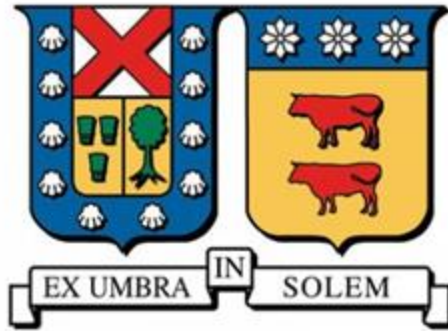


UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y DE MATERIALES

VALPARAÍSO - CHILE



“ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA GEOMETRÍA DE LOS
LEVANTADORES EN LA SEGREGACIÓN DE LA CARGA EN
UN MOLINO A ESCALA DE LABORATORIO”

Memoria presentada por:

MARÍA JOSÉ MUÑOZ SOTOMAYOR

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

INGENIERO CIVIL METALÚRGICO

Profesor Guía:

WALDO VALDERRAMA

Agosto de 2018



*A mis Padres,
A mis hermanas y abuela
A Francisco, José Tomás y Juan José*



AGRADECIMIENTOS

Quiero dar las gracias a mi familia. A mis padres, hermanas y abuela por el apoyo incondicional, los consejos, el amor y la sabiduría.

A Francisco y mis hijos José Tomas y Juan José, los amores de mi vida y la razón por la cual vivo y existo.

A mi profesor guía, Waldo Valderrama, por la confianza y el apoyo permanente durante toda mi vida universitaria.

Y mis amigos de carrera, por tantas alegrías, vivencias y sufrimientos compartidos.



RESUMEN

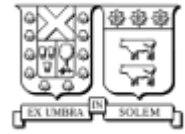
Esta investigación, tiene como objetivo estudiar el comportamiento axial y longitudinal de la carga en un molino a escala de laboratorio bajo la influencia de distintos elementos en el diseño de los levantadores, específicamente la incorporación a de un ángulo paralelo al eje del molino denominado ángulo de avance, el cual pretende incidir en el comportamiento de la carga. Para esto, se desarrolla una técnica experimental específica y se analiza el efecto del ángulo de ataque, ángulo de avance y de la velocidad de giro.

El procedimiento desarrollado utiliza un molino diseñado previamente de cara transparente y cuerpo de plástico PVC, desmontable, el cual está provisto de levantadores fabricados de material tecnyl por medio de una fresadora computarizada. Se introduce una carga de bolas de plástico y gelatina líquida. El molino se somete a distintas condiciones operacionales y luego de un número de revoluciones, es detenido en crush stop para dejar las bolas en una posición estática luego que la gelatina se solidifique. Posterior a esto, la carga es separada en secciones axiales y es determinada la masa de partículas que se encuentra en cada sección, permitiendo caracterizar la carga y estudiar fenómenos de segregaciones axiales.

Con la información obtenida, se desarrolla un procedimiento estadístico el cual intenta medir repetitividad de los experimentos, la influencia de ángulo de avance, ataque velocidad y posición de las partículas en el comportamiento observado para con esto, intentar explicar el fenómeno por medio de un modelo lineal.

Con los resultados obtenidos, se concluye que sí existe formas de influenciar en la segregación de la carga, pero la metodología empleada y los revestimientos utilizaron no son suficientes para determinar razones fundamentadas al comportamiento de la carga. Con lo estudiado, cualquiera de las variables involucradas, es decir, ángulo de avance, ángulo de ataque, velocidad, interacción, pudieron haber influenciado en el resultado obtenido.

El procedimiento propuesto permite acercarnos a condiciones operacionales en donde la carga se comporta de tal forma que permite una segregación de cuerpos y en el que su implementación en la industria podría resultar en disminuir tiempos de residencia de la carga y volumen de mineral procesado, pero se requiere de estudios adicionales para evaluar las distintas condiciones que aquí no fueron alcanzadas



ABSTRACT

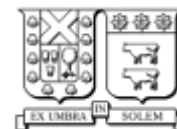
The objective of this investigation is to study the axial and longitudinal behavior of the load in a laboratory-scale mill. The mill was under the influence of different elements in the design of its lifters. Specifically, the inclusion of a parallel angle (referred from now on as the caster angle) to the axis of the mill, whose function was to influence in the behavior of the load. In order to accomplish this, a specific experimental technique was put into practice whose purpose was to analyze the effect of the angle of attack, the caster angle and the rotational speed.

The procedure developed makes use of a mill previously designed with a see-through face and a PVC unmountable body. It is equipped with technyl lifters manufactured in a CNC milling machine. A load of plastic balls and liquid jelly is introduced. The mill is then subjected to different operational conditions and after a number of revolutions it is brought to a crush stop. The objective of this is bringing the balls to a static position when the jelly solidifies. Once this is done, the load is separated in axial sections and the particle's mass of each section is determined. This allows to classify the load and study the phenomenons of axial segregation.

The information gathered was used to establish a statistical procedure whose function was measuring the repeatability of the experiments; and the influence of the caster angle, the angle of attack and the position of the particles, in the observed behavior so as to explain the phenomenon through a linear model.

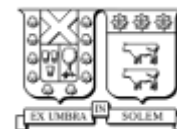
With the results obtained, we were able to conclude that it is possible to influence the segregation of the load, but the methodology employed and the cladding used were not sufficient to determine well founded reasons to explain the behavior of the load. The gathered data then indicates that any of the variables involved (caster angle, angle of attack, velocity, interaction) could have influenced the final result.

Nevertheless, the proposed procedure allows an approach to operational conditions in which the load behaves in such a way that the segregation of the bodies and its implementation in the industry could eventually result in the diminution of the times of residence of the load and the volume of processed minerals. However, additional studies are required to evaluate the different conditions that were not reached during this experiment.

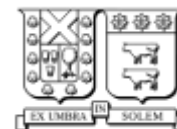


ÍNDICE TEÓRICO

AGRADECIMIENTOS	3
RESUMEN	4
ABSTRACT.....	5
ÍNDICE TEÓRICO.....	6
INDICE TABLAS	10
INDICE ILUSTRACIONES.....	12
1.1 INTRODUCCIÓN	18
1.2 OBJETIVOS	20
2 ANTECEDENTES	22
2.1 Mecanismos de molienda.....	24
2.2 Modelos de movimiento de carga en molienda	25
3.1 General.....	45
3.2 Diseño del Molino	46
3.3 Preparación de la carga	48
3.4 Determinación del medio acuoso.....	53
3.5 Procedimiento experimental	54
3.5.1 Forma de carguío del molino y condiciones operacionales	54
3.5.2 Velocidad de giro.....	55
3.5.3 Realización del ensayo.....	56
3.5.4 Procedimiento de Análisis Experimental.....	57
3.5.4.1 Análisis de Datos Tridimensional.....	57



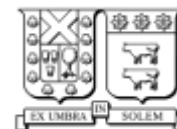
4.1	Resultados obtenidos para el Análisis Tridimensional	61
4.1.1	Comportamiento Radial de la carga.....	61
4.1.2	Comportamiento axial de la carga	63
4.1.3	Efecto de las tapas sobre el comportamiento axial de la carga.	67
4.1.4	Comportamiento de la carga en función de los revestimientos utilizados	69
4.1.4.1	Análisis de muestras en duplicado.....	69
4.1.4.2	Distribución para análisis de segregación longitudinal.....	73
4.1.4.2.1	Revestimiento Liso Caso Base – Velocidad de rotación 50% V_c	73
4.1.4.2.2	Revestimiento Liso Caso Base – Velocidad de rotación 75% V_c	75
4.1.4.2.3	Revestimiento Dentado – Ángulo de ataque 70° - Ángulo de avance 15° - Velocidad rotación 50% V_c	76
4.1.4.2.4	Revestimiento Dentado – Ángulo de ataque 70° - Ángulo de avance 15° - Velocidad de rotación 75% V_c	77
4.1.4.2.5	Revestimiento Dentado – Ángulo de ataque 50° - Ángulo de avance 15° - Velocidad de rotación 50% V_c	79
4.1.4.2.6	Revestimiento Dentado – Ángulo de ataque 50° - Ángulo de avance 15° - Velocidad rotación 75% V_c	81
4.1.4.3	Análisis de varianza multifactorial – Efecto Velocidad y Tipo de revestimiento...	84
4.1.4.3.1	Análisis multifactorial para bolas negras	84
4.1.4.3.2	Análisis multifactorial para bolas rojas.....	88
4.1.4.4	Modelo para bolas negras y análisis del ángulo de ataque.....	91
4.1.4.5	Modelo para bolas rojas y análisis del ángulo de ataque.	95
5	CONCLUSIONES	98
6	RECOMENDACIONES.....	100
	ANEXO A.....	101



PLANOS REVESTIMIENTOS.....	101
A.1 Plano Revestimiento número dos (2)	102
A.2 Plano revestimiento número tres (3):	103
ANEXO B.....	104
TABLAS DATOS EXPERIMENTALES	104
APLICACIÓN MEDIA MÓVIL (N=3)	104
B.1 Revestimiento 1 – 75% Vc – Distribución Bolas Rojas – Distribución Bolas Negras	105
B.2 Revestimiento 2 – 50% Vc – Distribución Bolas Rojas – Distribución Bolas Negras	106
B.3 Revestimiento 2 – 75% Vc – Distribución Bolas Rojas – Distribución Bolas Negras	107
B.4 Revestimiento 3 – 50% Vc – Distribución Bolas Rojas – Distribución Bolas Negras	108
B.5 Revestimiento 3 – 75% Vc – Distribución Bolas Rojas – Distribución Bolas Negras	109
ANEXO C.....	110
COMPORTAMIENTO DE REVESTIMIENTOS	110
GRAFICOS CON TAPAS.....	110
C.1 Comportamiento Revestimiento 90/0 a 75% Vc.....	111
C.2 Comportamiento Revestimiento 70/15 a 50% Vc.....	112
C.3 Comportamiento Revestimiento 70/15 a 75% Vc.....	112
C.4 Comportamiento Revestimiento 50/15 a 50% Vc.....	113
C. 5 Comportamiento Revestimiento 50/15 a 75% Vc.....	113
ANEXO D.....	114
COMPORTAMIENTO REVESTIMIENTOS.....	114



GRAFICOS SIN TAPAS.....	114
D.1 Comportamiento Revestimiento 90/0 a 75% V_c	115
D.2 Comportamiento Revestimiento 70/15 a 50% V_c	116
D.3 Comportamiento Revestimiento 70/15 a 75% V_c	116
D.4 Comportamiento Revestimiento 50/15 a 50% V_c	117
D.5 Comportamiento Revestimiento 50/15 a 75% V_c	117
ANEXO E	118
SECUENCIAS FOTOGRÁFICAS.....	118
ANEXO F	131
ANOVA PARA ANÁLISIS DE MUESTRAS EN DUPLICADO	131
REFERENCIAS.....	144



INDICE TABLAS

Tabla 1 Mecanismo de Molienda [8]	25
Tabla 2 Acción de una carga normal de bolas a distintos porcentajes de la velocidad crítica [8].....	30
Tabla 3 Efecto de la variación de la cantidad de carga de bolas.....	30
Tabla 4 Ángulo de ataque y ángulo de avance de los distintos modelos de revestimientos	39
Tabla 5 Especificaciones de la carga número uno de bolas.....	49
Tabla 6 Especificación de la composición de la carga número uno en numero de bolas y volúmen	50
Tabla 7 Número y masa de bolas para diferentes tamaños de bolas. Slot Parrilla 7,5 [cm]/ 3 [in].....	51
Tabla 8 Especificaciones de la carga número dos de bolas	53
Tabla 9 Especificación de la composición de la carga número uno en numero de bolas y volúmen	53
Tabla 10 Resumen Pruebas Experimentales a realizar	56
Tabla 11 Datos para cálculo ANOVA bolas rojas girando a 75% Vc	70
Tabla 13 Tabla ANOVA para análisis de varianza bolas rojas girando 75% Vc Revestimiento 2	70
Tabla 14 Valores probabilísticos para análisis de hipótesis nula Revestimiento 2 a 75% Vc bolas rojas	71
Tabla 15 Tabla porcentajes de datos que acepta la hipótesis nula	72
Tabla 16 Condiciones operacionales del Revestimiento uno (1) para velocidad de giro 50% de la velocidad crítica	73
Tabla 17 Tabla comportamiento de la carga Revestimiento 1 girando a 50% Vc	74
Tabla 18 Condiciones operacionales del Revestimiento uno (1) para velocidad de giro 75% de la velocidad crítica	75
Tabla 19 Tabla comportamiento de la carga Revestimiento 1 girando a 75% Vc	75
Tabla 20 Condiciones operacionales del Revestimiento dos (2) para velocidad de giro 50% de la velocidad crítica	76
Tabla 21 Tabla comportamiento de la carga Revestimiento 2 girando a 50% Vc	77
Tabla 22 Condiciones operacionales del Revestimiento dos (2) para velocidad de giro 75% de la velocidad crítica	77
Tabla 23 Tabla comportamiento de la carga Revestimiento 2 girando a 75% Vc	78
Tabla 24 Condiciones operacionales del Revestimiento tres (3) para velocidad de giro 50% de la velocidad crítica	79
Tabla 25 Tabla comportamiento de la carga Revestimiento 3 girando a 50% Vc	80
Tabla 26 Condiciones operacionales del Revestimiento tres (3) para velocidad de giro 75% de la velocidad crítica	81
Tabla 27 Tabla comportamiento de la carga Revestimiento 3 girando a 75% Vc	81
Tabla 28 Tabla resumen desplazamiento neto de bolas hacia la izquierda o hacia la derecha.	82

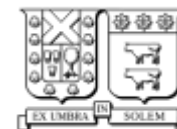


Tabla 29 Análisis de varianza para bolas negras - Efecto simultáneo Revestimiento y velocidad de giro.....	85
Tabla 30 Análisis de varianza para cálculo multifactorial - Velocidad y Tipo de revesimiento (ángulo de ataque).....	86
Tabla 31 Porcentaje de datos que acepta la hipótesis nula bolas negras.....	87
Tabla 32 Análisis de varianza para bolas rojas - Efecto simultáneo Revestimiento y velocidad de giro	88
Tabla 33 Análisis de varianza para cálculo multifactorial - Velocidad y Tipo de revesimiento (ángulo de ataque).....	89
Tabla 34 Porcentaje de datos que acepta la hipótesis nula bolas rojas	90
Tabla 34 Datos para determinación de modelo experimental de bolas negras	92
Tabla 35 Coeficientes del modelo experimental de bolas negras	93
Tabla 36 Tabla resumen estadística de regresión modelo bolas negras.....	94
Tabla 37 Coeficientes del modelo experimental de bolas rojas.....	95
Tabla 38 34 Datos para determinación de modelo experimental de bolas rojas	95
Tabla 39 Tabla resumen estadística de regresión modelo bolas rojas.....	96
Tabla 38 Datos experimentales para Revestimiento uno (1) a velocidad de giro 75% Vc. Datos ajustados con método Media Móvil (N=3).....	105
Tabla 39 Datos experimentales para Revestimiento dos (2) a velocidad de giro 50% Vc. Datos ajustados con método Media Móvil (N=3).....	106
Tabla 40 Datos experimentales para Revestimiento dos (2) a velocidad de giro 75% Vc. Datos ajustados con método Media Móvil (N=3).....	107
Tabla 41 Datos experimentales para Revestimiento tres (3) a velocidad de giro 50% Vc. Datos ajustados con método Media Móvil (N=3).....	108
Tabla 42 Datos experimentales para Revestimiento tres (3) a velocidad de giro 75% Vc. Datos ajustados con método Media Móvil (N=3).....	109
Tabla 43 Analisis de varianza para análisis de muestra en duplicado Rev1 50%Vc - Bolas Rojas	132
Tabla 44 Analisis de varianza para análisis d muestra en duplicado Rev1 50%Vc - Bolas Negras	133
Tabla 45 Analisis de varianza para análisis d muestra en duplicado Rev1 75%Vc - Bolas Rojas	134
Tabla 46 Analisis de varianza para análisis de muestra en duplicado Rev1 75%Vc - Bolas Negras	135
Tabla 47 Analisis de varianza para análisis de muestra en duplicado Rev2 50%Vc - Bolas Rojas	136
Tabla 48 Analisis de varianza para análisis de muestra en duplicado Rev2 50%Vc - Bolas Negras	137
Tabla 49 Analisis de varianza para análisis de muestra en duplicado Rev2 75%Vc - Bolas Rojas	138
Tabla 50 Analisis de varianza para análisis de muestra en duplicado Rev2 75%Vc - Bolas Negras	139



Tabla 51 Analisis de varianza para análisis de muestra en duplicado Rev3 50%Vc - Bolas Rojas	140
Tabla 52 Analisis de varianza para análisis de muestra en duplicado Rev3 50%Vc - Bolas Negras	141
Tabla 53 Analisis de varianza para análisis d muestra en duplicado Rev3 75%Vc - Bolas Rojas	142
Tabla 54 Analisis de varianza para análisis d muestra en duplicado Rev3 75%Vc – Bolas Negras	143

INDICE ILUSTRACIONES

Figura 1 Relación diámetro del molino [ft] con Potencia Instalada [kW] para molinos SAG.	23
Figura 2 Gráfico largo total [ft] en relación con el largo efectivo de molienda para molinos SAG	23
Figura 3 Velocidad de las bolas. Simulación de 150 bolas al 40% de la velocidad crítica. Fenómeno de cascada.	27
Figura 4 Velocidad de las bolas. Simulación de 150 bolas al 80% de la velocidad crítica. Fenómeno de catarata.	28
Figura 5 Velocidad de las bolas. Simulación de 150 bolas al 100% de la velocidad crítica. Fenómeno de centrifugación	29
Figura 6 (a) Trayectoria de una bola con velocidad de rotación correspondiente 60% de la velocidad crítica. (a) Bola ubicada en la capa interna de la carga. (b) Bola ubicada en la capa externa de la carga.	29
Figura 7 Segregación radial. Velocidad de rotación 80% de la velocidad crítica.....	32
Figura 8 Segregación radial. Velocidad de rotación 25% de la velocidad crítica.....	32
Figura 9 Transporte axial de la carga.....	33
Figura 10 Segregación radial de la carga	33
Figura 11 Distribución de la masa [toneladas/m] a lo largo del molino SAG después de 4 min de operación.	35
Figura 12 Distribución del tamaño medio de partículas a lo largo del molino SAG después de 4 min de operación.....	35
Figura 13 Masa de finos por unidad de longitud a lo largo el molino para un tamaño de parrilla de 60 mm.	36
Figura 14 Perfil de los levantadores. Altura y ángulo de ataque.	38
Figura 15 Trayectoria de la carga para distintos ángulos de la cara del revestimiento.....	38
Figura 16 Gráfico de interacción para el desplazamiento neto	40
Figura 17 Vista de la sección central del molino con método acoplado DEM -CFD	41
Figura 18 Ensamblaje molino escala piloto 3D Inventor Autodesk	46
Figura 19 Molino construido y en operación	47

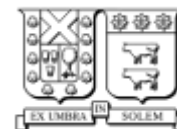


Figura 20 Revestimientos utilizados. a) Ángulo de ataque 90°, Ángulo de avance 0° b) Ángulo de ataque 70°, Ángulo de avance 15° c) Ángulo de ataque 50°, Ángulo de avance 15°	47
Figura 21 Molino montado sobre rodillos giratorios.	48
Figura 22 Regulador externo de velocidad de rotación de los rodillos	48
Figura 23 Tacómetro utilizado para verificar la velocidad de rotación del molino en RPM..	48
Figura 24 Gráfico distribución por número de bolas para diferentes tamaños para slot parrilla 7,5 [cm]	51
Figura 25 Gráfico distribución de bolas por porcentaje en volumen para diferentes tamaños para slot parrilla 7,5 [cm]	51
Figura 26 Método de carguío del molino.	55
Figura 27 Distribución secciones a lo largo del molino	56
Figura 28 Representación grafica de las secciones del molino	57
Figura 29 Fotograma obtenido a velocidad de rotación 50% Vc para levantador 1 (caso base)	61
Figura 30 Fotograma obtenido a 75% Vc par levantador 1 (caso base)	62
Figura 31 Experimento número dos (2) con el revestimiento 75/15 girando a un 75 % de la velocidad crítica. De arriba hacia abajo y de izquierda a derecha se observa Seccion 1 a Seccion 12	64
Figura 32 Experimento número dos (2) con el revestimiento 75/15 girando a un 75 % de la velocidad crítica. De arriba hacia abajo y de izquierda a derecha se observa Seccion 13 a Seccion 24	65
Figura 33 Experimento número dos (2) con el revestimiento 75/15 girando a un 75 % de la velocidad crítica. De arriba hacia abajo y de izquierda a derecha se observa Seccion 25 a Seccion 37	66
Figura 34 Experimento número dos (2) con el revestimiento 75/15 girando a un 75 % de la velocidad crítica. De izquierda a derecha se observa Seccion 38 a Seccion 40	67
Figura 35 Comportamiento Revestimiento 90/0 a 75% Vc Experimento 1 (original) y Experimento 2 (duplicado)	68
Figura 36 Gráfico de valores 1-P para revestimiento 2 girando a 75% Vc bolas rojas	72
Figura 37 Gráfico Comportamiento Revestimiento 1, ángulo de ataque 90°, ángulo de avance 0°, a 50% Vc para promedio bolas rojas (grandes), promedio bolas negras (pequeñas), y comportamiento general total promedio	74
Figura 38 Gráfico Comportamiento Revestimiento 1, ángulo de ataque 90°, ángulo de avance 0°, a 75% Vc para promedio bolas rojas (grandes), promedio bolas negras (pequeñas), y comportamiento general total promedio	75
Figura 39 Gráfico Comportamiento Revestimiento 2, ángulo de ataque 70°, ángulo de avance 15°, a 50% Vc para promedio bolas rojas (grandes), promedio bolas negras (pequeñas), y comportamiento general Total promedio	77
Figura 40 Gráfico Comportamiento Revestimiento 2, ángulo de ataque 70°, ángulo de avance 15°, a 75% Vc para promedio bolas rojas (grandes), promedio bolas negras (pequeñas), y comportamiento general Total promedio	78

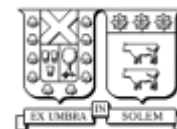


Figura 41 Gráfico Comportamiento Revestimiento 3, ángulo de ataque 50°, ángulo de avance 15°, a 50% Vc para promedio bolas rojas (grandes), promedio bolas negras (pequeñas), y comportamiento general Total promedio.....	80
Figura 42 Gráfico Comportamiento Revestimiento 3, ángulo de ataque 50°, ángulo de avance 15°, a 75% Vc para promedio bolas rojas (grandes), promedio bolas negras (pequeñas), y comportamiento general Total promedio.....	81
Figura 43 Gráfico valor de la partícula y del modelo experimental de bolas negras	94
Figura 44 Gráfico valor de la partícula y del modelo experimental de bolas rojas.....	97
Figura 44 Comportamiento Revestimiento 90/0 a 75% Vc. Experimento 1 (original) y Experimento 2 (duplicado) con tapas.....	111
Figura 45 Comportamiento Revestimiento 70/15 a 50%Vc. Experimento 1 (original) y Experimento 2 (duplicado)	112
Figura 46 Comportamiento Revestimiento 70/15 a 75% Vc. Experimento 1 (original) y Experimento 2 (duplicado)	112
Figura 47 Comportamiento Revestimiento 50/15 a 50% Vc. Experimento 1 (original) y Experimento 2 (duplicado)	113
Figura 48 Comportamiento Revestimiento 50/15 a 75% Vc. Experimento 1 (original) y Experimento 2 (duplicado)	113
Figura 49 Comportamiento Revestimiento 90/0 a 75% Vc. Experimento 1 (original) y Experimento 2 (duplicado)	115
Figura 50 Comportamiento Revestimiento 70/15 a 50%Vc. Experimento 1 (original) y Experimento 2 (duplicado)	116
Figura 51 Comportamiento Revestimiento 70/15 a 75% Vc. Experimento 1 (original) y Experimento 2 (duplicado)	116
Figura 52 Comportamiento Revestimiento 50/15 a 50% Vc. Experimento 1 (original) y Experimento 2 (duplicado)	117
Figura 53 Comportamiento Revestimiento 50/15 a 75% Vc. Experimento 1 (original) y Experimento 2 (duplicado)	117
Figura 54 Experimento número dos (2) con el revestimiento 75/15 girando a un 50 % de la velocidad crítica. De izquierda a derecha y de arriba hacia abajo se observa Sección 1 a Sección 16.....	119
Figura 55 Experimento número dos (2) con el revestimiento 75/15 girando a un 50 % de la velocidad crítica. De izquierda a derecha y de arriba hacia abajo se observa Sección 17 a Sección 33.....	120
Figura 56 Experimento número dos (2) con el revestimiento 75/15 girando a un 50 % de la velocidad crítica. De izquierda a derecha y de arriba hacia abajo se observa Sección 34 a Sección 38.....	121
Figura 57 Experimento número uno (1) con el revestimiento 75/15 girando a un 75 % de la velocidad crítica. De izquierda a derecha y de arriba hacia abajo se observa Sección 1 a Sección 16.....	122

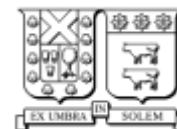
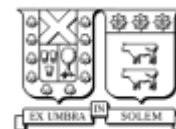


Figura 58 Experimento número uno (1) con el revestimiento 75/15 girando a un 75 % de la velocidad crítica. De izquierda a derecha y de arriba hacia abajo se observa Sección 17 a Sección 33.....	123
Figura 59 Experimento número uno (1) con el revestimiento 75/15 girando a un 75 % de la velocidad crítica. De izquierda a derecha y de arriba hacia abajo se observa Sección 34 a Sección 40.....	124
Figura 60 Experimento número dos (2) con el revestimiento 59/15 girando a un 50 % de la velocidad crítica. De izquierda a derecha y de arriba hacia abajo se observa Sección 1 a Sección 16.....	125
Figura 61 Experimento número dos (2) con el revestimiento 50/15 girando a un 50 % de la velocidad crítica. De izquierda a derecha y de arriba hacia abajo se observa Sección 17 a Sección 33.....	126
Figura 62 Experimento número dos (2) con el revestimiento 50/15 girando a un 50 % de la velocidad crítica. De izquierda a derecha y de arriba hacia abajo se observa Sección 34 a Sección 39.....	127
Figura 63 Experimento número dos (2) con el revestimiento 50/15 girando a un 75 % de la velocidad crítica. De izquierda a derecha y de arriba hacia abajo se observa Sección 1 a Sección 16.....	128
Figura 64 Experimento número dos (2) con el revestimiento 50/15 girando a un 75 % de la velocidad crítica. De izquierda a derecha y de arriba hacia abajo se observa Sección 16 a Sección 31.....	129
Figura 65 Experimento número dos (2) con el revestimiento 50/15 girando a un 75 % de la velocidad crítica. De izquierda a derecha y de arriba hacia abajo se observa Sección 32 a Sección 40.....	130
Figura 66 Gráfico comparativo valor P para Rev 1 50%Vc - Bolas Rojas.....	132
Figura 67 Gráfico comparativo valor P para Rev 1 50%Vc - Bolas Negras.....	133
Figura 68 Gráfico comparativo valor P para Rev 1 75%Vc - Bolas Rojas.....	134
Figura 69 Gráfico comparativo valor P para Rev 1 75%Vc - Bolas Negras.....	135
Figura 70 Gráfico comparativo valor P para Rev 2 50%Vc - Bolas Rojas.....	136
Figura 71 Gráfico comparativo valor P para Rev 2 50%Vc - Bolas Negras.....	137
Figura 72 Gráfico comparativo valor P para Rev 2 75%Vc - Bolas Rojas.....	138
Figura 73 Gráfico comparativo valor P para Rev 2 75%Vc - Bolas Negras.....	139
Figura 74 Gráfico comparativo valor P para Rev 3 50%Vc - Bolas Rojas.....	140
Figura 75 Gráfico comparativo valor P para Rev 3 50%Vc - Bolas Negras.....	141
Figura 76 Gráfico comparativo valor P para Rev 3 50%Vc - Bolas Rojas.....	142
Figura 77 Gráfico comparativo valor P para Rev 3 50%Vc - Bolas Negras.....	143



SIMBOLOGÍA

d	: Diámetro de bolas utilizadas, m
dl	: Diámetro de las partículas grandes, mm
ds	: Diámetro de las partículas pequeñas, mm
D	: Diámetro del molino, m
D_{ave}	: Diámetro medio de partícula de la mezcla, mm
DEM	: Sigla, método de elementos discretos
CFD	: Sigla, dinámica de fluidos computacionales
F	: Volumen de llenado del molino, %
ft	: Unidad de medida, pie
F_{cal}	: Factor Fischer calculado
F_{tab}	: Factor Fischer calculado
in	: Unidad de medida, pulgadas
KW	: Unidad de medida, Kilo watts
m	: Masa de bolas, g
mm	: Unidad de medida, milímetros
MW	: Unidad de medida, Mega watts
t	: Tiempo, min
Tph	: Unidad de medida, toneladas por hora
TWh	: Unidad de medida, Tera watts hora
V_c	: Velocidad crítica del molino, rpm
V	: Volumen útil del molino, cm ³
w	: Velocidad de rotación del molino, rpm
W	: Longitud del molino, m
α	: Índice de confianza para análisis de varianza.
λd	: Relación del tamaño de partícula



CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS



1.1 INTRODUCCIÓN

La molienda corresponde a una operación unitaria de gran importancia para el procesamiento de minerales, en donde el material es reducido de tamaño o triturado con el fin de obtener una granulometría deseada. Esta reducción se genera con diversos equipos que trabajan por impacto, aplastamiento o desgaste, ocurriendo consigo la liberación del mineral valioso que permite y favorece la flotabilidad de las partículas deseadas y determina la recuperación y ley del concentrado final. Si existe mayor reducción de tamaño del mineral, las partículas valiosas estarán más liberadas y por tanto la recuperación del mineral valioso se verá favorecida.

Dentro de la gran variedad de molinos que existen, los que cobran mayor importancia en la actualidad corresponden a los molinos semiautógenos (SAG) y los de bolas. Los primeros pueden alcanzar diámetros superiores a los 40 [ft], lo que implica una capacidad de procesamiento superior a las 3500 [tph] y los de bolas, que se ubican aguas abajo, reciben el producto de los molinos semiautógenos con el objetivo de seguir reduciendo tamaño hasta alcanzar la granulometría que requiere el proceso de flotación.

Si se analiza una planta de procesamiento de minerales, sin duda la etapa de molienda es la que más consumo de energía y de acero posee, convirtiéndose en una operación crítica en la industria minero metalúrgica y en muchos casos el cuello de botella de la operación. Se proyecta que en Chile el consumo de energía eléctrica en la minería del cobre aumentará de 21,9 [TWh] a 39,5 [TWh] desde el 2014 al año 2025 lo que representa un aumento de 80,6% en ese periodo de tiempo [1], siendo según Cochilco, la concentración y LXSXEW los procesos que más energía eléctrica requieren, alcanzando el 51% y 27% del consumo de energía total, respectivamente [2]. Conjuntamente se estima que del 51% mencionado anteriormente, entre un 35% a 45% de ésta es utilizada en molienda SAG [3].

Situaciones como las antes mencionadas, junto al crecimiento paulatino de la demanda del cobre en los países emergentes, la capacidad de producción limitada y las bajas leyes que se presentan en los yacimientos en operación, ponen de manifiesto la necesidad imperante de estudiar los fenómenos que ocurren dentro del molino, el movimiento de la carga y las fuerzas involucradas en la conminución, con el fin de determinar mejoras en los diseños y buscar soluciones que lleven a operar de una manera más eficiente y sostenible.



Las grandes inversiones requeridas en esta etapa hacen que la sustitución de tecnología en una planta existente sea inviable. Por lo tanto, hay que buscar soluciones incrementales a través de modificaciones menores a las actuales instalaciones, colocando siempre el énfasis en la constante identificación de oportunidades de desarrollo y de soluciones innovadoras para aumentar la productividad y seguir siendo competitivos en la definición de negocio minero.

Con miras a la búsqueda de estas oportunidades de mejora en las operaciones actuales, en la presente investigación se realizará un estudio del movimiento de la carga de bolas en el interior de un molino cilíndrico, con el fin de identificar patrones de segregación que se generen de manera natural o inducidos con modificaciones en los diseños de revestimientos instalados en el interior de un molino. El control de la segregación podría aportar mejoras al proceso de molienda. Si se logra una segregación por tamaños de los medios de molienda a lo largo del molino, es posible mejorar la correspondencia entre la distribución de impactos de los medios de molienda y el tamaño de mineral que los recibe a medida que se avanza a lo largo del molino. Así, el mineral grueso a la entrada recibe impactos de mayor energía en promedio, mientras que hacia la descarga hay preponderancia de medios de molienda de tamaños menores, que entregan la energía en forma de un mayor número de impactos de menor energía. De esta manera, se lograría un mejor uso de la energía dentro del molino.

El diseño experimental estará basado en investigaciones anteriores de varios autores en este campo y se buscará aprovechar los efectos de segregación encontrados en molinos cilíndricos que operan a distintas condiciones y estudiar la influencia de los revestimientos sobre el movimiento de la carga de bolas, con el fin de determinar la posibilidad de optar a un proceso más eficiente que los que se conocen hoy en día.



1.2 OBJETIVOS

1.2.1 OBJETIVO GENERAL

Analizar y evaluar los efectos que producen distintos diseños de revestimientos en la segregación axial de la carga en un molino cilíndrico a escala de laboratorio.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

Desarrollar una técnica experimental para evaluar la segregación de la carga de bolas.

Analizar el efecto del ángulo de ataque sobre la segregación de la carga.

Analizar el efecto del ángulo de avance sobre la segregación de la carga.

Analizar el efecto de la velocidad de giro sobre el comportamiento de la carga en forma longitudinal.



CAPÍTULO II

ANTECEDENTES TEÓRICOS Y GENERALES



2 ANTECEDENTES

Los esfuerzos por lograr comprender los fenómenos involucrados en los procesos de molienda, principalmente semiautógena, ha llevado a muchos autores a realizar estudios en diferentes campos. El objetivo principal de estos estudios, es lograr un proceso óptimo que finalmente logre una diferencia en cuanto al consumo energético del proceso de molienda. En este sentido, los campos de mayor investigación involucran, por ejemplo, estudios en la etapa de chancado primario para buscar una granulometría en particular de alimentación a la molienda semiautógena, incluir chancado de pebbles para aquellos tamaños que no pueden ser triturados eficientemente, estudio del nivel de llenado de bolas, nivel de llenado de carga, velocidad de giro del molino, estudio de los diseños de los revestimientos, parrillas, slots de descarga, y finalmente estudios de comportamiento de la carga dentro del molino en cuanto a la segregación por tamaños [4].

El diseño de molinos semiautógenos es similar a los diseños creados para la molienda convencional. Desde su invención, se tomaron los mismos parámetros asumiendo que sus comportamientos eran comparables y con el tiempo, la evolución ha sido principalmente escalar de tamaño, obviando todas las diferencias que actualmente se conocen en cuanto a comportamiento. De acuerdo con lo publicado por Jones [5], el crecimiento de los equipos en diámetro y largo para alcanzar mayores niveles de tratamiento involucra aumentos considerables en la potencia instalada requerida. Desde el primer molino autógeno instalado de 10 pies de diámetro y una potencia instalada de 70 [kW], la evolución creciente por alcanzar altos grados de tratamiento de mineral y sobrellevar dificultades en el procesamiento como la dureza del mineral tratado, ha llevado a la creación de molinos de más de 40 pies de diámetro y con potencias instaladas cercanas a 30 -32 [MW].

La Figura 1 presenta la relación entre diámetro del molino y potencia instalada en [kW], con el fin de mostrar la relación que existe entre estas dos variables. Por otro lado la Figura 2 muestra el largo total del molino en relación al largo efectivo de molienda, obteniéndose una relación casi lineal en más del 95% de los puntos comparados. Esto nos da una idea certera de que la fabricación de los molinos SAG ha estado dominada simplemente por la proporción entre largo y diámetro del molino que arroje los niveles de potencia necesarios para la

reducción de tamaño requerida, sin tomar en consideración otros factores relevantes de diseño que inciden directamente en la tarea de molienda.

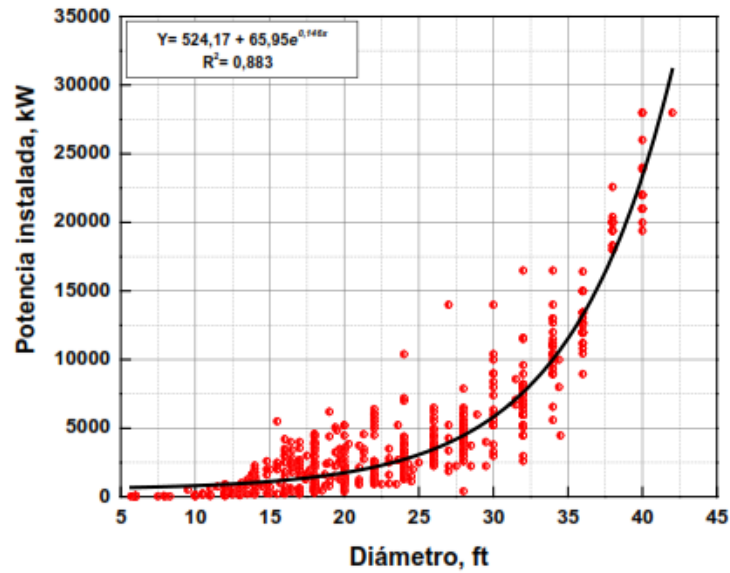


Figura 1 Relación diámetro del molino [ft] con Potencia Instalada [kW] para molinos SAG.

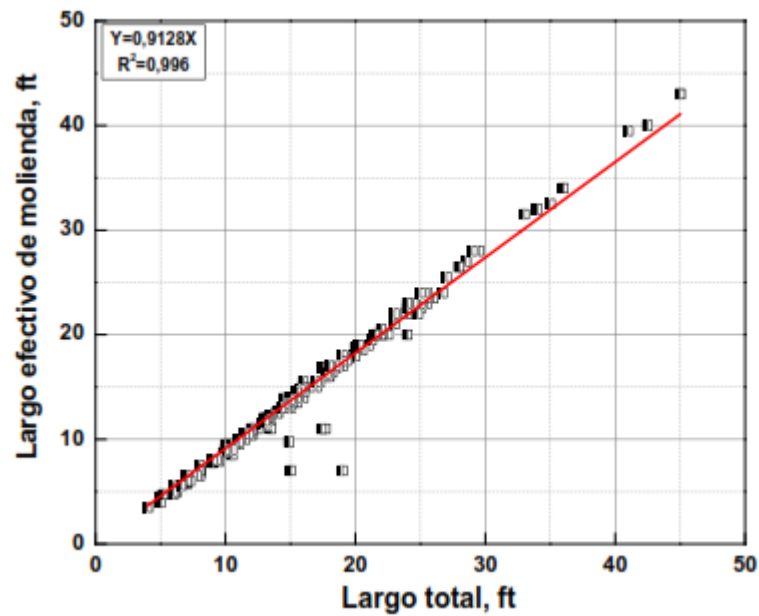


Figura 2 Gráfico largo total [ft] en relación con el largo efectivo de molienda para molinos SAG



Como modo de resolución de los problemas de diseño, se han presentado varios estudios con molinos a escala de laboratorio. Las conclusiones obtenidas de estos estudios pueden ser empleadas en diseños de equipos industriales, ya que se ha demostrado un acercamiento concreto en predecir parámetros como, por ejemplo, el consumo específico de energía [6]. Esta conclusión resulta favorable para estudiar otros parámetros operacionales que influyen directamente sobre el movimiento de la carga en el interior de molinos.

2.1 Mecanismos de molienda

Existen diversos mecanismos de molienda que ocurren en forma simultánea dentro del molino como consecuencia de la rotación del molino sobre su propio eje y de la forma de contacto entre mineral – bola o mineral – mineral que se produce. Estos mecanismos dependen de la forma de agrupamiento o separación de las partículas dentro del molino y de la distribución espacial de los medios de molienda.

Las teorías de fractura y procesos de reducción de tamaño en Molinos SAG vienen desarrollándose desde hace unos años atrás, identificándose ya en 1986, por medio del estudio llevado a cabo por Menacho [7], tres mecanismos de reducción de tamaño que ocurren dentro de un molino.

- Fractura de las partículas mediante impacto o nipping.
- Abrasión producto de rubbing o rozamiento.
- Astillamiento o chipping.

Estos fenómenos de reducción de tamaño se detallan en la Tabla 1. El % de energía consumida que se indica, corresponde al gasto estándar de energía en el respectivo mecanismo dentro de un molino SAG que opera en condiciones normales. [8]

De esta tabla se desprende que el mecanismo de impacto es el que más consumo tiene cuando el molino está en operación, es decir, cuando está girando a un porcentaje de velocidad crítica cercano al 80%. Cabe mencionar que parte de estos impactos no se genera precisamente entre bola y mineral o mineral – mineral, sino que muchos de ellos ocurren entre bola – bola, bola – revestimiento o mineral – revestimiento, razón por la cual no todos los impactos ocasionan reducción del tamaño del mineral. Si se intenta cuantificar la energía consumida en los impactos que llevan realmente a conminución del mineral, se encuentra que la nueva superficie



explica solamente un 1% del consumo, la energía de compresión previa a la fractura aproximadamente un 15%, mientras que el 85% restante se disipa como calor y pérdidas mecánicas, razón por la cual los esfuerzos por disminuir el consumo específico de energía del proceso de concentración se centran en estrategias operativas que incidan sobre los molinos SAG y de Bolas [9].

Tabla 1 Mecanismo de Molienda [8]

Mecanismos de Molienda	Energía Consumida (%)
Impacto	80
Astillamiento	10
Abrasión	1
Atrición – Resquebrajadura	9

2.2 Modelos de movimiento de carga en molienda

Para realizar el estudio del movimiento de la carga dentro del molino, es necesario definir modelos efectivos que permitan simular la ocurrencia de fenómenos. Inicialmente se estudiaba el comportamiento dinámico y cinemático de un elemento “representativo” de la carga, pero poco a poco y con la ayuda de la tecnología se desarrollaron algoritmos matemáticos complejos capaces de describir el comportamiento del colectivo de medios granulares en plena rotación. A partir de esto, se abrió el campo de la modelación numérica que entrega, sin lugar a dudas, datos con mayor exactitud y eficiencia del comportamiento de la carga del molino y que permiten la optimización del proceso y su mejor diseño.

2.2.1 Modelo analítico

El método analítico, desarrollado por Davis en 1919, estudió la dinámica y cinemática de los cuerpos por separado y obtuvo las fuerzas y movimientos de los cuerpos al interaccionar con la carcasa y revestimientos del molino. Este modelo fue pionero en explicar el comportamiento del movimiento de la carga y un enorme avance en cuanto a la medición de ocurrencia de fenómenos, sin embargo, el análisis se vio limitado o dificultado cuando el estudio se pretendía realizar sobre más de una bola, ya que la interacción no solo se genera con la carcasa, sino también entre ellas. Junto a lo anterior, el autor despreció los efectos de la fricción, obteniendo resultados insatisfactorios [10]. No fue sino hasta la segunda mitad de la década de los 90 que M.S. Powell y G. N. Nurick calcularon con buenos resultados las trayectorias que debían seguir los cuerpos moledores en un molino rotatorio, considerando el centro de masa y el cálculo del



torque al cual está sometida la carga al interior del molino, determinando la cantidad de energía disponible para la fractura de las partículas de mineral y por tanto, el consumo de potencia [11].

2.2.2 Modelo Numérico

Otra aproximación es la numérica, siendo más utilizado el método de elementos discretos DEM (Discrete Element Method). Consiste en una técnica basada en partículas, en donde a cada una de ellas se le hace un seguimiento. Este método surgió con el desarrollo de las computadoras y se refiere a un esquema numérico que permite rotaciones finitas y desplazamientos de cuerpos discretos que interactúan con sus vecinos, por medio de leyes de contacto donde se tiene en cuenta tanto la pérdida como el nacimiento de interacciones, modelando por tanto las colisiones y las fronteras [11]. Este método fue desarrollado inicialmente por Cundall y Strack en 1979 [12] para ser aplicado a partículas de materiales granulares bajo condiciones de carga dinámica, pero otros investigadores siguieron su desarrollo teórico, destacándose a los autores Mishra & Rajamani y Cleary quienes utilizaron el modelo de elementos discretos para describir la distribución de la energía de impacto de un molino real a partir del movimiento de la carga observada en un molino a escala de laboratorio, con una reducción significativa de inexactitudes [13]. Hasta hace muy poco el modelado de molinos se realizaba en dos dimensiones, pero en el último tiempo ha sido reemplazado por la simulación de cortes axiales delgados con condiciones de frontera periódicas [14] debido a la necesidad de estudiar el comportamiento a lo largo del molino.

Como consecuencia de las ventajas y desventajas de los distintos modelos descritos, las referencias que se utilizan en esta memoria, están ligadas preferentemente a análisis por medio del modelo numérico DEM, que a pesar de no representar las fases líquidas al interior del modelo obviando los elementos reológicos de la pulpa en el proceso de molienda, da una mejor idea de comportamiento conjunto de todos los factores involucrados en el movimiento de la carga [3].

2.3 Fenómenos de movimiento de la carga

Según un estudio realizado por medio de elementos discretos [15], existen distintos fenómenos de movimiento de la carga que se producen y que pueden coexistir en el interior de un molino. Para el estudio se utilizó un molino a escala de laboratorio estándar y se observó el

comportamiento de la carga para distintos porcentajes de velocidad crítica en la rotación del equipo. Los resultados encontrados por Barrientos & Espejo, se detallan a continuación.

2.3.1 Velocidad de Giro baja (40% V_c)

En la Figura 3 se observa el comportamiento de la carga a velocidad 40% de la velocidad crítica. Aquí existe una zona localizada en el centro del riñón en donde el movimiento de las bolas es escaso y la velocidad de rotación es reducida. Rodeando esta zona, existen otras dos capas, siendo la última la de mayor velocidad debido al derrumbamiento de la capa por encima del riñón. Producto de la velocidad de rotación, la velocidad de caída es mayor que la velocidad de ascenso, observándose que la cantidad de bolas en ascenso es mayor. Este fenómeno se conoce como *movimiento cascada*, y el mecanismo de reducción de tamaño más relevante corresponde al desgaste.

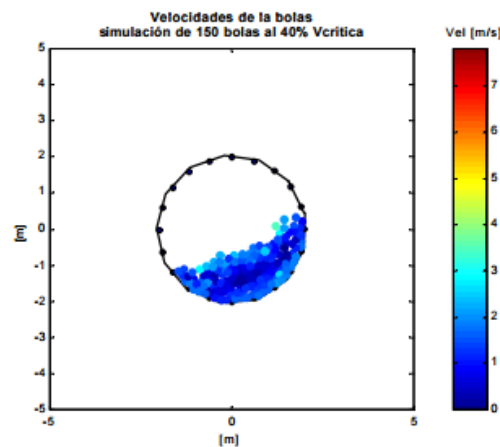


Figura 3 Velocidad de las bolas. Simulación de 150 bolas al 40% de la velocidad crítica. Fenómeno de cascada.

2.3.2 Velocidad de giro alta (80% V_c)

Al operar el molino al 80% de su velocidad crítica, la zona de baja velocidad ubicada cerca del centro del riñón sigue rodeada de las zonas de alta velocidad, pero ahora de mayor magnitud como consecuencia de la velocidad de rotación del molino. En la Figura 4 se observan además bolas que han sido expulsadas desde el centro y que caen en forma parabólica en caída libre. Este fenómeno es conocido como *movimiento en catarata* que produce las más altas magnitudes de fuerzas de impacto, por lo tanto es importante el control de la carga para evitar que las bolas caigan sobre los revestimientos y carcasa del molino. Al aumentar la velocidad

de rotación, la trayectoria de la bola conduce a un punto de choque más alto, aumentando las probabilidades de impacto con los revestimientos. Con esta caída se concentra más energía en el impacto, posibilitando la fractura, agrietamiento o partidura de mineral de mayor tamaño.

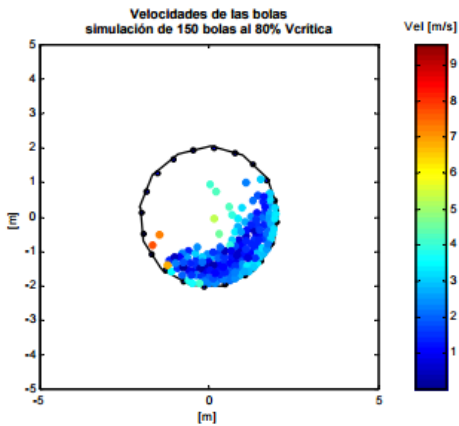


Figura 4 Velocidad de las bolas. Simulación de 150 bolas al 80% de la velocidad crítica. Fenómeno de catarata.

2.3.3 Velocidad de centrifugación de la cara (100% V_c)

Al 100% de la velocidad crítica, la capa de bolas en contacto con la carcasa del molino es centrifugada al alcanzar la velocidad tangencial en ese punto producto de la rotación del molino. Aún existe la zona de baja velocidad, aunque más pequeña. Comparado con los casos anteriores, el ángulo presenta mayor inclinación y existe una combinación entre movimiento catarata y centrifugación. Este tipo de movimiento de carga no es conveniente, ya que el hecho de que las bolas estén pegadas al cilindro, provoca que la cantidad de impactos efectivos sea menor y que el diámetro efectivo del molino se reduzca, alterando los parámetros de operación para las condiciones del molino.

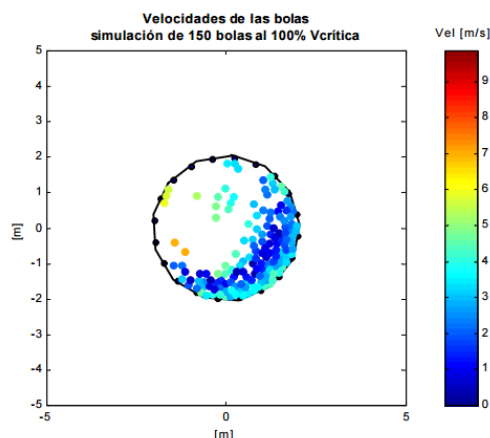


Figura 5 Velocidad de las bolas. Simulación de 150 bolas al 100% de la velocidad crítica. Fenómeno de centrifugación

Junto al estudio de la carga, se puede analizar la trayectoria de las bolas siguiendo el comportamiento de una de estas dentro del molino. Se conoce que las bolas que se encuentran en una capa determinada, se mantienen en esta durante el proceso de molienda. El mismo estudio anterior [15], analizó la trayectoria de dos bolas que se encontraban en diferentes capas de velocidades, una de baja velocidad y una de alta velocidad. El molino se hizo funcionar al 60% de la velocidad crítica, observándose, tal como muestra la Figura 6 que la capa externa al poseer mayor velocidad, produce mayor cantidad de desgaste y pérdida de masa de la bola, mientras que la bola ubicada en la capa interna permanece casi siempre en el mismo lugar, produciéndose menor cantidad de desgaste y disminución de masa. Esto corresponde a un fenómeno desfavorable para el proceso de molienda, ya que no todo el mineral tiene la misma probabilidad de reducir su tamaño.

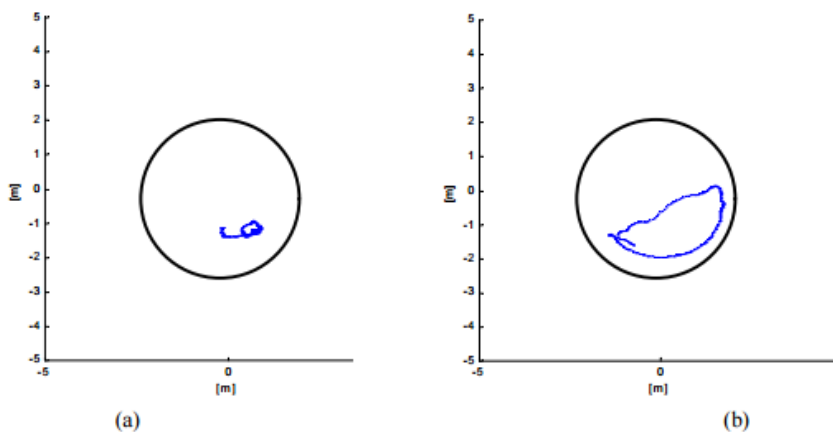
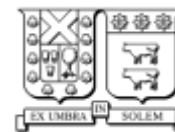


Figura 6 (a) Trayectoria de una bola con velocidad de rotación correspondiente 60% de la velocidad crítica. (a) Bola ubicada en la capa interna de la carga. (b) Bola ubicada en la capa externa de la carga.



Se conocen las siguientes respuestas en cuanto al movimiento de la carga, al variar la velocidad del molino (porcentaje de velocidad crítica alcanzada) y la carga de bolas del mismo, ambas de forma independiente [8]. Esta información es de utilidad para determinar puntos óptimos de operación de molinos rotatorios.

Tabla 2 Acción de una carga normal de bolas a distintos porcentajes de la velocidad crítica [8]

Porcentaje de la Velocidad Crítica	10	20	30	40	50	60	70	80	90
Deslizamiento	3	3	3	2	2	2	1	1	
Cascada			1	1	1	2	3	3	2
Centrifugación					1	1	2	2	3

Tabla 3 Efecto de la variación de la cantidad de carga de bolas.

Carga de Bolas (Porcentaje de volumen del molino)	5 a 15	15 a 25	25 a 35	35 a 45	45 a 50
Deslizamiento	3	3	2	1	1
Cascada		1	2	3	2
Centrifugación			1	2	3

- 1: leve cantidad
- 2: apreciable cantidad
- 3: gran cantidad

El autor habla de centrifugación para referirse a la segregación radial, la cual es creciente a medida que se aumenta la velocidad de giro del molino.

Al ponerse en marcha el molino, existe un gran consumo de energía inicial para poder romper la inercia y provocar el movimiento del sistema. La carga en su conjunto comienza a rotar y el comportamiento que tendrá dependerá, tal como se observa en la

Tabla 2 y

Tabla 3, del porcentaje de velocidad crítica que se esté utilizando en la operación y del porcentaje de llenado de bolas. La carga comienza desplazándose a la parte superior del molino, los componentes son acelerados poco a poco hasta alcanzar una velocidad deseada y luego es mantenida constante.



Considerando que el fenómeno esperado para provocar la reducción de tamaño es principalmente impacto, se asegura según los estudios llevados a cabo, que la velocidad optima de rotación del molino esté entre 70 y 85% y que la carga de bolas del molino debe estar comprendida entre un 25 a un 35% en volumen. Estos parámetros serán posteriormente tomados en consideración para definir condiciones experimentales.

2.4 Fenómeno de segregación

El experimento llevado a cabo por los autores Barrientos & Espejo [15], fue realizado con bolas del mismo tamaño, pero si se replica el estudio con un collar de bolas, se observa predominancia de ciertos tamaños de medios moledores en ciertas capas, atribuyendo este fenómeno a la segregación de los cuerpos en rotación.

La segregación es un proceso cinético de primer orden indicativo de un proceso aleatorio y difusional que juega un papel importante en los procesos de transporte de carga [16], responsable de que ésta adopte diferentes ordenamientos espaciales a diferentes velocidades de rotación, es decir, corresponde a la manera que tiene la carga de moverse y organizarse cuando se encuentra en plena rotación.

Esta hipótesis se corrobora nuevamente con el estudio realizado por Inostroza [17], quien indica que si se observa a nivel de laboratorio el funcionamiento de un molino, se descubre que con el aumento de la velocidad de operación, ocurre una segregación radial creciente de la carga según tamaños, lo que hace poner en cuestionamiento el supuesto de mezcla homogénea, supuesto que asume que todo el mineral tiene la misma probabilidad de molerse. Además indica que a altas velocidades de giro, 80% de la velocidad crítica, los medios de molienda de mayor tamaño tienden a acumularse en la zona central de la carga como se observa en la Figura 7 y que a bajas velocidades, cerca del 25% de la velocidad crítica, los medios de molienda de mayor tamaño tienden a desplazarse hacia la periferia de la carga, como se ilustra en la Figura 8. Con esta distribución, es claro señalar que las partículas de mayor tamaño tardarán más en procesarse debido a la ausencia de impactos de alta energía y que las partículas finas aumentarían en deterioro por la gran disponibilidad de impactos.

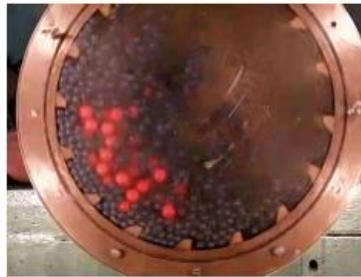


Figura 7 Segregación radial. Velocidad de rotación 80% de la velocidad crítica.



Figura 8 Segregación radial. Velocidad de rotación 25% de la velocidad crítica.

Los autores Hsu & Dietrich [18], señalan que junto a la velocidad de rotación del molino (w), existen otros parámetros que gobiernan la segregación tanto axial como radial. Los principales parámetros que controlan estos tipos de segregaciones en tambores giratorios incluyen: a) la escala geométrica (W/D y D/D_{ave} , siendo W : la longitud del tambor, D : el diámetro del tambor y D_{ave} el diámetro medio de partícula de la mezcla); b) la relación de tamaño de partícula ($\lambda d = dl/ds$, siendo λd : la relación del tamaño de partículas, (dl : el diámetro de las partículas grandes y ds : el diámetro de las partículas pequeñas); c) volumen del llenado (F); d) las propiedades del material y e) la fricción de la pared.

2.4.1 Segregación por transporte de masa

La segregación se produce además como consecuencia del transporte de masa dentro del molino, el cual está gobernado por dos fenómenos fundamentales, correspondiente a transporte axial y radial de la carga, influenciado principalmente por la velocidad de giro, porcentaje de sólidos y nivel de llenado [19].

2.4.1.1 Transporte axial de la carga

El transporte axial de la carga se refiere a la migración de la carga a lo largo del eje del molino y está fuertemente influenciado por la cascada que se genera, ya que luego de la caída, las partículas tienen igual probabilidad de avanzar o retroceder produciendo que el material se separe axialmente [20].

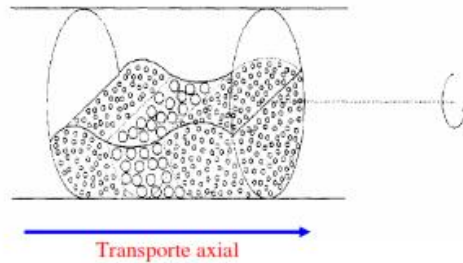


Figura 9 Transporte axial de la carga

2.4.1.2 Transporte radial de la carga

Por otro lado el transporte radial de la carga está gobernado por la catarata y su movimiento se produce en el plano ortogonal al eje del molino. Este tipo de transporte se ve influenciado por la posición espacial de cada uno de los componentes de la carga ya que debido a esto, los elementos estarán sometidos a diferentes velocidades. Otro factor importante es la granulometría y densidad del mineral, por la segregación de las partículas finas y gruesas descritas anteriormente. La segregación radial se produce a menor número de revoluciones que la segregación axial [21].

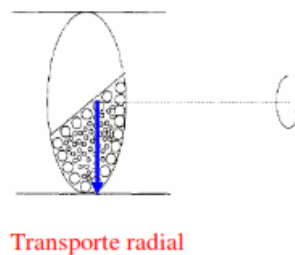


Figura 10 Segregación radial de la carga

El flujo de partículas sólidas dentro de los molinos es modelado típicamente por el método de elementos discretos, los cuales normalmente se hacen por periodos cortos de unas pocas revoluciones. Estas modelaciones facilitan la comprensión del movimiento radial de la carga y



su comportamiento con la camisa del molino, pero no alcanzan a proporcionar información sobre el transporte axial. Para poder realizar esto, se requiere simulación de todo el molino y el volumen total de la carga por periodos de tiempo significativos (en cientos de revoluciones). Por la dificultad de modelamiento, ya que aún el software o herramienta que permita este tipo de modelado requiere de una enorme capacidad de cómputo, es que por medio de esta investigación se pretende alcanzar resultados que den luces del comportamiento axial tan difícil de predecir.

2.4.1.3 Estudio sobre transporte axial de carga en un molino de Bolas

Un experimento de Paul Cleary [14] llevado a cabo por medio de método DEM y simulación en 3D del transporte axial de la carga en un molino de bolas, ofrece una oportunidad para el entendimiento de la dinámica interna y el desarrollo de mejoras en la operación que puede conducir a grandes incrementos en la eficiencia del molino y su rendimiento. En el experimento se utilizó un molino de bolas de 5 [m] de diámetro y 7 [m] de largo con nivel de llenado de 30% y velocidad de giro 75% de la velocidad crítica. La carga consistió en mineral con distribución 25-100 [mm] y bolas que componían el 48,6% en volumen de la carga con distribución entre 75 y 200 [mm]. El número total de partículas en este molino consistió en alrededor de 122.000 que pesaban en conjunto 114 toneladas.

En el experimento, Cleary [14] incluyó paredes planas al extremo del cilindro con el fin de entender el efecto de estas paredes en el flujo de partículas. Los resultados arrojaron que después de un corto tiempo, existe una fuerte segregación axial en las proximidades de las paredes debido a la alta cizalladura que inducen, lo que desemboca en una mayor cantidad de material fino directamente adyacente a las paredes. La Figura 11 muestra la distribución de la masa (curva negra) y la distribución del número de partículas (curva gris) a lo largo del molino, lo que esquematiza lo explicado anteriormente.

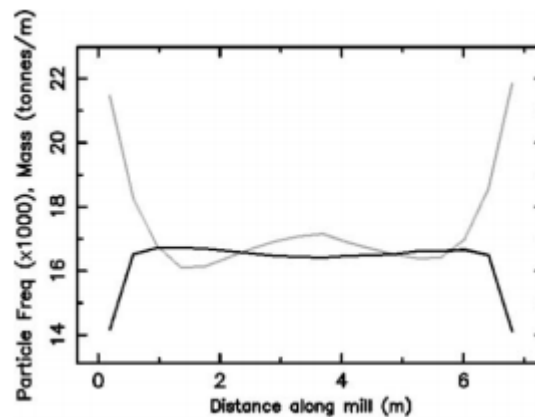


Figura 11 Distribución de la masa [toneladas/m] a lo largo del molino SAG después de 4 min de operación.

La Figura 12 por su parte, indica el tamaño medio de partículas que se encuentran en finas secciones paralelas a las paredes del molino. Se observa que incluso cuando no hay entrada o salida de material desde el molino, existen gradientes de composición en la dirección axial. La masa inferior en las regiones extremas significa que la densidad aparente de la carga es mucho menor, lo que indica que el cizallamiento de pared está induciendo la dilatación significativa de la carga. Esto conduce a que el tamaño medio de partículas cerca de las paredes sea un 15% menor que la mayor parte de la carga.

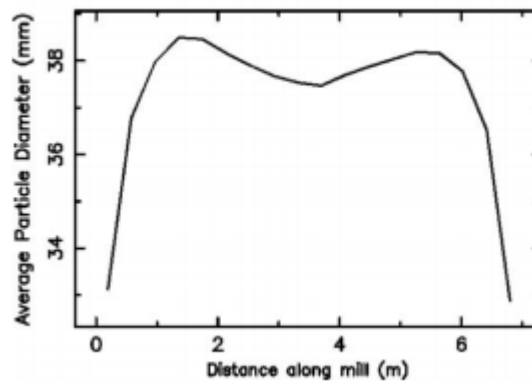


Figura 12 Distribución del tamaño medio de partículas a lo largo del molino SAG después de 4 min de operación

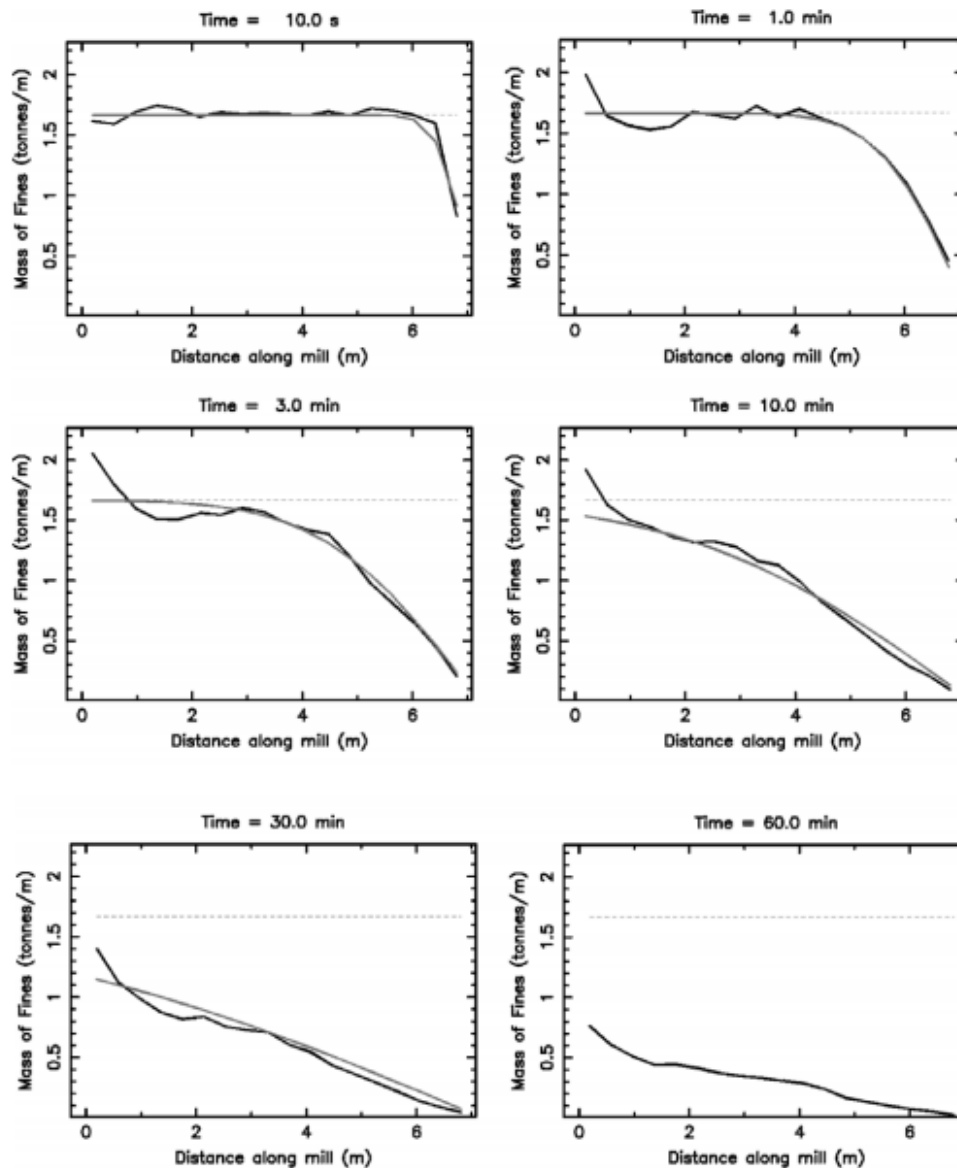
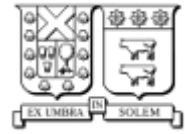


Figura 13 Masa de finos por unidad de longitud a lo largo el molino para un tamaño de parrilla de 60 mm.

El autor, por medio de la misma investigación explica que el cambio de la composición del molino a lo largo de su longitud se puede evaluar mediante el cálculo de la masa de las fracciones gruesas y finas en rebanadas verticales a lo largo del eje del molino. El cambio en la distribución de estas fracciones nos permite seguir el flujo axial de material fino. La **¡Error!** **No se encuentra el origen de la referencia.** muestra la variación en el tiempo de la



distribución de partículas a lo largo del molino que en estas simulaciones cuenta con una parrilla de $G=60$ [mm], un nivel de llenado de 30% y una velocidad del molino de 75% de su velocidad crítica. La línea gris discontinua representa la distribución inicial de partículas, mientras que la línea negra corresponde la distribución de partículas con el método DEM para distintos tiempos.

Observando las líneas negras de la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, que corresponde a los datos experimentales, notamos que a los 10 [s], alrededor de la mitad del material fino más cercano a la descarga ha fluido al extremo del molino y consecuentemente fuera de este. Después de 1 [min] de rotación, las partículas en el extremo de descarga del molino ha caído alrededor de un tercio de su valor original y existe un aumento de la masa de finos en la primera rebanada adyacente. Esta situación continua en el resto de los tiempos estudiados, encontrándose ya a los 30 [min] de funcionamiento, que la fracción de finos en el inicio de la sección se ha reducido en un tercio y hay muy poco material fino a la derecha del molino. Para el caso de ausencia de fluidos, que corresponde a lo estudiado, una conjetura razonable que explicaría lo encontrado sería que este proceso de transporte axial es difusivo de primer orden, concordando con las ecuaciones que el autor encontró con los datos experimentales. La línea gris presente en los gráficos, corresponde a una corrección de los datos que realizó el autor aplicando un coeficiente de escala elegido por medio del método de mínimos cuadrados.

2.5 Influencia de los revestimientos sobre el comportamiento de la carga

El interior de la carcasa cilíndrica de un molino está formada típicamente por una serie de protuberancias espaciadas circunferencialmente que son llamadas barras elevadoras. Estas son comúnmente miembros alargados que se extienden por toda la longitud del molino y tienen dos funciones principales. En primer lugar, mejoran la elevación y el lanzamiento de la carga aumentando la fricción y en segundo lugar, forman parte del recubrimiento de la pared interior del molino para protegerlo del desgaste, dispuesto para ser reemplazado a medida que se desgasta durante un período de tiempo.

El perfil de los levantadores se caracteriza y diseña considerando altura y ángulo de ataque, los cuales se indican en la Figura 14 y varían entre 0 y 90°. Este ángulo es un aspecto crucial del diseño del revestimiento y si se descuida, puede conducir a pérdida de rendimiento del molino. En el libro *Advances in Comminution* [22], se esquematiza cómo varía la trayectoria de la carga

alterando el ángulo de la cara de los elevadores para un molino de 8 [m] de diámetro con un 30% de llenado de carga, funcionando al 75% de la velocidad crítica. La Figura 15 muestra la trayectoria para ángulos progresivamente menores desde 90° a 60°, visualizándose que el punto de impacto es sensible al ángulo de ataque elevando la importancia de este criterio para el diseño del revestimiento.

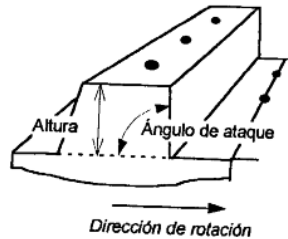


Figura 14 Perfil de los levantadores. Altura y ángulo de ataque.

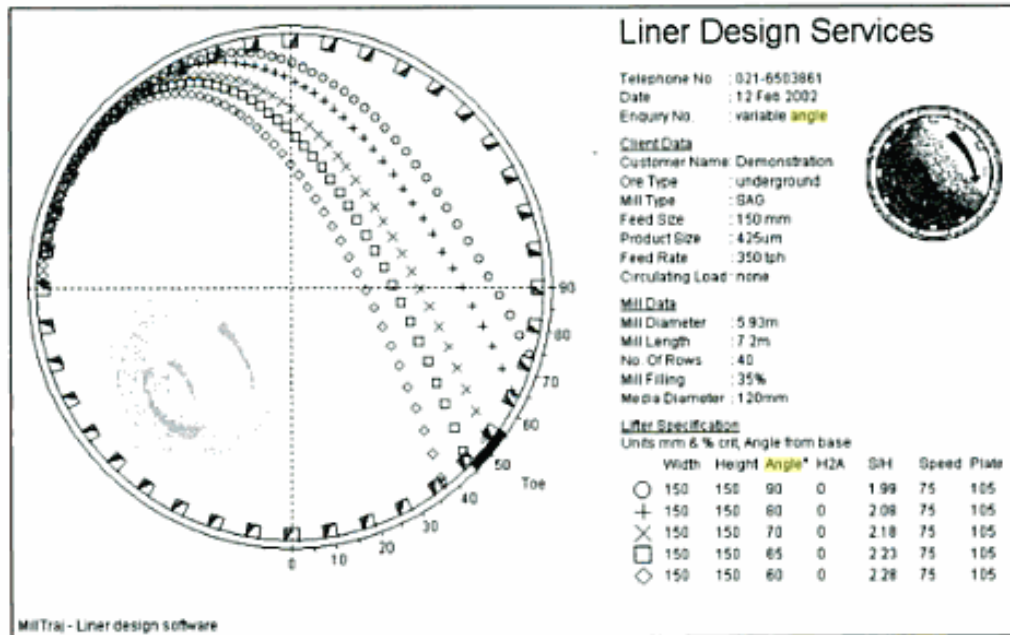
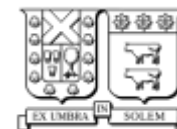


Figura 15 Trayectoria de la carga para distintos ángulos de la cara del revestimiento.



El ángulo formado por la cara frontal del levantador y la superficie base de la pieza son también parámetros claves para controlar el consumo de potencia. Los autores Valderrama y Magne [23] indican que los mayores valores en cuanto a consumo se obtienen utilizando levantadores con ángulos de 45° y velocidades de rotación del molino cercanas al 85% de la velocidad crítica, mientras que los menores consumos se encontraron en levantadores de alto ángulo de ataque y velocidades de giro más bajas.

2.5.1 Efecto de levantadores con ángulo de avance.

En la búsqueda de influenciar el movimiento longitudinal de la carga, el autor Venegas [24] indica que la acción de empuje de los levantadores podría proporcionar ventajas en cuanto a la extracción de la carga al interior del molino. El autor estudia los efectos en el movimiento longitudinal de la carga dentro del molino incorporando al diseño de levantadores convencionales un ángulo en sentido longitudinal, lo que llamó ángulo de avance. El experimento consistió en el diseño de cuatro tipos diferentes de barras levantadoras con la incorporación del ángulo de avance en dos de ellos (comprendido entre 0° y 15°) y un ángulo de ataque (comprendido en el rango $50^\circ - 70^\circ$), resultando en los revestimientos que se detallan en la Tabla 4.

Tabla 4 Ángulo de ataque y ángulo de avance de los distintos modelos de revestimientos

Revestimiento	Ángulo de Ataque	Ángulo de Avance
Modelo 1	70°	0°
Modelo 2	50°	0°
Modelo 3	70°	15°
Modelo 4	50°	15°

La técnica utilizada, consistió en la introducción de un magneto de alta intensidad de forma esférica dentro del molino completamente no magnético y la posterior recopilación de datos sobre el desplazamiento de este elemento por medio de un número de sensores. Como resultado de la investigación, se encontró que el efecto del ángulo de avance es mucho mayor (22,3 veces) que el efecto del ángulo de ataque y que la velocidad promedio de las experiencias con ángulo de avance es mayor a las que no lo posee, por lo tanto, el tiempo de recorrido de una

bola entre la alimentación y la descarga disminuye como consecuencia de un desplazamiento neto mayor, tal como se observa en la Figura 16.

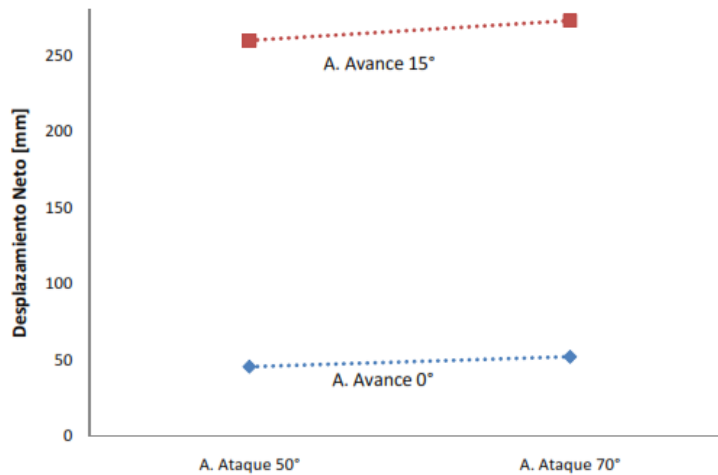


Figura 16 Gráfico de interacción para el desplazamiento neto

Considerando lo anterior, se puede asegurar que es posible alterar el movimiento de la carga mediante la inclusión de este ángulo paralelo al eje, fenómeno que será aprovechado para los fines de este estudio.

2.6 Modelamiento de la carga del molino con fluido en su interior.

En lo particular, la mayor cantidad de investigaciones sobre comportamiento de la carga de molinos bajo rotación sobre su eje consideran estudios sin fluidos en su interior. El modelado acoplando los efectos de las conductas de partículas y la dinámica de fluidos han sido activamente perseguidos, investigados y desarrollados en los últimos años, pero no cabe duda que la física de acoplamiento representa un enorme desafío para los investigadores, ya que requiere de tedioso trabajo de modelamiento, sumando el hecho de que no existe un único modelo válido para todas las aplicaciones. Se debe considerar entonces, que todos estos modelos son un acercamiento al real comportamiento, pero obvian aspectos fundamentales que pueden cambiar el panorama estudiado.

El modelamiento de fluidos es hoy posible con la ayuda de la tecnología llamada Dinámica de Fluidos Computacionales (CFD), capaz de estudiar flujos de una sola fase, turbulencia y flujos multifásicos. La amplia investigación ha llegado al acoplamiento DEM con CFD, donde se trata el fluido de forma continua y las partículas como entidades discretas [25].

Una de las aplicaciones de estos modelos acoplados es precisamente para el estudio de molinos SAG. Una investigación llevada a cabo por Donghong Gao y Jin Sun, [25] estudia un molino SAG de 10 [m] de diámetro, longitud efectiva de 4 [m], con 31,7% de carga total, 15,4% de llenado de bolas, 70% de masa sólida y velocidad de giro de 10,1 RPM. Se asume que el 25% de las partículas finas sólidas están totalmente mezcladas con el agua, resultando en una densidad de 1380 [kg/m³] y viscosidad dinámica de 5,0e-3 [kg/ms].



Figura 17 Vista de la sección central del molino con método acoplado DEM -CFD

La Figura 17 muestra las partículas luego de 5,68 [s] luego de que el molino empieza a girar desde la configuración inicial. El color azul claro representa las partículas de fluido, mientras que las rojas o marrón corresponden al mineral y el color negro a bolas de acero. Se debe tener en cuenta en tanto, que 5,68 [s] de tiempo físico representa menos de una revolución y que el tiempo de simulación correspondió a 20 días utilizando 16 procesos en simultáneo, lo que deja de manifiesto las limitaciones que existen en el modelado.



2.7 Hipótesis de Trabajo

En la actualidad, las limitaciones tecnológicas que existen para estudiar el panorama real del comportamiento de la carga en cuanto a segregación al interior de molinos son preponderantes. Los avances tecnológicos han permitido estudios más acabados en este campo, pero no han logrado resolver el problema de fondo, que corresponde a determinar las mejores condiciones para llevar a cabo una molienda eficiente y con menor consumo de energía.

Numerosas han sido las propuestas en cuanto a diseño de molinos y sus componentes, estudio y modificación de parámetros operacionales ya sea del molino en sí o de procesos auxiliares, pero las conclusiones siguen indicando que algo más se requiere. Además, aun no existe una herramienta a escala de laboratorio que permita conocer cuáles serán las condiciones óptimas que faciliten la tarea de diseño de perfiles de revetimiento. Las únicas alternativas a la fecha, son la realización de ensayos piloto y simulaciones empleando métodos DEM y CFD con tal de predecir cuál será el comportamiento del molino en funcionamiento y en períodos acotados de tiempo.

La medición experimental de la segregación de la carga al interior del molino de forma axial puede arrojar luz adicional sobre este problema. Si se logran identificar las condiciones que permitan observar una distribución coherente en tamaño de los medios moledores como del mineral, en donde los de mayor tamaño coincidan entre sí provocando una molienda más efectiva, se logrará un gran avance.

Pensando que en la industria las oportunidades de mejora deben incluir modificaciones menores en los diseños por los altos costos que ellos implican, evaluar el comportamiento que se tiene variando por ejemplo, el diseño de los revestimientos o la velocidad de giro del molino, resulta una idea factible.

En este estudio, por tanto, se pretende dar respuesta a los efectos que producen estas dos variables en el comportamiento interno de la carga, realizando simulaciones con un molino a escala de laboratorio y en condiciones estándares que permitan realizar comparaciones bajo un



caso base, teniendo como suposición que sí se puede modificar el comportamiento interno de la carga incluyendo revestimientos adecuados.

Se plantea la primera hipótesis, en la cual se espera que la segregación longitudinal de la carga se vea incrementada al incorporar un ángulo de avance al perfil de un levantador de un molino cilíndrico, el que generará acción de empuje sobre los elementos presentes en la periferia de la carga y segregación medible de la misma.

La segunda hipótesis se refiere a que los patrones de segregación radial conocidos ampliamente no se verán afectados por el ángulo de avance no nulo y podrán ser observados en los experimentos.

Específicamente, se podrá:

- a) Observar cuerpos de mayor tamaño en la periferia del molino a velocidades de rotación menores a 50% V_c
- b) Observar cuerpos de menor tamaño en la periferia del molino a velocidades de rotación superiores a 70% V_c



CAPÍTULO III

IMPLEMENTACIÓN EN LABORATORIO



3.1 General

El análisis y estudio de los fenómenos involucrados en la segregación de partículas en el interior de molinos requiere un sistema adecuado que permita medir la cantidad y posición de éstas, es decir su distribución tanto axial como radial. Se requiere para esto, contar con un equipo totalmente desmontable y desarmable que cuente con piezas intercambiables y que permita evaluar distintos diseños de revestimientos en un solo equipo. A pesar de que las experiencias que se llevarán a cabo son en batch, el equipo o molino puede contar con tapas que permitan la alimentación y descarga de mineral y agua para realizar pruebas de forma continua con miras a un futuro estudio si los resultados preliminares batch resultan alentadores.

La importancia de contar con el molino desmontable, es que permite retirar las tapas y observar la distribución de partículas de forma longitudinal aislando de forma seccional poco a poco la carga contenida en su interior. En este mismo sentido, se requiere de algún elemento que fije las partículas en la posición final alcanzada una vez que el molino es detenido en crush stop. Esto último se requiere para la manipulación del molino de forma segura, sin modificar la distribución de las partículas y evitar el derrumbe de las mismas al retirar las tapas y las láminas longitudinalmente. Este procedimiento sencillo permitirá la caracterización de la carga obtenida en cada ensayo, lo cual resulta muy difícil en molinos de gran tamaño a escala industrial o con métodos de modelamiento computacional, tal como ha sido recalcado en numerosas oportunidades durante este estudio.

Tanto el diámetro del molino como el diámetro de las partículas escogidas deben ser suficientes para otorgar espacio satisfactorio y permitir la segregación de las partículas, así como ser de un tamaño manejable y con un volumen de carga menor que conlleve un gasto económico bajo. Por lo tanto, se buscará con el dimensionamiento del equipo, trabajar a una escala que permita analizar de forma visual los diferentes experimentos y que permita la caracterización total del sistema y lograr a tiempo relativamente corto los resultados requeridos, favoreciendo al mismo tiempo la flexibilidad del sistema para la evaluación de más de un diseño.

3.2 Diseño del Molino

Tomando en consideración los requerimientos para el desarrollo del experimento y las limitaciones económicas para llevar a cabo el estudio, se utilizó el mismo molino que diseñó y confeccionó Venegas en su estudio titulado “Efecto del Perfil de Revestimiento en el Movimiento Longitudinal de Carga en un Molino Rotatorio” [24].

Este fue construido de material de PVC, de 414 [mm] de largo, diámetro externo de 160 [mm] y diámetro interno de 154 [mm], lo que resulta en espesor del material correspondiente a 6 [mm]. Las tapas cuentan con un diámetro exterior de 180 [mm]. Considerando el ensamblaje del molino en las tapas, se considera un largo efectivo de solamente 397 [mm]. Esto nos indica, que la relación L/D para este molino es igual a 2.6, lo cual resulta favorable para el estudio del comportamiento axial de la carga. Cada tapa cuenta con seis perforaciones, las que son atravesadas con varillas roscadas de bronce y fijadas con golillas y tuercas de este mismo material. La Figura 18 muestra el ensamblaje 3D realizada en Inventor para visualizar cómo se realiza el ensamblaje de las piezas, y la Figura 19 muestra una fotografía de la construcción finalizada y en operación.

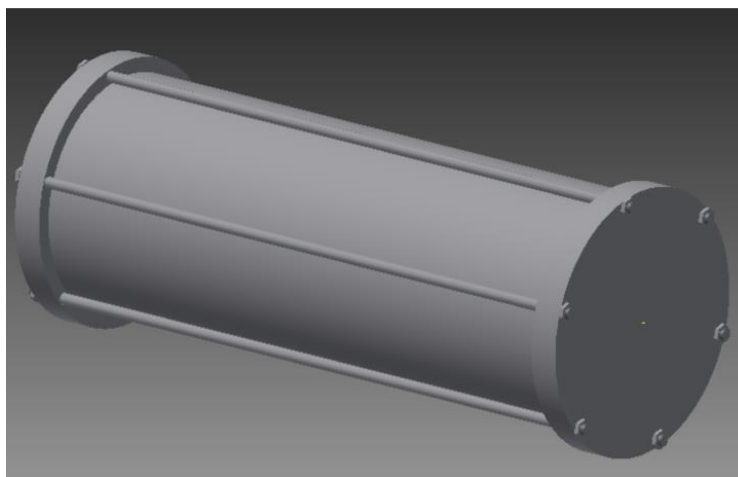


Figura 18 Ensamblaje molino escala piloto 3D Inventor Autodesk



Figura 19 Molino construido y en operación

El cilindro fue provisto de 8 levantadores en su interior. Estos levantadores fueron diseñados y fabricados en tecnyl por medio de una fresadora computarizada.

Para este estudio, se utilizarán tres tipos diferentes de revestimientos. El primero con ángulo de ataque 90° y ángulo de avance 0° . El segundo con ángulo de ataque 70° y ángulo de avance 15° y el tercero con ángulo de ataque 50° y ángulo de avance 15° . Los planos se encuentran en Anexo A y son de la autoría de Venegas [24]. La Figura 20 muestra los revestimientos para que el lector tenga una referencia básica de los diseños utilizados. Más detalles sobre el diseño consultar el trabajo del autor [24].

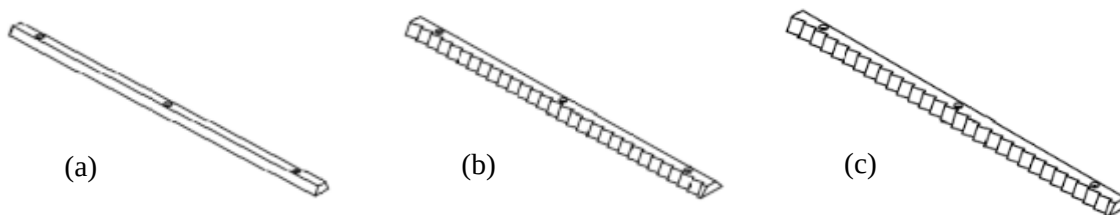


**Figura 20 Revestimientos utilizados. a) Ángulo de ataque 90° , Ángulo de avance 0°
b) Ángulo de ataque 70° , Ángulo de avance 15° c) Ángulo de ataque 50° , Ángulo de avance 15°**

El accionamiento del molino corresponde a un sistema rotatorio compuesto de dos (2) rodillos (Figura 21), los cuales son controlados por medio de un regulador de velocidad externo (Figura 22), el que es ajustado manualmente para variar la velocidad de rotación del molino. La verificación de la velocidad del molino se realizó con un tacómetro manual, equipo que puede ser visualizado en la Figura 23.



Figura 21 Molino montado sobre rodillos giratorios.



Figura 22 Regulador externo de velocidad de rotación de los rodillos



Figura 23 Tacómetro utilizado para verificar la velocidad de rotación del molino en RPM

3.3 Preparación de la carga



Para la realización de los experimentos, se consideraron dos (2) cargas diferentes de bolas.

La primera carga correspondió a bolas de plástico de tres (3) diámetros diferentes, con un agujero diametral (se usan en bisutería). Sus especificaciones se detallan en la Tabla 5.

Tabla 5 Especificaciones de la carga número uno de bolas

Bola	Color	Diámetro [mm]	Volumen teórico [ml]	Volumen Experimental [ml]	Densidad Aparente [g/ml]
1	Verde	18	3,05	3,33	1,06
2	Negro	12	0,90	1,40	0,70
3	Rojo	6	0,11	0,12	0,83

El volumen teórico corresponde a la aplicación de la ecuación de una esfera perfecta, siendo r el radio de la esfera, medido con pie de metro.

Ecuación 1 Volúmen de una esfera

$$\frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r^3$$

El volumen experimental corresponde a la variación de volumen de una probeta con agua al introducir varias unidades de esferas. Es importante mencionar, que las esferas no son 100% sólidas, ya que poseen un orificio que las atraviesa perpendicularmente y además no en todos los casos poseen esfericidad perfecta, por lo que este valor es el considerado para el resto de los cálculos.

La densidad aparente por su parte corresponde a una magnitud escalar referida a la cantidad de masa contenida en un determinado volumen, la que fue calculada con una balanza para determinar masa y una probeta con agua utilizando el procedimiento explicado anteriormente.

El volumen de llenado del molino corresponde a 25% del volumen efectivo del molino, correspondiente a 1800,1 [cm³], siendo la composición de la carga tal como sigue:



Tabla 6 Especificación de la composición de la carga número uno en numero de bolas y volúmen

Bola	Color	Número	% Volumen	Volumen [cm ³]
1	Verde	162	30	540,30
2	Negro	514	40	720,40
3	Rojo	4502	30	540,30
			Volumen Total [cm ³]	1800,1

Los porcentajes utilizados en la carga uno (1) se determinaron considerando igual volumen de bolas para los tamaños extremos y el porcentaje restante para el tamaño intermedio, resultando en un número de partículas desigual.

Esta carga fue utilizada finalmente para hacer pruebas preliminares del funcionamiento del molino, afinar detalles en cuanto al tiempo de realización de las pruebas, formas de carguío y metodología de trabajo. El trabajo con estos tamaños fue descartado debido a que la relación de diámetro entre bolas y molino no tenía relación alguna con la realidad.

La carga número dos se determinó considerando las características de collares de bolas que se generan al interior de un molinos SAG industrial, la relación entre diámetro de molino/ diámetro de bola y la facilidad de manipulación de éstas para el análisis cuantitativo.

Teóricamente, la distribución de tamaño de bolas dentro de un molino varía dependiendo del tamaño de la parrilla de descarga, pero el comportamiento, según los datos que se presentan en la Tabla 7 obtenida de mediciones al molino SAG de 34 [ft] de la Planta “El Soldado” [26] de ANGLOAMERICAN para tamaño de slot de 7,5 [cm], demuestra que la distribución de las bolas es una relación en cuanto a número de bolas y no al volumen de las mismas. Esta relación se esquematiza en la Figura 24 que muestra el número de bolas que se encuentran en el interior del molino para cada tamaño de bolas y la Figura 25 que muestra el volumen de bolas encontrado para cada tamaño en relación al volumen total de la carga contenida.

Tabla 7 Número y masa de bolas para diferentes tamaños de bolas. Slot Parrilla 7,5 [cm]/ 3 [in]

Slot Parrilla 7,5 [cm] / 3 [in]					
RI	RS	Tamaño	Masa de bolas	Número de bolas	% Parcial
2,5	3,0	2,8	1.905,8	13.600	0,9
3	3,5	3,3	23.304,3	10.079	10,6
3,5	4,0	3,8	44.292,6	12.470	20,1
4	4,5	4,3	51.913,0	10.040	23,5
4,5	5,2	4,9	99.241,1	12.915	44,9

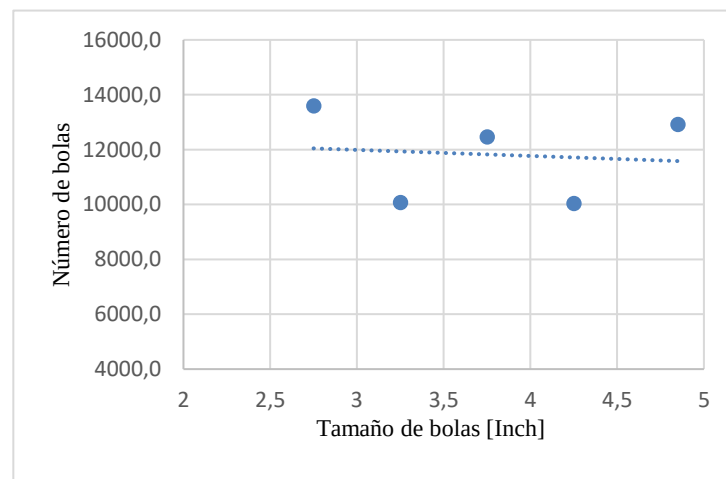


Figura 24 Gráfico distribución por número de bolas para diferentes tamaños para slot parrilla 7,5 [cm]

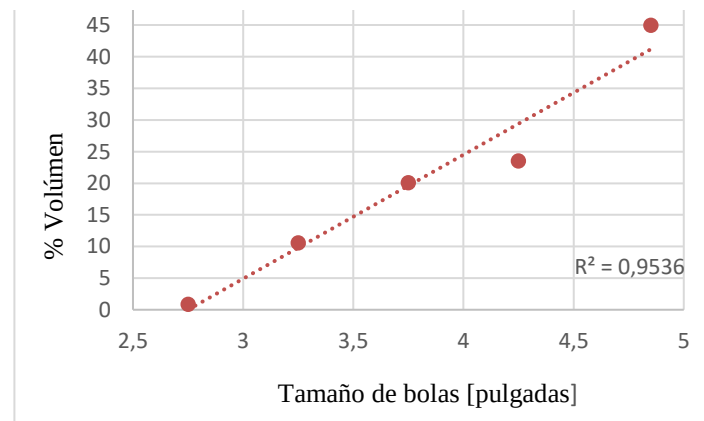


Figura 25 Gráfico distribución de bolas por porcentaje en volumen para diferentes tamaños para slot parrilla 7,5 [cm]



Si se analiza detalladamente la Figura 24, es posible determinar que la alimentación de bolas se realiza intentando mantener una distribución en cuanto a número de bolas y no al volumen que ocupan dentro del molino para los distintos tamaños. Si inicialmente se alimentan un cierto número de bolas de tamaño 5 [in], en un tiempo determinado éstas se transformarán en bolas de diámetros menores debido a los procesos de desgaste naturales que ocurren, fenómeno que continuará de forma sucesiva hasta obtener todo tipo de tamaños. Finalmente las bolas serán desechadas por el sistema cuando alcancen el tamaño del slot de la parrilla de descarga. Si se considera una tasa de desgaste diario que influye de manera relativamente equitativa en las bolas, se obtiene finalmente una distribución de bolas que es aproximadamente lineal.

Si se analiza de igual forma la Figura 25, se observa que estos tamaños representan porcentajes en volumen en relación al volumen total ocupado por las bolas muy desiguales entre ellas. Para el diámetro menor que corresponde al rango comprendido entre 2,5 [in] y 3 [in] se observa que su volumen total ocupa menos de 1% del volumen total de bolas aunque el número de estas es similar o mayor al número de bolas de otros tamaños analizados y que las bolas de mayor tamaño, comprendidas entre 4,5 [in] y 5,2 [in] ocupan casi un 45% del volumen total. Esta relación puede ser aproximada a una recta lineal, con coeficiente R^2 de 0,954, indicador que asegura que la relación se puede modelar de esa manera.

Otro parámetro a considerar es la relación entre el diámetro del molino y el diámetro de la bola. En este caso el diámetro de la bola mayor, que corresponde a 5 [in], representa un 1,23% del diámetro total del molino (34 [ft]). Para este caso de estudio, el diámetro del molino es de 154 [mm], por lo tanto, para mantener la escala, la bola de mayor tamaño debe ser de diámetro cercano a 2 [mm].

Con esta información, se decidió eliminar el tamaño de bolas de 14 [mm] y 18 [mm] por lo excesivo en tamaño, resultando en la carga número dos que se muestra en la Tabla 8, manteniendo el 25% de llenado en relación al volumen total del molino. Aunque el análisis realizado indica que la bola de mayor tamaño debe ser de 2 [mm], diámetros menores a este son difíciles de manipular, razón por la cual se decide mantener el diámetro de bola correspondiente a 6 [mm] y además se determina la utilización de solamente dos tamaños de bolas para la realización del estudio.

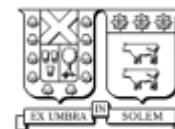


Tabla 8 Especificaciones de la carga número dos de bolas

Bola	Color	Diámetro [mm]	Volumen teórico [ml]	Volumen Experimental [ml]	Densidad Aparente [g/ml]
1	Rojo	6	0,11	0,12	0,83
2	Negro	2	0,0042	0,06	0,83

Con un total superior a 10.000 bolas por tamaño, se consigue una distribución en volumen correspondiente a 67% para bolas rojas de 6 [mm] y 33% para las bolas negras de 2 [mm]. Es importante destacar que no todas las bolas negras son del mismo tamaño, lo que corresponde a una muestra no homogénea, determinándose 2 [mm] como diámetro promedio. De todas formas, el parámetro que influye para la determinación del peso a utilizar es la densidad aparente de la muestra utilizada, la que se detalla en la Tabla 8.

Tabla 9 Especificación de la composición de la carga número uno en numero de bolas y volumen

Bola	Color	Número	% Volumen	Volumen	Masa [g]
1	Rojo	10.200	67%	1.224	1.020
2	Negro	10.200	33%	612	510
			Volumen Total [ml]	1836,1	

3.4 Determinación del medio acuoso.

Como ha sido mencionado, se requiere de un método que permita “congelar” el estado final de las bolas cuando el molino en operación es detenido en crush stop con tal de determinar la segregación longitudinal de la carga. Para esto, se decide utilizar gelatina sin sabor como medio acuoso, la cual es agregada al inicio de cada experimento y que una vez finalizado, debe permanecer en una posición fija hasta su endurecimiento.

Al colocar la gelatina en contacto con un líquido, esta lo absorbe y aumenta su volumen. Dentro de las propiedades importantes de las soluciones de gelatina influyen el pH, la concentración, el origen y el procedimiento de fabricación. El gel que se forma al enfriarse es un sistema



translucido que contiene las propiedades de un sólido, esto es, conserva la forma y resiste a la deformación.

La razón en la preparación de la gelatina correspondió a 100 [g] de gelatina en polvo por litro de agua y la naturaleza de la gelatina es la misma para todos los casos. Se utiliza un nivel de llenado del molino no mayor al nivel de bolas, con tal de que ésta ocupe solo los intersticios del molino y se eliminen efectos secundarios provocados, por ejemplo, por flotabilidad de las partículas en el líquido.

3.5 Procedimiento experimental

El desarrollo de este trabajo y los procedimientos experimentales que se indican, se determinaron con las mejores respuestas obtenidas en ensayos previos realizados con la carga de bola número uno y que evaluaban diferentes aspectos. Estos no son incluidos como resultados finales, sino que son utilizados de forma interna para determinar las mejores condiciones de estudio. Dentro de las conclusiones que se obtuvieron correspondió a utilizar tiempos de rotación bajos para evitar que la gelatina comenzara a endurecer o cambiara de formas importante su densidad, lo que puede influir importantemente en la forma en que se mueven las partículas en el medio. Se determinó un tiempo suficiente para que alcanzara un estado estacionario en cuanto a la segregación axial, y que no se perdiera la característica líquida de la gelatina en su estado inicial.

3.5.1 Forma de carguío del molino y condiciones operacionales

Para estandarizar los ensayos, se determina una forma de llenado del molino que será utilizada en todos los casos. Se divide la masa de bolas rojas y negras en dos partes iguales y se agregan de forma ordenada tal como se esquematiza en la Figura 26. De este modo se asegura que el estado inicial de las bolas es el mismo en todos los experimentos, reduciendo con ello la aleatoriedad de las partículas en el estado inicial y atribuyendo los resultados netamente al efecto que provocan los revestimientos sobre la segregación de la carga. Este proceso involucra masar la muestra inicial e introducirla por la parte superior una vez que todas las partes del molino son montadas. Paso seguido, se introduce la cantidad de gelatina establecida y el molino finalmente es rotado horizontalmente para ser montado sobre los rodillos. Luego de estas operaciones, se está en condiciones para iniciar las pruebas.

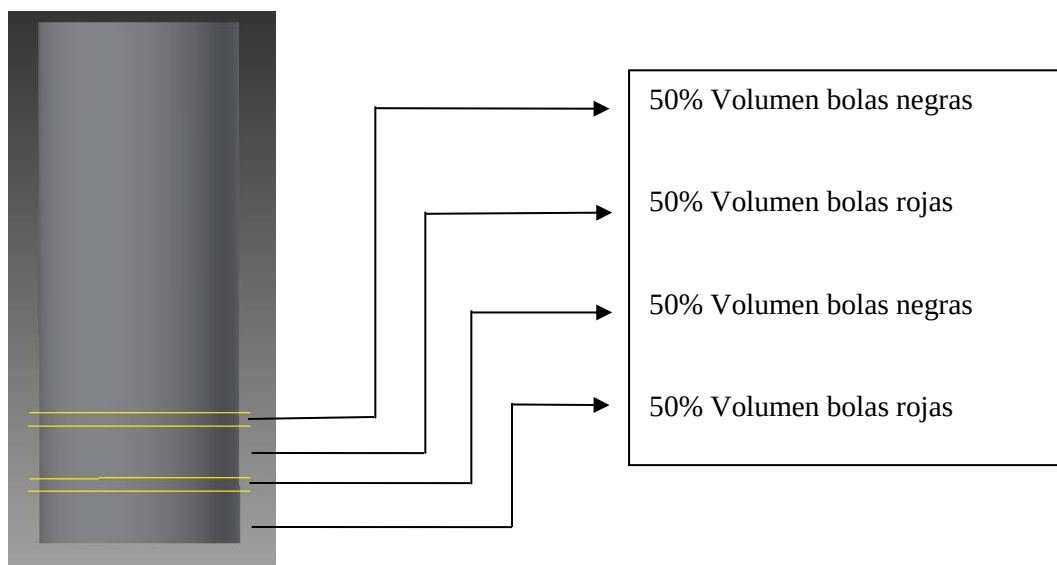


Figura 26 Método de carguío del molino.

3.5.2 Velocidad de giro

En los antecedentes se mostró la importancia de la velocidad de giro en la forma de segregación. Una vez introducida al molino la carga de bolas, se calcula la velocidad a la cual debe girar este en relación al cálculo de la velocidad crítica, según la siguiente fórmula:

$$V_c = \frac{42,2}{\sqrt{(D - d)}}$$

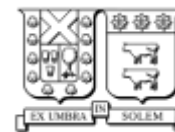
Donde:

V_c : Velocidad crítica del molino, rpm

D : Diámetro del molino

d : Diámetro de bolas utilizadas.

Siguiendo la fórmula, mientras mayor es el diámetro de las bolas utilizadas, mayor es la influencia de estas en el cálculo. Para los diámetros de bolas utilizados, la variación de la velocidad crítica considerando el diámetro de 6 [mm] es solamente del 2,2% por lo tanto, este parámetro no es determinante para el cálculo de la velocidad crítica, razón por la cual no se considera para el cálculo final. La velocidad crítica aplicando la fórmula corresponde a 107,5 RPM. Se determinan dos velocidades de giro, correspondientes a 75% y 50% de la velocidad



crítica, lo que representa 80 RPM y 55 RPM respectivamente. Para el caso base correspondiente al revestimiento con 90° en ángulo de ataque y 0° en el ángulo de avance, se realiza una prueba experimental a 75% de la velocidad crítica. Para los dos revestimientos restantes se utilizan las dos velocidades de rotación. Todos los experimentos se realizan en duplicado, resultando en un total del 10 pruebas.

Tabla 10 Resumen Pruebas Experimentales a realizar

N° Revestimiento	Velocidad Rotación	Número de pruebas
1 (Caso base)	75% V _c	Duplicado (2)
2	50% V _c	Duplicado (2)
2	75% V _c	Duplicado (2)
3	50% V _c	Duplicado (2)
3	75% V _c	Duplicado (2)
	N° Total Pruebas	10

3.5.3 Realización del ensayo

Una vez que el molino es cargado con bolas, llenado con la solución acuosa de gelatina y montado sobre los rodillos, se inicia el giro del molino según las velocidades determinadas en el punto 3.5.2. La medición de la velocidad se realiza por medio de un tacómetro al inicio del experimento y en la mitad de este, con tal de verificar que se está cumpliendo con la velocidad establecida. Luego de transcurrido el tiempo determinado para la realización de la prueba, el molino se detiene en crush stop y se deja reposar durante un intervalo de 15-18 [hr] para obtener la gelatina sólida.

Una vez que la gelatina solidifica, se desmontan las tapas del molino y se separa la carga de forma longitudinal cada 1 [cm] tal como se esquematiza en la Figura 27, resultando en 40 secciones, las que son fotografiadas y almacenadas en bolsas individuales. De forma sucesiva, las bolas son lavadas con agua caliente de forma tal de eliminar la gelatina que las une y luego son separadas manualmente por color para finalmente ser masadas por medio de una balanza. Este procedimiento nos permitirá realizar el estudio a lo largo del eje axial del molino,

conociendo la distribución de partículas que se genera con los distintos revestimientos y a diferentes velocidades de giro.

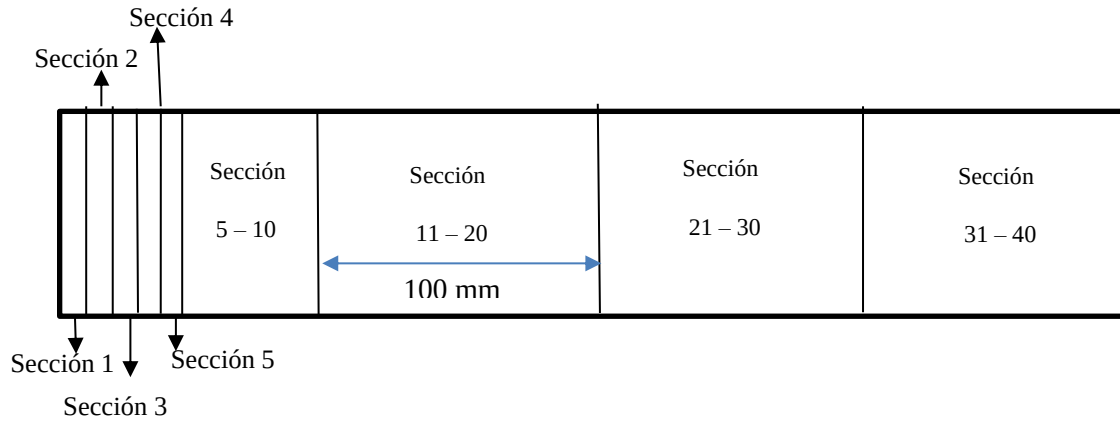


Figura 28 Representación grafica de las secciones del molino

3.5.4 Procedimiento de Análisis Experimental

3.5.4.1 Análisis de Datos Tridimensional

Este análisis se realiza con los datos de masa de bolas rojas (mayor tamaño) y negras (menor tamaño) obtenidas en cada una de las 40 secciones del molino. Debido a que el proceso de extracción de material se realiza de forma manual, la probabilidad de errores experimentales es alta. Para minimizar el error, se realiza un tratamiento de la información experimental con tal de suavizar los datos y tener resultados más satisfactorios. El método escogido es media móvil simple con $n=3$, donde cada punto es el promedio de tres datos originales, los que son presentados en un gráfico de dispersión para identificar si existe alguna distribución de partículas a lo largo del molino que pueda ser medida.

Es necesario también para el análisis, evaluar la repetitividad de los ensayos y determinar cuando estamos frente a una variación real y cuando el desajuste esta asociados a errores del método escogido. Para identificar este punto, todos los ensayos se realizaron en duplicado bajo las mismas condiciones. A partir de los valores obtenidos se puede determinar el error relativo y con esto la reproducibilidad de los datos que se pueden obtener bajo los procedimientos establecidos.



CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y CONCLUSIONES



En esta sección se presenta la evaluación de las variables introducidas en el diseño de los revestimientos para el estudio de segregación de la carga en un molino a escala laboratorio. Esta se lleva a cabo con el objetivo de identificar y analizar la influencia que tienen los revestimientos sobre el movimiento axial y finalmente establecer la veracidad de la hipótesis planteada.

Las pruebas realizadas para comprender la segregación longitudinal en el cilindro giratorio horizontal se iniciaron con una serie de estudios experimentales que considera un tipo de mezcla correspondiente a esferas de plástico de dos tamaños diferentes. Uno de los problemas que se observó en la ejecución de las pruebas, consistió en que algunas bolas quedaban adheridas a las paredes del molino y ciertas bolas también quedaban atrapadas entre los dientes de los revestimientos identificados como número dos (2) y tres (3) debido a la consistencia de la gelatina, situación que dificultaba la separación de las secciones transversales. El efecto de frotamiento de las partículas en este caso no genera estática debido a que existe solución acuosa que las baña, situación ventajosa que evita la atracción de partículas con cargas opuestas. Por otro lado, debido al nivel de la solución acuosa, se eliminan los grandes movimientos de suspensión que puedan tener las partículas, evitando la influencia de este fenómeno en el transporte de la carga sobre el estado final analizado.

Se observó la distribución de las partículas a lo largo del eje del molino con un estado inicial en donde se identifica un gradiente de partículas con mayor número en el extremo de alimentación y un menor número en el extremo de descarga, gradiente que se genera al voltear el molino de forma horizontal sobre la unidad motriz. Si bien el molino opera en estado batch, se considera descarga al extremo en donde se espera que las partículas avancen producto del ángulo incorporado a los revestimientos estudiados y alimentación al extremo opuesto. Se utilizará esta convención en los análisis futuros con tal de evitar explicaciones repetitivas.

Los datos reportados se basan en mediciones de la distribución de las partículas a lo largo del molino, las que son afectadas por diferentes fuerzas internas que se generan entre las mismas bolas, de las bolas con las paredes del molino y los levantadores, y el efecto que genera el medio acuoso sobre las partículas estudiadas.

Uno de los aspectos que debe ser tomado en consideración es que las pruebas se desarrollaron en un molino batch con paredes externas sólidas y cerradas, por lo tanto las partículas que avanzan o retroceden no pueden ser descargadas por los extremos del molino, resultado en que



éstas tengan algún comportamiento al llegar a las proximidades de las tapas. Una posibilidad es que se mantengan en esa posición axial obligando a otras partículas a retroceder o que sean ellas mismas las que retrocedan. Esta variable debe ser estudiada con más detalle para determinar la influencia de las tapas y tomar acciones que compensen el fenómeno.

Una desventaja de este análisis tridimensional es que no se cuenta con un seguimiento de las partículas durante el tiempo en el cual se está llevando a cabo el experimento, situación que no permite observar cual es el movimiento de una partícula al llegar a la proximidad de la pared ni cuáles son sus movimientos en forma general dentro del molino, teniendo por tanto, el resultado de la distribución solamente en un estado final luego de un número finito de revoluciones (aproximadamente 800 revoluciones para velocidad de giro 75% V_c y 550 revoluciones para velocidad de giro 50% V_c), cifras calculadas en base al tiempo de rotación y la velocidad de giro.

Luego de unas ciertas revoluciones, se observó que el primer efecto que se produce es la aparición de segregación radial tal como se reporta en los antecedentes, encontrándose con predominancia de los distintos tamaños en relación al porcentaje de velocidad crítica alcanzada, corroborando las teorías planteadas por un sinnúmero de autores. Esto es seguido por el desarrollo de bandas axiales que provocan segregación de forma longitudinal dentro del molino. Este último punto es el que será analizado con detalle durante el avance del estudio.

Según la hipótesis planteada, se espera encontrar resultados en cuanto a la segregación en función del ángulo de avance incorporados a los diferentes levantadores. Se considerará como resultado positivo, si se logran determinar condiciones óptimas que permitan manipular la segregación natural que se producen dentro de los molinos ya que con esto, se podrán forzar a los molinos a tener ciertos comportamientos que favorezcan la eficiencia de molienda y por ende, influir en el procesamiento de minerales y finalmente en los costos de producción.

4.1 Resultados obtenidos para el Análisis Tridimensional

4.1.1 Comportamiento Radial de la carga

Si bien se observó segregación radial en los experimentos a unas cuantas revoluciones, no es posible, con este método determinar de forma cuantitativa la segregación. Esto se debe a que, posterior a la detención del molino en crush stop, existieron movimientos descendentes de ambos tamaños de bolas desde las paredes y parte superior del molino, que modificaron la naturaleza de la segregación. Las bolas se asentaron y acomodaron de tal forma que se redujo de forma significativa la exactitud del experimento para el análisis de distribución radial de la carga.

Sin embargo, si es posible observar cualitativamente la distribución radial de la carga. Por medio del programa *Converter to JPG*, se obtuvieron fotogramas de videos grabados durante la realización de los experimentos para ambas velocidades de rotación bajo el caso base, es decir, sin la inclusión del ángulo de avance en el levantador. De todas formas, el fenómeno radial fue observado en cada uno de los revestimientos.



Figura 29 Fotograma obtenido a velocidad de rotación 50% V_c para levitador 1 (caso base)

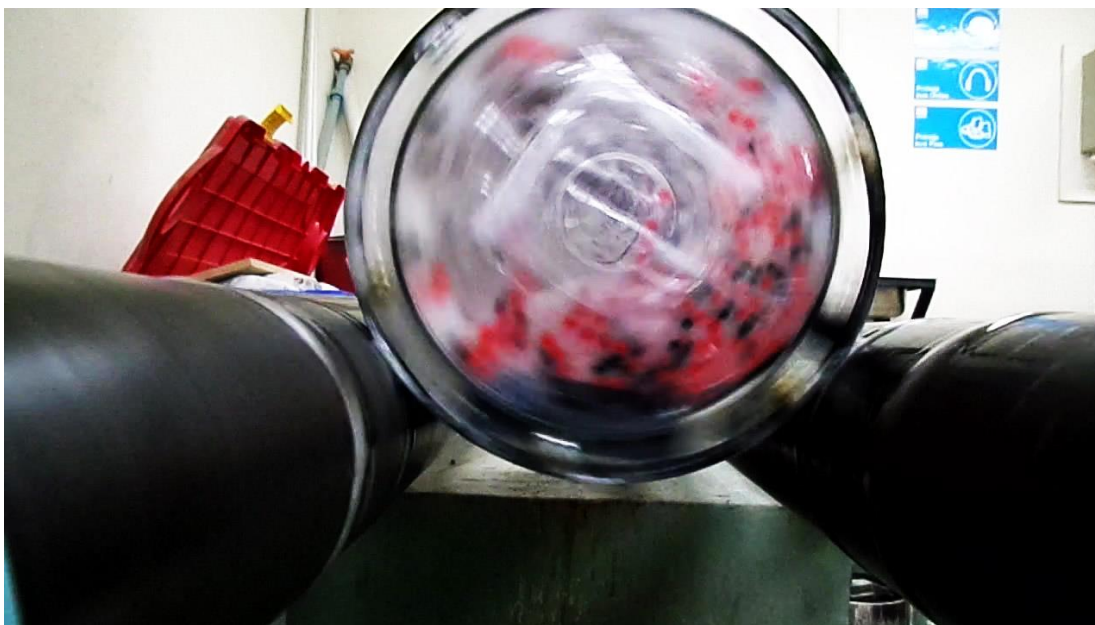


Figura 30 Fotograma obtenido a 75% V_c par levantador 1 (caso base)

La Figura 29 muestra el comportamiento radial de la carga girando a 50% de la velocidad crítica. En ella se observa la predominancia de las bolas de mayor tamaño en la periferia del molino, tal como la evidencia teórica ha mostrado en diversas ocasiones. La cascada es más suave y el derrumbamiento se provoca en un punto anterior al caso de mayor velocidad. Para el caso de la Figura 30, las bolas negras que corresponden a las más pequeñas, comienzan a ocupar las paredes del molino, observándose una mayor cantidad de ellas en comparación al caso anterior. Si bien, no es completamente visible el fenómeno, las bolas rojas comienzan a inundar la zona central del riñon. El levantamiento que se genera a 75% V_c es mayor y la cascada provoca que el movimiento de las partículas sea más efectiva.

Es posible afirmar entonces, que bajo los parámetros incluidos en este experimento, la segunda hipótesis es verdadera, observando que los fenómenos conocidos en cuanto a segregación radial se mantienen.



4.1.2 Comportamiento axial de la carga

Con el objetivo de tener un panorama de la forma en que las láminas fueron separadas, se presenta la secuencia de fotografías obtenidas en el Experimento número dos (2) con el revestimiento 75/15 girando a un 75% de la velocidad crítica

La secuencia fotográfica se presenta desde el extremo de carga hacia el extremo de descarga, según la convención descrita más arriba. Al inicio de la secuencia se observa gran cantidad de partículas rojas, pero a medida que vamos avanzando en las secciones, las partículas negras comienzan a aparecer. Esto nos da el primer indicio de que la geometría de los levantadores genera segregación hacia un lado del molino, permitiendo el empuje de las partículas de menor tamaño hacia la descarga, lo que puede favorecer la evacuación de los bajo tamaños y por tanto se gana en capacidad de tratamiento y se reduce el tiempo de residencia del mineral ya molido. Junto a esto, las bolas y el mineral coincidirán en tamaño, aumentando la probabilidad de choques efectivos y las bolas de menor tamaño realizar su labor de abrasión del mineral más pequeño, terminando el trabajo de molienda. Esto será contrastado con la información cuantitativa obtenida de los mismos experimentos en lo que continúa.

La secuencia fotográfica para otros casos de estudio se encuentra en Anexo E.

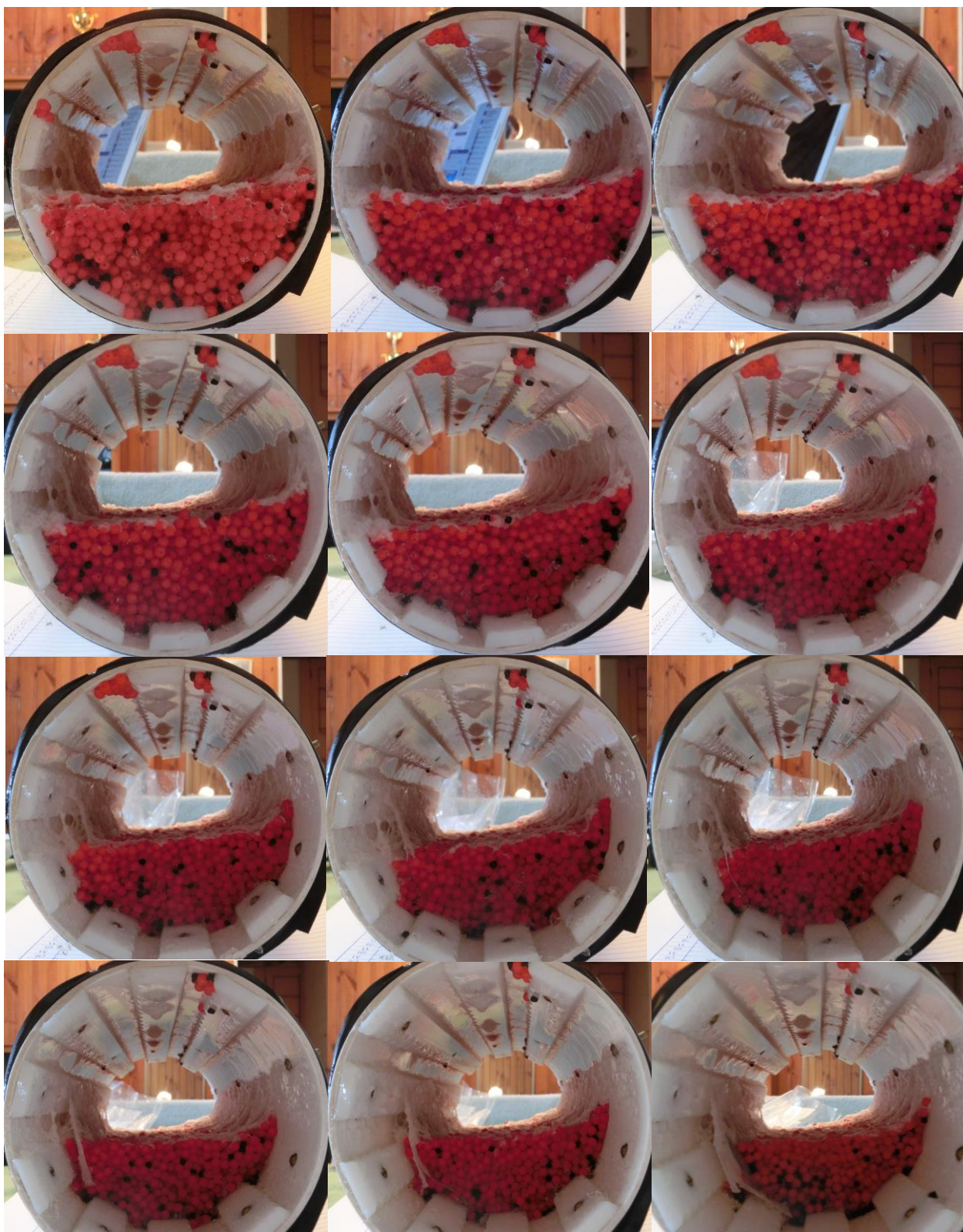


Figura 31 Experimento número dos (2) con el revestimiento 75/15 girando a un 75 % de la velocidad crítica. De arriba hacia abajo y de izquierda a derecha se observa Sección 1 a Sección 12



Figura 32 Experimento número dos (2) con el revestimiento 75/15 girando a un 75 % de la velocidad crítica. De arriba hacia abajo y de izquierda a derecha se observa Sección 13 a Sección 24



Figura 33 Experimento número dos (2) con el revestimiento 75/15 girando a un 75 % de la velocidad crítica. De arriba hacia abajo y de izquierda a derecha se observa Sección 25 a Sección 37



Figura 34 Experimento número dos (2) con el revestimiento 75/15 girando a un 75 % de la velocidad crítica. De izquierda a derecha se observa Sección 38 a Sección 40

4.1.3 Efecto de las tapas sobre el comportamiento axial de la carga.

Debido a que se realizó un procedimiento experimental en batch, a continuación se analiza la influencia que tienen las tapas sobre la distribución axial de la carga de bolas, permitiendo obtener información sobre si las tapas afectan la cantidad de bolas obtenidas en las primeras y últimas secciones. Para este objetivo, basta analizar la distribución de carga a lo largo del molino y verificar si existe un quiebre de tendencia en los extremos.

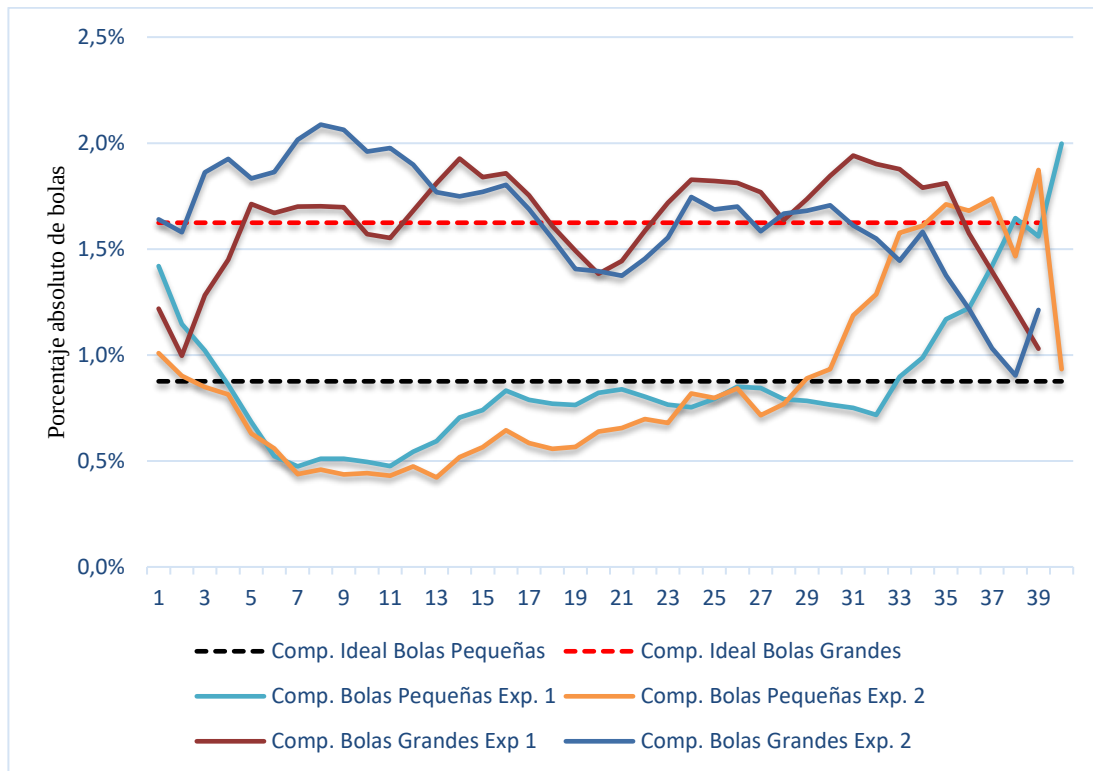
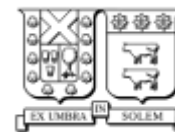


Figura 35 Comportamiento Revestimiento 90/0 a 75% Vc Experimento 1 (original) y Experimento 2 (duplicado)

La Figura 35 muestra el comportamiento del Revestimiento 90/0 bajo una velocidad de rotación de 75% Vc, encontrándose que existe un quiebre en la tendencia de datos en las primeras y últimas secciones tanto para ambos tamaños de bolas, coincidiendo con lo reportado en la literatura. Las tapas producen por tanto, distorsión del comportamiento obtenido en el transporte axial de la carga, razón por la cual las primeras y últimas cinco secciones fueron eliminadas de la base de datos para los análisis posteriores. El resto de los gráficos con tapas pueden encontrarse en Anexo C, donde en todos los casos se observa el mismo comportamiento distorsionado bajo la tendencia de datos global.



4.1.4 Comportamiento de la carga en función de los revestimientos utilizados

4.1.4.1 Análisis de muestras en duplicado

Se realiza el análisis de varianza entre los datos obtenidos de las pruebas tanto para bolas rojas y negras con tal de evaluar la hipótesis nula y verificar si existe significancia entre los datos obtenidos y con esto analizar el error experimental de los datos.

El análisis de la varianza (ANOVA) es una potente herramienta estadística que es frecuentemente utilizada para el control de métodos analíticos. El objetivo es identificar, en el conjunto de resultados de análisis, si la fuente de variación corresponde a un error aleatorio o al llamado factor controlado que involucra el tipo de método, las diferentes condiciones, entre otros factores. Con esto se pretende determinar si la interacción de los factores tiene influencia significativa en el resultado.

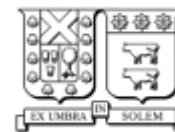
Se realiza una prueba de hipótesis nula utilizando el test de Fisher la cual nos indicará si existe o no diferencia significativa entre las pruebas y determinará si los errores aleatorios son la causa predominante de la discrepancia entre los valores medidos o no.

Se utiliza un nivel de significancia de 99,5% para calcular la probabilidad de rechazar o aceptar la hipótesis nula, por tanto, todos aquellos P menores a 0,995 corresponden a datos en los cuales tiene una réplica que no es estadísticamente significativa.

Se presenta a continuación el método de cálculo para el revestimiento dos girando a 75%Vc, bolas rojas. La información completa del resto de los revestimientos se muestra en **Anexo F**.

Para determinar el error experimental de las muestras original y duplicado y verificar que estas pueden emplearse en los cálculos posteriores, se realiza un análisis de varianza de secciones consecutivas y se compara con el valor de la prueba de Fisher. Esto se determina como método de cálculo, ya que en un modelo no segregado, la cantidad de partículas entre secciones consecutivas debiese coincidir. Se realiza este procedimiento para todas las secciones.

Para entender de mejor forma el método, se debe considerar que para poder aplicarlo debemos identificar y contar con las siguientes variables:



- La variable de interés: masa de partículas en cada sección
- Un factor: las secciones en las que se encuentran las bolas
- Niveles del factor: el total de las secciones
- Numero de observaciones: dos observaciones (original y duplicado)

Si se tiene el molino con un largo total L , al reducir las secciones a un ΔL lo menor posible, se puede considerar que no habrá diferencia en la segregación entre estas secciones, ya que esto es un fenómeno que ocurre y se visualiza en largos considerables. Con esta suposición, si se estudian dos secciones consecutivas, contemplando que finalmente son dos mediciones de la misma medida, se puede determinar si el duplicado tiene o no diferencia significativa con la muestra original.

Se presenta el cálculo inicial que corresponde a la comparación de las secciones uno y dos tanto para el dato original como el duplicado y se determinan todos los valores F de test de Fisher para posteriormente ser contrastado con el estadístico de confianza determinado y con esto concluir sobre el grado de significancia.

Tabla 11 Datos para cálculo ANOVA bolas rojas girando a 75% V_c

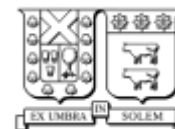
Secciones	Experimento 1	Experimento 2
1	3,3%	2,8%
2	3,5%	3,2%

Para el cual, la tabla ANOVA corresponde a:

Tabla 12 Tabla ANOVA para análisis de varianza bolas rojas girando 75% V_c Revestimiento 2

Fuente de variación		Grados libertad	Cuadrado medio	Fo
Secciones	1,77E-05	1	1,77E-05	4,37
Error	8,106E-06	2	4,0E-06	
Total	2,55E-05	3		

Esto se realiza de forma sucesiva, encontrándose los F_o para todas las secciones contiguas, el valor probabilístico P , y su consiguiente valor $P-1$, el cual es graficado junto al valor de confianza correspondiente al 99,5%. Además, se escribe la respuesta 0 para los valores en los



cuales se acepta la hipótesis nula y 1 para los cuales se rechaza la hipótesis nula. Se rechaza la hipótesis nula en aquellos casos en donde el valor 1-P es mayor al valor de confianza 0.95.

El valor P es obtenido con la función distribución de probabilidad y considerando los grados de libertad de cada variable.

Tabla 13 Valores probabilísticos para análisis de hipótesis nula Revestimiento 2 a 75% Vc bolas rojas

Secciones	Factor F Calculado	P	1-P	Grado de confianza	Respuesta
1	4,38	0,17	0,83	0,95	0
2	5,56	0,14	0,86	0,95	0
3	0,35	0,61	0,39	0,95	0
4	0,11	0,78	0,22	0,95	0
5	11,40	0,08	0,92	0,95	0
6	6,42	0,13	0,87	0,95	0
7	0,68	0,50	0,50	0,95	0
8	5,58	0,14	0,86	0,95	0
9	0,69	0,49	0,51	0,95	0
10	2,82	0,23	0,77	0,95	0
11	1,25	0,38	0,62	0,95	0
12	0,49	0,56	0,44	0,95	0
13	0,18	0,71	0,29	0,95	0
14	541,64	0,00	1,00	0,95	1
15	28,86	0,03	0,97	0,95	1
16	0,08	0,81	0,19	0,95	0
17	0,60	0,52	0,48	0,95	0
18	0,25	0,67	0,33	0,95	0
19	10,24	0,09	0,91	0,95	0
20	455,76	0,00	1,00	0,95	1
				%No rechazo	85%

Para este caso, se tiene que el 15% de los datos se encuentran sobre el nivel de confianza y por tanto el 85% de los datos no rechaza la hipótesis nula.

El gráfico representa los valores 1- P obtenidos, los cuales son comparados con el valor probabilístico. Todos los datos que están sobre el valor probabilístico de 0,95 rechazan la

hipótesis nula lo que quiere decir que los valores fueron influenciados por un agente y no son resultado de un proceso aleatorio.

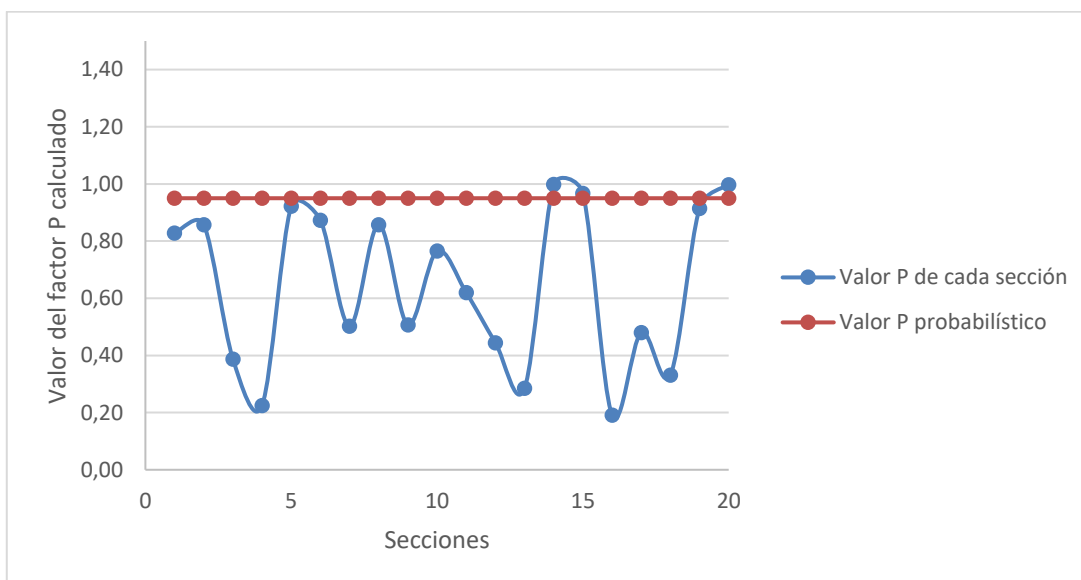


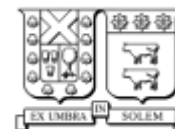
Figura 36 Gráfico de valores 1-P para revestimiento 2 girando a 75% Vc bolas rojas

Se presenta además el porcentaje de datos que no rechaza la hipótesis nula. La tabla mostrada a continuación muestra el porcentaje de datos que no rechaza la hipótesis nula para todos los experimentos y para los dos tipos de bolas.

Tabla 14 Tabla porcentajes de datos que acepta la hipótesis nula

Revestimiento	Velocidad de Giro	Bolas Rojas	Bolas Negras
Rev 1 (90/0)	50%Vc	75%	85%
	75%Vc	70%	65%
Rev2 (70/15)	50%Vc	80%	65%
	75%Vc	85%	70%
Rev 3 (50/15)	50%Vc	90%	75%
	75%Vc	70%	55%

Considerando que los porcentajes de datos que no rechaza la hipótesis nula bordean el 75%, se deduce que los experimentos no tienen diferencia significativa y que por tanto, el modelo experimental permite estudiar las variables de interés y utilizar el duplicado para los cálculos



futuros. El único resultado que muestra mayor desviación es el revestimiento tres (3) girando a 75%Vc para bolas negras, por lo tanto, debemos tener más precaución en el tratamiento de la información en este caso y en el consiguiente análisis.

Con este método también se determinó el error experimental entre la medición de datos del experimento uno (1) y del experimento dos (2) para todos los casos, encontrándonos un error inherente al experimento cercano al 10%

4.1.4.2 Distribución para análisis de segregación longitudinal

El comportamiento encontrado en cada una de las condiciones se describe en detalle a continuación. Esto se logra mediante la contabilización de bolas en bandas axiales lo que representa la concentración de cada una de las especies de partículas en forma longitudinal, resumiendo el desarrollo general de la segregación y revelando el estado final de la carga luego de un número finito de revoluciones. Se presenta de forma gráfica el promedio de los dos experimentos realizados para cada caso experimental. La decisión de presentar el promedio de los datos toma en consideración los resultados de análisis de varianza de los experimentos y facilitar la lectura de los datos. A su vez, se toma como parámetro, la masa de bolas desde el centro del molino hacia la derecha y hacia la izquierda, para intentar medir la segregación global de la carga. Bajo esta convención, el centro del molino es el punto cero y todo lo encontrado hacia la derecha se considera “descarga” por la posición de los levantadores dentro del molino y todo lo considerado hacia la izquierda se considera “alimentación”.

4.1.4.2.1 Revestimiento Liso Caso Base – Velocidad de rotación 50% Vc

Tabla 15 Condiciones operacionales del Revestimiento uno (1) para velocidad de giro 50% de la velocidad crítica

Condiciones Operacionales	
Identificación Revestimiento	1
Tipo de Revestimiento	Liso
Ángulo de ataque	90°
Ángulo de avance	0°
Número de revestimientos instalados	8
Velocidad operación	50% Vc (55 RPM)

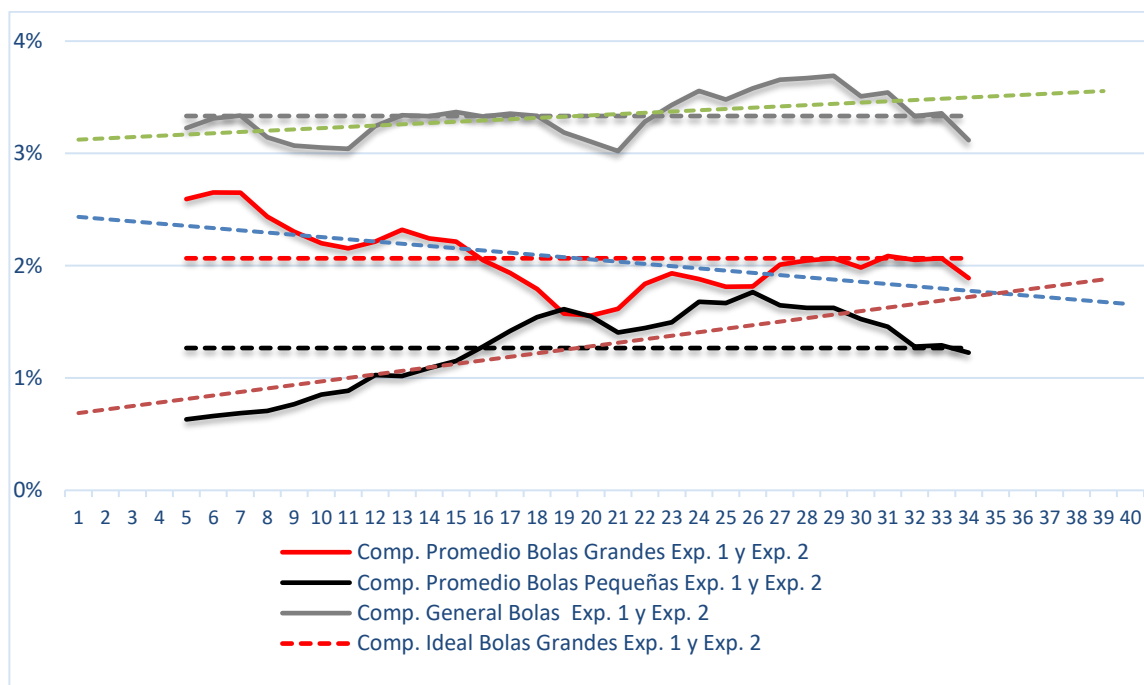


Figura 37 Gráfico Comportamiento Revestimiento 1, ángulo de ataque 90°, ángulo de avance 0°, a 50% Vc para promedio bolas rojas (grandes), promedio bolas negras (pequeñas), y comportamiento general total promedio

Tabla 16 Tabla comportamiento de la carga Revestimiento 1 girando a 50% Vc

	Bolas Rojas	Bolas Negras	Total de bolas
Hacia la izquierda	33,3%	15,3%	48,7%
Hacia la derecha	28,7%	22,7%	51,3%
Delta volumen	-4,7%	7,3%	2,7%

Para este caso, se obtiene que del total en masa de bolas rojas, correspondiente al 62%, un 33,3% de estas están concentradas hacia la izquierda del molino, mientras que el 28,7% están hacia la derecha, en tanto en bolas negras ocurre lo opuesto, encontrándose que en la parte hacia la derecha hay mayor concentración con un 22,7% de bolas. En la situación general, se tiene que el 51,3% en masa de bolas están en la segunda mitad del molino, es decir, hacia la denominada “descarga”, por lo tanto se segrega hacia ese lado.

Se obtiene que en este caso, que la carga en su conjunto esta segregada hacia la derecha, las bolas negras segregan hacia la derecha y las rojas hacia la izquierda.

4.1.4.2.2 Revestimiento Liso Caso Base – Velocidad de rotación 75% Vc

Tabla 17 Condiciones operacionales del Revestimiento uno (1) para velocidad de giro 75% de la velocidad crítica

Condiciones Operacionales	
Identificación Revestimiento	1
Tipo de Revestimiento	Liso
Ángulo de ataque	90°
Ángulo de avance	0°
Número de revestimientos instalados	8
Velocidad operación	75% Vc (80 RPM)

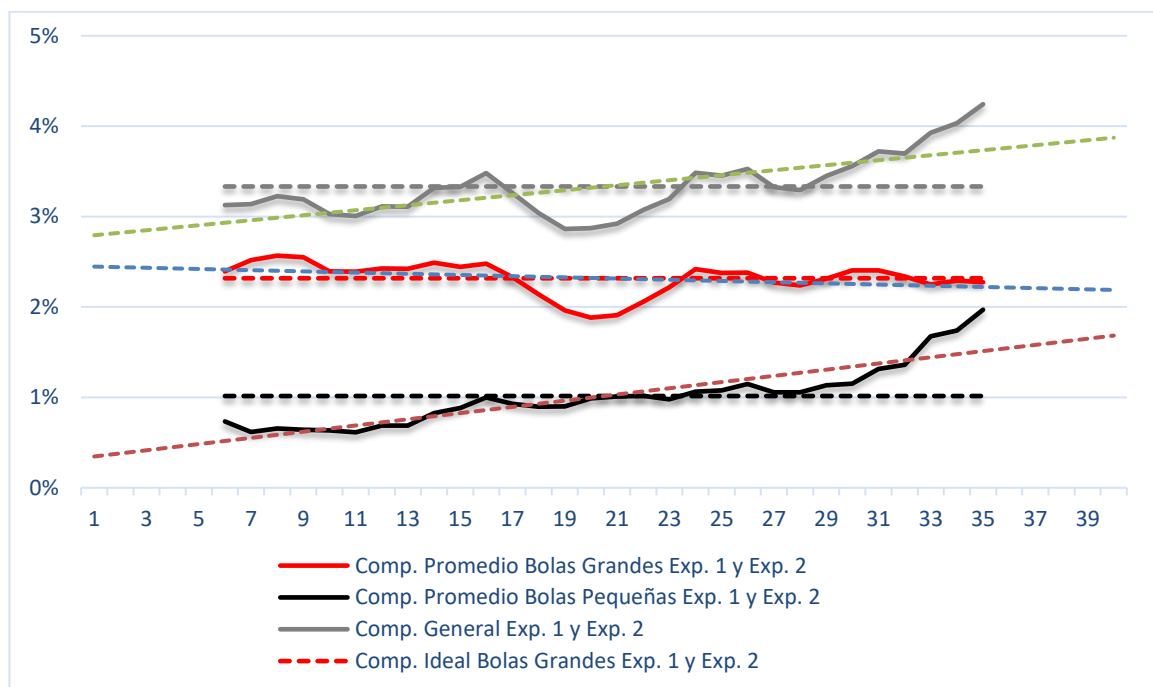
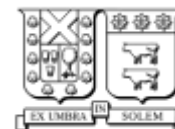


Figura 38 Gráfico Comportamiento Revestimiento 1, ángulo de ataque 90°, ángulo de avance 0°, a 75% Vc para promedio bolas rojas (grandes), promedio bolas negras (pequeñas), y comportamiento general total promedio

Tabla 18 Tabla comportamiento de la carga Revestimiento 1 girando a 75% Vc

	Bolas Rojas	Bolas Negras	Total de bolas
Hacia la izquierda	35,4%	11,7%	47,1%
Hacia la derecha	34,1%	18,8%	52,9%
Delta	-1,2%	7,1%	5,8%



Las bolas rojas se concentran hacia la izquierda del molino pero en menor proporción, ya que existe solo un 1,2% más de bolas hacia la derecha. Con ese porcentaje incluso se puede asumir que no hay segregación. Las bolas negras presentan una mayor tendencia hacia la derecha del molino, con un 7,1% de diferencia. Al evaluar el molino en su conjunto, nos encontramos con que el molino segregó hacia la derecha con un 47,1% versus un 52,9%, dado principalmente por la segregación de bolas negras que generan el desequilibrio.

4.1.4.2.3 Revestimiento Dentado – Angulo de ataque 70° - Ángulo de avance 15°- Velocidad rotación 50% Vc

Tabla 19 Condiciones operacionales del Revestimiento dos (2) para velocidad de giro 50% de la velocidad crítica

Condiciones Operacionales	
Identificación Revestimiento	2
Tipo de Revestimiento	Dentado
Ángulo de ataque	70°
Ángulo de avance	15°
Número de revestimientos instalados	8
Velocidad operación	50% Vc (55RPM)

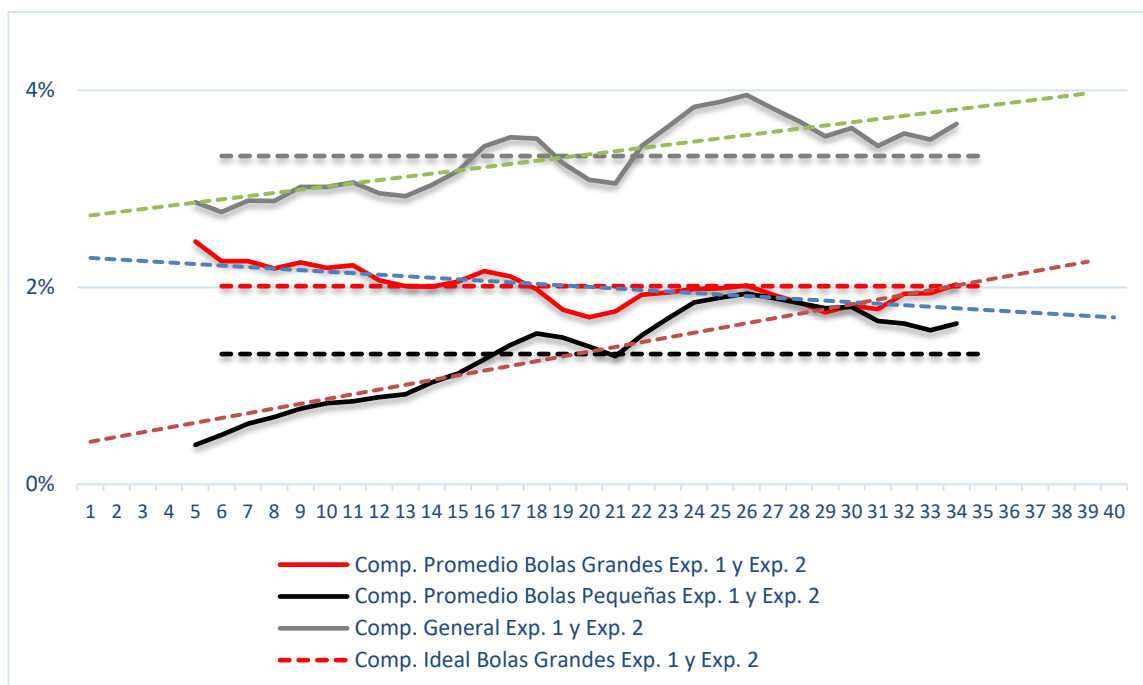


Figura 39 Gráfico Comportamiento Revestimiento 2, ángulo de ataque 70°, ángulo de avance 15°, a 50% Vc para promedio bolas rojas (grandes), promedio bolas negras (pequeñas), y comportamiento general Total promedio

Tabla 20 Tabla comportamiento de la carga Revestimiento 2 girando a 50% Vc

	Bolas Rojas	Bolas Negras	Total de bolas
Hacia la izquierda	32,0%	14,3%	46,3%
Hacia la derecha	28,3%	25,4%	53,7%
Delta	-3,7%	11,1%	7,4%

En este caso, con la introducción del ángulo de avance, notamos que existe una mayor tendencia de desplazamiento de bolas negras hacia la derecha del molino encontrándonos con cerca de un 80% más de bolas en esa sección. La carga en general se desplaza hacia la derecha aunque las bolas rojas estén desplazadas hacia la izquierda. Las bolas roja están concentradas mayormente hacia la izquierda del molino y en su tendencia global, existe mayor masa de bolas hacia la derecha del molino.

4.1.4.2.4 Revestimiento Dentado – Ángulo de ataque 70° - Ángulo de avance 15° - Velocidad de rotación 75% Vc

Tabla 21 Condiciones operacionales del Revestimiento dos (2) para velocidad de giro 75% de la velocidad crítica

Condiciones Operacionales	
Identificación Revestimiento	2



Tipo de Revestimiento	Dentado
Ángulo de ataque	70°
Ángulo de avance	15°
Número de revestimientos instalados	8
Velocidad operación	75% Vc (80 RPM)

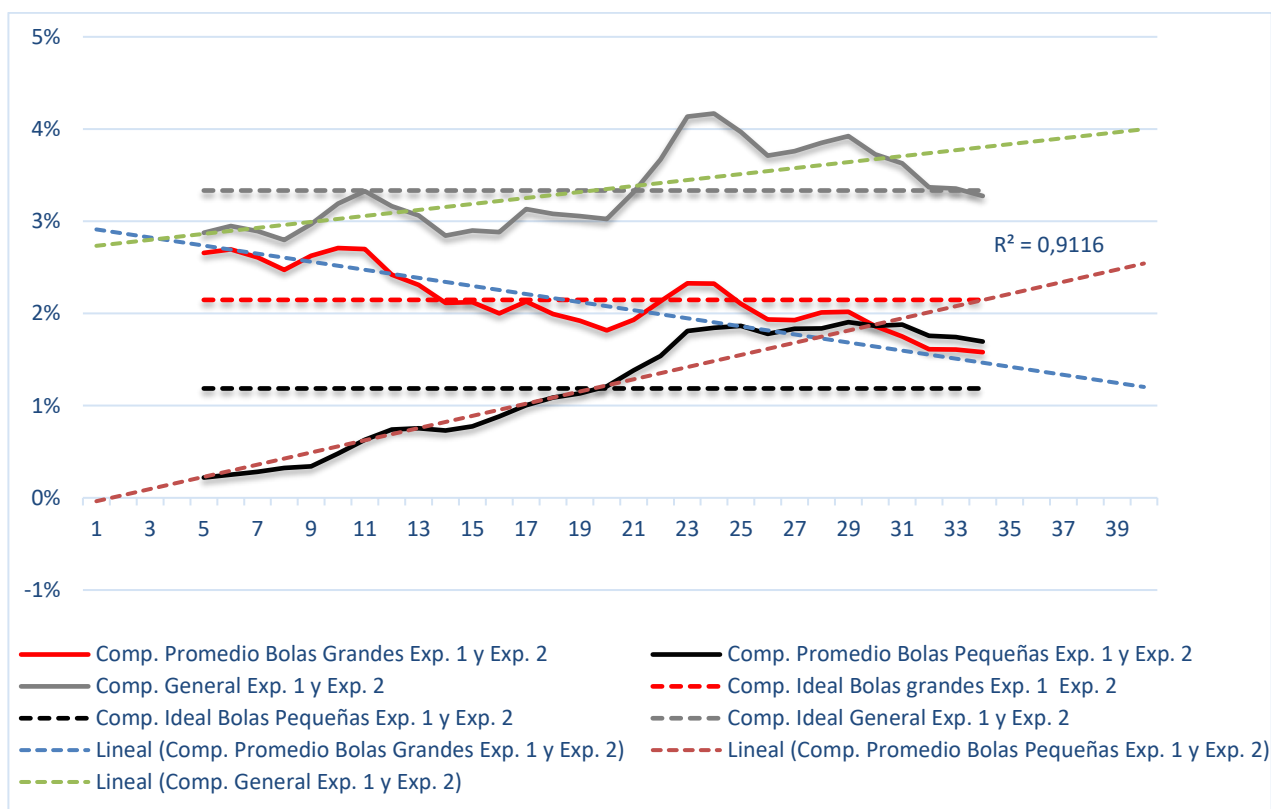


Figura 40 Gráfico Comportamiento Revestimiento 2, ángulo de ataque 70°, ángulo de avance 15°, a 75% Vc para promedio bolas rojas (grandes), promedio bolas negras (pequeñas), y comportamiento general Total promedio

Tabla 22 Tabla comportamiento de la carga Revestimiento 2 girando a 75% Vc

	Bolas Rojas	Bolas Negras	Total de bolas
Hacia la izquierda	34,6%	10,6%	45,3%
Hacia la derecha	27,1%	24,7%	51,9%
Delta volumen	-7,5%	14,1%	6,6%

El efecto de segregación de bolas negras se acentúa a velocidad de giro de 75%Vc, encontrándose un 14,1% más de bolas hacia la derecha del molino. Esta cantidad corresponde



a más del doble de bolas que a la izquierda. Las bolas rojas a su vez se encuentran segregadas hacia la izquierda del molino y la segregación de bolas esta hacia la derecha.

Los resultados encontrados en el revestimiento dos (2) girando tanto a 50% como a 75% de la V_c , muestra los mejores resultados en cuanto a la hipótesis planteada en el inicio del informe. Se esperaba con este estudio, ver un comportamiento de segregación influenciado por la geometría de los revestimientos, en donde las partículas de menor tamaño se concentraran hacia la derecha del molino y en el que las bolas de mayor tamaño estén en las primeras secciones. Las bolas de mayor tamaño, al concentrarse en esas secciones, tienen mayor posibilidad de molerse debido a que los cuerpos de molienda coinciden en tamaño con el mineral, generando una mayor probabilidad de choques efectivo. Los cuerpos de molienda pequeños, a su vez, estarán en las últimas secciones provocando molienda por desgaste y favoreciendo que el mineral alcance la granulometría final deseada para su descarga. Se observa a su vez, que el mineral, en su comportamiento general esta desplazado hacia la derecha, lo que permitiría una descarga de mineral más eficiente y un tiempo de permanencia menor, lo que conllevaría a mayor procesamiento de mineral en un mismo periodo de tiempo.

4.1.4.2.5 Revestimiento Dentado – Ángulo de ataque 50° - Ángulo de avance 15° - Velocidad de rotación 50% V_c

Tabla 23 Condiciones operacionales del Revestimiento tres (3) para velocidad de giro 50% de la velocidad crítica

Condiciones Operacionales	
Identificación Revestimiento	3
Tipo de Revestimiento	Dentado
Ángulo de ataque	50°
Ángulo de avance	15°
Número de revestimientos instalados	8
Velocidad operación	50% V_c (55 RPM)

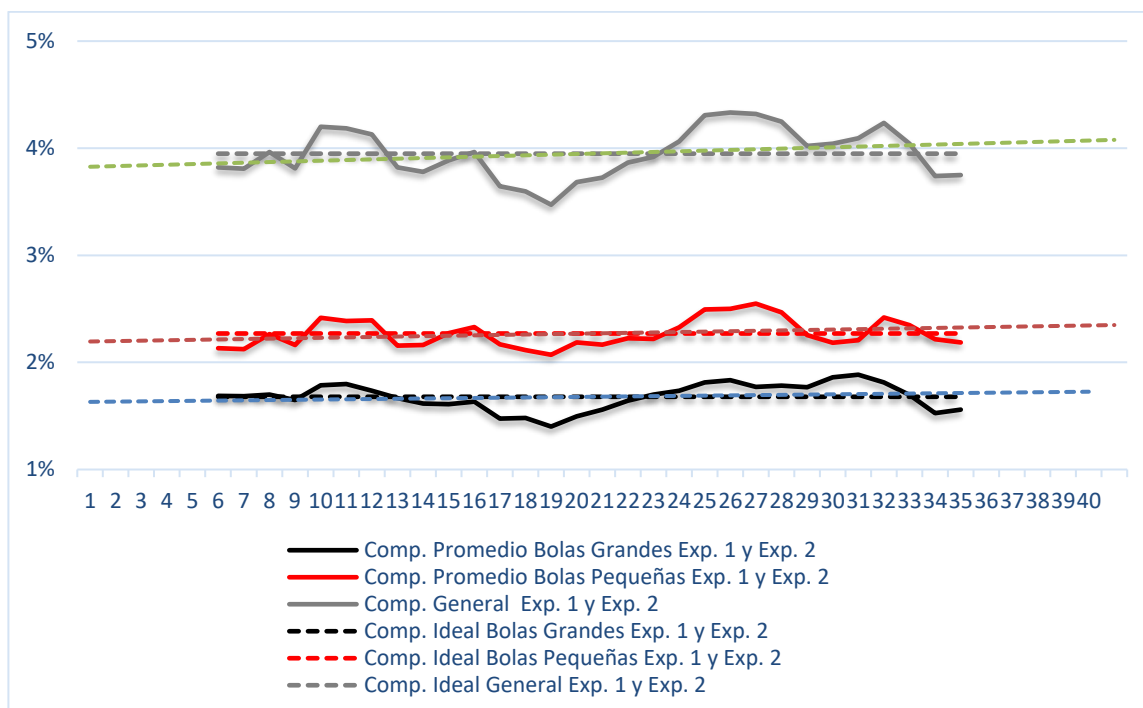


Figura 41 Gráfico Comportamiento Revestimiento 3, ángulo de ataque 50°, ángulo de avance 15°, a 50% Vc para promedio bolas rojas (grandes), promedio bolas negras (pequeñas), y comportamiento general Total promedio

Tabla 24 Tabla comportamiento de la carga Revestimiento 3 girando a 50% Vc

	Bolas Rojas	Bolas Negras	Total de bolas
Hacia la izquierda	31,1%	17,4%	48,4%
Hacia la derecha	32,3%	19,2%	51,6%
Delta volumen	1,3%	1,9%	3,1%

Este revestimiento presenta casi nula segregación, y por primera vez observamos más bolas rojas a la derecha del molino. Lo mismo para bolas negras y para el comportamiento general. Considerando que la incorporación del ángulo de avance debía incidir en el movimiento de bolas pequeñas hacia la izquierda del molino, fenómeno que si es observado en los casos anteriores, vemos que aquí ese principio no se cumple. El comportamiento de bolas observado, es en general, lo que se esperaba observar en el caso del revestimiento uno (1) sin ángulo de ataque.

4.1.4.2.6 Revestimiento Dentado – Ángulo de ataque 50° - Ángulo de avance 15° - Velocidad rotación 75% Vc

Tabla 25 Condiciones operacionales del Revestimiento tres (3) para velocidad de giro 75% de la velocidad crítica

Condición Operacionales	
Identificación Revestimiento	3
Tipo de Revestimiento	Dentado
Ángulo de ataque	50°
Ángulo de avance	15°
Número de revestimientos instalados	8
Velocidad operación	75% Vc (80 RPM)

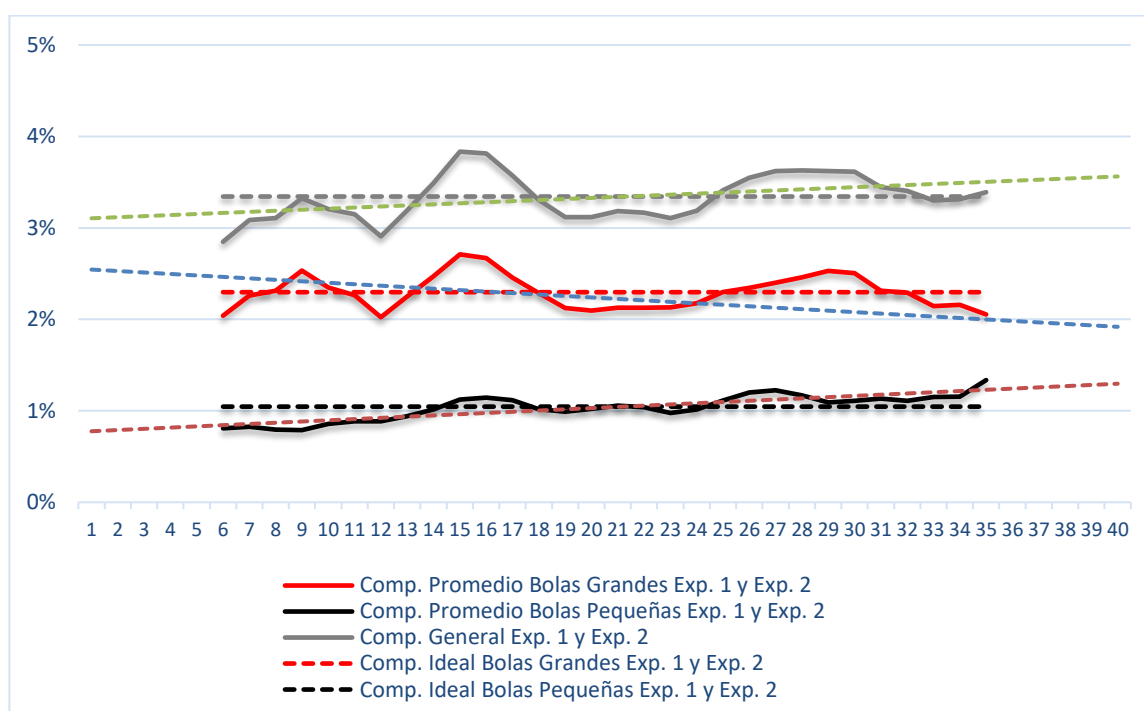


Figura 42 Gráfico Comportamiento Revestimiento 3, ángulo de ataque 50°, ángulo de avance 15°, a 75% Vc para promedio bolas rojas (grandes), promedio bolas negras (pequeñas), y comportamiento general Total promedio

Tabla 26 Tabla comportamiento de la carga Revestimiento 3 girando a 75% Vc

	Bolsa Rojas	Bolas negras	Total de bolas
Hacia la izquierda	34,8%	14,2%	49,1%
Hacia la derecha	34,1%	16,9%	50,9%
Delta	-0,8%	2,7%	1,9%



La evaluación del revestimiento tres (3) resulta más compleja debido a que, en primer lugar, este revestimiento no mostró una buena repetitividad de datos entre experimentos, sobre todo en este caso. El 45% de los datos medidos mostraron rechazo de la hipótesis nula. Junto a lo anterior, tampoco muestra segregación marcada de bolas, tanto para bolas rojas, como bolas negras ni para la evaluación conjunta. El motivo por el cual este revestimiento no mostro un comportamiento esperado no ha sido evaluado y no esta tampoco dentro de los alcances de este estudio.

En este sentido sí se puede realizar un alcance. En el movimiento de carga y la evaluación de los ángulos ideales que deben ser incorporados al perfil de ataque de los levantadores, tiene relación, tal como muestra la Fig. 15, al lugar donde las bolas son eyectadas y a que posición del molinos éstas alcanzan. Si se tiene un ángulo muy alto, las bolas son proyectadas al manto y si es muy bajo, no alcanzan la zona del riñón del molino en donde se produce la mayor cantidad de choques efectivos y desplazamientos de hacia delante o hacia atrás. Considerando que este revestimiento tiene ángulo de avance, pero que su ángulo de ataque es muy bajo, se puede plantear como hipótesis de estudio par aun futuro, que esta condición lo hace desfavorable en cuanto a la segregación de partículas.

Ahora bien, dando una mirada global de los resultados, la información entregada arriba se resume a continuación. Aquí se presenta el delta de bolas en relación a la primera y segunda mitad del molino. Los valores negativos indican que la carga esta desplazada en ese porcentaje hacia la izquierda del molino y los valores positivos indican desplazamiento de la carga hacia la derecha, siempre recordando la convención para determinar izquierda y derecha.

Tabla 27 Tabla resumen desplazamiento neto de bolas hacia la izquierda o hacia la derecha.

	% Velocidad crítica de giro	Delta Bolas Rojas	Delta Bolas Negras	Delta Total de bolas
Revestimiento 1	50	-4,7%	7,3%	2,7%
	75	-1,2%	7,1%	5,8%
Revestimiento 2	50	-3,7%	11,1%	7,4%
	75	-7,5%	14,1%	6,6%
Revestimiento 3	50	1,3%	1,9%	3,1%
	75	-0,8%	2,7%	1,9%



Los resultados revelan el comportamiento de segregación de la carga, donde se observa que en casi la totalidad de los experimentos la masa de bolas rojas (las de mayor tamaño) está concentrada hacia la izquierda del molino o “alimentación” y a su vez la mayor cantidad de bolas negras (bolas pequeñas) están concentradas a la derecha del molino o “descarga”. Para la generalidad, las bolas se encuentra que también están concentradas hacia la derecha del molino

A su vez, los mejores resultados se encontraron en el revestimiento número dos (2) que posee ángulo de avance de 15% y ángulo de ataque de 70°. También, se confirma que el revestimiento número uno (1), a pesar de que no posee ángulo de avance, segregó más bolas hacia la derecha de lo que lo hizo el revestimiento número tres (3), siendo que el primero no posee levantadores con ángulo de avance. Lo mismo se observa en las bolas rojas y en el comportamiento general de la carga. Este resultado claramente no es lo que se había planteado en la hipótesis inicial de la investigación y el motivo por el cual sucede no puede ser aún explicado con la metodología experimental que se utilizó.

Para poder dilucidar lo que sucede en los experimentos, se tendría que determinar, por ejemplo, si el ángulo de ataque influye mayormente que el ángulo de avance ya que el revestimiento tres (3) a pesar de que posee ángulo de avance, su ángulo de ataque es muy pequeño. Los resultados en este sentido podrían deberse a que, tal como muestra la Figura 15, el ángulo no permite levante de la carga y no cae en el sector del riñón del molino que es la zona en la cual hay mayor probabilidad de avance o retroceso de partículas, resultando en un estado de movimiento pasivo y terminando en una segregación nula. El revestimiento uno (1) a su vez no posee ángulo de avance, pero su ángulo de ataque puede influir en segregar hacia la descarga de igual forma.

Los resultados aquí encontrados, a pesar que no presentan en todos los casos relación a la hipótesis planteada, si se comporta de forma general tal como se esperaba, con una concentración de bolas pequeñas siempre a la derecha del molino, concentración de rojas hacia la izquierda y resultado general hacia la derecha. Esto es positivo, ya que se puede esperar que los cuerpos de molienda coincidan en tamaño con el mineral y por ende se puede conseguir una mayor efectividad en el proceso de reducción de tamaño. En este sentido, las bolas grandes aumentarían su probabilidad de impacto con el mineral y a su vez las bolas pequeñas permitirían la reducción de tamaño por desgaste. Con el desplazamiento de la carga hacia



delante, permite que el mineral sea evaluado a la salida del molino, reduciendo los tiempos de permanencia y aumentando la capacidad de tratamiento en un mismo periodo de tiempo.

4.1.4.3 Análisis de varianza multifactorial – Efecto Velocidad y Tipo de revestimiento

Por medio de un análisis de varianza, se puede estudiar el efecto combinado de la velocidad de rotación del molino y el tipo de revestimiento utilizado en forma simultánea y evaluar por medio de la interacción de estos dos factores la significancia de los datos encontrados. Este análisis se realiza por medio de un diseño de experimentos factorial, el que nos permitirá caracterizar la segregación de la carga y verificar si estos factores afectan la segregación longitudinal. La salida de este análisis nos indicará si alguno de estos factores es crítico para el resultado de segregación.

Para un control de datos más compacto, se utilizaron seis puntos de análisis, donde cada uno corresponde al promedio de cinco datos originales obviando los datos cercanos a las tapas. Se utiliza además, los datos originales y duplicados para obtener un resultado confiable y a su vez se separan los datos por tamaño (o color) y se realiza un análisis aislado.

Para este análisis, se identifican tres factores (revestimientos: Rev1, Rev2, Rev3) y dos niveles (velocidad: 50%Vc y 75%Vc) y a su vez cada muestra con su duplicado. El interés es poder probar la hipótesis de que existen cambios de respuestas tanto en los factores principales como en su interacción.

El análisis multifactorial nos dará información sobre la posible interacción de las dos variables. En este análisis se presenta la construcción de la tabla y los consiguientes cálculos de factores F para verificar el rechazo o aceptación la hipótesis nula.

4.1.4.3.1 Análisis multifactorial para bolas negras

La Tabla 29 muestra el porcentaje de masa de cada punto, para cada revestimiento y tipo de bola, considerando que cada punto es la suma de cinco secciones originales.

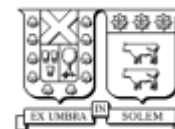


Tabla 28 Análisis de varianza para bolas negras - Efecto simultáneo Revestimiento y velocidad de giro

	50% Vc		75%Vc	
Rev 1(0/90)	Negras_orig.	Negras_dup.	Negras_orig.	Negras_dup.
	7,47%	6,48%	7,17%	6,71%
	9,21%	10,98%	8,73%	6,92%
	11,71%	16,03%	11,35%	8,59%
	16,71%	16,65%	11,28%	10,49%
	18,22%	18,13%	11,52%	11,93%
	17,10%	14,07%	12,91%	21,18%
Rev 2 (75/15)	4,90%	8,55%	3,75%	2,66%
	9,21%	11,25%	8,29%	6,68%
	15,56%	15,53%	11,50%	10,33%
	19,06%	16,24%	18,79%	16,05%
	23,81%	18,87%	22,56%	18,75%
	18,32%	18,35%	22,13%	19,25%
Rev 3 (50/15)	12,89%	10,95%	6,78%	10,93%
	13,00%	11,92%	8,54%	12,52%
	13,13%	11,58%	10,13%	12,85%
	12,56%	13,89%	11,55%	11,02%
	13,94%	14,24%	12,92%	12,22%
	12,68%	14,88%	15,14%	11,64%

Las siguientes tablas resumen el análisis de varianza para cada sección longitudinal analizada. Se ha decidido utilizar $\alpha = 0,05$. Los valores f_0 de la tabla deben ser contrastados con $f_{0.05,2,6} = 5,14$ y $f_{0.05,1,6} = 5,99$ para concluir sobre los efectos principales de tipo de revestimiento y velocidad sobre la segregación de la carga. Estos valores son los tabulados por Fisher para el grado de confianza, y los grados de libertad que poseen los factores y niveles contemplados en el análisis.



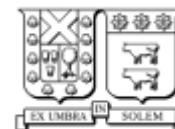
Tabla 29 Análisis de varianza para cálculo multifactorial - Velocidad y Tipo de revestimiento (ángulo de ataque)

Sección 1							
Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	Fo	P	1-P	Respuesta
Tipo Revestimiento	6,E-03	2	3,E-03	9,84	0,01	0,99	1
Velocidad	1,E-03	1	1,E-03	4,78	0,07	0,93	1
Interacción	7,E-04	2	4,E-04	1,17	0,37	0,63	1
Error	2,E-03	6	3,E-04				
Total	1,E-02	11					

Sección 2							
Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	Fo	P	1-P	Respuesta
Tipo Revestimiento	2,E-03	2	9,E-04	3,56	0,10	0,90	1
Velocidad	2,E-03	1	2,E-03	6,37	0,04	0,96	1
Interacción	3,E-05	2	2,E-05	0,07	0,94	0,06	1
Error	2,E-03	6	3,E-04				
Total	5,E-03	11					

Sección 3							
Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	Fo	P	1-P	Respuesta
Tipo Revestimiento	5,E-04	2	2,E-04	0,73	0,52	0,48	1
Velocidad	3,E-03	1	3,E-03	9,46	0,02	0,98	1
Interacción	8,E-04	2	4,E-04	1,28	0,35	0,65	1
Error	2,E-03	6	3,E-04				
Total	6,E-03	11					

Sección 4							
Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	Fo	P	1-P	Respuesta
Tipo Revestimiento	6,E-03	2	3,E-03	19,53	0,00	1,00	0
Velocidad	2,E-03	1	2,E-03	14,01	0,01	0,99	1
Interacción	2,E-03	2	8,E-04	5,37	0,05	0,95	1
Error	9,E-04	6	2,E-04				
Total	1,E-02	11					



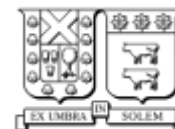
Sección 5							
Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	Fo	P	1-P	Respuesta
Tipo Revestimiento	1,E-02	2	7,E-03	19,73	0,00	1,00	0
Velocidad	2,E-03	1	2,E-03	7,54	0,03	0,97	1
Interacción	2,E-03	2	1,E-03	2,93	0,13	0,87	1
Error	2,E-03	6	3,E-04				
Total	2,E-02	11					

Sección 6							
Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	Fo	P	1-P	Respuesta
Tipo Revestimiento	7,E-03	2	4,E-03	4,107	0,08	0,92	1
Velocidad	4,E-04	1	4,E-04	0,456	0,52	0,48	1
Interacción	4,E-04	2	2,E-04	0,228	0,80	0,20	1
Error	5,E-03	6	9,E-04				
Total	1,E-02	11					

Tabla 30 Porcentaje de datos que acepta la hipótesis nula bolas negras

Variable	No rechaza hipótesis nula
Tipo revestimiento	67%
Velocidad	88%
Interacción	56%

Para el análisis multifactorial, se calculó la probabilidad P y se comparó con el estadístico al 0,05% de confianza, resultando en que en el 67% de los casos el tipo de revestimiento, es decir, el ángulo de ataque no influye en el resultado de segregación. En cuanto a la velocidad, el resultado es más categórico con un 88% de no rechazo de la hipótesis nula. Los datos indican que en un 56% de los casos, las variables interacción y velocidad influyeron en el resultado final de segregación. Estos resultados nos dan las primeras luces en cuanto a saber con qué influencia las variables alteran el comportamiento de segregación de la carga



4.1.4.3.2 Análisis multifactorial para bolas rojas

Se realiza el mismo análisis para bolas rojas.

Tabla 31 Análisis de varianza para bolas rojas - Efecto simultáneo Revestimiento y velocidad de giro

	50% Vc		75%Vc	
Rev 1(0/90)	Rojas_orig	Rojas_dup	Rojas_orig	Rojas_dup
	13,66%	13,35%	12,84%	15,63%
	12,59%	12,68%	13,56%	14,33%
	10,47%	10,02%	12,46%	12,27%
	11,00%	11,54%	12,92%	12,23%
	12,01%	12,12%	13,54%	13,05%
	11,90%	12,00%	14,34%	11,83%
Rev 2 (75/15)	14,65%	13,81%	15,41%	15,42%
	14,47%	11,77%	14,74%	14,21%
	12,45%	12,60%	12,61%	11,45%
	12,49%	10,71%	13,16%	11,78%
	12,84%	10,91%	13,06%	10,66%
	11,31%	11,67%	10,20%	9,72%
Rev 3 (50/15)	12,48%	12,44%	13,56%	12,56%
	12,54%	12,20%	13,77%	12,87%
	11,50%	9,97%	13,94%	12,51%
	11,86%	12,49%	12,27%	12,41%
	12,11%	13,03%	14,32%	13,51%
	11,79%	13,27%	12,03%	13,51%

Las siguientes tablas resumen el análisis de varianza para cada sección longitudinal analizada. Se ha decidido utilizar $\alpha = 0,05$.

Los valores f_0 de la tabla deben ser contrastados con $f_{0.05,2,6} = 5,14$ y $f_{0.05,1,6} = 5,99$ para concluir sobre los efectos principales de tipo de revestimiento y velocidad sobre la segregación de la carga.

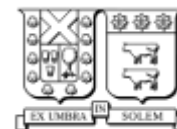


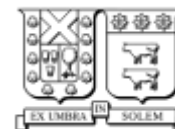
Tabla 32 Análisis de varianza para cálculo multifactorial - Velocidad y Tipo de revestimiento (ángulo de ataque)

Sección 1							
Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	Fo	P	1-P	Respuesta
Tipo Revestimiento	9,E-04	2	4,E-04	5,33	0,05	0,95	1
Velocidad	2,E-04	1	2,E-04	2,62	0,16	0,84	1
Interacción	2,E-05	2	1,E-05	0,12	0,89	0,11	1
Error	5,E-04	6	8,E-05				
Total	2,E-03	11					

Sección 2							
Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	Fo	P	1-P	Respuesta
Tipo Revestimiento	2,E-04	2	9,E-05	1,20	0,36	0,64	1
Velocidad	4,E-04	1	4,E-04	5,75	0,05	0,95	1
Interacción	1,E-05	2	5,E-06	0,07	0,94	0,06	1
Error	5,E-04	6	8,E-05				
Total	1,E-03	11					

Sección 3							
Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	Fo	P	1-P	Respuesta
Tipo Revestimiento	2,E-04	2	1,E-04	2,01	0,21	0,79	1
Velocidad	6,E-04	1	6,E-04	11,39	0,01	0,99	1
Interacción	5,E-04	2	3,E-04	5,35	0,05	0,95	1
Error	3,E-04	6	5,E-05				
Total	2,E-03	11					

Sección 4							
Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	Fo	P	1-P	Respuesta
Tipo Revestimiento	2,E-05	2	1,E-05	0,22	0,81	0,19	1
Velocidad	2,E-04	1	2,E-04	3,47	0,11	0,89	1
Interacción	7,E-05	2	3,E-05	0,64	0,56	0,44	1
Error	3,E-04	6	5,E-05				
Total	6,E-04	11					



Sección 5							
Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	Fo	P	1-P	Respuesta
Tipo Revestimiento	4,E-04	2	2,E-04	2,04	0,21	0,79	1
Velocidad	2,E-04	1	2,E-04	2,34	0,18	0,82	1
Interacción	1,E-04	2	6,E-05	0,60	0,58	0,42	1
Error	6,E-04	6	9,E-05				
Total	1,E-03	11					

Sección 6							
Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	Fo	P	1-P	Respuesta
Tipo Revestimiento	9,E-04	2	5,E-04	5,012	0,05	0,95	1
Velocidad	8,E-07	1	8,E-07	0,008	0,93	0,07	1
Interacción	4,E-04	2	2,E-04	1,998	0,22	0,78	1
Error	6,E-04	6	9,E-05				
Total	2,E-03	11					

Tabla 33 Porcentaje de datos que acepta la hipótesis nula bolas rojas

Variable	No rechaza hipótesis nula
Tipo revestimiento	100%
Velocidad	100%
Interacción	100%

Para el caso de bolas rojas, en el 100% de los casos se no se rechaza la hipótesis nula, es decir, el revestimiento ni la velocidad influyen en el comportamiento de la segregación de la carga y además, no existe interacción entre las dos variables.

Era de esperarse que las bolas mostrarán un comportamiento influenciado por las variables introducidas. El análisis sí mostro algunos resultados con respecto a las bolas de menor tamaño, pero nada con respecto a las bolas de mayor tamaño. Se debe considerar en este punto, que evalúa solamente dos variables quías no resulta del todo certero, ya que dentro de la variable revestimiento existen dos subcategorías y además se debe evaluar la influencia que tiene la ubicación de la partícula en el momento en que esta siendo segregada.



4.1.4.4 Modelo para bolas negras y análisis del ángulo de ataque.

Del análisis multifactorial se encuentra que las bolas rojas acepta la hipótesis nula en un 100% tanto en el análisis del tipo de revestimiento (ángulo de ataque), velocidad e interacción. Lo interesante es que, para los mismos experimentos, las bolas negras sí presentaron rechazo de la hipótesis nula en varios casos, encontrándonos con el siguiente cuadro resumen de resultados.

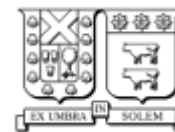
Variable	Aceptación hipótesis nula
Tipo revestimiento	67%
Velocidad	88%
Interacción	56%

Con esta información y con la herramienta regresión de análisis de datos de Excel, podemos calcular un modelo que explique el comportamiento de bolas negras, encontrar coeficientes y determinar cuál es la variable que más impacta en los resultados. Este análisis se realiza ya que, tenemos resultados que no son absolutos y considerando que la respuesta del revestimiento tres (3) no concuerda para nada con lo encontrado en los otros casos, es válido cuestionarse la influencia de los factores.

Junto a lo anterior, solo queda hacer un análisis grupal de los datos para conocer el comportamiento del ángulo de ataque. Esto se debe a que los tres casos presentados poseen distinto ángulo (90° , 70° y 50°) lo cual no permite realizar comparaciones aislando factores.

Se utiliza, por tanto, la ubicación de la partícula, es decir, en qué sección del molino se encuentra, junto al ángulo de ataque, avance y velocidad del molino. Para efectos de cálculo, se utiliza el promedio de las dos mediciones (original y duplicado). Lo anterior se puede realizar sin problemas debido a que se aceptó la hipótesis nula para la mayoría de los casos en la evaluación de repetitividad de experimentos.

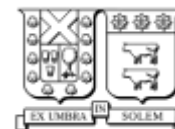
Para este análisis, se consideró el valor de la partícula, que corresponde al promedio de la masa de bolas del experimento original y duplicado para cada sección. La ubicación nos indica en qué sección del molino se encuentra la masa determinada. Además, cada porcentaje de masa se asocia al revestimiento utilizado, determinando cuál es el ángulo de ataque y avance del revestimiento y a qué velocidad fue realizado el experimento, permitiendo determinar la tabla a continuación.



Para la primera línea de datos, por ejemplo, se tiene que en el experimento en el cual se utilizó el revestimiento con un ángulo de ataque de 50°, un ángulo de avance de 15° girando a un 50% de V_c , se encontró en la sección 1, un 13,5% de bolas negras en promedio en los dos experimentos (original y duplicado). Así sucesivamente para todos los datos.

Tabla 34 Datos para determinación de modelo experimental de bolas negras

Partícula	Ubicación	Ataque	Velocidad	Avance	Modelo
11,9%	1	50	50	15	8,4%
8,9%	1	50	70	15	6,4%
6,7%	1	70	50	15	10,4%
3,2%	1	70	70	15	8,4%
7,0%	1	90	50	0	8,3%
6,9%	1	90	70	0	6,3%
12,5%	2	50	50	15	10,3%
10,5%	2	50	70	15	8,3%
10,2%	2	70	50	15	12,3%
7,5%	2	70	70	15	10,3%
10,1%	2	90	50	0	10,3%
7,8%	2	90	70	0	8,3%
12,4%	3	50	50	15	12,2%
11,5%	3	50	70	15	10,2%
15,5%	3	70	50	15	14,2%
10,9%	3	70	70	15	12,2%
13,9%	3	90	50	0	12,2%
10,0%	3	90	70	0	10,2%
13,2%	4	50	50	15	14,1%
11,3%	4	50	70	15	12,1%
17,6%	4	70	50	15	16,1%
17,4%	4	70	70	15	14,1%
16,7%	4	90	50	0	14,1%
10,9%	4	90	70	0	12,1%
14,1%	5	50	50	15	16,1%
12,6%	5	50	70	15	14,0%
21,3%	5	70	50	15	18,1%
20,7%	5	70	70	15	16,1%
18,2%	5	90	50	0	16,0%
11,7%	5	90	70	0	14,0%
13,8%	6	50	50	15	18,0%



13,4%	6	50	70	15	16,0%
18,3%	6	70	50	15	20,0%
20,7%	6	70	70	15	18,0%
15,6%	6	90	50	0	18,0%
17,0%	6	90	70	0	16,0%

Seguidamente y con el apoyo de la herramienta regresión de Excel es posible determinar los coeficientes para cada factor, encontrándonos con los datos que siguen. El procedimiento anterior a este, es realizar una estandarización de datos la cual permitirá hacer comparaciones en magnitud y determinar qué factores son los que predominan en el modelo lineal encontrado

La estandarización es como sigue:

$$\text{dato estandarizado} = \frac{\text{dato original} - \text{promedio del set de datos}}{\text{desviación estándar del set de datos}}$$

Se calcula por tanto el promedio de los datos correspondiente a partícula, ubicación, ángulo de ataque, ángulo de avance y velocidad y su consiguiente desviación estándar permitiendo determinar los coeficientes corregidos.

Tabla 35 Coeficientes del modelo experimental de bolas negras

<i>Coeficientes</i>	
Intercepción	-4,07E-16
Ubicación	0,77
Ataque	0,31
Velocidad	-0,23
Avance	0,36

La ecuación lineal corresponde a:

$$\text{Modelo} = \text{Intercepción} + 0,77 * \text{Ubicación} + 0,31 * \text{Ataque} \\ - 0,23 * \text{Velocidad} + 0,36 * \text{Avance}$$

Según el análisis, el factor que más influye es la ubicación de la partícula, es decir, en que parte del molino se encuentra. Este factor es inherente al experimento. Dentro del resto de los parámetros, se observa que el ángulo de avance y de ataque posee un coeficiente similar con 0,31 y 0,36. A su vez la velocidad influye negativamente en el modelo con un coeficiente de -0,23.

Se obtuvo el ajuste del modelo, quedando:

Tabla 36 Tabla resumen estadística de regresión modelo bolas negras

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación múltiple	0,83
Coefficiente de determinación R^2	0,69
R^2 ajustado	0,65
Error típico	0,59
Observaciones	36

Los datos indican que el modelo tiene un valor de ajuste R^2 de 0,69. Tanto el valor de la partícula, que corresponde al valor promedio del dato original y de su duplicado, como el valor de la partícula modelada son graficados para visualizar la similitud en los valores.

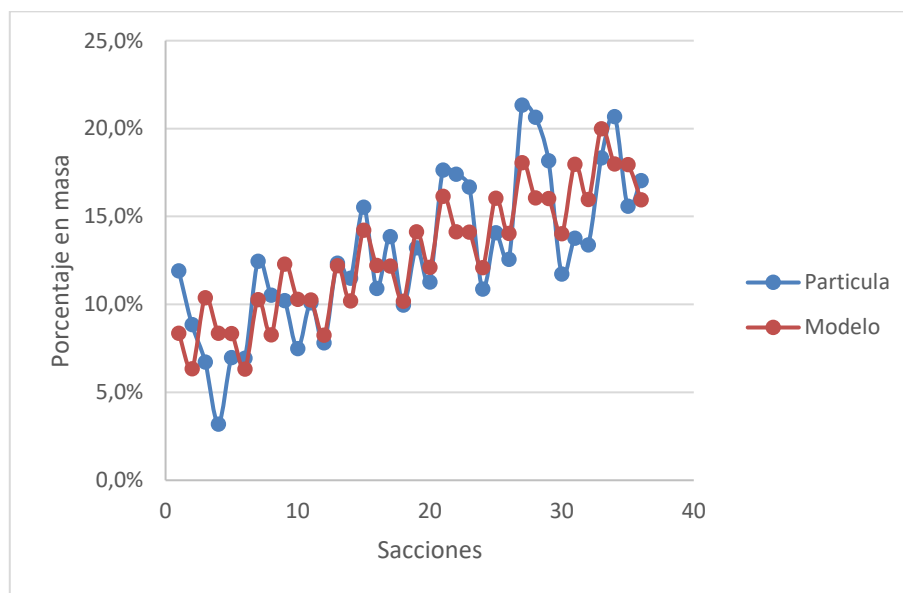
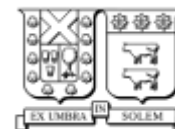


Figura 43 Gráfico valor de la partícula y del modelo experimental de bolas negras

Finalmente se determina la desviación estándar media de lo encontrado, el cual representa el error del modelo con respecto a los datos originales, encontrándonos con un error de 33%.

Se puede asegurar que algo de éxito tiene este modelo por el ajuste que encontramos de 0,69 aunque un valor de 33% de error es alto para determinar que existe un comportamiento modelable. Aquí se debe considerar el error inherente del experimento que bordea el 10 -11 %.



Ahora bien, considerando que el revestimiento tres (3) es el que peores resultados tuvo en cuanto a repetitividad de datos, si se elimina todo el set de datos que nos aportó el revestimiento, nos encontramos con que el modelo alcanza una desviación estándar de un 25%

4.1.4.5 Modelo para bolas rojas y análisis del ángulo de ataque.

El mismo protocolo de análisis es aplicado a las bolas rojas con el fin de determinar los porcentajes de ajuste del modelo y su consiguiente modelamiento.

Resultan los coeficientes corregidos.

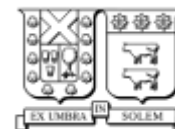
Tabla 37 Coeficientes del modelo experimental de bolas rojas

<i>Coeficientes</i>	
Intercepción	2,4E-15
Ubicación	-0,49
Ataque	0,34
Velocidad	-0,04
Avance	-0,02

Nuevamente, con los coeficientes encontrados, se calcula los valores del modelo para cada caso, permitiendo determinar la validez de este resultado.

Tabla 38 34 Datos para determinación de modelo experimental de bolas rojas

Partícula	Ubicación	Ataque	Velocidad	Avance	Modelo
12,46%	1	50	50	15	13,06%
13,06%	1	50	70	15	13,85%
14,23%	1	70	50	15	13,03%
15,42%	1	70	70	15	13,81%
13,51%	1	90	50	0	13,11%
14,23%	1	90	70	0	13,89%
12,37%	2	50	50	15	12,73%
13,32%	2	50	70	15	13,51%
13,12%	2	70	50	15	12,69%
14,48%	2	70	70	15	13,48%
13,51%	2	90	50	0	12,78%
13,95%	2	90	70	0	13,56%



10,74%	3	50	50	15	12,40%
13,22%	3	50	70	15	13,18%
12,52%	3	70	50	15	12,36%
12,03%	3	70	70	15	13,15%
10,24%	3	90	50	0	12,44%
12,37%	3	90	70	0	13,23%
12,18%	4	50	50	15	12,06%
12,34%	4	50	70	15	12,85%
11,60%	4	70	50	15	12,03%
12,47%	4	70	70	15	12,81%
11,27%	4	90	50	0	12,11%
12,57%	4	90	70	0	12,90%
12,57%	5	50	50	15	11,73%
13,91%	5	50	70	15	12,52%
11,87%	5	70	50	15	11,70%
11,86%	5	70	70	15	12,48%
12,06%	5	90	50	0	11,78%
13,29%	5	90	70	0	12,56%
12,53%	6	50	50	15	11,40%
12,77%	6	50	70	15	12,18%
11,49%	6	70	50	15	11,36%
9,96%	6	70	70	15	12,15%
11,95%	6	90	50	0	11,45%
13%	6	90	70	0	12,23%

Tabla 39 Tabla resumen estadística de regresión modelo bolas rojas

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación múltiple	0,60
Coefficiente de determinación R²	0,37
R² ajustado	0,29
Error típico	0,01
Observaciones	36

El porcentaje de error del modelo para bolas rojas es de un 7,7% lo cual es menor incluso que el error mismo del experimento. Lo curioso es que el valor ajustado del R² es menor que en el caso de bolas negras. Esto se puede deber a que pueden existir puntos que estén muy alejados y que no representen completamente al modelo. En este sentido, en el gráfico es fácil

determinar cuáles son esos puntos que no se ajustan, los cuales pueden ser eliminados de la evaluación para mejorar ajuste.

Se grafica los valores de los datos reales y del modelo para conocer estas discrepancias.

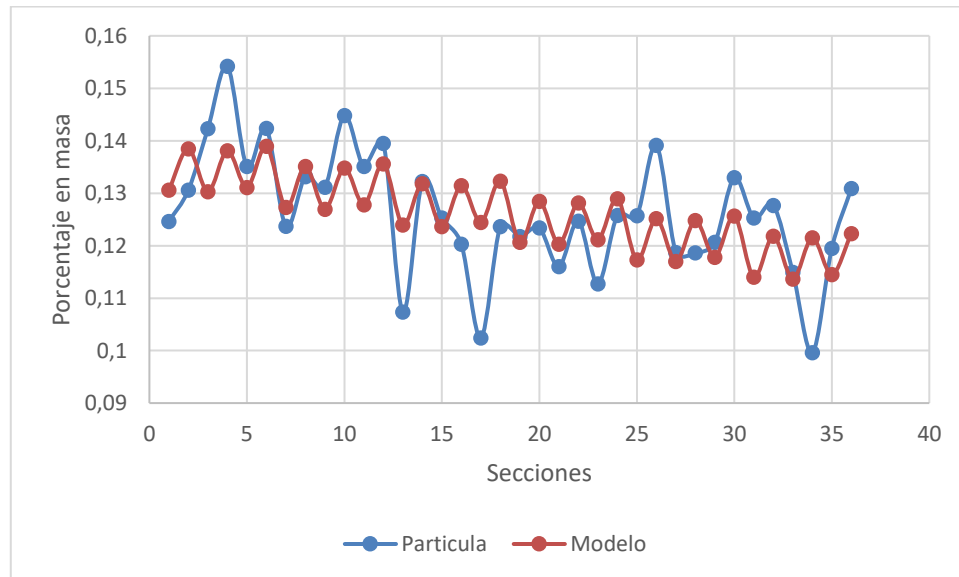


Figura 44 Gráfico valor de la partícula y del modelo experimental de bolas rojas

En el caso de bolas rojas, no se observa tendencia clara. Puede concluirse que no existe segregación o que hay muy poca segregación hacia el lado derecho del molino.



5 CONCLUSIONES

Los experimentos llevados a cabo han mostrado que no es sencillo obtener la información con respecto a la distribución axial de las bolas a pesar de que los esfuerzos se concentraron en este punto con el desarrollo de una técnica y un estándar de medición. Los efectos que se observaron pueden resultar de una serie de combinaciones y condiciones, dificultando la visualización de una posible solución al problema de segregación.

En primer lugar, el método escogido nos obliga a tener que descartar los datos de las primeras y últimas secciones del molino, debido a que las tapas generan un quiebre en la tendencia de los datos, disminuyendo la probabilidad de éxito de las mediciones.

Los resultados de análisis de comportamiento de segregación de la carga no son claros en cuanto a la influencia del ángulo de avance en la masa de bolas encontradas en cada sección. En este sentido, se encontraron mejores resultados de segregación medidos en el levantador que no poseía ángulo de avance que en el revestimiento tres que sí poseía. Esto se puede explicar por el bajo ángulo de ataque de este revestimiento tres lo que podría impedir el movimiento de la carga en general por tener un punto de impacto muy bajo y que las partículas no tengan la oportunidad de ser afectadas por el riñón de la carga.

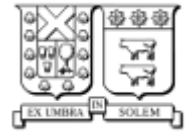
A su vez, los mejores resultados se encontraron en el revestimiento número dos (2) que posee ángulo de avance de 15% y ángulo de ataque de 70°. Este escenario es muy favorable, debido a que estas son las condiciones operaciones que más se asemejan a una operación industrial. No debemos olvidar que el motivo principal del estudio es lograr determinar condiciones operacionales y de diseño que permitan una organización de partículas dentro del molino, para que los medios molidores coincidan en tamaño con las partículas que deben ser molidas, permitiendo reducción de tamaño más efecto, con menos pérdida de energía y la posibilidad de disminuir los tiempos de residencia del material sin afectar la granulometría y con esto alcanzar volumen de procesamiento mayor en un periodo de tiempo igual. Además, se consideran exitosos los resultados para este caso en particular, debido a que nos estamos acercando a las condiciones esperadas, tanto en el comportamiento aislado de las partículas como en su comportamiento general.



Con respecto a los modelos lineales encontrados, se determinó que la segregación se pueden modelar bajo ciertos índices o coeficientes que impactan sobre el modelo, encontrándonos con un nivel de ajuste del 0,69% para bolas negras y de 0,28% para bolas rojas. A pesar de que las bolas rojas tienen bajo ajuste del modelo, poseen una desviación estándar del error muy bajas, incluso más bajo que el error inherente al experimento. Esto se explica debido a que se evaluaron puntos en los cuales los resultados están alejados al comportamiento general del experimento. En bolas negras, el modelo tiene un ajuste mucho más aceptable, pero el error del modelo bordea el 33% lo cual está sobre los rangos aceptables.

En general, se concluye que el modelo experimental funciona para realizar evaluación debido a que tiene una repetitividad comprobada con el análisis de Fisher y su rechazo de la hipótesis nula. Además, la influencia del ángulo de avance se visualiza en algunos casos en particular, principalmente en la evaluación de las condiciones operacionales a escala industrial, visualizando una gran segregación de bolas de ambos tamaños. A pesar de esto, no se llega a un resultado en el cual no pueda ser refutado el hecho de que la incorporación de este ángulo favorece el proceso de segregación, porque no es un fenómeno permanente en las condiciones estudiadas.

Se debe por tanto, seguir profundizando en el análisis de la segregación e intentando nuevos métodos de evaluación para determinar condiciones favorables para la industria. Lo que es claro, es que si se sigue evaluando el ángulo de avance en las condiciones operacionales industriales y que en esta investigación mostramos resultados favorables, esto puede resultar en una realidad en la implementación, ya que, la incorporación de esta variable no resulta en gran inversión, sino más bien en un rediseño que se podría implementar a corto plazo.



6 RECOMENDACIONES

Esta investigación es una aproximación a los resultados que se plantearon en la hipótesis. Los recursos limitados con los cuales se contaba, no posibilitaron, por ejemplo, aislar algunas variables de interés para ser estudiadas con más detalle. En este sentido, algunas implementaciones adicionales pueden dar un mejor panorama de las ventajas que se pueden obtener al utilizar la segregación como parámetro operacional. Dentro de las recomendaciones se tiene:

- Incluirle al levantador caso base el ángulo de avance de 15° para comparar de forma aislada el comportamiento del ángulo de ataque.
- Diseñar revestimiento manteniendo el ángulo de ataque y variando el ángulo de avance.
- Realizar experimentos con otras velocidades, y por sobre todo, velocidades intermedias entre $50\%V_c$ y $75\%V_c$ para ver la evolución de los resultados en esos rangos de velocidades.

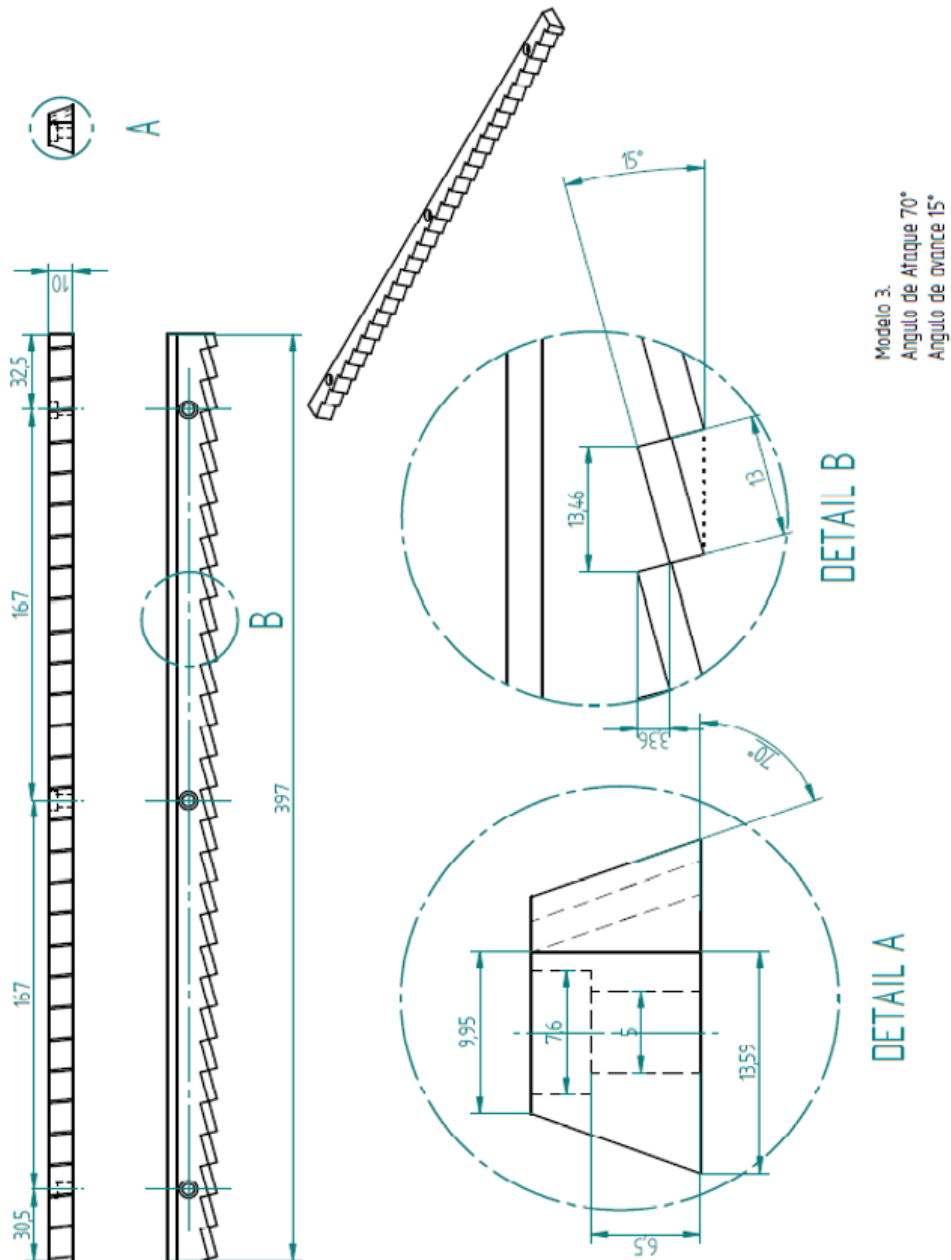


ANEXO A

PLANOS REVESTIMIENTOS

Los planos presentados en esta sección, son de la autoría del autor Venegas y pueden ser visualizados en su trabajo de investigación [24]

A.1 Plano Revestimiento número dos (2)



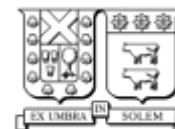
[illegible]



ANEXO B

TABLAS DATOS EXPERIMENTALES

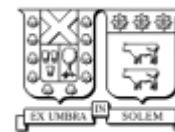
APLICACIÓN MEDIA MÓVIL (N=3)



B.1 Revestimiento 1 – 75% Vc – Distribución Bolas Rojas – Distribución Bolas Negras

Tabla 40 Datos experimentales para Revestimiento uno (1) a velocidad de giro 75% Vc. Datos ajustados con método Media Móvil (N=3)

Sección	Experimento 1				Experimento 2			
	Masa Bolas Rojas	MM N=3	Masa Bolas Negras	MM N=3	Masa Bolas Rojas	MM N=3	Masa Bolas Negras	MM N=3
1	23,9	19,5	28	22,73	34	27,6	20,6	16,97
2	15,1	16,0	21,8	18,37	19,8	26,6	14,3	15,17
3	19,6	20,5	18,4	16,37	28,9	31,3	16	14,27
4	13,2	23,2	14,9	13,77	31	32,4	15,2	13,70
5	28,8	27,4	15,8	10,97	34	30,8	11,6	10,60
6	27,7	26,8	10,6	8,37	32,1	31,3	14,3	9,40
7	25,8	27,2	6,5	7,60	26,4	33,9	5,9	7,37
8	26,8	27,3	8	8,17	35,5	35,1	8	7,73
9	29,1	27,2	8,3	8,17	39,8	34,7	8,2	7,33
10	25,9	25,2	8,2	7,93	30	33,0	7	7,43
11	26,6	24,9	8	7,63	34,3	33,2	6,8	7,23
12	23	26,9	7,6	8,70	34,6	31,9	8,5	7,97
13	25	29,0	7,3	9,50	30,8	29,7	6,4	7,10
14	32,8	30,9	11,2	11,30	30,4	29,4	9	8,70
15	29,2	29,5	10	11,87	28	29,8	5,9	9,50
16	30,6	29,8	12,7	13,33	29,8	30,3	11,2	10,83
17	28,6	28,1	12,9	12,63	31,5	28,4	11,4	9,83
18	30,1	25,8	14,4	12,33	29,7	26,1	9,9	9,37
19	25,6	23,9	10,6	12,23	24	23,6	8,2	9,53
20	21,6	22,2	12	13,17	24,5	23,5	10	10,73
21	24,5	23,1	14,1	13,43	22,4	23,1	10,4	11,03
22	20,4	25,4	13,4	12,87	23,5	24,5	11,8	11,73
23	24,5	27,5	12,8	12,27	23,4	26,1	10,9	11,43
24	31,3	29,3	12,4	12,07	26,5	29,4	12,5	13,77
25	26,8	29,2	11,6	12,70	28,5	28,4	10,9	13,40
26	29,7	29,0	12,2	13,63	33,1	28,6	17,9	14,17
27	31	28,3	14,3	13,53	23,5	26,6	11,4	12,03
28	26,4	26,2	14,4	12,67	29,2	28,0	13,2	12,93
29	27,6	27,8	11,9	12,57	27,2	28,3	11,5	14,97
30	24,7	29,6	11,7	12,27	27,7	28,7	14,1	15,70
31	31,1	31,1	14,1	12,03	29,9	27,1	19,3	19,97
32	32,9	30,5	11	11,50	28,5	26,1	13,7	21,63
33	29,3	30,1	11	14,37	22,9	24,3	26,9	26,50
34	29,2	28,7	12,5	15,83	26,8	26,6	24,3	27,07
35	31,7	29,0	19,6	18,73	23,2	23,1	28,3	28,77
36	25,1	25,2	15,4	19,57	29,8	20,5	28,6	28,27
37	30,2	22,3	21,2	22,77	16,4	17,3	29,4	29,23
38	20,3	19,4	22,1	26,37	15,2	15,2	26,8	24,67
39	16,5	16,5	25	25	20,4	20,4	31,5	31,50
40	21,5	21,5	32	32			15,7	15,70



B.2 Revestimiento 2 – 50% Vc – Distribución Bolas Rojas – Distribución Bolas Negras

Tabla 41 Datos experimentales para Revestimiento dos (2) a velocidad de giro 50% Vc. Datos ajustados con método Media Móvil (N=3)

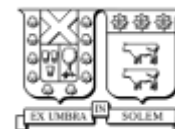
Sección	Experimento 1				Experimento 2			
	Masa Bolas Rojas	MM N=3	Masa Bolas Negras	MM N=3	Masa Bolas Rojas	MM N=3	Masa Bolas Negras	MM N=3
1	38,2	33,6	2	1,93	38,5	36,0	2	2,3
2	26,4	33,6	2,1	2,23	32,2	37,4	1,8	2,9
3	36,2	36,6	1,7	2,17	37,3	41,3	3,1	4,0
4	38,3	37,8	2,9	2,83	42,7	40,8	3,9	4,9
5	35,2	35,9	1,9	3,20	44	36,3	5	5,8
6	39,8	34,2	3,7	4,37	35,7	31,7	5,7	6,3
7	32,7	30,9	4	5,07	29,2	29,7	6,7	8,2
8	30,1	28,9	5,4	5,43	30,2	31,6	6,4	10,9
9	29,8	27,8	5,8	6,07	29,6	30,8	11,6	12,1
10	26,8	30,6	5,1	7,83	35	29,6	14,7	12,6
11	26,7	32,6	7,3	9,40	27,7	26,1	10	12,5
12	38,2	33,5	11,1	10,07	26,2	26,0	13,2	12,4
13	33	31,0	9,8	10,73	24,5	24,4	14,4	12,8
14	29,4	27,0	9,3	10,83	27,3	26,8	9,6	13,6
15	30,6	26,3	13,1	13,00	21,5	27,3	14,5	14,6
16	20,9	23,6	10,1	13,23	31,5	31,2	16,6	16,8
17	27,3	28,6	15,8	17,17	28,9	29,3	12,8	16,7
18	22,7	27,3	13,8	18,57	33,3	29,0	20,9	19,2
19	35,8	27,1	21,9	21,33	25,6	25,8	16,4	19,6
20	23,5	22,8	20	20,93	28,2	24,5	20,3	18,9
21	22	24,3	22,1	20,50	23,7	21,1	22	16,9
22	22,8	25,6	20,7	19,77	21,7	21,3	14,3	15,1
23	28	27,8	18,7	21,27	17,9	23,7	14,3	19,1
24	26,1	26,1	19,9	23,97	24,3	25,9	16,6	21,1
25	29,2	26,1	25,2	26,27	28,9	26,9	26,5	23,1
26	23	28,6	26,8	28,23	24,6	24,6	20,1	22,5
27	26,2	30,6	26,8	29,33	27,1	23,4	22,8	22,5
28	36,7	28,7	31,1	29,33	22,1	22,7	24,6	21,4
29	28,8	24,5	30,1	27,70	21,1	24,8	20,1	21,6
30	20,7	21,0	26,8	25,07	25	25,5	19,4	22,7
31	24	22,4	26,2	23,70	28,3	26,1	25,2	24,4
32	18,4	22,8	22,2	22,10	23,3	24,7	23,6	22,2
33	24,7	25,3	22,7	22,33	26,6	26,4	24,5	21,3
34	25,2	23,4	21,4	19,43	24,2	26,1	18,6	20,3
35	25,9	23,8	22,9	19,90	28,3	26,3	20,7	19,4
36	19,1	22,8	14	18,40	25,9	24,4	21,7	16,2
37	26,4	26,4	22,8	22,80	24,7	24,1	15,7	13,6
38					22,5	24,7	11,3	13,6
39					25,2	25,2	13,8	14,8
40					26,5	26,5	15,7	15,7



B.3 Revestimiento 2 – 75% Vc – Distribución Bolas Rojas – Distribución Bolas Negras

Tabla 42 Datos experimentales para Revestimiento dos (2) a velocidad de giro 75% Vc. Datos ajustados con método Media Móvil (N=3)

Sección	Experimento 1				Experimento 2			
	Masa Bolas Rojas	MM N=3	Masa Bolas Negras	MM N=3	Masa Bolas Rojas	MM N=3	Masa Bolas Negras	MM N=3
1	32,5	35,2	3,8	3,63	30,9	29,7	3,5	2,87
2	37,6	36,8	3,1	3,23	29	33,6	1,6	2,63
3	35,4	35,4	4	3,37	29,1	36,9	3,5	2,93
4	37,4	33,1	2,6	3,10	42,8	37,5	2,8	2,53
5	33,4	31,3	3,5	3,17	38,9	34,6	2,5	2,30
6	28,4	33,1	3,2	3,13	30,9	31,9	2,3	2,27
7	32,1	32,8	2,8	3,43	34,1	33,1	2,1	2,77
8	38,7	31,7	3,4	3,80	30,8	32,1	2,4	3,17
9	27,5	27,3	4,1	4,37	34,5	33,1	3,8	3,57
10	28,9	30,0	3,9	4,83	31	34,2	3,3	3,57
11	25,6	31,0	5,1	6,67	33,7	35,2	3,6	5,13
12	35,4	32,3	5,5	8,30	37,9	33,6	3,8	7,13
13	32	29,7	9,4	9,73	34	29,5	8	8,43
14	29,6	28,9	10	9,47	29	27,6	9,6	9,03
15	27,5	26,2	9,8	9,13	25,6	25,5	7,7	8,73
16	29,6	26,0	8,6	9,33	28,2	25,9	9,8	9,67
17	21,6	24,7	9	10,57	22,8	24,2	8,7	11,03
18	26,8	26,7	10,4	12,07	26,7	25,4	10,5	12,50
19	25,7	25,5	12,3	13,33	23,2	23,3	13,9	13,27
20	27,5	23,8	13,5	14,73	26,4	23,3	13,1	13,03
21	23,4	21,9	14,2	16,20	20,2	22,5	12,8	13,43
22	20,4	22,6	16,5	17,93	23,2	24,6	13,2	15,93
23	21,9	25,6	17,9	19,13	24,2	26,5	14,3	18,50
24	25,5	30,6	19,4	21,73	26,5	26,5	20,3	22,50
25	29,5	31,5	20,1	23,10	28,8	25,4	20,9	22,07
26	36,7	29,4	25,7	24,20	24,1	22,2	26,3	21,50
27	28,4	25,4	23,5	23,03	23,4	22,0	19	20,53
28	23,2	25,1	23,4	22,90	19	22,1	19,2	21,97
29	24,6	25,9	22,2	23,23	23,6	23,4	23,4	21,77
30	27,6	25,4	23,1	24,43	23,7	24,0	23,3	22,23
31	25,4	23,0	24,4	24,53	22,9	22,5	18,6	21,20
32	23,2	20,7	25,8	23,57	25,4	22,0	24,8	22,47
33	20,4	19,8	23,4	22,13	19,3	19,7	20,2	20,87
34	18,6	19,5	21,5	21,80	21,4	20,5	22,4	22,40
35	20,4	19,5	21,5	23,53	18,3	19,0	20	23,97
36	19,5	19,0	22,4	24,55	21,7	20,4	24,8	27,63
37	18,5	18,5	26,7	26,70	16,9	21,3	27,1	27,43
38					22,7	23,5	31	27,97
39					24,4	24,0	24,2	26,45
40					23,5	23,5	28,7	28,70



B.4 Revestimiento 3 – 50% Vc – Distribución Bolas Rojas – Distribución Bolas Negras

Tabla 43 Datos experimentales para Revestimiento tres (3) a velocidad de giro 50% Vc. Datos ajustados con método Media Móvil (N=3)

Sección	Experimento 1				Experimento 2			
	Masa Bolas Rojas	MM N=3	Masa Bolas Negras	MM N=3	Masa Bolas Rojas	MM N=3	Masa Bolas Negras	MM N=3
1	35,5	27,0	10,2	10,1	25,4	28,3	8,7	8,63
2	21,4	23,6	8,1	11,6	27	31,9	7,7	10,33
3	24,1	28,5	12	14,3	32,5	34,1	9,5	11,93
4	25,3	28,4	14,6	14,1	36,1	31,1	13,8	13,17
5	36	27,2	16,4	13,3	33,8	29,2	12,5	13,10
6	23,8	23,5	11,2	13,1	23,4	27,9	13,2	13,73
7	21,9	23,7	12,3	13,5	30,4	27,4	13,6	12,90
8	24,7	26,2	15,7	15,3	29,9	25,8	14,4	11,73
9	24,4	25,1	12,4	14,5	21,8	25,4	10,7	11,23
10	29,5	28,0	17,7	15,2	25,8	28,1	10,1	13,67
11	21,4	27,1	13,3	14,3	28,7	29,3	12,9	14,87
12	33,1	27,5	14,5	13,8	29,7	28,3	18	15,07
13	26,7	24,4	15,1	13,4	29,6	27,0	13,7	13,00
14	22,8	23,2	11,8	14,5	25,5	24,6	13,5	13,27
15	23,7	24,8	13,3	16,1	25,8	22,8	11,8	12,67
16	23,2	24,7	18,3	16,6	22,6	22,8	14,5	13,57
17	27,4	24,2	16,6	14,6	19,9	20,9	11,7	12,20
18	23,4	22,7	14,9	14,0	25,8	21,7	14,5	13,17
19	21,8	22,1	12,4	13,5	17,1	20,3	10,4	13,17
20	22,8	22,8	14,8	14,0	22,3	22,2	14,6	14,83
21	21,8	22,4	13,4	13,3	21,4	24,4	14,5	15,43
22	23,8	23,0	13,7	13,3	22,9	26,5	15,4	16,33
23	21,7	22,9	12,9	13,5	28,9	27,7	16,4	16,07
24	23,4	24,9	13,3	14,2	27,7	27,8	17,2	15,87
25	23,5	27,0	14,4	15,2	26,4	28,7	14,6	16,57
26	27,7	26,6	14,9	15,4	29,4	29,0	15,8	16,93
27	29,9	26,7	16,4	16,2	30,3	26,6	19,3	17,27
28	22,3	24,9	15	16,1	27,2	27,0	15,7	17,30
29	27,8	23,2	17,3	15,4	22,2	27,4	16,8	14,63
30	24,6	21,3	15,9	14,1	31,6	31,0	19,4	16,13
31	17,1	21,6	12,9	14,2	28,4	31,5	7,7	16,43
32	22,3	23,3	13,6	13,9	33	30,1	21,3	20,20
33	25,3	24,0	16,2	13,2	33,2	27,9	20,3	18,30
34	22,3	24,2	11,9	13,6	24,2	26,0	19	16,70
35	24,5	26,3	11,6	15,2	26,3	28,0	15,6	14,37
36	25,9	26,4	17,4	15,3	27,6	27,5	15,5	14,03
37	28,4	26,8	16,7	12,8	30	26,3	12	13,60
38	24,9	28,6	11,9	10,3	25	25,6	14,6	14,83
39	27,1	30,5	9,7	9,6	23,9	25,9	14,2	14,95
40	33,8	33,8	9,4	9,4	27,8	27,8	15,7	15,7



B.5 Revestimiento 3 – 75% Vc – Distribución Bolas Rojas – Distribución Bolas Negras

Tabla 44 Datos experimentales para Revestimiento tres (3) a velocidad de giro 75% Vc. Datos ajustados con método Media Móvil (N=3)

Sección	Experimento 1				Experimento 2			
	Masa Bolas Rojas	MM N=3	Masa Bolas Negras	MM N=3	Masa Bolas Rojas	MM N=3	Masa Bolas Negras	MM N=3
1	21,1	18,8	30,1	19,3	21,1	25,9	19,7	16,7
2	16,8	20,7	13,7	13,6	23,4	29,2	17,7	20,9
3	18,5	28,4	14,1	10,4	33,3	29,6	12,7	19,9
4	26,9	29,5	12,9	7,5	30,8	27,1	32,3	18,6
5	39,7	27,7	4,3	6,3	24,8	26,8	14,7	12,6
6	21,8	23,0	5,2	7,4	25,7	26,0	8,7	12,3
7	21,5	26,5	9,5	7,2	29,8	27,6	14,4	12,9
8	25,6	27,3	7,4	6,7	22,5	28,1	13,8	12,7
9	32,4	30,3	4,8	6,5	30,5	30,4	10,5	12,8
10	23,8	27,1	8	7,4	31,2	29,2	13,7	13,5
11	34,6	27,3	6,7	8,7	29,4	26,8	14,1	12,7
12	23	22,9	7,5	8,5	26,9	25,7	12,7	12,9
13	24,2	26,3	12	8,7	24,2	27,6	11,3	14,1
14	21,5	27,8	6,1	8,2	25,9	31,6	14,7	16,7
15	33,2	31,9	8,1	10,2	32,6	33,0	16,4	17,1
16	28,6	32,1	10,3	10,8	36,3	31,7	18,9	17,0
17	34	29,6	12,3	11,0	30	29,2	15,9	16,0
18	33,6	26,6	9,8	9,7	28,9	28,2	16,1	14,9
19	21,1	24,2	11	9,9	28,6	26,8	16	14,0
20	25,2	25,3	8,4	11,1	27,1	24,8	12,7	13,4
21	26,4	24,4	10,4	12,4	24,6	26,6	13,4	12,9
22	24,4	24,5	14,6	12,6	22,6	26,5	14,2	12,2
23	22,3	23,3	12,3	11,4	32,7	27,9	11	12,0
24	26,8	24,3	10,9	11,4	24,3	28,0	11,5	13,0
25	20,8	24,9	11,1	12,2	26,8	30,4	13,4	14,6
26	25,2	26,3	12,1	13,4	32,9	30,0	14	15,5
27	28,7	29,1	13,4	14,3	31,5	28,2	16,4	15,0
28	25	29,2	14,7	14,0	25,7	29,7	16	14,0
29	33,7	29,8	14,9	12,3	27,4	30,8	12,5	13,8
30	28,9	27,2	12,4	13,1	35,9	33,1	13,4	13,5
31	26,8	24,2	9,7	13,6	29,1	31,6	15,6	13,5
32	25,8	24,1	17,1	14,3	34,4	31,2	11,4	12,1
33	20	23,0	13,9	14,5	31,4	28,7	13,6	12,9
34	26,6	23,4	11,9	16,7	27,7	29,9	11,3	13,8
35	22,5	24,2	17,8	19,6	26,9	30,5	13,9	15,9
36	21,1	21,6	20,5	20,5	35,2	30,0	16,3	15,9
37	29	19,4	20,4	21,4	29,3	26,5	17,5	16,3
38	14,7	12,6	20,7	25,8	25,6	22,3	14	15,7
39	14,4	11,6	23,2	23,2	24,7	20,6	17,5	16,6
40	8,8	8,8	33,5	33,5	16,5	16,5	15,7	15,7



ANEXO C

COMPORTAMIENTO DE REVESTIMIENTOS

GRAFICOS CON TAPAS

C.1 Comportamiento Revestimiento 90/0 a 75% Vc.

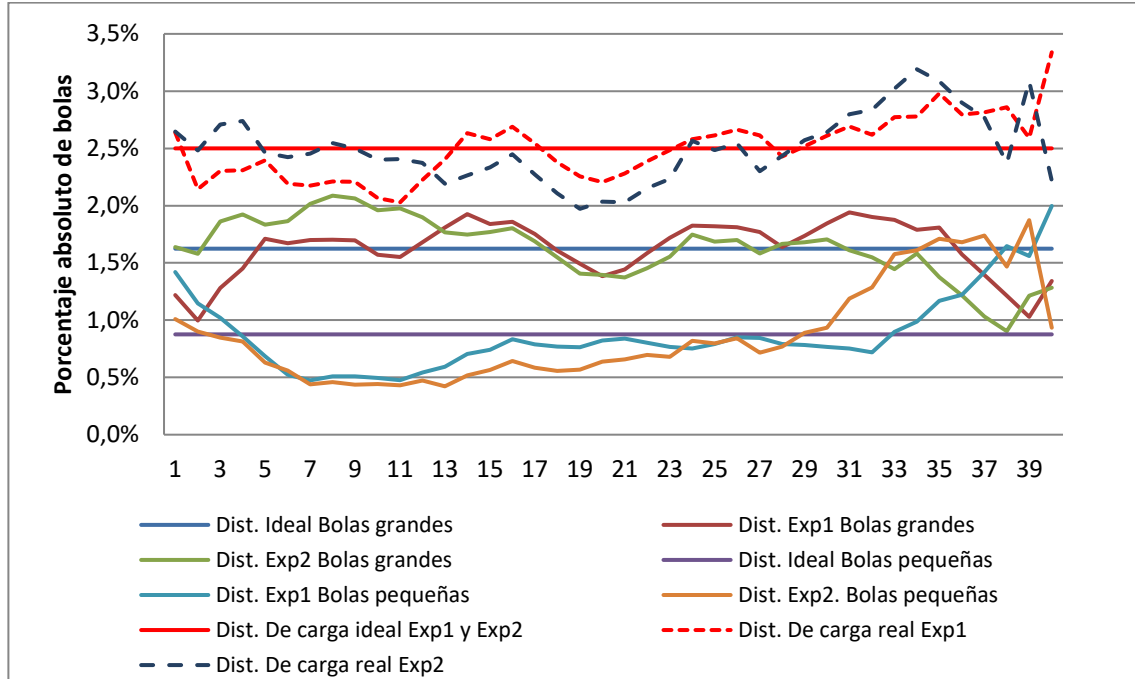


Figura 45 Comportamiento Revestimiento 90/0 a 75% Vc. Experimento 1 (original) y Experimento 2 (duplicado) con tapas

C.2 Comportamiento Revestimiento 70/15 a 50% Vc.

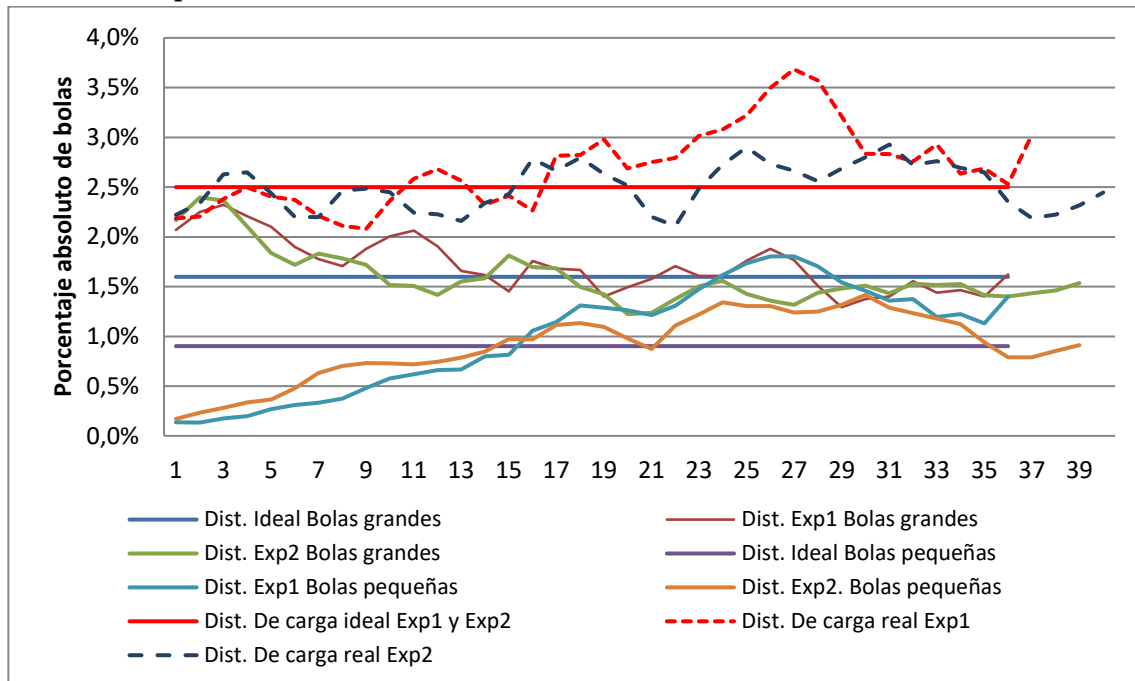


Figura 46 Comportamiento Revestimiento 70/15 a 50%Vc. Experimento 1 (original) y Experimento 2 (duplicado)

C.3 Comportamiento Revestimiento 70/15 a 75% Vc.

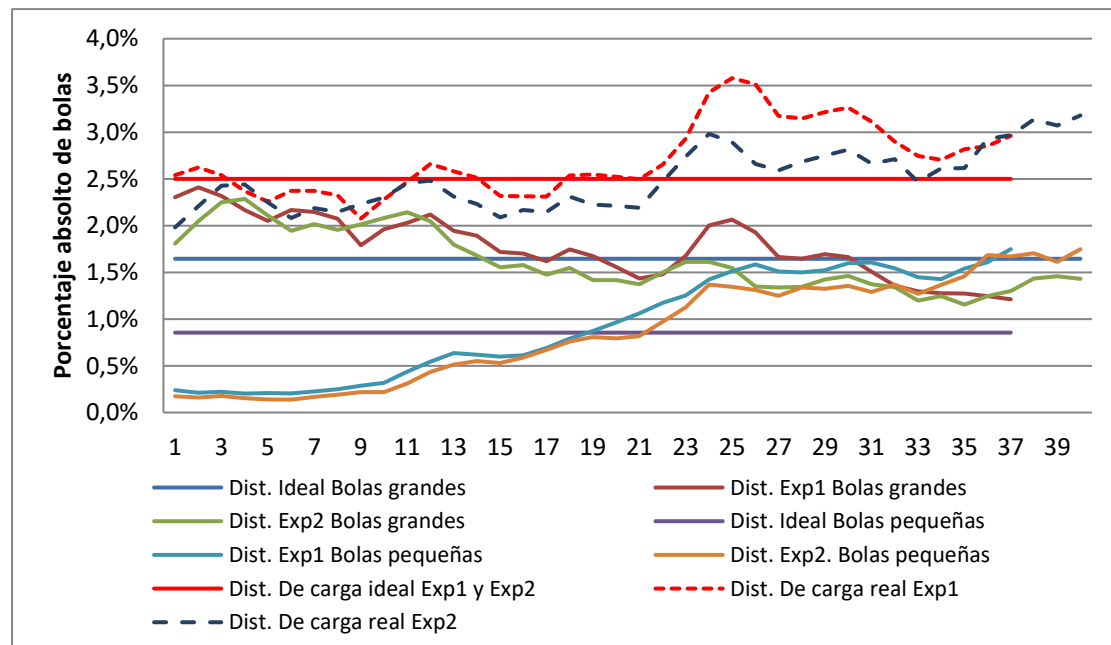


Figura 47 Comportamiento Revestimiento 70/15 a 75% Vc. Experimento 1 (original) y Experimento 2 (duplicado)

C.4 Comportamiento Revestimiento 50/15 a 50% Vc.

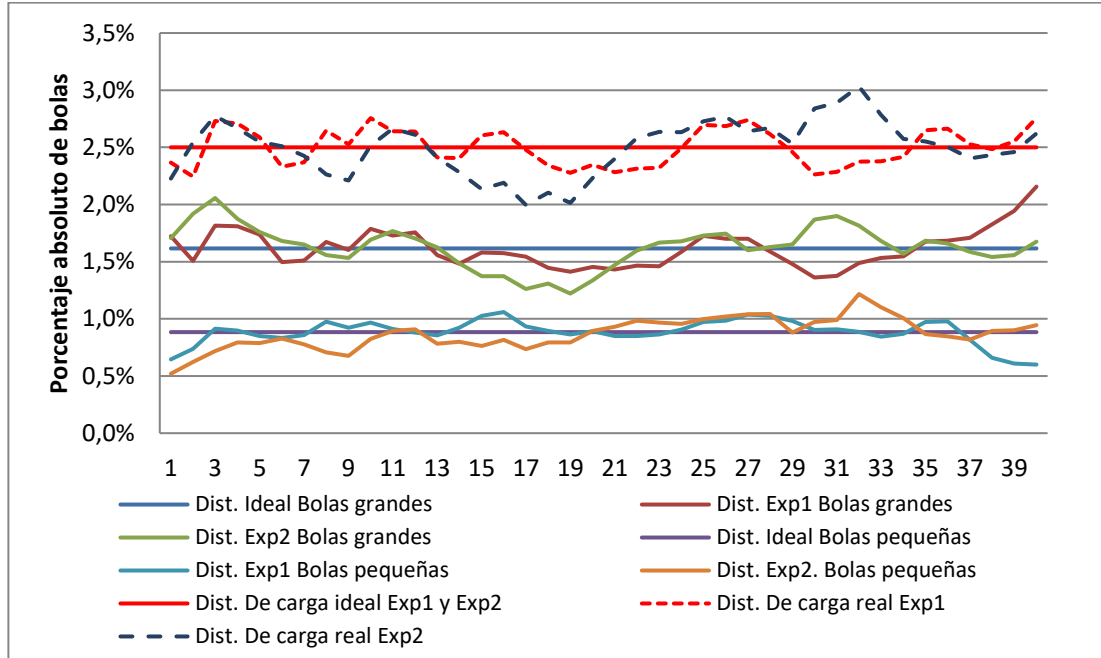


Figura 48 Comportamiento Revestimiento 50/15 a 50% Vc. Experimento 1 (original) y Experimento 2 (duplicado)

C. 5 Comportamiento Revestimiento 50/15 a 75% Vc.

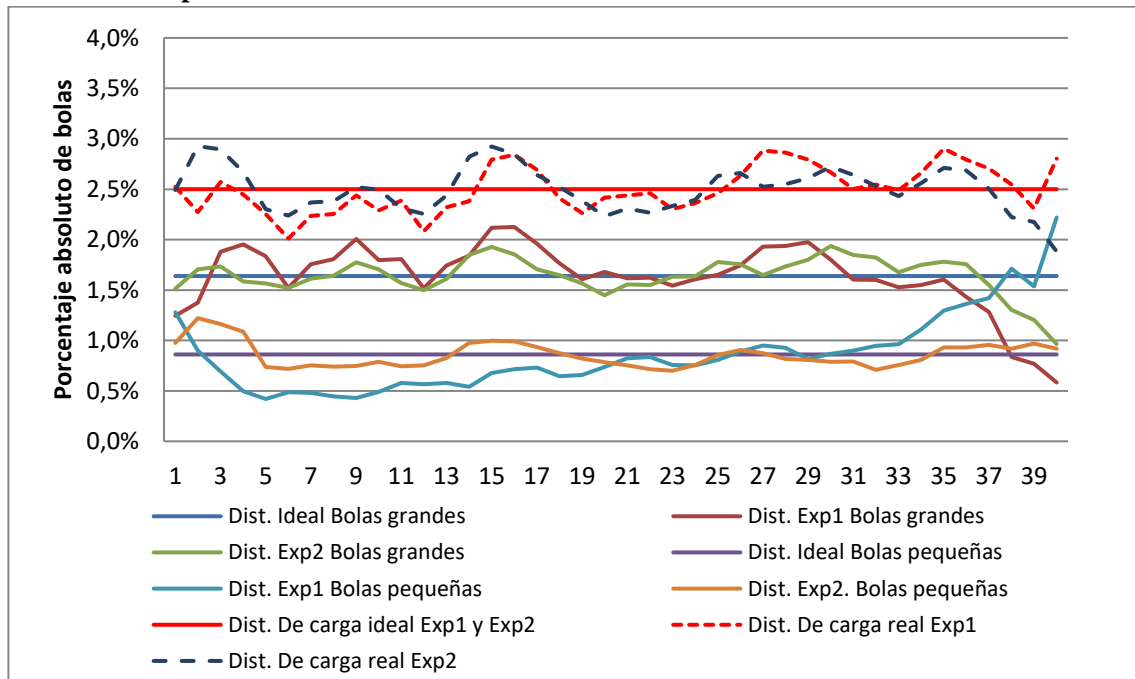


Figura 49 Comportamiento Revestimiento 50/15 a 75% Vc. Experimento 1 (original) y Experimento 2 (duplicado)



ANEXO D

COMPORTAMIENTO REVESTIMIENTOS

GRAFICOS SIN TAPAS

D.1 Comportamiento Revestimiento 90/0 a 75% Vc.

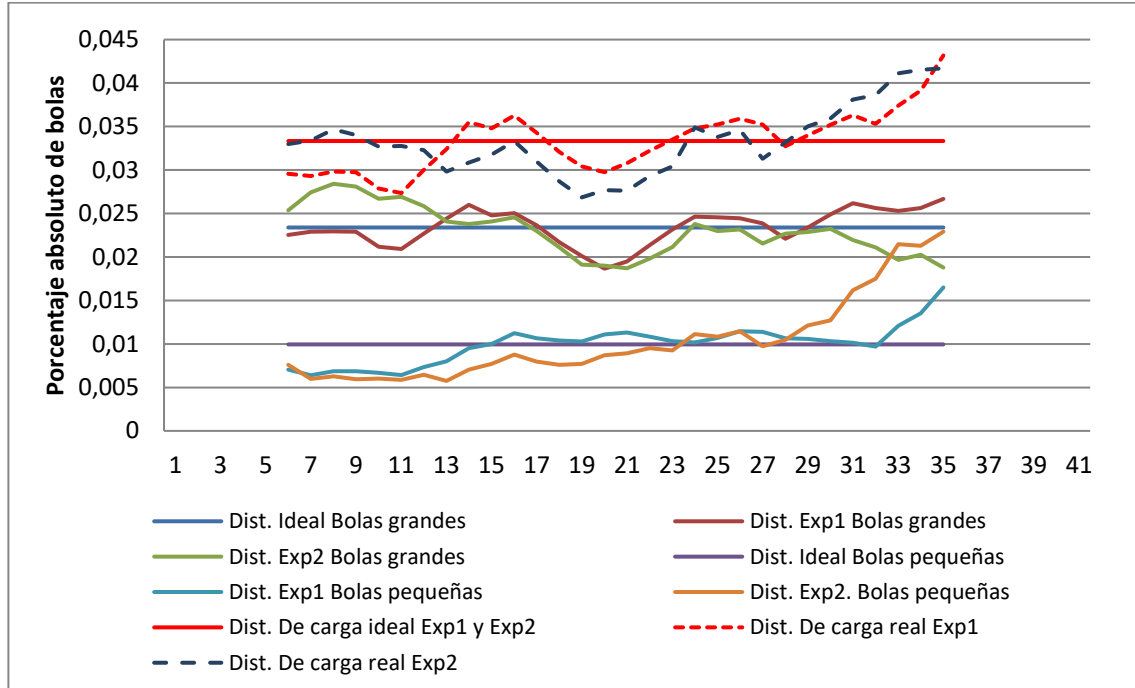


Figura 50 Comportamiento Revestimiento 90/0 a 75% Vc. Experimento 1 (original) y Experimento 2 (duplicado)

D.2 Comportamiento Revestimiento 70/15 a 50% Vc.

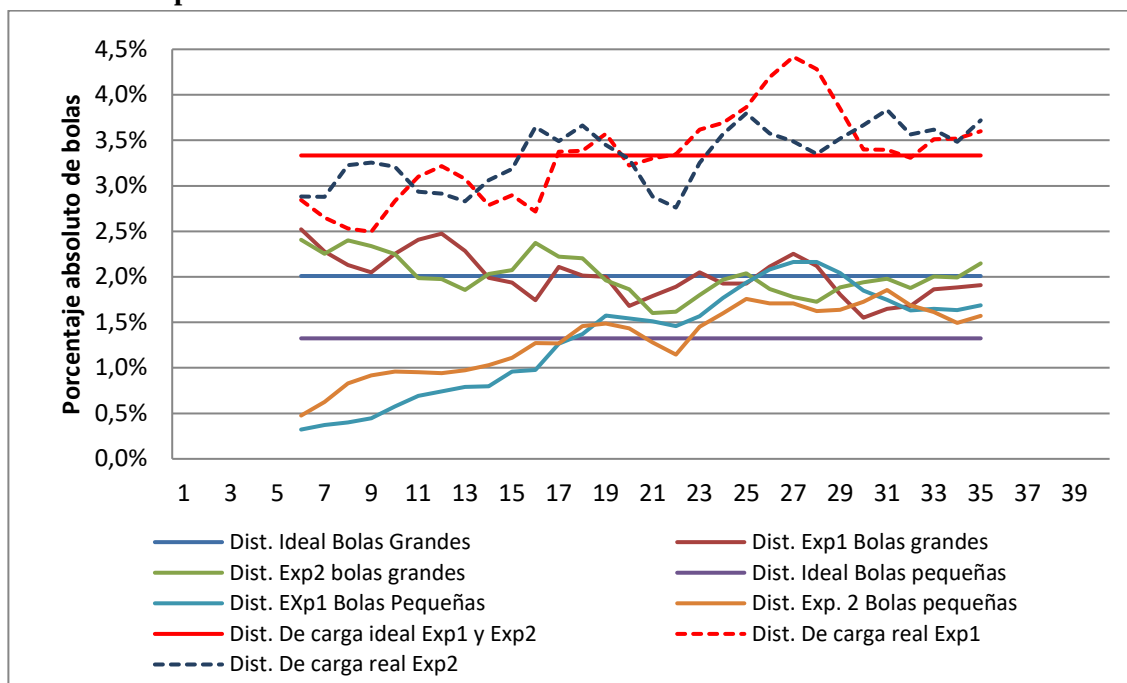


Figura 51 Comportamiento Revestimiento 70/15 a 50% Vc. Experimento 1 (original) y Experimento 2 (duplicado)

D.3 Comportamiento Revestimiento 70/15 a 75% Vc.

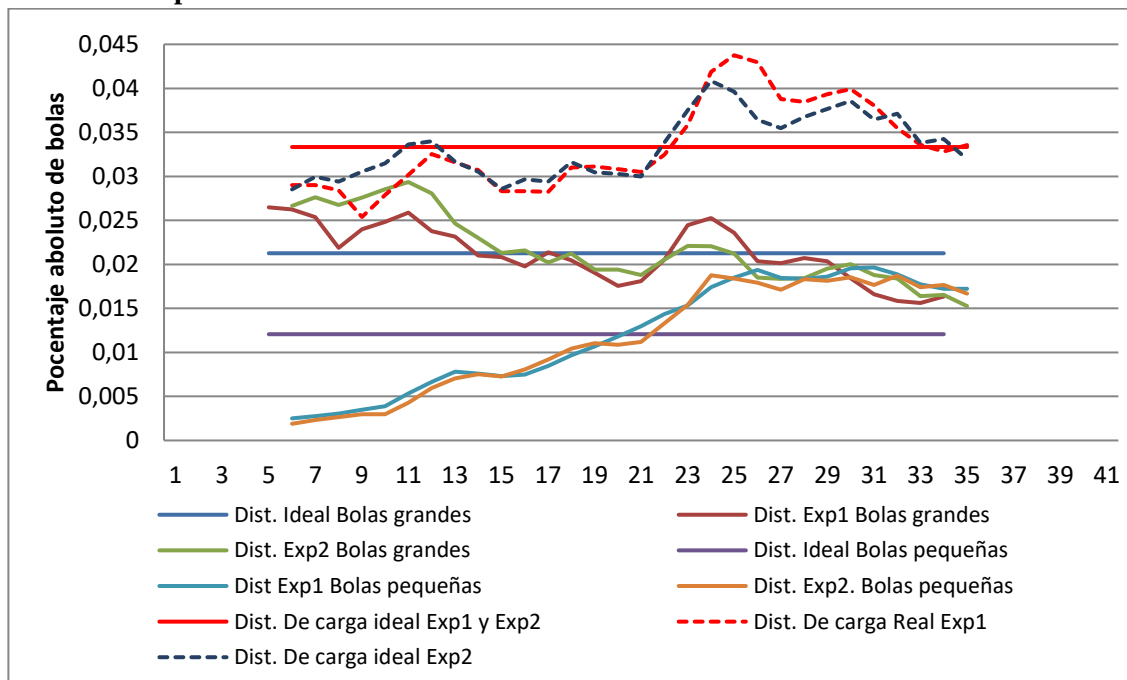


Figura 52 Comportamiento Revestimiento 70/15 a 75% Vc. Experimento 1 (original) y Experimento 2 (duplicado)

D.4 Comportamiento Revestimiento 50/15 a 50% Vc.

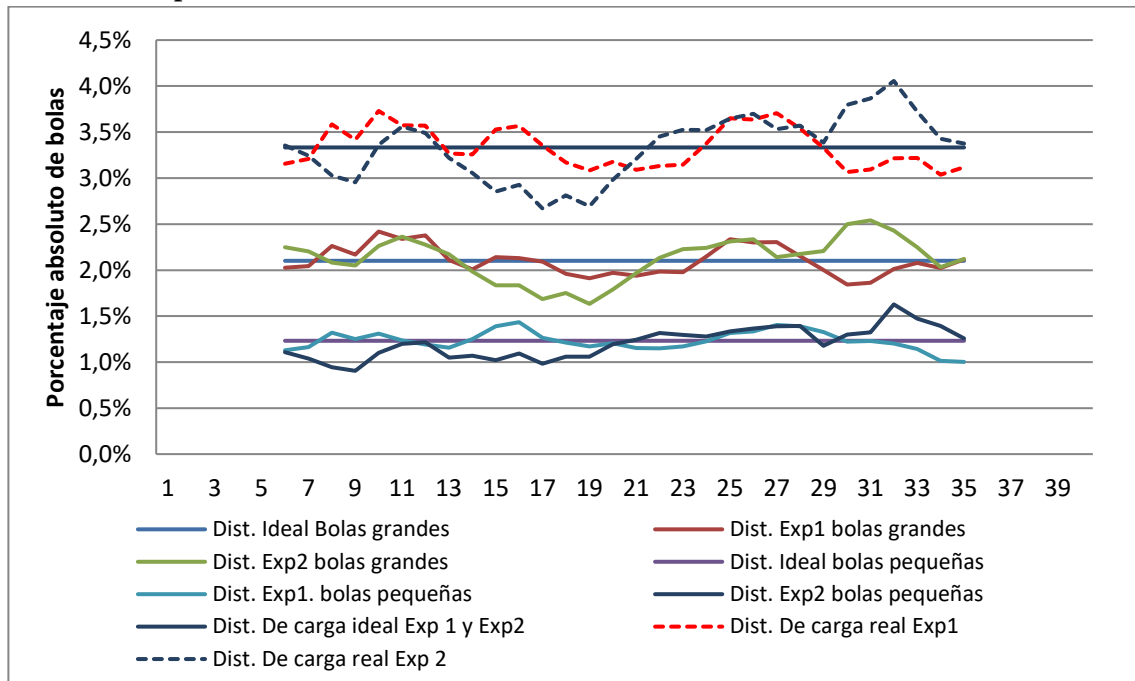


Figura 53 Comportamiento Revestimiento 50/15 a 50% Vc. Experimento 1 (original) y Experimento 2 (duplicado)

D.5 Comportamiento Revestimiento 50/15 a 75% Vc.

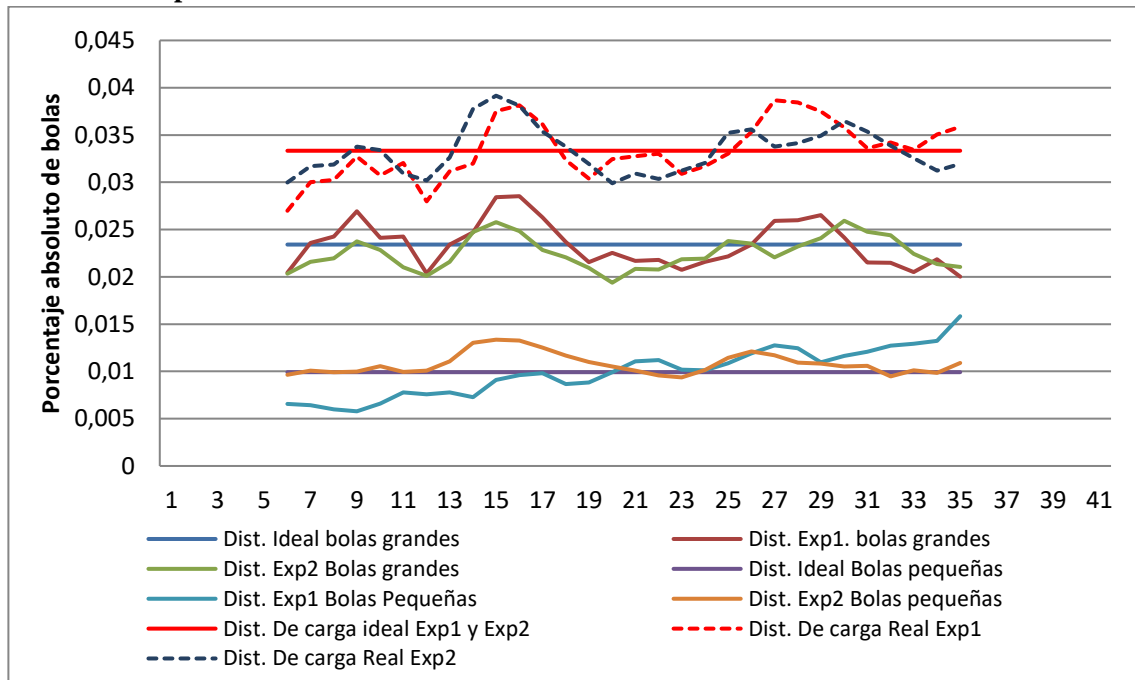


Figura 54 Comportamiento Revestimiento 50/15 a 75% Vc. Experimento 1 (original) y Experimento 2 (duplicado)



ANEXO E

SECUENCIAS FOTOGRÁFICAS

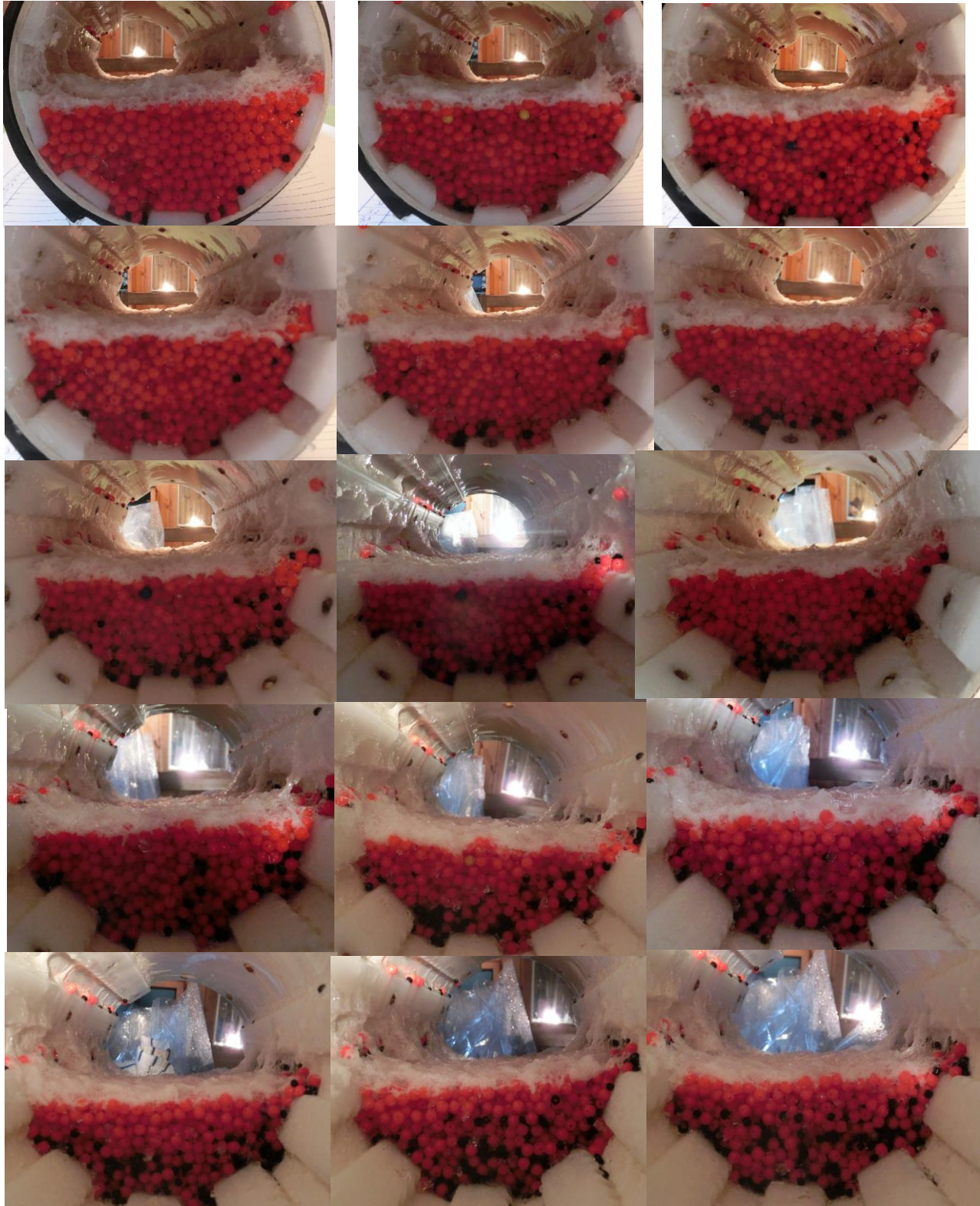


Figura 55 Experimento número dos (2) con el revestimiento 75/15 girando a un 50 % de la velocidad crítica. De izquierda a derecha y de arriba hacia abajo se observa Sección 1 a Sección 16

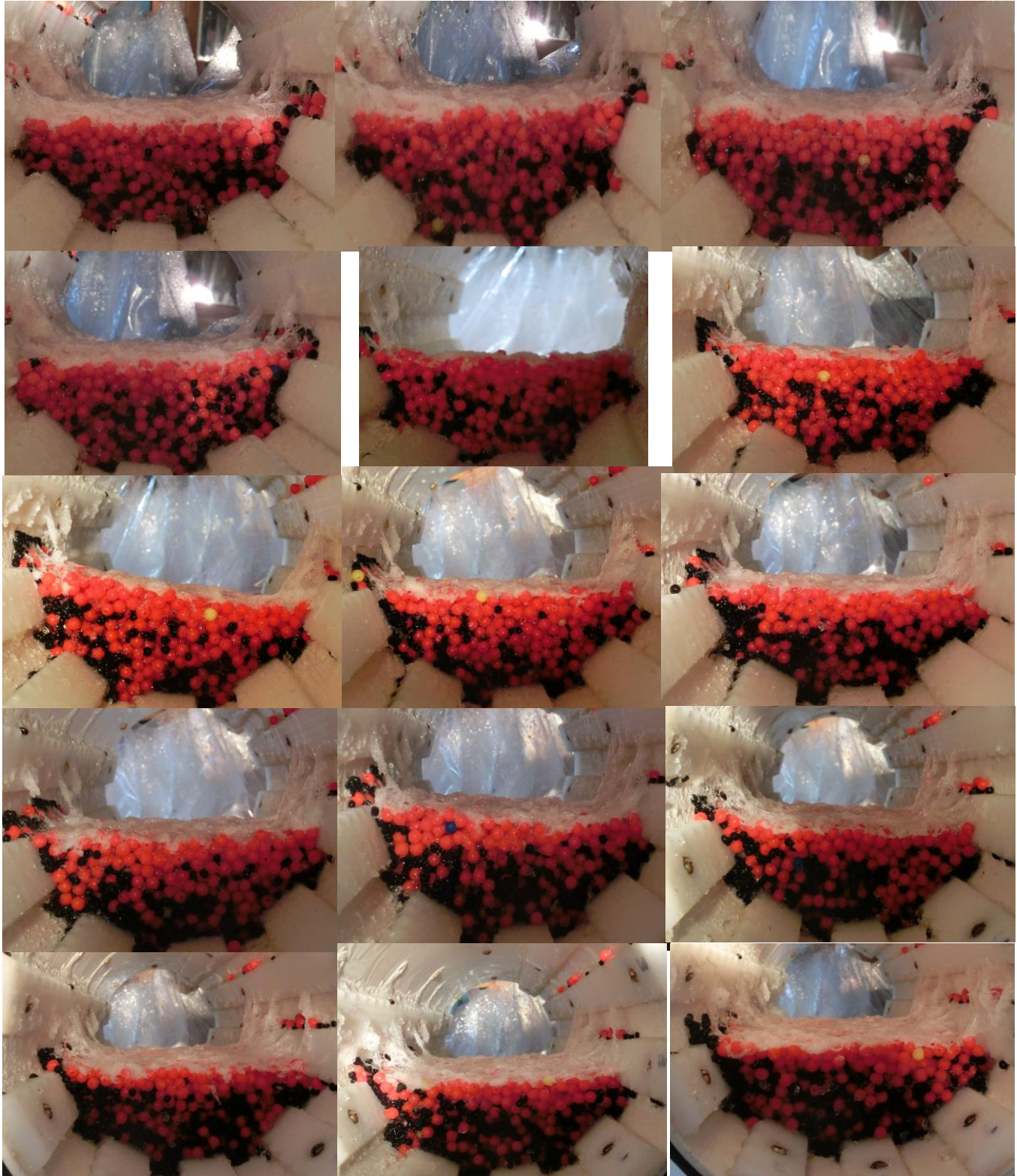


Figura 56 Experimento número dos (2) con el revestimiento 75/15 girando a un 50 % de la velocidad crítica. De izquierda a derecha y de arriba hacia abajo se observa Sección 17 a Sección 33

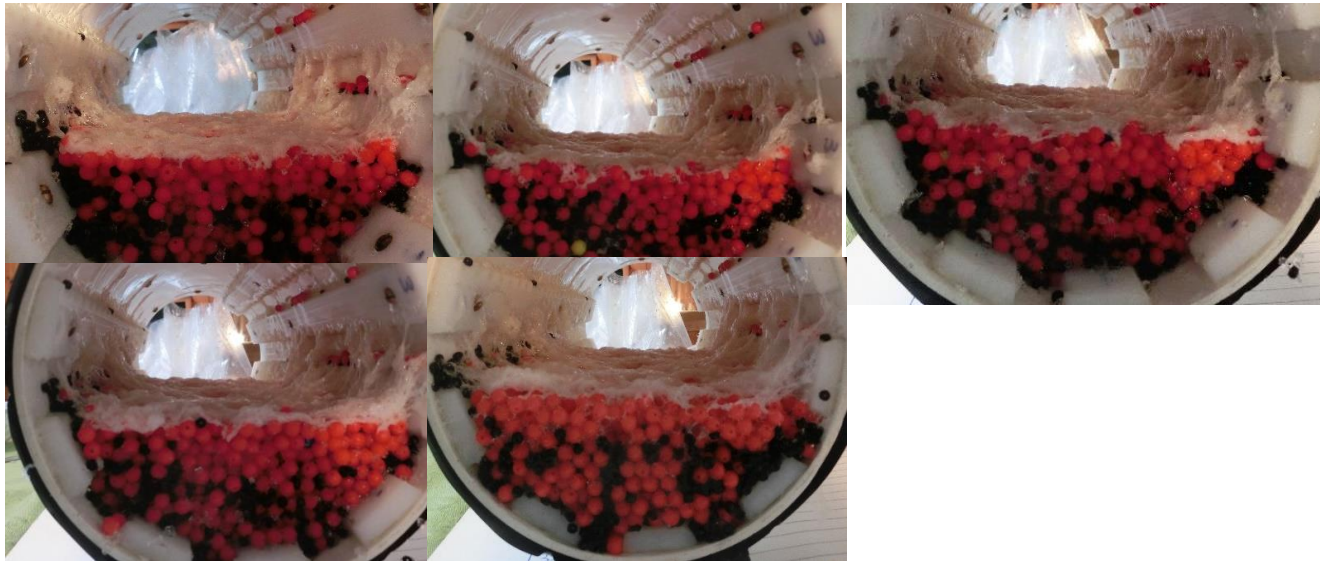


Figura 57 Experimento número dos (2) con el revestimiento 75/15 girando a un 50 % de la velocidad crítica. De izquierda a derecha y de arriba hacia abajo se observa Seccion 34 a Seccion 38

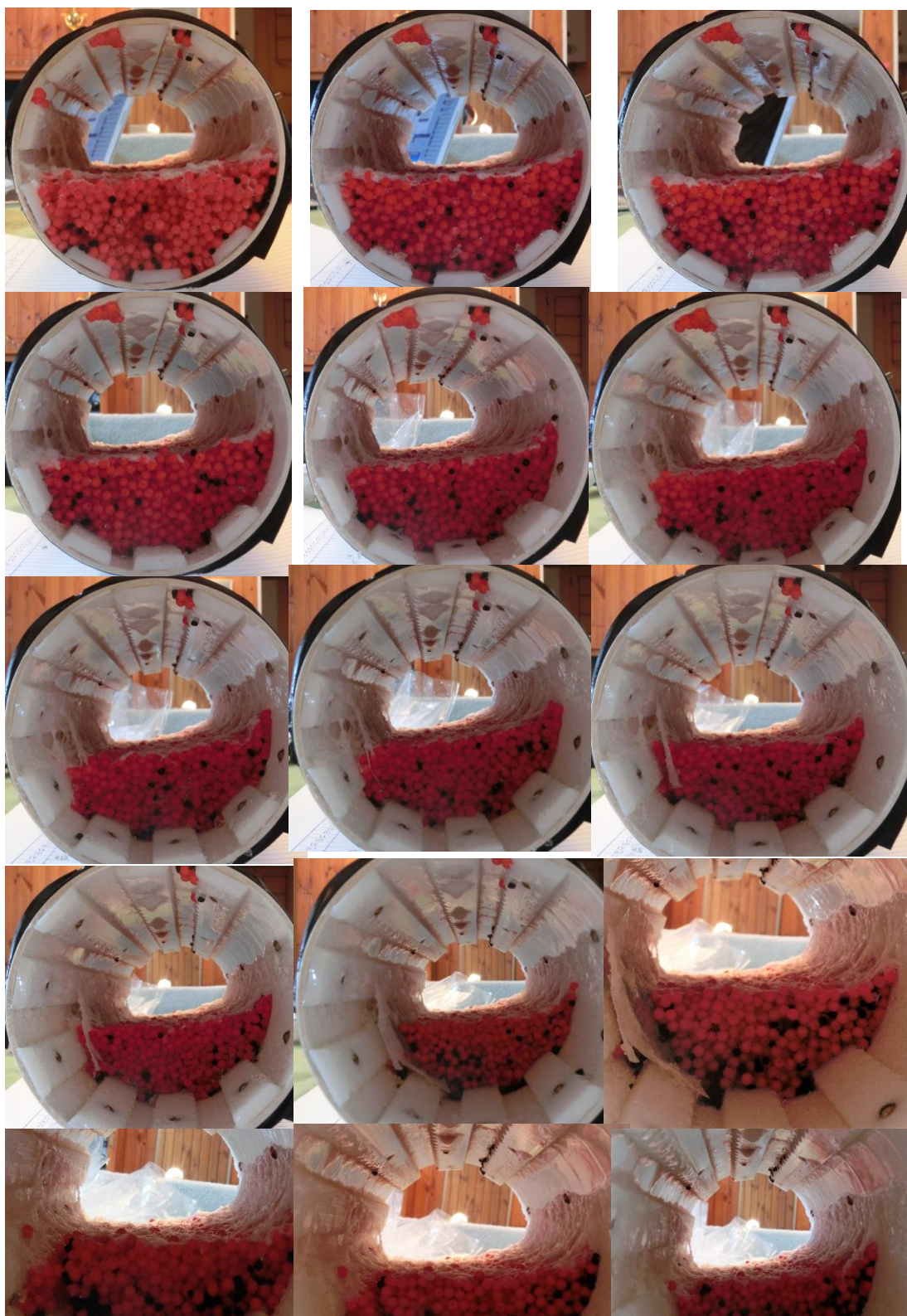


Figura 58 Experimento número uno (1) con el revestimiento 75/15 girando a un 75 % de la velocidad crítica. De izquierda a derecha y de arriba hacia abajo se observa Sección 1 a Sección 16



Figura 59 Experimento número uno (1) con el revestimiento 75/15 girando a un 75 % de la velocidad crítica. De izquierda a derecha y de arriba hacia abajo se observa Sección 17 a Sección 33

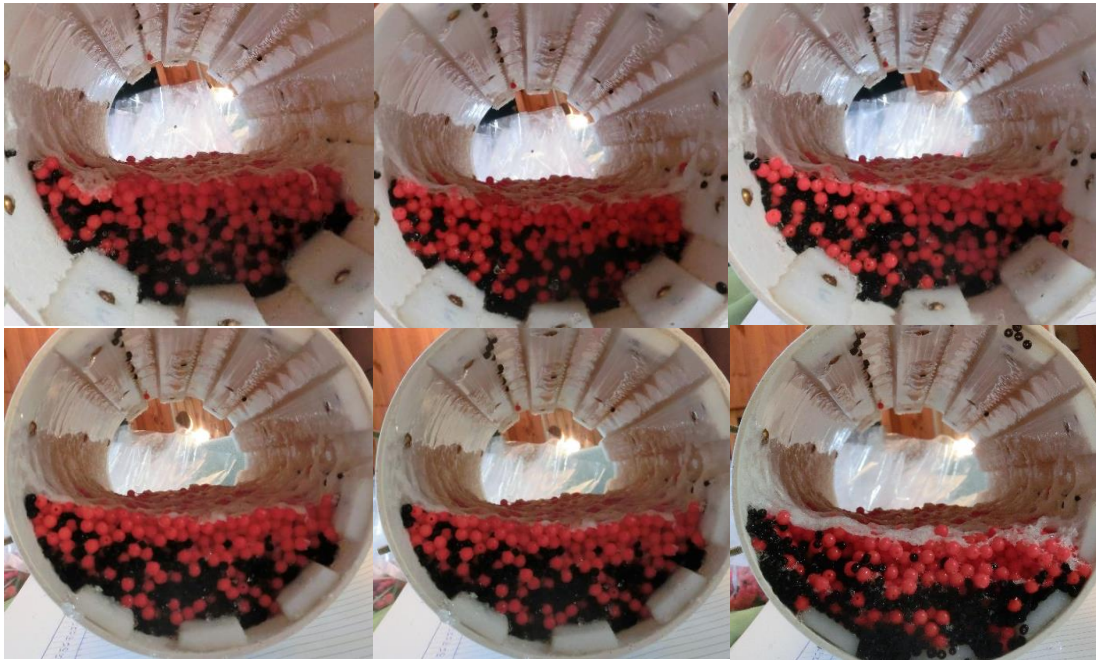


Figura 60 Experimento número uno (1) con el revestimiento 75/15 girando a un 75 % de la velocidad crítica. De izquierda a derecha y de arriba hacia abajo se observa Sección 34 a Sección 40



Figura 61 Experimento número dos (2) con el revestimiento 59/15 girando a un 50 % de la velocidad crítica. De izquierda a derecha y de arriba hacia abajo se observa Sección 1 a Sección 16



Figura 62 Experimento número dos (2) con el revestimiento 50/15 girando a un 50 % de la velocidad crítica. De izquierda a derecha y de arriba hacia abajo se observa Sección 17 a Sección 33

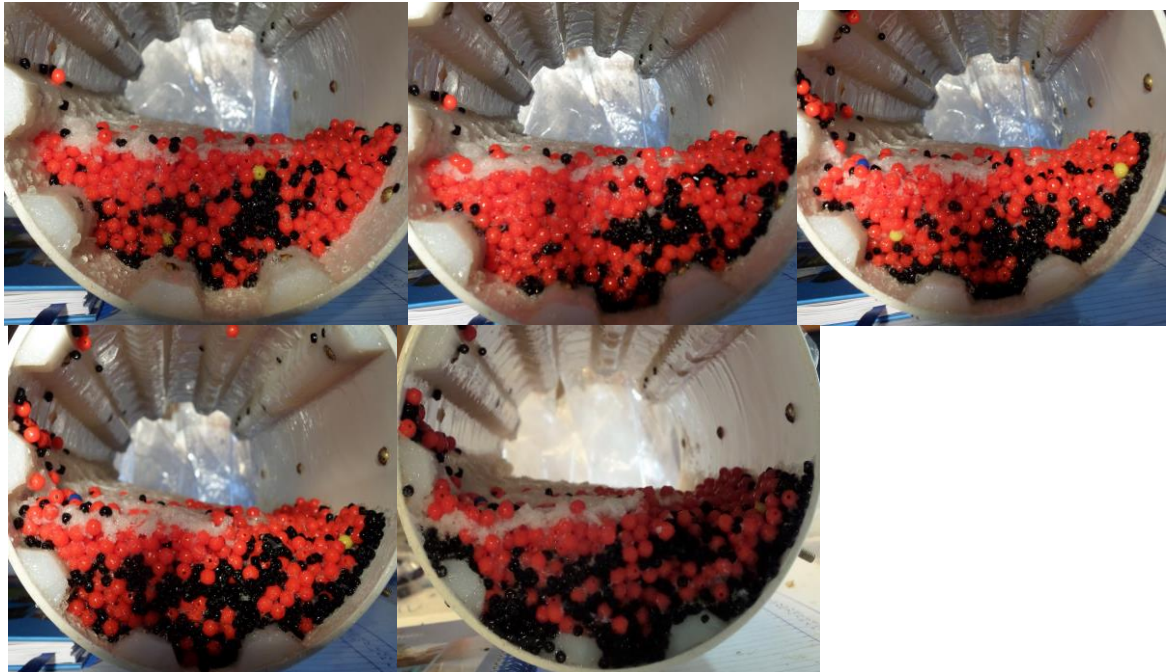


Figura 63 Experimento número dos (2) con el revestimiento 50/15 girando a un 50 % de la velocidad crítica. De izquierda a derecha y de arriba hacia abajo se observa Sección 34 a Sección 39



Figura 64 Experimento número dos (2) con el revestimiento 50/15 girando a un 75 % de la velocidad crítica. De izquierda a derecha y de arriba hacia abajo se observa Sección 1 a Sección 16



Figura 65 Experimento número dos (2) con el revestimiento 50/15 girando a un 75 % de la velocidad crítica. De izquierda a derecha y de arriba hacia abajo se observa Sección 16 a Sección 31



Figura 66 Experimento número dos (2) con el revestimiento 50/15 girando a un 75 % de la velocidad crítica. De izquierda a derecha y de arriba hacia abajo se observa Sección 32 a Sección 40



ANEXO F

ANOVA PARA ANÁLISIS DE MUESTRAS EN DUPLICADO

Tabla 45 Analisis de varianza para análisis de muestra en duplicado Rev1 50%Vc - Bolas Rojas

Secciones	Factor F calculado	P	1-P	Factor de confianza	Respuesta
1	83,39	0,01	0,99	0,95	0
2	9,20	0,09	0,91	0,95	0
3	0,03	0,88	0,12	0,95	0
4	604,65	0,00	1,00	0,95	1
5	29,20	0,03	0,97	0,95	0
6	0,62	0,51	0,49	0,95	0
7	5,21	0,15	0,85	0,95	0
8	5,42	0,15	0,85	0,95	0
9	18,87	0,05	0,95	0,95	0
10	2,86	0,23	0,77	0,95	0
11	3,29	0,21	0,79	0,95	0
12	14,03	0,06	0,94	0,95	0
13	53,59	0,02	0,98	0,95	1
14	2,39	0,26	0,74	0,95	0
15	1,01	0,42	0,58	0,95	0
16	0,17	0,72	0,28	0,95	0
17	0,39	0,59	0,41	0,95	0
18	55,58	0,02	0,98	0,95	0
19	13,85	0,07	0,93	0,95	0
20	1,32	0,37	0,63	0,95	0
					10%

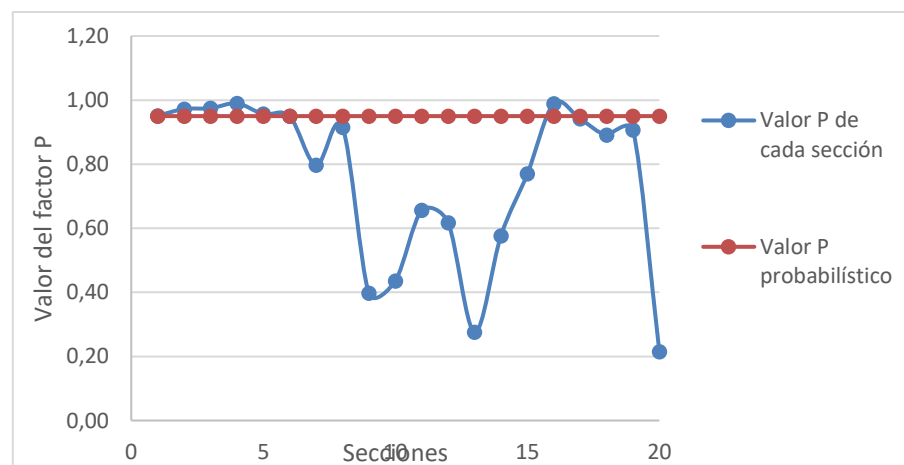


Figura 67 Gráfico comparativo valor P para Rev 1 50%Vc - Bolas Rojas

Tabla 46 Analisis de varianza para análisis d muestra en duplicado Rev1 50%Vc - Bolas Negras

Secciones	Factor F calculado	P	1-P	Factor de confianza	Respuesta
1	1,34	0,37	0,63	0,95	0
2	3,18	0,22	0,78	0,95	0
3	6,35	0,13	0,87	0,95	0
4	3,23	0,21	0,79	0,95	0
5	9,88	0,09	0,91	0,95	0
6	10,59	0,08	0,92	0,95	0
7	4,23	0,18	0,82	0,95	0
8	6,50	0,13	0,87	0,95	0
9	0,22	0,69	0,31	0,95	0
10	20,82	0,04	0,96	0,95	0
11	6,02	0,13	0,87	0,95	0
12	5,99	0,13	0,87	0,95	0
13	0,00	#¡NUM!	#¡NUM!	0,95	#¡NUM!
14	0,21	0,69	0,31	0,95	0
15	0,25	0,67	0,33	0,95	0
16	33,85	0,03	0,97	0,95	0
17	2,11	0,28	0,72	0,95	0
18	40,22	0,02	0,98	0,95	0
19	0,24	0,67	0,33	0,95	0
20	7,70	0,11	0,89	0,95	0
					15%

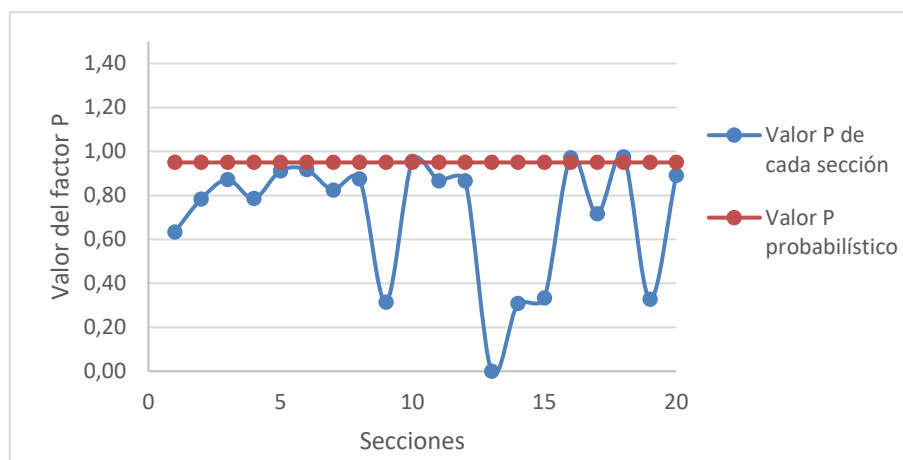


Figura 68 Gráfico comparativo valor P para Rev 1 50%Vc - Bolas Negras

Tabla 47 Analisis de varianza para análisis d muestra en duplicado Rev1 75%Vc - Bolas Rojas

Secciones	Factor F calculado	P	1-P	Factor de confianza	Respuesta
1	18,96	0,05	0,95	0,95	0
2	34,29	0,03	0,97	0,95	0
3	37,68	0,03	0,97	0,95	0
4	96,57	0,01	0,99	0,95	0
5	21,35	0,04	0,96	0,95	0
6	18,23	0,05	0,95	0,95	0
7	3,47	0,20	0,80	0,95	0
8	10,20	0,09	0,91	0,95	0
9	0,37	0,60	0,40	0,95	0
10	0,47	0,56	0,44	0,95	0
11	1,51	0,34	0,66	0,95	0
12	1,23	0,38	0,62	0,95	0
13	0,16	0,72	0,28	0,95	1
14	1,00	0,42	0,58	0,95	0
15	2,90	0,23	0,77	0,95	0
16	86,88	0,01	0,99	0,95	0
17	15,50	0,06	0,94	0,95	0
18	7,67	0,11	0,89	0,95	0
19	9,25	0,09	0,91	0,95	0
20	0,10	0,79	0,21	0,95	0
					5%

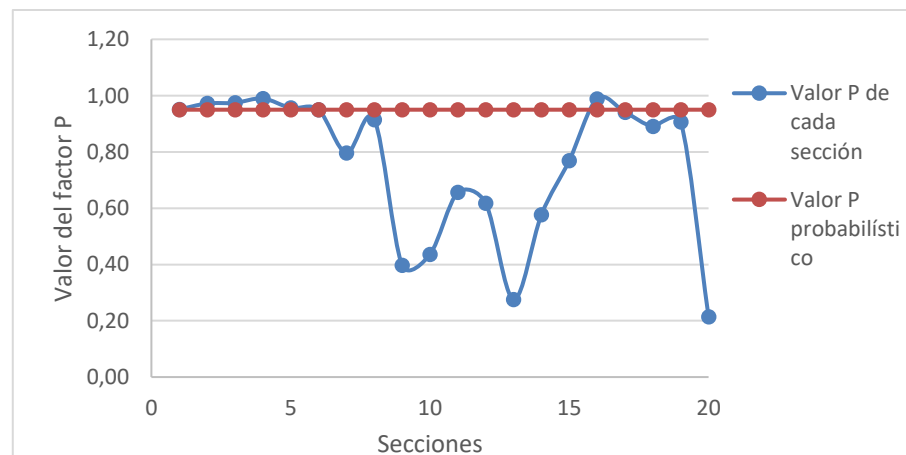


Figura 69 Gráfico comparativo valor P para Rev 1 75%Vc - Bolas Rojas

Tabla 48 Analisis de varianza para análisis de muestra en duplicado Rev1 75%Vc - Bolas Negras

Secciones	Factor F calculado	P	1-P	Factor de confianza	Respuesta
1	4,79	0,16	0,84	0,95	0
2	1,55	0,34	0,66	0,95	0
3	0,00	0,96	0,04	0,95	0
4	3,71	0,19	0,81	0,95	0
5	58,97	0,02	0,98	0,95	0
6	1,89	0,30	0,70	0,95	0
e7	5,70	0,14	0,86	0,95	0
8	8,58	0,10	0,90	0,95	0
9	147,86	0,01	0,99	0,95	0
10	16,19	0,06	0,94	0,95	0
11	25,82	0,04	0,96	0,95	0
12	0,01	0,95	0,05	0,95	0
13	0,00	0,99	0,01	0,95	0
14	3,40	0,21	0,79	0,95	0
15	35,86	0,03	0,97	0,95	0
16	94,32	0,01	0,99	0,95	0
17	183,29	0,01	0,99	0,95	0
18	290,98	0,00	1,00	0,95	1
19	0,20	0,70	0,30	0,95	0
20	0,49	0,56	0,44	0,95	0
					5%

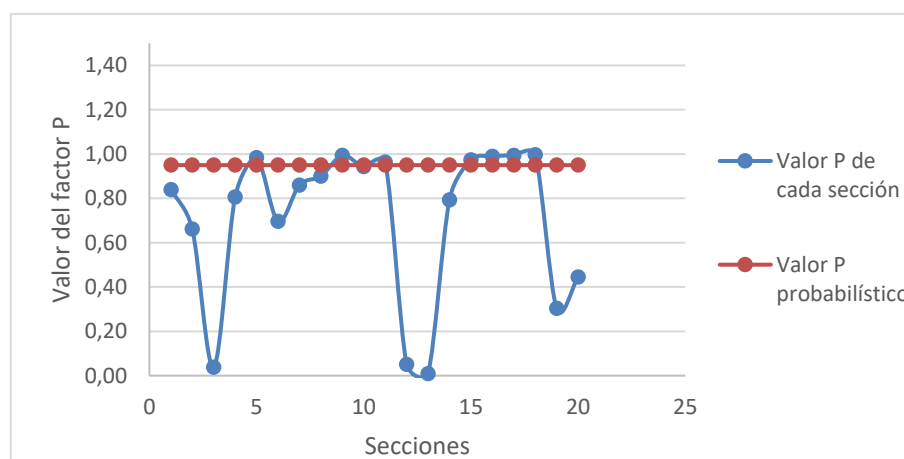


Figura 70 Gráfico comparativo valor P para Rev 1 75%Vc - Bolas Negras

Tabla 49 Analisis de varianza para análisis de muestra en duplicado Rev2 50%Vc - Bolas Rojas

Secciones	Factor F calculado	P	1-P	Factor de confianza	Respuesta
1	1,32	0,37	0,63	0,95	0
2	3,95	0,19	0,81	0,95	0
3	1,92	0,30	0,70	0,95	0
4	0,80	0,47	0,53	0,95	0
5	0,35	0,61	0,39	0,95	0
6	364,39	0,00	1,00	0,95	1
7	4,77	0,16	0,84	0,95	0
8	1,18	0,39	0,61	0,95	0
9	1,08	0,41	0,59	0,95	0
10	0,36	0,61	0,39	0,95	0
11	54,60	0,02	0,98	0,95	0
12	7,63	0,11	0,89	0,95	0
13	0,04	0,86	0,14	0,95	0
14	68,09	0,01	0,99	0,95	0
15	0,21	0,69	0,31	0,95	0
16	3,23	0,21	0,79	0,95	0
17	0,07	0,82	0,18	0,95	0
18	0,18	0,71	0,29	0,95	0
19	0,54	0,54	0,46	0,95	0
20	1581,59	0,00	1,00	0,95	1
					10%

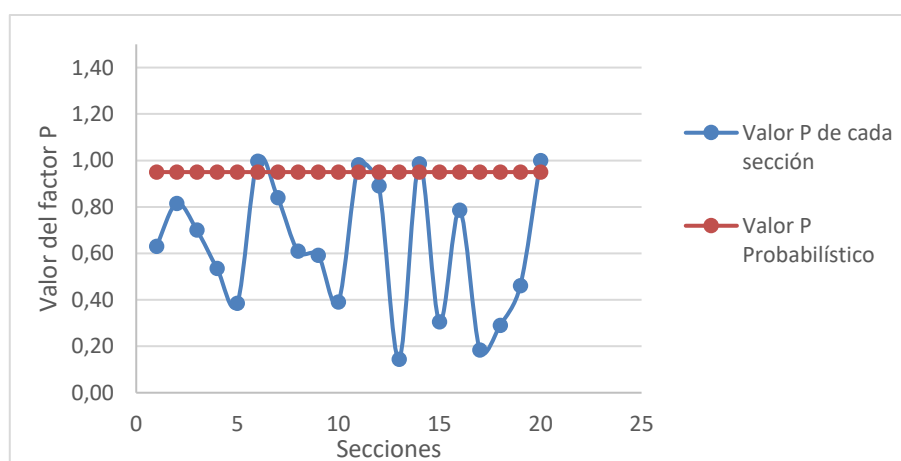


Figura 71 Gráfico comparativo valor P para Rev 2 50%Vc - Bolas Rojas

Tabla 50 Analisis de varianza para análisis de muestra en duplicado Rev2 50%Vc - Bolas Negras

Secciones	Factor F calculado	P	1-P	Factor de confianza	Respuesta
1	2,10	0,28	0,72	0,95	0
2	12,51	0,07	0,93	0,95	0
3	12,83	0,07	0,93	0,95	0
4	10,29	0,08	0,92	0,95	0
5	34,46	0,03	0,97	0,95	1
6	64,65	0,02	0,98	0,95	1
7	42,65	0,02	0,98	0,95	1
8	5,80	0,14	0,86	0,95	0
9	0,00	0,96	0,04	0,95	0
10	22,61	0,04	0,96	0,95	1
11	18,38	0,05	0,95	0,95	0
12	2,30	0,27	0,73	0,95	0
13	0,26	0,66	0,34	0,95	0
14	170,53	0,01	0,99	0,95	1
15	8,64	0,10	0,90	0,95	0
16	0,10	0,78	0,22	0,95	0
17	0,00	0,96	0,04	0,95	0
18	0,60	0,52	0,48	0,95	0
19	43,06	0,02	0,98	0,95	1
20	91,05	0,01	0,99	0,95	1
					35%

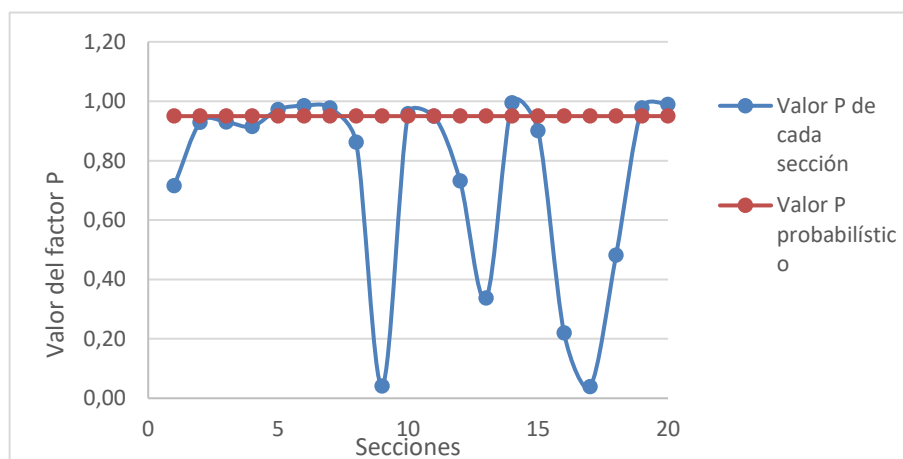


Figura 72 Gráfico comparativo valor P para Rev 2 50%Vc - Bolas Negras

Tabla 51 Analisis de varianza para análisis de muestra en duplicado Rev2 75%Vc - Bolas Rojas

Secciones	Factor F calculado	P	1-P	Factor de confianza	Respuesta
1	4,38	0,17	0,83	0,95	0
2	5,56	0,14	0,86	0,95	0
3	0,35	0,61	0,39	0,95	0
4	0,11	0,78	0,22	0,95	0
5	11,40	0,08	0,92	0,95	0
6	6,42	0,13	0,87	0,95	0
7	0,68	0,50	0,50	0,95	0
8	5,58	0,14	0,86	0,95	0
9	0,69	0,49	0,51	0,95	0
10	2,82	0,23	0,77	0,95	0
11	1,25	0,38	0,62	0,95	0
12	0,49	0,56	0,44	0,95	0
13	0,18	0,71	0,29	0,95	0
14	541,64	0,00	1,00	0,95	1
15	28,86	0,03	0,97	0,95	1
16	0,08	0,81	0,19	0,95	0
17	0,60	0,52	0,48	0,95	0
18	0,25	0,67	0,33	0,95	0
19	10,24	0,09	0,91	0,95	0
20	455,76	0,00	1,00	0,95	1
					15%

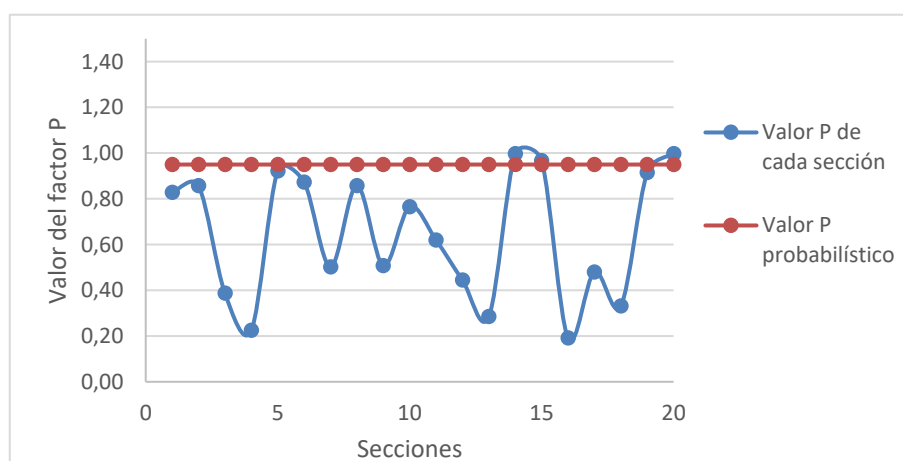


Figura 73 Gráfico comparativo valor P para Rev 2 75%Vc - Bolas Rojas

Tabla 52 Analisis de varianza para análisis de muestra en duplicado Rev2 75%Vc - Bolas Negras

Secciones	Factor F calculado	P	1-P	Factor de confianza	Respuesta
1	17,30	0,05	0,95	0,95	0
2	11,29	0,08	0,92	0,95	0
3	2307,79	0,00	1,00	0,95	1
4	12,95	0,07	0,93	0,95	0
5	34,35	0,03	0,97	0,95	1
6	2,49	0,26	0,74	0,95	0
7	30,95	0,03	0,97	0,95	1
8	4,24	0,18	0,82	0,95	0
9	0,42	0,58	0,42	0,95	0
10	8,93	0,10	0,90	0,95	0
11	6,94	0,12	0,88	0,95	0
12	0,69	0,49	0,51	0,95	0
13	41,44	0,02	0,98	0,95	1
14	32,24	0,03	0,97	0,95	1
15	37,47	0,03	0,97	0,95	1
16	32,26	0,03	0,97	0,95	1
17	10,91	0,08	0,92	0,95	0
18	0,14	0,74	0,26	0,95	0
19	0,60	0,52	0,48	0,95	0
20	0,28	0,65	0,35	0,95	0

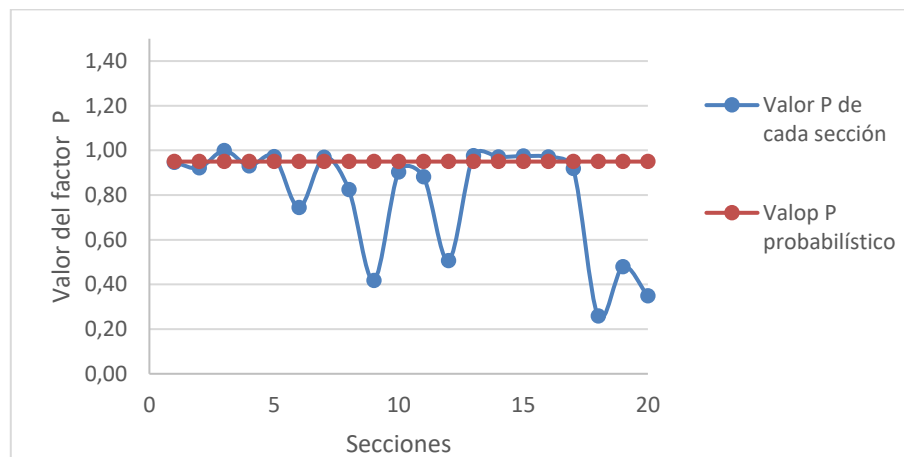


Figura 74 Gráfico comparativo valor P para Rev 2 75%Vc - Bolas Negras

Tabla 53 Analisis de varianza para análisis de muestra en duplicado Rev3 50%Vc - Bolas Rojas

Secciones	Factor F calculado	P	1-P	Factor de confianza	Respuesta
1	1,45	0,35	0,65	0,95	0
2	2,24	0,27	0,73	0,95	0
3	0,49	0,56	0,44	0,95	0
4	0,00	0,99	0,01	0,95	0
5	0,62	0,51	0,49	0,95	0
6	0,36	0,61	0,39	0,95	0
7	0,08	0,81	0,19	0,95	0
8	4620,52	0,00	1,00	0,95	1
9	16,42	0,06	0,94	0,95	0
10	7,18	0,12	0,88	0,95	0
11	1,23	0,38	0,62	0,95	0
12	4,46	0,17	0,83	0,95	0
13	0,00	0,99	0,01	0,95	0
14	0,60	0,52	0,48	0,95	0
15	7,04	0,12	0,88	0,95	0
16	35,10	0,03	0,97	0,95	1
17	1,61	0,33	0,67	0,95	0
18	2,67	0,24	0,76	0,95	0
19	12,58	0,07	0,93	0,95	0
20	13,49	0,07	0,93	0,95	0
					10%

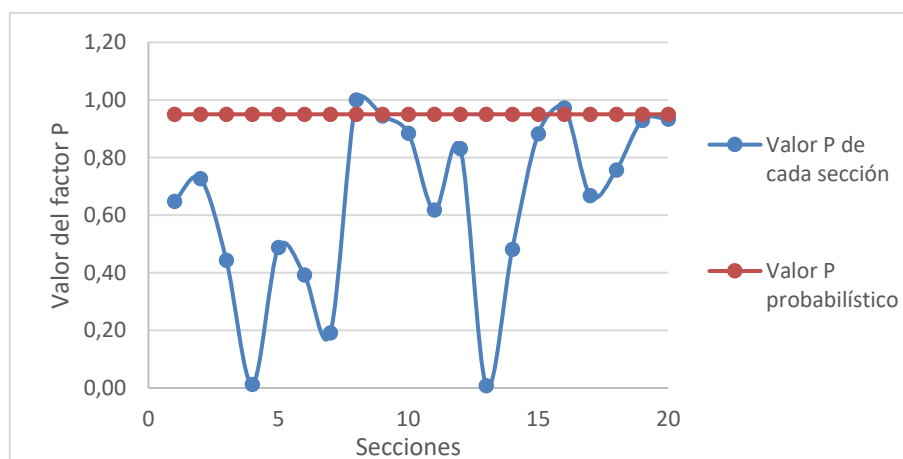


Figura 75 Gráfico comparativo valor P para Rev 3 50%Vc - Bolas Rojas

Tabla 54 Análisis de varianza para análisis de muestra en duplicado Rev3 50%Vc - Bolas Negras

Secciones	Factor F calculado	P	1-P	Factor de confianza	Respuesta
1	2,52	0,25	0,75	0,95	0
2	12,79	0,07	0,93	0,95	0
3	0,97	0,43	0,57	0,95	0
4	5,83	0,14	0,86	0,95	0
5	5,59	0,14	0,86	0,95	0
6	1,25	0,38	0,62	0,95	0
7	5,98	0,13	0,87	0,95	0
8	54,89	0,02	0,98	0,95	1
9	15,50	0,06	0,94	0,95	0
10	0,16	0,73	0,27	0,95	0
11	19,60	0,05	0,95	0,95	1
12	17,27	0,05	0,95	0,95	0
13	0,01	0,93	0,07	0,95	0
14	24,56	0,04	0,96	0,95	1
15	0,00	1,00	0,00	0,95	0
16	3,71	0,19	0,81	0,95	0
17	17,81	0,05	0,95	0,95	0
18	99,36	0,01	0,99	0,95	1
19	2,37	0,26	0,74	0,95	0
20	201,85	0,00	1,00	0,95	1
					25%

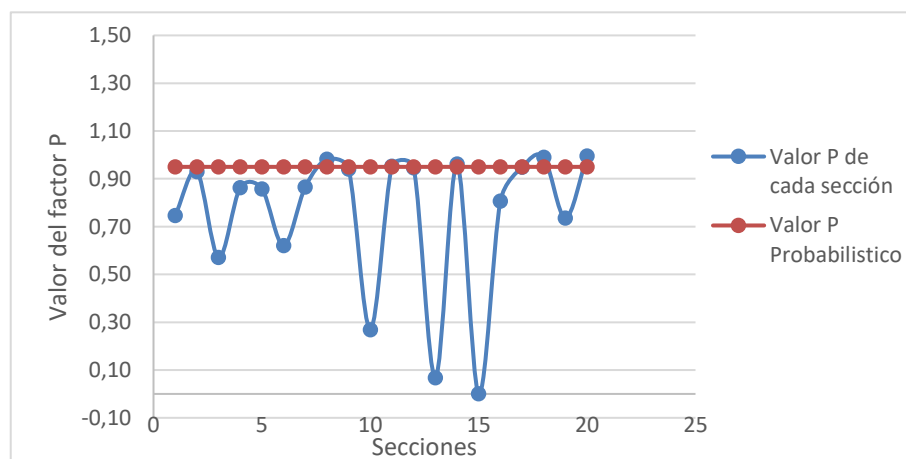


Figura 76 Gráfico comparativo valor P para Rev 3 50%Vc - Bolas Negras

Tabla 55 Analisis de varianza para análisis d muestra en duplicado Rev3 75%Vc - Bolas Rojas

Secciones	Factor F calculado	P	1-P	Factor de confianza	Respuesta
1	6,76	0,12	0,88	0,95	0
2	10,15	0,09	0,91	0,95	0
3	0,79	0,47	0,53	0,95	0
4	30,35	0,03	0,97	0,95	1
5	2,31	0,27	0,73	0,95	0
6	0,79	0,47	0,53	0,95	0
7	0,27	0,65	0,35	0,95	0
8	41,91	0,02	0,98	0,95	1
9	3,52	0,20	0,80	0,95	0
10	4,15	0,18	0,82	0,95	0
11	171,31	0,01	0,99	0,95	1
12	2,88	0,23	0,77	0,95	0
13	1,88	0,30	0,70	0,95	0
14	33,00	0,03	0,97	0,95	1
15	0,05	0,85	0,15	0,95	0
16	276,61	0,00	1,00	0,95	1
17	19,07	0,05	0,95	0,95	1
18	7,99	0,11	0,89	0,95	0
19	2,01	0,29	0,71	0,95	0
20	7,19	0,12	0,88	0,95	0
					30%

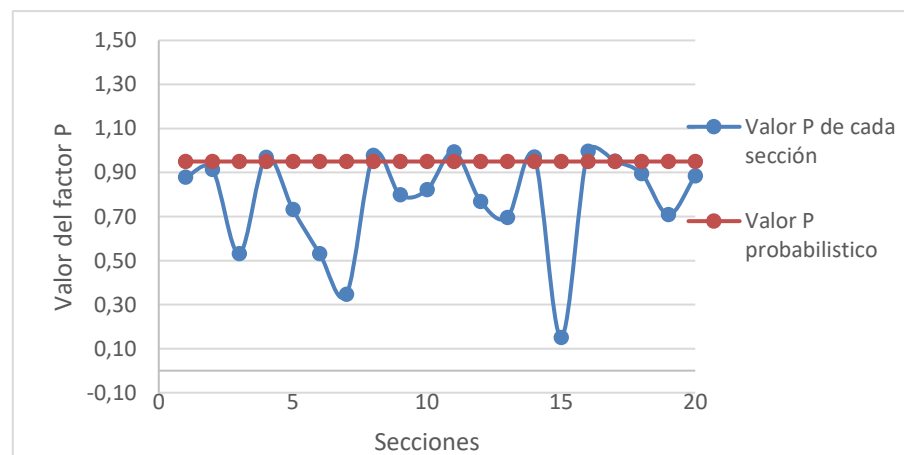


Figura 77 Gráfico comparativo valor P para Rev 3 50%Vc - Bolas Rojas

Tabla 56 Analisis de varianza para análisis d muestra en duplicado Rev3 75%Vc – Bolas Negras

Secciones	Factor F calculado	P	1-P	Factor de confianza	Respuesta
1	0,00	0,95	0,05	0,95	0
2	25,68	0,04	0,96	0,95	1
3	61,41	0,02	0,98	0,95	1
4	257,70	0,00	1,00	0,95	1
5	71,29	0,01	0,99	0,95	1
6	410,68	0,00	1,00	0,95	1
7	20,14	0,05	0,95	0,95	1
8	252,86	0,00	1,00	0,95	1
9	17,07	0,05	0,95	0,95	0
10	6,20	0,13	0,87	0,95	0
11	22,79	0,04	0,96	0,95	1
12	0,64	0,51	0,49	0,95	0
13	0,01	0,94	0,06	0,95	0
14	8,12	0,10	0,90	0,95	0
15	2,28	0,27	0,73	0,95	0
16	12,36	0,07	0,93	0,95	0
17	10,41	0,08	0,92	0,95	0
18	151,29	0,01	0,99	0,95	1
19	18,31	0,05	0,95	0,95	0
20	7,39	0,11	0,89	0,95	0
					0,45

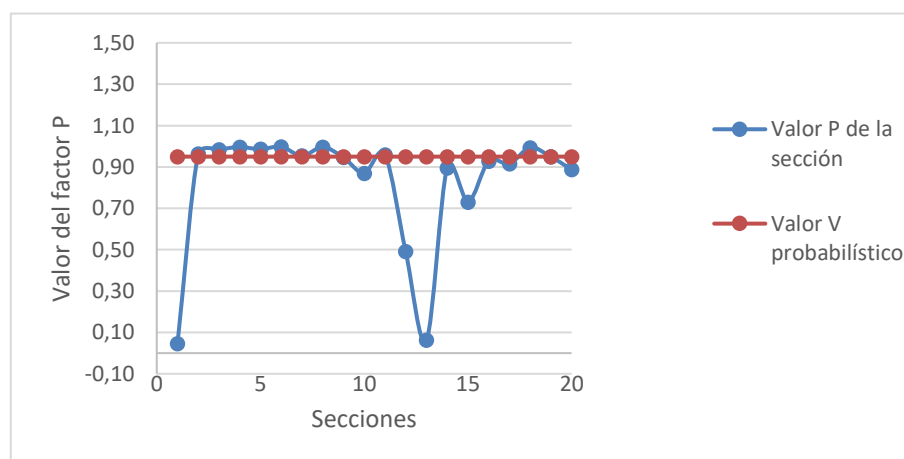
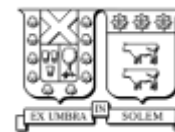


Figura 78 Gráfico comparativo valor P para Rev 3 50%Vc - Bolas Negras



REFERENCIAS

- [1] C. C. d. Cobre, «Proyección del consumo de energía eléctrica de la minería del cobre 2014 - 2025,» Registro de Propiedad intelectual N° 248.731, Santiago, 2014.
- [2] C. C. d. Cobre, «Actualización de información sobre el consumo de energía asociado a la minería del cobre al año 2012,» Gobierno de Chile, Santiago, 2013.
- [3] M. Becerra Maquieira, «Análisis de los procesos de reducción de tamaño y clasificación interna en la molienda semiautógena a partir de ensayos de laboratorio.,» Universidad de Santiago, Santiago, 2014.
- [4] M. Becerra, «Análisis de los procesos de reducción de tamaño y clasificación interna en la molienda semiautógena a partir de ensayos de laboratorio,» Universidad de Santiago, Santiago, Chile, 2014.
- [5] F. M. Jones S., «Autogenous and Semiautogenous Mills 2010 Update,» de *Proceedings of the SAG Conference* , Vancouver, Canadá, 2011.
- [6] R. A. Klymowsky I.B., «The use of Small-scale mills and computer simulation techniques for scale-up and design of SAG Mill Circuits,» *International Journal of Mineral Processing*, n° 44, 1996.
- [7] M. J., «Some solutions for the kinetics of combined fracture and abrasion breakage,» *Powder Technology*, n° 49, pp. 87-95, 1986.
- [8] V. Soto Reyes, *Molienda y Clasificación*, Copiapó: Universidad de Atacama, 1991.
- [9] J. Ipinza, «El consumo específico de energía,» *Minería Chilena*, 2009.
- [10] E. W. Davis, «Fine crushing in ball mills: Trans. AIME,» 1919.
- [11] I. E. R. Madrid, «Balance poblacional en un molino de bolas para una ley de desgaste tipo exponencial e hiperbolico en tiempos largos,» Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas, Medellín, 2013.
- [12] P. Cundall y O. Strack, «A discrete numerical model for granular assemblies,» *Geotechnique*, p. 47, 1979.
- [13] A. Datta y R. Rajamani, «A direct approach of modeling batch grinding in ball mills using population balance principles and impact energy distribution,» *International Journal of Mineral Processing*, n° 64, 2002.



- [14] M. S. P. W. Cleary, «DEM modelling of industrial granular flows: 3D case studies and the effect of particles shape on hopper discharge,» *Appl. Math Modell*, nº 26, pp. 89-111, 2002.
- [15] G. Barrientos y L. Espejo, «Evaluación de las cargas de impacto en el interior de un molino SAG,» Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Concepcion, Concepción, 2003.
- [16] O. Pouliquen, J. Delour y S. Savage, «Fingering in granular flows,» *Nature* 386, pp. 816-817, 1997.
- [17] J. Inostroza, «Estudio de la segregación de la carga en molinos rotatorios,» Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso, 2013.
- [18] L. Hsu, W. Dietrich y L. Sklar, «Experimental study of bedrock erosion by granular flows,» *Journal of Geophysical Research* 113, 2008.
- [19] L. Magne, «Estudio del transporte de masa en molinos autógenos».
- [20] M. Nakagawa, «NMRI study: axial migration of radially segregated core of granular mixture in a horizontal rotating cylinder».
- [21] L. Prigozhim y H. Kalman, «Radial mixing and segregation of binary mixture in a rotating drum».
- [22] S. K. Kawatra, «Advance in comminution,» SME, pp. 352-258.
- [23] W. Valderrama, «Efecto del diseño de revestimientos sobre el consumo de potencia en molienda,» *Revista de Metalurgia*, nº 4, pp. 215-222, 1996.
- [24] F. Venegas, «Efecto del Perfil de Revestimiento en el Movimiento Longitudinal de carga en un molino rotatorio,» Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso, 2011.
- [25] J. S. Donghong Gao, «Using DEM in particulate Flow Simulations,» 2011.