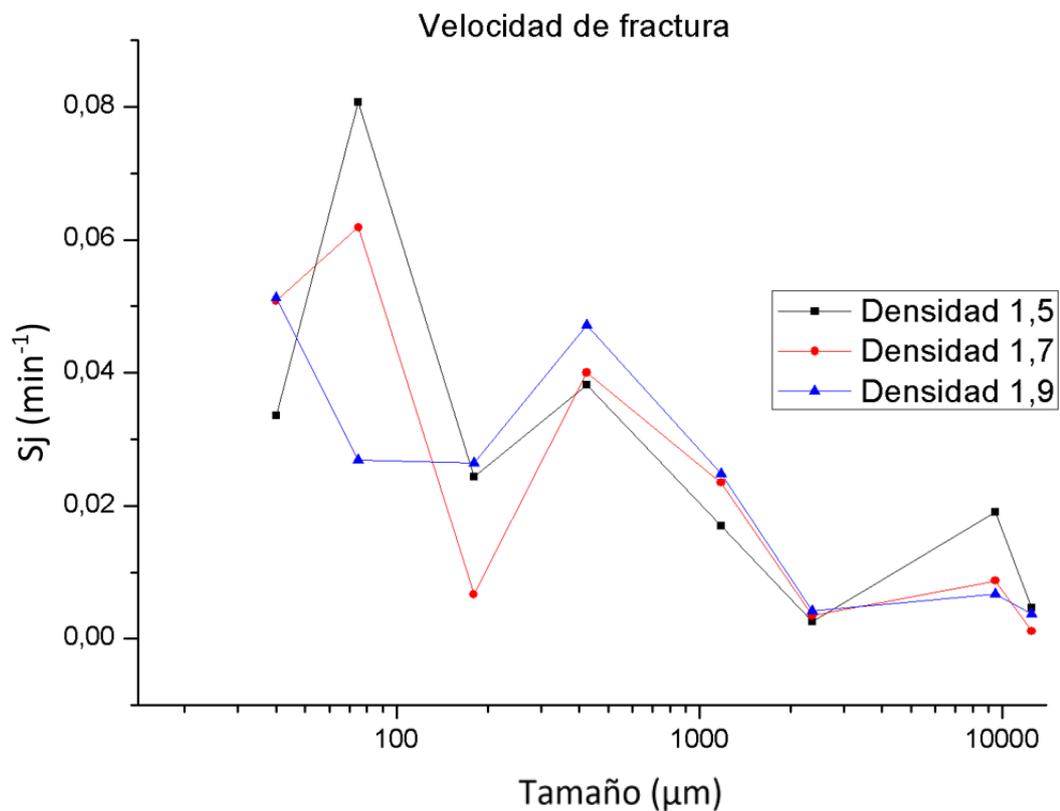


Figura 3.22 Resultados velocidad de fractura para las tres densidades en el molino de bolas con mayor porcentaje de bolas pequeñas.

Fuente: Elaboración propia.

Para la distribución con mayor porcentaje de bolas grandes (80% de bolas de 5 cm, 10% de bolas de 3.5 cm y 10% de bolas de 2.7 cm) se evidencia que la densidad de 1.7 kg/l es la que posee una mejor zona de impacto a pesar de que su velocidad de fractura es mayor a la de las demás densidades. Asimismo, la densidad de 1.5 kg/l presenta la menor velocidad de fractura; sin embargo, su zona de astillamiento es muy pronunciada alcanzado la mayor velocidad de fractura de los ensayos, mientras que la densidad de 1.9 kg/l evidencia una zona de impacto y astillamiento regular, tal como se puede observar en la figura 3.23.

Tabla 3.9 Datos de la velocidad de fractura para una distribución de bolas con mayor porcentaje de bolas grandes para el molino de bolas de laboratorio.

Velocidad de fractura			
Tamaño	Densidad 1.9	Densidad 1.5	Densidad 1.7
12500	0.00667	0.01472	0.0046
9500	0.02231	0.04991	0.01081
2360	0.00414	0.00874	0.0069
1180	0.01426	0.00391	0.01311
425	0.00115	0.00437	0.07038
180	0.06187	0.0414	0.05474
75	0.03703	0.03657	0.0506
40	0.06992	0.11477	0.06417

Fuente: Elaboración propia.

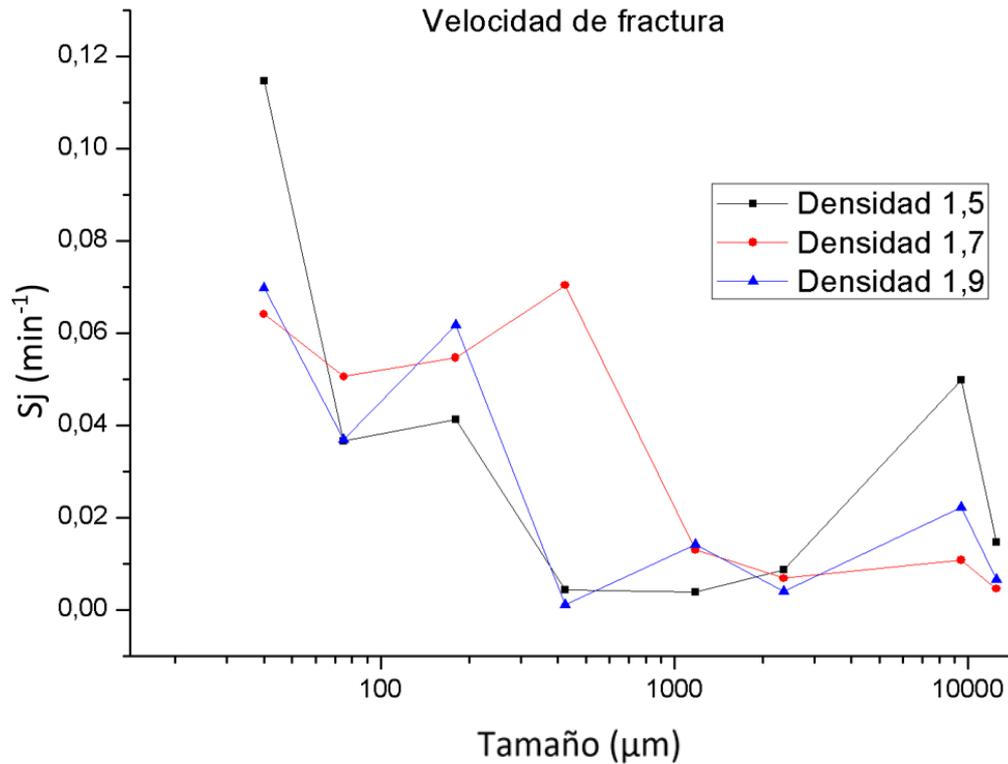


Figura 3.23 Resultados velocidad de fractura para las tres densidades en el molino de bolas con mayor porcentaje de bolas grandes.

Fuente: Elaboración propia.

En cuanto a la distribución con un porcentaje equitativo de bolas (60% de bolas de 5 cm, 30% de bolas de 3.5 cm y 10% de bolas de 2.7 cm), se observa en la figura 3.24, que la densidad de 1.9 kg/l es la que requiere una menor velocidad de fractura para alcanzar un tamaño determinado y su zona de impacto y astillamiento es la más representativa. Por otro lado, la densidad de 1.7 kg/l alcanza la mayor velocidad de fractura y tiene una zona de impacto y astillamiento pronunciada, mientras que la densidad de 1.5 kg/l requiere una velocidad de fractura similar a la de la densidad de 1.9 kg/l, así como su zona de impacto y astillamiento.

Tabla 3.10 Datos de la velocidad de fractura para una distribución con un porcentaje equitativo de bolas para el molino de bolas de laboratorio.

Velocidad de fractura			
Tamaño	Densidad 1.9	Densidad 1.5	Densidad 1.7
12500	0.00805	0.00782	0.01104
9500	0.000046	0.000207	0.0046
2360	0.00897	0.00759	0.00598
1180	0.03059	0.03151	0.04508
425	0.02507	0.02461	0.03473
180	0.03956	0.04163	0.04025
75	0.05014	0.04416	0.04301
40	0.06371	0.06072	0.05221

Fuente: Elaboración propia.

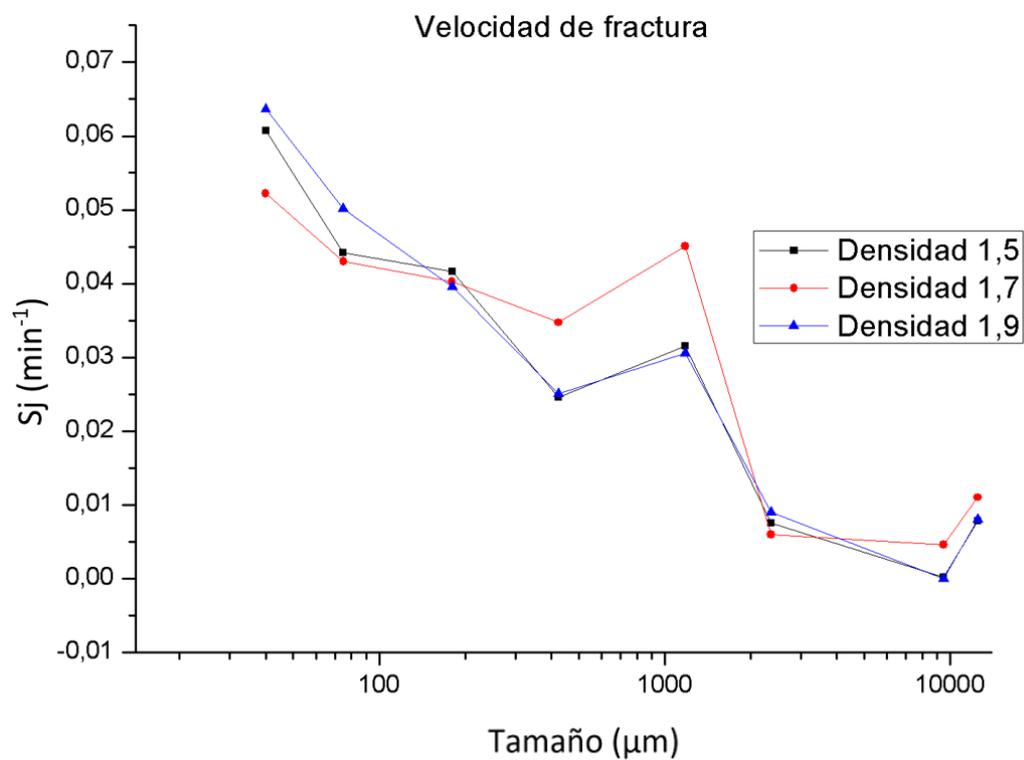


Figura 3.24 Resultados velocidad de fractura para las tres densidades en el molino de bolas con un porcentaje equitativo de bolas.

Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO 4

ANÁLISIS Y RESULTADOS

4.1. Interpretación y tabla de resultados

Tras lo realizado en los capítulos 2 y 3 se obtiene la siguiente tabla de resultados donde se comparó el D80 promedio y la velocidad de fractura para cada ensayo en todos los molinos.

Tabla 4.1 Tabla de comparación de resultados.

Tipo de molino	Densidad (kg/l)	D80 promedio (micras)	Malla pasante	Sj (min⁻¹)
Molino SAG (60%, 30%, 10%)	1.5	4037.11	3/8	0.068
	1.7	4084.5	3/8	0.19
	1.9	4587.45	3/8	0.098
Molino de bolas laboratorio (60%, 30%, 10%)	1.5	12233.24	1/2	0.031
	1.7	12264.44	1/2	0.045
	1.9	11636.75	1/2	0.0305
Molino de bolas laboratorio (80%, 10%, 10%)	1.5	3440.42	3/8	0.041
	1.7	7664.21	3/8	0.054
	1.9	6022.07	3/8	0.06
Molino de bolas laboratorio (10%, 10%, 80%)	1.5	5255.07	3/8	0.081
	1.7	6792.99	3/8	0.061
	1.9	5699.86	3/8	0.027

Molino de bolas planta (55%, 32.5%, 12.5%)	1.5	7063.6	3/8	0.037
	1.7	6399.45	3/8	0.053
	1.9	6216.52	3/8	0.1

Fuente: Elaboración propia.

Los valores de la velocidad de fractura analizados corresponden a tamaño de finos en donde coinciden los puntos de quiebre de zona de impacto y zona de astillamiento de las tres densidades experimentales.

Interpretando los valores obtenidos, se puede determinar que el ensayo de molino de bolas de laboratorio con una densidad de 1.5 kg/l y una distribución de 80% de bolas de 5 cm, 10% de bolas de 3.5 cm y 10% de bolas de 2.7 cm es el que obtuvo un valor menor de D80 (3440.42 μm), es decir, es el que una mejor fragmentación consiguió de todos los ensayos. Esto puede justificarse debido a que las bolas más grandes fracturan mejor un material más grande y la mayor presencia de agua facilita el proceso. Asimismo, el ensayo que requiere una menor velocidad de fractura, de todas las pruebas, para romper el material y alcanzar un tamaño determinado es el de una distribución de 10% de bolas de 5 cm, 10% de bolas de 3.5 cm y 80% de bolas de 2.7 cm, con una densidad de 1.9 kg/l, esto puede ser debido a que al existir una mayor cantidad de bolas pequeñas, estas fracturan las partículas astilladas, más no logran romper el material más grande, requiriendo así una menor velocidad de fractura, pero obteniendo un D80 que no consta como el menor de los ensayos realizados para esta distribución, sino como astillamiento.

En cuanto a los ensayos realizados en el molino SAG se determinó que la prueba con una densidad de 1.5kg/l, y con una carga de bolas de 60% de bolas de 7.8 cm, 30% de bolas de 5 cm y 10% de bolas de 4.2 cm, es la que mejor resultado obtuvo respecto al valor del D80 (4037 μm); asimismo, consiguió el menor valor de velocidad de fractura, siendo este el óptimo.

Del mismo modo, el ensayo realizado en el molino de bolas de laboratorio con una carga de 80% de bolas de 5 cm, 10% de bolas de 3.5 cm y 10 % de bolas de 2.7 cm obtuvo mejores resultados con una densidad de 1.5 kg/l tanto en D80 (3440.42 μm)

como en velocidad de fractura. Igualmente, el ensayo desarrollado con una distribución de 60% de bolas de 5 cm, 30% de bolas de 3.5 cm y 10% de bolas de 2.7 cm y el ensayo con una carga de 10% de bolas de 5 cm, 10% de bolas de 3.5 cm y 80% de bolas de 2.7 cm alcanzaron mejores resultados trabajando con una densidad de 1.9 kg/l en su D80 (11636.75 μm y 5699.86 μm , respectivamente) y en su velocidad de fractura.

Ahora bien, el molino de bolas de planta que trabaja con una distribución de bolas de 55% de bolas de 4 pulgadas, 32.5% de bolas de 3 pulgadas y 12.5% de bolas de 2 pulgadas, obtuvo sus mejores resultados de D80 (7063.6 μm) y de velocidad de fractura, trabajando con una densidad de 1.5 kg/l.

Por otro lado, el ensayo realizado en el molino chileno resultó en un valor de 231.263 micras para el D80, este dato resultó inferior y muy distinto a los demás, debido a que el material muestreado se obtuvo de aquel que salía del molino, pasando una malla ASTM #70, por lo que resulta incongruente comparar este valor con el de los demás molinos. Asimismo, el valor obtenido para la velocidad de fractura en el que se alcanza una fuerza de impacto capaz de fragmentar el material, resulta en 0.106 min^{-1} , siendo este un valor elevado en comparación a los demás, denotando así que el proceso de fracturación se basa en fuerzas de cizallamiento más que en fuerzas de impacto.

4.2. Análisis y comparación de los resultados de cinética de fractura

Se realizó una comparativa tomando los datos de los tamizajes para un porcentaje de carga de bolas semejante y una misma densidad para el molino de bolas de planta, de laboratorio y SAG, salvo el caso del molino chileno en el cual la densidad no tiene una influencia significativa y no precisa de bolas como medios moledores.

Los resultados de dicha comparativa se plasman a continuación:

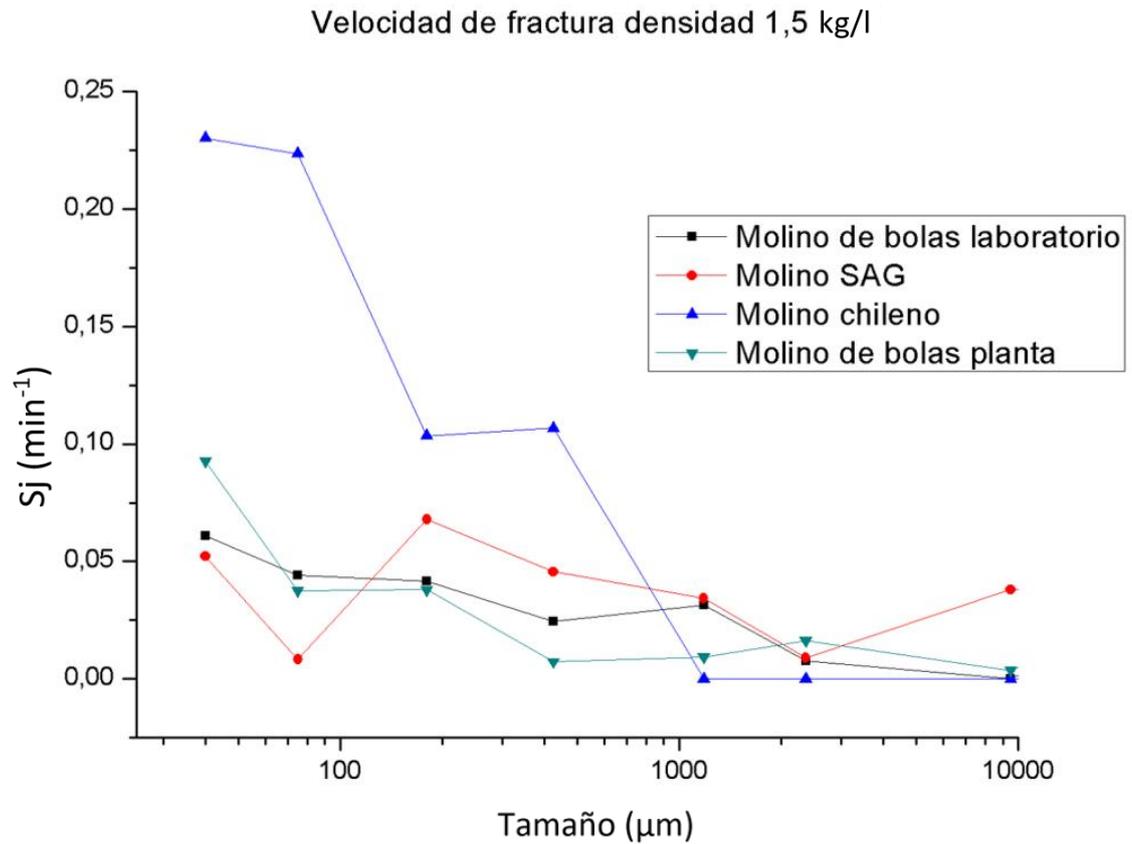


Figura 4.1 Comparación de la velocidad de fractura para los cuatro molinos a una densidad de 1.5 kg/l.

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 4.1, se puede observar que, para alcanzar un tamaño determinado de partícula con la densidad 1.5 kg/l, el molino chileno requiere de una mayor velocidad mientras que el molino de bolas de planta lo consigue a una menor velocidad de fractura. Además, se puede apreciar que el molino de bolas de laboratorio y el molino de bolas de planta tienen una tendencia y valores similares para todas las densidades.

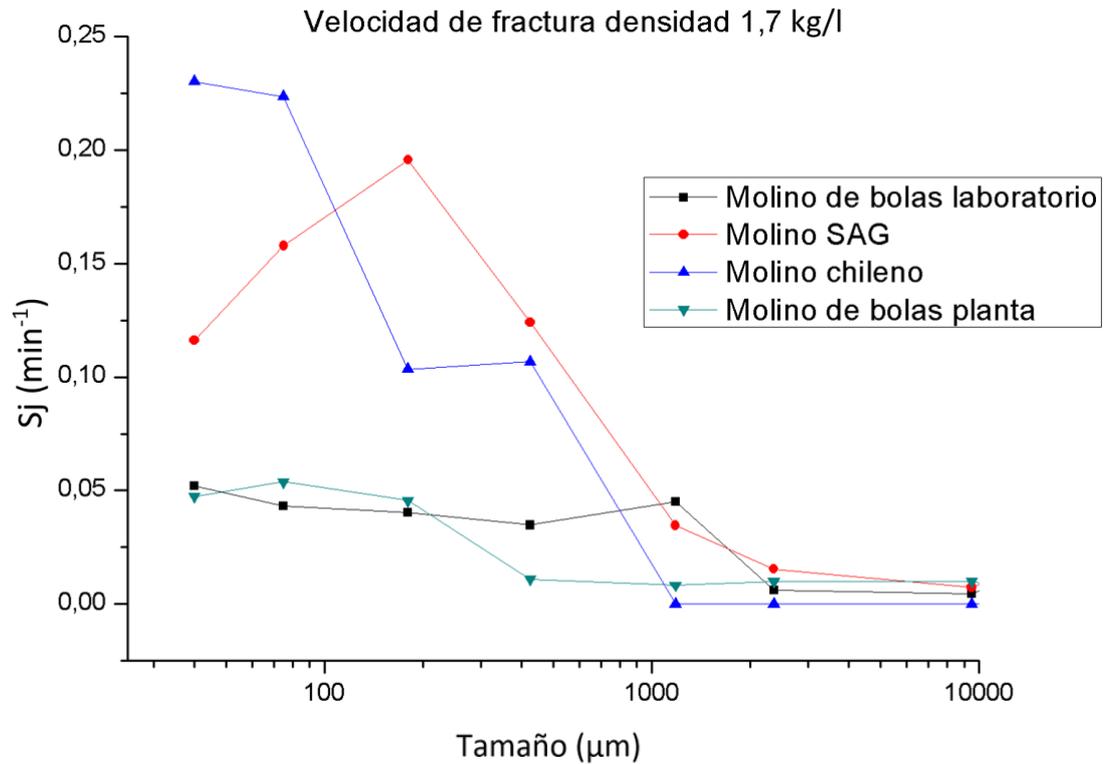


Figura 4.2 Comparación de la velocidad de fractura para los cuatro molinos a una densidad de 1.7 kg/l.

Fuente: Elaboración propia.

En cuanto a la densidad de 1.7 kg/l, se puede apreciar que tanto el molino chileno como el SAG requieren de una velocidad de fractura mucho mayor que el molino de bolas de planta y de laboratorio, para alcanzar un tamaño determinado. Además, se puede observar que la tendencia del molino SAG cambia drásticamente comparada con su semejante de la densidad de 1.5 kg/l, mientras que las densidades del molino chileno, molino de bolas de planta y de laboratorio, se mantienen (figura 4.2).

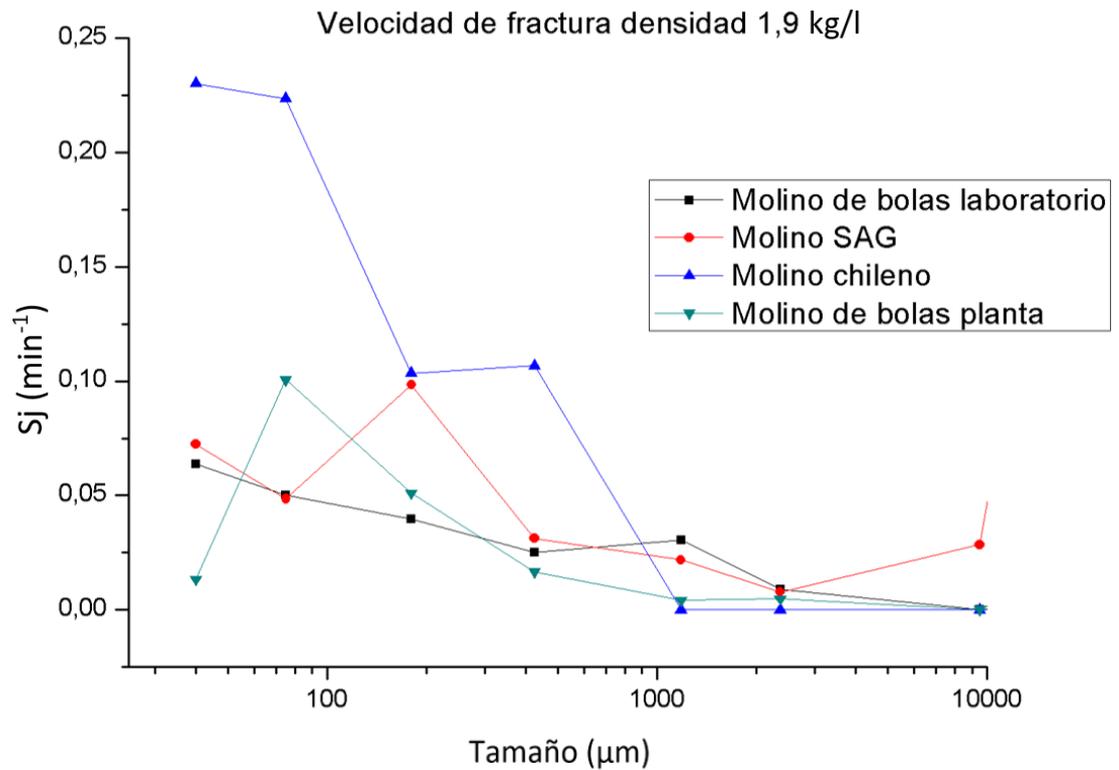


Figura 4.3 Comparación de la velocidad de fractura para los cuatro molinos a una densidad de 1.9 kg/l

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, para la densidad de 1.9 kg/l se evidencia que se mantiene la tendencia inicial para el molino chileno, molino SAG y molino de bolas de laboratorio, por otro lado, el molino de bolas de planta varía levemente su tendencia (figura 4.3).

El análisis de cinética de fractura de los equipos de molienda, tanto en laboratorio como de planta, ha llegado a determinar que el equipo más idóneo para la conminución del material empleado en los ensayos es el molino de bolas en planta con una distribución de 55% de bolas de 4 pulgadas, 32.5% de bolas de 3 pulgadas y 12.5% de 2 pulgadas, utilizando una densidad de 1.5 kg/l.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

- Al analizar la eficiencia de la cinética de fractura entre los molinos de bolas de planta y SAG de laboratorio, variando el porcentaje de humedad, se determinó que la densidad de 1.5 kg/l es la que denota una velocidad de fractura menor para alcanzar un tamaño determinado en comparación con los otros ensayos. Asimismo, esta densidad posee la fracción pasante más significativa de finos en comparación con las otras densidades.
- Para la carga de distribución del molino de bolas de laboratorio se analizó la fracción pasante más representativa en cada caso y se obtuvieron los siguientes resultados; la carga de 60% de bolas de 5 cm, 30% de bolas de 3.5 cm y 10% de bolas de 2.7 cm tiene un menor D80, trabajando con una densidad de 1.9 kg/l. Asimismo, para el porcentaje de carga de 10% de bolas de 5 cm, 10% de bolas de 3.5 cm y 80% de bolas de 2.7 cm se tuvo que en la densidad de 1.5 kg/l mostró mejores resultados. Finalmente, para la carga de bolas de 80% de bolas de 5 cm, 10% de bolas de 3.5 cm y 10% de bolas de 2.7 cm el mejor resultado fue el de la densidad 1.5 kg/l.
- En el molino de bolas de laboratorio, la densidad de 1.5 kg/l es la que presenta una menor velocidad de fractura para la distribución de bolas de 80% de bolas de 5 cm, 10% de bolas de 3.5 cm y 10% de bolas de 2.7 cm. Por otro lado, la densidad de 1.9 kg/l es la que evidencia una menor velocidad de fractura para las dos distribuciones de bolas restantes. Asimismo, los ensayos realizados con un mayor porcentaje de bolas pequeñas muestran la menor velocidad de fractura de todos los ensayos realizados para este molino.
- Las pruebas desarrolladas en el molino chileno determinaron que la fuerza predominante es de cizallamiento, debido a que las ruedas del molino giran sobre el material asentado en la base generando abrasión, más no impacto. La densidad con la que trabaja el molino es de 1.15 kg/l y esta no representa una variante significativa en el proceso de molienda.
- Finalmente, los ensayos realizados permitieron verificar que las condiciones del molino de planta de uso actual son las que mejores resultados de molienda obtienen en cuanto a cinética de fractura.

Recomendaciones

- El molino SAG funciona mejor como un equipo de trituración secundaria más que como un equipo de molienda, por lo que se sugiere que en planta se continúe con el molino de bolas.
- Es recomendable que el proceso de molienda se desarrolle con una mayor cantidad de agua para este tipo de material, ya que los ensayos realizados han demostrado que se obtienen mejores resultados.
- La distribución de carga de bolas depende íntegramente del tipo y tamaño de material que ingresa al equipo, por lo que se recomienda elegir la distribución en base a estas variables.
- Se recomienda realizar este tipo de análisis de velocidad de fractura con otros tipos de roca, puesto que las condiciones de molienda variarán según sus características.
- Los resultados obtenidos cambiarán de acuerdo al tipo de molienda que se efectúe, es por ello que sería recomendable realizar ensayos para el mismo tipo de material en molienda seca.
- Por motivos de seguridad no es recomendable tomar las muestras dentro de los molinos, sino trabajar con el material saliente de los mismos.
- Para la planta de tratamiento se recomienda realizar un estudio para determinar si es necesario implementar un proceso de flotación, anterior al actual de cianuración, siguiendo así un circuito.
- En la planta de tratamiento se recomienda realizar estudios de razón de reducción para las trituradoras, para que ingrese un material más pequeño a molienda y así tratar de mejorar este proceso.

BIBLIOGRAFÍA

Alcántara, J. (2008). *DISEÑO PRÁCTICO DE UN MOLINO DE BOLAS*. Obtenido de INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL: <https://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/107/TESIS+Juan+Ramon+Alcantara+Valladares++MOLINO+DE+BOLAS.pdf?sequence=1>

Alderete, R. (2012). *OPTIMIZACIÓN DEL CIRCUITO DE MOLIENDA-CLASIFICACIÓN PARA LA RECUPERACIÓN DE MINERALES VALIOSOS*. Obtenido de <https://es.slideshare.net/zadithcinthialazarocampos/richard-numerado>

Altamirano, M., & Sacoto, D. (2017). *Evaluación experimental del proceso de molienda de crudo de UCEM Planta Industrial Guapán*. Obtenido de <https://dspace.uazuay.edu.ec/bitstream/datos/7251/1/13195.pdf>

Álvarez, P., & Sánchez, E. (2021). *Incidencia de la velocidad de rotación en la eficiencia de molienda SAG*. Obtenido de <https://dspace.uazuay.edu.ec/bitstream/datos/11537/1/17069.pdf>

Arriagada, M. (6 de agosto de 2013). *Molienda* . Obtenido de <https://es.slideshare.net/miguelangelarriagada/molienda-24994633>

Austin , L., & Concha, F. (1994). *Diseño y simulación de circuitos de molienda y clasificación*. Concepcion, Chile: CYTED.

Blanco, E. A. (2014). *Molienda*. Obtenido de https://ocw.unican.es/pluginfile.php/693/course/section/703/8._molienda.pdf

Cabezas, E. (2017). *DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN MOLINO DE BOLAS PARA APLICACIONES DE PULVIMETALURGIA EN LOS LABORATORIOS DE INGENIERÍA MECÁNICA DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO*. Obtenido de UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO: <https://repositorio.uta.edu.ec/bitstream/123456789/26388/1/Tesis%20I.%20M.%20398%20-%20Cabezas%20Casco%20Erik%20Andr%c3%a9s.pdf>

Cárcamo, H. (2003). *Operaciones mecánicas* . Chile: Universidad Católica del Norte

Codelco . (2018). *Molienda*. Obtenido de https://www.codelcoeduca.cl/codelcoeduca/site/artic/20190109/asocfile/20190109005343/molienda_media_t_cnico_060119.pdf

Coello, A. (1993). *Consideraciones sobre la molienda de los minerales lateríticos*. Obtenido de [https://ninive.ismm.edu.cu/bitstream/handle/123456789/2483/Namindo.pdf?sequence=1&isAllowed=y#:~:text=Se%20denomina%20cin%20C3%A9tica%20de%20molienda,molienda%20\(Coello%201993\)](https://ninive.ismm.edu.cu/bitstream/handle/123456789/2483/Namindo.pdf?sequence=1&isAllowed=y#:~:text=Se%20denomina%20cin%20C3%A9tica%20de%20molienda,molienda%20(Coello%201993)).

Colorado, L., Llano, S., & Osorio, A. (24 de Marzo de 2020). *Quartz grinding specific rate of breakege classification by discriminant analysis*. Obtenido de <https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistauisingenierias/article/view/10166/10455>

Corral, J. (2012). *CARACTERIZACIÓN GRANULOMÉTRICA DE LAS PLANTAS PRODUCTORAS DE ARENA EN LA REPUBLICA DOMINICANA, SU IMPACTO EN LA CALIDAD Y COSTO DEL HORMIGÓN*. Obtenido de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=87024622003>

Guerrero, R. (2015). *PLAN DE DESARROLLO Y ORDENAMIENTO TERRITORIAL DEL CANTÓN CAMILO PONCE ENRÍQUEZ*. Obtenido de <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/23513>

León, J. (1999). *Situación actual de la mediana minería en el Ecuador. Cambio de sistema de producción en la mina Bonanza*. Obtenido de <https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/3347/1/5869.pdf>

Leyva, E., Fernández, M., González, O., Sánchez, A., & Ferreiro, Y. (2009). Estudio de la cinética de molienda de la mena de cromita del yacimiento Albertina. *Tecnología Química*, 55-63.

Martinez, J., & Diaz, F. (2016). *DISEÑO DEL PROTOTIPO DE UN MOLINO DE BOLAS PARA LABORATORIO*. Obtenido de https://www.ipomex.org.mx/recursos/ipo/files_ipo3/2019/44020/1/c2da996526c5953a41f2d6669515a6cf.pdf

Morales, A. (2004). *IEEPO*. Obtenido de http://pep.ieepo.oaxaca.gob.mx/recursos/multimedia/rocas_minerales/publi_rocas/ba-salto-p04.htm

Rodriguez, R. (2019). *AMPLIACIÓN DE PROCESO BONANZA E INSTALACIÓN DE PLANTA RUMICURI- ECUADOR*. Obtenido de <http://repositorio.unsa.edu.pe/bitstream/handle/UNSA/9829/IMromorm.pdf?sequence=1&isAllowed=y#:~:text=Los%20molinos%20que%20se%20utilizan,capacidad%20instalada%20de%2030%20Ton.>

Rosales , G., Andrade, J., Alvarado, G., Espinosa, E., & Nava, D. (13 de noviembre de 2020). *Investigación experimental en el consumo de energía específica y reducción de tamaño en la molienda de bolas usando diferentes tipos de levantador*. Obtenido de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-77432020000200110

Silva, M. (2013). *VARIABLES OPERACIONALES Y SU INFLUENCIA EN LA OPERACIÓN, PRO OPTIMIZACION DEL CONSUMO ENERGETICO EN LA MOLIENDA SAG*. Obtenido de UNIVERSIDAD DE CHILE: <http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/116302/VARIABLES-operacionales-y-su-influencia-en-la-operacio%CC%81n-pro-optimizacio%CC%81n.pdf?sequence=4&isAllowed=y>

Universidad de Buenos Aires. (2015). *Molienda*. Obtenido de http://materias.fi.uba.ar/7202/MaterialAlumnos/06_Apunte%20Molienda.pdf

ANEXOS

Anexo 1. Molino de bolas de planta: tablas peso retenido, granulometría Rossin-Rammler ensayo 1.9 kg/l.

Tiempo 3 minutos							
Malla	X	Peso Retenido (kg)	Fracción retenida f(x)	Fracción pasante acumulada F(x)	x f(x)	Rosin - Rammler	
						X	Y
						ln(x)	ln(ln(1/(1-F(x))))
+3/4	19000	0	0	1	0	9,852194258	#jDIV/0!
-3/4/+0,5	12500	0,275	0,15035539	1	1879,44232	9,433483923	#jDIV/0!
-0,5/+3/8	9500	0,232	0,12684527	0,84964461	1205,03007	9,159047078	0,639088778
-3/8/+8	2360	0,838	0,45817387	0,72279934	1081,29032	7,766416898	0,249211721
-8/+16	1180	0,169	0,09240022	0,26462548	109,032258	7,073269717	-1,179685619
-16/+40	425	0,101	0,05522143	0,17222526	23,4691088	6,052089169	-1,665933058
-40/+80	180	0,074	0,04045927	0,11700383	7,28266812	5,192956851	-2,083976507
-80/+100	150	0,024	0,01312192	0,07654456	1,96828868	5,010635294	-2,53033007
-100/+200	75	0,036	0,01968289	0,06342264	1,47621651	4,317488114	-2,725351763
-200	60	0,08	0,04373975	0,04373975	2,62438491	4,094344562	-3,107218773
		1,829	1				

Tiempo 9 minutos							
Malla	X	Peso Retenido (kg)	Fracción retenida f(x)	Fracción pasante acumulada F(x)	x f(x)	Rosin - Rammler	
						X	Y
						ln(x)	ln(ln(1/(1-F(x))))
+3/4	19000	0	0	1	0	9,852194258	#jDIV/0!
-3/4/+0,5	12500	0,269	0,1478022	1	1847,52747	9,433483923	#jDIV/0!
-0,5/+3/8	9500	0,222	0,12197802	0,8521978	1158,79121	9,159047078	0,648087261
-3/8/+8	2360	0,746	0,40989011	0,73021978	967,340659	7,766416898	0,270139843
-8/+16	1180	0,156	0,08571429	0,32032967	101,142857	7,073269717	-0,951536097
-16/+40	425	0,112	0,06153846	0,23461538	26,1538462	6,052089169	-1,319096356
-40/+80	180	0,101	0,05549451	0,17307692	9,98901099	5,192956851	-1,660501744
-80/+100	150	0,042	0,02307692	0,11758242	3,46153846	5,010635294	-2,078722716
-100/+200	75	0,07	0,03846154	0,09450549	2,88461538	4,317488114	-2,309870874
-200	60	0,102	0,05604396	0,05604396	3,36263736	4,094344562	-2,852919728
		1,82	1				

Tiempo 15 minutos							
Malla	X	Peso Retenido (kg)	Fracción retenida f(x)	Fracción pasante acumulada F(x)	x f(x)	Rosin - Rammler	
						X	Y
						ln(x)	ln(ln(1/(1-F(x))))
+3/4	19000	0	0	1	0	9,852194258	#jDIV/0!
-3/4/+0,5	12500	0,241	0,13344408	1	1668,05094	9,433483923	#jDIV/0!
-0,5/+3/8	9500	0,211	0,11683278	0,86655592	1109,91141	9,159047078	0,700158941
-3/8/+8	2360	0,691	0,38261351	0,74972315	902,967885	7,766416898	0,325835549
-8/+16	1180	0,141	0,07807309	0,36710963	92,1262458	7,073269717	-0,782070048
-16/+40	425	0,111	0,06146179	0,28903654	26,1212625	6,052089169	-1,075479185
-40/+80	180	0,144	0,07973422	0,22757475	14,3521595	5,192956851	-1,35394319
-80/+100	150	0,073	0,04042082	0,14784053	6,06312292	5,010635294	-1,832696469
-100/+200	75	0,149	0,08250277	0,10741971	6,18770764	4,317488114	-2,174730186
-200	60	0,045	0,02491694	0,02491694	1,49501661	4,094344562	-3,67961746
		1,806	1				

Anexo 2. Molino de bolas de planta: tablas peso retenido, granulometría Rossin-Rammler ensayo 1.5 kg/l.

Tiempo 3 minutos							
Malla	X	Peso Retenido (kg)	Fracción retenida f(x)	Fracción pasante acumulada F(x)	x f(x)	Rosin - Rammler	
						X	Y
						ln(x)	ln(ln(1/(1-F(x))))
+3/4	19000	0	0	1	0	9,852194258	#¡DIV/0!
-3/4/+0,5	12500	0,372	0,2027248	1	2534,05995	9,433483923	#¡DIV/0!
-0,5/+3/8	9500	0,224	0,12207084	0,7972752	1159,67302	9,159047078	0,467441541
-3/8/+8	2360	0,765	0,41689373	0,67520436	983,86921	7,766416898	0,117391042
-8/+16	1180	0,151	0,08228883	0,25831063	97,1008174	7,073269717	-1,207897972
-16/+40	425	0,103	0,05613079	0,1760218	23,8555858	6,052089169	-1,641903235
-40/+80	180	0,074	0,04032698	0,11989101	7,25885559	5,192956851	-2,057996931
-80/+100	150	0,029	0,01580381	0,07956403	2,37057221	5,010635294	-2,490025605
-100/+200	75	0,043	0,02343324	0,06376022	1,75749319	4,317488114	-2,719864851
-200	60	0,074	0,04032698	0,04032698	2,41961853	4,094344562	-3,190223939

Tiempo 9 minutos							
Malla	X	Peso Retenido (kg)	Fracción retenida f(x)	Fracción pasante acumulada F(x)	x f(x)	Rosin - Rammler	
						X	Y
						ln(x)	ln(ln(1/(1-F(x))))
+3/4	19000	0	0	1	0	9,852194258	#¡DIV/0!
-3/4/+0,5	12500	0,332	0,18271877	1	2283,98459	9,433483923	#¡DIV/0!
-0,5/+3/8	9500	0,214	0,11777655	0,81728123	1118,87727	9,159047078	0,530514774
-3/8/+8	2360	0,677	0,37259218	0,69950468	879,317556	7,766416898	0,184255596
-8/+16	1180	0,13	0,07154651	0,32691249	84,4248762	7,073269717	-0,926644314
-16/+40	425	0,107	0,05888828	0,25536599	25,0275179	6,052089169	-1,221246336
-40/+80	180	0,114	0,06274078	0,19647771	11,2933407	5,192956851	-1,519824137
-80/+100	150	0,041	0,02256467	0,13373693	3,38470006	5,010635294	-1,940955965
-100/+200	75	0,097	0,0533847	0,11117226	4,0038525	4,317488114	-2,138327098
-200	60	0,105	0,05778756	0,05778756	3,46725371	4,094344562	-2,82136709
		1,817	1				

Tiempo 15 minutos							
Malla	X	Peso Retenido (kg)	Fracción retenida f(x)	Fracción pasante acumulada F(x)	x f(x)	Rosin - Rammler	
						X	Y
						ln(x)	ln(ln(1/(1-F(x))))
+3/4	19000	0	0	1	0	9,852194258	#¡DIV/0!
-3/4/+0,5	12500	0,317	0,17630701	1	2203,8376	9,433483923	#¡DIV/0!
-0,5/+3/8	9500	0,208	0,11568409	0,82369299	1098,99889	9,159047078	0,551311944
-3/8/+8	2360	0,592	0,32925473	0,7080089	777,041157	7,766416898	0,207852803
-8/+16	1180	0,128	0,07119021	0,37875417	84,0044494	7,073269717	-0,742277729
-16/+40	425	0,116	0,06451613	0,30756396	27,4193548	6,052089169	-1,000924739
-40/+80	180	0,136	0,0756396	0,24304783	13,6151279	5,192956851	-1,27849805
-80/+100	150	0,032	0,01779755	0,16740823	2,66963293	5,010635294	-1,697112251
-100/+200	75	0,083	0,0461624	0,14961068	3,4621802	4,317488114	-1,819782415
-200	60	0,186	0,10344828	0,10344828	6,20689655	4,094344562	-2,2145807
		1,798	1				

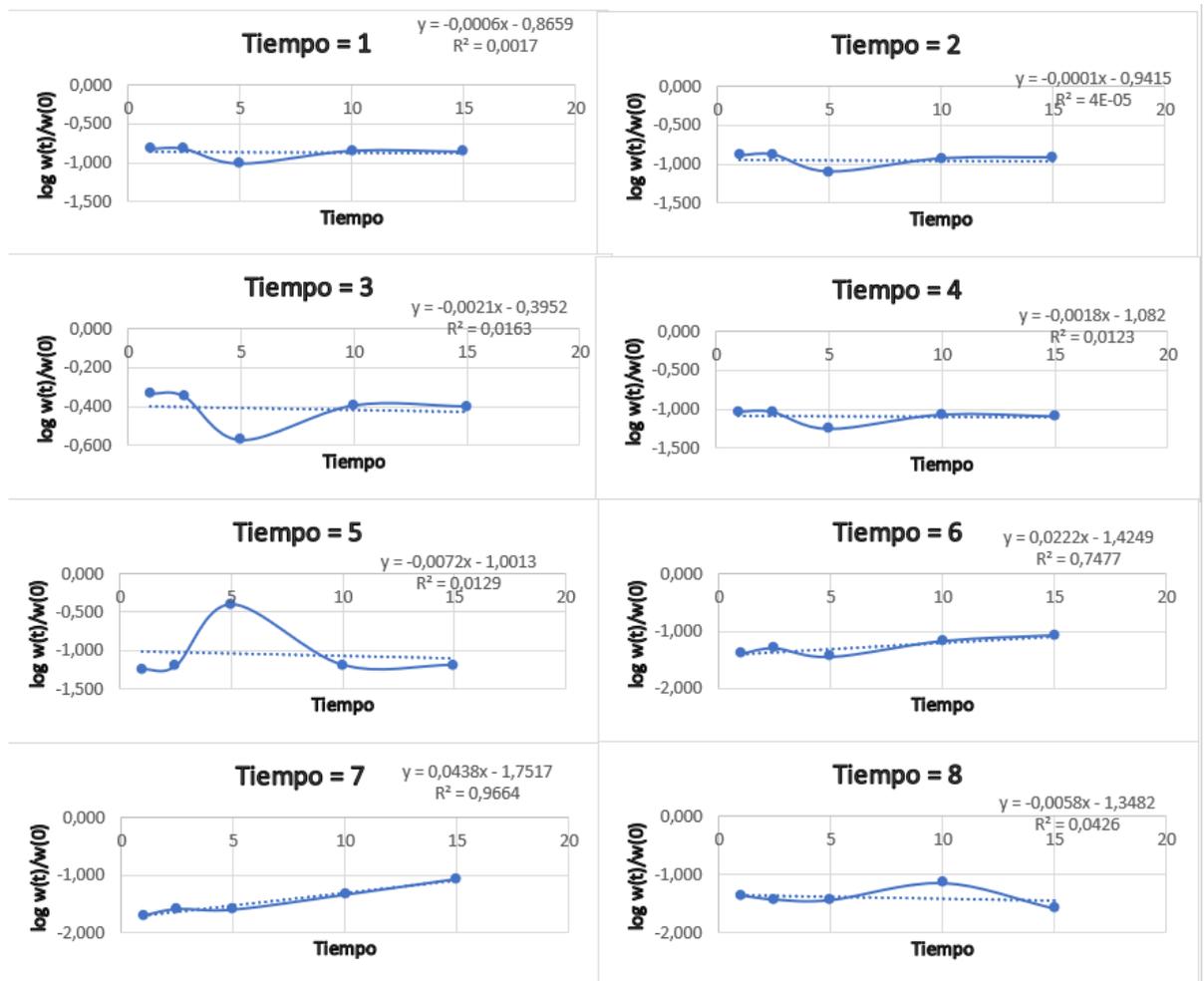
Anexo 3. Molino de bolas de planta: tablas peso retenido, granulometría Rossin-Rammler ensayo 1.7 kg/l

Tiempo 3 minutos							
Malla	X	Peso Retenido (kg)	Fracción retenida f(x)	Fracción pasante acumulada F(x)	x f(x)	Rosin - Rammler	
						X	Y
						ln(x)	ln(ln(1/(1-F(x))))
+3/4	19000	0	0	1	0	9,852194258	#iDIV/0!
-3/4/+0,5	12500	0,308	0,16803055	1	2100,38189	9,433483923	#iDIV/0!
-0,5/+3/8	9500	0,247	0,13475177	0,83196945	1280,14184	9,159047078	0,5786391
-3/8/+8	2360	0,84	0,45826514	0,69721768	1081,50573	7,766416898	0,177929538
-8/+16	1180	0,147	0,0801964	0,23895254	94,6317512	7,073269717	-1,298065363
-16/+40	425	0,091	0,04964539	0,15875614	21,0992908	6,052089169	-1,755194045
-40/+80	180	0,067	0,0365521	0,10911075	6,57937807	5,192956851	-2,158180424
-80/+100	150	0,02	0,01091107	0,07255865	1,63666121	5,010635294	-2,585933665
-100/+200	75	0,039	0,0212766	0,06164757	1,59574468	4,317488114	-2,754675282
-200	60	0,074	0,04037098	0,04037098	2,42225859	4,094344562	-3,189110658
		1,833	1				

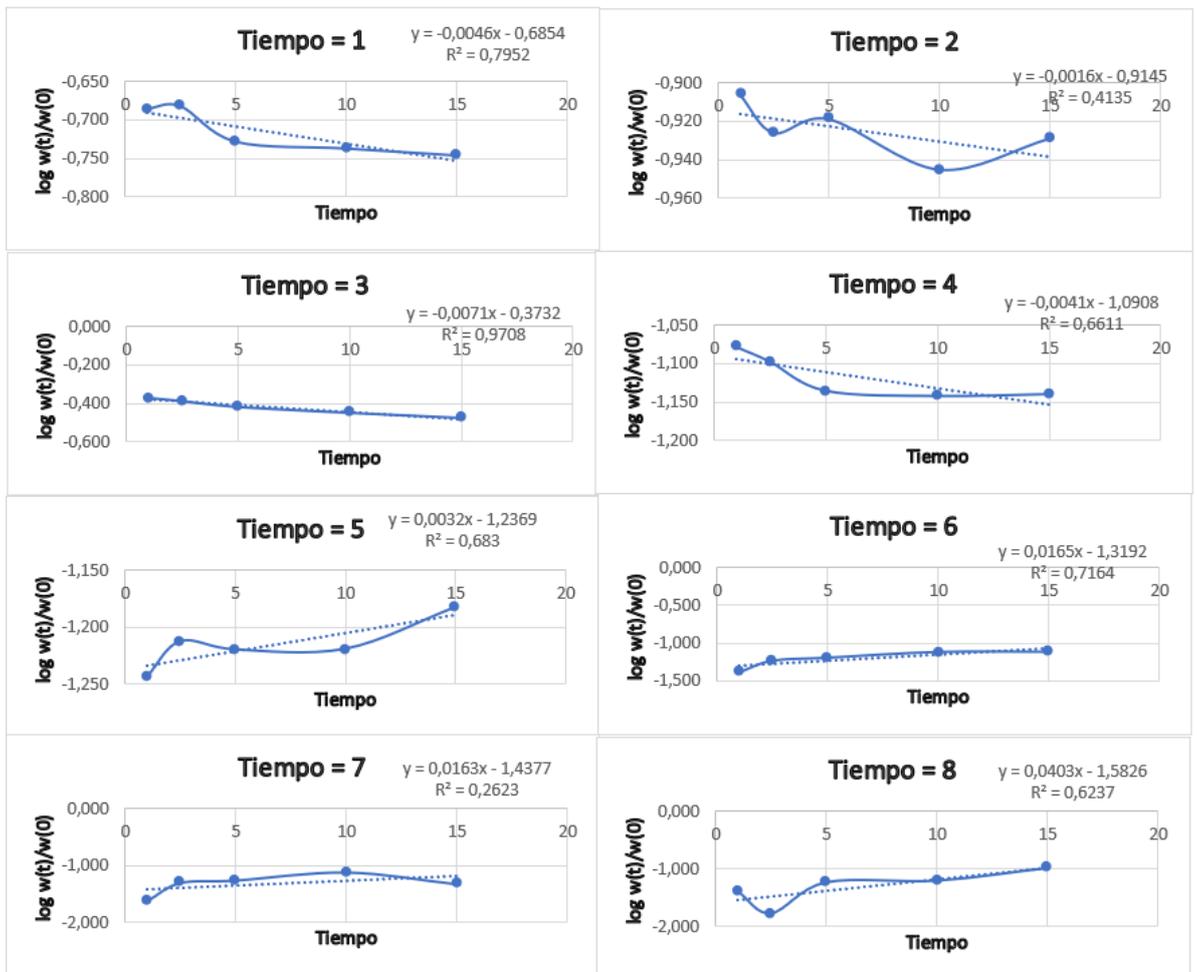
Tiempo 9 minutos							
Malla	X	Peso Retenido (kg)	Fracción retenida f(x)	Fracción pasante acumulada F(x)	x f(x)	Rosin - Rammler	
						X	Y
						ln(x)	ln(ln(1/(1-F(x))))
+3/4	19000	0	0	1	0	9,852194258	#iDIV/0!
-3/4/+0,5	12500	0,268	0,14741474	1	1842,68427	9,433483923	#iDIV/0!
-0,5/+3/8	9500	0,231	0,12706271	0,85258526	1207,09571	9,159047078	0,649459257
-3/8/+8	2360	0,761	0,41859186	0,72552255	987,876788	7,766416898	0,256877067
-8/+16	1180	0,137	0,07535754	0,30693069	88,9218922	7,073269717	-1,003415002
-16/+40	425	0,097	0,05335534	0,23157316	22,6760176	6,052089169	-1,334043846
-40/+80	180	0,1	0,0550055	0,17821782	9,9009901	5,192956851	-1,628213531
-80/+100	150	0,032	0,01760176	0,12321232	2,64026403	5,010635294	-2,028821317
-100/+200	75	0,059	0,03245325	0,10561056	2,4339934	4,317488114	-2,192708927
-200	60	0,133	0,07315732	0,07315732	4,38943894	4,094344562	-2,577397905
		1,818	1				

Tiempo 15 minutos							
Malla	X	Peso Retenido (kg)	Fracción retenida f(x)	Fracción pasante acumulada F(x)	x f(x)	Rosin - Rammler	
						X	Y
						ln(x)	ln(ln(1/(1-F(x))))
+3/4	19000	0	0	1	0	9,852194258	#iDIV/0!
-3/4/+0,5	12500	0,261	0,14712514	1	1839,06426	9,433483923	#iDIV/0!
-0,5/+3/8	9500	0,210	0,11837655	0,85287486	1124,57723	9,159047078	0,650485868
-3/8/+8	2360	0,703	0,39627959	0,73449831	935,219842	7,766416898	0,282267994
-8/+16	1180	0,126	0,07102593	0,33821871	83,8105975	7,073269717	-0,884743223
-16/+40	425	0,103	0,05806088	0,26719278	24,6758737	6,052089169	-1,168372035
-40/+80	180	0,124	0,06989853	0,20913191	12,5817362	5,192956851	-1,449770693
-80/+100	150	0,029	0,01634724	0,13923337	2,45208568	5,010635294	-1,89757437
-100/+200	75	0,1	0,05636979	0,12288613	4,22773393	4,317488114	-2,031654104
-200	60	0,118	0,06651635	0,06651635	3,99098083	4,094344562	-2,676089026
		1,774	1				

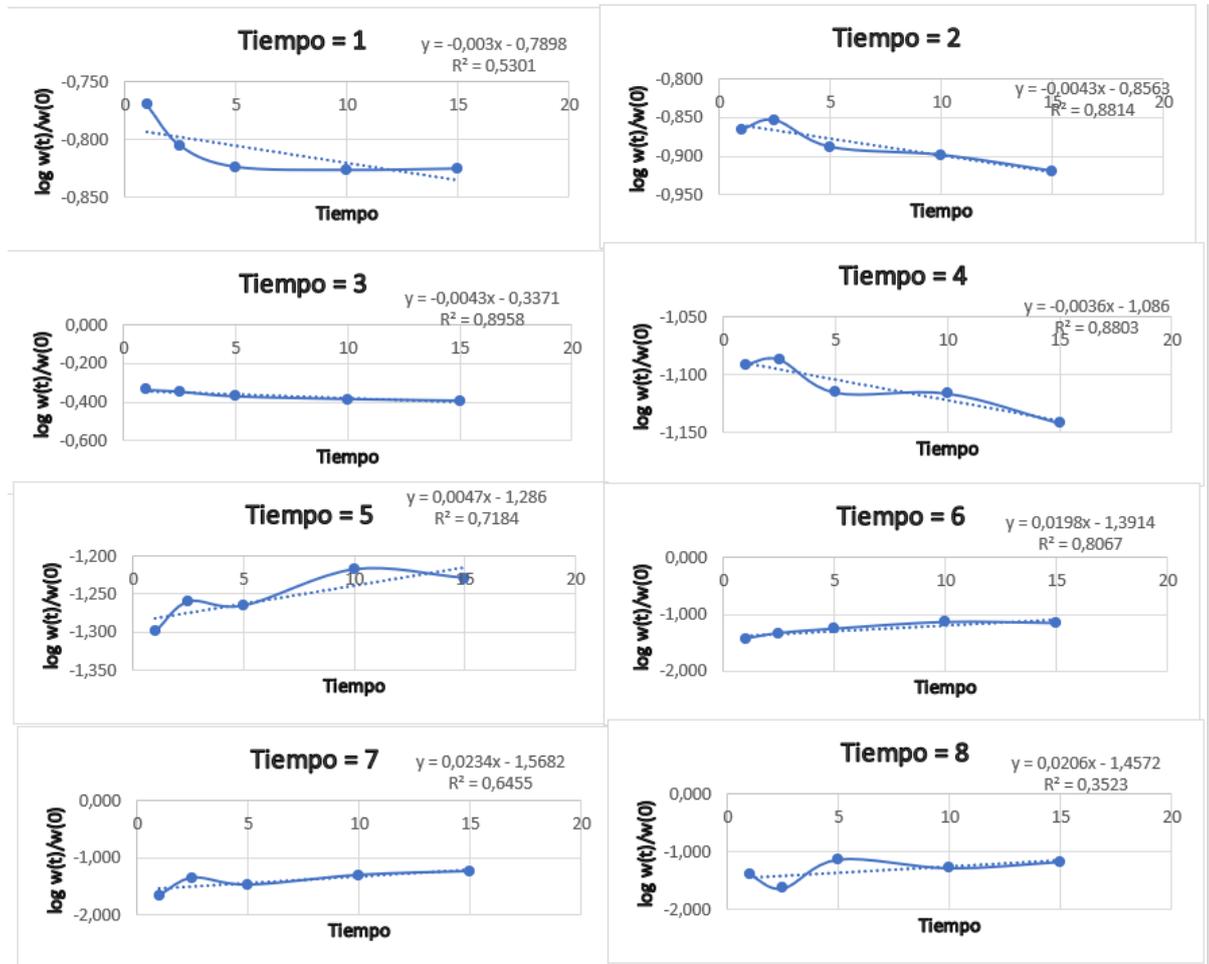
Anexo 4. Gráficas para el cálculo de la velocidad específica de fractura del ensayo de 1.9 kg/l del molino de bolas de planta.



Anexo 5. Gráficas para el cálculo de la velocidad específica de fractura del ensayo de 1.7 kg/l del molino de bolas de planta.



Anexo 6. Gráficas para el cálculo de la velocidad específica de fractura del ensayo de 1.5 kg/l del molino de bolas de planta.



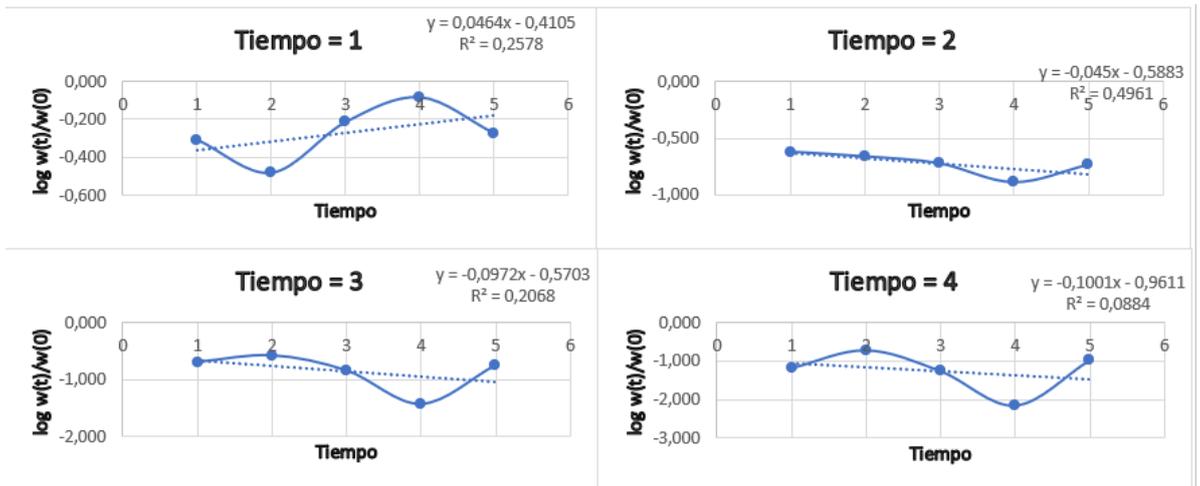
Anexo 7. Molino chileno: tablas peso retenido, granulometría Rossin-Rammler ensayo 1.15 kg/l.

Tiempo 3 minutos							
Malla	X	Peso Retenido (kg)	Fracción retenida f(x)	Fracción pasante acumulada F(x)	x f(x)	Rosin - Rammler	
						X	Y
						ln(x)	ln(ln(1/(1-F(x))))
-16/+40	425	0	0	1	0	6,052089169	#iDIV/0!
-40/+80	180	0,076	0,49350649	1	88,8311688	5,192956851	#iDIV/0!
-80/+100	150	0,037	0,24025974	0,50649351	36,038961	5,010635294	-0,34782952
-100/+200	75	0,031	0,2012987	0,26623377	15,0974026	4,317488114	-1,172587891
-200	60	0,01	0,06493506	0,06493506	3,8961039	4,094344562	-2,700985671
		0,154	1				

Tiempo 9 minutos							
Malla	X	Peso Retenido (kg)	Fracción retenida f(x)	Fracción pasante acumulada F(x)	x f(x)	Rosin - Rammler	
						X	Y
						ln(x)	ln(ln(1/(1-F(x))))
-16/+40	425	0	0	1	0	6,052089169	#iDIV/0!
-40/+80	180	0,09	0,6122449	1	110,204082	5,192956851	#iDIV/0!
-80/+100	150	0,028	0,19047619	0,3877551	28,5714286	5,010635294	-0,712079437
-100/+200	75	0,021	0,14285714	0,19727891	10,7142857	4,317488114	-1,515274015
-200	60	0,008	0,05442177	0,05442177	3,26530612	4,094344562	-2,883142189

Tiempo 15 minutos							
Malla	X	Peso Retenido (kg)	Fracción retenida f(x)	Fracción pasante acumulada F(x)	x f(x)	Rosin - Rammler	
						X	Y
						ln(x)	ln(ln(1/(1-F(x))))
-16/+40	425	0	0	1	0	6,052089169	#iDIV/0!
-40/+80	180	0,072	0,53333333	1	96	5,192956851	#iDIV/0!
-80/+100	150	0,025	0,18518519	0,46666667	27,7777778	5,010635294	-0,464246379
-100/+200	75	0,024	0,17777778	0,28148148	13,3333333	4,317488114	-1,106955598
-200	60	0,014	0,1037037	0,1037037	6,22222222	4,094344562	-2,211974732
		0,135	1				

Anexo 8. Gráficas para el cálculo de la velocidad específica de fractura del ensayo de 1.15 kg/l del molino chileno.



Anexo 9. Molino SAG: tablas peso retenido, granulometría Rossin-Rammler ensayo 1.7 kg/l.

Tiempo 3 minutos							
Malla	X	Peso Retenido (kg)	Fracción retenida f(x)	Fracción pasante acumulada F(x)	x f(x)	Rosin - Rammler	
						X	Y
						ln(x)	ln(ln(1/(1-F(x))))
+3/4	19000	0	0	1	0	9,852194258	#DIV/0!
-3/4/+0,5	12500	0,042	0,0345679	1	432,098765	9,433483923	#DIV/0!
-0,5/+3/8	9500	0,155	0,12757202	0,9654321	1211,93416	9,159047078	1,213377364
-3/8/+8	2360	0,971	0,79917695	0,83786008	1886,05761	7,766416898	0,598449408
-8/+16	1180	0,032	0,02633745	0,03868313	31,0781893	7,073269717	-3,232691007
-16/+40	425	0,006	0,00493827	0,01234568	2,09876543	6,052089169	-4,388244325
-40/+80	180	0,001	0,00082305	0,00740741	0,14814815	5,192956851	-4,901559592
-80/+100	150	0,001	0,00082305	0,00658436	0,12345679	5,010635294	-5,019756565
-100/+200	75	0,003	0,00246914	0,00576132	0,18518519	4,317488114	-5,153701609
-200	60	0,004	0,00329218	0,00329218	0,19753086	4,094344562	-5,714556642

Tiempo 9 minutos							
Malla	X	Peso Retenido (kg)	Fracción retenida f(x)	Fracción pasante acumulada F(x)	x f(x)	Rosin - Rammler	
						X	Y
						ln(x)	ln(ln(1/(1-F(x))))
+3/4	19000	0	0	1	0	9,852194258	#DIV/0!
-3/4/+0,5	12500	0,023	0,01637011	1	204,626335	9,433483923	#DIV/0!
-0,5/+3/8	9500	0,058	0,04128114	0,98362989	392,170819	9,159047078	1,413982085
-3/8/+8	2360	0,952	0,67758007	0,94234875	1599,08897	7,766416898	1,048491439
-8/+16	1180	0,17	0,12099644	0,26476868	142,775801	7,073269717	-1,179052209
-16/+40	425	0,124	0,08825623	0,14377224	37,5088968	6,052089169	-1,862919121
-40/+80	180	0,043	0,03060498	0,05551601	5,5088968	5,192956851	-2,862661407
-80/+100	150	0,005	0,00355872	0,02491103	0,53380783	5,010635294	-3,679857754
-100/+200	75	0,014	0,00996441	0,02135231	0,74733096	4,317488114	-3,835822825
-200	60	0,016	0,0113879	0,0113879	0,68327402	4,094344562	-4,469482706
		1,405	1				

Tiempo 15 minutos							
Malla	X	Peso Retenido (kg)	Fracción retenida f(x)	Fracción pasante acumulada F(x)	x f(x)	Rosin - Rammler	
						X	Y
						ln(x)	ln(ln(1/(1-F(x))))
+3/4	19000	0	0	1	0	9,852194258	#DIV/0!
-3/4/+0,5	12500	0,043	0,03464948	1	433,118453	9,433483923	#DIV/0!
-0,5/+3/8	9500	0,130	0,10475423	0,96535052	995,165189	9,159047078	1,212676617
-3/8/+8	2360	0,769	0,61966156	0,86059629	1462,40129	7,766416898	0,678227022
-8/+16	1180	0,082	0,06607575	0,24093473	77,9693795	7,073269717	-1,288559811
-16/+40	425	0,091	0,07332796	0,17485898	31,1643836	6,052089169	-1,649213686
-40/+80	180	0,056	0,0451249	0,10153102	8,12248187	5,192956851	-2,234336886
-80/+100	150	0,009	0,00725222	0,05640612	1,08783239	5,010635294	-2,846288282
-100/+200	75	0,033	0,02659146	0,04915391	1,99435939	4,317488114	-2,987703238
-200	60	0,028	0,02256245	0,02256245	1,35374698	4,094344562	-3,780079536
		1,241	1				

Anexo 10. Molino SAG: tablas peso retenido, granulometría Rossin-Rammler ensayo 1.9 kg/l.

Tiempo 3 minutos							
Malla	X	Peso Retenido (kg)	Fracción retenida f(x)	Fracción pasante acumulada F(x)	x f(x)	Rosin - Rammler	
						X	Y
						ln(x)	ln(ln(1/(1-F(x))))
+3/4	19000	0	0	1	0	9,852194258	#¡DIV/0!
-3/4/+0,5	12500	0,028	0,0245614	1	307,017544	9,433483923	#¡DIV/0!
-0,5/+3/8	9500	0,121	0,10614035	0,9754386	1008,33333	9,159047078	1,310109357
-3/8/+8	2360	0,888	0,77894737	0,86929825	1838,31579	7,766416898	0,710415833
-8/+16	1180	0,066	0,05789474	0,09035088	68,3157895	7,073269717	-2,35708
-16/+40	425	0,021	0,01842105	0,03245614	7,82894737	6,052089169	-3,411413727
-40/+80	180	0,005	0,00438596	0,01403509	0,78947368	5,192956851	-4,259135888
-80/+100	150	0,001	0,00087719	0,00964912	0,13157895	5,010635294	-4,636044197
-100/+200	75	0,005	0,00438596	0,00877193	0,32894737	4,317488114	-4,731796368
-200	60	0,005	0,00438596	0,00438596	0,26315789	4,094344562	-5,427148628
		1,14	1				

Tiempo 9 minutos							
Malla	X	Peso Retenido (kg)	Fracción retenida f(x)	Fracción pasante acumulada F(x)	x f(x)	Rosin - Rammler	
						X	Y
						ln(x)	ln(ln(1/(1-F(x))))
+3/4	19000	0	0	1	0	9,852194258	#¡DIV/0!
-3/4/+0,5	12500	0,026	0,02574257	1	321,782178	9,433483923	#¡DIV/0!
-0,5/+3/8	9500	0,121	0,11980198	0,97425743	1138,11881	9,159047078	1,297356331
-3/8/+8	2360	0,594	0,58811881	0,85445545	1387,9604	7,766416898	0,656106062
-8/+16	1180	0,096	0,0950495	0,26633663	112,158416	7,073269717	-1,172135097
-16/+40	425	0,086	0,08514851	0,17128713	36,1881188	6,052089169	-1,671943625
-40/+80	180	0,035	0,03465347	0,08613861	6,23762376	5,192956851	-2,407097354
-80/+100	150	0,005	0,0049505	0,05148515	0,74257426	5,010635294	-2,940149387
-100/+200	75	0,022	0,02178218	0,04653465	1,63366337	4,317488114	-3,043826521
-200	60	0,025	0,02475248	0,02475248	1,48514851	4,094344562	-3,686323976
		1,01	1				

Tiempo 15 minutos							
Malla	X	Peso Retenido (kg)	Fracción retenida f(x)	Fracción pasante acumulada F(x)	x f(x)	Rosin - Rammler	
						X	Y
						ln(x)	ln(ln(1/(1-F(x))))
+3/4	19000	0	0	1	0	9,852194258	#¡DIV/0!
-3/4/+0,5	12500	0,08	0,04149378	1	518,672199	9,433483923	#¡DIV/0!
-0,5/+3/8	9500	0,261	0,13537344	0,95850622	1286,04772	9,159047078	1,157576502
-3/8/+8	2360	1,298	0,67323651	0,82313278	1588,83817	7,766416898	0,549482331
-8/+16	1180	0,098	0,05082988	0,14989627	59,9792531	7,073269717	-1,817711962
-16/+40	425	0,076	0,03941909	0,09906639	16,753112	6,052089169	-2,260256628
-40/+80	180	0,047	0,02437759	0,0596473	4,3879668	5,192956851	-2,788713805
-80/+100	150	0,007	0,00363071	0,03526971	0,54460581	5,010635294	-3,326831136
-100/+200	75	0,025	0,0129668	0,031639	0,97251037	4,317488114	-3,437332513
-200	60	0,036	0,0186722	0,0186722	1,12033195	4,094344562	-3,971309977
		1,928	1				

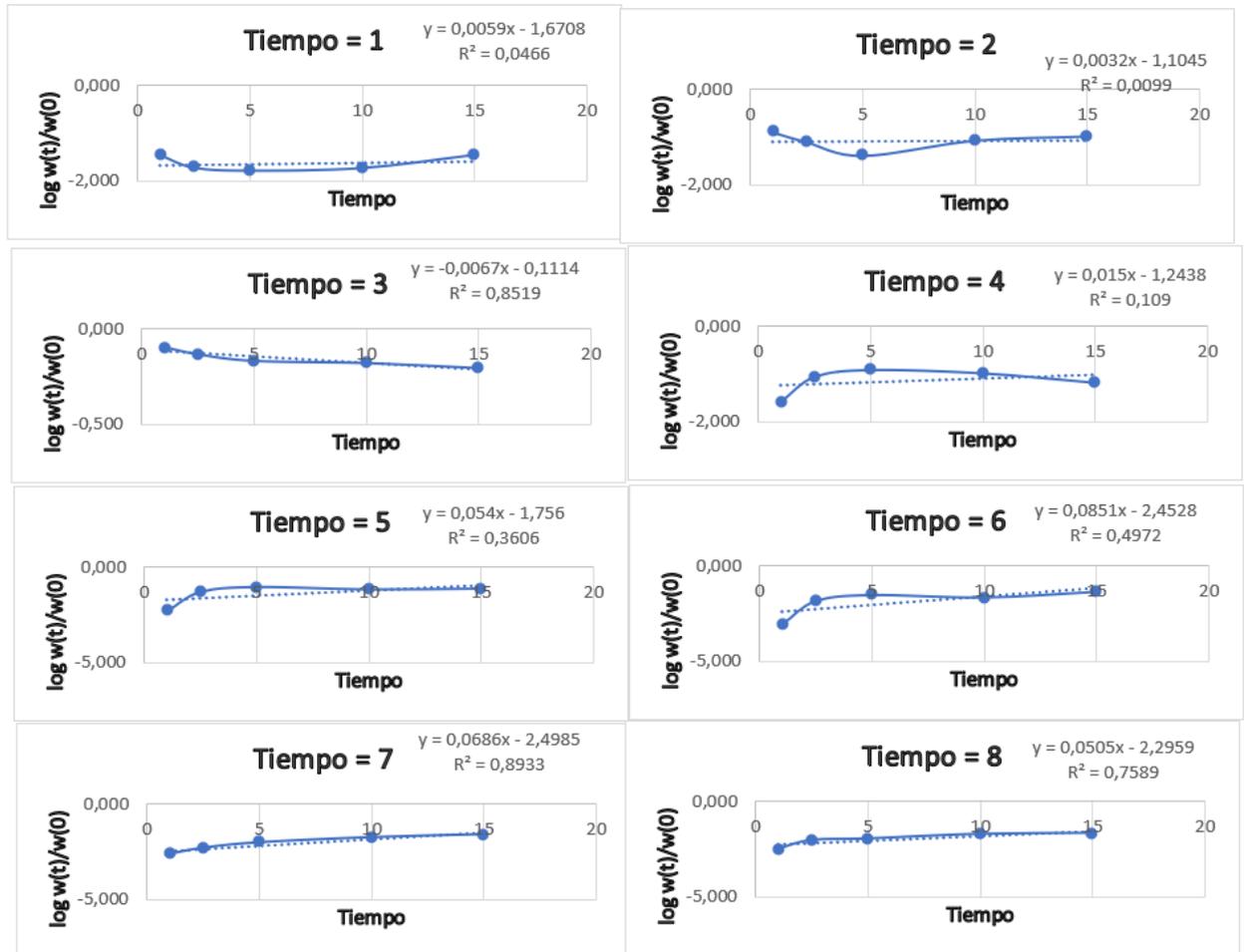
Anexo 11. Molino SAG: tablas peso retenido, granulometría Rossin-Rammler ensayo 1.5 kg/l.

Tiempo 3 minutos							
Malla	X	Peso Retenido (kg)	Fracción retenida f(x)	Fracción pasante acumulada F(x)	x f(x)	Rosin - Rammler	
						X	Y
						ln(x)	ln(ln(1/(1-F(x))))
+3/4	19000	0	0	1	0	9,852194258	#jDIV/0!
-3/4/+0,5	12500	0,03	0,04149378	1	518,672199	9,433483923	#jDIV/0!
-0,5/+3/8	9500	0,095	0,13139696	0,95850622	1248,27109	9,159047078	1,157576502
-3/8/+8	2360	0,515	0,71230982	0,82710927	1681,05118	7,766416898	0,562523263
-8/+16	1180	0,035	0,04840941	0,11479945	57,1230982	7,073269717	-2,104217582
-16/+40	425	0,024	0,03319502	0,06639004	14,1078838	6,052089169	-2,678056572
-40/+80	180	0,011	0,01521438	0,03319502	2,73858921	5,192956851	-3,388523636
-80/+100	150	0,001	0,00138313	0,01798064	0,20746888	5,010635294	-4,009401456
-100/+200	75	0,005	0,00691563	0,01659751	0,5186722	4,317488114	-4,090145848
-200	60	0,007	0,00968188	0,00968188	0,58091286	4,094344562	-4,632638489
		0,723	1				

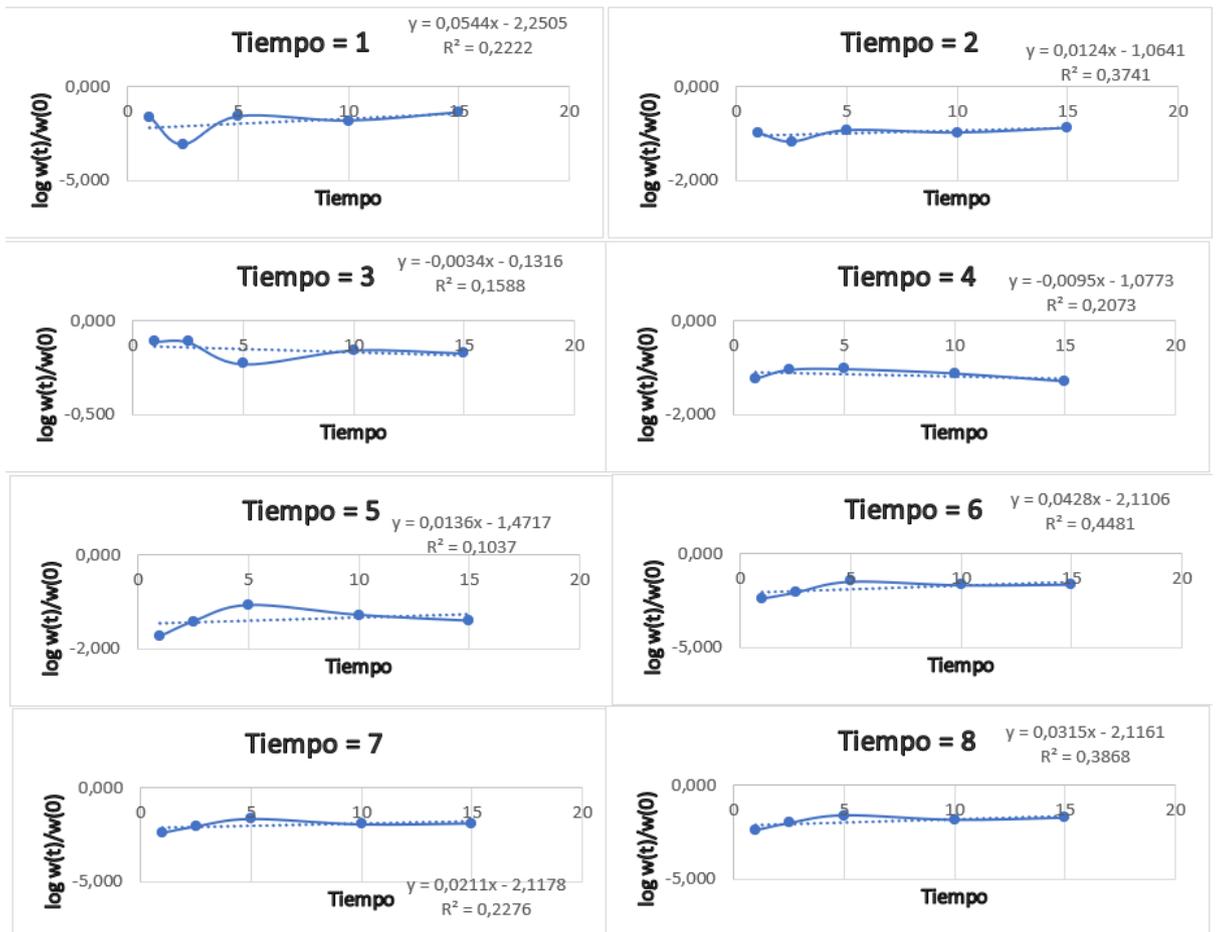
Tiempo 9 minutos							
Malla	X	Peso Retenido (kg)	Fracción retenida f(x)	Fracción pasante acumulada F(x)	x f(x)	Rosin - Rammler	
						X	Y
						ln(x)	ln(ln(1/(1-F(x))))
+3/4	19000	0	0	1	0	9,852194258	#jDIV/0!
-3/4/+0,5	12500	0,013	0,01372756	1	171,594509	9,433483923	#jDIV/0!
-0,5/+3/8	9500	0,082	0,08658923	0,98627244	822,597677	9,159047078	1,455901982
-3/8/+8	2360	0,691	0,72967265	0,89968321	1722,02746	7,766416898	0,832657875
-8/+16	1180	0,057	0,06019007	0,17001056	71,0242872	7,073269717	-1,68016997
-16/+40	425	0,04	0,04223865	0,10982049	17,9514256	6,052089169	-2,151305945
-40/+80	180	0,026	0,02745512	0,06758184	4,94192186	5,192956851	-2,65963307
-80/+100	150	0,005	0,00527983	0,04012672	0,79197466	5,010635294	-3,195305818
-100/+200	75	0,016	0,01689546	0,03484688	1,26715945	4,317488114	-3,339109688
-200	60	0,017	0,01795143	0,01795143	1,07708553	4,094344562	-4,011042168
		0,947	1				

Tiempo 15 minutos							
Malla	X	Peso Retenido (kg)	Fracción retenida f(x)	Fracción pasante acumulada F(x)	x f(x)	Rosin - Rammler	
						X	Y
						ln(x)	ln(ln(1/(1-F(x))))
+3/4	19000	0	0	1	0	9,852194258	#jDIV/0!
-3/4/+0,5	12500	0,014	0,01676647	1	209,580838	9,433483923	#jDIV/0!
-0,5/+3/8	9500	0,050	0,05988024	0,98323353	568,862275	9,159047078	1,408147433
-3/8/+8	2360	0,505	0,60479042	0,92335329	1427,30539	7,766416898	0,943341008
-8/+16	1180	0,085	0,10179641	0,31856287	120,11976	7,073269717	-0,958281923
-16/+40	425	0,073	0,08742515	0,21676647	37,1556886	6,052089169	-1,409258537
-40/+80	180	0,051	0,06107784	0,12934132	10,994012	5,192956851	-1,976847067
-80/+100	150	0,008	0,00958084	0,06826347	1,43712575	5,010635294	-2,649236149
-100/+200	75	0,026	0,03113772	0,05868263	2,33532934	4,317488114	-2,80552634
-200	60	0,023	0,02754491	0,02754491	1,65269461	4,094344562	-3,578004323
		0,835	1				

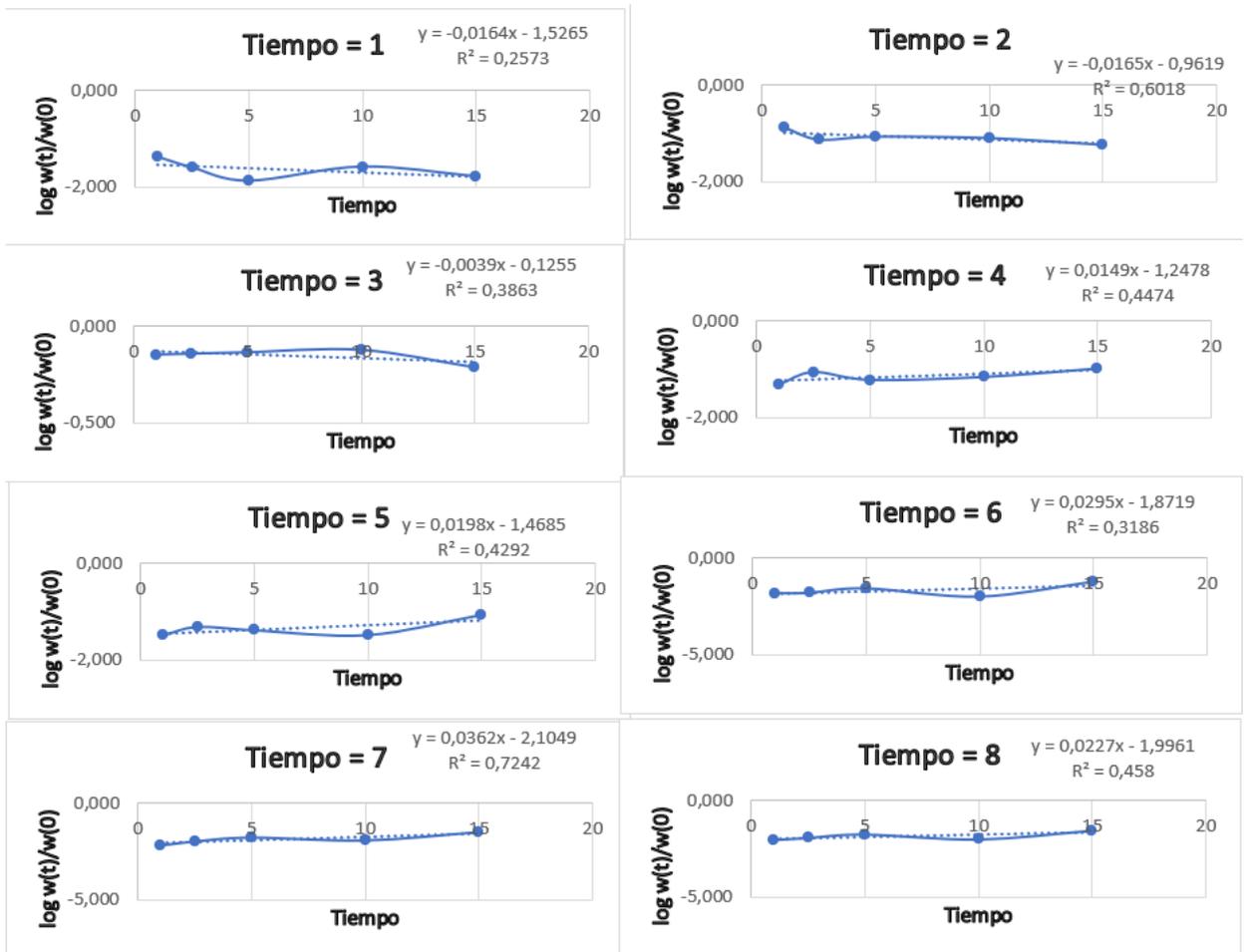
Anexo 12. Gráficas para el cálculo de la velocidad específica de fractura del ensayo de 1.7 kg/l del molino SAG.



Anexo 13. Gráficas para el cálculo de la velocidad específica de fractura del ensayo de 1.9 kg/l del molino SAG.



Anexo 14. Gráficas para el cálculo de la velocidad específica de fractura del ensayo de 1.5 kg/l del molino SAG.



Anexo 15. Molino de bolas de laboratorio: tablas peso retenido, granulometría Rossin-Rammler ensayo 1.9 kg/l con carga de distribución 10% de bolas grandes, 10% de bolas medianas y 80% pequeñas.

Tiempo 3 minutos							
Malla	X	Peso Retenido (kg)	Fracción retenida f(x)	Fracción pasante acumulada F(x)	x f(x)	Rosin - Rammler	
						X	Y
						ln(x)	ln(ln(1/(1-F(x))))
+3/4	19000	0	0	1	0	9,852194258	#iDIV/0!
-3/4/+0,5	12500	0,355	0,19388312	1	2423,53905	9,433483923	#iDIV/0!
-0,5/+3/8	9500	0,150	0,08192245	0,80611688	778,263244	9,159047078	0,495000924
-3/8/+8	2360	0,65	0,35499727	0,72419443	837,793555	7,766416898	0,253136524
-8/+16	1180	0,166	0,09066084	0,36919716	106,979792	7,073269717	-0,774873808
-16/+40	425	0,188	0,10267613	0,27853632	43,6373566	6,052089169	-1,119407293
-40/+80	180	0,15	0,08192245	0,17586019	14,7460404	5,192956851	-1,642916695
-80/+100	150	0,034	0,01856909	0,09393774	2,78536319	5,010635294	-2,316204878
-100/+200	75	0,09	0,04915347	0,07536865	3,6865101	4,317488114	-2,546439612
-200	60	0,048	0,02621518	0,02621518	1,57291098	4,094344562	-3,628163474
		1,831	1				

Tiempo 9 minutos							
Malla	X	Peso Retenido (kg)	Fracción retenida f(x)	Fracción pasante acumulada F(x)	x f(x)	Rosin - Rammler	
						X	Y
						ln(x)	ln(ln(1/(1-F(x))))
+3/4	19000	0	0	1	0	9,852194258	#iDIV/0!
-3/4/+0,5	12500	0,311	0,17249029	1	2156,12867	9,433483923	#iDIV/0!
-0,5/+3/8	9500	0,165	0,09151414	0,82750971	869,384359	9,159047078	0,563843587
-3/8/+8	2360	0,622	0,34498059	0,73599556	814,154187	7,766416898	0,286523428
-8/+16	1180	0,129	0,07154742	0,39101498	84,4259567	7,073269717	-0,701256772
-16/+40	425	0,131	0,07265668	0,31946755	30,8790904	6,052089169	-0,954824257
-40/+80	180	0,181	0,10038824	0,24681087	18,0698835	5,192956851	-1,260758646
-80/+100	150	0,041	0,02273988	0,14642263	3,4109817	5,010635294	-1,84314273
-100/+200	75	0,082	0,04547976	0,12368275	3,4109817	4,317488114	-2,024748096
-200	60	0,141	0,078203	0,078203	4,6921797	4,094344562	-2,508008481
		1,803	1				

Tiempo 15 minutos							
Malla	X	Peso Retenido (kg)	Fracción retenida f(x)	Fracción pasante acumulada F(x)	x f(x)	Rosin - Rammler	
						X	Y
						ln(x)	ln(ln(1/(1-F(x))))
+3/4	19000	0	0	1	0	9,852194258	#iDIV/0!
-3/4/+0,5	12500	0,307	0,17325056	1	2165,63205	9,433483923	#iDIV/0!
-0,5/+3/8	9500	0,152	0,08577878	0,82674944	814,89842	9,159047078	0,561337952
-3/8/+8	2360	0,579	0,32674944	0,74097065	771,128668	7,766416898	0,300707315
-8/+16	1180	0,105	0,05925508	0,41422122	69,9209932	7,073269717	-0,625838
-16/+40	425	0,087	0,04909707	0,35496614	20,8662528	6,052089169	-0,824503871
-40/+80	180	0,19	0,10722348	0,30586907	19,3002257	5,192956851	-1,007598554
-80/+100	150	0,06	0,03386005	0,1986456	5,07900677	5,010635294	-1,507549505
-100/+200	75	0,125	0,07054176	0,16478555	5,29063205	4,317488114	-1,714427583
-200	60	0,167	0,09424379	0,09424379	5,65462754	4,094344562	-2,31278599
		1,772	1				

Anexo 16. Molino de bolas de laboratorio: tablas peso retenido, granulometría Rossin-Rammler ensayo 1.5 kg/l con carga de distribución 10% de bolas grandes, 10% de bolas medianas y 80% pequeñas.

Tiempo 3 minutos

Malla	X	Peso Retenido (kg)	Fracción retenida f(x)	Fracción pasante acumulada F(x)	x f(x)	Rosin - Rammler	
						X	Y
						ln(x)	ln(ln(1/(1-F(x))))
+3/4	19000	0	0	1	0	9,852194258	#¡DIV/0!
-3/4/+0,5	12500	0,191	0,10488742	1	1311,09281	9,433483923	#¡DIV/0!
-0,5/+3/8	9500	0,158	0,08676551	0,89511258	824,272378	9,159047078	0,81309128
-3/8/+8	2360	1,103	0,60571115	0,80834706	1429,47831	7,766416898	0,502028537
-8/+16	1180	0,103	0,05656233	0,20263591	66,7435475	7,073269717	-1,485258116
-16/+40	425	0,096	0,05271829	0,14607359	22,4052718	6,052089169	-1,845728413
-40/+80	180	0,067	0,03679297	0,0933553	6,62273476	5,192956851	-2,322740497
-80/+100	150	0,009	0,00494234	0,05656233	0,74135091	5,010635294	-2,843440855
-100/+200	75	0,043	0,0236134	0,05161999	1,77100494	4,317488114	-2,937463336
-200	60	0,051	0,02800659	0,02800659	1,68039539	4,094344562	-3,561145941
		1,821	1				

Tiempo 9 minutos

Malla	X	Peso Retenido (kg)	Fracción retenida f(x)	Fracción pasante acumulada F(x)	x f(x)	Rosin - Rammler	
						X	Y
						ln(x)	ln(ln(1/(1-F(x))))
+3/4	19000	0	0	1	0	9,852194258	#¡DIV/0!
-3/4/+0,5	12500	0,187	0,10314396	1	1289,2995	9,433483923	#¡DIV/0!
-0,5/+3/8	9500	0,132	0,0728075	0,89685604	691,671263	9,159047078	0,820497457
-3/8/+8	2360	1,053	0,5808053	0,82404854	1370,7005	7,766416898	0,552474411
-8/+16	1180	0,092	0,05074462	0,24324324	59,8786542	7,073269717	-1,277571256
-16/+40	425	0,076	0,04191947	0,19249862	17,815775	6,052089169	-1,542665094
-40/+80	180	0,102	0,05626034	0,15057915	10,1268616	5,192956851	-1,812775679
-80/+100	150	0,038	0,02095974	0,09431881	3,14396029	5,010635294	-2,311949596
-100/+200	75	0,034	0,01875345	0,07335907	1,40650855	4,317488114	-2,574533638
-200	60	0,099	0,05460563	0,05460563	3,27633756	4,094344562	-2,879673184
		1,813	1				

Tiempo 15 minutos

Malla	X	Peso Retenido (kg)	Fracción retenida f(x)	Fracción pasante acumulada F(x)	x f(x)	Rosin - Rammler	
						X	Y
						ln(x)	ln(ln(1/(1-F(x))))
+3/4	19000	0	0	1	0	9,852194258	#¡DIV/0!
-3/4/+0,5	12500	0,174	0,0967204	1	1209,005	9,433483923	#¡DIV/0!
-0,5/+3/8	9500	0,121	0,06725959	0,9032796	638,966092	9,159047078	0,848410499
-3/8/+8	2360	1,022	0,56809339	0,83602001	1340,70039	7,766416898	0,592227278
-8/+16	1180	0,078	0,04335742	0,26792663	51,1617565	7,073269717	-1,165154312
-16/+40	425	0,051	0,02834908	0,22456921	12,0483602	6,052089169	-1,36909693
-40/+80	180	0,086	0,04780434	0,19622012	8,60478043	5,192956851	-1,521290455
-80/+100	150	0,038	0,02112285	0,14841579	3,1684269	5,010635294	-1,828484346
-100/+200	75	0,123	0,06837132	0,12729294	5,1278488	4,317488114	-1,993958871
-200	60	0,106	0,05892162	0,05892162	3,53529739	4,094344562	-2,801336376
		1,799	1				

Anexo 17. Molino de bolas de laboratorio: tablas peso retenido, granulometría Rossin-Rammler ensayo 1.7 kg/l con carga de distribución 10% de bolas grandes, 10% de bolas medianas y 80% pequeñas.

Tiempo 9 minutos

Malla	X	Peso Retenido (kg)	Fracción retenida f(x)	Fracción pasante acumulada F(x)	x f(x)	Rosin - Rammler	
						X	Y
						ln(x)	ln(ln(1/(1-F(x))))
+3/4	19000	0	0	1	0	9,852194258	#iDIV/0!
-3/4/+0,5	12500	0,254	0,13956044	1	1744,50549	9,433483923	#iDIV/0!
-0,5/+3/8	9500	0,196	0,10769231	0,86043956	1023,07692	9,159047078	0,677656575
-3/8/+8	2360	0,949	0,52142857	0,75274725	1230,57143	7,766416898	0,334573433
-8/+16	1180	0,077	0,04230769	0,23131868	49,9230769	7,073269717	-1,335301651
-16/+40	425	0,059	0,03241758	0,18901099	13,7774725	6,052089169	-1,563027841
-40/+80	180	0,085	0,0467033	0,15659341	8,40659341	5,192956851	-1,770157755
-80/+100	150	0,053	0,02912088	0,10989011	4,36813187	5,010635294	-2,150633814
-100/+200	75	0,049	0,02692308	0,08076923	2,01923077	4,317488114	-2,474345665
-200	60	0,098	0,05384615	0,05384615	3,23076923	4,094344562	-2,894076902

Tiempo 3 minutos

Malla	X	Peso Retenido (kg)	Fracción retenida f(x)	Fracción pasante acumulada F(x)	x f(x)	Rosin - Rammler	
						X	Y
						ln(x)	ln(ln(1/(1-F(x))))
+3/4	19000	0	0	1	0	9,852194258	#iDIV/0!
-3/4/+0,5	12500	0,26	0,14199891	1	1774,98635	9,433483923	#iDIV/0!
-0,5/+3/8	9500	0,231	0,12616057	0,85800109	1198,5254	9,159047078	0,668821656
-3/8/+8	2360	0,976	0,53304205	0,73184052	1257,97925	7,766416898	0,2747286
-8/+16	1180	0,094	0,05133807	0,19879847	60,5789186	7,073269717	-1,506688353
-16/+40	425	0,08	0,04369197	0,1474604	18,5690879	6,052089169	-1,835488033
-40/+80	180	0,057	0,03113053	0,10376843	5,60349536	5,192956851	-2,211315305
-80/+100	150	0,015	0,00819224	0,0726379	1,2288367	5,010635294	-2,584799768
-100/+200	75	0,035	0,01911524	0,06444566	1,43364282	4,317488114	-2,708809794
-200	60	0,083	0,04533042	0,04533042	2,71982523	4,094344562	-3,070671609
		1,831	1				

Tiempo 15 minutos

Malla	X	Peso Retenido (kg)	Fracción retenida f(x)	Fracción pasante acumulada F(x)	x f(x)	Rosin - Rammler	
						X	Y
						ln(x)	ln(ln(1/(1-F(x))))
+3/4	19000	0	0	1	0	9,852194258	#iDIV/0!
-3/4/+0,5	12500	0,252	0,13884298	1	1735,53719	9,433483923	#iDIV/0!
-0,5/+3/8	9500	0,196	0,10798898	0,86115702	1025,89532	9,159047078	0,68027046
-3/8/+8	2360	0,913	0,5030303	0,75316804	1187,15152	7,766416898	0,335791658
-8/+16	1180	0,066	0,03636364	0,25013774	42,9090909	7,073269717	-1,245261074
-16/+40	425	0,045	0,02479339	0,2137741	10,5371901	6,052089169	-1,424988915
-40/+80	180	0,071	0,03911846	0,18898072	7,04132231	5,192956851	-1,56320603
-80/+100	150	0,03	0,01652893	0,14986226	2,47933884	5,010635294	-1,817958315
-100/+200	75	0,082	0,04517906	0,13333333	3,38842975	4,317488114	-1,944205697
-200	60	0,16	0,08815427	0,08815427	5,2892562	4,094344562	-2,382879528
		1,815	1				

Anexo 18. Molino de bolas de laboratorio: tablas peso retenido, granulometría Rossin-Rammler ensayo 1.5 kg/l con carga de distribución 80% de bolas grandes, 10% de bolas medianas y 10% pequeñas.

Tiempo 3 minutos							
Malla	X	Peso Retenido (kg)	Fracción retenida f(x)	Fracción pasante acumulada F(x)	x f(x)	Rosin - Rammler	
						X	Y
						ln(x)	ln(ln(1/(1-F(x))))
+3/4	19000	0	0	1	0	9,852194258	#¡DIV/0!
-3/4/+0,5	12500	0,045	0,02437703	1	304,712893	9,433483923	#¡DIV/0!
-0,5/+3/8	9500	0,110	0,0595883	0,97562297	566,088841	9,159047078	1,312140137
-3/8/+8	2360	1,224	0,66305525	0,91603467	1564,8104	7,766416898	0,907189964
-8/+16	1180	0,15	0,08125677	0,25297941	95,8829902	7,073269717	-1,232157839
-16/+40	425	0,142	0,07692308	0,17172264	32,6923077	6,052089169	-1,669149653
-40/+80	180	0,083	0,04496208	0,09479957	8,09317443	5,192956851	-2,306604295
-80/+100	150	0,009	0,00487541	0,04983749	0,73131094	5,010635294	-2,97353561
-100/+200	75	0,042	0,0227519	0,04496208	1,7063922	4,317488114	-3,079021872
-200	60	0,041	0,02221018	0,02221018	1,33261105	4,094344562	-3,795995096
		1,846	1				

Tiempo 9 minutos							
Malla	X	Peso Retenido (kg)	Fracción retenida f(x)	Fracción pasante acumulada F(x)	x f(x)	Rosin - Rammler	
						X	Y
						ln(x)	ln(ln(1/(1-F(x))))
+3/4	19000	0	0	1	0	9,852194258	#¡DIV/0!
-3/4/+0,5	12500	0,039	0,02126499	1	265,812432	9,433483923	#¡DIV/0!
-0,5/+3/8	9500	0,089	0,04852781	0,97873501	461,014177	9,159047078	1,348253134
-3/8/+8	2360	1,098	0,59869138	0,9302072	1412,91167	7,766416898	0,97916201
-8/+16	1180	0,149	0,08124318	0,33151581	95,8669575	7,073269717	-0,909457789
-16/+40	425	0,159	0,08669575	0,25027263	36,8456925	6,052089169	-1,24463633
-40/+80	180	0,13	0,07088332	0,16357688	12,7589967	5,192956851	-1,722490879
-80/+100	150	0,037	0,02017448	0,09269357	3,0261723	5,010635294	-2,330212937
-100/+200	75	0,041	0,02235551	0,07251908	1,67666303	4,317488114	-2,586500131
-200	60	0,092	0,05016358	0,05016358	3,00981461	4,094344562	-2,966843688
		1,834	1				

Tiempo 15 minutos							
Malla	X	Peso Retenido (kg)	Fracción retenida f(x)	Fracción pasante acumulada F(x)	x f(x)	Rosin - Rammler	
						X	Y
						ln(x)	ln(ln(1/(1-F(x))))
+3/4	19000	0	0	1	0	9,852194258	#¡DIV/0!
-3/4/+0,5	12500	0,037	0,02027397	1	253,424658	9,433483923	#¡DIV/0!
-0,5/+3/8	9500	0,059	0,03232877	0,97972603	307,123288	9,159047078	1,360570664
-3/8/+8	2360	1,036	0,56767123	0,94739726	1339,70411	7,766416898	1,080104428
-8/+16	1180	0,132	0,07232877	0,37972603	85,3479452	7,073269717	-0,738994265
-16/+40	425	0,151	0,08273973	0,30739726	35,1643836	6,052089169	-1,001579889
-40/+80	180	0,169	0,09260274	0,22465753	16,6684932	5,192956851	-1,368649134
-80/+100	150	0,046	0,02520548	0,13205479	3,78082192	5,010635294	-1,954560601
-100/+200	75	0,054	0,02958904	0,10684932	2,21917808	4,317488114	-2,180367706
-200	60	0,141	0,07726027	0,07726027	4,63561644	4,094344562	-2,52064072
		1,825	1				

Anexo 19. Molino de bolas de laboratorio: tablas peso retenido, granulometría Rossin-Rammler ensayo 1.9 kg/l con carga de distribución 80% de bolas grandes, 10% de bolas medianas y 10% pequeñas.

Tiempo 3 minutos							
Malla	X	Peso Retenido (kg)	Fracción retenida f(x)	Fracción pasante acumulada F(x)	x f(x)	Rosin - Rammler	
						X	Y
						ln(x)	ln(ln(1/(1-F(x))))
+3/4	19000	0	0	1	0	9,852194258	#jDIV/0!
-3/4/+0,5	12500	0,232	0,12663755	1	1582,96943	9,433483923	#jDIV/0!
-0,5/+3/8	9500	0,273	0,14901747	0,87336245	1415,66594	9,159047078	0,725820629
-3/8/+8	2360	1,013	0,5529476	0,72434498	1304,95633	7,766416898	0,253560328
-8/+16	1180	0,106	0,05786026	0,17139738	68,2751092	7,073269717	-1,671235727
-16/+40	425	0,086	0,04694323	0,11353712	19,9508734	6,052089169	-2,115972551
-40/+80	180	0,048	0,02620087	0,06659389	4,71615721	5,192956851	-2,674882931
-80/+100	150	0,008	0,00436681	0,04039301	0,65502183	5,010635294	-3,188553552
-100/+200	75	0,03	0,01637555	0,0360262	1,22816594	4,317488114	-3,305219314
-200	60	0,036	0,01965066	0,01965066	1,1790393	4,094344562	-3,91973787
		1,832	1				

Tiempo 9 minutos							
Malla	X	Peso Retenido (kg)	Fracción retenida f(x)	Fracción pasante acumulada F(x)	x f(x)	Rosin - Rammler	
						X	Y
						ln(x)	ln(ln(1/(1-F(x))))
+3/4	19000	0	0	1	0	9,852194258	#jDIV/0!
-3/4/+0,5	12500	0,21	0,11500548	1	1437,56846	9,433483923	#jDIV/0!
-0,5/+3/8	9500	0,254	0,13910186	0,88499452	1321,46769	9,159047078	0,771392365
-3/8/+8	2360	0,94	0,51478642	0,74589266	1214,89595	7,766416898	0,314809651
-8/+16	1180	0,1	0,05476451	0,23110624	64,6221249	7,073269717	-1,336352569
-16/+40	425	0,097	0,05312158	0,17634173	22,5766703	6,052089169	-1,639899405
-40/+80	180	0,085	0,04654984	0,12322015	8,37897043	5,192956851	-2,028753384
-80/+100	150	0,031	0,016977	0,07667032	2,54654984	5,010635294	-2,528621292
-100/+200	75	0,027	0,01478642	0,05969332	1,10898138	4,317488114	-2,78791842
-200	60	0,082	0,0449069	0,0449069	2,69441402	4,094344562	-3,080278546
		1,826	1				

Tiempo 15 minutos							
Malla	X	Peso Retenido (kg)	Fracción retenida f(x)	Fracción pasante acumulada F(x)	x f(x)	Rosin - Rammler	
						X	Y
						ln(x)	ln(ln(1/(1-F(x))))
+3/4	19000	0	0	1	0	9,852194258	#jDIV/0!
-3/4/+0,5	12500	0,201	0,11056106	1	1382,0132	9,433483923	#jDIV/0!
-0,5/+3/8	9500	0,189	0,1039604	0,88943894	987,623762	9,159047078	0,789451124
-3/8/+8	2360	0,932	0,51265127	0,78547855	1209,85699	7,766416898	0,431357349
-8/+16	1180	0,086	0,04730473	0,27282728	55,819582	7,073269717	-1,143846332
-16/+40	425	0,089	0,0489549	0,22552255	20,8058306	6,052089169	-1,364271698
-40/+80	180	0,122	0,06710671	0,17656766	12,0792079	5,192956851	-1,63848631
-80/+100	150	0,027	0,01485149	0,10946095	2,22772277	5,010635294	-2,154783201
-100/+200	75	0,048	0,02640264	0,09460946	1,98019802	4,317488114	-2,308714907
-200	60	0,124	0,06820682	0,06820682	4,09240924	4,094344562	-2,650096444
		1,818	1				

Anexo 20. Molino de bolas de laboratorio: tablas peso retenido, granulometría Rossin-Rammler ensayo 1.7 kg/l con carga de distribución 80% de bolas grandes, 10% de bolas medianas y 10% pequeñas.

Tiempo 3 minutos

Malla	X	Peso Retenido (kg)	Fracción retenida f(x)	Fracción pasante acumulada F(x)	x f(x)	Rosin - Rammler	
						X	Y
						ln(x)	ln(ln(1/(1-F(x))))
+3/4	19000	0	0	1	0	9,852194258	#iDIV/0!
-3/4/+0,5	12500	0,379	0,20687773	1	2585,97162	9,433483923	#iDIV/0!
-0,5/+3/8	9500	0,285	0,15556769	0,79312227	1477,89301	9,159047078	0,454653504
-3/8/+8	2360	0,757	0,41320961	0,63755459	975,174672	7,766416898	0,014771754
-8/+16	1180	0,106	0,05786026	0,22434498	68,2751092	7,073269717	-1,370234348
-16/+40	425	0,118	0,06441048	0,16648472	27,3744541	6,052089169	-1,7031815
-40/+80	180	0,081	0,04421397	0,10207424	7,95851528	5,192956851	-2,228703956
-80/+100	150	0,012	0,00655022	0,05786026	0,98253275	5,010635294	-2,820071625
-100/+200	75	0,049	0,02674672	0,05131004	2,00600437	4,317488114	-2,943647744
-200	60	0,045	0,02456332	0,02456332	1,47379913	4,094344562	-3,694091812

Tiempo 9 minutos

Malla	X	Peso Retenido (kg)	Fracción retenida f(x)	Fracción pasante acumulada F(x)	x f(x)	Rosin - Rammler	
						X	Y
						ln(x)	ln(ln(1/(1-F(x))))
+3/4	19000	0	0	1	0	9,852194258	#iDIV/0!
-3/4/+0,5	12500	0,337	0,18577729	1	2322,2161	9,433483923	#iDIV/0!
-0,5/+3/8	9500	0,282	0,15545755	0,81422271	1476,84675	9,159047078	0,520700724
-3/8/+8	2360	0,7	0,38588754	0,65876516	910,694598	7,766416898	0,072492143
-8/+16	1180	0,087	0,04796031	0,27287762	56,5931643	7,073269717	-1,143629075
-16/+40	425	0,109	0,0600882	0,22491731	25,5374862	6,052089169	-1,367333035
-40/+80	180	0,124	0,06835722	0,16482911	12,3042999	5,192956851	-1,71413802
-80/+100	150	0,036	0,01984564	0,09647189	2,97684675	5,010635294	-2,288208415
-100/+200	75	0,045	0,02480706	0,07662624	1,86052922	4,317488114	-2,529219901
-200	60	0,094	0,05181918	0,05181918	3,10915105	4,094344562	-2,933507786

Tiempo 15 minutos

Malla	X	Peso Retenido (kg)	Fracción retenida f(x)	Fracción pasante acumulada F(x)	x f(x)	Rosin - Rammler	
						X	Y
						ln(x)	ln(ln(1/(1-F(x))))
+3/4	19000	0	0	1	0	9,852194258	#iDIV/0!
-3/4/+0,5	12500	0,32	0,17718715	1	2214,83942	9,433483923	#iDIV/0!
-0,5/+3/8	9500	0,266	0,14728682	0,82281285	1399,22481	9,159047078	0,548438548
-3/8/+8	2360	0,663	0,36710963	0,67552602	866,378738	7,766416898	0,118271756
-8/+16	1180	0,069	0,03820598	0,30841639	45,0830565	7,073269717	-0,997578817
-16/+40	425	0,089	0,04928018	0,27021041	20,9440753	6,052089169	-1,155185755
-40/+80	180	0,139	0,07696567	0,22093023	13,8538206	5,192956851	-1,387676609
-80/+100	150	0,064	0,03543743	0,14396456	5,31561462	5,010635294	-1,861472926
-100/+200	75	0,069	0,03820598	0,10852713	2,8654485	4,317488114	-2,163864771
-200	60	0,127	0,07032115	0,07032115	4,2192691	4,094344562	-2,618446131
		1,806		1			

Anexo 21. Molino de bolas de laboratorio: tablas peso retenido, granulometría Rosin-Rammler ensayo 1.9 kg/l con carga de distribución 60% de bolas grandes, 30% de bolas medianas y 10% pequeñas.

Tiempo 3 minutos

Malla	X	Peso Retenido (kg)	Fracción retenida f(x)	Fracción pasante acumulada F(x)	x f(x)	Rosin - Rammler	
						X	Y
						ln(x)	ln(ln(1/(1-F(x))))
+3/4	19000	0	0	1	0	9,852194258	#¡DIV/0!
-3/4/+0,5	12500	0,532	0,29150685	1	3643,83562	9,433483923	#¡DIV/0!
-0,5/+3/8	9500	0,286	0,15671233	0,70849315	1488,76712	9,159047078	0,209200215
-3/8/+8	2360	0,622	0,34082192	0,55178082	804,339726	7,766416898	-0,220057157
-8/+16	1180	0,107	0,05863014	0,2109589	69,1835616	7,073269717	-1,43996153
-16/+40	425	0,102	0,05589041	0,15232877	23,7534247	6,052089169	-1,800220672
-40/+80	180	0,068	0,03726027	0,09643836	6,70684932	5,192956851	-2,28857427
-80/+100	150	0,01	0,00547945	0,05917808	0,82191781	5,010635294	-2,79685838
-100/+200	75	0,042	0,0230137	0,05369863	1,7260274	4,317488114	-2,896897623
-200	60	0,056	0,03068493	0,03068493	1,84109589	4,094344562	-3,46844126
		1,825	1				

Tiempo 9 minutos

Malla	X	Peso Retenido (kg)	Fracción retenida f(x)	Fracción pasante acumulada F(x)	x f(x)	Rosin - Rammler	
						X	Y
						ln(x)	ln(ln(1/(1-F(x))))
+3/4	19000	0	0	1	0	9,852194258	#¡DIV/0!
-3/4/+0,5	12500	0,487	0,26772952	1	3346,61902	9,433483923	#¡DIV/0!
-0,5/+3/8	9500	0,267	0,14678395	0,73227048	1394,4475	9,159047078	0,275947027
-3/8/+8	2360	0,576	0,3166575	0,58548653	747,31171	7,766416898	-0,127095223
-8/+16	1180	0,086	0,04727872	0,26882903	55,788895	7,073269717	-1,161207236
-16/+40	425	0,093	0,05112699	0,2215503	21,728972	6,052089169	-1,384492369
-40/+80	180	0,099	0,05442551	0,17042331	9,79659153	5,192956851	-1,677504143
-80/+100	150	0,028	0,01539307	0,1159978	2,30896097	5,010635294	-2,09316951
-100/+200	75	0,055	0,03023639	0,10060473	2,26772952	4,317488114	-2,244008106
-200	60	0,128	0,07036833	0,07036833	4,22210005	4,094344562	-2,61775033
		1,819	1				

Tiempo 15 minutos

Malla	X	Peso Retenido (kg)	Fracción retenida f(x)	Fracción pasante acumulada F(x)	x f(x)	Rosin - Rammler	
						X	Y
						ln(x)	ln(ln(1/(1-F(x))))
+3/4	19000	0	0	1	0	9,852194258	#¡DIV/0!
-3/4/+0,5	12500	0,449	0,25083799	1	3135,47486	9,433483923	#¡DIV/0!
-0,5/+3/8	9500	0,281	0,15698324	0,74916201	1491,34078	9,159047078	0,324217461
-3/8/+8	2360	0,526	0,29385475	0,59217877	693,497207	7,766416898	-0,108781511
-8/+16	1180	0,066	0,03687151	0,29832402	43,5083799	7,073269717	-1,037657693
-16/+40	425	0,07	0,03910615	0,26145251	16,6201117	6,052089169	-1,193791878
-40/+80	180	0,122	0,06815642	0,22234637	12,2681564	5,192956851	-1,380415444
-80/+100	150	0,029	0,01620112	0,15418994	2,4301676	5,010635294	-1,787007986
-100/+200	75	0,087	0,04860335	0,13798883	3,6452514	4,317488114	-1,907257554
-200	60	0,16	0,08938547	0,08938547	5,36312849	4,094344562	-2,368344572
		1,79	1				

Anexo 22. Molino de bolas de laboratorio: tablas peso retenido, granulometría Rosin-Rammler ensayo 1.5 kg/l con carga de distribución 60% de bolas grandes, 30% de bolas medianas y 10% pequeñas.

Tiempo 3 minutos

Malla	X	Peso Retenido (kg)	Fracción retenida f(x)	Fracción pasante acumulada F(x)	x f(x)	Rosin - Rammler	
						X	Y
						ln(x)	ln(ln(1/(1-F(x))))
+3/4	19000	0	0	1	0	9,852194258	#iDIV/0!
-3/4/+0,5	12500	0,62	0,33879781	1	4234,97268	9,433483923	#iDIV/0!
-0,5/+3/8	9500	0,242	0,13224044	0,66120219	1256,28415	9,159047078	0,079136236
-3/8/+8	2360	0,557	0,30437158	0,52896175	718,31694	7,766416898	-0,28393447
-8/+16	1180	0,109	0,05956284	0,22459016	70,284153	7,073269717	-1,368990663
-16/+40	425	0,113	0,06174863	0,16502732	26,2431694	6,052089169	-1,712821073
-40/+80	180	0,082	0,04480874	0,10327869	8,06557377	5,192956851	-2,216314238
-80/+100	150	0,01	0,00546448	0,05846995	0,81967213	5,010635294	-2,80926915
-100/+200	75	0,05	0,0273224	0,05300546	2,04918033	4,317488114	-2,910252874
-200	60	0,047	0,02568306	0,02568306	1,54098361	4,094344562	-3,648942537
		1.83	1				

Tiempo 9 minutos

Malla	X	Peso Retenido (kg)	Fracción retenida f(x)	Fracción pasante acumulada F(x)	x f(x)	Rosin - Rammler	
						X	Y
						ln(x)	ln(ln(1/(1-F(x))))
+3/4	19000	0	0	1	0	9,852194258	#iDIV/0!
-3/4/+0,5	12500	0,544	0,29972452	1	3746,55647	9,433483923	#iDIV/0!
-0,5/+3/8	9500	0,239	0,13168044	0,70027548	1250,96419	9,159047078	0,186389521
-3/8/+8	2360	0,524	0,28870523	0,56859504	681,344353	7,766416898	-0,173510825
-8/+16	1180	0,085	0,04683196	0,27988981	55,261708	7,073269717	-1,11367202
-16/+40	425	0,099	0,05454545	0,23305785	23,1818182	6,052089169	-1,326728537
-40/+80	180	0,107	0,05895317	0,1785124	10,6115702	5,192956851	-1,626388607
-80/+100	150	0,05	0,02754821	0,11955923	4,1322314	5,010635294	-2,060952558
-100/+200	75	0,053	0,0292011	0,09201102	2,19008264	4,317488114	-2,337973582
-200	60	0,114	0,06280992	0,06280992	3,76859504	4,094344562	-2,735383049
		1,815	1				

Tiempo 15 minutos

Malla	X	Peso Retenido (kg)	Fracción retenida f(x)	Fracción pasante acumulada F(x)	x f(x)	Rosin - Rammler	
						X	Y
						ln(x)	ln(ln(1/(1-F(x))))
+3/4	19000	0	0	1	0	9,852194258	#iDIV/0!
-3/4/+0,5	12500	0,516	0,28603104	1	3575,38803	9,433483923	#iDIV/0!
-0,5/+3/8	9500	0,239	0,13248337	0,71396896	1258,59202	9,159047078	0,224466624
-3/8/+8	2360	0,482	0,26718404	0,58148559	630,554324	7,766416898	-0,138062843
-8/+16	1180	0,065	0,03603104	0,31430155	42,5166297	7,073269717	-0,974668726
-16/+40	425	0,077	0,04268293	0,27827051	18,1402439	6,052089169	-1,120536238
-40/+80	180	0,15	0,08314856	0,23558758	14,9667406	5,192956851	-1,314353966
-80/+100	150	0,054	0,02993348	0,15243902	4,49002217	5,010635294	-1,799433874
-100/+200	75	0,083	0,04600887	0,12250554	3,45066519	4,317488114	-2,034968181
-200	60	0,138	0,07649667	0,07649667	4,58980044	4,094344562	-2,530981442
		1,804	1				

Anexo 23. Molino de bolas de laboratorio: tablas peso retenido, granulometría Rossin-Rammler ensayo 1.7 kg/l con carga de distribución 60% de bolas grandes, 30% de bolas medianas y 10% pequeñas.

Tiempo 3 minutos

Malla	X	Peso Retenido (kg)	Fracción retenida f(x)	Fracción pasante acumulada F(x)	x f(x)	Rosin - Rammler	
						X	Y
						ln(x)	ln(ln(1/(1-F(x))))
+3/4	19000	0	0	1	0	9,852194258	#¡DIV/0!
-3/4/+0,5	12500	0,619	0,34048405	1	4256,05061	9,433483923	#¡DIV/0!
-0,5/+3/8	9500	0,214	0,11771177	0,65951595	1118,26183	9,159047078	0,074538667
-3/8/+8	2360	0,497	0,27337734	0,54180418	645,170517	7,766416898	-0,247873542
-8/+16	1180	0,115	0,06325633	0,26842684	74,6424642	7,073269717	-1,162965056
-16/+40	425	0,135	0,07425743	0,20517052	31,5594059	6,052089169	-1,47129609
-40/+80	180	0,098	0,05390539	0,13091309	9,7029703	5,192956851	-1,963885705
-80/+100	150	0,015	0,00825083	0,0770077	1,23762376	5,010635294	-2,524050207
-100/+200	75	0,058	0,03190319	0,06875688	2,39273927	4,317488114	-2,641772516
-200	60	0,067	0,03685369	0,03685369	2,21122112	4,094344562	-3,282083433
		1,818	1				

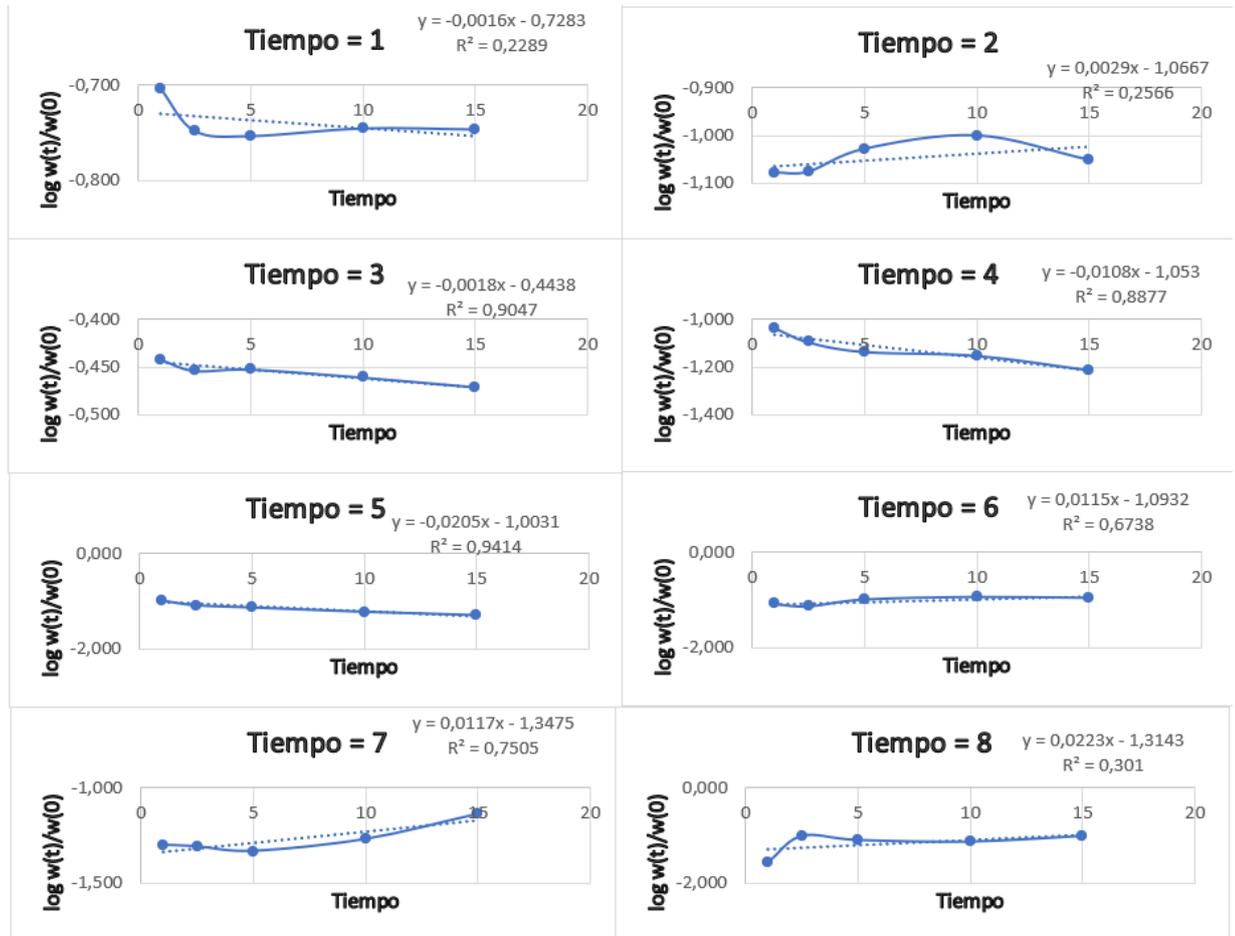
Tiempo 9 minutos

Malla	X	Peso Retenido (kg)	Fracción retenida f(x)	Fracción pasante acumulada F(x)	x f(x)	Rosin - Rammler	
						X	Y
						ln(x)	ln(ln(1/(1-F(x))))
+3/4	19000	0	0	1	0	9,852194258	#¡DIV/0!
-3/4/+0,5	12500	0,539	0,29811947	1	3726,49336	9,433483923	#¡DIV/0!
-0,5/+3/8	9500	0,223	0,12334071	0,70188053	1171,73673	9,159047078	0,190836014
-3/8/+8	2360	0,48	0,26548673	0,57853982	626,548673	7,766416898	-0,146147806
-8/+16	1180	0,086	0,04756637	0,3130531	56,1283186	7,073269717	-0,979501392
-16/+40	425	0,11	0,06084071	0,26548673	25,8573009	6,052089169	-1,175880414
-40/+80	180	0,148	0,08185841	0,20464602	14,7345133	5,192956851	-1,474173012
-80/+100	150	0,039	0,0215708	0,12278761	3,23561947	5,010635294	-2,032511096
-100/+200	75	0,063	0,03484513	0,10121681	2,61338496	4,317488114	-2,23760811
-200	60	0,12	0,06637168	0,06637168	3,98230088	4,094344562	-2,678342879
		1,808	1				

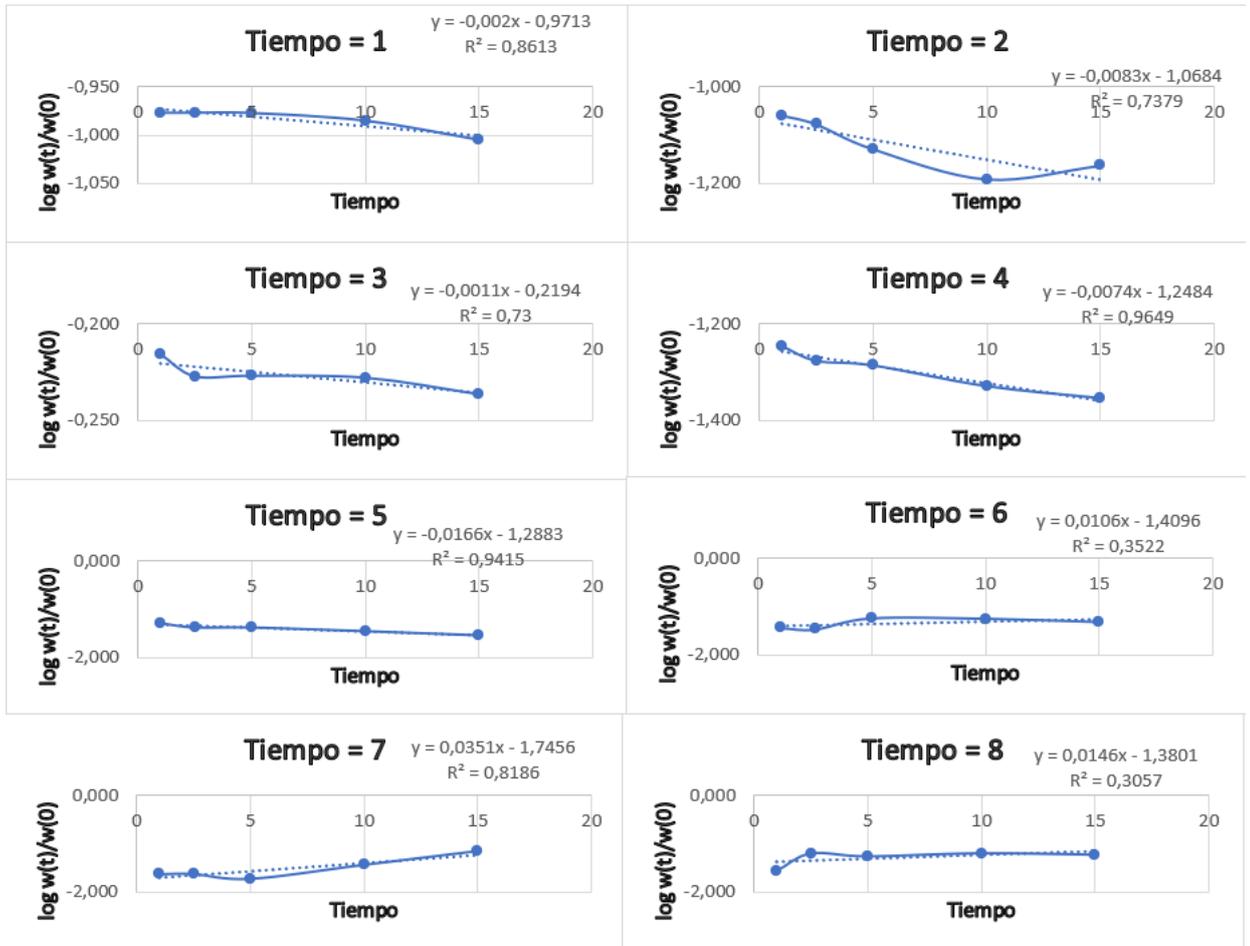
Tiempo 15 minutos

Malla	X	Peso Retenido (kg)	Fracción retenida f(x)	Fracción pasante acumulada F(x)	x f(x)	Rosin - Rammler	
						X	Y
						ln(x)	ln(ln(1/(1-F(x))))
+3/4	19000	0	0	1	0	9,852194258	#¡DIV/0!
-3/4/+0,5	12500	0,501	0,28004472	1	3500,55897	9,433483923	#¡DIV/0!
-0,5/+3/8	9500	0,232	0,12968139	0,71995528	1231,97317	9,159047078	0,241223898
-3/8/+8	2360	0,438	0,24482951	0,5902739	577,797652	7,766416898	-0,113990557
-8/+16	1180	0,056	0,0313024	0,34544438	36,9368362	7,073269717	-0,858496654
-16/+40	425	0,078	0,04359978	0,31414198	18,529905	6,052089169	-0,975285611
-40/+80	180	0,173	0,09670207	0,2705422	17,4063723	5,192956851	-1,153743157
-80/+100	150	0,046	0,02571269	0,17384013	3,8569033	5,010635294	-1,655654735
-100/+200	75	0,103	0,05757406	0,14812745	4,31805478	4,317488114	-1,83059377
-200	60	0,162	0,09055338	0,09055338	5,43320291	4,094344562	-2,354731632
		1,789	1				

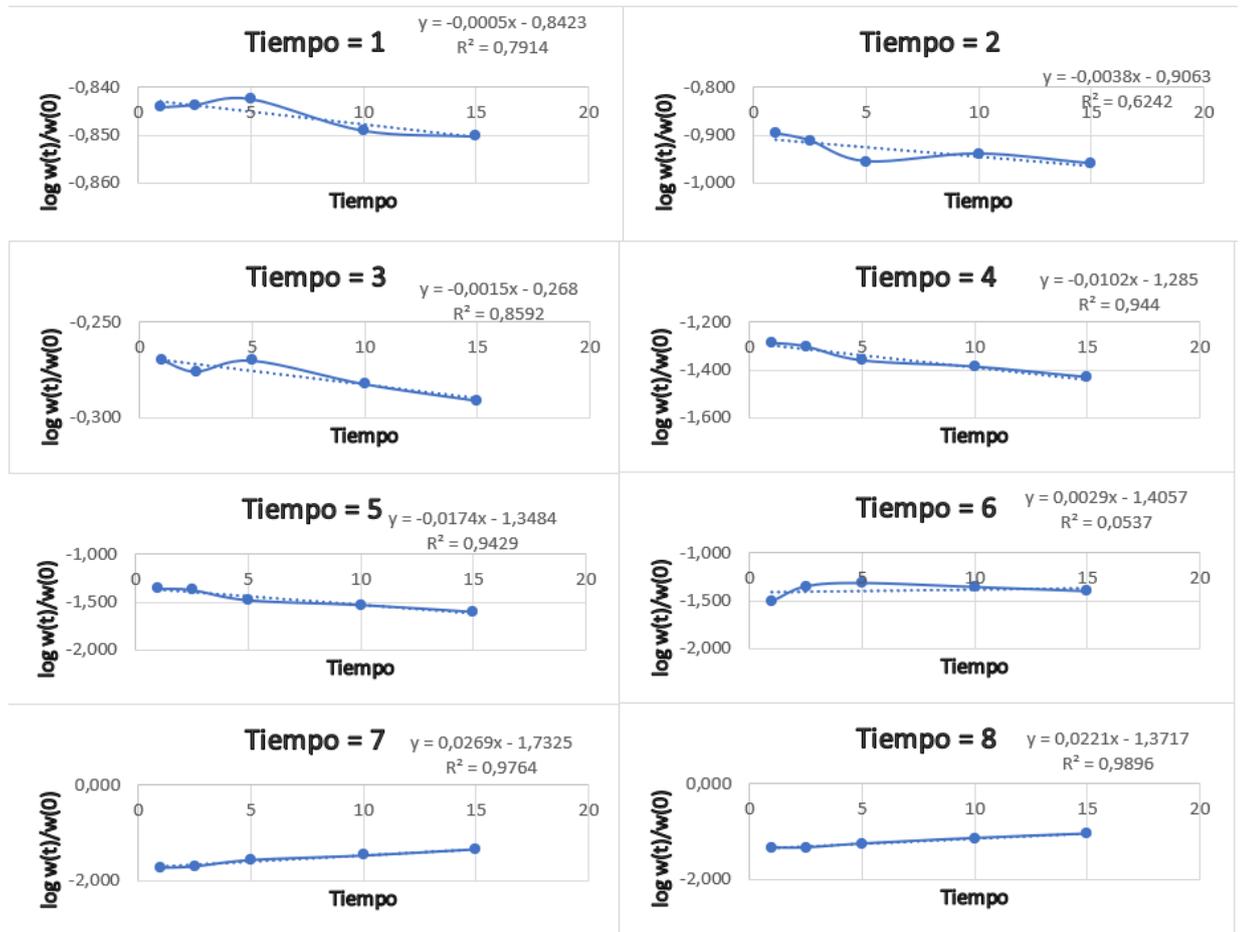
Anexo 24. Gráficas para el cálculo de la velocidad específica de fractura del ensayo de 1.9 kg/l del molino de bolas de laboratorio con carga de distribución 10% de bolas grandes, 10% de bolas medianas y 80% pequeñas.



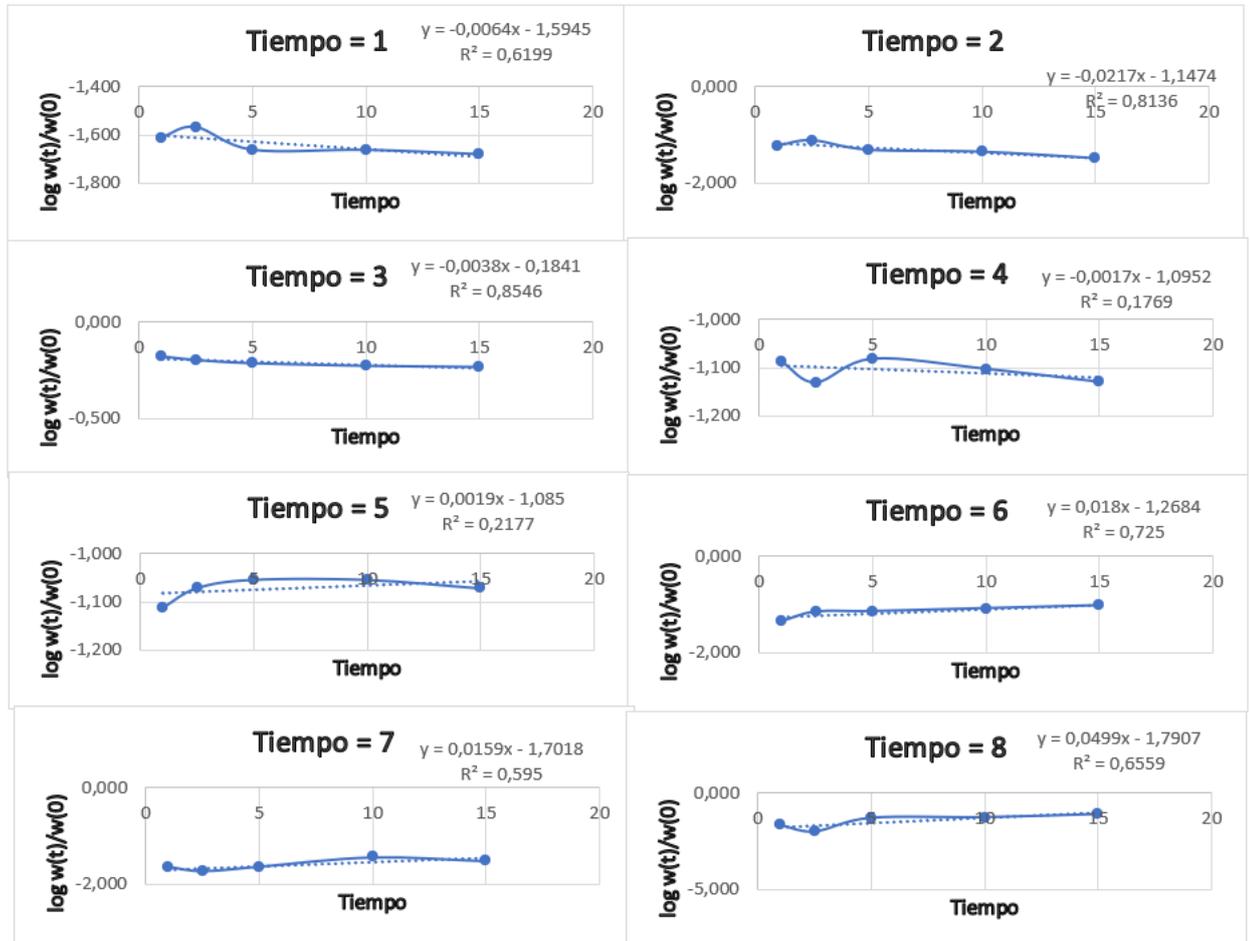
Anexo 25. Gráficas para el cálculo de la velocidad específica de fractura del ensayo de 1.5 kg/l del molino de bolas de laboratorio con carga de distribución 10% de bolas grandes, 10% de bolas medianas y 80% pequeñas.



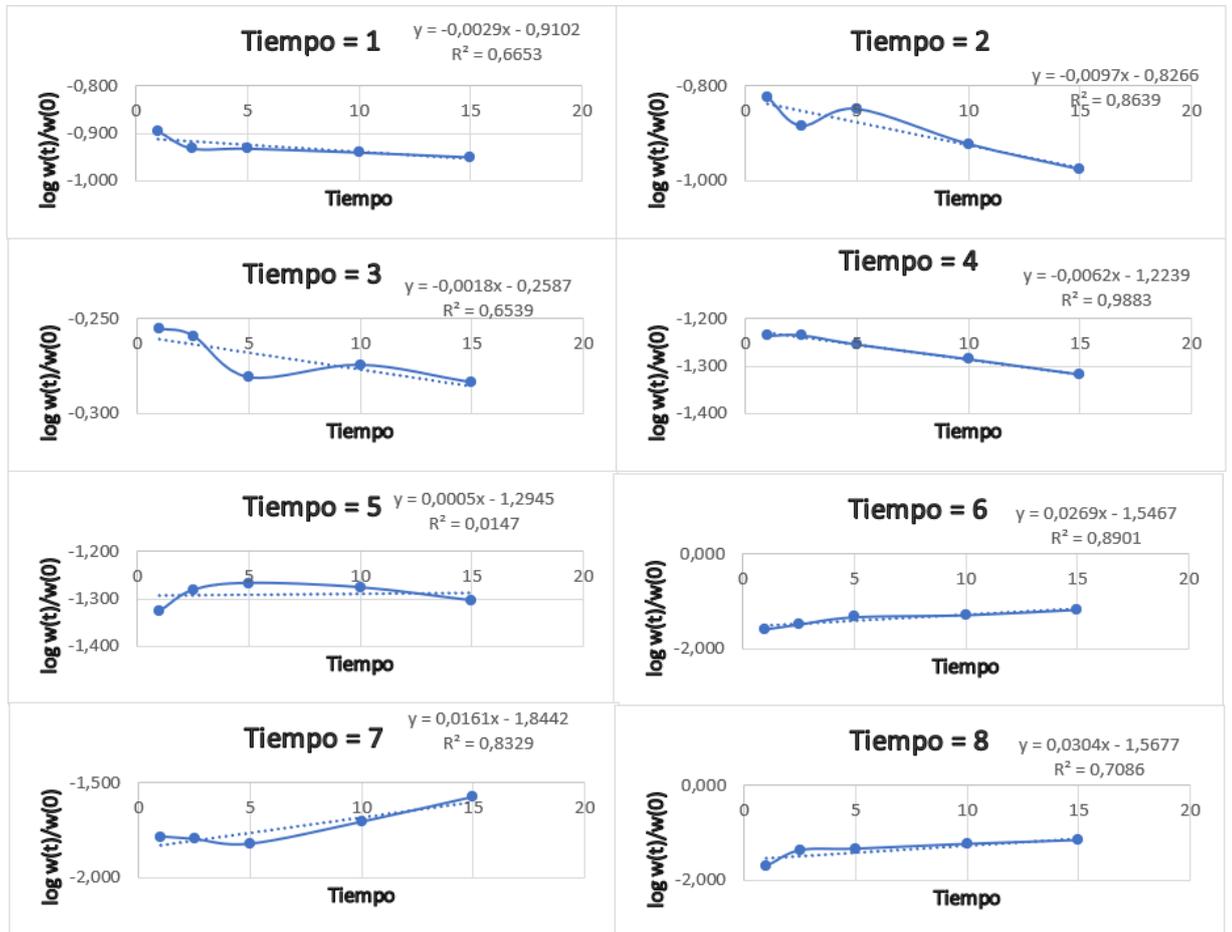
Anexo 26. Gráficas para el cálculo de la velocidad específica de fractura del ensayo de 1.7 kg/l del molino de bolas de laboratorio con carga de distribución 10% de bolas grandes, 10% de bolas medianas y 80% pequeñas.



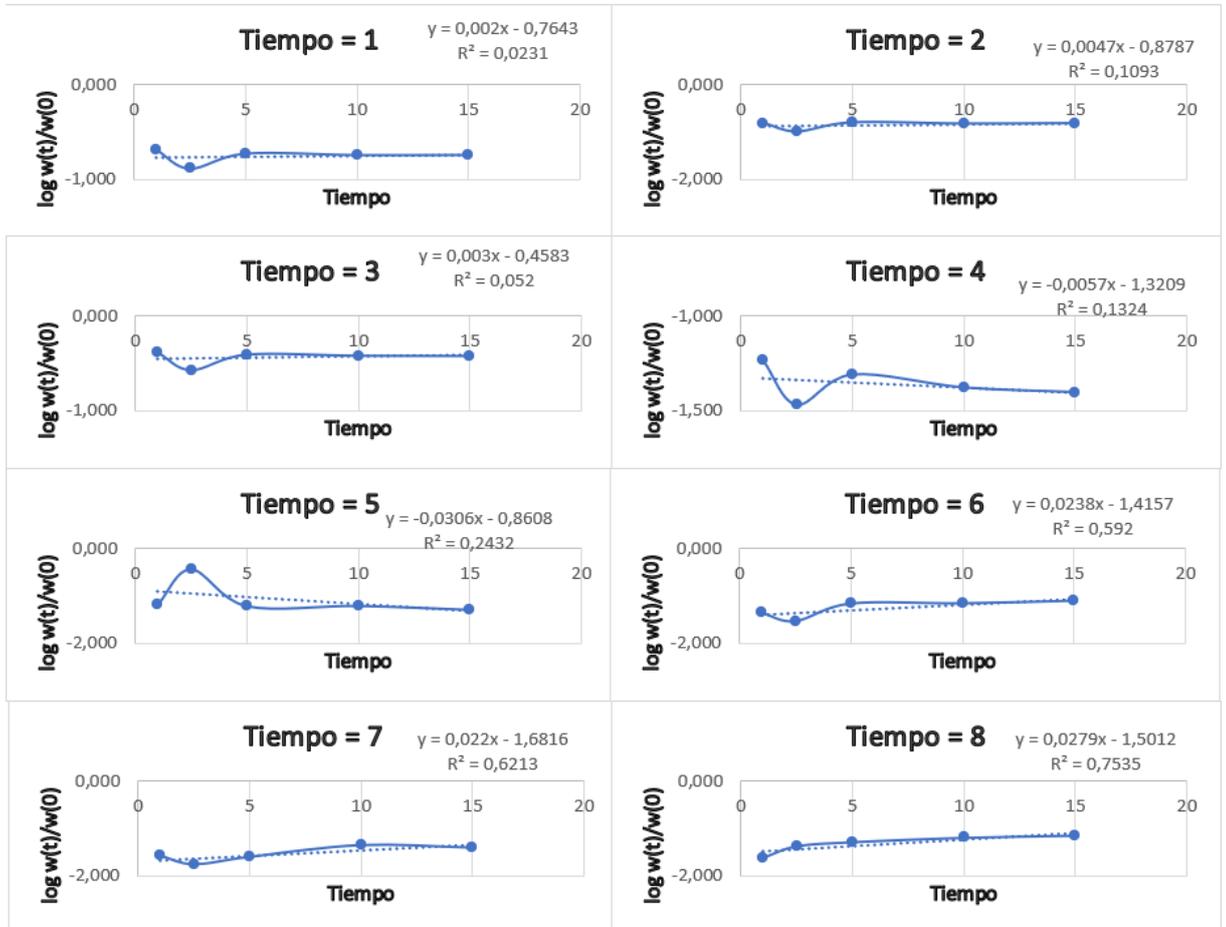
Anexo 27. Gráficas para el cálculo de la velocidad específica de fractura del ensayo de 1.5 kg/l del molino de bolas de laboratorio con carga de distribución 80% de bolas grandes, 10% de bolas medianas y 10% pequeñas.



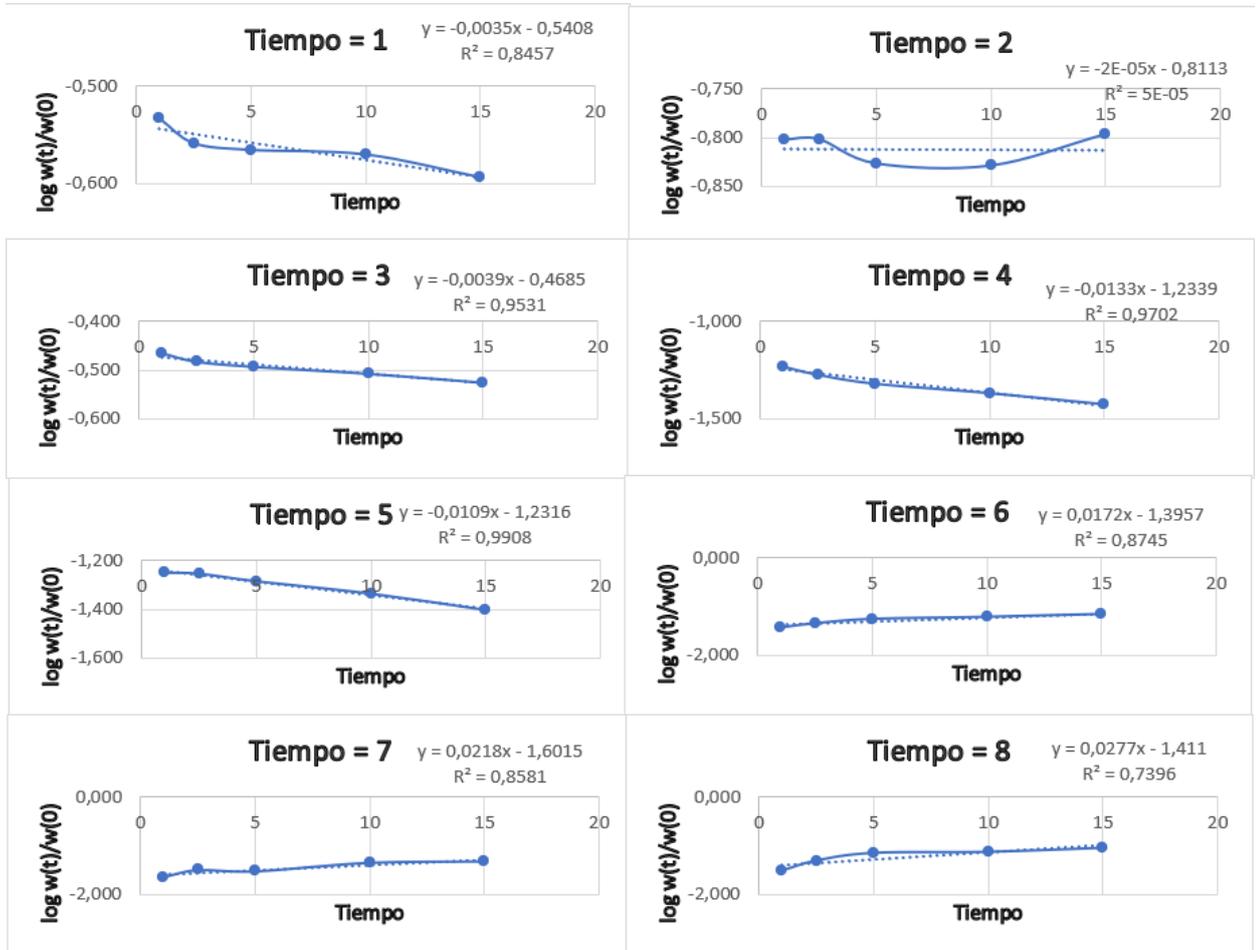
Anexo 28. Gráficas para el cálculo de la velocidad específica de fractura del ensayo de 1.9 kg/l del molino de bolas de laboratorio con carga de distribución 80% de bolas grandes, 10% de bolas medianas y 10% pequeñas.



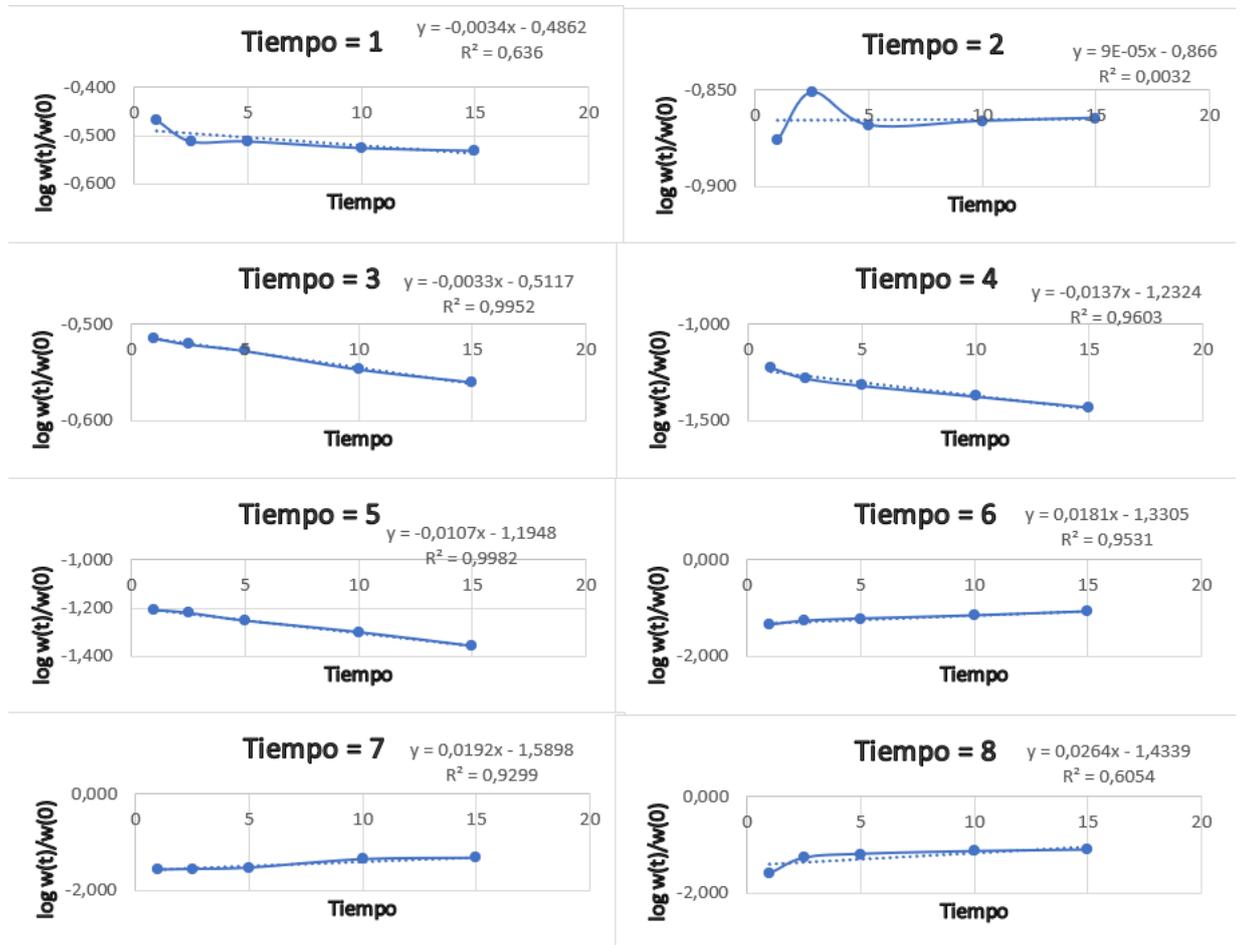
Anexo 29. Gráficas para el cálculo de la velocidad específica de fractura del ensayo de 1.7 kg/l del molino de bolas de laboratorio con carga de distribución 80% de bolas grandes, 10% de bolas medianas y 10% pequeñas.



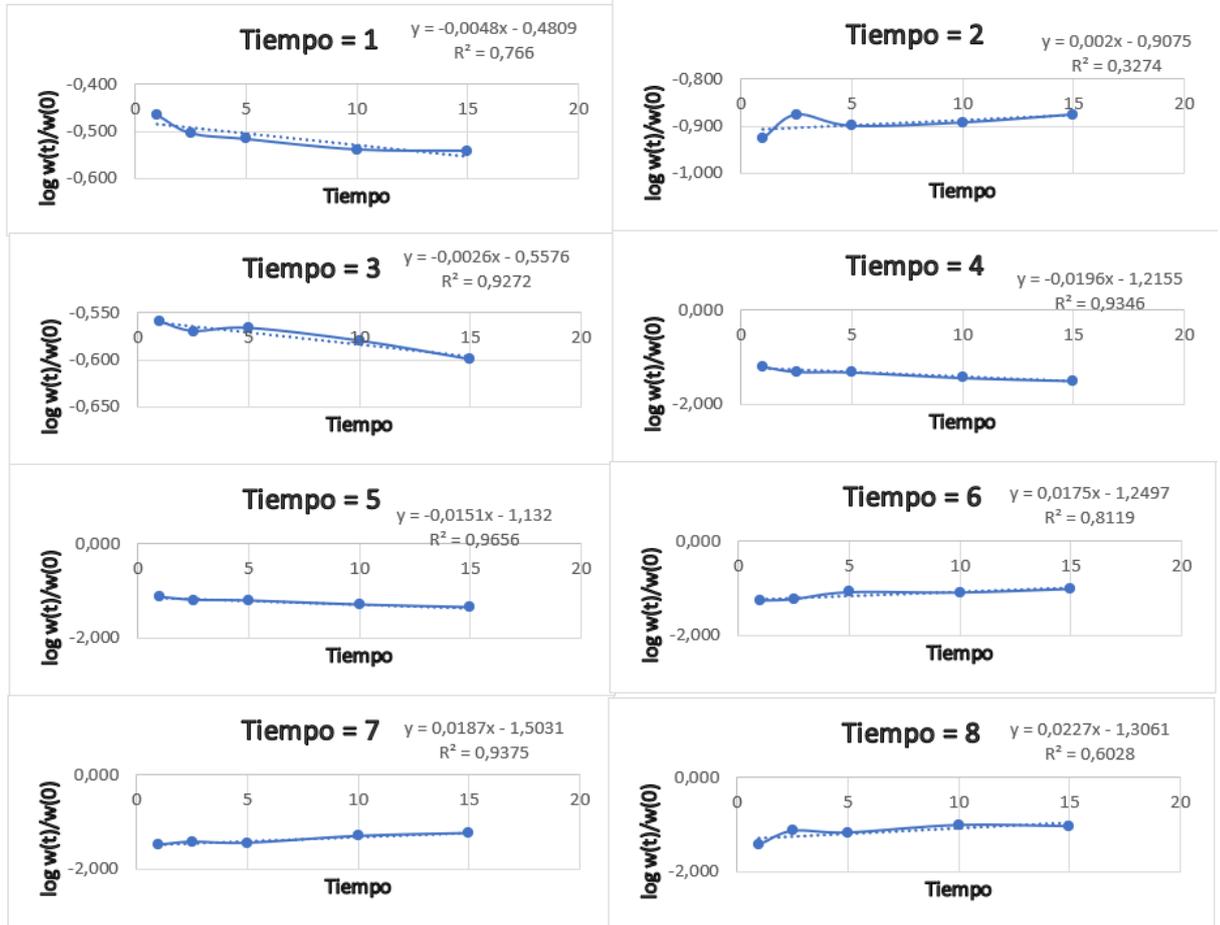
Anexo 30. Gráficas para el cálculo de la velocidad específica de fractura del ensayo de 1.9 kg/l del molino de bolas de laboratorio con carga de distribución 60% de bolas grandes, 30% de bolas medianas y 10% pequeñas.



Anexo 31. Gráficas para el cálculo de la velocidad específica de fractura del ensayo de 1.5 kg/l del molino de bolas de laboratorio con carga de distribución 60% de bolas grandes, 30% de bolas medianas y 10% pequeñas.



Anexo 32. Gráficas para el cálculo de la velocidad específica de fractura del ensayo de 1.7 kg/l del molino de bolas de laboratorio con carga de distribución 60% de bolas grandes, 30% de bolas medianas y 10% pequeñas.



Anexo 33. Velocidad de fractura para las distintas densidades.

