



**UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE MINAS**

**MAXIMIZACIÓN DE LA INFORMACIÓN DE CONMINUCIÓN
OBTENIBLE DESDE MUESTRAS DE EXPLORACIÓN**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL DE MINAS

KATHERINE TAMARA SALAZAR HERNÁNDEZ

**PROFESOR GUÍA:
ALDO CASALI BACELLI**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
MAGÍN TORRES RUBILAR
GONZALO MONTES ATENAS**

**SANTIAGO DE CHILE
2014**

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL
TÍTULO DE: Ingeniera Civil de Minas
POR: Katherine Tamara Salazar Hernández
FECHA: 15/10/2014
PROFESOR GUÍA: Aldo Casali Bacelli

MAXIMIZACIÓN DE LA INFORMACIÓN DE CONMINUCIÓN OBTENIBLE DESDE MUESTRAS DE EXPLORACIÓN

El alza de costos que afecta a la industria minera, incentiva la búsqueda de estrategias para obtener una mayor cantidad de información en las etapas tempranas de evaluación de estos proyectos. Una forma de lograr este objetivo, es mediante la utilización de las muestras de las primeras etapas de exploración para la obtención de información metalúrgica.

Se han desarrollado distintos protocolos de preparación de muestras para realizar pruebas metalúrgicas de conminución y concentración, sin embargo éstos consideran la utilización de la totalidad del material de exploración extraído. El objetivo de esta memoria de título, es recomendar protocolos de pruebas metalúrgicas que consideren la óptima utilización del material disponible, para maximizar la información posible de obtener.

Como metodología para el diseño de estos protocolos, se realiza la caracterización de las distintas pruebas metalúrgicas disponibles y sus consideraciones, se incluyen fundamentos de muestreo, y técnicas de control y aseguramiento de la calidad, considerando diversas alternativas para la determinación de parámetros relevantes en el diseño de procesos de conminución.

Se realizan 15 propuestas de protocolos, de las cuales 8 corresponden a muestras provenientes de sondajes diamantinos, 1 de sondajes de aire reverso y 6 de muestras de material particulado. Cada uno de ellos constituye una recomendación sobre la utilización de las muestras, y las distintas metodologías de estimación de parámetros, con un error fundamental menor al 10% para la mayor parte de las propuestas.

Al analizar dos casos de estudio, se comprueba que es factible obtener información relevante a partir del material de exploración, ya sea sondajes cuarteados o material particulado, manifestando coherencia entre los resultados obtenidos mediante distintas metodologías, y permitiendo realizar un análisis para diferentes circuitos de conminución.

ABSTRACT

The rising costs affecting the mining industry, encourages the search for strategies to obtain a larger amount of information on the early stages of evaluation of these projects. One way to achieve this is by using samples from exploration steps, in order to obtain some metallurgical information.

Different protocols have been developed for the preparation of metallurgical test samples for comminution and concentration, nevertheless they consider the use of the entirely exploration material extracted. The objective of this work is to develop protocols for metallurgical tests, considering the optimal use of the available material to maximize the information obtainable from it.

As a methodology for the design of protocols, we have to consider the characterization of several available metallurgical tests and their considerations, including sampling techniques, quality assurance and quality control, and considering several alternatives for the determination of parameters for the comminution processes design.

In this work, 15 proposals for protocols are made; of which 8 correspond to samples from diamond drilling, 1 from reverse circulation drilling and 6 from particulated material. Each of these protocols is a recommendation on the use of samples and different methodologies for parameters estimation, with a fundamental error lower than 10% for most of them.

By analyzing two study cases, it is found that it is feasible to obtain relevant information from the exploration material, whether quartered drillcore or particulated material, showing consistency between the results obtained by different methods, and allowing an analysis for different comminution circuits.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer, en primer lugar, a Dios y a mi mamita Claudia. Viejita querida, muchas gracias por apoyarme aun cuando todo se veía negro, y por enseñarme a llevar siempre la verdad, el amor, y la sonrisa por delante. Para ti principalmente es este primer gran logro.

Agradezco también a mis hermanos Nicole y Juanito, quienes fueron – y serán siempre – mi mayor motivación para seguir avanzando. A mi papá Juan, quien es ejemplo de constancia y trabajo para mí. A mi Yayito, por siempre estar ahí y cuidar siempre de nosotros.

Agradezco a Eduardo, quien fuera mi pilar fundamental durante estos años: gracias por tu paciencia infinita, sobre todo en estos últimos meses, por compartirme tus buenos y malos ratos, y por estar siempre luchando a mi lado. Gracias también a Lizzy y Dao, por estar siempre ahí, y por quererme como una más de la familia. Este trabajo finalizado es mi forma de agradecerles.

También agradezco de forma especial a mis tíos Miriam y Jean Paul, a Lidsay y Polo, por ser los primeros que creyeron en mí, y me animaron a emprender la aventura. A Nico, tía Patty, tía Nana, tía Gina, y toda mi gente de Talca, por recargar mis pilas (y mi estómago) en cada viaje a casa. Gracias también a Rossana, no sabes lo importante que fue tu ayuda cuando lo necesité.

Gracias a mis queridas amigas del Hogar Universitario Mario Ojeda, donde viví los mejores años de la vida universitaria, y de donde me llevo los mejores recuerdos: Eva, Cami, Poly, Denisse, gracias por todo su apoyo y consejos en los momentos precisos.

A mis amigos de la Universidad, con quienes pasé momentos memorables, y cuya amistad espero no perder nunca: Andrea, Celeste, Cristóbal, Ale, Yazna, Isaac, José, Nachín, Panchito, Maca, Patito, Vale Smith y Nico Guarda. Muchas gracias por tanto, y espero que nunca se pierda la esencia de cada uno.

A mis compañeros de trabajo, por la paciencia, el apoyo y los gratos momentos durante el desarrollo de esta memoria. A mis jefes, por entregarme el espacio y tiempo para finalizar este trabajo. En especial muchas gracias a Cristina, Gaby, Pía, Felipe, Gonza y Marito. También gracias a mis colegas de la caverna Geomet, Marcela y Cristian, por su disposición y ayuda para el sustento bibliográfico de esta memoria.

A todos quienes conforman el Depto. de Ingeniería de Minas, en particular a mis profesores guía y co-guía, por sus valiosas correcciones y comentarios; al profesor Emery, y con especial cariño a Juanita, a Luchito y don Carlos por hacer más amenos los días rondando por el departamento.

Finalmente, agradezco a mi abuelita Silvia, a mi abueli Lucila, tío Emilio y Yoyito por estar cuidándome siempre desde arriba.

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Objetivos.....	2
1.1.1. Objetivo General.....	2
1.1.2. Objetivos Específicos	2
1.2. Alcances.....	3
2. ANÁLISIS BIBLIOGRÁFICO.....	4
2.1. Antecedentes generales de la exploración minera	4
2.2. Diseño de procesos de conminución.....	7
2.3. Descripción de Pruebas Metalúrgicas	8
2.3.1. Pruebas de Chancado.....	8
2.3.2. Pruebas de Molienda	13
2.3.3. Pruebas de Abrasión	22
2.3.4. Pruebas de Caracterización.....	24
2.4. Clasificación de Pruebas Metalúrgicas	30
2.5. Protocolos de Pruebas	31
3. METODOLOGÍA	34
3.1. Análisis de Pruebas Metalúrgicas	34
3.2. Diseño de Protocolos de Muestreo	34
3.2.1. Definición del tipo de muestra	34
3.2.2. Selección de pruebas metalúrgicas a utilizar.....	35
3.2.3. Definición de las etapas de corte y preparación de cargas	35
3.2.4. Estimación de Parámetros Metalúrgicos	36
3.2.5. Determinación del Error Fundamental del protocolo y QA/QC.....	36
3.3. Análisis de ejemplos de estudio.....	36
4. PROTOCOLOS DE PREPARACIÓN DE MUESTRAS.....	37
4.1. Consideraciones generales	37
4.1.1. Clasificación de pruebas metalúrgicas para el diseño de protocolos.....	37
4.1.2. Control y Aseguramiento de la Calidad (QA/QC) de los protocolos.....	38
4.2. Protocolos de Sondajes Diamantinos (DDH)	40
4.2.1. Protocolo DDH - #1.....	40
4.2.2. Protocolo DDH - #2.....	43

4.2.3.	Protocolo DDH - #3-A	46
4.2.4.	Protocolo DDH - #3-B.....	49
4.2.5.	Protocolo DDH - #4.....	52
4.2.6.	Protocolo DDH - #5-A	55
4.2.7.	Protocolo DDH - #5-B.....	58
4.2.8.	Protocolo DDH - #6.....	61
4.3.	Protocolos de Sondajes de Aire Reverso (AR).....	64
4.3.1.	Protocolo AR #1	64
4.4.	Protocolos de Material Particulado.....	66
4.4.1.	Protocolo R1” - #1	66
4.4.2.	Protocolo R1” - #2.....	68
4.4.3.	Protocolo R1” - #3.....	70
4.4.4.	Protocolo R6#.....	73
4.4.5.	Protocolo R8#.....	75
4.4.6.	Protocolo R10#.....	77
4.5.	Resumen de Protocolos de Pruebas	79
5.	ANÁLISIS DE EJEMPLO DE ESTUDIO	80
5.1.	Antecedentes generales del yacimiento en estudio.....	80
5.2.	Ejemplo 1: Mineral desde Sondajes DDH.....	81
5.2.1.	Definición del protocolo a utilizar.....	81
5.2.2.	Caracterización de Cabeza.....	83
5.2.3.	Consumo Específico de Energía.....	86
5.2.4.	Caracterización para Concentración.....	90
5.2.5.	Control y aseguramiento de la calidad	90
5.3.	Ejemplo 2: Material de Rechazo bajo 8#Ty	91
5.3.1.	Definición del protocolo a utilizar.....	91
5.3.2.	Caracterización de Cabeza.....	93
5.3.3.	Consumo Específico de Energía.....	95
5.3.4.	Caracterización para Concentración.....	97
5.3.5.	Control y aseguramiento de la calidad	98
5.4.	Análisis de Resultados de Ejemplos de Estudio	100
6.	DISCUSIONES.....	101
7.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	103
8.	BIBLIOGRAFÍA.....	104

ANEXOS

Anexo A: Nomogramas de Pierre Gy para los Protocolos de Muestreo.....	107
Anexo B: Metodologías de estimación de parámetros de conminución.....	117
Anexo C: Información Metalúrgica Ejemplo de Estudio 1.....	121
Anexo D: Información Metalúrgica Ejemplo de Estudio 2.....	124

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1: Diámetros de Sondajes Diamantinos	6
Tabla 2-2: Correlaciones del Índice de Chancado de Metso con otros índices	11
Tabla 2-3: Correlaciones del Índice de Abrasividad con otros índices	11
Tabla 2-4: Resumen de Pruebas de Chancado.....	12
Tabla 2-5: Correlación entre índice A_{xb} y dureza	14
Tabla 2-6: Largo de sondaje requerido para prueba SMC.....	14
Tabla 2-7: Carga de Bolas estándar en prueba de Bond para molienda de Bolas	18
Tabla 2-8: Carga de Bolas “Chuquicamata” en prueba de Bond para molienda de Bolas.....	20
Tabla 2-9: Carga de Bolas “BICO” en prueba de Bond para molienda de Bolas	20
Tabla 2-10: Resumen de Pruebas de Molienda	22
Tabla 2-11: Desgaste para distintos equipos	23
Tabla 2-12: Correlación de t_a con grado de abrasión	24
Tabla 2-13: Resumen de Pruebas de Abrasión.....	24
Tabla 2-14: Carga de Bolas “Chuquicamata” en prueba de cinética de molienda	25
Tabla 2-15: Resumen de Pruebas de Caracterización	29
Tabla 2-16: Clasificación de pruebas en etapa de conminución	30
Tabla 2-17: Clasificación de pruebas en fracción de tamaño.....	30
Tabla 2-18: Clasificación de pruebas en <i>software</i> de modelamiento	31
Tabla 3-1: Diámetros utilizados – Sondajes DDH	34
Tabla 3-2: Diámetros utilizados – Sondajes AR	35
Tabla 3-3: Diámetros utilizados – Material Particulado.....	35
Tabla 4-1: Clasificación de pruebas metalúrgicas por Nivel.....	37
Tabla 4-2: Clasificación de pruebas metalúrgicas por Reutilización	38
Tabla 4-3: Pérdida de masa por etapa de corte.....	39
Tabla 4-4: Pérdida de masa por prueba reutilizable	39
Tabla 4-5: Metraje requerido – Protocolo DDH-#1	40
Tabla 4-6: Etapas de corte y homogeneización – Protocolo DDH-#1	41
Tabla 4-7: Error Fundamental – Protocolo DDH-#1.....	42
Tabla 4-8: Fracción de tamaño SMC por tipo de sondaje	43
Tabla 4-9: Metraje requerido – Protocolo DDH-#2	43
Tabla 4-10: Etapas de corte y homogeneización – Protocolo DDH-#2	44
Tabla 4-11: Error Fundamental – Protocolo DDH-#2.....	45
Tabla 4-12: Metraje requerido – Protocolo DDH-#3-A	46
Tabla 4-13: Etapas de corte y homogeneización – Protocolo DDH-#3-A	47
Tabla 4-14: Error Fundamental – Protocolo DDH-#3-A	48
Tabla 4-15: Metraje requerido – Protocolo DDH-#3-B	49

Tabla 4-13: Etapas de corte y homogeneización – Protocolo DDH-#3-B	50
Tabla 4-14: Error Fundamental – Protocolo DDH-#3-B.....	51
Tabla 4-15: Metraje requerido – Protocolo DDH-#4	52
Tabla 4-16: Etapas de corte y homogeneización – Protocolo DDH-#4	53
Tabla 4-17: Error Fundamental – Protocolo DDH-#4.....	54
Tabla 4-18: Metraje requerido – Protocolo DDH-#5-A	55
Tabla 4-19: Etapas de corte y homogeneización – Protocolo DDH-#5-A	56
Tabla 4-20: Error Fundamental – Protocolo DDH-#5-A	57
Tabla 4-21: Metraje requerido – Protocolo DDH-#5-B	58
Tabla 4-22: Etapas de corte y homogeneización – Protocolo DDH-#5-B	59
Tabla 4-23: Error Fundamental – Protocolo DDH-#5-B.....	60
Tabla 4-24: Metraje requerido – Protocolo DDH-#6	61
Tabla 4-25: Etapas de corte y homogeneización – Protocolo DDH-#6	62
Tabla 4-26: Error Fundamental – Protocolo DDH-#6.....	63
Tabla 4-27: Metraje requerido – Protocolo AR#1	64
Tabla 4-28: Etapas de corte y homogeneización – Protocolo AR #1	65
Tabla 4-29: Error Fundamental – Protocolo AR #1	65
Tabla 4-30: Etapas de corte y homogeneización – Protocolo R1”-#1.....	67
Tabla 4-31: Error Fundamental – Protocolo R1”-#1	67
Tabla 4-32: Etapas de corte y homogeneización – Protocolo R1”-#2.....	69
Tabla 4-33: Error Fundamental – Protocolo R1”-#2.....	69
Tabla 4-34: Etapas de corte y homogeneización – Protocolo R1”-#3.....	71
Tabla 4-35: Error Fundamental – Protocolo R1”-#3	72
Tabla 4-36: Etapas de corte y homogeneización – Protocolo R6#.....	73
Tabla 4-37: Error Fundamental – Protocolo R6#	74
Tabla 4-38: Etapas de corte y homogeneización – Protocolo R8#.....	75
Tabla 4-39: Error Fundamental – Protocolo R8#.....	76
Tabla 4-40: Etapas de corte y homogeneización – Protocolo R10#.....	77
Tabla 4-41: Error Fundamental – Protocolo R10#.....	78
Tabla 4-42: Resumen de Protocolos propuestos.....	79
Tabla 5-1: Etapas de corte y homogeneización – Ejemplo 1	82
Tabla 5-1: Pérdidas por corte y homogeneización – Ejemplo 1.....	82
Tabla 5-2: Resumen de muestras por unidad – Ejemplo 1	83
Tabla 5-3: Composición química por unidad – Ejemplo 1.....	84
Tabla 5-4: Caracterización física – Ejemplo 1	84
Tabla 5-5: Resultados pruebas de conminución – Ejemplo 1	86
Tabla 5-6: Criterios de diseño para circuitos – Ejemplo 1	86
Tabla 5-7: Leyes de cabeza en muestras duplicadas	90
Tabla 5-8: Errores en variabilidad a pequeña escala	91
Tabla 5-9: Etapas de corte y homogeneización – Ejemplo 2	92
Tabla 5-11: Pérdidas por corte y homogeneización – Ejemplo 2.....	92
Tabla 5-10: Resumen de muestras por unidad – Ejemplo 2.....	93
Tabla 5-11: Caracterización física – Ejemplo 2	93
Tabla 5-12: Resultados pruebas de conminución – Ejemplo 2	95

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1: Comparación de cargas de bolas para prueba Bond Wi de Bolas	21
Figura 2-2: Protocolo de Muestreo propuesto por Doll & Barratt – Etapas 1 y 2.....	32
Figura 2-3: Protocolo de Muestreo propuesto por Doll & Barratt – Etapas 3 y 4.....	32
Figura 2-4: Protocolo de Muestreo propuesto por Doll & Barratt – Etapa 5	33
Figura 4-1: Protocolo de Muestreo DDH #1	41
Figura 4-2: Protocolo de Muestreo DDH #2	44
Figura 4-3: Protocolo de Muestreo DDH-#3-A.....	47
Figura 4-4: Protocolo de Muestreo DDH #3-B	50
Figura 4-5: Protocolo de Muestreo DDH #4	53
Figura 4-6: Protocolo de Muestreo DDH #5-A	56
Figura 4-7: Protocolo de Muestreo DDH #5-B	59
Figura 4-8: Protocolo de Muestreo DDH #6	62
Figura 4-9: Protocolo de Muestreo AR#1	64
Figura 4-10: Protocolo de Muestreo R1” - #1	66
Figura 4-11: Protocolo de Muestreo R1” - #2	68
Figura 4-12: Protocolo de Muestreo R1” - #3	71
Figura 4-13: Protocolo de Muestreo R6#	73
Figura 4-14: Protocolo de Muestreo R8#	75
Figura 4-15: Protocolo de Muestreo R10#	77
Figura 5-1: Protocolo de Muestreo desde Exploración	80
Figura 5-2: Protocolo de Muestreo Ejemplo 1	82
Figura 5-3: Mineralogía en Base Total – Ejemplo 1	84
Figura 5-4: Mineralogía de Sulfuros – Ejemplo 1. Izq.: Sulf. Totales. Der.: Sulf. de Cu	85
Figura 5-5: Sulfuros de Cu a 212 μm – Ejemplo 1. Izq.: Liberación. Der.: Asociación.....	85
Figura 5-6: Sulfuros de Mo a 212 μm – Ejemplo 1. Liberación.	85
Figura 5-7: Circuito SABC-B – Ejemplo 1	87
Figura 5-8: CEE (kWh/t) para circuito SABC-B por método de Morrell	87
Figura 5-9: CEE (kWh/t) para circuito SABC-B por método de Aminpro	88
Figura 5-10: Circuito HPGR/Molino de Bolas – Ejemplo 1	88
Figura 5-11: CEE (kWh/t) para circuito HPGR/Bolas por método de Morrell.....	89
Figura 5-12: Comparación CEE (kWh/t) entre circuitos.....	89
Figura 5-13: Tiempo de molienda requerido para 3 tamaños – Ejemplo 1	90
Figura 5-14: Protocolo de Muestreo Ejemplo 2	92
Figura 5-15: Mineralogía en Base Total – Ejemplo 2	93
Figura 5-16: Mineralogía de Sulfuros – Ejemplo 2. Izq.: Sulf. Totales. Der.: Sulf. de Cu	94
Figura 5-17: Sulfuros de Cu a 212 μm – Ejemplo 2. Izq.: Liberación. Der.: Asociación.....	94
Figura 5-18: Sulfuros de Mo a 212 μm – Ejemplo 2. Liberación.	94
Figura 5-19: CEE (kWh/t) para Molienda de Bolas - Ejemplo 2	95
Figura 5-20: Comparación CEE (kWh/t) Molino de Bolas para sondajes y rechazos	96
Figura 5-21: Tiempo de molienda requerido para 3 tamaños – Ejemplo 2	97
Figura 5-22: Comparación tiempo de molienda (212 μm) para sondajes y rechazos	98
Figura 5-23: Gráfico de control – Muestra de referencia. Arriba: %Cu Bajo; Centro: %Cu Medio; Abajo: %Cu Alto.	99

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1: Cálculo del Índice de Chancado de Bond.....	8
Ecuación 2: Cálculo del Crusher Index	9
Ecuación 3: Cálculo del Índice de Chancado de Metso	10
Ecuación 4: Cálculo del Índice de Abrasividad de Metso.....	10
Ecuación 5: Cálculo de High Pressure Index	12
Ecuación 6: Cálculo de índice t_{10}	13
Ecuación 7: Cálculo de SAG Mill Pinion Energy	16
Ecuación 8: Cálculo de Índice de Bond para molino de Barras	17
Ecuación 9: Cálculo de Índice de Bond para molino de Bolas	19
Ecuación 10: Cálculo de Índice de Abrasión de Bond	23
Ecuación 11: Cálculo de Índice de Abrasión de JK MRC	23
Ecuación 12: Cálculo factor de forma en volumen	26
Ecuación 13: Cálculo factor de forma en volumen por partícula	26
Ecuación 14: Cálculo de Densidad Real.....	27
Ecuación 15: Cálculo de Gravedad Específica.....	27
Ecuación 16: Cálculo de Densidad Aparente	28
Ecuación 17: Cálculo de Humedad en Base Húmeda	28
Ecuación 18: Cálculo de Humedad en Base Seca	28

1. INTRODUCCIÓN

Al evaluar la pre-factibilidad de desarrollo de un proyecto, se espera tener la mayor cantidad de información, y lo más certera posible, para realizar la más correcta y verosímil evaluación del potencial del proyecto *greenfield*.

Observando el actual escenario de costos en la industria, se hace necesaria una estrategia que permita obtener una mayor cantidad de información a partir del material de exploración disponible.

Esto se logra, en el ámbito metalúrgico, a través del desarrollo e implementación de protocolos de toma y preparación de muestras, que permitan tanto obtener las muestras para los análisis usuales correspondientes a cada etapa del proyecto, como además realizar pruebas metalúrgicas – de conminución y concentración, en el caso más común – para conocer el comportamiento eventual del mineral en la planta. Estas pruebas muchas veces son costosas, y requieren gran cantidad de muestra, la cual debe ser preparada bajo condiciones especiales de granulometría.

Sin embargo, es posible enfocar los esfuerzos en un protocolo que optimice la muestra disponible, y a su vez entregue la mayor cantidad de información para un diseño exitoso de las distintas etapas del procesamiento de minerales.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo General

Recomendar protocolos de tratamiento de sondajes y material particulado de exploración, para maximizar la información posible de obtener mediante la incorporación de pruebas metalúrgicas que no se consideran actualmente.

1.1.2. Objetivos Específicos

A continuación, se proponen los siguientes objetivos específicos:

- Enfocar el protocolo a diseñar desde la definición de la muestra de material de exploración, hasta la caracterización física, química y metalúrgica de ésta, dirigida al desarrollo de proyectos *greenfield*.
- Definir las diferentes pruebas metalúrgicas, sus requerimientos y las metodologías de obtención de información a las que han sido incorporadas.
- Optimizar la utilización de las masas disponibles, considerando las restricciones de masa y granulometría inherentes a cada prueba.
- Aplicar técnicas de control y aseguramiento de la calidad en la implementación de los protocolos de muestreo.

1.2. Alcances

- El análisis será aplicable para proyectos de minería metálica en etapas tempranas, incorporando a la metodología convencional sólo pruebas metalúrgicas asociadas a los procesos de conminución.
- No se incluye el análisis del elemento Au.
- No se considerarán muestras extraídas con la finalidad de proyectos de expansión.
- Se analizarán las pruebas correspondientes al diseño de procesos para minerales sulfurados.
- Sólo se realizará un análisis técnico, sin incorporar la dimensión económica en la propuesta.
- No se consideran los criterios de selección de las muestras, asumiendo en todo momento que las muestras son representativas y han sido adecuadamente seleccionadas.
- Se reciben muestras tanto de sondajes como muestras de material particulado, sometidas a etapas previas de chancado, y muestras de rechazo.
- No se consideran pruebas metalúrgicas de tipo piloto.

2. ANÁLISIS BIBLIOGRÁFICO

La creciente demanda de minerales metálicos y no metálicos se satisface mayoritariamente con la búsqueda y hallazgo de nuevos yacimientos minerales, constituyendo la base de la industria minera.

Esta actividad es de alto riesgo económico, ya que supone gastos que solamente se recuperan en caso que esta exploración tenga éxito y se desarrolle una explotación minera exitosa, por lo que corresponde a una inversión a largo plazo.

El precio de los metales, la estabilidad político-administrativa del país y las interacciones con las comunidades y el medio ambiente también constituyen factores claves para el éxito o fracaso de una campaña de exploración [1].

2.1. Antecedentes generales de la exploración minera

La exploración corresponde a la etapa inicial de cualquier actividad minera, la que tiene por objeto identificar las zonas donde se ubican los yacimientos minerales, que pueden entregar un potencial beneficio económico.

Con el fin de identificar de la forma más precisa el potencial blanco de exploración, se explora en distintas etapas, las cuales tienen como premisa la minimización del riesgo del eventual proyecto, y de sus costos asociados.

Las etapas se detallan a continuación [2].

- Prospección: El objetivo de esta etapa es realizar una evaluación regional, a una escala que ronda los 100.000 [km²] de superficie, para determinar si una zona concreta presenta posibilidades de que exista un tipo de yacimiento mineral.

Se realiza un análisis de antecedentes de la región, incluyendo mapas, fotos aéreas, imágenes satelitales, etc.

Además se gestionan las *due dilligence* y se evalúan las características medioambientales de la zona, para analizar la percepción del clima de inversión, la que junto con la evaluación del potencial geológico entrega el atractivo para la inversión en minería.

- Exploración: Una vez establecidas las posibilidades de la región evaluada, se realiza un estudio en terreno y en laboratorio, para obtener la información geoquímica,

geológica y geofísica pertinente, sobre una superficie aproximada de hasta 1.000 [km²].

Su objetivo es corroborar o descartar la hipótesis inicial de existencia de mineralización de interés económico, de forma de reducir el riesgo de la inversión.

Si se detecta una mineralización de interés, se lleva a cabo la evaluación del yacimiento, con la cuantificación de los recursos indicados e inferidos. Esta se realiza en un soporte entre 1-10 [km²]. Luego se realiza la exploración en una malla regular más fina, para clasificar los recursos en medidos e indicados, y finalmente definir las reservas.

Existen diversas herramientas de exploración, donde la extracción de sondajes constituye una de las técnicas directas más importantes en la actualidad.

Los sondajes corresponden a perforaciones que se realizan en el lugar de interés, con el objetivo de obtener muestras del subsuelo y cruzar los cuerpos mineralizados, para recabar información y realizar un modelo tridimensional del potencial yacimiento.

Se realizan dos tipos principales de sondajes, los cuales corresponden a:

- Sondajes diamantinos (DDH): Su uso se enfoca a proyectos principalmente de mediana y gran minería, considerándose su uso cuando se requiere perforar a profundidades mayores a 300 [m], llegando incluso a perforar más allá de los 2.000 [m].

También son requeridos cuando el sistema a analizar es complejo, es decir, es poco homogéneo [3]. Presentan un rendimiento de entre 40 a 80 [m/día], dependiendo de las condiciones del material a perforar.

Los sondajes diamantinos tienen la virtud que se puede recuperar un testigo, que representa fielmente las características del yacimiento en profundidad, ya que permite ubicar espacialmente y de manera exacta la muestra.

Existen distintos tipos de sondajes diamantinos, los que difieren en el diámetro del testigo extraído. Esta caracterización se observa en la Tabla 2-1.

Tabla 2-1: Diámetros de Sondajes Diamantinos

Tamaño sondaje	Diámetro interno [mm]
AQ	27,0
BQ	36,5
NQ	47,6
HQ	63,5
PQ	85,0

El tipo de material extraído por este método de perforación es muy requerido por las diversas disciplinas involucradas en la exploración, ya que se obtiene material para caracterizar el yacimiento desde el punto de vista estructural, geológico y eventualmente metalúrgico.

- Sondajes de Aire Reverso (AR): El uso de sondajes de aire reverso se ve restringido a exploración superficial, en condiciones de material homogéneo. Este tipo de perforación se encuentra orientado a una primera etapa de definición de objetivos, como método para chequear composición y leyes presentes. Alcanza una profundidad media de 300 [m] de perforación, con máximos de 700 [m].

Es más rápido (rendimiento 3 veces mayor) y económico que su símil diamantino, por lo que sirve para acotar el yacimiento de manera superficial.

Los diámetros de perforación de sondajes van entre 127 y 190 [mm], lo que equivale a una densidad lineal (considerando densidad de la roca de $2,6 [t/m^3]$ y recuperación 80%) entre 35 y 75 [kg/m]. Sin embargo, es importante mencionar el tamaño que alcanzan las partículas de detrito resultante bordean los 10 a 15 [mm], con un 80% del material bajo aproximadamente 3 [mm].

Otras técnicas de exploración directa, desde las cuales se obtiene material particulado, son:

- Muestreos dirigidos de afloramientos.
- Muestreo en caminos y trincheras.
- Muestreo en galerías y piques de exploración.

2.2. Diseño de procesos de conminución

Las empresas mineras, al buscar asegurarse cada vez más tempranamente en la toma de decisiones, están considerando enfocar los esfuerzos en una buena definición de la etapa de procesamiento del mineral.

Starkey, en 2001, menciona los principales aspectos a considerar para un diseño exitoso de procesos de conminución [4], que pueden resumirse en:

- Toma de muestras acorde al diseño a implementar.
- Definición del programa de pruebas acorde a los objetivos de la compañía.
- Interpretación del resultado de las pruebas.
- Determinación de las dimensiones de los equipos requeridos.

Estos aspectos se enuncian considerando una óptima obtención del material, con la finalidad de estudiar con ello la variabilidad total del yacimiento. Muchas veces esto no es posible, ya sea por restricciones de capital, tiempo o disponibilidad del material de exploración, cuando se trata de pruebas en etapas tempranas de proyectos.

En estas primeras etapas, las pruebas realizadas al material extraído en la exploración se enfocan básicamente a las características químicas y mapeo geológico del potencial yacimiento. Las pruebas metalúrgicas aparecen de forma tardía en este proceso, y aumentan progresivamente en relevancia y cantidad, lo que permite obtener la información pertinente para el diseño de dichos procesos.

Para realizar estas estimaciones, la técnica más fiable es la realización de pruebas piloto, pues presenta el menor grado de escalamiento entre las alternativas disponibles. Sin embargo, estas pruebas requieren una gran cantidad de muestra, de granulometría muy gruesa. Al no ser factible realizar estas pruebas piloto debido a las complicaciones de obtener tal cantidad de muestra, y al gran esfuerzo económico que significa esta operación, se realizan pruebas a escala de laboratorio [5]. Sin embargo, estas pruebas piloto sí son requeridas una vez que el proyecto se encuentra en la etapa de factibilidad, según los requerimientos indicados en la norma canadiense NI 43-101 [6].

Las pruebas de laboratorio, al requerir menos masa, dan la posibilidad de realizar una mayor cantidad de ellas para estudiar la variabilidad a lo largo del yacimiento, a través del análisis de muestras puntuales. Comprender la variabilidad en los distintos parámetros de conminución (dureza del mineral, consumo específico de energía, abrasión, etc.) en el contexto de un plan minero real es requerido, debido a que cualquier pérdida en producción debido a la sub-estimación de la capacidad de tratamiento puede tener graves consecuencias en el retorno del negocio.

Por ello, las distintas pruebas metalúrgicas disponibles en el mercado se han ido ajustando de tal forma de requerir menor cantidad de masa, de granulometrías menos estrictas, y entregar información que reproduzca lo más fielmente el comportamiento del mineral en distintos circuitos de conminución y concentración.

2.3. Descripción de Pruebas Metalúrgicas

2.3.1. Pruebas de Chancado

2.3.1.1. Bond Low Energy Impact test [LEIT]

El ensayo de impacto de Bond ha sido desarrollado para determinar los requerimientos de potencia neta en la etapa de chancado de mineral, pudiendo medir la dispersión natural del mineral en la muestra [7].

Para ejecutar este test se necesitan aproximadamente 20 especímenes (con un mínimo de 10) en un rango de tamaño inferior a 3” y superior a 2” (-76 [mm] +51 [mm]) [8]. También es factible utilizar muestras provenientes desde sondajes diamantinos de diámetro PQ o HQ. Aun así, existen indicios de que los sondajes de diámetro NQ también pueden ser utilizados en esta prueba, siempre y cuando sean impactados de forma axial [9].

El equipo para ejecutar el test se conforma de dos péndulos o martillos opuestos e iguales, de 30 [lb] cada uno, los cuales están instalados en un sistema de dos ruedas. La altura de caída de estos martillos puede ser controlada mediante marcas de graduación al exterior de estas ruedas.

El espécimen de roca se ubica en la dirección tal que ambos martillos lo golpeen a lo largo de su eje menor. La altura desde la cual los péndulos son liberados se aumenta hasta que la energía con la cual éstos golpean sea suficiente para producir su fractura.

El índice de trabajo de chancado se calcula en base a un promedio de 10 test exitosos, mediante la siguiente fórmula:

$$W_{i,ch} \left[\frac{kWh}{tc} \right] = \frac{2,59 \cdot C}{\rho_s} = \frac{53,49 \cdot K}{\rho_s}$$

Ecuación 1: Cálculo del Índice de Chancado de Bond

Donde:

$W_{i,Ch} \left[\frac{kWh}{tc} \right]$: Índice de trabajo del mineral, aplicable al chancado.

$\rho_s [-]$: Gravedad específica del mineral.

$C \left[\frac{lb*ft}{in} \right]$: Esfuerzo del impacto aplicado (libras pie), necesario para fracturar el material, por pulgada de espesor de la roca.

$K \left[\frac{J}{mm} \right]$: Esfuerzo del impacto aplicado (Joules), necesario para fracturar el material, por milímetro de espesor de la roca.

2.3.1.2. SAG Crusher index [Ci]

Este test ha sido desarrollado por Minnovex para conocer la distribución granulométrica del mineral en las diferentes etapas de chancado y, a su vez, preparar las muestras para someterlas a la prueba SPI [10].

Para ejecutar esta prueba se necesitan 10 [kg] de muestra en un rango de tamaños inferior a 3" y superior a 3/4".

La muestra chancada en las siguientes etapas:

- Chancado 1°: Consiste en un chancado primario con un equipo de mandíbulas, elíptico de muelas planas, y cerrado a un *setting* de 1". La muestra es chancada una sola vez por el equipo, y sólo se rescata la fracción +3/4".
- Chancado 2°: La fracción obtenida (+3/4") de la etapa anterior es chancada (una sola vez) por un equipo similar al anterior, pero cerrado a un *setting* de 3/4".
- Chancado 3°: La fracción superior a un tamaño +3/4" del producto de la etapa anterior, debe ser reducida nuevamente de tamaño por el chancador secundario.
- Chancado 4°: La fracción +3/4" que, luego del chancado 3°, continúe a este tamaño debe ser reducida de tamaño nuevamente por el chancador secundario. Si luego de estas etapas aún quedaran partículas sobre 3/4", se deben reducir sucesivamente por el chancador secundario o utilizando un martillo si fuese necesario.

El objetivo de esta prueba es la obtención de un 20% en la fracción de tamaño -3/4" +1/2".

El índice de chancado, entonces, es calculado como sigue:

$$Ci \left[\frac{kWh}{t} \right] = \left(1 - \frac{C}{B} \right) * \left(1 - \frac{B}{A} \right) * 100$$

Ecuación 2: Cálculo del Crusher Index

Donde:

- $C_i \left[\frac{kWh}{t} \right]$: *Crusher index*, índice de chancado del mineral.
 $A [g]$: Peso total de la muestra.
 $B [g]$: Peso + $\frac{3}{4}$ " obtenido en la etapa de chancado primario.
 $C [g]$: Peso + $\frac{3}{4}$ " obtenido en la etapa de chancado secundario.

2.3.1.3. *Metso Crushability Index*

La prueba de Metso para la determinación de un índice de chancado aparece en 2002, como una alternativa a las pruebas más tradicionales, debido a su menor requerimiento de masa y granulometría más flexible.

Se requieren 0,5 [kg] de mineral en la fracción de tamaño -6,3 +4,0 [mm]. La muestra se ingresa en un recipiente cilíndrico de 90 [mm] de diámetro y 100 [mm] de altura, ubicando dentro del recipiente una paleta de doble aspa, que gira a una velocidad es de 4.500 [rpm] [11].

El test es realizado durante 5 minutos, donde la muestra es chancada por la paleta giratoria, la cual a su vez es desgastada por el mineral. Se cuantifica la fracción de mineral que se encuentra sobre 1,6 [mm] luego de realizada la prueba.

Como resultado se obtiene el *Índice de Chancado* (%):

$$\text{Índice de Chancado (\%)} = \frac{\text{Fracción bajo 1,6 mm [g]}}{\text{Masa total de la muestra [g]}} \times 100$$

Ecuación 3: Cálculo del Índice de Chancado de Metso

También es posible obtener un *Índice de Abrasividad*, controlando la pérdida de peso de la paleta durante el desarrollo de la prueba.

$$\text{Índice Abrasividad} \left(\frac{g}{t} \right) = \frac{(P \text{ final paleta} - P \text{ inicial paleta}) [g]}{P \text{ inicial paleta} [g]} \times 10^5 \left[\frac{g}{t} \right]$$

Ecuación 4: Cálculo del Índice de Abrasividad de Metso

Metso ha publicado diversas correlaciones entre el *Índice de Chancado* con otros índices presentes en el mercado, según lo indicado en la tabla siguiente:

Tabla 2-2: Correlaciones del Índice de Chancado de Metso con otros índices

Clasificación	Índice de Chancado [%]	Bond Wi Chancado [kWh/t]
Muy blando	> 50	0 – 7
Blando	40 – 50	7 – 10
Mediano	30 – 40	10 – 14
Duro	20 – 30	14 – 18
Muy duro	10 – 20	> 18

Además, se tienen correlaciones entre el Índice de Abrasividad con el Índice de Abrasión de Bond.

Tabla 2-3: Correlaciones del Índice de Abrasividad con otros índices

Clasificación	Índice de Abrasividad [g/t]	Índice de Abrasión
Muy blando	0 – 100	0 – 0,1
Blando	100 – 600	0,1 – 0,4
Mediano	600 – 1.200	0,4 – 0,6
Duro	1.200 – 1.700	0,6 – 0,8
Muy duro	> 1.700	> 0,8

2.3.1.4. *Static Pressure Test [SPT]*

En reemplazo de los test desarrollados por Polysius, los cuales requieren grandes cantidades de muestra para su realización, SGS propone una prueba para la estimación de los requerimientos de energía para lograr una reducción de tamaño de los equipos de chancado HPGR [12].

Esta prueba mide la energía requerida en reducir de tamaño mediante compresión de una prensa hidráulica a una muestra de mineral seco, dispuesto en un contenedor de acero. Se realiza en circuito cerrado, y requiere al menos 7 [kg] de una muestra de granulometría 100% bajo ¾”, con no más de un 20% bajo ½”.

La prueba consiste en la realización de ciclos consecutivos de molienda, donde el material bajo 6# (malla de corte de la prueba) es removido, y la masa extraída es restituida con mineral fresco. La prueba finaliza cuando la masa de material bajotamaño que es extraída del molino se estabiliza en un 80% bajo 6# Ty (3,35 [µm]).

La energía específica promedio de los 3 últimos ciclos de molienda es utilizada para calcular el High Pressure Index, HPi:

$$HPi \left[\frac{kWh}{tc} \right] = \frac{E}{\left(\frac{10}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{10}{\sqrt{F_{80}}} \right)}$$

Ecuación 5: Cálculo de High Pressure Index

Donde

$HPi \left[\frac{kWh}{t} \right]$: Índice de Molienda de Alta presión (HP Work index).

$E \left[\frac{kWh}{t} \right]$: Energía específica de los últimos 3 ciclos de molienda, calculada desde el trabajo mecánico ejercido por la prensa (y convertido a unidades de energía eléctrica), dividido por el peso del producto bajo 6#.

$F_{80} [\mu m]$: Tamaño 80% pasante de la alimentación fresca al circuito de molienda.

$P_{80} [\mu m]$: Tamaño 80% pasante del producto final del circuito de molienda, obtenido por análisis granulométrico al bajotamaño de la prueba.

2.3.1.5. Resumen de Pruebas de Chancado

Se presenta una tabla resumen de las pruebas de chancado revisadas.

Tabla 2-4: Resumen de Pruebas de Chancado

	Masa [kg]	Granulometría Alimentación	Granulometría Producto
LEIT	20,0 (20 especímenes)	-3'' +2'' (-76 +51 mm)	-
Crusher Index	10,0	100% -3'' +3/4'' (-76 +19 mm)	80% -1/2'' (12.5 mm)
Metso Crushability	0,5	-6,3 +4 mm	20-50% -1,6 mm
HPGR (SPT)	7,0	100% -3/4'' (19 mm) 80% +1/2'' (12,7 mm)	80% -6# Ty (3,35 mm)

2.3.2. Pruebas de Molienda

2.3.2.1. JK Drop Weight test [JK DWT]

El test JK Drop Weight fue desarrollado en los laboratorios de JKMRC como una forma de determinar las características del quiebre de una muestra de mineral en un molino AG o SAG [13]. Además, este test entrega parámetros requeridos en los modelos de Chancado desarrollados también por el JKMRC [14] [15].

La ejecución del test requiere aproximadamente de 100 [kg] de muestra, la cual debe incluir entre 10 y 30 partículas de cada una de las siguientes fracciones de tamaño:

- -63,0 +53,0 [mm]
- -45,0 +37,5 [mm]
- -31,5 +26,5 [mm]
- -22,4 +19,0 [mm]
- -16,0 +13,2 [mm]

Estas partículas son impactadas en 3 niveles distintos de energía potencial utilizando un dispositivo de impacto desarrollado por el JKMRC. Al final del test se obtienen 15 combinaciones fracción/energía, las cuales serán utilizadas para construir la matriz de dependencia de energía específica E_{cs} [kWh/t], con el tamaño correspondiente a cada fracción.

Luego de los impactos, los productos de cada combinación son colectados y se les realiza un análisis granulométrico. La distribución de tamaños obtenida es normalizada respecto a aquella de la alimentación.

La relación entre ruptura y energía específica está dada por la siguiente ecuación, propuesta por Narayanan y Whiten [16]:

$$t_{10} = A (1 - e^{-b \cdot E_{cs}})$$

Ecuación 6: Cálculo de índice t_{10}

Donde:

t_{10} [%] : Porcentaje pasante de 1/10 del tamaño original de partícula (estimado como la media geométrica del rango de tamaño de la muestra original).

E_{cs} $\left[\frac{kWh}{t}\right]$: Energía específica aplicada a través del dispositivo de impacto.

A, b : Parámetros de ajuste de la ecuación, donde:

A: Porcentaje máximo de material que se genera en un tamaño de 1/10 de la partícula original, luego del impacto.

b: Velocidad con la que se consigue la ruptura, en función del consumo específico de energía.

El producto de los parámetros A y b representa la pendiente de la curva cuando $E_{cs}=0$, lo que mide la resistencia al impacto del mineral: menores valores de Axb indican minerales más resistentes en términos de ruptura por impacto [17].

Tabla 2-5: Correlación entre índice Axb y dureza

	Alta Dureza	Dureza Media				Baja Dureza	
Axb	< 30	30-38	38-43	43-56	56-67	67-127	>127

2.3.2.2. SAG Mill Comminution index [SMC]

La prueba SMC fue desarrollada para entregar un amplio rango de parámetros de conminución, a través del impacto controlado de muestras de roca. Nace como un test JKDWT simplificado, considerando que, a diferencia del JKDWT, éste no requiere grandes cantidades de muestra.

La prueba puede utilizar como alimentación sondajes completos o “cuarteados” (método “*Cut-core*”), utilizado cuando la muestra es limitada; o muestras previamente chancadas (método “*Crush and Select*”), utilizado cuando hay suficiente muestra.

La cantidad de masa requerida para este test dependerá del diámetro del sondaje, según la tabla.

Tabla 2-6: Largo de sondaje requerido para prueba SMC

Rango diámetro sondaje [mm]		Largo de sondaje requerido [m]	
Mínimo	Máximo	<i>Crush and Select</i>	<i>Cut Core</i>
32,3	39,4	6,9	0,8
39,5	45,4	5,2	0,9
45,5	52,7	3,9	1,1
52,8	60,3	2,9	1,4
60,4	69,4	2,2	1,7
69,5	79,9	1,7	-
80,0	89,1	1,3	-

Si se escogen muestras por el método “*Cut Core*”, se requiere de que la recuperación del sondaje sea alta, es decir de sondajes competentes y con discontinuidades poco frecuentes [18].

El test puede ser llevado a cabo en tres fracciones distintas de tamaño:

- - 31,5 + 26,5 [mm]
- - 22,4 + 19,0 [mm]
- - 16,0 + 13,2 [mm]

Cada muestra es impactada con el martillo utilizado en la prueba *JK Drop Weight*, considerando 3 energías de impacto distintas.

Los índices que se obtienen al realizar la prueba corresponden a:

- *DWi [kWh/m³]*, el cual mide la resistencia a la fractura por impacto del mineral. Está relacionado con los parámetros *A* y *b* del modelo de la prueba *JK Drop Weight*, extraído de la matriz *t10 – Ecs*.
- *DWi [%]*, el cual posiciona la muestra en la base de datos de *JKTech*, entregando el percentil de dureza que representa dicha muestra.
- *Mia [kWh/t]*, que está relacionado con la energía requerida para la fractura del mineral en molinos primarios.
- *Mih [kWh/t]*, se utiliza para el cálculo del consumo de energía de equipos *HPGR*.
- *Mic [kWh/t]*, el cual se utiliza en el cálculo del consumo de energía de chancadores [19].

Además, se obtienen las matrices de ruptura y de energía versus *Ecs*, las que se utilizan como parámetro de entrada en el software *JKSimMet*.

En general, en términos de identificación de la muestra, se utiliza el *JKDWT* para la caracterización de las principales litologías o unidades geometalúrgicas, mientras que el uso del *SMC* se aplica mayoritariamente en el estudio de la variabilidad del mineral dentro de cada uno de estos tipos de agrupaciones [5].

2.3.2.3. *SAG Power index [SPI]*

Esta prueba, desarrollada por *MinnovEx*, es una de las más utilizadas para el mapeo geometalúrgico de dureza de mineral. Considera, en su desarrollo, los mecanismos de ruptura del mineral por impacto, compresión y abrasión [20].

La prueba es realizada en un molino de 305 [mm] de diámetro por 102 [mm] de largo, que corresponde al molino *SAG* estándar de *Starkey*, con una carga de 39 bolas de

diámetro 1¼” (peso total 5.010 [g]). El molino opera a 70% de la velocidad crítica, usa un volumen de llenado del 15% en mineral y un volumen de 15% en aceros.

El test requiere de 2 [kg] de muestra 100% bajo ¾” (19 [mm]), y con un 80% bajo ½” (12,7 [mm]).

La prueba se realiza en ciclos, mientras el molino gira a una velocidad de 54 [rpm]. El material fino (bajo 10# ó 1,7 [mm]) es removido sistemáticamente al finalizar cada ciclo, y se repone la misma cantidad de mineral, de forma que cada ciclo opere con la mismo peso de material [5, 12].

El test se ejecuta hasta que el producto alcanza un 80% bajo 1,7 [mm] (#10 Ty). El tiempo requerido, en minutos, para realizar esta reducción de tamaño corresponde al SPI [21]. Otro valor que entrega este test corresponde al P_{64} , tamaño bajo el cual pasa el 64% de la muestra ensayada [22], el cual indica una estimación del tamaño de rotura natural del mineral [12].

2.3.2.4. SAGDesign

Este test fue desarrollado por el SAGDesign Consulting Group para suplir las deficiencias que presenta el test SAG Power Index en términos de dimensionamiento de molinos SAG [23]. Para ejecutar este test se requieren de 10 [kg] de muestra de material chancado a un 80% bajo 19 [mm] (¾”).

Esta prueba es realizada en un molino SAG de 488 [mm] de diámetro y 163 [mm] de largo, y busca reproducir las condiciones de estos molinos en una operación típica: nivel de llenado total del 26%, donde un 11% corresponde a aceros (16 [kg]) y un 15% a mineral (volumen constante de 4,5 [l]); y girando a un 76% de la velocidad crítica.

La molienda es realizada en varios ciclos hasta lograr un 80% -10#Ty (1,7 [mm]). Al producto de esta prueba SAGDesign se le realiza además, un test de Bond para molino de bolas con el fin de caracterizar la dureza del mineral en su fracción gruesa y fina respectivamente [24].

Del test se obtiene el número de revoluciones del molino, las cuales están relacionadas con el consumo de energía del molino SAG a través de la siguiente ecuación:

$$SAG\ Mill\ Pinion\ Energy\ \left[\frac{kWh}{t}\right] = \frac{Revs * (16000 + g)}{447,3\ g}$$

Ecuación 7: Cálculo de SAG Mill Pinion Energy

Donde

$Revs$: Revoluciones del molino para lograr el producto deseado (80% -10#Ty)

g : Gramos de mineral testeado, correspondiente a 4,5 [l] en volumen.

2.3.2.5. Bond Work Index para Molino de Barras

El índice de trabajo del material, aplicable a la molienda gruesa en molinos de barras, requiere una muestra de aproximadamente 15 [kg] con una granulometría de 100% - 1/2" para su realización.

Se determina en un molino estándar de laboratorio, de 12" de diámetro y 24" de largo, cuya carga de barras (de peso total 33,38 kg) tiene la siguiente distribución:

- 6 barras de 1¼" de diámetro y 21" de largo
- 2 barras de 1¾" de diámetro y 21" de largo

El molino descrito es alimentado por un volumen aparente de 1.250 [cm³] (aproximadamente 3 [kg]) de material.

La molienda se realiza en seco y a velocidad constante de 46 [rpm], durante un tiempo tal que reproduzca una operación en circuito cerrado con 100% de carga circulante. Al final de cada ciclo de molienda, se retira la porción de mineral bajo el tamaño de corte (normalmente 14#Ty, pero varía entre 4 y 65#Ty), y es reemplazada con material fresco de modo de mantener la carga de mineral al inicio [25].

El test finaliza cuando, en los últimos tres ciclos, los gramos netos del material bajotamaño producidos por revolución (Grp) alcanzan el equilibrio.

El índice de trabajo del material, válido para molienda en molinos de barras, se calcula según la expresión:

$$W_{i,R} \left[\frac{kWh}{tc} \right] = \frac{62}{P_{100}^{0,23} Grp^{0,625} \left(\frac{10}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{10}{\sqrt{F_{80}}} \right)}$$

Ecuación 8: Cálculo de Índice de Bond para molino de Barras

Donde

$W_{i,R} \left[\frac{kWh}{tc} \right]$: Índice de Molienda (Work index) para molino de barras.

$P_{100} [\mu m]$: Abertura de la malla de corte utilizada para cerrar el circuito (tamaño 100% pasante del producto).

Grp [g/rev] : Masa de bajotamaño producido por revolución del molino de barras, bajo condiciones de equilibrio (100% carga circulante). En la práctica, corresponde al Gbp promedio de los últimos 3 ciclos de molienda.

F_{80} [μm] : Tamaño 80% pasante de la alimentación fresca al circuito de molienda.

P_{80} [μm] : Tamaño 80% pasante del producto final del circuito de molienda, obtenido por análisis granulométrico al bajotamaño de la prueba.

2.3.2.6. Bond Work Index para Molino de Bolas

El índice de trabajo del material, aplicable a la molienda fina en molinos de bolas, se determina en un molino estándar de laboratorio, de dimensiones 305 [mm] de diámetro por 305 [mm] de largo, que gira a 70 [rpm] y posee revestimiento liso. Se requiere una masa de 8 a 10 [kg] por muestra.

Se agrega la siguiente carga balanceada de bolas de acero al molino, cuyo peso total es de 20,125 [kg].

Tabla 2-7: Carga de Bolas estándar en prueba de Bond para molienda de Bolas

Diámetro [pulg]	N° aprox. de bolas	Peso [g]	Área superficial, [pulg ²]
1,45	43	8.803	285
1,17	67	7.206	289
1,00	10	0.672	32
0,75	71	2.011	126
0,61	94	1.433	110
Total	285	20.125	842

La alimentación al molino corresponde a material chancado a 100% -6#Ty con un volumen aparente de 700 [cm³]. Este material se muele en seco en un molino de bolas simulando una operación en circuito cerrado con 250% de carga circulante (utilizando la malla de corte requerida, que puede ir entre 28 y 400#Ty). La malla de corte más común para cerrar el circuito es de 100#Ty, correspondiente a 150 [μm].

Se continúa con los ciclos de molienda, hasta que los gramos netos de bajotamaño producidos por revolución alcancen el equilibrio.

El índice de trabajo del material, válido para molienda en molinos de bolas se calculará, según la siguiente expresión empírica desarrollada para materiales heterogéneos:

$$W_{i,B} \left[\frac{kWh}{tc} \right] = \frac{44,5}{P_{100}^{0,23} Gbp^{0,82} \left(\frac{10}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{10}{\sqrt{F_{80}}} \right)}$$

Ecuación 9: Cálculo de Índice de Bond para molino de Bolas

Donde

- $W_{i,B} \left[\frac{kWh}{tc} \right]$: Índice de Molienda (Work index) para molino de bolas.
- $P_{100} [\mu m]$: Abertura de la malla de corte utilizada para cerrar el circuito (tamaño 100% pasante del producto).
- $Gbp [g/rev]$: Masa de bajotamaño producido por revolución del molino de bolas, bajo condiciones de equilibrio (100% carga circulante). En la práctica, corresponde al Gbp promedio de los últimos 3 ciclos de molienda.
- $F_{80} [\mu m]$: Tamaño 80% pasante de la alimentación fresca al circuito de molienda.
- $P_{80} [\mu m]$: Tamaño 80% pasante del producto final del circuito de molienda, obtenido por análisis granulométrico al bajotamaño de la prueba.

Existen laboratorios que modifican las condiciones estándar de desarrollo de la prueba de Bond para molienda de bolas. Uno de los parámetros que presenta mayor variación es la malla de corte a la cual se finaliza la prueba [26].

Las mallas de corte más comunes son:

- 150#Ty, correspondiente a 106 [μm].
- 100#Ty, correspondiente a 150 [μm].
- 65#Ty, correspondiente a 212 [μm].
- 60#Ty, correspondiente a 250 [μm].

Además, se pueden utilizar diferentes tamaños del mineral alimentado al molino, que difieren del 100% -6#Ty estándar. Entre los tamaños más comunes se encuentran 8#Ty y 10#Ty.

También existen modificaciones en el número de ciclos de molienda. Un ejemplo de ello es la prueba de Bond “Estándar Aminpro”, donde se calcula el índice de trabajo realizando sólo 3 ciclos de molienda, a 50, 150 y 450 revoluciones cada uno, bajo las mismas condiciones que un ensayo normal (en términos de carga de bolas, velocidad, etc). A través de modelamiento, se busca replicar el comportamiento del material en un ensayo

estándar de Bond [27]. Similar es el caso de SGS, quien realiza una prueba llamada “*ModBond*” como input a su modelo CEET2. Esta prueba corresponde a una prueba de Bond que requiere una menor cantidad de masa (1,2 [kg]), y se lleva a cabo en sólo un ciclo de molienda, por lo que no se alcanza el estado de equilibrio durante la prueba [28].

Finalmente, una de las adaptaciones más comunes en los laboratorios locales es aquella donde se modifica el collar de bolas utilizado para el ensayo. Por ejemplo, la división Chuquicamata trabaja en todas sus campañas de pruebas metalúrgicas con una carga de bolas que difiere a la original en el tamaño y cantidad de bolas por tamaño, pero que mantiene el peso final de estos medios de molienda [29]. Este tamaño de bolas ha sido acondicionado para cargas cuya granulometría de alimentación sea de 100% -10#Ty.

Tabla 2-8: Carga de Bolas “Chuquicamata” en prueba de Bond para molienda de Bolas

Diámetro [pulg]	N° aprox. de bolas	Peso [g]	Área superficial [pulg²]
1,50	25	5.913	177
1,25	46	6.340	226
1,00	31	2.165	97
0,88	39	1.564	94
0,75	144	4.170	254
Total	285	20.125	849

Además, la carga que se utiliza actualmente en los laboratorios corresponde a la carga “BICO”, la que se detalla en la tabla [30]. Esta carga de bolas también difiere a la carga original en el tamaño y número de bolas por cada uno de ellos.

Tabla 2-9: Carga de Bolas “BICO” en prueba de Bond para molienda de Bolas

Diámetro [pulg]	N° aprox. de bolas	Peso [g]	Área superficial [pulg²]
1,50	25	5.561	177
1,25	39	5.020	191
1,00	60	3.955	188
0,88	68	3.003	165
0,75	93	2.586	164
Total	285	20.125	886

Se presenta en la figura siguiente, por lo tanto, una representación gráfica de la diferencia entre las tres cargas de bolas previamente expuestas. En ella, se compara el porcentaje en peso bajo cada uno de los tamaños de bolas de los distintos collares.

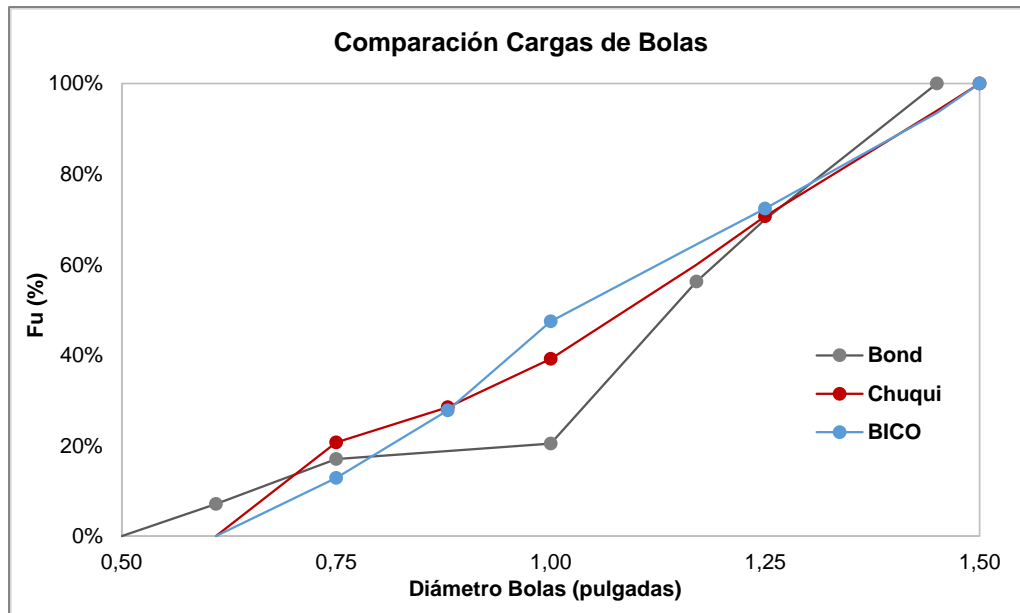


Figura 2-1: Comparación de cargas de bolas para prueba Bond Wi de Bolas

2.3.2.7. Jar mill grindability test

Esta prueba fue desarrollada para conocer el comportamiento del mineral en la molienda de molinos verticales, aplicables principalmente a la etapa de remolienda de concentrados [31].

Para ejecutar la prueba se requiere una muestra de 15 [kg] de mineral, el que debe estar chancado un 100% bajo 3,6 [mm]. Se lleva a cabo en un molino vertical desarrollado por Metso, de 8" de diámetro por 10" de largo, un factor de llenado de bolas del 40% y una velocidad crítica de 70%.

La prueba es del tipo cinética, donde se ensayan 4 intervalos de tiempo, determinando la granulometría del producto en cada intervalo. Las muestras son ensayadas en seco, y adicionalmente se lleva a cabo una prueba en base húmeda. El tiempo total de molienda es considerado como un 30% menor que aquel obtenido para las pruebas en base seca. Además, esta prueba en base húmeda es útil en la determinación de la función selección del mineral.

El resultado final de la prueba es la energía específica requerida para reducir el mineral de tamaño, desde la alimentación de diseño al producto deseado. Esta energía específica es calculada en unidades de Hp-h/t.

2.3.2.8. Resumen de Pruebas de Molienda

Se presenta una tabla resumen de las pruebas de molienda revisadas.

Tabla 2-10: Resumen de Pruebas de Molienda

	Masa [kg]	Granulometría Alimentación	Granulometría Producto
JKDWT	75,0	5 fracc. -63,2 +13,2 mm	-
SMC	6,0	1 fracc. -32 +27 mm	-
SPI	2,0	100% -3/4" (19 mm) 80% -1/2" (12,7 mm)	80% -10# Ty (1.7 mm)
SAGDesign	10,0 (4,5 L)	80% -3/4" (19 mm)	80% -10#Ty (1.7 mm)
Bond Wi de Barras	15,0	100% -1/2" (12.5 mm)	100% -14# Ty (1.18 mm)
Bond Wi de Bolas	10,0	100% -6# Ty (3.35 mm)	100% -100# Ty (150 um)
Jar Mill – Vertimill	15,0	100% -3,6 mm	-

2.3.3. Pruebas de Abrasión

En primera instancia, es importante destacar que las pruebas a describir a continuación presentan distinto alcance, en términos de la medición de la abrasión: mientras la prueba de Bond determina el desgaste de los medios de molienda (aceros), la prueba desarrollada por el JK MRC busca caracterizar la molienda del mineral por este mecanismo, y no considera un término de desgaste de aceros.

2.3.3.1. Bond Abrasion test

Esta prueba determina el índice de abrasión, que se utiliza para cuantificar el desgaste de los medios de acero en chancadores, molinos de barras y molinos de bolas.

Se requieren 1,6 [kg] de muestra, en el rango - 3/4" + 1/2" (-19,0 +12,5 [mm]). Se ingresa la muestra (4 cargas de 400 [g]) a un tambor giratorio que tiene incorporada una platina de acero inoxidable. La medida de abrasión es entregada por la pérdida de peso de esta platina, al final del ciclo de molienda a tiempo fijo (15 [min] por carga).

El índice de abrasión se calcula como sigue:

$$A_i = \text{Peso platina}_i - \text{Peso platina}_f$$

Ecuación 10: Cálculo de Índice de Abrasión de Bond

Este índice puede ser correlacionado con el desgaste, en lb/kWh, a través de lo indicado en la tabla siguiente. [32]

Tabla 2-11: Desgaste para distintos equipos

Desgaste [lb/kWh]		
Molienda húmeda de barras	Barras	$0.35(A_i - 0.020)^{0.2}$
	Revestimientos	$0.035(A_i - 0.015)^{0.3}$
Molienda húmeda de bolas	Bolas	$0.35(A_i - 0.015)^{0.33}$
	Revestimientos	$0.026(A_i - 0.015)^{0.3}$
Molienda seca de bolas	Bolas	$0.05A_i^{0.5}$
	Revestimientos	$0.005A_i^{0.5}$
Chancadores (giratorios, de conos, mandíbulas)	Revestimientos	$(A_i + 0.22)/11$

2.3.3.2. JK Abrasion test

El parámetro de abrasión t_a , requerido para caracterizar la ruptura del mineral por abrasión, es determinado usando un molino similar al molino estándar de Bond.

Requiere 3 [kg] de una muestra en el rango -55 +38 [mm], que es ingresada al molino por 10 minutos, a un 70% de la velocidad crítica. El material resultante es analizado en su granulometría y se obtiene el valor t_{10} para este producto [13].

El parámetro de abrasión, entonces, es calculado como:

$$t_a = \frac{t_{10}}{10}$$

Ecuación 11: Cálculo de Índice de Abrasión de JK MRC

Al igual que el producto Axb , a menores valores de t_a , mayor es la resistencia del material a la abrasión.

Tabla 2-12: Correlación de t_a con grado de abrasión

	Alta Abrasión	Abrasión Media				Baja Abrasión
t_a	< 0,24	0,24-0,35	0,35-0,41	0,41-0,54	0,54-0,65	0,65-1,38
						>1,38

2.3.3.3. Resumen de Pruebas de Abrasión

Se presenta una tabla resumen de las pruebas de abrasión revisadas.

Tabla 2-13: Resumen de Pruebas de Abrasión

	Masa [kg]	Granulometría Alimentación	Granulometría Producto
JK Abrasión (mineral)	3,0	-53 +37,5 mm (d=47.5 mm)	-
Bond Abrasión (acero)	1,6	-3/4" +1/2" (+19 -12,7 mm)	-

2.3.4. Pruebas de Caracterización

2.3.4.1. Cinética de Molienda

Se requieren al menos cuatro (4) cargas de mineral de una masa mínima de 1 [kg] cada una, a una granulometría de un 100% -10#Ty. El objetivo de la prueba es determinar el tiempo requerido para lograr un tamaño deseado, caracterizado por el P80 (en micrones).

El procedimiento consta de introducir en el molino, de dimensiones 8,75" de largo y 6,75" de diámetro, la carga de mineral y una carga de bolas que consta de 10 [kg] de bolas de 1" de diámetro [33]. Además se agrega agua, para ajustar la carga de mineral al porcentaje de sólido que se requiera. Si el protocolo de trabajo lo indicase, se adicionan los reactivos y cal en las dosis establecidas.

Se ajusta un tiempo fijo de molienda para cada una de las cargas, y luego de deslamar la muestra a la malla #400 y secarla, se realiza un análisis granulométrico a distintas mallas, para determinar el P80 o % sobre una malla de referencia establecida. Esto, de manera que sea posible interpolar (o extrapolar) el tiempo necesario para lograr el grado de molienda requerido.

Además, de la misma forma que en la prueba de Bond para molino de Bolas, es posible modificar la carga de bolas según los requerimientos de quien solicite el estudio.

Así, una de las variaciones más comunes es la solicitada por Codelco Chuquicamata, denominada "Carga Chuquicamata", que se detalla a continuación:

Tabla 2-14: Carga de Bolas “Chuquicamata” en prueba de cinética de molienda

Diámetro [pulg]	N° aprox. de bolas	Peso [g]
1 ¼”	15	1.898
1”	60	4.307
7/8”	70	3.136
Total	145	9.341

Finalmente, se puede incorporar pruebas de reactivos (reguladores de pH, colectores, etc.) simultánea a la realización de la prueba cinética de molienda.

2.3.4.2. *QEMSCAN*

QEMSCAN es un acrónimo para Quantitative Evaluation of Materials by Scanning Electron Microscopy, herramienta de microscopía óptica que considera en su configuración la medición de la variabilidad mineralógica basada en la química en escala de micrones.

Las muestras a ingresar a este microscopio deben ser cuidadosamente preparadas en forma de briquetas de 30 [mm] de diámetro y aproximadamente 10 [mm] de espesor. Se requieren 0,5 [kg] de muestra en una granulometría preferentemente entre 106 y 38 [µm], de los cuales mediante etapas sucesivas de cuarteo y rifle se seleccionan 5 [g]. Este mineral es mezclado con partículas de grafito de una granulometría similar al mineral. Las briquetas son fabricadas con esta mezcla, incorporando además resinas y otros agentes endurecedores. La mezcla es tratada en una olla a presión, luego es desgastada y pulida, para finalmente ser recubierta de otra capa de carbón, obteniendo así la briketa que será posteriormente analizada [34].

QEMSCAN, en su modo PMA (Análisis de partículas minerales, por su sigla en inglés) entrega la distribución de los minerales y elementos dentro de ellos, el porcentaje másico y rangos de tamaño en los cuales se presentan los minerales, la distribución del tamaño de partículas y tamaño de grano por muestra, y la liberación, textura y asociación de cada mineral con otras especies [35].

2.3.4.3. *Microscopía Óptica*

La técnica de microscopía óptica es principalmente utilizada para la determinación de composición mineral, ya sea a través de la polarización de luz transmitida (aplicable a minerales transparentes, no metálicos) como de luz reflejada (minerales opacos, principalmente sulfuros y algunos óxidos de Fe) [36]. Esto se realiza mediante el recuento calcográfico de puntos, a través de los cuales se determina la abundancia relativa de las especies sulfuradas y ganga, vía base mineral y/o base sulfuro. Además es posible

determinar el grado de liberación y las asociaciones minerales para una granulometría dada, mediante la técnica de barrido.

Los requerimientos de masa son tales que sea posible crear una briqueta de dimensiones 45 [mm] de largo, 25 [mm] de ancho y 15 [mm] de espesor. Normalmente, se requieren 0,5 [kg] de mineral a la granulometría deseada, la cual corresponde generalmente al grado de molienda objetivo (P80 del producto de molienda).

Al obtener la cuantificación de minerales opacos y transparentes, junto con el balance elemental, es posible determinar la composición mineralógica global de la muestra [37].

2.3.4.4. Factor de Forma

Una de las características a determinar a una partícula es su factor de forma, la que es importante en los procesos de clasificación, concentración y separación. Existen distintos indicadores de este factor, dependiendo de las dimensiones características de la partícula, siendo el más utilizado el factor de forma de volumen α_V , que se define como sigue:

$$\alpha_V = \frac{V_P}{d_n^3}$$

Ecuación 12: Cálculo factor de forma en volumen

Donde:

V_P = Volumen superficial de una partícula irregular

d_n = Diámetro nominal de una partícula irregular.

Experimentalmente, es posible determinarlo para tamaños superiores a 150 [μm], mediante la medición de las siguientes características de una fracción de mineral, con una distribución de tamaños cerrada:

- Número de partículas, N
- Tamaño medio de partículas, d_n
- Masa de la fracción, M
- Densidad de una fracción, ρ

$$\alpha_{Vn} = \frac{M}{\rho N d_n^3}$$

Ecuación 13: Cálculo factor de forma en volumen por partícula

2.3.4.5. Densidad real

La determinación de la densidad real se realiza en conjunto con la gravedad específica, esto es, el cociente entre el peso de la muestra respecto al peso del agua, la cual se calcula mediante el método de picnometría. Este consiste en medir la diferencia entre el picnómetro con mineral y aire, y aquel con mineral y agua. Para ello, se requieren aproximadamente 0,5 [kg] de mineral, de granulometría 100% -10#Ty.

Es importante notar que se debe conocer la temperatura del agua en todo momento, de forma de determinar su densidad exacta.

Se realizan al menos 4 repeticiones para una misma muestra. La fórmula de determinación de la densidad real será:

$$\rho_s = \frac{\rho_L(M - B)}{(A + M) - (B + P)}$$

Ecuación 14: Cálculo de Densidad Real

Donde:

B = Peso del picnómetro vacío, g

M = Peso del picnómetro con mineral, g

P = Peso del picnómetro con mineral y agua, g

A = Peso del picnómetro con agua, g

Con la determinación de la densidad real, es posible calcular la gravedad específica del mineral, que se obtiene como:

$$G.S = \frac{\rho_s}{\rho_L}$$

Ecuación 15: Cálculo de Gravedad Específica

Donde:

ρ_L = Densidad del líquido a la temperatura de trabajo, g/cm³

2.3.4.6. Densidad aparente

La determinación de la densidad aparente es fundamental para el diseño de distintas etapas de chancado, acopio, transporte y clasificación del mineral. Esta se realiza mediante la lectura directa del volumen de mineral en una probeta graduada. Para ello, se requieren aproximadamente 0,5 [kg] de mineral, de granulometría 100% -10#Ty.

Se registra el volumen ocupado por la muestra de mineral (en cm^3), la cual debe presentar un buen acomodo de las partículas (lo que es posible lograr mediante golpes suaves a la probeta). La muestra luego es pesada en una balanza de precisión, para determinar su masa exacta.

La densidad aparente del mineral, por lo tanto, será:

$$\rho_{ap} = \frac{M_{ap}}{V_{ap}} = \frac{m_{real} + m_{aire}}{V_{real} + V_{aire}}$$

Ecuación 16: Cálculo de Densidad Aparente

Donde:

M_{ap} = Masa del mineral, g

V_{ap} = Volumen del mineral, cm^3

2.3.4.7. *Humedad del mineral*

Para el desarrollo de esta prueba se requieren aproximadamente 1,2 [kg] de mineral, de granulometría bajo 10#Ty.

La muestra es pesada en su estado natural (“húmeda”), en una balanza de precisión mínima $\pm 0,01$ [g]. Ésta se ingresa luego a la estufa, a una temperatura entre los 70-80°C por un período de 12 horas. Pasado este tiempo la muestra es retirada, dejando enfriar, y pesada nuevamente, para obtener el peso seco. La muestra es nuevamente ingresada a la estufa por 1 hora, y es pesada para detectar diferencias entre ambos pesos. Si esta diferencia es menor de 0,05 g, se finaliza el proceso [38].

Se calcula la humedad en base seca y base húmeda, según las fórmulas:

$$Humedad_{B.Humeda}(\%) = \frac{\text{Peso húmedo} - \text{Peso seco}}{\text{Peso húmedo}}$$

Ecuación 17: Cálculo de Humedad en Base Húmeda

$$Humedad_{B.Seca}(\%) = \frac{\text{Peso húmedo} - \text{Peso seco}}{\text{Peso seco}}$$

Ecuación 18: Cálculo de Humedad en Base Seca

2.3.4.8. Resumen de Pruebas de Caracterización

Se presenta una tabla resumen de las pruebas de caracterización revisadas.

Tabla 2-15: Resumen de Pruebas de Caracterización

	Masa [kg]	Granulometría Alimentación	Granulometría Producto
Cinética de Molienda	4,0	100% -10#Ty (1,7 mm)	-
Microscopía Óptica	0,5	100% -10#Ty (1,7 mm)	-
QEMSCAN	0,5	100% -10#Ty (1,7 mm)	-
Factor de Forma	0,5	100% -10#Ty (1,7 mm)	-
Densidad Real	0,5	100% -10#Ty (1,7 mm)	-
Densidad aparente	0,5	100% -10#Ty (1,7 mm)	-
Humedad	1,2	100% -10#Ty (1,7 mm)	-

2.4. Clasificación de Pruebas Metalúrgicas

A partir de las distintas pruebas metalúrgicas de conminución mencionadas, es posible realizar clasificaciones según distintos criterios.

Uno de ellos es la etapa de conminución al cual se ve enfocada la prueba para el cálculo de potencia o dimensionamiento. Esta clasificación ya ha sido observada en la sección anterior, y se resume en la tabla.

Tabla 2-16: Clasificación de pruebas en etapa de conminución

Pruebas Utilizadas	
Chancado	Bond LEIT Ci Metso Crushability SPT
Molienda	JKDWT SMC SPI SAGDesign Bond Wi Barras Bond Wi Bolas
Remolienda	Jar Mill - Vertimill

Otra forma de clasificación de las pruebas de conminución es la del tamaño de la fracción a evaluar, llamado la escala de test [39].

Tabla 2-17: Clasificación de pruebas en fracción de tamaño

Pruebas Utilizadas	
Fracción fina	Bond Wi Bolas
Fracción media	SPI Bond Wi Barras SMC JKDWT
Fracción gruesa	Bond LEIT

Una clasificación más comercial, es a partir del *software* de modelamiento que utiliza los resultados de las pruebas para el diseño de procesos metalúrgicos [39].

Tabla 2-18: Clasificación de pruebas en *software* de modelamiento

Pruebas Utilizadas	
Millpower 2000	Bond LEIT Bond Wi de Barras Bond Wi de Bolas Bond Abrasión
JKSimMet	SMC o JKDWT Bond Wi de Bolas Bond Wi de Barras JK Abrasión
CEET2	Crusher Index SPI Bond Wi de Bolas
SAGDesign	SAGDesign Bond Wi de Bolas

Por lo tanto, se observa que se cuenta con una amplia gama de pruebas, de diferentes características y propósitos, que se pueden combinar de forma conveniente para complementar los protocolos de sondajes actuales.

2.5. Protocolos de Pruebas

La problemática de realizar pruebas metalúrgicas con muestras obtenidas desde la etapa de exploración ya ha sido abordada con anterioridad. Barratt y Doll proponen un protocolo de preparación de muestras, que considera la realización de pruebas metalúrgicas de chancado, molienda, abrasión, pruebas geotécnicas y de flotación [40]. Se busca entregar sets de datos que permitan desarrollar tres métodos o modelos de cálculo de parámetros de conminución, correspondiente a diferentes licencias comerciales.

El protocolo se divide en 5 etapas, que se diferencian principalmente en el tamaño de la muestra predominante en cada etapa.

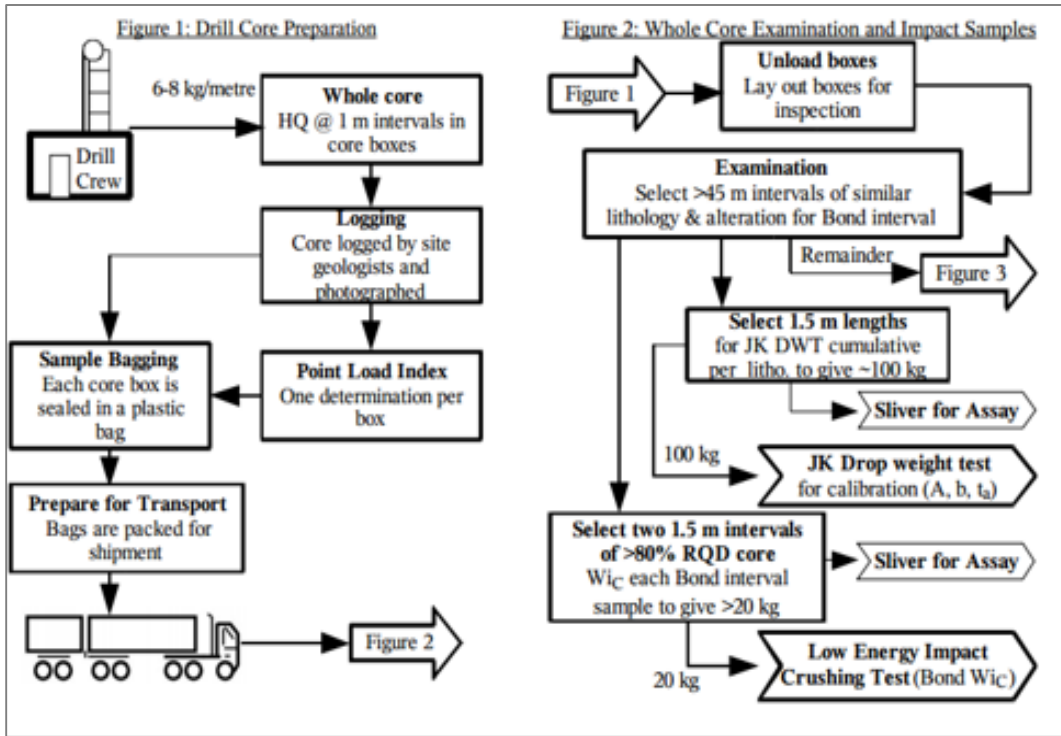


Figura 2-2: Protocolo de Muestreo propuesto por Doll & Barratt – Etapas 1 y 2

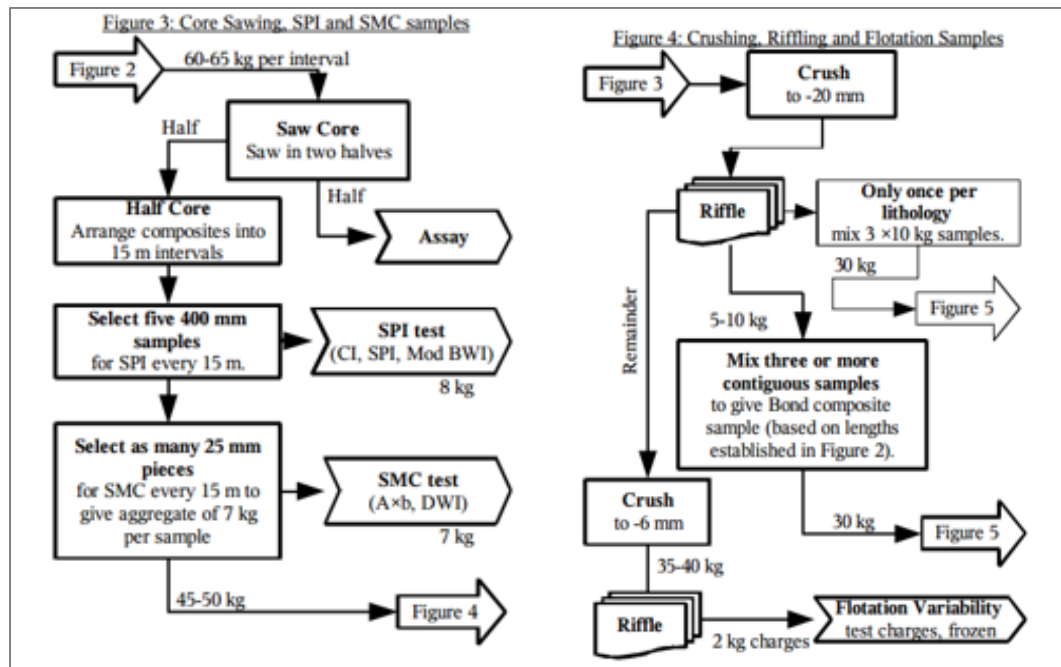


Figura 2-3: Protocolo de Muestreo propuesto por Doll & Barratt – Etapas 3 y 4

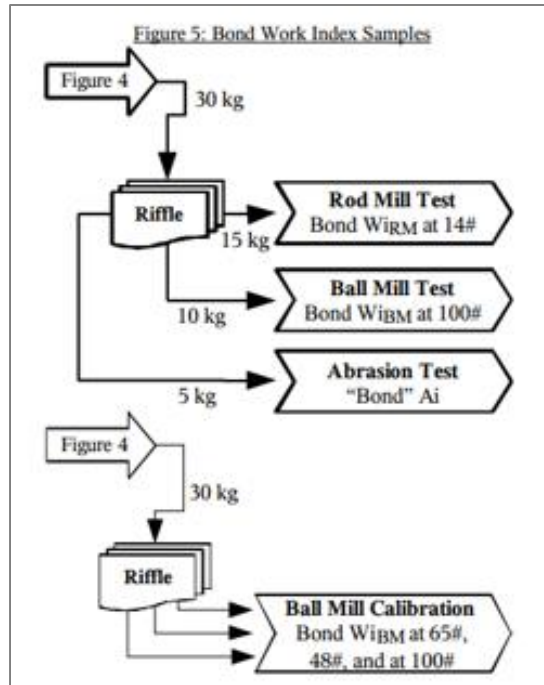


Figura 2-4: Protocolo de Muestreo propuesto por Doll & Barratt – Etapa 5

Este protocolo considera la utilización del sondaje completo para los fines ya mencionados. Como ya se ha observado, las limitaciones de muestra impiden llevar a cabo un programa de pruebas tan extenso. Además, se debe resguardar siempre un testigo de todo el sondaje (al menos $\frac{1}{4}$ longitudinal), para observación geológica o comprobaciones futuras [41].

Muchas veces, a causa de esto, la parte del sondaje que se encuentra disponible para realizar pruebas metalúrgicas no cumple con las condiciones de masa y granulometría recomendadas para la realización de éstas.

Por ello, es necesario el diseño de protocolos que permitan la obtención de información oportuna y certera, optimizando el uso de la muestra y combinando distintas plataformas de modelamiento de procesos de conminución.

3. METODOLOGÍA

Las etapas de trabajo en esta memoria de título, contemplan desde el estudio de las distintas pruebas metalúrgicas que han sido desarrolladas, luego la clasificación de estas pruebas, la elaboración de distintas propuestas de protocolos de muestreo en función de las metodologías de estimación actuales, incluyendo tópicos de control y aseguramiento de la calidad, y finalmente se realiza un análisis de casos de estudio de dos de estos protocolos propuestos.

Los datos utilizados para los ejemplos de estudio fueron proporcionados por una empresa minera que se encuentra desarrollando un proyecto en etapa de pre-factibilidad, y las pruebas de laboratorio fueron realizadas en el laboratorio metalúrgico *SGS Minerals Services S.A.*

3.1. Análisis de Pruebas Metalúrgicas

Se realiza un análisis bibliográfico de las distintas pruebas existentes, considerando como parámetros relevantes la masa y granulometría requerida por cada prueba, además de los resultados obtenibles a partir de cada una de ellas.

Luego, se realiza una nueva clasificación de estas pruebas utilizando conceptos como la capacidad de reutilización de material resultante luego de cada prueba.

3.2. Diseño de Protocolos de Muestreo

A partir de las pruebas estudiadas, se diseñan nuevos protocolos de muestreo, con el objeto de maximizar la información obtenible.

La metodología de elaboración de los protocolos tiene la estructura que se menciona a continuación.

3.2.1. Definición del tipo de muestra

En primera instancia se caracteriza la muestra de entrada, identificando su masa y granulometría. Para esta metodología se consideran los siguientes tipos de muestra:

- Sondajes Diamantinos (DDH), ya sea utilizando sondajes completos o cuarteados. Se utilizarán los tamaños más comunes, correspondientes a los diámetros:

Tabla 3-1: Diámetros utilizados – Sondajes DDH

	Diámetro interno [mm]
NQ	47,6
HQ	63,5
PQ	85,0

- Sondajes de Aire Reverso (AR), considerando dos tamaños de perforación:

Tabla 3-2: Diámetros utilizados – Sondajes AR

	Diámetro interno [mm]
5"	127,0
7 ½"	190,5

- Material particulado, ya sea de rechazo desde análisis geoquímico, o desde otras campañas de exploración. Los tamaños que se analizarán se presentan en la tabla.

Tabla 3-3: Diámetros utilizados – Material Particulado

	Diámetro [mm]
100% -1"	25,4
100% -6#Ty	3,35
100% -8#Ty	2,36
100% -10#Ty	1,70

Se considera una recuperación del sondaje extraído de 90% para los sondajes diamantinos, y de un 80% para los sondajes de aire reverso.

3.2.2. Selección de pruebas metalúrgicas a utilizar

Se analizan las pruebas metalúrgicas factibles de utilizar para una muestra de entrada definida, a partir de lo estudiado en el capítulo de análisis bibliográfico. Los protocolos de muestreo se diseñan en base a distintos niveles de tamaño, medidos según la granulometría a la cual pertenecen las distintas pruebas metalúrgicas.

El desarrollo de los protocolos considera, cuando sea necesaria, la reutilización del material proveniente del producto de una prueba, para la realización de otra prueba metalúrgica de un nivel de tamaño menor, optimizando así la utilización de esta masa.

3.2.3. Definición de las etapas de corte y preparación de cargas

Con el fin de minimizar los errores de delimitación y extracción de las muestras y submuestras, se explicitan las etapas de corte y división que se realizarán en cada etapa del protocolo, priorizando siempre aquellas técnicas que involucren la menor intervención humana en la realización de cada etapa.

3.2.4. Estimación de Parámetros Metalúrgicos

Se definen los requerimientos de información, y según éstos se selecciona el conjunto de pruebas necesaria para cumplir con ellos. Los distintos requerimientos a estudiar serán los que se presentan a continuación:

- Consumo Específico de Energía
- Consumo de Aceros
- Caracterización de Cabeza
- Caracterización para Concentración

Cada uno de los puntos mencionados tiene distintas metodologías para obtener la información, la cual es seleccionada en función de las pruebas disponibles para cada protocolo.

3.2.5. Determinación del Error Fundamental del protocolo y QA/QC

Para determinar el error de las muestras obtenidas mediante los protocolos propuestos, se utiliza el Nomograma de Muestreo desarrollado por Pierre Gy. Este método está basado en el cálculo del error fundamental de muestreo, y permite observar la contribución de cada una de las etapas del protocolo al error fundamental del procedimiento completo.

Se consideran además, para el control y aseguramiento de la calidad de la información a obtener, la ejecución de diferentes medidas de control, dirigidas a disminuir la variabilidad a pequeña escala del mineral. Estas serán definidas de forma transversal a todos los protocolos.

3.3. Análisis de ejemplos de estudio

Finalmente, se busca ejemplificar la definición de estos protocolos mediante dos casos de estudio de distintos tipos de material, en los cuales se obtienen parámetros de caracterización para molienda. Se analizan tanto la caracterización de cabeza de las muestras, la caracterización para concentración y el consumo específico de energía mediante diversas metodologías, con la finalidad de obtener información para las distintas geologías y, además, para distintas configuraciones de circuitos.

4. PROTOCOLOS DE PREPARACIÓN DE MUESTRAS

4.1. Consideraciones generales

Para realizar una correcta definición de los protocolos, se consideran los siguientes conceptos transversales a todas las propuestas.

4.1.1. Clasificación de pruebas metalúrgicas para el diseño de protocolos

Los protocolos de muestreo se diseñarán en base a distintos niveles de tamaño, medidos según la granulometría a la cual pertenecen las distintas pruebas metalúrgicas (Tabla 4-1).

Tabla 4-1: Clasificación de pruebas metalúrgicas por Nivel

Pruebas	
Nivel 1 Mayor a 1”	Bond LEIT Crusher Index JK DWT JK Abrasión SMC
Nivel 2 1”- 6#Ty	SPI Metso Crushability Bond Wi Barras SAGDesign Bond Abrasión SPT Jar Mill - Vertimill
Nivel 3 6#Ty – 10#Ty	Bond Wi Bolas
Nivel 4 Menor a 10#Ty	Microscopía Óptica QEMSCAN Densidad real Densidad aparente Humedad Factor de forma Cinética de Molienda

Este desarrollo considerará además, cuando sea necesaria, la reutilización del material proveniente del producto de una prueba, para la realización de otra prueba metalúrgica de un nivel de tamaño menor. Para ello, las pruebas cuyo material producto es considerado como reutilizable se mencionan a continuación.

Tabla 4-2: Clasificación de pruebas metalúrgicas por Reutilización

Pruebas	
Reutilizable	Bond LEIT Crusher Index JKDWT SMC SAGDesign SPT
No Reutilizable	Metso Crushability Bond Wi Bolas Bond Wi Barras SPI Bond Abrasión JK Abrasión Jar Mill – Vertimill QEMSCAN Densidad real Densidad aparente Humedad Factor de forma Cinética de Molienda

4.1.2. Control y Aseguramiento de la Calidad (QA/QC) de los protocolos

Como consideración preliminar, se determina que antes de cada etapa de reducción de tamaño se realiza un tamizaje del material a la malla que corresponda el producto esperado de chancado, para evitar la generación de un exceso de material fino en cada etapa. Además, las cargas de mineral serán generadas mediante la unión de los capachos opuestos del divisor rotatorio, donde se considera que un capacho está constituido por al menos 40 incrementos de mineral.

Los protocolos de muestreo serán diseñados de forma tal, que se busque no superar un error fundamental del 5% para todas las etapas, considerando en ello los distintos tamaños de entrada de la muestra. Para una correcta ejecución de los protocolos, se indican las siguientes consideraciones enfocadas en el control y aseguramiento de la calidad del producto a obtener.

- Control operacional de equipos, enfocada principalmente en el control de desgaste de los medios de molienda y de abrasión, y la calibración de los equipos de corte y homogeneización.
- Control durante el proceso de preparación de las muestras, enfocado en dos aspectos principales:

- Control de variación o pérdida de peso, la cual puede definirse desde las etapas de corte [Tabla 4-3] o reutilización de muestras [Tabla 4-4].

Tabla 4-3: Pérdida de masa por etapa de corte

Etapas	Pérdida (%)
Corte	1%
Homogenización	1%

Tabla 4-4: Pérdida de masa por prueba reutilizable

Prueba	Pérdida (%)
LEIT	5%
JK DWT	5%
SMC	5%
Crusher Index	3%
SAGDesign	2%
SPT	2%

- Control granulométrico, que se debe realizar al 10% de las cargas generadas, para al menos 4 mallas distintas. Se acepta como válida una diferencia en las masas retenidas por malla, comparando la carga generada y la distribución granulométrica de la carga madre de dicha etapa de reducción de tamaño, menor a 3%.
- Control de la precisión de las etapas de muestreo, mediante:
 - Precisión del análisis químico, controlando el error de análisis en muestras duplicadas, o contra la ley de la carga madre.
 - Precisión mecánica, la que incluye la cuantificación del error de preparación mecánica y análisis químico.
 - Precisión global, que incluye los errores de las etapas de corte, preparación y análisis químico.
- Exactitud del análisis químico, el que se cuantifica a través del uso de materiales de referencia.

Se considera que todas las pruebas son llevadas a cabo correctamente, por lo que no se asegura la generación de una carga testigo para todas las granulometrías, a utilizar en caso de producirse un error en la realización de las pruebas. Sin embargo, se genera una carga testigo de 0,5 [kg] a granulometría 100% -10#Ty en la mayor parte de los protocolos, la cual puede ser utilizada para realizar análisis químicos y determinar el error de análisis y/o de preparación de las muestras.

4.2. Protocolos de Sondajes Diamantinos (DDH)

4.2.1. Protocolo DDH - #1

La definición del protocolo responde a la necesidad de formular un protocolo que maximice la información obtenible, con el menor requerimiento de masa, a un bajo error fundamental.

El material de entrada a este protocolo corresponde a 20 [kg] de mineral, proveniente de muestras de ¼ de sondaje. Los sondajes aceptables, además de su metraje requerido, se observan en la tabla.

Tabla 4-5: Metraje requerido – Protocolo DDH-#1

Tipo Sondaje	Metraje Teórico [m]	Metraje método “Cut-Core” [m]
NQ	20,0	4,4
HQ	11,0	6,8
PQ	6,5	-

Las pruebas a realizar, por nivel, serán:

- Nivel 1: SMC
- Nivel 2: Prueba de Bond para Abrasión
- Nivel 3: Prueba de Bond para Molienda de Bolas
- Nivel 4: Caracterización de cabeza, y para concentración.

El protocolo de preparación de las muestras para las pruebas mencionadas se observa a continuación.

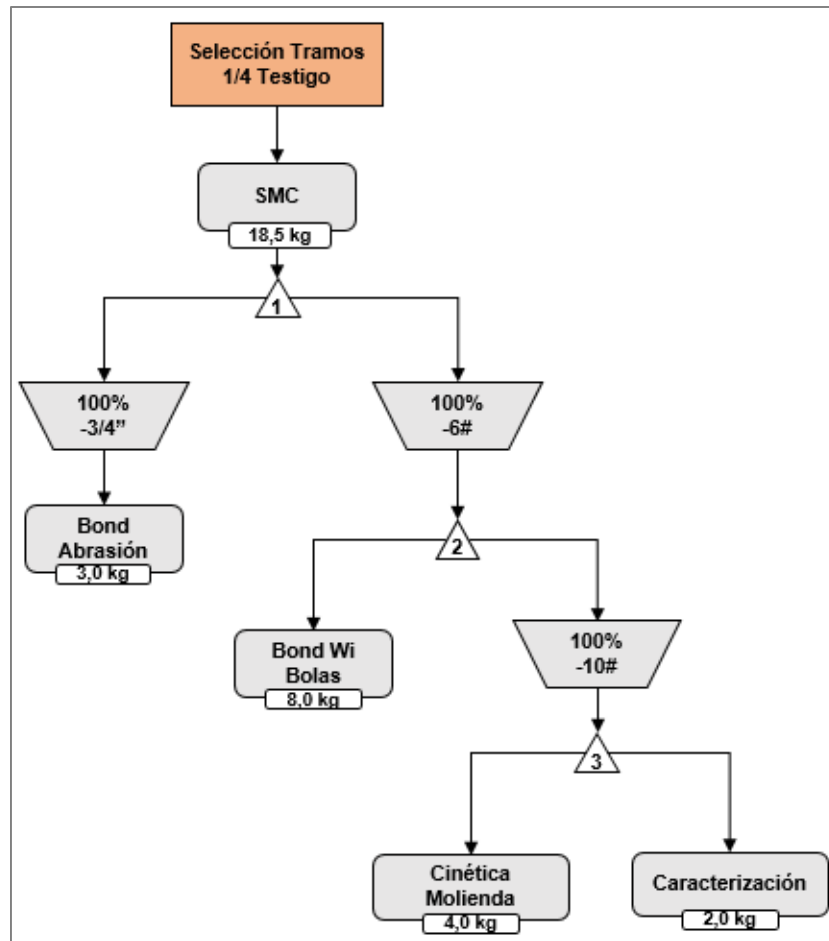


Figura 4-1: Protocolo de Muestreo DDH #1

Se detallan las etapas de corte indicadas en el protocolo.

Tabla 4-6: Etapas de corte y homogeneización – Protocolo DDH-#1

Etapa	Homogeneización	Corte	Resultado
1	Traspaleo	Divisor Rotatorio	12 cargas de 1,55 kg
2	Divisor Rotatorio	Divisor Rotatorio	20 cargas de 0,75 kg
3	Divisor Rotatorio	Divisor Rotatorio	6 cargas de 1,10 kg

Para la formación de las masas totales requeridas para las pruebas de Bond Abrasión (2 capachos) y Bond Wi de Bolas (11 capachos), se debe procurar juntar los capachos opuestos del divisor rotatorio, para eliminar posibles sesgos en la unión de las cargas.

El error fundamental en el que se incurre, al llevar la muestra original desde sondajes cuarteados NQ hasta las cargas de caracterización, se observa en la tabla siguiente:

Tabla 4-7: Error Fundamental – Protocolo DDH-#1

Etapa	Masa Muestra [kg]	Diámetro [cm]	Error Relativo [%]
¼ Sondaje NQ	20,0	2,38	3,0
División	15,5	2,38	
Chancado -6#	15,5	0,34	0,6
División	6,8	0,34	
Chancado -10#	6,8	0,17	0,6
Caracterización	2,0	0,17	
Error Fundamental			3,2

Para el caso de sondajes tamaño HQ, el error en la primera etapa de división se incrementa a 4,3%, considerando un error global del protocolo de 4,4%. Finalmente, para los sondajes de tamaño PQ, estos valores llegan a 6,2% y 6,3% respectivamente.

Por lo tanto, el protocolo diseñado presenta un error fundamental menor al 5% para los sondajes de tamaño NQ y HQ, y menor al 10% para las tres alternativas.

La información requerida se obtendrá según las siguientes metodologías:

- Consumo Específico de Energía: A través del método desarrollado por Morrell, desarrollado en el Anexo B.1.
- Consumo de Aceros: Desde el índice de abrasión que se obtiene desde la prueba de Bond para Abrasión, se puede calcular el consumo de aceros de distintos medios de molienda y revestimientos de equipos por lo que se indica en la Tabla 2-11.
- Caracterización de Cabeza: Considerando la restringida cantidad de masa disponible para la caracterización, se puede tomar una de las siguientes opciones:
 - Realizar una caracterización física completa, determinando la humedad, factor de forma y densidad de cada muestra.
 - Si se prioriza en cambio la caracterización mineralógica, se ejecutan las pruebas de microscopía óptica o análisis QEMSCAN, además de la densidad del mineral.
- Caracterización para Concentración: A través de la realización de pruebas cinéticas de molienda, se espera caracterizar la muestra respecto al tiempo necesario para lograr el producto de molienda deseado.

Como consideración general, la prueba SMC considera que es posible ensayar las siguientes fracciones de tamaño, dependiendo del diámetro del sondaje de la muestra.

Tabla 4-8: Fracción de tamaño SMC por tipo de sondaje

Tipo Sondaje	Fracción de tamaño [mm]
NQ	-22,4 +19,0 -16,0 +13,2
HQ PQ	-31,5 +26,5 -22,4 +19,0 -16,0 +13,2

4.2.2. Protocolo DDH - #2

Este protocolo está dirigido a obtener información de conminución a través del software de modelamiento CEET2, además de entregar la oportunidad de realizar comparaciones mediante el método de Aminpro.

El material de entrada a este protocolo corresponde a 30 [kg] de mineral, proveniente de muestras de ¼ de sondaje. Los sondajes aceptables, además de su metraje requerido, se observan en la tabla.

Tabla 4-9: Metraje requerido – Protocolo DDH-#2

Tipo Sondaje	Metraje Teórico [m]
NQ	29,5
HQ	16,5
PQ	9,5

Las pruebas a realizar, por nivel, serán:

- Nivel 1: Crusher Index
- Nivel 2: SPI, SPT, Prueba de Bond para Abrasión.
- Nivel 3: Prueba de Bond para Molienda de Bolas
- Nivel 4: Caracterización de cabeza.

El protocolo de preparación de las muestras para las pruebas mencionadas se observa a continuación.

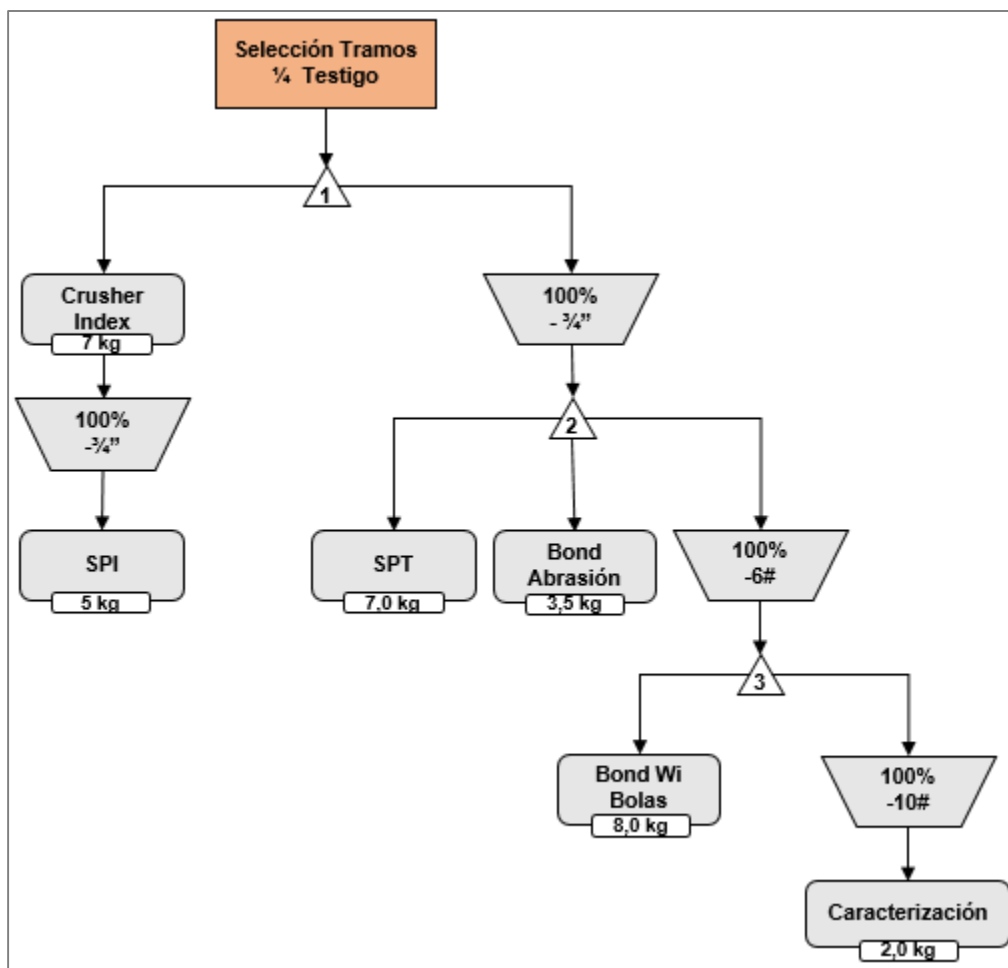


Figura 4-2: Protocolo de Muestreo DDH #2

Se detallan las distintas etapas de corte descritas en el protocolo.

Tabla 4-10: Etapas de corte y homogeneización – Protocolo DDH-#2

Etapa	Homogeneización	Corte	Resultado
1	Traspaleo	Divisor Rotatorio	8 cargas de 3,60 kg
2	Divisor Rotatorio	Divisor Rotatorio	12 cargas de 1,75 kg
3	Divisor Rotatorio	Divisor Rotatorio	10 cargas de 1,05 kg

Para la formación de las masas totales requeridas para las pruebas Crusher Index (2 capachos), SPT (4 capachos), Bond Abrasión (2 capachos) y Bond Wi de Bolas (8 capachos), se debe procurar juntar los capachos opuestos del divisor rotatorio, para eliminar posibles sesgos en la unión de las cargas.

El error fundamental en el que se incurre, al llevar la muestra desde el sondaje cuarteado NQ hasta las cargas de caracterización, se observa en la Tabla 4-11.

Tabla 4-11: Error Fundamental – Protocolo DDH-#2

Etapa	Masa Muestra [kg]	Diámetro [cm]	Error Relativo [%]
¼ Sondaje NQ	30,0	2,38	2,9
División	21,2	2,38	
Chancado -¾”	21,2	1,60	3,4
División	10,3	1,60	
Chancado -10#	10,3	0,34	1,4
Caracterización	2,0	0,34	
Error Fundamental			4,7

Para el caso de sondajes tamaño HQ, el error en la primera etapa de división se incrementa a 4,2%, considerando un error global del protocolo de 5,5%. Finalmente, para los sondajes de tamaño PQ, estos valores llegan a 5,9% y 7,0% respectivamente.

Por lo tanto, el protocolo diseñado presenta un error fundamental menor al 5% para los sondajes de tamaño NQ, y menor al 10% para las tres alternativas.

La información requerida se obtendrá según las siguientes metodologías:

- Consumo Específico de Energía: A través del método desarrollado por MinnovEx Technologies Inc. [Anexo B.2] y de la metodología de Aminpro [Anexo B.3]. Es posible incorporar las variables entregadas por la prueba SPT para evaluar alternativas que incorporen equipos HPGR.
- Consumo de Aceros: Desde el índice de abrasión que se obtiene desde la prueba de Bond para Abrasión, se puede calcular el consumo de aceros de distintos medios de molienda y revestimientos de equipos por lo que indica la Tabla 2-11.
- Caracterización de Cabeza: Considerando la restringida cantidad de masa disponible para la caracterización, se puede tomar una de las siguientes opciones:
 - Realizar una caracterización física completa, determinando la humedad, factor de forma y densidad de cada muestra.
 - Si se prioriza en cambio la caracterización mineralógica, se ejecutan las pruebas de microscopía óptica o análisis QEMSCAN, además de la densidad del mineral.

4.2.3. Protocolo DDH - #3-A

Este protocolo considera la utilización del software de modelamiento JKSimMet para el diseño de procesos de conminución, y además incorpora la caracterización de remolienda para la etapa de concentración del mineral.

El material de entrada a este protocolo corresponde a 75 [kg] de mineral, proveniente de muestras de sondajes completos. Los sondajes aceptables, además de su metraje requerido, se observan en la tabla siguiente.

Tabla 4-12: Metraje requerido – Protocolo DDH-#3-A

Tipo Sondaje	Metraje Teórico [m]
HQ	9,5
PQ	5,0

Las pruebas a realizar, por nivel, serán:

- Nivel 1: JK DWT
- Nivel 2: Vertimill, Prueba de Bond para Molienda de Barras
- Nivel 3: Prueba de Bond para Molienda de Bolas
- Nivel 4: Caracterización de cabeza, y para concentración.

El protocolo de preparación de las muestras para las pruebas mencionadas se observa a continuación.

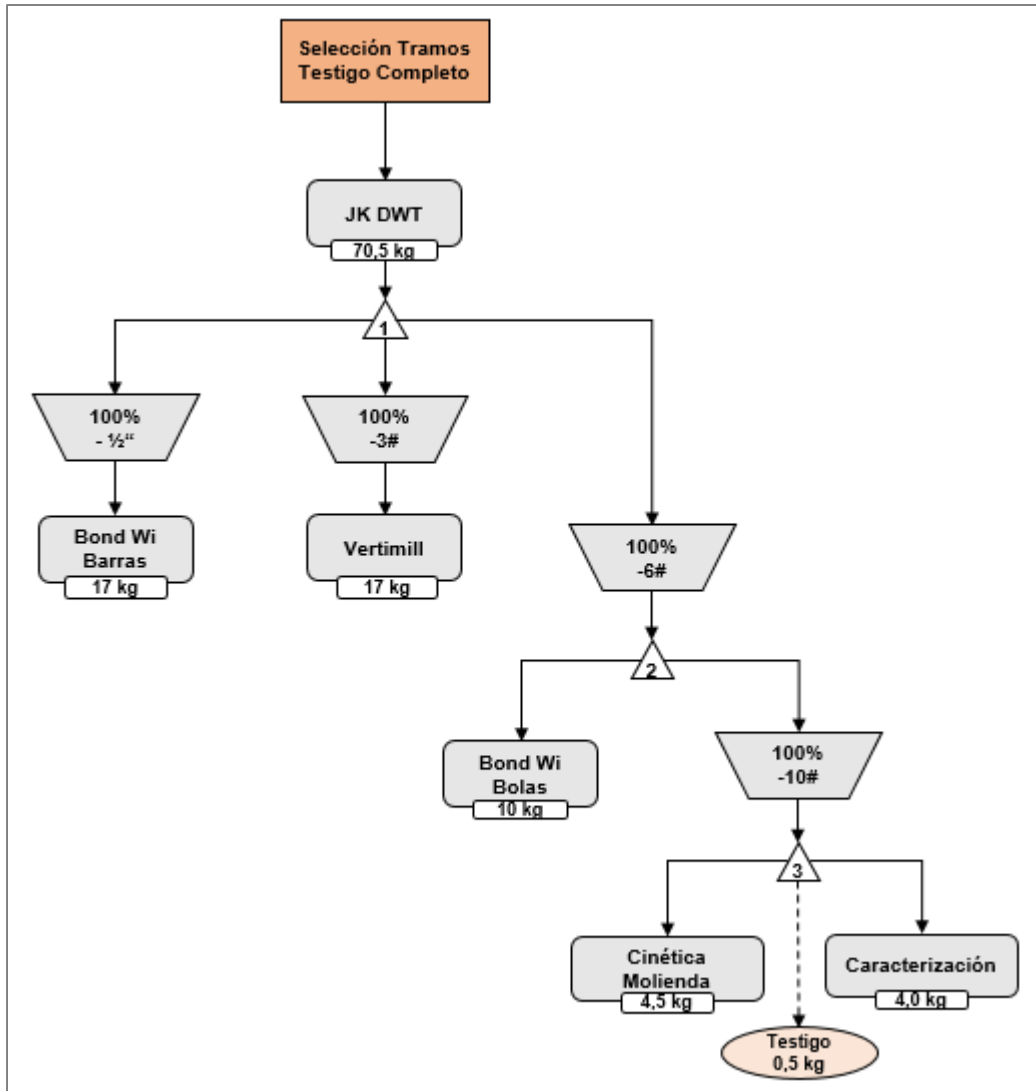


Figura 4-3: Protocolo de Muestreo DDH-#3-A

Se detallan las etapas de corte descritas en el protocolo.

Tabla 4-13: Etapas de corte y homogeneización – Protocolo DDH-#3-A

Etapa	Homogeneización	Corte	Resultado
1	Traspaleo	Divisor Rotatorio	20 cargas de 3,5 kg
2	Divisor Rotatorio	Divisor Rotatorio	4 cargas de 5,0 kg
3	Divisor Rotatorio	Divisor Rotatorio	8 cargas de 1,2 kg

Para la formación de las masas totales requeridas para las pruebas Bond Wi de Barras (5 capachos), Vertimill (5 capachos) y Bond Wi de Bolas (2 capachos), se debe procurar juntar los capachos opuestos del divisor rotatorio, para eliminar posibles sesgos en la unión de las cargas.

El error fundamental en el que se incurre, al llevar la muestra original desde el sondaje completo de tamaño HQ hasta las cargas de caracterización, se observa en la tabla.

Tabla 4-14: Error Fundamental – Protocolo DDH-#3-A

Etapa	Masa Muestra [kg]	Diámetro [cm]	Error Relativo [%]
Sondaje completo HQ	75,0	6,35	10,6
División	34,9	6,35	
Chancado -6#	34,9	0,34	0,6
División	10,0	0,34	
Chancado -10#	10,0	0,17	0,4
Caracterización	4,0	0,17	
Error Fundamental			10,7

Para el caso de sondajes tamaño PQ, el error en la primera etapa de división se incrementa a 15,3%, considerando un error global del protocolo de 15,4%.

Por lo tanto, el protocolo diseñado presenta un error fundamental mayor al 10% para ambas alternativas, debido a la granulometría de entrada del mineral.

La información requerida se obtendrá según las siguientes metodologías:

- Consumo Específico de Energía: A través del método desarrollado por JK MRC [Anexo B.4], considerando la molienda tanto por impacto como por abrasión.
- Consumo de Aceros: No se incorpora un índice de consumo de aceros.
- Caracterización de Cabeza: Se busca realizar una caracterización física, mediante la determinación de la humedad, factor de forma y densidad de cada muestra. Además, la caracterización mineralógica estará determinada por la ejecución de pruebas de microscopía óptica o análisis QEMSCAN.
- Caracterización para Concentración: A través de la realización de pruebas cinéticas de molienda, se espera caracterizar la muestra respecto al tiempo necesario para lograr un producto de molienda deseado. Además, incluyendo las pruebas Vertimill se obtiene información sobre las condiciones sobre las cuales realizar la remolienda de concentrados.

4.2.4. Protocolo DDH - #3-B

Este protocolo difiere del protocolo DDH #3-A, en que se considera la incorporación de la prueba SMC calibrada con la base de datos de JK, en lugar de la prueba JK DWT completa. Esto, para poder utilizar el software de modelamiento JKSimMet, cuando se dispone de una menor cantidad de masa.

El material de entrada a este protocolo corresponde a 50 [kg] de mineral, proveniente de muestras de $\frac{1}{4}$ de sondajes. Los sondajes aceptables, además de su metraje requerido, se observan en la tabla.

Tabla 4-15: Metraje requerido – Protocolo DDH-#3-B

Tipo Sondaje	Metraje Teórico [m]
NQ	49,0
HQ	27,0
PQ	15,5

Las pruebas a realizar, por nivel, serán:

- Nivel 1: SMC
- Nivel 2: Vertimill, Prueba de Bond para Molienda de Barras
- Nivel 3: Prueba de Bond para Molienda de Bolas
- Nivel 4: Caracterización de cabeza, y para concentración.

El protocolo de preparación de las muestras para las pruebas mencionadas se observa a continuación.

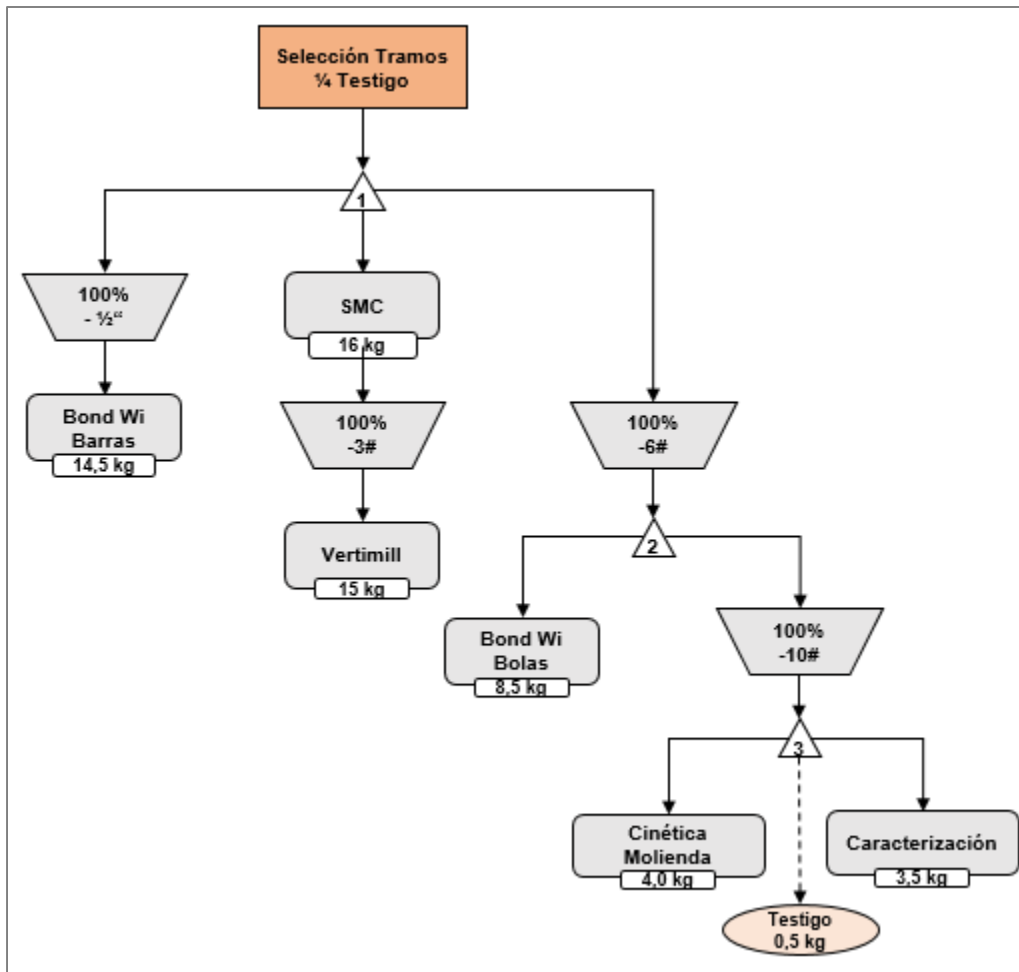


Figura 4-4: Protocolo de Muestreo DDH #3-B

Se detallan las etapas de corte descritas en el protocolo.

Tabla 4-16: Etapas de corte y homogeneización – Protocolo DDH-#3-B

Etapa	Homogeneización	Corte	Resultado
1	Traspaleo	Divisor Rotatorio	30 cargas de 1,6 kg
2	Divisor Rotatorio	Divisor Rotatorio	12 cargas de 1,4 kg
3	Divisor Rotatorio	Divisor Rotatorio	8 cargas de 1,0 kg

Para la formación de las masas totales requeridas para las pruebas Bond Wi de Barras (9 capachos), SMC (10 capachos) y Bond Wi de Bolas (6 capachos), se debe procurar juntar los capachos opuestos del divisor rotatorio, para eliminar posibles sesgos en la unión de las cargas.

El error fundamental en el que se incurre, al llevar la muestra original de ¼ de testigo NQ hasta las cargas de caracterización, se observa en la tabla.

Tabla 4-17: Error Fundamental – Protocolo DDH-#3-B

Etapa	Masa Muestra [kg]	Diámetro [cm]	Error Relativo [%]
¼ Sondaje NQ	50,0	2,38	4,9
División	17,5	2,38	
Chancado -6#	17,5	0,34	0,5
División	8,5	0,34	
Chancado -10#	8,5	0,17	0,4
División	3,5	0,17	
Error Fundamental			4,9

Para el caso de sondajes tamaño HQ, el error en la primera etapa de división se incrementa a 7,0%, considerando un error global del protocolo de 7,0%. Finalmente, para los sondajes de tamaño PQ, estos valores llegan a 9,9% y 10,0% respectivamente.

Por lo tanto, el protocolo diseñado presenta un error fundamental menor al 5% para los sondajes de tamaño NQ, y menor al 10% para las tres alternativas.

La información requerida se obtendrá según las siguientes metodologías:

- Consumo Específico de Energía: A través del método desarrollado por JK MRC [Anexo B.4], considerando la molienda tanto por impacto como por abrasión, y solicitando que la prueba SMC sea calibrada con los parámetros correspondientes a la prueba JK DWT.
- Consumo de Aceros: No se incorpora un índice de consumo de aceros.
- Caracterización de Cabeza: Se busca realizar una caracterización física, mediante la determinación de la humedad, factor de forma y densidad de cada muestra. Además, la caracterización mineralógica estará determinada por la ejecución de pruebas de microscopía óptica o análisis QEMSCAN.
- Caracterización para Concentración: A través de la realización de pruebas cinéticas de molienda, se espera caracterizar la muestra respecto al tiempo necesario para lograr un producto de molienda deseado. Además, incluyendo las pruebas Vertimill se obtiene información sobre las condiciones sobre las cuales realizar la remolienda de concentrados.

4.2.5. Protocolo DDH - #4

Este protocolo considera la propuesta de pruebas metalúrgicas para realizar estimaciones mediante la metodología de Barratt, realizando todas las pruebas desarrolladas por Bond.

El material de entrada a este protocolo corresponde a 55 [kg] de mineral, proveniente de muestras de sondaje completo. Los sondajes aceptables, además de su metraje requerido, se observan en la tabla.

Tabla 4-18: Metraje requerido – Protocolo DDH-#4

Tipo Sondaje	Metraje Teórico [m]
NQ	13,5
HQ	7,5
PQ	4,5

Las pruebas a realizar, por nivel, serán:

- Nivel 1: LEIT
- Nivel 2: Prueba de Bond para Molienda de Barras, SPT, Vertimill, Prueba de Bond para Abrasión.
- Nivel 3: Prueba de Bond para Molienda de Bolas
- Nivel 4: Caracterización de cabeza, y Cinética de Molienda.

El protocolo de preparación de las muestras para las pruebas mencionadas se observa a continuación.

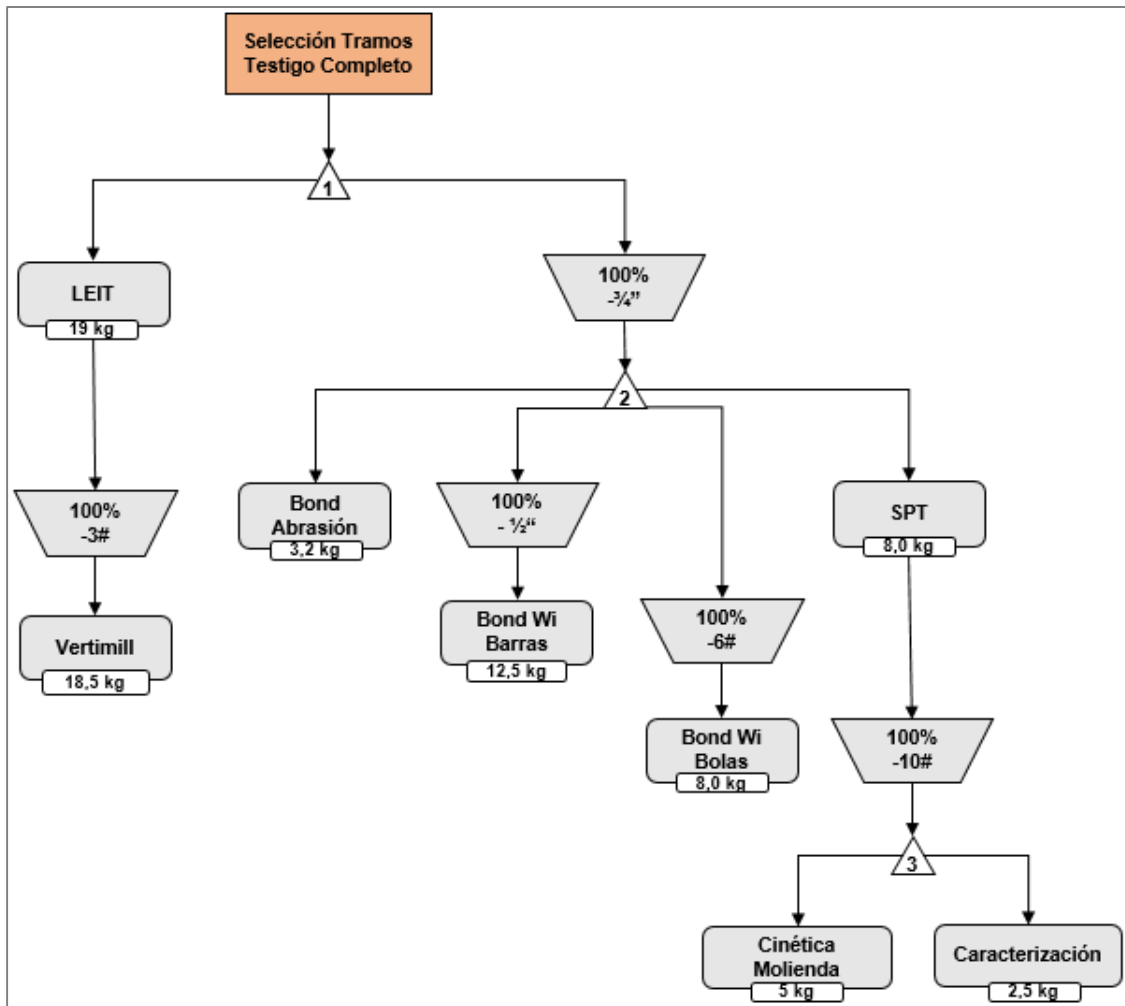


Figura 4-5: Protocolo de Muestreo DDH #4

Se detallan las etapas de corte descritas en el protocolo.

Tabla 4-19: Etapas de corte y homogeneización – Protocolo DDH-#4

Etapa	Homogeneización	Corte	Resultado
1	Traspaleo	Divisor Rotatorio	8 cargas de 6,6 kg
2	Divisor Rotatorio	Divisor Rotatorio	20 cargas de 1,6 kg
3	Divisor Rotatorio	Divisor Rotatorio	6 cargas de 1,25 kg

Para la formación de las masas totales requeridas para las pruebas LEIT (3 capachos), SPT (5 capachos), Bond Wi Abrasión (2 capachos), Bond Wi de Barras (8 capachos) y Bond Wi de Bolas (5 capachos), se debe procurar juntar los capachos opuestos del divisor rotatorio, para eliminar posibles sesgos en la unión de las cargas.

El error fundamental en el que se incurre, al llevar la muestra original desde los testigos de sondajes completos de tamaño NQ, hasta las cargas de caracterización, se observa en la tabla.

Tabla 4-20: Error Fundamental – Protocolo DDH-#4

Etapa	Masa Muestra [kg]	Diámetro [cm]	Error Relativo [%]
Sondaje completo NQ	55,0	4,75	6,6
División	33,0	4,75	
Chancado -3/4"	33,0	1,71	5,3
División	7,7	1,71	
Chancado -10#	7,7	0,17	0,5
Caracterización	2,5	0,17	
Error Fundamental			8,5

Para el caso de sondajes tamaño HQ, el error en la primera etapa de división se incrementa a 9,5%, considerando un error global del protocolo de 10,8%. Finalmente, para los sondajes de tamaño PQ, estos valores llegan a 13,6% y 14,6% respectivamente.

Por lo tanto, ninguno de los protocolos diseñados presenta un error fundamental menor al 5%, pero para los sondajes de tamaño NQ este error es menor a un 10%.

La información requerida se obtendrá según las siguientes metodologías:

- Consumo Específico de Energía: A través del método desarrollado por Barratt [Anexo B.5]. Es posible incorporar las variables entregadas por la prueba SPT para evaluar alternativas que incorporen equipos HPGR.
- Consumo de Aceros: Desde el índice de abrasión que se obtiene desde la prueba de Bond para Abrasión, se puede calcular el consumo de aceros de distintos medios de molienda y revestimientos de equipos por lo que indica la Tabla 2-11.
- Caracterización de Cabeza: Considerando la restringida cantidad de masa disponible para la caracterización, se puede tomar una de las siguientes opciones:
 - Realizar una caracterización física completa, determinando la humedad, factor de forma y densidad de cada muestra.
 - Si se prioriza en cambio la caracterización mineralógica, se ejecutan las pruebas de microscopía óptica o análisis QEMSCAN, además de la densidad del mineral.
- Caracterización para Concentración: A través de la realización de pruebas cinéticas de molienda, se espera caracterizar la muestra respecto al tiempo necesario para lograr el producto de molienda deseado. Además, incluyendo las pruebas Vertimill se obtiene información sobre las condiciones para realizar la remolienda de concentrados.

4.2.6. Protocolo DDH - #5-A

El protocolo a continuación hace uso de una metodología desarrollada recientemente, conocida como SAGDesign, que incluye una nueva prueba metalúrgica introducida al mercado.

El material de entrada a este protocolo corresponde a 30 [kg] de mineral, proveniente de muestras de sondaje completo. Los sondajes aceptables, además de su metraje requerido, se observan en la tabla.

Tabla 4-21: Metraje requerido – Protocolo DDH-#5-A

Tipo Sondaje	Metraje Teórico [m]
NQ	7,5
HQ	4,0
PQ	2,5

Se tienen las consideraciones a tener en cuenta para el diseño de los protocolos.

Las pruebas a realizar, por nivel, serán:

- Nivel 1: LEIT
- Nivel 2: SAGDesign, SPT, Prueba de Bond para Abrasión
- Nivel 3: Prueba de Bond para Molienda de Bolas
- Nivel 4: Caracterización de cabeza, y cinéticas de molienda.

El protocolo de preparación de las muestras para las pruebas mencionadas se observa a continuación.

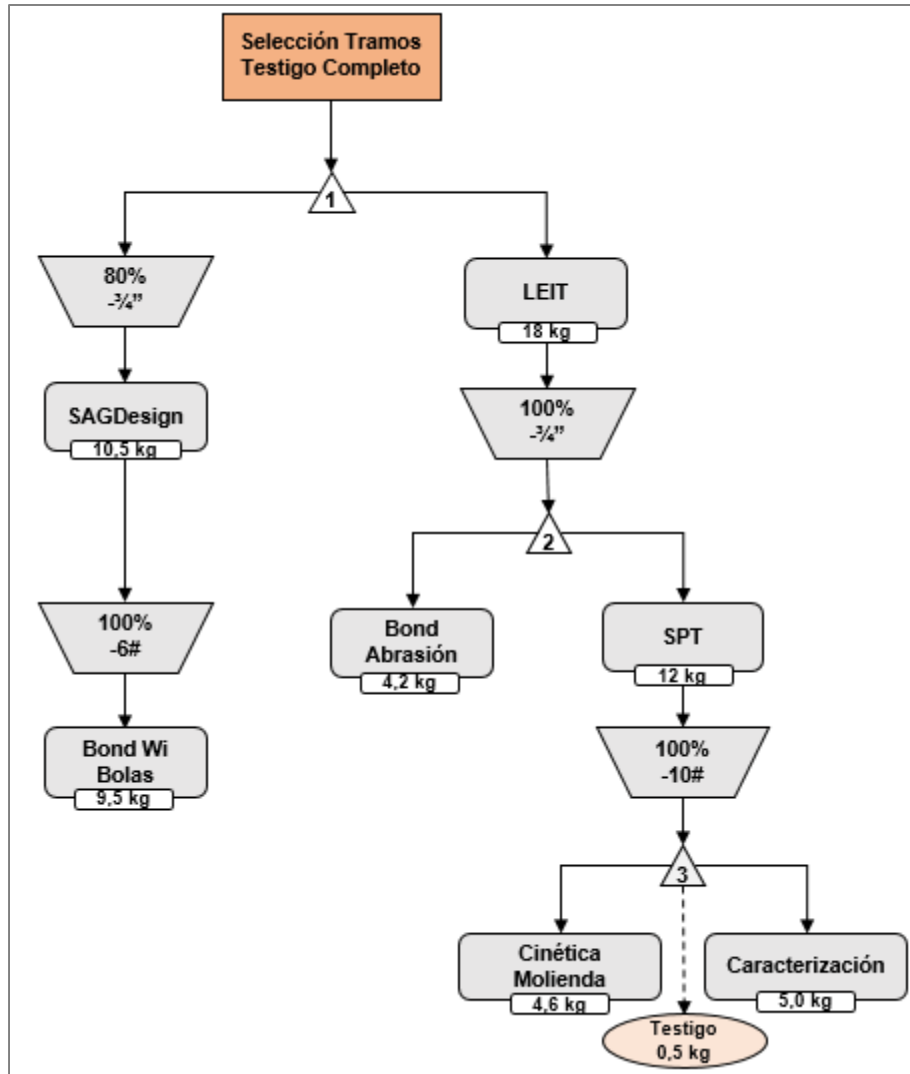


Figura 4-6: Protocolo de Muestreo DDH #5-A

Se detallan las etapas de corte descritas en el protocolo.

Tabla 4-22: Etapas de corte y homogeneización – Protocolo DDH-#5-A

Etapa	Homogeneización	Corte	Resultado
1	Traspaleo	Divisor Rotatorio	8 cargas de 3,6 kg
2	Divisor Rotatorio	Divisor Rotatorio	8 cargas de 2,0 kg
3	Divisor Rotatorio	Divisor Rotatorio	10 cargas de 1,2 kg

Para la formación de las masas totales requeridas para las pruebas SAGDesign (3 capachos), LEIT (5 capachos), Bond Abrasión (2 capachos) y SPT (6 capachos), se debe procurar juntar los capachos opuestos del divisor rotatorio, para eliminar posibles sesgos en la unión de las cargas.

El error fundamental en el que se incurre, al llevar la muestra original de sondaje completo NQ hasta las cargas de caracterización, se observa en la tabla.

Tabla 4-23: Error Fundamental – Protocolo DDH-#5-A

Etapa	Masa Muestra [kg]	Diámetro [cm]	Error Relativo [%]
Sondaje Completo NQ	30,0	4,75	8,9
División	18,0	4,75	
Chancado -3/4"	18,0	1,71	2,6
División	12,5	1,71	
Chancado -10#	12,5	0,17	0,3
Caracterización	5,0	0,17	
Error Fundamental			9,3

Para el caso de sondajes tamaño HQ, el error en la primera etapa de división se incrementa a 12,8%, considerando un error global del protocolo de 13,1%. Finalmente, para los sondajes de tamaño PQ, estos valores llegan a 18,5% y 18,6% respectivamente.

Por lo tanto, el protocolo diseñado presenta un error fundamental menor al 10% sólo para los sondajes de tamaño NQ.

La información requerida se obtendrá según las siguientes metodologías:

- Consumo Específico de Energía: A través del método desarrollado por Starkey (SAGDesign), explicitado en el Anexo B.6. Es posible incorporar las variables entregadas por la prueba SPT para evaluar alternativas que incorporen equipos HPGR, y aquellas entregadas por la prueba LEIT para los equipos de chancado.
- Consumo de Aceros: Desde el índice de abrasión que se obtiene desde la prueba de Bond para Abrasión, se puede calcular el consumo de aceros de distintos medios de molienda y revestimientos de equipos por lo que indica la Tabla 2-11.
- Caracterización de Cabeza: Se busca realizar una caracterización física, mediante la determinación de la humedad, factor de forma y densidad de cada muestra. Además, la caracterización mineralógica estará determinada por la ejecución de pruebas de microscopía óptica o análisis QEMSCAN.
- Caracterización para Concentración: A través de la realización de pruebas cinéticas de molienda, se espera caracterizar la muestra respecto al tiempo necesario para lograr el producto de molienda deseado.

4.2.7. Protocolo DDH - #5-B

Este protocolo difiere del DDH - #5-A en que se cambia la prueba de chancado LEIT por la prueba Metso de chancado.

El material de entrada a este protocolo corresponde a 25 [kg] de mineral, proveniente de muestras de ¼ de sondaje. Los sondajes aceptables, además de su metraje requerido, se observan en la tabla.

Tabla 4-24: Metraje requerido – Protocolo DDH-#5-B

Tipo Sondaje	Metrage Teórico [m]
NQ	24,5
HQ	14,0
PQ	8,0

Las pruebas a realizar, por nivel, serán:

- Nivel 2: SAGDesign, SPT, Metso Crushability, Prueba de Bond para Abrasión
- Nivel 3: Prueba de Bond para Molienda de Bolas
- Nivel 4: Caracterización de cabeza, y cinética de molienda.

El protocolo de preparación de las muestras para las pruebas mencionadas se observa a continuación.

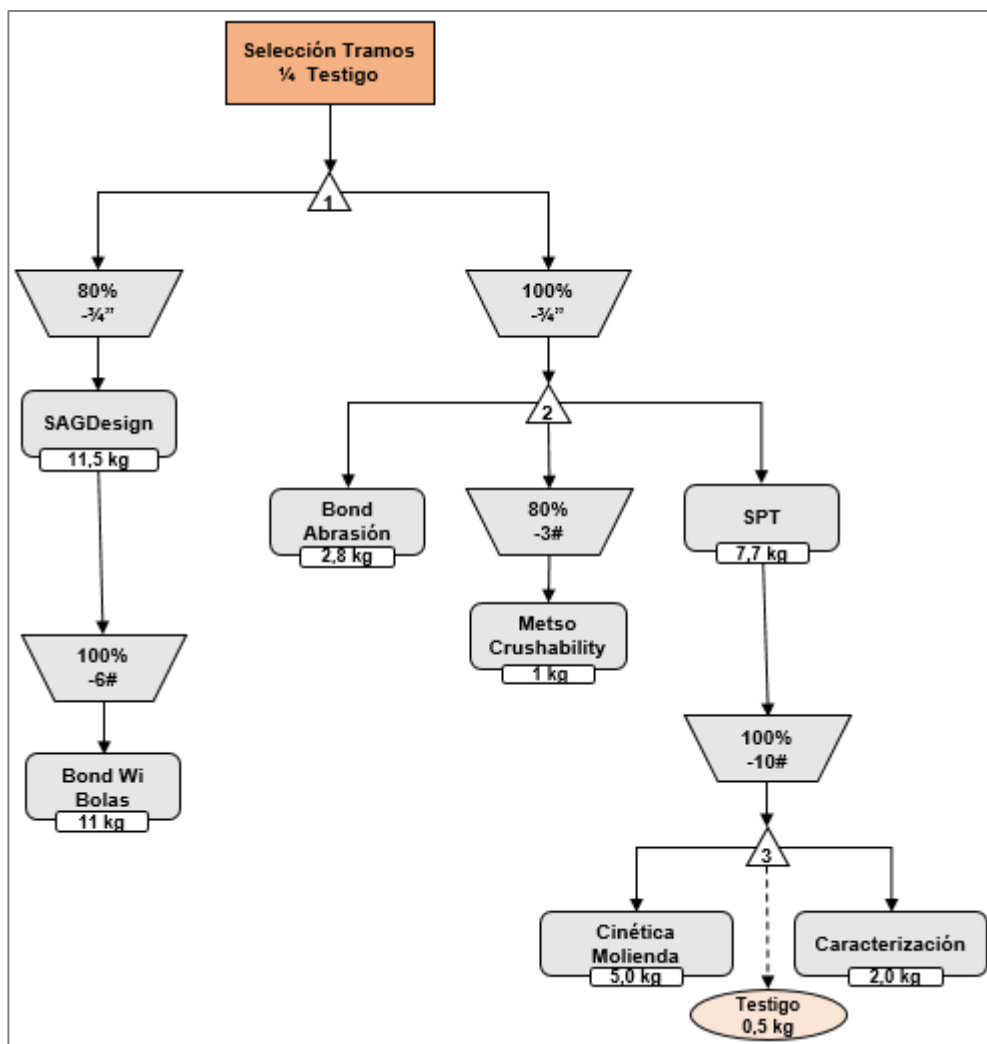


Figura 4-7: Protocolo de Muestreo DDH #5-B

Se detallan las etapas de corte descritas en el protocolo.

Tabla 4-25: Etapas de corte y homogeneización – Protocolo DDH-#5-B

Etapa	Homogeneización	Corte	Resultado
1	Traspaleo	Cortador Riffle	2 cargas de 12,3 kg
2	Divisor Rotatorio	Divisor Rotatorio	12 cargas de 1,0 kg
3	Divisor Rotatorio	Divisor Rotatorio	6 cargas de 1,25 kg

Para la formación de la masa total requerida para las pruebas Bond Abrasión (3 capachos) y SPT (8 capachos), se debe procurar juntar los capachos opuestos del divisor rotatorio, para eliminar posibles sesgos en la unión de las cargas.

El error fundamental en el que se incurre, al llevar la muestra original de ¼ de testigo hasta las cargas de caracterización, se observa en la tabla.

Tabla 4-26: Error Fundamental – Protocolo DDH-#5-B

Etapa	Masa Muestra [kg]	Diámetro [cm]	Error Relativo [%]
1/4 Sondaje	25,0	2,38	5,2
División	12,2	2,38	
Chancado -3/4”	12,2	1,71	3,8
División	7,5	1,71	
Chancado -10#	7,5	0,17	0,5
Caracterización	2,5	0,17	
Error Fundamental			6,4

Para el caso de sondajes tamaño HQ, el error en la primera etapa de división se incrementa a 7,4%, considerando un error global del protocolo de 8,3%. Finalmente, para los sondajes de tamaño PQ, estos valores llegan a 10,7% y 11,3% respectivamente.

Por lo tanto, el protocolo diseñado presenta un error fundamental menor al 10% para los sondajes de tamaño NQ y HQ.

La información requerida se obtendrá según las siguientes metodologías:

- Consumo Específico de Energía: A través del método desarrollado por Starkey (SAGDesign), explicitado en el Anexo B.6. Es posible incorporar las variables entregadas por la prueba SPT para evaluar alternativas que incorporen equipos HPGR, y aquellas entregadas por la prueba *Metso Crushability* para los equipos de chancado.
- Consumo de Aceros: Desde el índice de abrasión que se obtiene desde la prueba de Bond para Abrasión, se puede calcular el consumo de aceros de distintos medios de molienda y revestimientos de equipos por lo que indica la Tabla 2-11.
- Caracterización de Cabeza: Considerando la restringida cantidad de masa disponible para la caracterización, se puede tomar una de las siguientes opciones:
 - Realizar una caracterización física completa, determinando la humedad, factor de forma y densidad de cada muestra.
 - Si se prioriza en cambio la caracterización mineralógica, se ejecutan las pruebas de microscopía óptica o análisis QEMSCAN, además de la densidad del mineral.
- Caracterización para Concentración: A través de la realización de pruebas cinéticas de molienda, se espera caracterizar la muestra respecto al tiempo necesario para lograr el producto de molienda deseado.

4.2.8. Protocolo DDH - #6

La definición del protocolo considera realización de las pruebas metalúrgicas más comúnmente solicitadas por las empresas mineras, para el mapeo de variabilidad en el yacimiento.

El material de entrada a este protocolo corresponde a 28 [kg] de mineral, proveniente de muestras de ¼ de sondaje. Los sondajes aceptables, además de su metraje requerido, se observan en la tabla.

Tabla 4-27: Metraje requerido – Protocolo DDH-#6

Tipo Sondaje	Metraje Teórico [m]
NQ	27,0
HQ	15,5
PQ	8,5

Las pruebas a realizar, por nivel, serán:

- Nivel 1: SMC, Crusher Index
- Nivel 2: SPI, Prueba de Bond para Abrasión
- Nivel 3: Prueba de Bond para Molienda de Bolas
- Nivel 4: Caracterización de cabeza, y cinética de molienda.

El protocolo de preparación de las muestras para las pruebas mencionadas se observa a continuación.

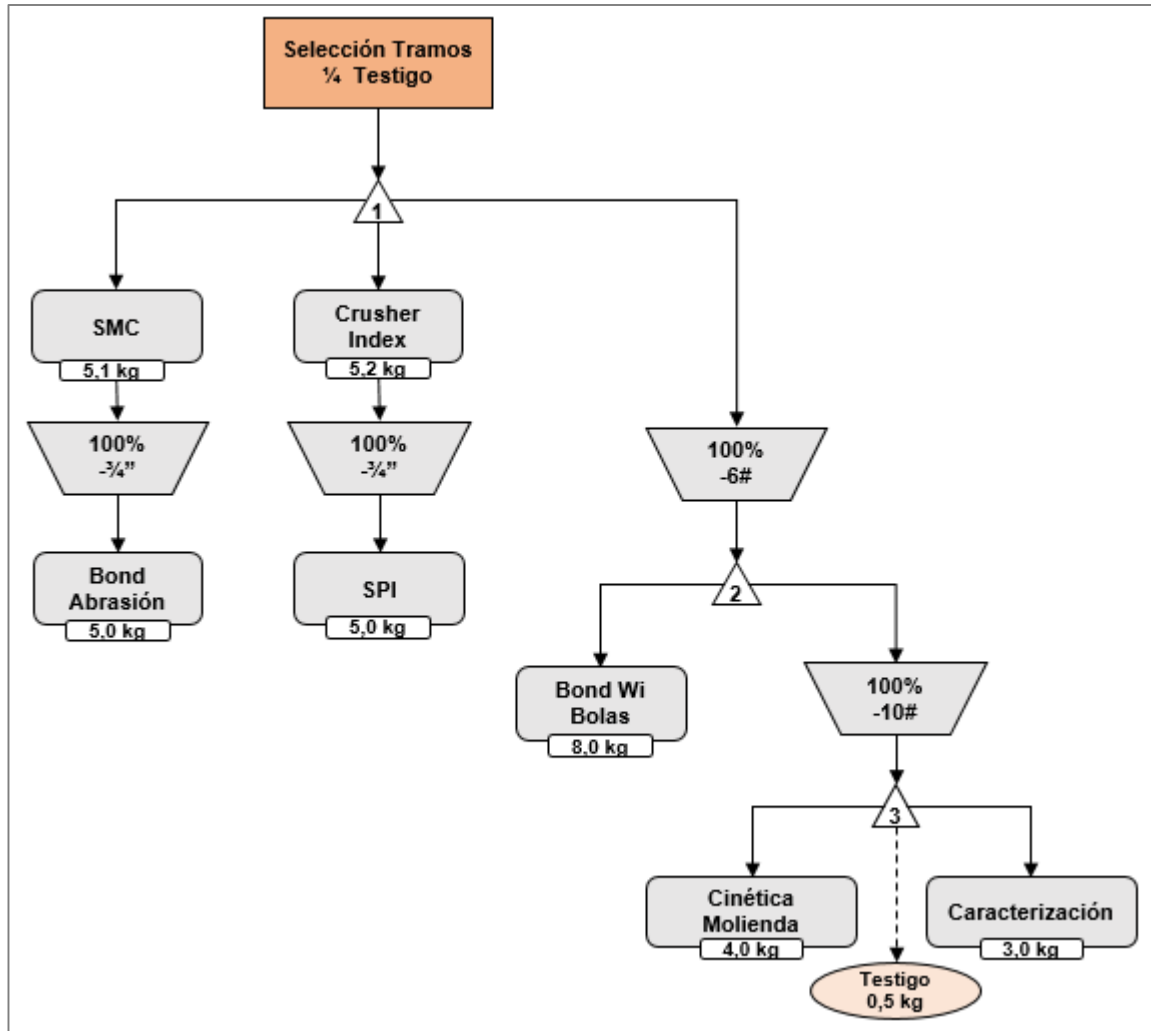


Figura 4-8: Protocolo de Muestreo DDH #6

Se detallan las etapas de corte descritas en el protocolo.

Tabla 4-28: Etapas de corte y homogeneización – Protocolo DDH-#6

Etapa	Homogeneización	Corte	Resultado
1	Traspaleo	Divisor Rotatorio	10 cargas de 2,7 kg
2	Divisor Rotatorio	Riffle	2 cargas de 8,0 kg
3	Divisor Rotatorio	Divisor Rotatorio	12 cargas de 0,65 kg

Para la formación de la masa total requerida para las pruebas SMC (2 capachos), Crusher Index (2 capachos) y Cinética de Molienda (6 capachos), se debe procurar juntar los capachos opuestos del divisor rotatorio, para eliminar posibles sesgos en la unión de las cargas.

El error fundamental en el que se incurre, al llevar la muestra original desde los testigos cuarteados NQ hasta las cargas de caracterización, se observa en la tabla.

Tabla 4-29: Error Fundamental – Protocolo DDH-#6

Etapa	Masa Muestra [kg]	Diámetro [cm]	Error Relativo [%]
¼ Sondaje NQ	28,0	2,38	4,0
División	16,3	2,38	
Chancado -6#	16,3	0,34	0,6
División	7,9	0,34	
Chancado -10#	7,9	0,17	0,4
Caracterización	3,0	0,17	
Error Fundamental			4,1

Para el caso de sondajes tamaño HQ, el error en la primera etapa de división se incrementa a 5,8%, considerando un error global del protocolo de 5,9%. Finalmente, para los sondajes de tamaño PQ, estos valores llegan a 8,3% y 8,4% respectivamente.

Por lo tanto, el protocolo diseñado presenta un error fundamental menor al 5% para los sondajes de tamaño NQ, y menor al 10% para las tres alternativas.

La información requerida se obtendrá según las siguientes metodologías:

- Consumo Específico de Energía: A través del método desarrollado por S. Morrell (Anexo B.1), o del método de Aminpro (Anexo B.3).
- Consumo de Aceros: Desde el índice de abrasión que se obtiene desde la prueba de Bond para Abrasión, se puede calcular el consumo de aceros de distintos medios de molienda y revestimientos de equipos por lo que indica la Tabla 2-11.
- Caracterización de Cabeza: Se busca realizar una caracterización física, mediante la determinación de la humedad, factor de forma y densidad de cada muestra. Además, la caracterización mineralógica estará determinada por la ejecución de pruebas de microscopía óptica o análisis QEMSCAN.
- Caracterización para Concentración: A través de la realización de pruebas cinéticas de molienda, se espera caracterizar la muestra respecto al tiempo necesario para lograr el producto de molienda deseado.

4.3. Protocolos de Sondajes de Aire Reverso (AR)

4.3.1. Protocolo AR #1

Se genera un protocolo de aire reverse, el cual se encuentra destinado a la caracterización de las muestras, y el conocimiento de su desempeño en las etapas de concentración.

El material de entrada a este protocolo corresponde a 25 [kg] de mineral, proveniente de muestras de sondaje de aire reverse. Los metrajes requeridos por diámetro de sondaje se observan en la tabla.

Tabla 4-30: Metraje requerido – Protocolo AR#1

Tipo Sondaje	Metraje Teórico [m]
127 [mm]	1,0
190 [mm]	0,5

Las pruebas a realizar, por nivel, serán:

- Nivel 2: Vertimill
- Nivel 4: Caracterización de cabeza, y cinética de molienda.

El protocolo de preparación de las muestras para las pruebas mencionadas se observa a continuación.

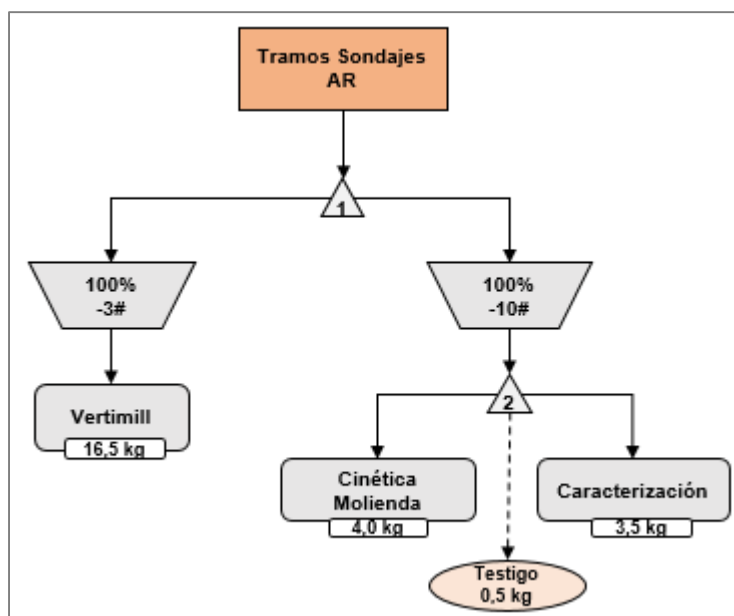


Figura 4-9: Protocolo de Muestreo AR#1

Se detallan las etapas de corte descritas en el protocolo.

Tabla 4-31: Etapas de corte y homogeneización – Protocolo AR #1

Etapa	Homogeneización	Corte	Resultado
1	Divisor Rotatorio	Divisor Rotatorio	6 cargas de 4,1 kg
2	Divisor Rotatorio	Divisor Rotatorio	8 cargas de 1,0 kg

Para la formación de la masa total requerida para la prueba Vertimill (4 capachos), se debe procurar juntar los capachos opuestos del divisor rotatorio, para eliminar posibles sesgos en la unión de las cargas.

El error fundamental en el que se incurre, al llevar la muestra original extraída desde el sondaje de aire reverso hasta las cargas de caracterización, se observa en la tabla.

Tabla 4-32: Error Fundamental – Protocolo AR #1

Etapa	Masa Muestra [kg]	Diámetro [cm]	Error Relativo [%]
Sondaje AR	25,0	0,30	0,5
División	8,0	0,30	
Chancado -10#	8,0	0,17	0,3
Caracterización	3,5	0,17	
Error Fundamental			0,7

El protocolo diseñado presenta un error fundamental menor al 5%.

La información requerida se obtendrá según las siguientes metodologías:

- **Caracterización de Cabeza:** Se busca realizar una caracterización física, mediante la determinación de la humedad, factor de forma y densidad de cada muestra. Además, la caracterización mineralógica estará determinada por la ejecución de pruebas de microscopía óptica o análisis QEMSCAN.
- **Caracterización para Concentración:** A través de la realización de pruebas cinéticas de molienda, se espera caracterizar la muestra respecto al tiempo necesario para lograr el producto de molienda deseado. Además, incluyendo las pruebas Vertimill se obtiene información sobre las condiciones sobre las que se debe realizar la remolienda de concentrados.

4.4. Protocolos de Material Particulado

4.4.1. Protocolo R1" - #1

Este protocolo es similar al DDH-#6, salvo que las muestras ya se encuentran previamente chancadas, por lo que la aplicación es distinta.

El material de entrada a este protocolo corresponde a 28 [kg] de mineral bajo con 100% bajo 1".

Las pruebas a realizar, por nivel, serán:

- Nivel 1: SMC, Crusher Index
- Nivel 2: SPI, Prueba de Bond para Abrasión
- Nivel 3: Prueba de Bond para Molienda de Bolas
- Nivel 4: Caracterización de cabeza, y cinética de molienda.

El protocolo de preparación de las muestras para las pruebas mencionadas se observa a continuación.

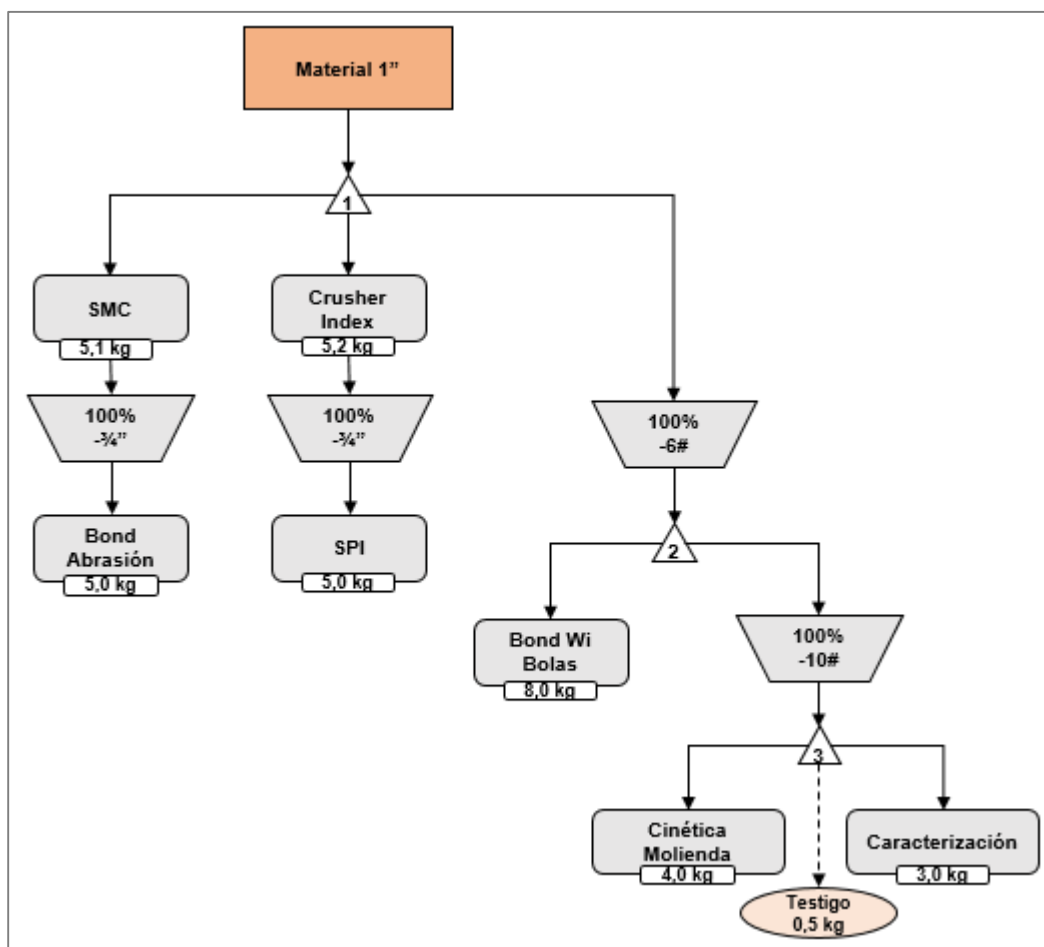


Figura 4-10: Protocolo de Muestreo R1" - #1

Se detallan las etapas de corte descritas en el protocolo.

Tabla 4-33: Etapas de corte y homogeneización – Protocolo R1”-#1

Etapa	Homogeneización	Corte	Resultado
1	Traspaleo	Divisor Rotatorio	10 cargas de 2,7 kg
2	Divisor Rotatorio	Riffle	2 cargas de 8,0 kg
3	Divisor Rotatorio	Divisor Rotatorio	12 cargas de 0,65 kg

Para la formación de la masa total requerida para las pruebas SMC (2 capachos), Crusher Index (2 capachos) y Cinética de Molienda (6 capachos), se debe procurar juntar los capachos opuestos del divisor rotatorio, para eliminar posibles sesgos en la unión de las cargas.

El error fundamental en el que se incurre, al llevar la muestra original hasta las cargas de caracterización, se observa en la tabla.

Tabla 4-34: Error Fundamental – Protocolo R1”-#1

Etapa	Masa Muestra [kg]	Diámetro [cm]	Error Relativo [%]
Material -1”	25,0	2,54	4,3
División	15,0	2,54	
Chancado -6#	15,0	0,34	0,6
División	7,5	0,34	
Chancado -10#	7,5	0,17	0,4
Caracterización	3,0	0,17	
Error Fundamental			4,4

Por lo tanto, el protocolo diseñado presenta un error fundamental menor al 5%.

La información requerida se obtendrá según las siguientes metodologías:

- Consumo Específico de Energía: A través del método desarrollado por S. Morrell (Anexo B.1), o del método de Aminpro (Anexo B.3).
- Consumo de Aceros: Desde el índice de abrasión que se obtiene desde la prueba de Bond para Abrasión, se puede calcular el consumo de aceros de distintos medios de molienda y revestimientos de equipos por lo que indica la Tabla 2-11.
- Caracterización de Cabeza: Se busca realizar una caracterización física, mediante la determinación de la humedad, factor de forma y densidad de cada muestra. Además, la caracterización mineralógica estará determinada por la ejecución de pruebas de microscopía óptica o análisis QEMSCAN.

- Caracterización para Concentración: A través de la realización de pruebas cinéticas de molienda, se espera caracterizar la muestra respecto al tiempo necesario para lograr el producto de molienda deseado.

4.4.2. Protocolo R1” - #2

Este protocolo es similar al DDH-#1, salvo que las muestras ya se encuentran previamente chancadas, por lo que la aplicación es distinta.

El material de entrada a este protocolo corresponde a 20 [kg] de mineral, proveniente de muestras de granulometría bajo 1”.

Las pruebas a realizar, por nivel, serán:

- Nivel 1: SMC
- Nivel 2: Prueba de Bond para Abrasión
- Nivel 3: Prueba de Bond para Molienda de Bolas
- Nivel 4: Caracterización de cabeza, y cinética de molienda.

El protocolo de preparación de las muestras para las pruebas mencionadas se observa a continuación.

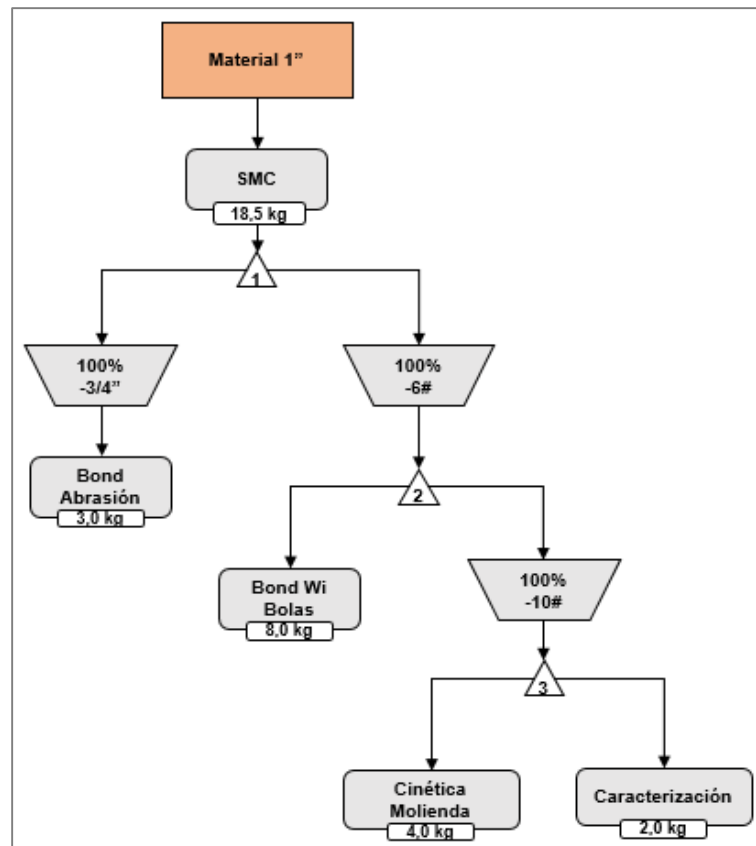


Figura 4-11: Protocolo de Muestreo R1” - #2

Se detallan las etapas de corte descritas en el protocolo.

Tabla 4-35: Etapas de corte y homogeneización – Protocolo R1”-#2

Etapa	Homogeneización	Corte	Resultado
1	Traspaleo	Divisor Rotatorio	12 cargas de 1,55 kg
2	Divisor Rotatorio	Divisor Rotatorio	20 cargas de 0,75 kg
3	Divisor Rotatorio	Divisor Rotatorio	6 cargas de 1,10 kg

Para la formación de las masas totales requeridas para las pruebas de Bond Abrasión (2 capachos) y Bond Wi de Bolas (11 capachos), se debe procurar juntar los capachos opuestos del divisor rotatorio, para eliminar posibles sesgos en la unión de las cargas.

El error fundamental en el que se incurre, al llevar la muestra original hasta las cargas de caracterización, se observa en la tabla.

Tabla 4-36: Error Fundamental – Protocolo R1”-#2

Etapa	Masa Muestra [kg]	Diámetro [cm]	Error Relativo [%]
Material -1”	20,0	2,54	3,2
División	15,5	2,54	
Chancado -6#	15,5	0,34	0,6
División	6,8	0,34	
Chancado -10#	6,8	0,17	0,6
Caracterización	2,0	0,17	
Error Fundamental			3,3

Por lo tanto, el protocolo diseñado presenta un error fundamental menor al 5%.

La información requerida se obtendrá según las siguientes metodologías:

- Consumo Específico de Energía: A través del método desarrollado por S. Morrell (2004), desarrollado en el Anexo B.1.
- Consumo de Aceros: Desde el índice de abrasión que se obtiene desde la prueba de Bond para Abrasión, se puede calcular el consumo de aceros de distintos medios de molienda y revestimientos de equipos por lo que se indica la Tabla 2-11.
- Caracterización de Cabeza: Considerando la restringida cantidad de masa disponible para la caracterización, se puede tomar una de las siguientes opciones:
 - Realizar una caracterización física completa, determinando la humedad, factor de forma y densidad de cada muestra.

- Si se prioriza en cambio la caracterización mineralógica, se ejecutan las pruebas de microscopía óptica o análisis QEMSCAN, además de la densidad del mineral.
- Caracterización para Concentración: A través de la realización de pruebas cinéticas de molienda, se espera caracterizar la muestra respecto al tiempo necesario para lograr el producto de molienda deseado.

4.4.3. Protocolo R1" - #3

Este protocolo es similar al DDH-#5-B, salvo que las muestras ya se encuentran previamente chancadas, por lo que la aplicación es distinta.

El material de entrada a este protocolo corresponde a 25 [kg] de mineral, proveniente de mineral bajo 1".

Las pruebas a realizar, por nivel, serán:

- Nivel 2: SAGDesign, Metso Crushability, SPT, Prueba de Bond para Abrasión.
- Nivel 3: Prueba de Bond para Molienda de Bolas
- Nivel 4: Caracterización de cabeza, y cinética de molienda.

El protocolo de preparación de las muestras para las pruebas mencionadas se observa a continuación.

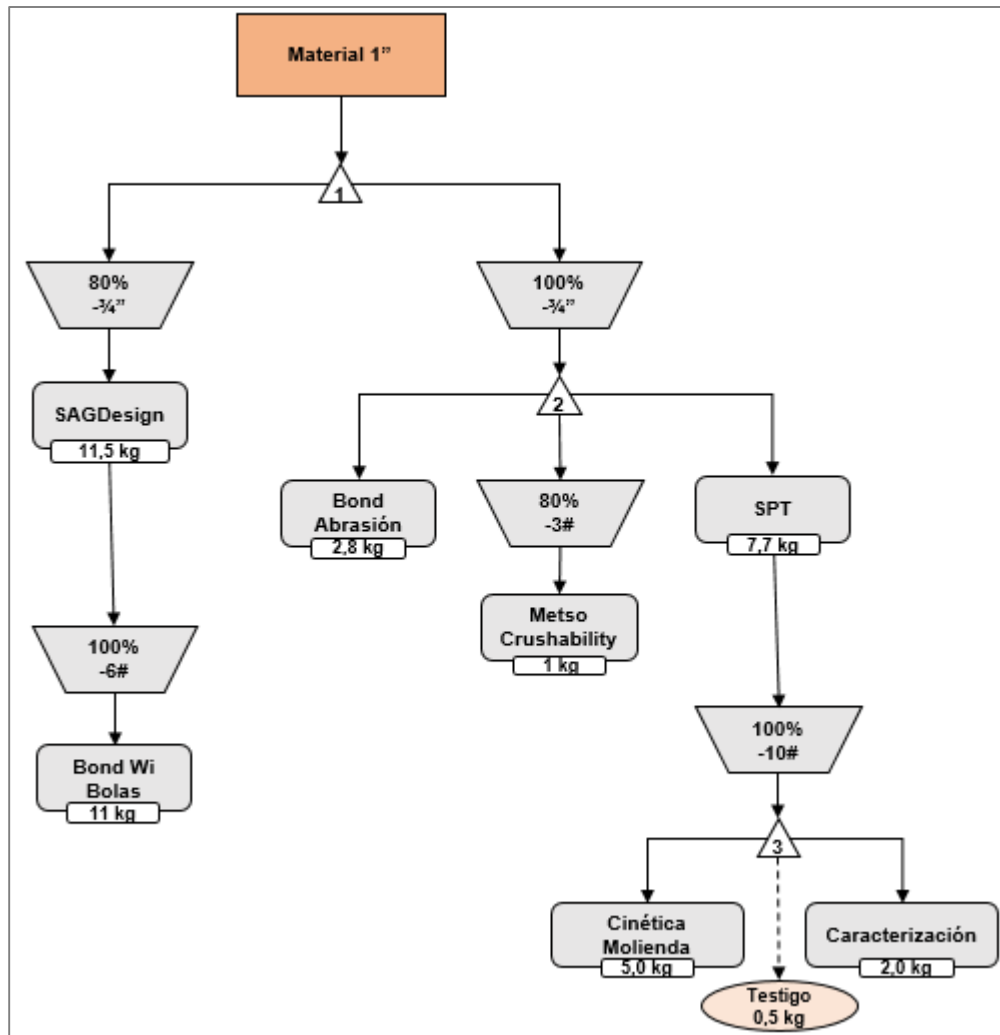


Figura 4-12: Protocolo de Muestreo R1"- #3

Se detallan las etapas de corte descritas en el protocolo.

Tabla 4-37: Etapas de corte y homogeneización – Protocolo R1"-#3

Etapa	Homogeneización	Corte	Resultado
1	Traspaleo	Riffle	2 cargas de 12,3 kg
2	Divisor Rotatorio	Divisor Rotatorio	12 cargas de 1,0 kg
3	Divisor Rotatorio	Divisor Rotatorio	6 cargas de 1,25 kg

Para la formación de la masa total requerida para las pruebas Bond Abrasión (3 capachos) y SPT (8 capachos), se debe procurar juntar los capachos opuestos del divisor rotatorio, para eliminar posibles sesgos en la unión de las cargas.

El error fundamental en el que se incurre, al llevar la muestra original hasta las cargas de caracterización, se observa en la tabla.

Tabla 4-38: Error Fundamental – Protocolo R1”-#3

Etapa	Masa Muestra [kg]	Diámetro [cm]	Error Relativo [%]
Material -1”	25,0	2,54	5,5
División	12,2	2,54	
Chancado -6#	12,2	0,34	0,5
División	7,5	0,34	
Chancado -10#	7,5	0,17	0,5
Caracterización	2,5	0,17	
Error Fundamental			5,5

Por lo tanto, el protocolo diseñado presenta un error fundamental menor al 10%.

La información requerida se obtendrá según las siguientes metodologías:

- Consumo Específico de Energía: A través del método desarrollado por J. Starkey (SAGDesign), explicitado en el Anexo B.6. Es posible incorporar las variables entregadas por la prueba SPT para evaluar alternativas que incorporen equipos HPGR, y aquellas entregadas por la prueba *Metso Crushability* para los equipos de chancado.
- Consumo de Aceros: Desde el índice de abrasión que se obtiene desde la prueba de Bond para Abrasión, se puede calcular el consumo de aceros de distintos medios de molienda y revestimientos de equipos por lo que indica la Tabla 2-11.
- Caracterización de Cabeza: Considerando la restringida cantidad de masa disponible para la caracterización, se puede tomar una de las siguientes opciones:
 - Realizar una caracterización física completa, determinando la humedad, factor de forma y densidad de cada muestra.
 - Si se prioriza en cambio la caracterización mineralógica, se ejecutan las pruebas de microscopía óptica o análisis QEMSCAN, además de la densidad del mineral.
- Caracterización para Concentración: A través de la realización de pruebas cinéticas de molienda, se espera caracterizar la muestra respecto al tiempo necesario para lograr el producto de molienda deseado.

4.4.4. Protocolo R6#

Este protocolo constituye una alternativa a la utilización de muestras de rechazo de granulometrías menores a 1”.

El material de entrada a este protocolo corresponde a 33 [kg] de mineral, proveniente de muestras de granulometría 100% bajo 6#Ty.

Las pruebas a realizar, por nivel, serán:

- Nivel 2: Vertimill
- Nivel 3: Prueba de Bond para Molienda de Bolas
- Nivel 4: Caracterización de cabeza, y cinética de molienda.

El protocolo de preparación de las muestras para las pruebas mencionadas se observa a continuación.

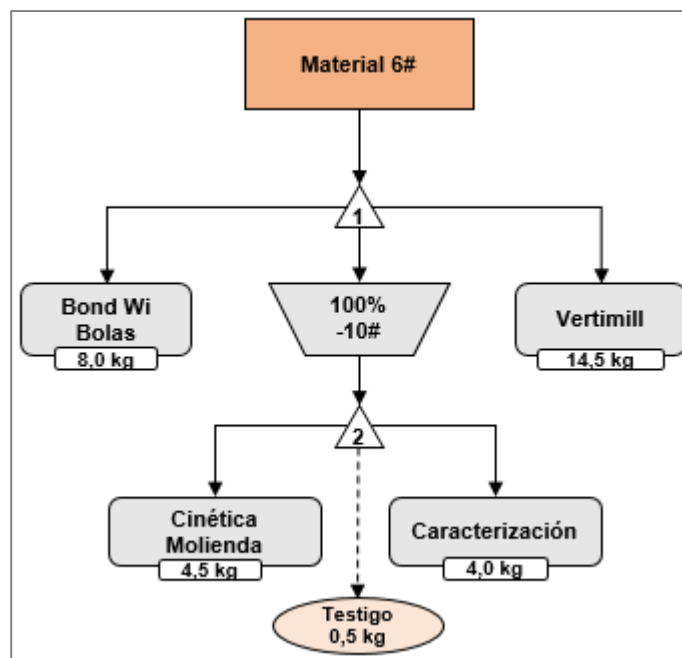


Figura 4-13: Protocolo de Muestreo R6#

Se detallan las etapas de corte descritas en el protocolo.

Tabla 4-39: Etapas de corte y homogeneización – Protocolo R6#

Etapa	Homogeneización	Corte	Resultado
1	Divisor Rotatorio	Divisor Rotatorio	20 cargas de 1,6 kg
2	Divisor Rotatorio	Divisor Rotatorio	8 cargas de 1,15 kg

Para la formación de la masa total requerida para la prueba Bond Wi de Bolas (5 capachos) y Vertimill (9 capachos), se debe procurar juntar los capachos opuestos del divisor rotatorio, para eliminar posibles sesgos en la unión de las cargas.

El error fundamental en el que se incurre, al llevar la muestra original hasta las cargas de caracterización, se observa en la tabla.

Tabla 4-40: Error Fundamental – Protocolo R6#

Etapa	Masa Muestra [kg]	Diámetro [cm]	Error Relativo [%]
Material -6#	33,0	0,34	0,6
División	9,5	0,34	
Chancado -10#	9,5	0,17	0,4
Caracterización	4,0	0,17	
Error Fundamental			0,7

Por lo tanto, el protocolo diseñado presenta un error fundamental menor al 5%.

La información requerida se obtendrá según las siguientes metodologías:

- Consumo Específico de Energía: Se puede estimar un consumo específico para la Molienda de Bolas mediante la realización de la prueba de Bond respectiva, utilizando criterios de diseño y la metodología desarrollada por Bond [Anexo B-7].
- Caracterización de Cabeza: Se busca realizar una caracterización física, mediante la determinación de la humedad, factor de forma y densidad de cada muestra. Además, la caracterización mineralógica estará determinada por la ejecución de pruebas de microscopía óptica o análisis QEMSCAN.
- Caracterización para Concentración: A través de la realización de pruebas cinéticas de molienda, se espera caracterizar la muestra respecto al tiempo necesario para lograr el producto de molienda deseado. Además, incluyendo las pruebas Vertimill se obtiene información sobre las condiciones sobre las que se debe realizar la remolienda de concentrados.

4.4.5. Protocolo R8#

El material de entrada a este protocolo corresponde a 16,5 [kg] de mineral, proveniente de muestras de material bajo 8#Ty.

Las pruebas a realizar, por nivel, serán:

- Nivel 3: Prueba de Bond Modificada para Molienda de Bolas
- Nivel 4: Caracterización de cabeza, y cinética de molienda.

El protocolo de preparación de las muestras para las pruebas mencionadas se observa a continuación.

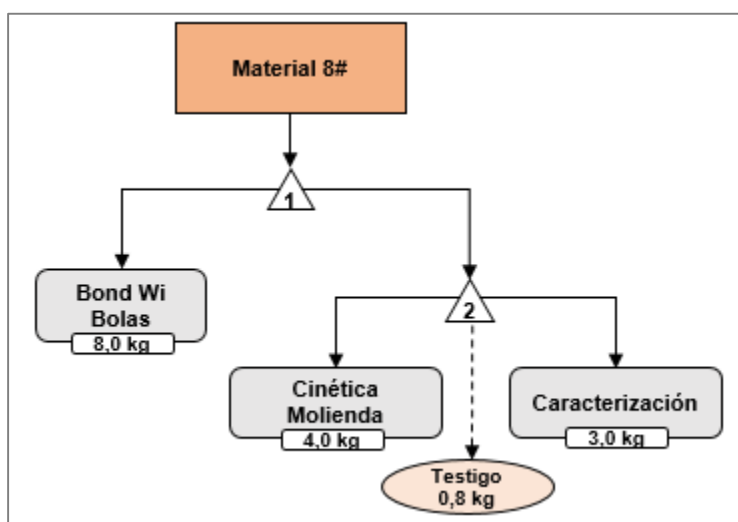


Figura 4-14: Protocolo de Muestreo R8#

Se detallan las etapas de corte descritas en el protocolo.

Tabla 4-41: Etapas de corte y homogeneización – Protocolo R8#

Etapa	Homogeneización	Corte	Resultado
1	Divisor Rotatorio	Riffle	2 cargas de 8,1 kg
2	Divisor Rotatorio	Divisor Rotatorio	8 cargas de 1,0 kg

El error fundamental en el que se incurre, al llevar la muestra original hasta las cargas de caracterización, se observa en la tabla.

Tabla 4-42: Error Fundamental – Protocolo R8#

Etapa	Masa Muestra [kg]	Diámetro [cm]	Error Relativo [%]
Chancado -8#	16,5	0,24	0,4
División	8,1	0,24	
Chancado -10#	8,1	0,17	0,4
Caracterización	3,0	0,17	
Error Fundamental			0,6

Por lo tanto, el protocolo diseñado presenta un error fundamental menor al 5%.

La información requerida se obtendrá según las siguientes metodologías:

- Consumo Específico de Energía: Se puede estimar un consumo específico para la Molienda de Bolas mediante la realización de la prueba de Bond respectiva, utilizando criterios de diseño y la metodología desarrollada por Bond [Anexo B-7].
- Caracterización de Cabeza: Se busca realizar una caracterización física, mediante la determinación de la humedad, factor de forma y densidad de cada muestra. Además, la caracterización mineralógica estará determinada por la ejecución de pruebas de microscopía óptica o análisis QEMSCAN.
- Caracterización para Concentración: A través de la realización de pruebas cinéticas de molienda, se espera caracterizar la muestra respecto al tiempo necesario para lograr el producto de molienda deseado.

4.4.6. Protocolo R10#

El material de entrada a este protocolo corresponde a 16,5 [kg] de mineral, proveniente de muestras chancadas bajo 10#Ty.

Las pruebas a realizar, por nivel, serán:

- Nivel 3: Prueba de Bond Modificada para Molienda de Bolas
- Nivel 4: Caracterización de cabeza, y Cinética de Molienda.

El protocolo de preparación de las muestras para las pruebas mencionadas se observa a continuación.

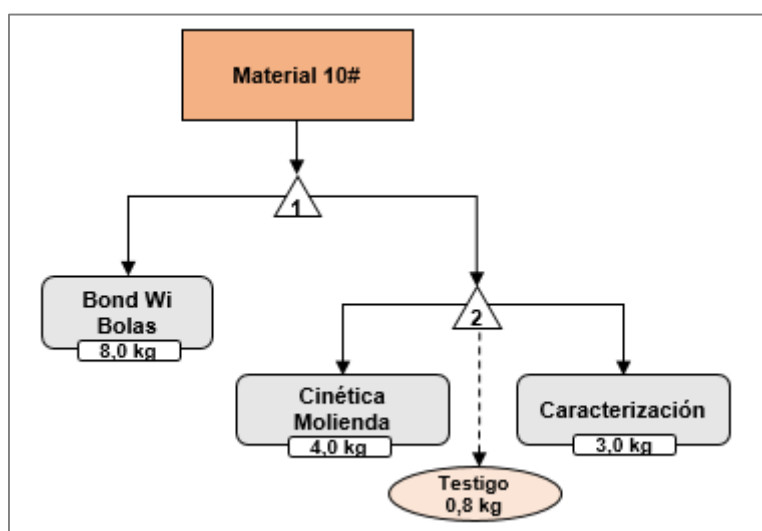


Figura 4-15: Protocolo de Muestreo R10#

Se detallan las etapas de corte descritas en el protocolo.

Tabla 4-43: Etapas de corte y homogeneización – Protocolo R10#

Etapa	Homogeneización	Corte	Resultado
1	Divisor Rotatorio	Riffle	2 cargas de 8,1 kg
2	Divisor Rotatorio	Divisor Rotatorio	8 cargas de 1,0 kg

Para la formación de la masa total requeridas para la prueba de Cinética de Molienda, se debe procurar juntar los cachos opuestos del divisor rotatorio, para eliminar posibles sesgos en la unión de las cargas.

El error fundamental en el que se incurre, al llevar la muestra original hasta las cargas de caracterización, se observa en la siguiente tabla.

Tabla 4-44: Error Fundamental – Protocolo R10#

Etapa	Masa Muestra [kg]	Diámetro [cm]	Error Relativo [%]
Chancado -10#	16,5	0,17	0,2
División	8,1	0,17	
Material -10#	8,1	0,17	0,4
Caracterización	3,0	0,17	
Error Fundamental			0,5

Por lo tanto, el protocolo diseñado presenta un error fundamental menor al 5%.

La información requerida se obtendrá según las siguientes metodologías:

- Consumo Específico de Energía: Se puede estimar un consumo específico para la Molienda de Bolas mediante la realización de la prueba de Bond respectiva, utilizando criterios de diseño y la metodología desarrollada por Bond [Anexo B-7].
- Caracterización de Cabeza: Se busca realizar una caracterización física, mediante la determinación de la humedad, factor de forma y gravedad específica de cada muestra. Además, la caracterización mineralógica estará determinada por la ejecución de pruebas de microscopía óptica o análisis QEMSCAN.
- Caracterización para Concentración: A través de la realización de pruebas cinéticas de molienda, se espera caracterizar la muestra respecto al tiempo necesario para lograr el producto de molienda deseado.

4.5. Resumen de Protocolos de Pruebas

Luego de revisar todas las alternativas propuestas para los distintos tipos de material, se presenta una tabla resumen que muestra los principales factores de decisión al momento de escoger un protocolo de muestreo.

Tabla 4-45: Resumen de Protocolos propuestos

Tipo de Material	Tamaño mineral	Protocolos recomendados	Masa requerida (kg)	Metodología	Resultados	
¼ Sondaje DDH	Sondaje NQ/HQ/PQ	DDH #1	20,0	Morrell	CEE circuito Chancado/SAG/Bolas/HPGR Consumo aceros Caracterización Cinéticas	
		DDH #2	30,0	CEET2 Aminpro		
		DDH #5-B	25,0	SAGDesign		
		DDH #6	28,0	Morrell CEET2 Aminpro		
		DDH #3-B (*)	50,0	JKSimMet		
Sondaje metalúrgico DDH	Sondaje NQ/HQ/PQ	DDH #4	55,0	Barratt		
		DDH #5-A	30,0	SAGDesign		
	Sondaje HQ/PQ	DDH #3-A (*)	75,0	JKSimMet		
Sondaje Aire Reverso	127 [mm] 190 [mm]	AR #1	25,0	-		Caracterización para Flotación
Material particulado	Chancado 1''	R1'' #1	28,0	Morrell CEET2 Aminpro		
		R1'' #2	20,0	Morrell		
		R1'' #3	25,0	SAGDesign		
	Chancado 6#	R6#	33,0	Bond	CEE Bolas Caracterización para Flotación	
	Chancado 8#	R8#	16,5	Bond	CEE Bolas Caracterización para Flotación	
	Chancado 10#	R10#	16,5	Bond	CEE Bolas Caracterización para Flotación	

(*): No incluye la determinación de consumo de aceros.

5. ANÁLISIS DE EJEMPLO DE ESTUDIO

Utilizando una base de datos de sondajes y material particulado de un yacimiento recientemente explorado por una empresa minera, se pretende corroborar la efectividad de dos de los protocolos recomendados.

5.1. Antecedentes generales del yacimiento en estudio

El yacimiento, ubicado en la I Región de Tarapacá sobre los 2.000 m.s.n.m, corresponde a un depósito del tipo pórfido cuprífero, con créditos en Au y Mo. El modelo geológico actual considera un área de 1,7 [km] x 1,8 [km], poblado con 82 sondajes que completan 30.581 [m], a una profundidad máxima de 1.300 [m]. El protocolo de tratamiento de las muestras, desde su extracción hasta la obtención de muestras para análisis químico en exploración, se muestra en la Figura 5-1. Además, se indican los rechazos generados por el protocolo.

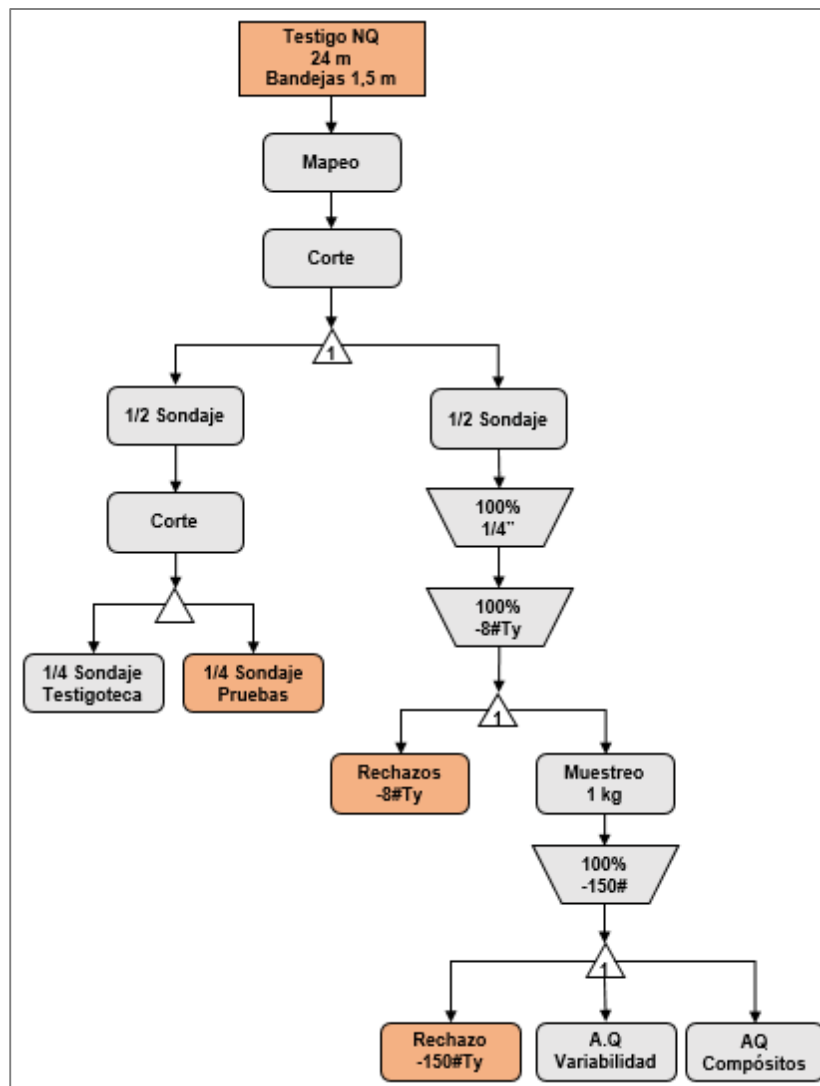


Figura 5-1: Protocolo de Muestreo desde Exploración

5.2. Ejemplo 1: Mineral desde Sondajes DDH

Se cuenta con 38 muestras de mineral del yacimiento descrito, correspondientes a muestras de ¼ de sondajes de tamaño NQ. Las muestras, debidamente identificadas y almacenadas, cuentan con aproximadamente 20 [kg] cada una.

Se busca obtener información para evaluar - en términos del consumo energético - dos circuitos de conminución por distintas metodologías, y a la vez caracterizar las muestras de cabeza de forma física y mineralógica. Al tratarse de sulfuros primarios, también se busca conocer algunas características del mineral al someterlo al proceso de concentración, por lo que se solicita realizar pruebas cinéticas de molienda.

5.2.1. Definición del protocolo a utilizar

Considerando la información requerida desde las muestras de exploración, y observando las posibilidades disponibles, se considera oportuno trabajar bajo lo que indica el protocolo “DDH #6”.

Como los protocolos corresponden a una recomendación, se decide dejar fuera la realización de la prueba de Bond para Abrasión, en pos de dar mayor énfasis en la caracterización del mineral con la limitada muestra disponible.

Las pruebas a realizar, entonces, serán:

- Nivel 1: Prueba SMC
- Nivel 2: Prueba SPI
- Nivel 3: Prueba de Bond para Molienda de Bolas
- Nivel 4: Caracterización de cabeza (Humedad, Gravedad Específica y Microscopía Óptica) y para concentración (Cinéticas de Molienda).

El protocolo de preparación de las muestras para las pruebas mencionadas se observa a continuación.

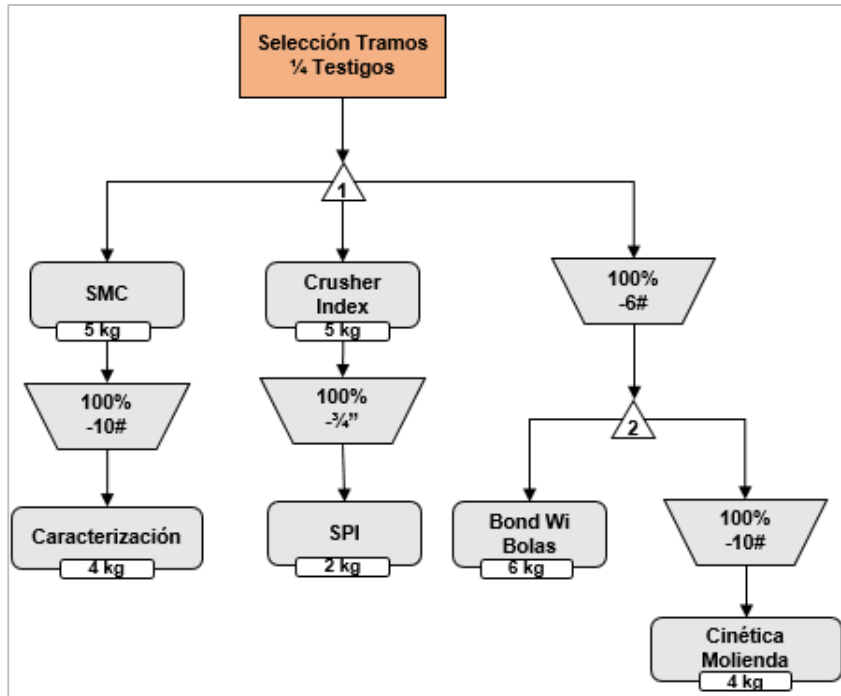


Figura 5-2: Protocolo de Muestreo Ejemplo 1

Se detallan las dos etapas de corte descritas en el protocolo, en la Tabla 5-1.

Tabla 5-1: Etapas de corte y homogeneización – Ejemplo 1

Etapa	Homogeneización	Corte	Resultado
1	Divisor Rotatorio	Divisor Rotatorio	4 cargas de 5,0 kg
2	Divisor Rotatorio	Divisor Rotatorio	10 cargas de 1,0 kg

Se reutilizará el material producto de las pruebas SMC y Crusher Index, considerando una pérdida de material (principalmente finos) de 5% en cada caso. También se considera una pérdida de material por cada etapa de corte, correspondiente a un 1%.

Para la formación de la carga para la prueba de Bond Wi de Bolas, se tomarán los cachos opuestos de mineral desde el divisor rotatorio.

Las pérdidas promedio de mineral, incurridas en cada etapa se observan en la tabla.

Tabla 5-2: Pérdidas por corte y homogeneización – Ejemplo 1

Etapa	Pérdidas (g)	Pérdidas (%)
1	162,1	0,75
2	97,7	0,92

Una vez definido el protocolo a utilizar, y las consideraciones pertinentes, se realizan los análisis a las muestras [Anexo C].

5.2.2. Caracterización de Cabeza

Las muestras han sido clasificadas según su zona mineral, litología y zona de alteración en 10 unidades denominadas “GEOL”, las que se caracterizan como sigue:

Tabla 5-3: Resumen de muestras por unidad – Ejemplo 1

	N° Muestras	Zona Mineral	Sub-Zona Mineral	Litología	Alteración
GEOL1	9	PRI	CPY 1-2	AND	CLS
GEOL2	3	PRI	CPY 1-2	AND	SER
GEOL3	3	PRI	CPY 1-2	AND	BCL
GEOL4	9	PRI	CPY 3-4-5	AND	CLS
GEOL5	3	PRI	CPY 3-4-5	AND	BCL
GEOL6	1	PRI	CPY 1-2	PBFT	CLS
GEOL7	3	PRI	CPY 3-4-5	PFBT	CLS
GEOL8	1	PRI	CPY 3-4-5	PFBT	SER
GEOL9	3	PRI	CPY 1-2	PQFI	CLS
GEOL10	3	PRI	CPY 1-2	PQFI	SER

La simbología utilizada es la siguiente:

- Zona Mineral
 - PRI: Zona primaria
- Sub-Zona Mineral
 - CPY 1-2: Calcopirita de baja intensidad
 - CPY 3-4-5: calcopirita de alta intensidad
- Litología
 - AND: Andesita
 - PFBT: Pórfido feldespatos - biotita temprana
 - PQFI: Pórfido cuarzo - feldespatos intermineral
- Alteración:
 - CLS: Clorita - Sericita
 - SER: Sericita
 - BCL: Biotita - Clorita

Se cuenta con la información de la caracterización química desde la etapa de exploración, la cual se detalla a continuación.

Tabla 5-4: Composición química por unidad – Ejemplo 1

	Cu (%)	Mo (ppm)	Au (ppm)	Ag (g/t)
GEOL1	0,21	120	0,02	2,33
GEOL2	0,23	45	0,01	2,67
GEOL3	0,23	156	0,04	2,00
GEOL4	0,52	57	0,07	3,00
GEOL5	0,46	37	0,04	1,67
GEOL6	0,26	173	0,00	2,00
GEOL7	0,60	144	0,09	4,67
GEOL8	0,92	73	0,02	3,00
GEOL9	0,25	126	0,02	1,00
GEOL10	0,22	81	0,00	0,67
Promedio	0,36	95	0,04	2,0

Respecto a la caracterización física, se realizan pruebas de determinación de humedad y gravedad específica.

Tabla 5-5: Caracterización física – Ejemplo 1

Caracterización Física	
Gravedad Específica	2,80
Humedad (%)	0,15

Finalmente, la caracterización mineralógica se realiza a través de la herramienta de microscopía óptica para minerales opacos. Se muestra la distribución promedio de los minerales en las muestras.

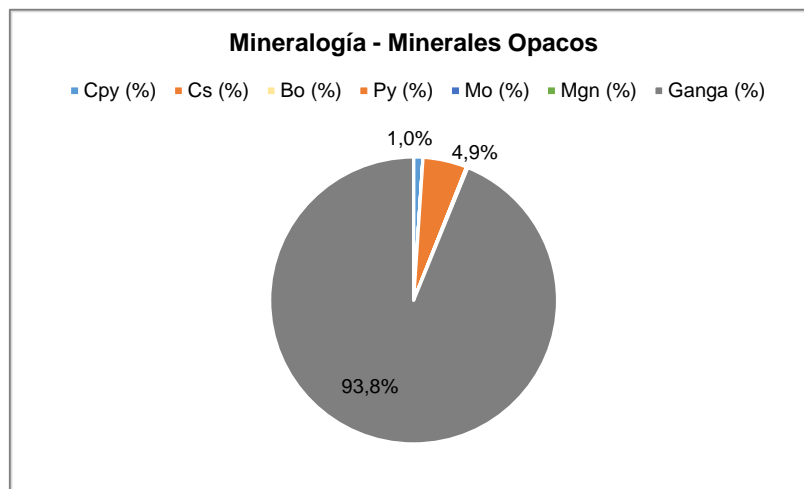


Figura 5-3: Mineralogía en Base Total – Ejemplo 1

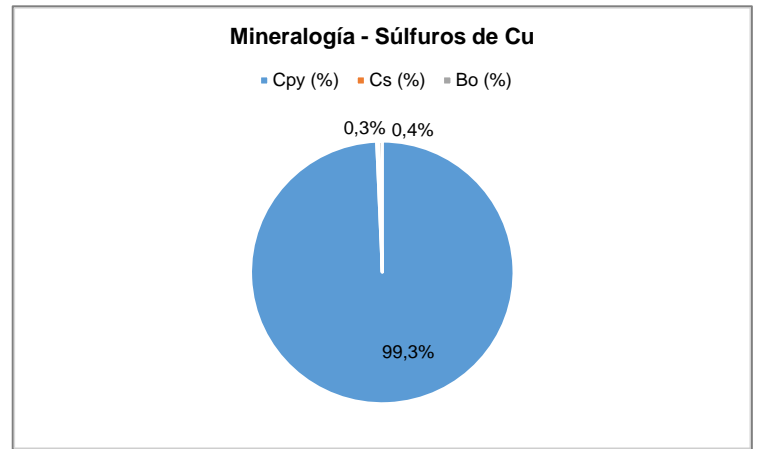
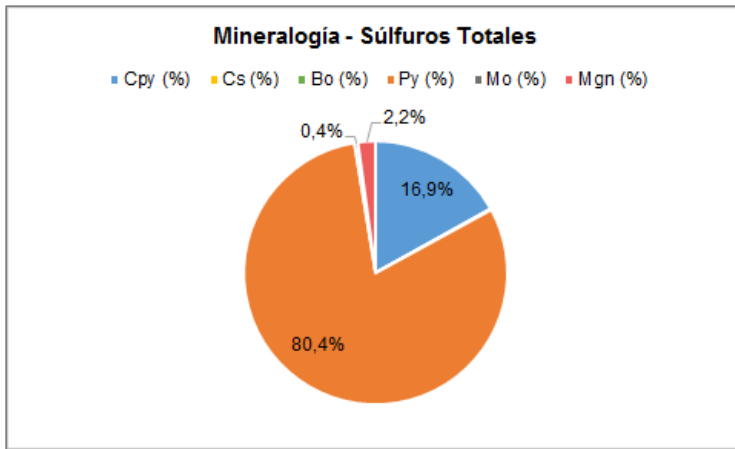


Figura 5-4: Mineralogía de Sulfuros – Ejemplo 1. Izq.: Sulf. Totales. Der.: Sulf. de Cu.

Asimismo, se presentan los estudios de liberación del mineral, realizados a una granulometría de 212 [µm].

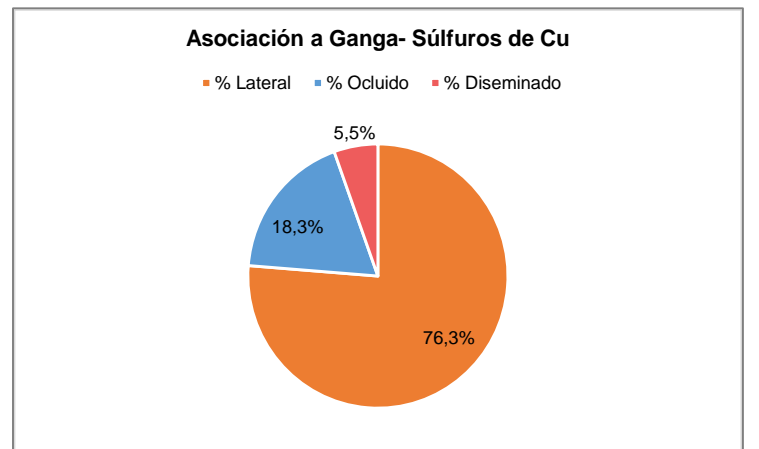
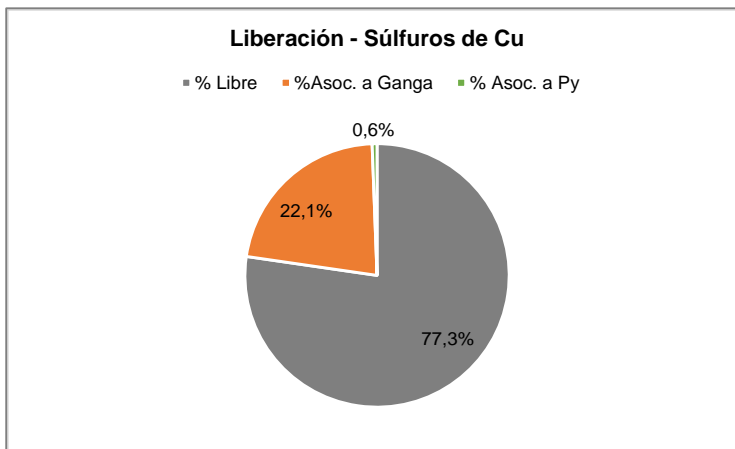


Figura 5-5: Sulfuros de Cu a 212 µm – Ejemplo 1. Izq.: Liberación. Der.: Asociación.

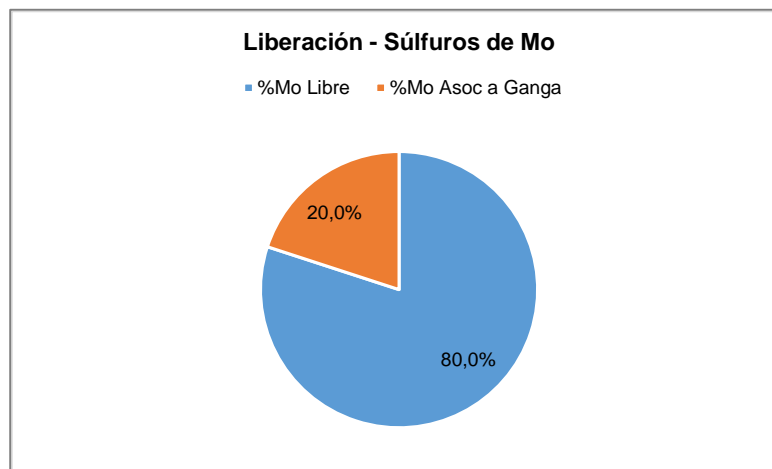


Figura 5-6: Sulfuros de Mo a 212 µm – Ejemplo 1. Liberación.

5.2.3. Consumo Específico de Energía

Con la finalidad de determinar el consumo específico de energía de conminución para un circuito dado, se realizan las pruebas metalúrgicas anteriormente mencionadas, cuyos resultados se muestran a continuación.

Tabla 5-6: Resultados pruebas de conminución – Ejemplo 1

	SMC					SPI		Bond Wi Bolas
	DWi (kWh/m ³)	Axb	Mia (kWh/t)	Mic (kWh/t)	Mih (kWh/t)	Ci	SPI (min)	BWi (kWh/tc)
GEOL1	12,6	22,2	31,4	13,6	26,4	5,6	195	16,2
GEOL2	7,7	34,7	22,4	8,8	17,0	10,6	125	12,5
GEOL3	10,6	26,6	27,3	11,5	22,2	5,2	170	14,8
GEOL4	11,1	25,8	28,8	12,2	23,7	6,3	192	15,3
GEOL5	13,5	20,7	33,2	14,6	28,3	6,6	196	16,6
GEOL6	11,8	22,7	30,4	13,0	25,2	2,7	225	13,4
GEOL7	10,1	29,5	26,0	10,8	20,9	5,2	188	13,6
GEOL8	4,2	65,8	13,0	4,5	8,8	13,4	57	12,7
GEOL9	11,2	25,3	29,4	12,5	24,2	10,2	174	14,6
GEOL10	8,1	34,7	22,5	9,0	17,3	11,4	125	12,7
Promedio	10,9	27,2	28,1	11,9	23,0	6,4	177	14,8

Los criterios de diseño para realizar el análisis de circuitos, considerando dos metodologías de estimación, se presentan en la tabla.

Tabla 5-7: Criterios de diseño para circuitos – Ejemplo 1

Metodología	SABC-B		HPGR
	Morrell (SMC)	Aminpro (SPI-Bond)	Morrell (SMC)
F80 Ch. 1° (mm)	152,4	152,4	152,4
F80 HPGR (mm)	-	-	30,0
CSS Ch. Pebbles (mm)	-	12,7	-
% Pebbles (%)	-	20,0	-
F80 M. Bolas (µm)	2.500	2.500	3.500
P80 Molienda (µm)	210	210	210

5.2.3.1. Estimación para circuito SABC-B

La primera alternativa a estimar corresponde a un circuito SABC-B, compuesto principalmente de un molino SAG seguido de un molino de bolas, el cual se observa en la Figura 5-7.

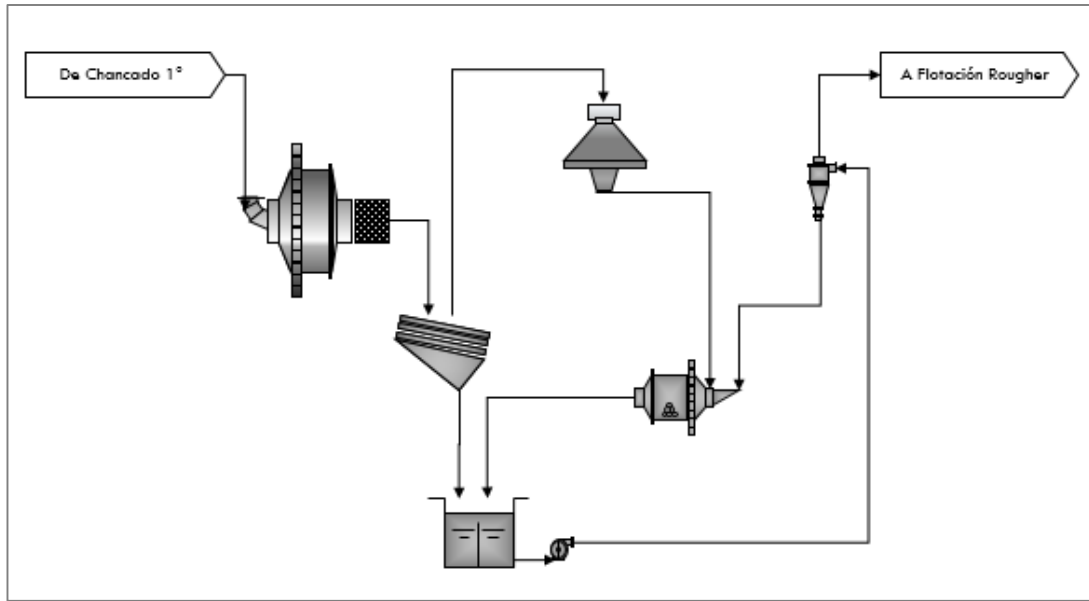


Figura 5-7: Circuito SABC-B – Ejemplo 1

A partir de la metodología de Morrell, determinada principalmente por los parámetros obtenidos de la prueba SMC, se observa la estimación del consumo específico de energía para cada equipo.

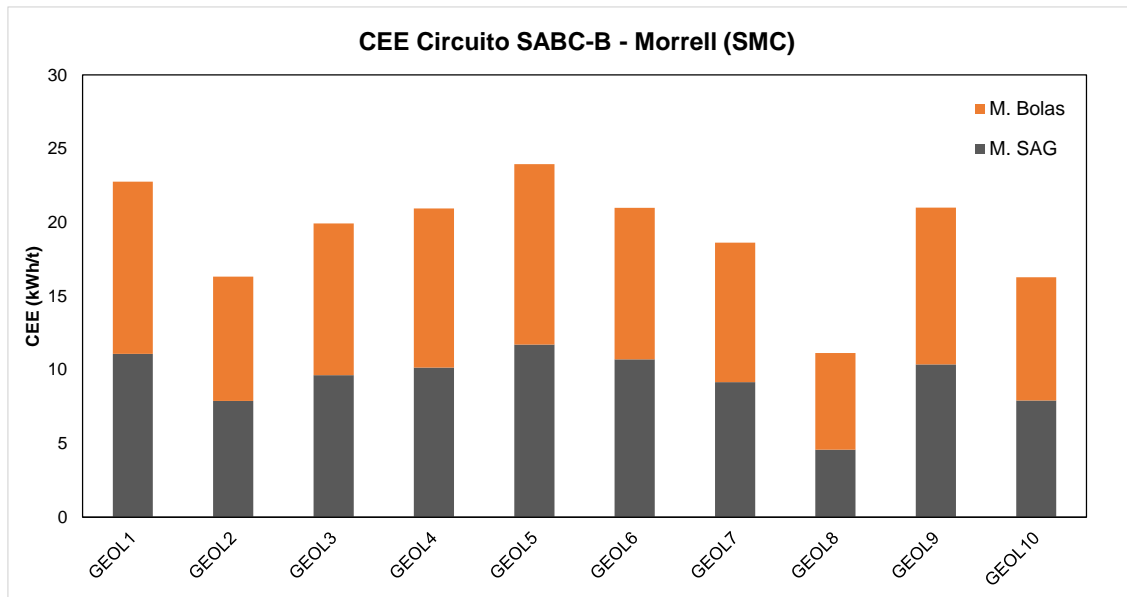


Figura 5-8: CEE (kWh/t) para circuito SABC-B por método de Morrell

Además, desde los parámetros obtenidos por las pruebas SPI y Bond para molino de Bolas, se observa la estimación del consumo específico de energía según la metodología de Aminpro.

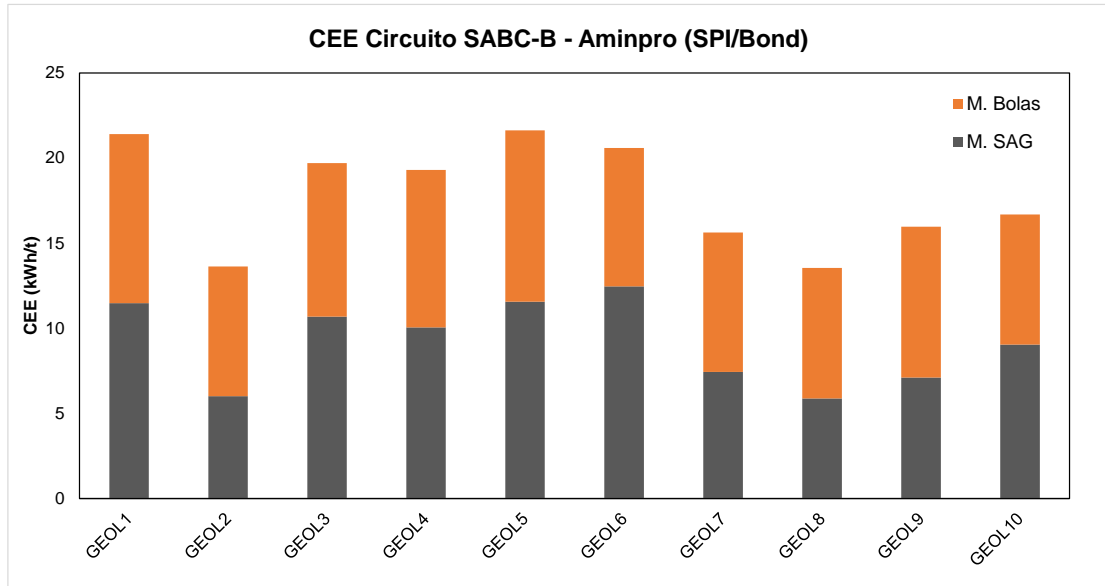


Figura 5-9: CEE (kWh/t) para circuito SABC-B por método de Aminpro

5.2.3.2. Estimación para circuito HPGR-Bolas

Otra alternativa la constituye el diseño de un circuito que incluya chancado secundario, además de un equipo HPGR y un molino de bolas. Se denominará “HPGR/Bolas”, y se define como muestra la Figura 5-10.

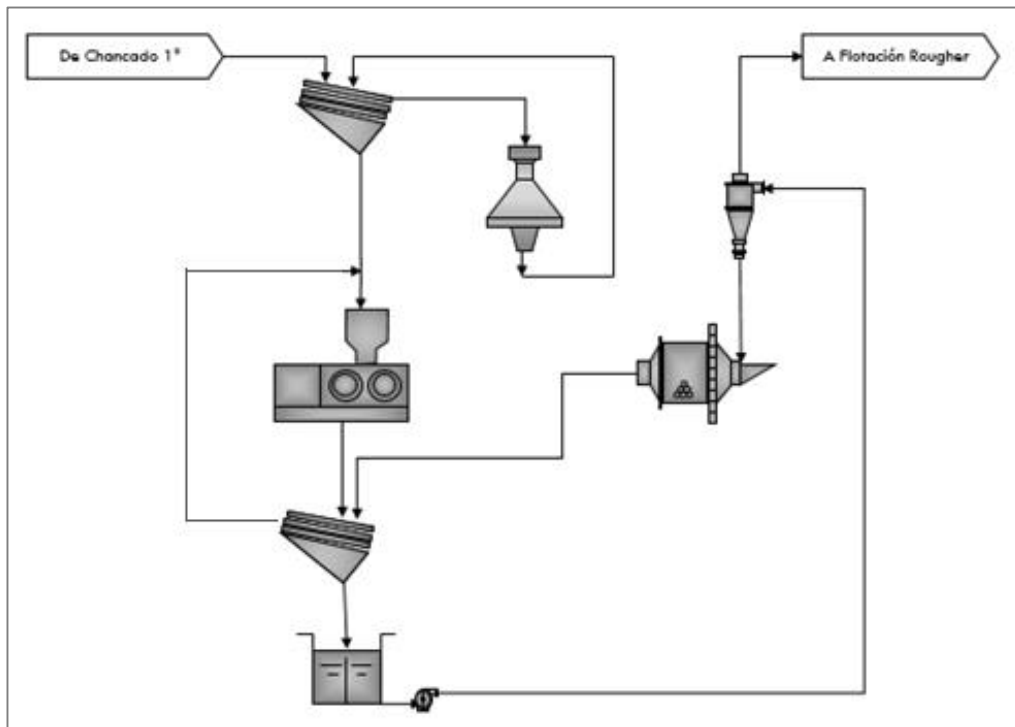


Figura 5-10: Circuito HPGR/Molino de Bolas – Ejemplo 1

El consumo específico de energía de este circuito también puede ser determinado por la metodología de Morrell, y se muestra en la figura.

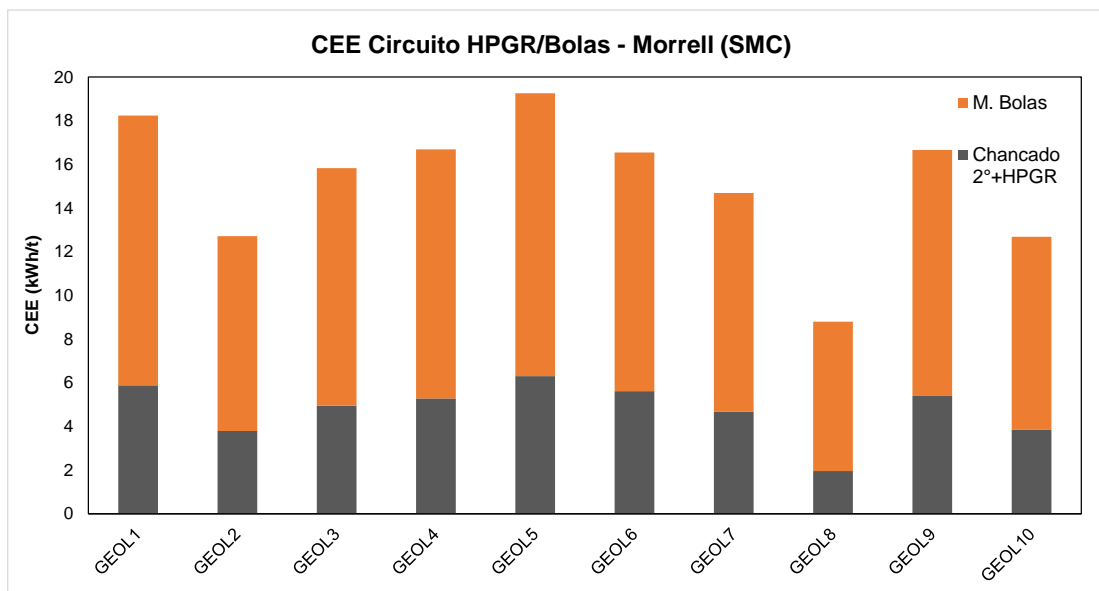


Figura 5-11: CEE (kWh/t) para circuito HPGR/Bolas por método de Morrell

5.2.3.3. Comparación de los circuitos

Se realiza una comparación entre ambos circuitos, a través de las estimaciones realizadas por la metodología de Morrell.

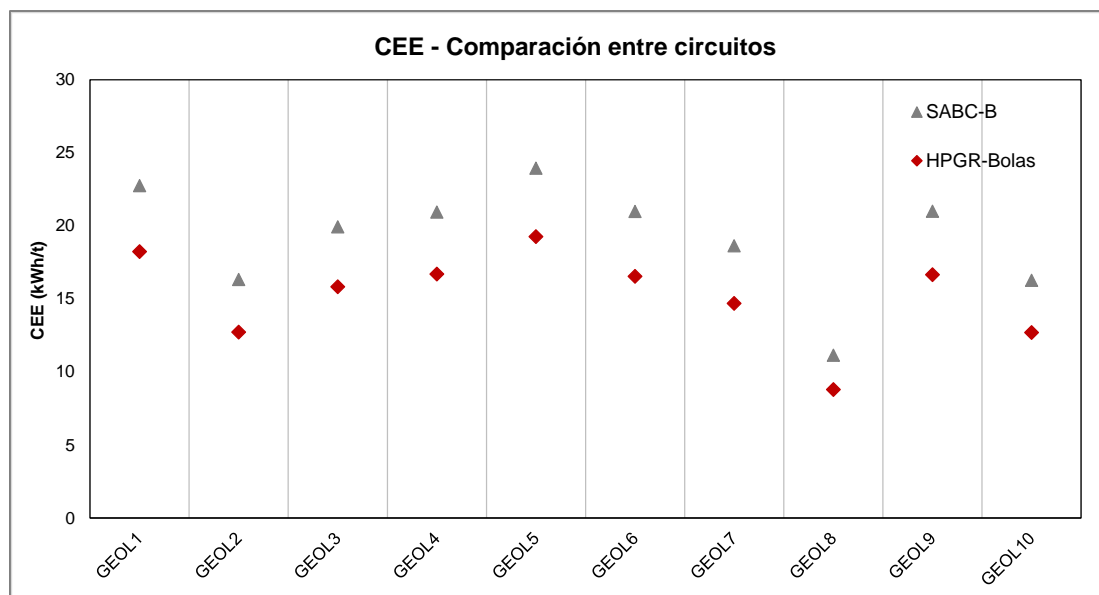


Figura 5-12: Comparación CEE (kWh/t) entre circuitos

5.2.4. Caracterización para Concentración

Para obtener una caracterización de las muestras respecto al tiempo requerido para lograr un producto de molienda deseado, se realiza la prueba cinética de molienda a 4 tiempos. Luego, se estima la curva que pasa por estos puntos, y se calcula el tiempo necesario para obtener un determinado grado de molienda. Estos resultados, obtenidos para cada geología, se muestran en la Figura 5-13.

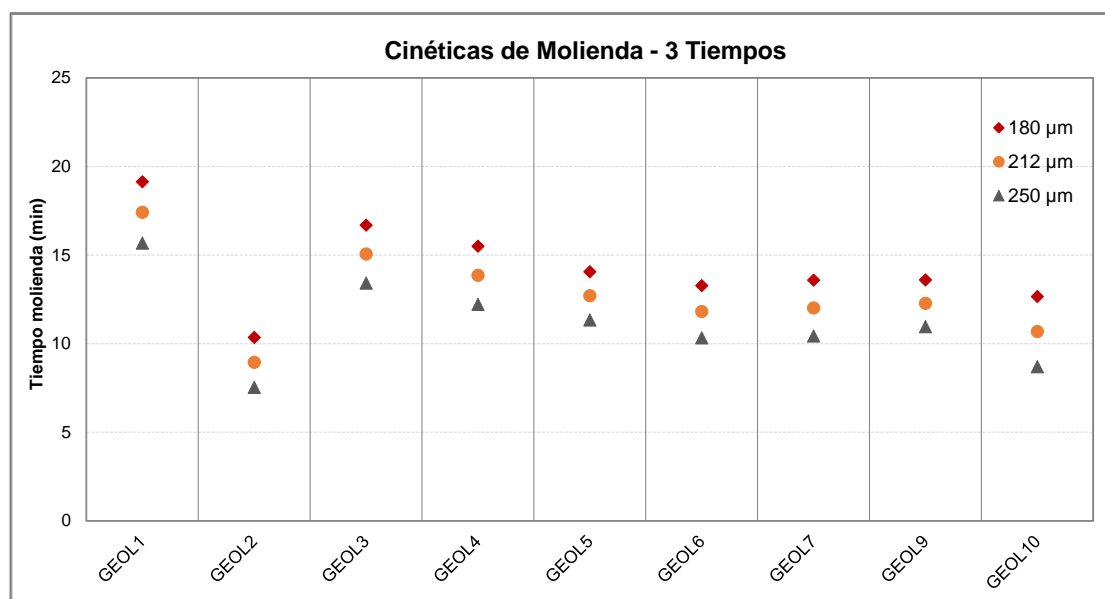


Figura 5-13: Tiempo de molienda requerido para 3 tamaños – Ejemplo 1

5.2.5. Control y aseguramiento de la calidad

Entre las técnicas para el control y aseguramiento de la calidad implementadas en este ejemplo de estudio, destacan la cuantificación del error de preparación y el error del análisis químico. Esto se realizó para aquellas muestras donde existía una mayor cantidad de masa disponible, masa que fue utilizada con esta finalidad.

Las leyes obtenidas desde los duplicados de preparación y de análisis químico se observan en la tabla.

Tabla 5-8: Leyes de cabeza en muestras duplicadas

	Ley Cabeza (%)	Ley Duplicado (%)	
		Preparación	Análisis Químico
M-05	0,174	0,166	0,175
M-24	0,444	0,434	0,446
M-31	0,392	0,375	0,396
M-34	0,344	0,330	0,345

Así, el error total considerando las dos variables anteriores además del error fundamental del protocolo de muestreo, se detalla a continuación.

Tabla 5-9: Errores en variabilidad a pequeña escala

	Error (%)				
	Preparación	Análisis Químico	Fundamental	Total	
				Suma	Propagación
M-05	4,09%	0,51%	5,70%	10,3%	26,2%
M-24	1,70%	0,56%	5,70%	7,96%	19,7%
M-31	3,38%	0,96%	5,70%	10,0%	27,1%
M-34	3,87%	0,20%	5,70%	9,77%	23,1%
Promedio				9,51%	24,0%

5.3. Ejemplo 2: Material de Rechazo bajo 8#Ty

Se cuenta con 27 muestras de mineral, correspondientes a muestras de rechazo desde los sondajes ya descritos. Las muestras constan de aproximadamente 15 [kg] cada una.

Se busca obtener información para evaluar las muestras de cabeza de forma física y mineralógica. También se espera obtener algún índice de molienda, y obtener el tiempo requerido para lograr un producto de molienda, para realizar las pruebas de concentración.

5.3.1. Definición del protocolo a utilizar

Considerando la información requerida, y observando las posibilidades disponibles, se considera oportuno trabajar bajo lo que indica el protocolo “R 8#”.

Las pruebas a realizar serán:

- Nivel 3: Prueba de Bond para Molienda de Bolas (modificando la malla de corte de la alimentación).
- Nivel 4: Caracterización de cabeza (Humedad, Gravedad Específica y Microscopía Óptica) y para concentración (Cinéticas de Molienda).

El protocolo de preparación de las muestras para las pruebas mencionadas se observa a continuación.

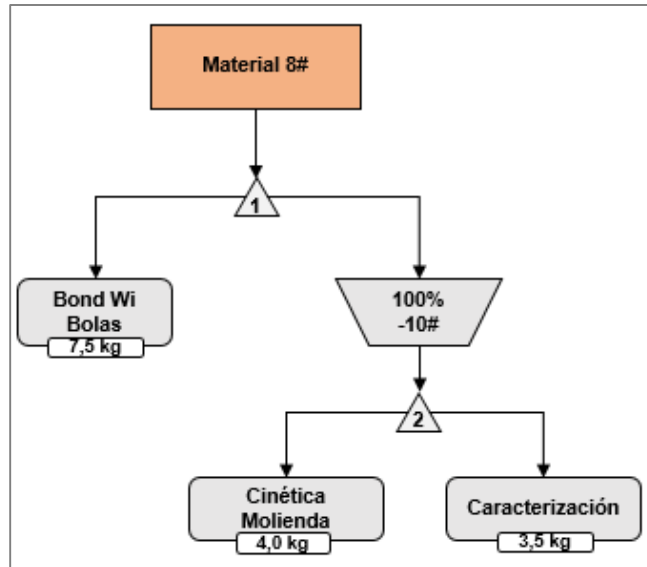


Figura 5-14: Protocolo de Muestreo Ejemplo 2

Se detallan las etapas de corte descritas en el protocolo.

Tabla 5-10: Etapas de corte y homogeneización – Ejemplo 2

Etapa	Homogeneización	Corte	Resultado
1	Divisor Rotatorio	Divisor Rotatorio	2 cargas de 7,5 kg
2	Divisor Rotatorio	Divisor Rotatorio	15 cargas de 0,5 kg

Luego de la Etapa 2 de corte, se juntan 4 cargas de mineral con sus capachos opuestos del divisor rotatorio, de forma de crear 4 cargas finales de 1,0 [kg] cada una, para realizar las pruebas de cinética de molienda.

Para las cargas de caracterización, se destinan 3 cargas para la determinación de humedad, 1 para la gravedad específica, y 2 para la determinación de las características mineralógicas de la muestra. No se considera reutilización de muestra para la ejecución de este protocolo.

Las pérdidas promedio de mineral, incurridas por cada etapa se observan en la tabla.

Tabla 5-11: Pérdidas por corte y homogeneización – Ejemplo 2

Etapa	Pérdidas (g)	Pérdidas (%)
1	126,1	0,81
2	78,3	0,97

Una vez definido el protocolo a utilizar, y las consideraciones pertinentes, se realizan los análisis a las muestras [Anexo D].

5.3.2. Caracterización de Cabeza

La clasificación previamente realizada según zona mineral, litología y alteración, ahora se replica considerando las nuevas muestras de material de rechazo.5+

Tabla 5-12: Resumen de muestras por unidad – Ejemplo 2

	N° Muestras	Zona Mineral	Sub-Zona Mineral	Litología	Alteración
GEOL1	5	PRI	CPY 1-2	AND	CLS
GEOL2	2	PRI	CPY 1-2	AND	SER
GEOL3	3	PRI	CPY 1-2	AND	BCL
GEOL4	7	PRI	CPY 3-4-5	AND	CLS
GEOL5	2	PRI	CPY 3-4-5	AND	BCL
GEOL6	1	PRI	CPY 1-2	PBFT	CLS
GEOL7	2	PRI	CPY 3-4-5	PFBT	CLS
GEOL8	1	PRI	CPY 3-4-5	PFBT	SER
GEOL9	3	PRI	CPY 1-2	PQFI	CLS
GEOL10	1	PRI	CPY 1-2	PQFI	SER

Respecto a la caracterización física, las pruebas de determinación de humedad y gravedad específica entregan los siguientes resultados.

Tabla 5-13: Caracterización física – Ejemplo 2

Caracterización Física	
Gravedad Específica	2,80
Humedad (%)	0,16

La caracterización mineralógica también se realiza por microscopía óptica a minerales opacos. Se muestra la distribución promedio de los minerales en las muestras.

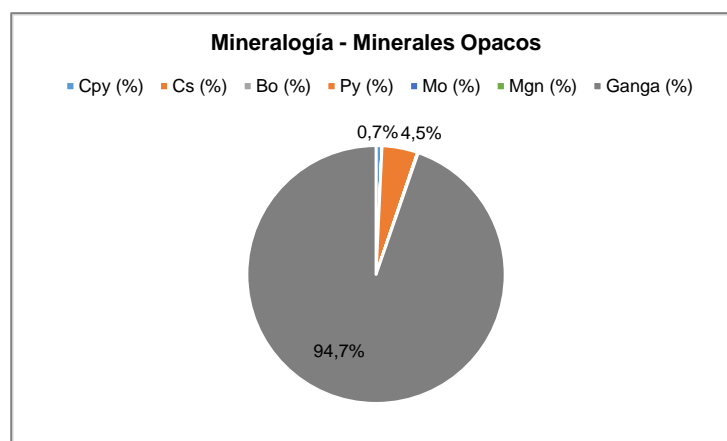


Figura 5-15: Mineralogía en Base Total – Ejemplo 2

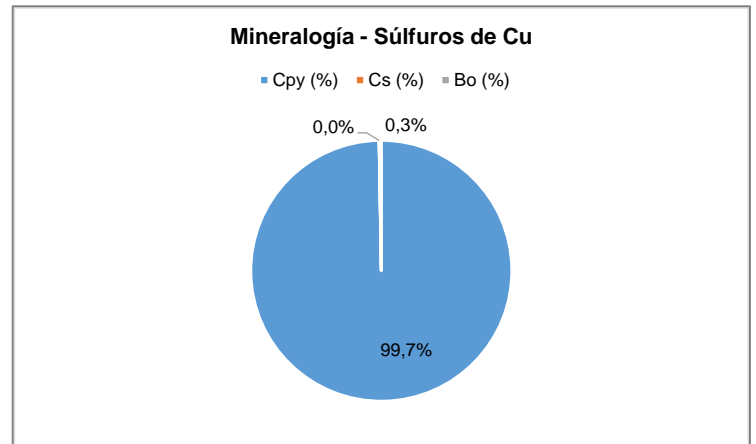
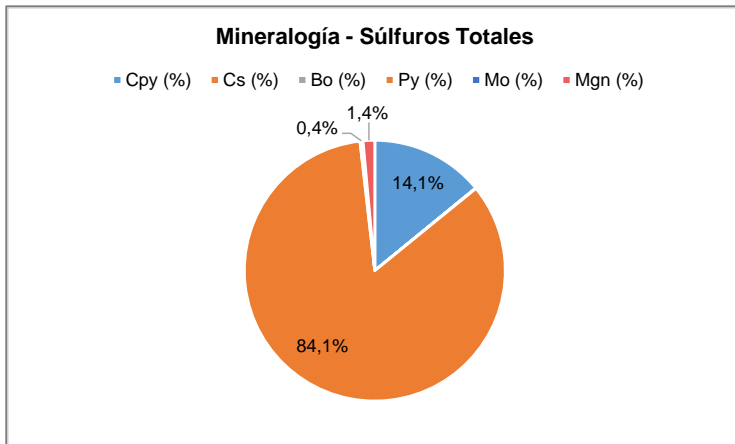


Figura 5-16: Mineralogía de Sulfuros – Ejemplo 2. Izq.: Sulf. Totales. Der.: Sulf. de Cu

Asimismo, se presentan los estudios de liberación del mineral.

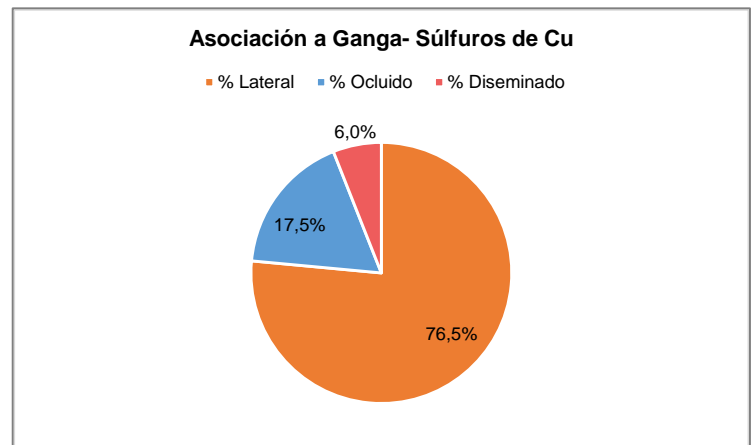
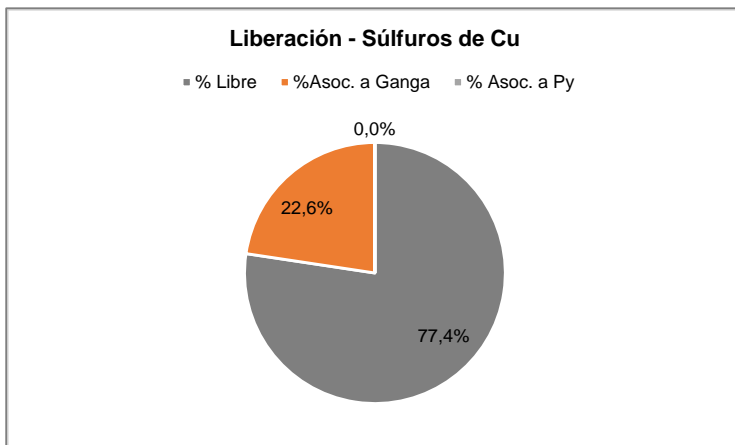


Figura 5-17: Sulfuros de Cu a 212 μm – Ejemplo 2. Izq.: Liberación. Der.: Asociación.

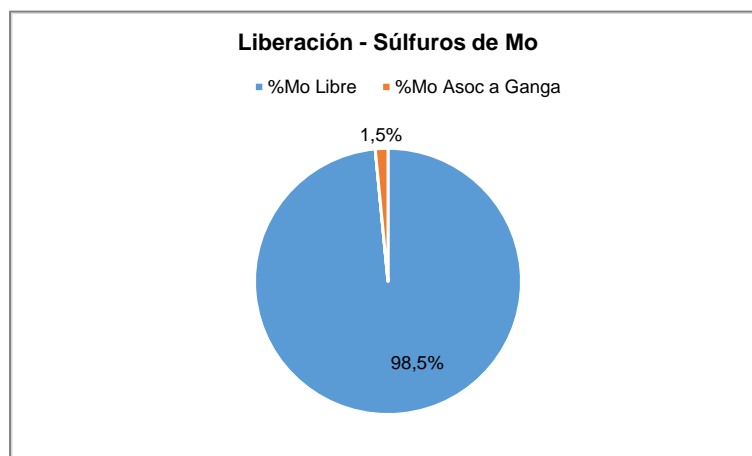


Figura 5-18: Sulfuros de Mo a 212 μm – Ejemplo 2. Liberación.

5.3.3. Consumo Específico de Energía

Con la finalidad de determinar el consumo específico de molienda para un circuito dado, y considerando las restricciones de granulometría del mineral, se realiza una prueba de Bond modificada para molino de Bolas, con una muestra de 8#Ty y una malla de corte de 100#Ty, correspondiente a 150 [µm].

Tabla 5-14: Resultados pruebas de conminución – Ejemplo 2

	Bond Wi Bolas
	Wi,B (kWh/tc)
GEOL1	15,8
GEOL2	13,8
GEOL3	14,5
GEOL4	16,3
GEOL5	15,7
GEOL6	13,1
GEOL7	14,9
GEOL8	12,7
GEOL9	15,1
GEOL10	14,4
Promedio	14,6

Se calcula el consumo del molino de Bolas mediante la metodología de Bond para las distintas unidades. Lo obtenido se observa en la Figura 5-19.

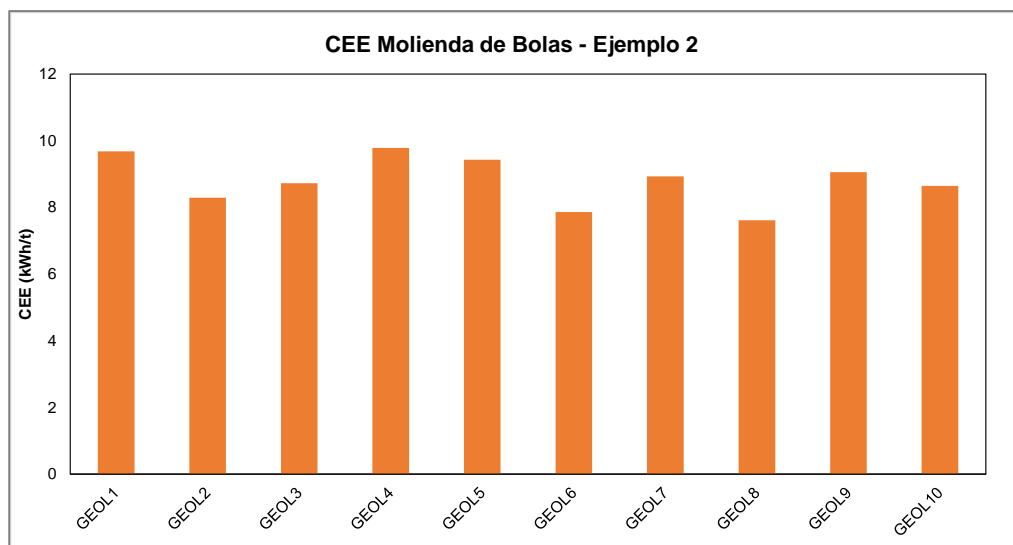


Figura 5-19: CEE (kWh/t) para Molienda de Bolas - Ejemplo 2

5.3.3.1. Comparación con resultados desde muestra de sondajes

Como se ya ha mencionado, este material particulado pertenece al rechazo del proceso de muestreo que se realizó en la etapa de exploración, por lo cual las muestras pueden ser comparadas con sus pares correspondientes a las muestras de ¼ de sondaje. Se realiza la comparación del CEE (kWh/t) calculado para el molino de Bolas para cada geología.

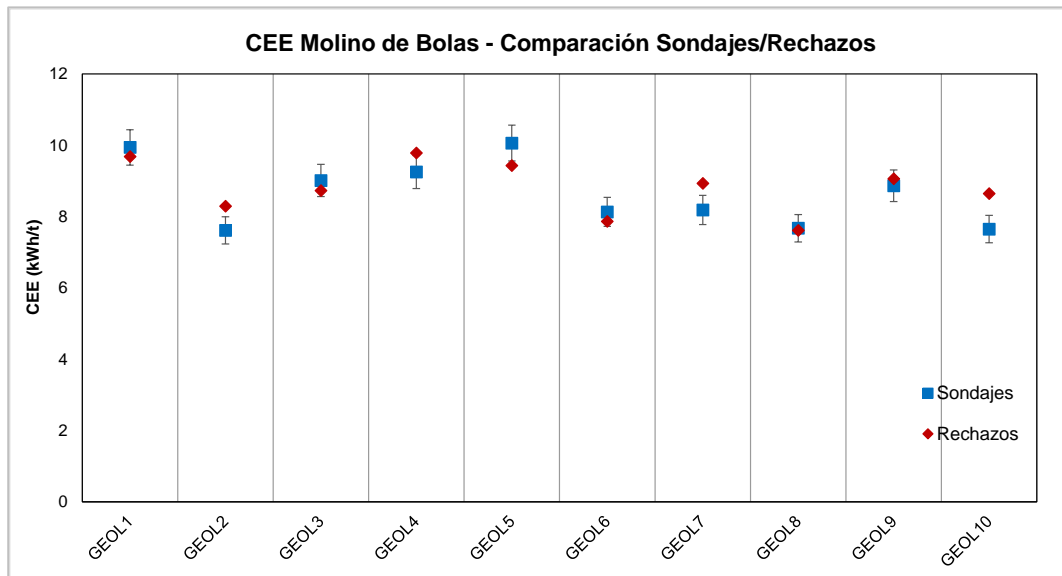


Figura 5-20: Comparación CEE (kWh/t) Molino de Bolas para sondajes y rechazos

5.3.4. Caracterización para Concentración

Para obtener una caracterización de las muestras respecto a su comportamiento en flotación, se realiza la prueba cinética de molienda a 4 tiempos, para determinar el tiempo necesario para lograr 3 productos de molienda distintos. Los resultados se observan en la Figura 5-21.

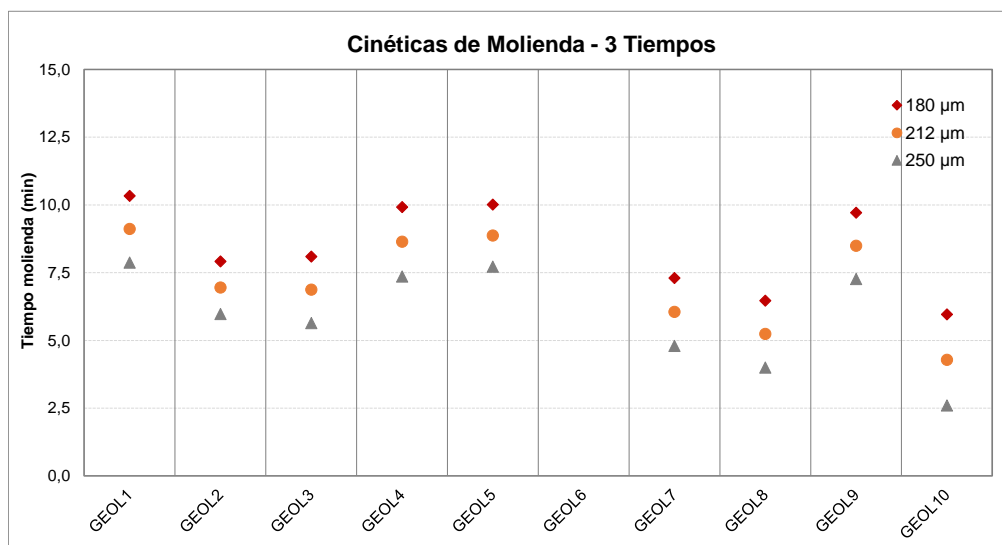


Figura 5-21: Tiempo de molienda requerido para 3 tamaños – Ejemplo 2

5.3.4.1. Comparación con resultados desde muestra de sondajes

Para los tiempos de la cinética de molienda, también se puede realizar una comparación con los datos obtenidos desde las muestras de sondajes para cada geología, incorporando en la visualización un margen de error del 5% respecto al tiempo calculado en la muestra directa desde el sondaje para 212 [µm].

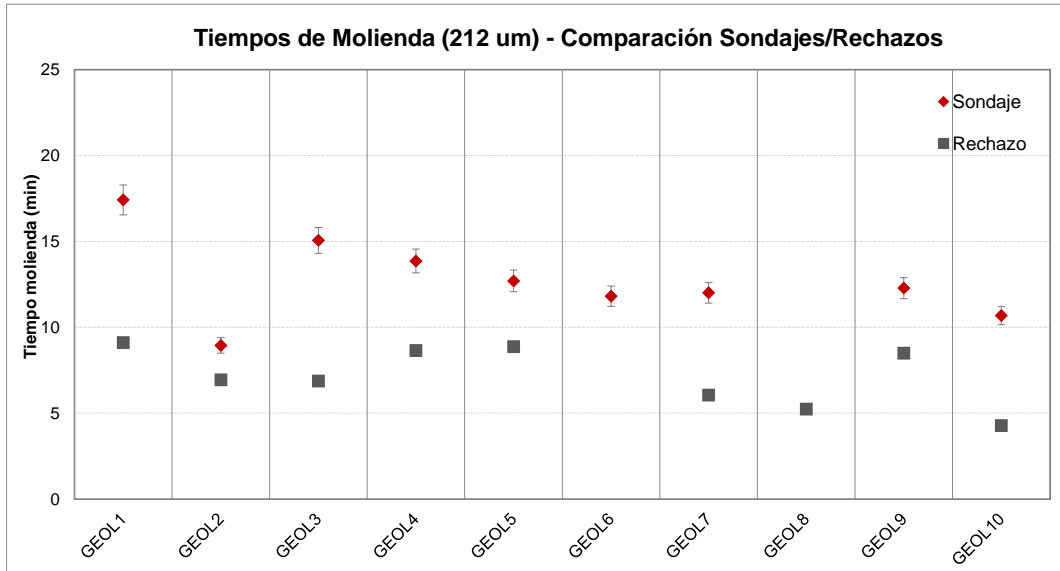


Figura 5-22: Comparación tiempo de molienda (212 µm) para sondajes y rechazos

5.3.5. Control y aseguramiento de la calidad

Como complemento, se realizan pruebas de control de calidad dirigidas a analizar la exactitud del análisis químico que se desarrolla en el laboratorio.

Esto se realiza con el uso de muestras de referencias, cuya composición se encuentra certificada, y se inserta de forma ciega en las muestras de análisis químico del material.

Para este ejemplo, se introducen 3 muestras de referencia, correspondientes a leyes de Cu alta, media y baja respectivamente. Los resultados obtenidos, además del valor certificado de la muestra y la banda de seguridad de $\pm\sigma$, se observa en las figuras siguientes.

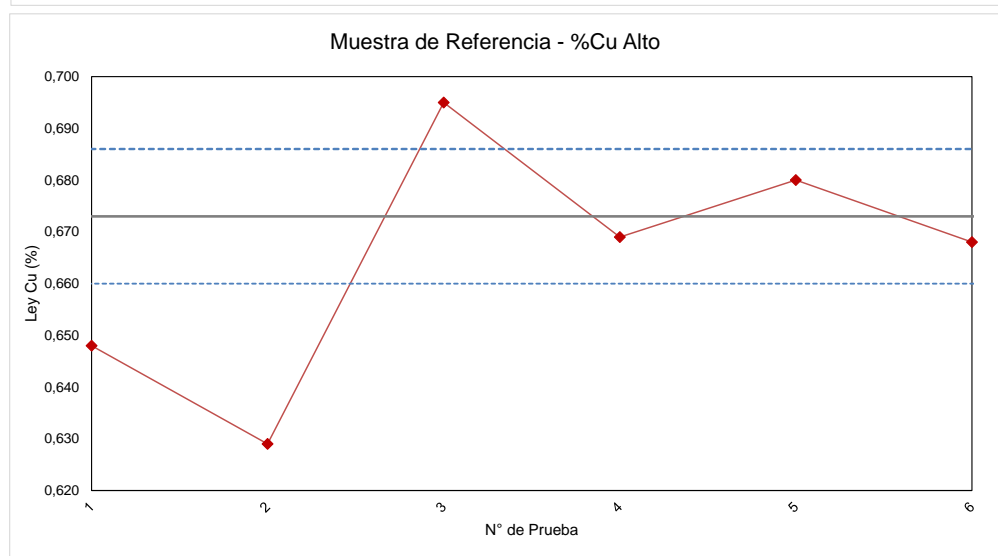
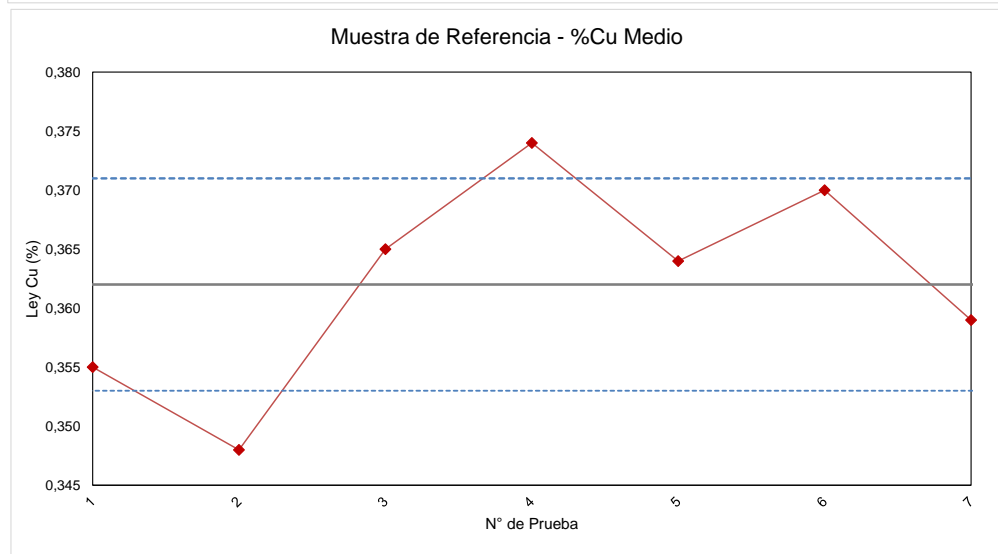
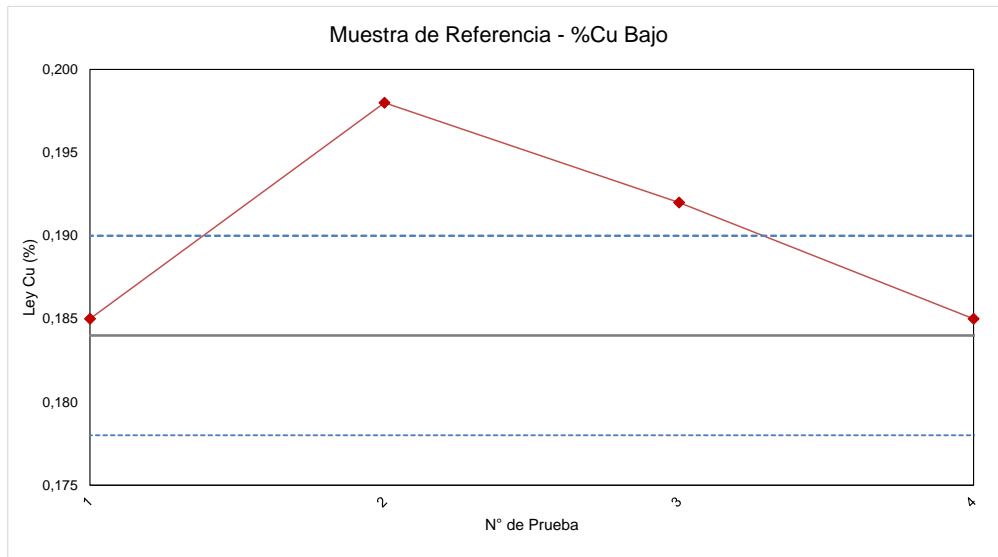


Figura 5-23: Gráfico de control – Muestra de referencia. Arriba: %Cu Bajo; Centro: %Cu Medio; Abajo: %Cu Alto.

5.4. Análisis de Resultados de Ejemplos de Estudio

Considerando los resultados obtenidos en ambos ejemplos de estudio, es importante realizar algunos análisis.

Por ejemplo, para el caso de la caracterización física y mineralógica, se observa que el material a 212 [μm] presenta una composición en base sulfuros de Pirita y Calcopirita principalmente, la cual se replica tanto para las muestras de sondajes como de rechazos. Los sulfuros de Cu se encuentran prácticamente liberados a este tamaño, así como también los sulfuros de Mo.

Al comparar la estimación de consumo específico de energía para el circuito SAG-Bolas realizada por las dos metodologías, se observa que aquel estimado por la propuesta de Morrell es mayor en 8 de las 10 geologías. Además, se observa que para todas las unidades definidas, el consumo específico de energía del circuito HPGR-Bolas es aproximadamente un 20% menor que el del circuito SAG-Bolas (Figura 5-12).

Realizando también una comparación entre los índices de Bond para molienda de Bolas obtenidos en ambos ejemplos se observa que, mientras en el caso de las muestras de sondaje fue utilizado un material de alimentación de 6#Ty, en el segundo caso la alimentación fue más fina. Sin perjuicio de esto, se tiene que los valores obtenidos no presentan una tendencia a sub o sobreestimar el índice W_i en las distintas geologías, registrándose la mayor parte de los valores para CEE (kWh/t) dentro de un 5% de error calculado desde el índice para el material de sondajes.

En el caso de las pruebas cinéticas de molienda, los resultados del tiempo de molienda para lograr un producto a 212 [μm] presentados para el caso del material bajo 8#Ty son notoriamente menores, cuando las muestras han sido ensayadas en similares condiciones. Esto se debe principalmente al exceso de material fino presente en el material de alimentación a esta prueba, el cual impacta notoriamente en los resultados obtenidos.

Finalmente, las técnicas de control y aseguramiento de la calidad para ambos ejemplos muestran valores aceptables para la precisión y exactitud del análisis químico, como también en la precisión de la preparación mecánica de las pruebas, las que unidas al bajo error fundamental incurrido, entregan errores totales cercanos a un 10%. Para la exactitud, los análisis químicos de las muestras de referencia evidencian un coeficiente de variación entre 2,5% y 3,5%.

6. DISCUSIONES

Es importante realizar, en primera instancia, un análisis crítico de las pruebas metalúrgicas existentes en el mercado, y las diversas prácticas que se llevan a cabo para su implementación. Desde el análisis bibliográfico, es posible observar que la prueba de Metso para índice de chancado requiere una granulometría de entrada entre 4 y 6 [mm]. Esta fracción de tamaño no es característica de las pruebas de chancado, por lo que podría no ser representativa al no caracterizar de la misma manera la resistencia del material. Además, las correlaciones publicadas entre este índice y otros similares para distintos materiales no debe ser utilizada, por lo que siempre se debe realizar la prueba metalúrgica, en pos de obtener datos realmente fiables y no basarse en aproximaciones que pocas veces son aplicables.

Por otra parte, al analizar la prueba SAGDesign, se observa que constituye una alternativa reciente al diseño de procesos de conminución que no cuenta con una base de datos extensa para validar su propuesta. Además, existen pocos laboratorios en Chile que tienen incorporado este procedimiento, por lo que el respaldo de los resultados obtenidos no es suficiente hasta el momento. Similar es el caso de la prueba SPT para equipos HPGR, la cual ha sido desarrollada recientemente como alternativa a las pruebas a escala piloto de Polysius, y que no ha tenido una amplia difusión para extender su base de datos.

Contrario es el caso de la prueba SPI, ya que para esta prueba se cuenta con una gran cantidad de información, para distintos tipos de yacimientos alrededor del mundo. Sin embargo, esta prueba – la cual va dirigida a la caracterización de la molienda SAG – no considera en su desarrollo una variación en la granulometría de alimentación, factor importante para caracterizar adecuadamente la molienda semi-autógena.

Respecto a la prueba de Bond para Molienda de Bolas, se presenta una gran cantidad de desviaciones de la prueba original, las cuales deben ser siempre conocidas y, en la mayor parte de los casos, representarán una diferencia importante en el producto o resultado de la prueba. Variables como el collar de bolas utilizado, la malla de alimentación y de corte, y la cantidad de ciclos de molienda utilizados son parámetros claves que pueden producir amplias variaciones en el desempeño del mineral.

Para las pruebas de caracterización del mineral, la herramienta de microscopía óptica presenta limitaciones, debido a que no es posible observar la variabilidad de minerales presentes en la ganga al realizar la microscopía para minerales opacos. En cambio, QEMSCAN es mucho más preciso en la entrega de esta información, siempre que se encuentre calibrado para el tipo de mineral que se quiera analizar. Sin embargo, el precio y tiempo de respuesta de este test lo hace menos competitivo en aquellas etapas exploratorias con restricciones de plazos y presupuestos.

Ahora, analizando los protocolos de muestreo propuestos, es importante notar que el error fundamental está calculado de forma conservadora (por su factor de liberación), y este error puede disminuir en más de un 100% si se consideraran condiciones más favorables en términos del tamaño de liberación, homogeneidad y ley promedio de las muestras.

El hecho de considerar distintas metodologías de estimación enriquece aún más esta discusión. Por ejemplo, la metodología desarrollada por Aminpro tiene una componente netamente empírica correspondiente al cálculo del consumo específico del molino SAG, basado en la energía a la fuente. No así la componente del consumo del molino de bolas, el cual es desarrollado por la ecuación de Bond y sus factores correctivos, y representa la energía entregada al piñón del sistema.

En el caso de la metodología de Barratt, no se considera una prueba de molienda específica para el molino SAG, sino que este consumo se estima combinando fracciones de tamaño con los índices para molienda de barras y de bolas. Esto puede considerarse una desventaja cuando se espera una mayor certeza en el diseño de circuitos que incluyan equipos de molienda autógena o semi-autógena.

Considerando los tópicos de control y aseguramiento de la calidad, es importante notar que para los protocolos aplicables a material particulado – ya sea desde sondajes de aire reverso o material de rechazo - es necesario realizar un análisis granulométrico a las muestras de cabeza, para conocer al menos dos puntos de la curva granulométrica además del P100, correspondiente al tamaño máximo de partículas. Esto, con la finalidad de determinar las pruebas que son efectivamente realizables dependiendo de las características de este material (exceso de finos, granulometría muy amplia, etc.).

Finalmente, el protocolo para las muestras de exploración del proyecto en estudio, muestra que los protocolos antes propuestos representan una recomendación, la cual puede ser modificada de acuerdo a los requerimientos del cliente, pero siempre considerando los comentarios previamente expuestos. Además, la utilización de al menos dos metodologías de estimación de parámetros de conminución es útil para analizar desde diferentes perspectivas un eventual circuito, y tomar una decisión menos sesgada y con una mayor cantidad de alternativas. Esta decisión siempre queda de parte del cliente ya que, en este caso, se privilegia realizar el análisis por las dos alternativas en desmedro de la obtención de algún índice de abrasión, que permita dimensionar el consumo de los medios de molienda en los distintos circuitos.

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Considerando las restricciones que presenta el negocio minero actualmente, tanto en tiempos como en presupuesto, se hace necesario obtener la mayor cantidad de información desde el material de exploración que se encuentre disponible. El diseño de protocolos que permitan la obtención de información oportuna y certera, optimizando el uso de la muestra y combinando distintas plataformas de modelamiento de procesos de conminución constituye una de las alternativas para resolver este tema.

A partir del trabajo realizado se concluye que es posible desarrollar alternativas a los protocolos actuales para muestras de exploración, incorporando pruebas de conminución para al menos una fracción de tamaño, y con un error fundamental total menor al 10% en la mayor parte de las alternativas propuestas, para muestras provenientes de sondajes NQ. Este error es mayor al muestrear desde testigos de sondajes de mayor diámetro, debido a la mayor granulometría de dichas muestras.

Para un correcto diseño de estos protocolos, se concluye que es fundamental conocer a cabalidad las condiciones sobre las cuales se realizan las pruebas de conminución y caracterización en el laboratorio, para determinar aquellas pruebas que son idóneas para la obtención de la información requerida.

Además, la consideración de acciones para el control y aseguramiento de la calidad permiten cuantificar el error en el que se incurre al obtener las cargas para las distintas pruebas, y garantizar que esta muestra es representativa del lote original.

Entre las recomendaciones más relevantes para un trabajo futuro, se consideran:

- Incluir en el análisis pruebas relativas a concentración del mineral, como pruebas cinéticas de flotación o concentración magnética.
- También es importante incluir información relativa a pruebas ambientales, tales como aquellas de sedimentación y drenaje ácido.
- Considerar una propuesta que incluya la dimensión económica tanto de las propuestas (costo de las pruebas metalúrgicas, HH de personal), como también la determinación de indicadores de costos de operación (consumo total de aceros, consumo de energía global, etc.).
- Finalmente, una metodología global debe incorporar la definición de unidades geometalúrgicas y la selección de muestras representativas de cada una de ellas, para dar cierre al ciclo de estudio geometalúrgico propiamente tal.

8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] W. Cuadra, «Aspectos generales de la Exploración Minera,» Apuntes del Curso MI3130 - Minería, FCFM Universidad de Chile, Santiago de Chile, 2010.
- [2] J. Ortiz, «Exploración,» Apuntes del curso MI3130 - Minería, FCFM Universidad de Chile, Santiago de Chile, 2010.
- [3] J. Rojas, Interviewee, *Tópicos de Exploración*. [Entrevista]. 21 04 2014.
- [4] J. Starkey, A critical review of grinding design procedures for the 21st century, Brisbane, Australia: Proceedings Comminution 2001, 2001.
- [5] A. McKen, «An overview of the small-scale tests available to characterize ore grindability for desing purposes,» SGS Minerals Technical Bulletin, 2005.
- [6] Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum - CIM, «National Instrument 43-101 - Standards of disclosure for mineral projects,» 2011.
- [7] D. Barratt y A. Doll, Testwork programs that deliver multiple data sets of comminution parameters for use in mine planning and project engineering, Santiago de Chile: Proceedings Procemin 2008, 2008.
- [8] F. Bond, Crushing Test by Pressure and Impact, Trans AIME, Vol 169, 1947.
- [9] A. Doll, R. Phillips y D. Barratt, Effect of core diameter on the Bond Impact Crushing Work Index test, Vancouver, Canada: Proceedings SAG 2010, 2010.
- [10] SGS Minerals, «Test Crusher Index y chancado menos seis mallas,» Procedimiento de Laboratorio, Santiago de Chile, 2013.
- [11] Metso Minerals Industries, Inc., «Lab test Descriptions,» Wisconsin, USA, 2013.
- [12] D. Bulled y K. Husain, «The development of a small-scale test to determine work index for High Pressure Grinding Rolls,» SGS Minerals Technical Bulletin, 2008.
- [13] T. Napier-Munn, S. Morrell, R. Morrison y T. Kojovic, «Capítulo 4: Rock testing-determining the material-specific breakage function,» de *Mineral comminution circuits - Their operation and optimization*", Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre, 1996, p. 413.
- [14] J. A. Andersen y T. J. Napier-Munn, «Power prediction for cone crushers,» de *Mill Operators' Conference*, Cobar, 1988.
- [15] S. F. A. Awachie, «Development of crusher models using laboratory breakage data,» 1983.

- [16] S. Narayanan y W. Whiten, «Breakage characteristics for ores for ball mill modelling,» *Proceedings of the Australasian Institute of Mining and Metallurgy*, pp. 31-39, 1983.
- [17] P. L. JKTech, «JK Drop Weight Test - In detail,» JKTech Lab Services, 2013.
- [18] S. Morrell, About the SMC test, Publicación en Web Oficial SMC, 2004.
- [19] S. Morrell, «Predicting the overall specific energy requirement of crushing, high pressure grinding roll and tumbling mill circuits,» *Minerals Engineering*, vol. 22, pp. 544-549, 2009.
- [20] J. Starkey, Getting more from drill core: Preliminary SAG design, Monterey, California: Randol Gol Forum, 1997.
- [21] J. Starkey y G. Dobby, Application of the Minnovex SAG Power Index Test at five Canadian SAG plants", Vancouver, Canada: Proceedings SAG 1996, 1996.
- [22] G. Dobby, G. Kosick y J. Starkey, Application of the Minnovex SAG Power Index test at five Canadian SAG plants, Vancouver, Canada: Proceedings SAG 1996, 1996.
- [23] J. Starkey, S. Hindstrom y G. Nadasdy, SagDesign testing - What it is and why it works, Vancouver, Canada: Proceedings SAG 2006, 2006.
- [24] J. Starkey y P. Scinto, SAG mill grinding design versus geometallurgy - getting it right for competent ores, Brisbane, Australia: Proceedings IMPC 2010, 2010.
- [25] J. Sepúlveda y L. Gutierrez, Dimensionamiento y optimización de plantas concentradoras mediante técnicas de modelación matemática, Santiago de Chile: Centro de Investigación Minera y Metalúrgica CIMM, 1986.
- [26] SGS Minerals, «Test Estándar Bond Bolas,» Chile, 2012.
- [27] Aminpro Chile, «Ensayo de Laboratorio - Bond Bolas Modificado,» Chile, 2010.
- [28] L. Flores, «Hardness model and reconciliation of throughput models to plant results at Minera Escondida Ltda., Chile,» SGS Minerals's Technical Bulletin, Santiago, Chile, 2005.
- [29] Codelco Norte, Subgerencia Concentración, «Test de Bond,» Chile, 2010.
- [30] Asmin Industrial, «Protocolo de trabajo INS.013.SIP,» Chile, 2010.
- [31] D. B. Mazzinghy, R. Galéry, C. Schneider y V. Kronemberger, Scale up and simulation of Vertimill pilot test operated with copper ore, Brazil: Journal of Materials Research and Technology, 2013.

- [32] F. Bond, Metal wear in crushing and grinding, Allis-Chalmers Publication, 1963.
- [33] SGS Minerals S.A, «Protocolo: Curva de Cinética de Molienda,» Santiago de Chile, 2012.
- [34] A. M. Rojo, Interviewee, *QEMSCAN Express, SOMIN*. [Entrevista]. 31 03 2014.
- [35] SGS Minerals, «QEMSCAN Operational Modes,» Technical Report, 2013.
- [36] V. Maksaev, «Microscopía de Menas,» Apuntes del curso Metalogénesis, Santiago, Chile, 2011.
- [37] SGS-CIMM, «Microscopía Óptica,» Informe de Proyecto, Santiago, Chile, 2013.
- [38] S. Minerals, «Determinación de Humedad en muestras sólidas,» Procedimientos Metalurgia, Santiago de Chile, 2014.
- [39] A. Doll y D. Barratt, «Grinding: Why so many tests?,» de *43rd Annual Meeting of the Canadian Mineral Processors*, Ontario, Canada, 2011.
- [40] A. Doll y D. Barratt, Testwork programs that deliver multiple data sets of comminution parameters for use in mine planning and project engineering, Santiago de Chile: Proceedings Procemin 2008, 2008.
- [41] M. Solari, *Reservas, Tamaño Explotación, Vida Útil, Ley de Corte y Muestreo*, Santiago, Chile: Apuntes del curso MI5082, Universidad de Chile, 2013.
- [42] P. Gy, «Sampling of Particulate Materials,» Elsevier, Amsterdam, Holanda, 1982.
- [43] P. Keto, P. Kuula-Väisänen y J. Ruuskanen, Effect of Material parameters on the compactibility of backfill materials, Olkiluoto, Finland: Working Report 2006-34, 2006.
- [44] A. Casali, «"Material Particulado",» Apuntes del curso MI4020, FCFM Universidad de Chile, Santiago, Chile, 2011.

ANEXOS

ANEXO A: Nomogramas de Pierre Gy para los Protocolos de Muestreo

Para determinar el error de las muestras obtenidas mediante los protocolos propuestos, se utiliza en Nomograma desarrollado por Pierre Gy [42].

Si bien la fórmula desarrollada por Gy es débil en el caso de minerales de baja ley (ppm), es comúnmente utilizada para el muestreo de minerales de Cu.

Este método está basado en el cálculo del error fundamental de muestreo, definido como:

$$\sigma_{FE} = \left(\frac{1}{M_L} - \frac{1}{M_S} \right) \cdot C \cdot d_N^3$$

Donde

$M_L [g]$ = Masa del lote desde el cual se toma la muestra

$M_S [g]$ = Masa de la muestra

$d_N [cm]$ = Diámetro nominal, que corresponde al d_{95} de las partículas del lote.

C = Constante característica del mineral, representada por la fórmula:

$$C = f \cdot g \cdot l \cdot m$$

Donde

f = **Factor de forma**

Relaciona el diámetro de una partícula con su volumen, de la siguiente forma:

$$f = \frac{V_{partícula}}{d^3}$$

g = **Factor granulométrico**

Correspondiente un factor que depende del cociente entre el diámetro de la partícula de mayor tamaño, y la de menor, definido como θ :

$$\theta = \frac{d_{sup}}{d_{inf}}$$

m = **Factor mineralógico**

Representa la composición mineralógica del lote, según:

$$c = \frac{(1 - a)}{a} [(1 - a) \cdot \rho_m + a \cdot \rho_g]$$

Donde:

a = Proporción del mineral o elemento de interés en el lote. Si se trata de mineral de oro, en ppm.

$\rho_m \left[\frac{t}{m^3} \right]$ = Densidad del mineral de mena.

$\rho_g \left[\frac{t}{m^3} \right]$ = Densidad de la ganga.

Cuando a es pequeño (menor a 0,1), el factor se aproxima por:

$$c = \frac{\rho_m}{a}$$

Cuando a es grande (mayor a 0,1), por tanto, el factor se aproxima por:

$$c = (1 - a) \cdot \rho_g$$

$l =$ **Factor de liberación.**

$$l = \left(\frac{d_l}{d_N}\right)^b$$

Donde:

$d_l [cm]$ = Diámetro de liberación

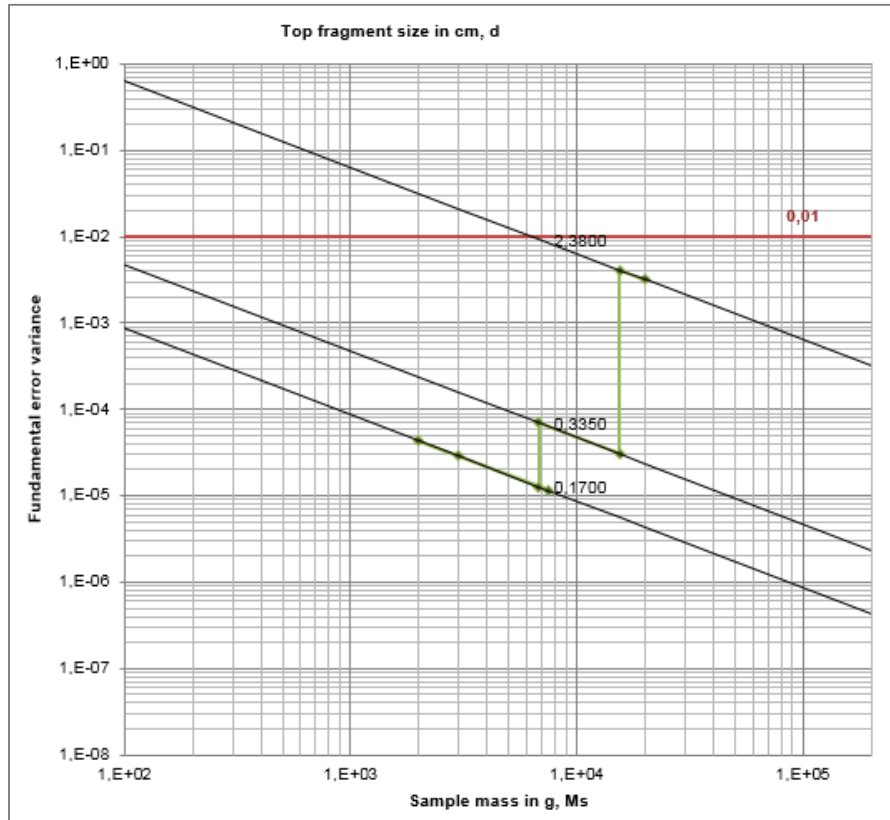
$d_N [cm]$ = Diámetro d_{95} de las partículas del lote.

b = Factor relacionado a la pendiente de la línea de calibración. En mineral de oro se utiliza 1,5, siendo el factor más común 0,5.

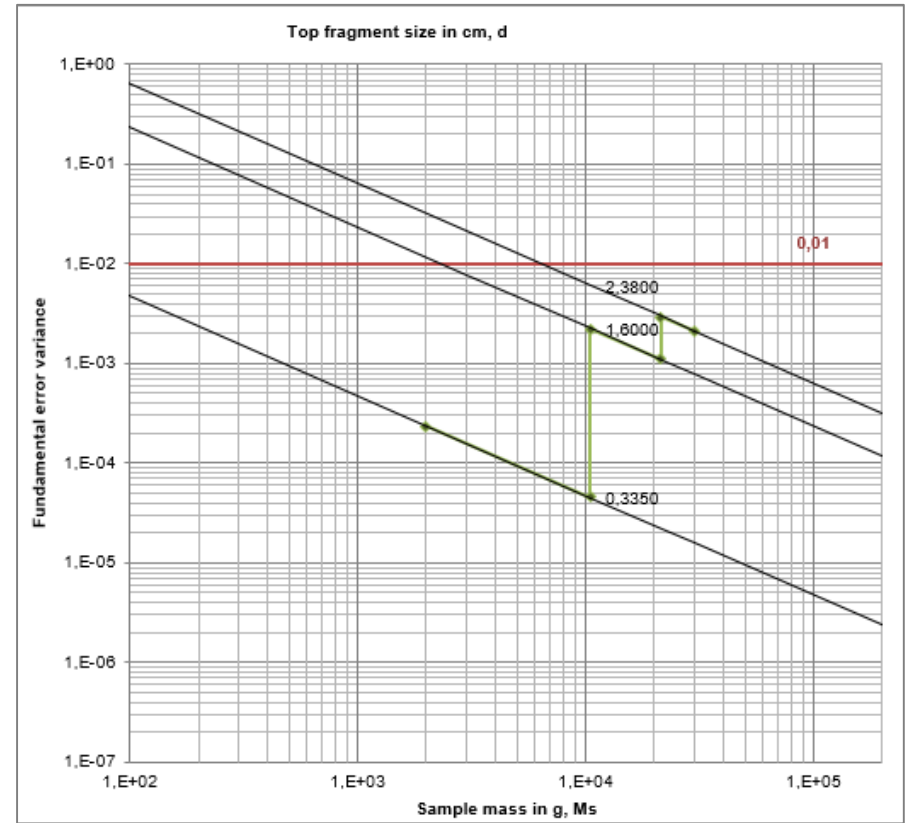
Se tienen los siguientes parámetros para el diseño de protocolos de muestreo, utilizando como muestra minerales de cobre.

	Valor
Ley media Cu (%)	0,4
Ley mineral (%)	34,0
Densidad mineral (g/cm³)	4,7
Densidad ganga (g/cm³)	2,7
Diámetro Liberación (um)	212
Factores	
f	0,5
g	0,25
b	0,5

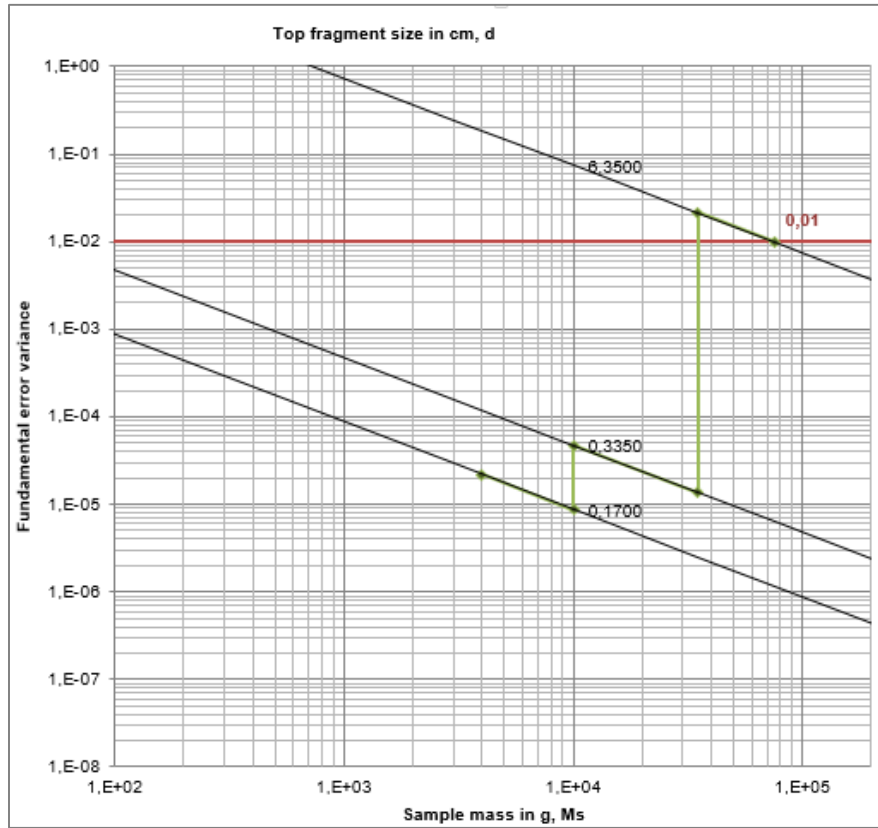
- Protocolo DDH-#1



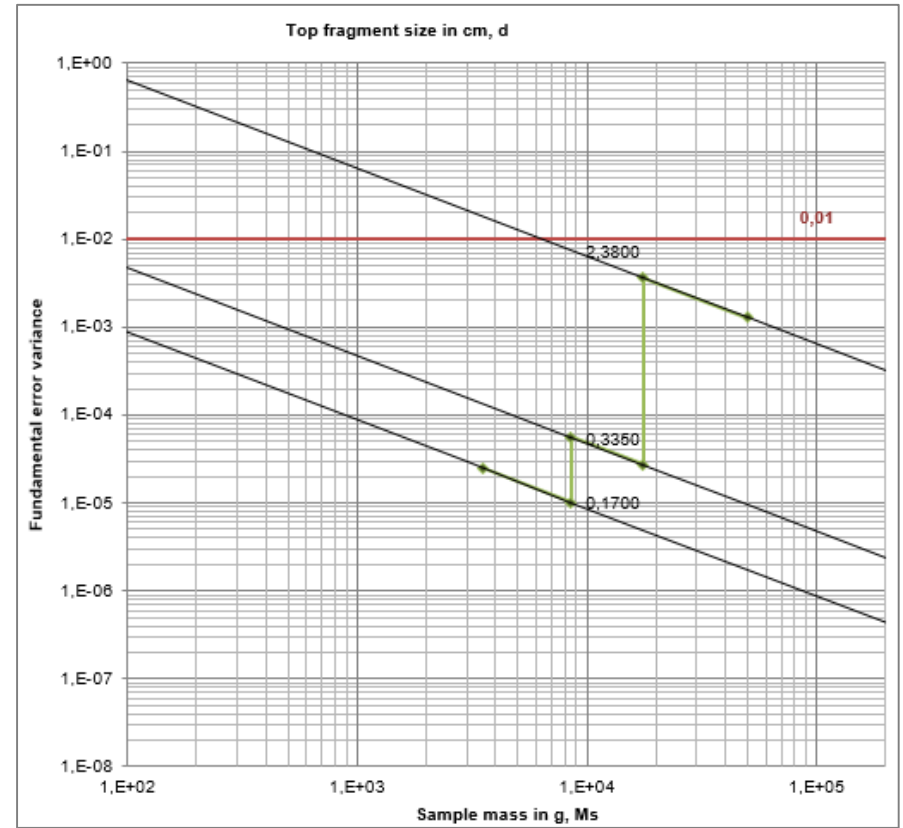
- Protocolo DDH-#2



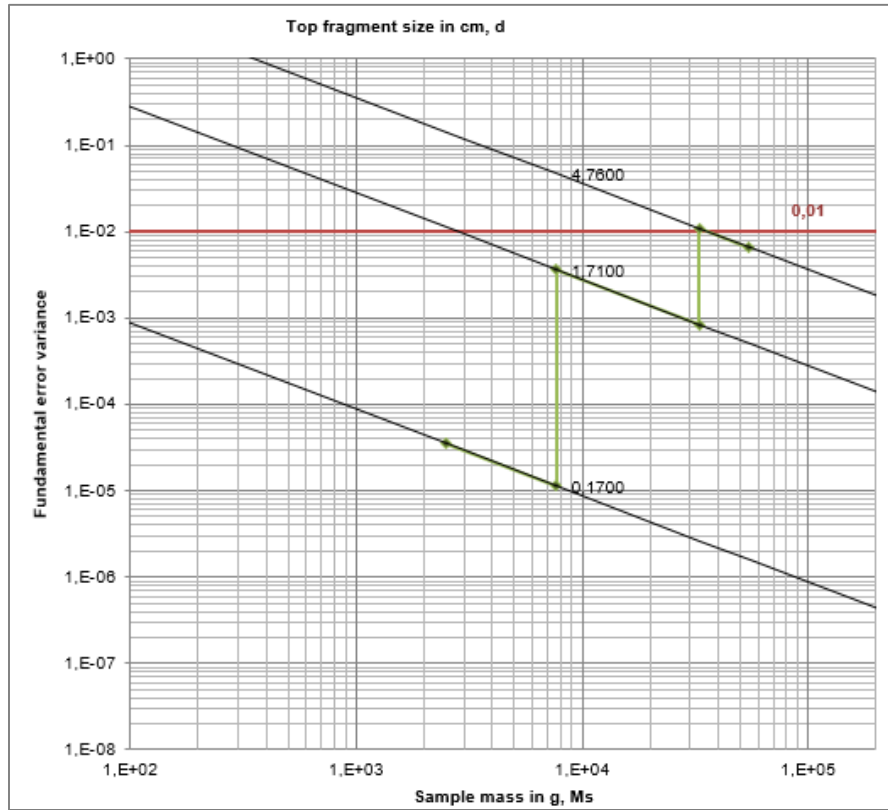
- Protocolo DDH-#3-A



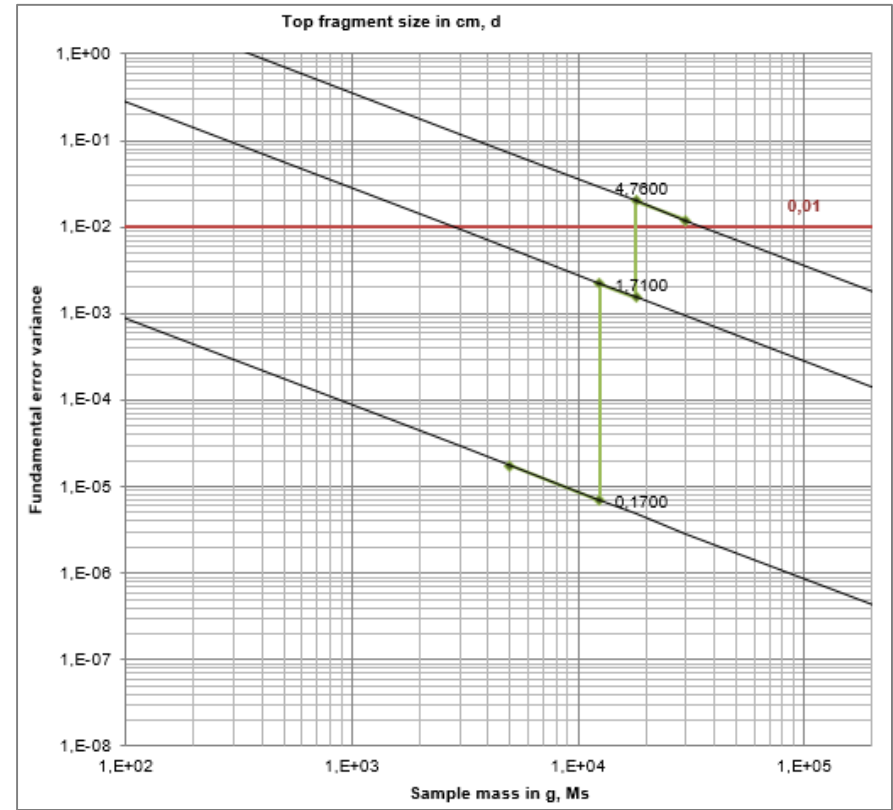
- Protocolo DDH-#3-B



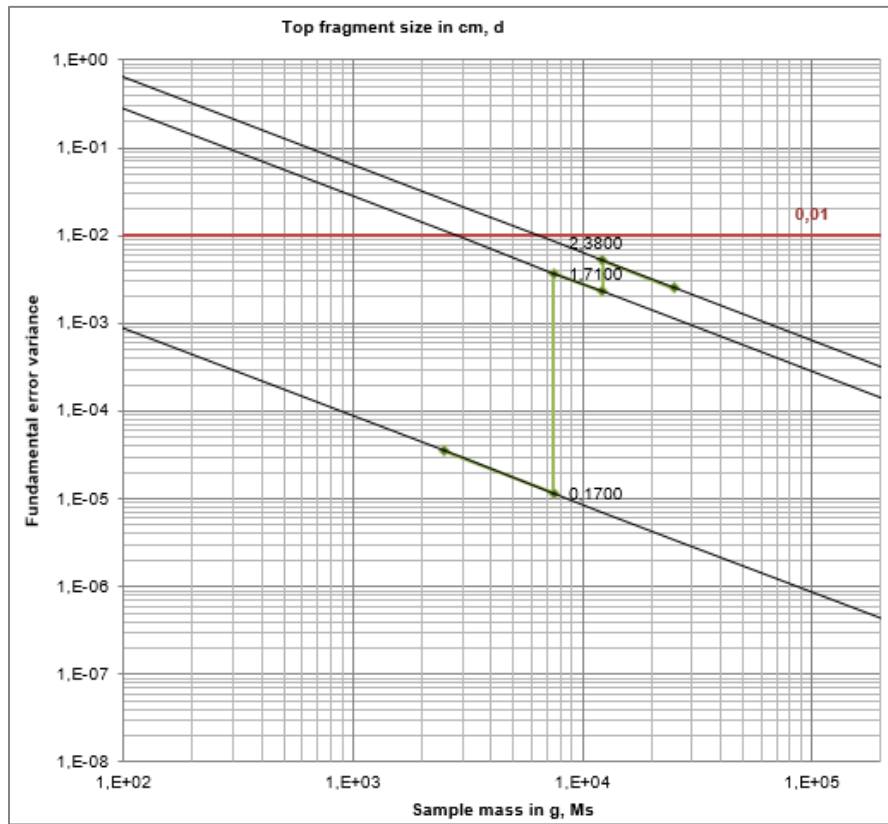
- Protocolo DDH-#4



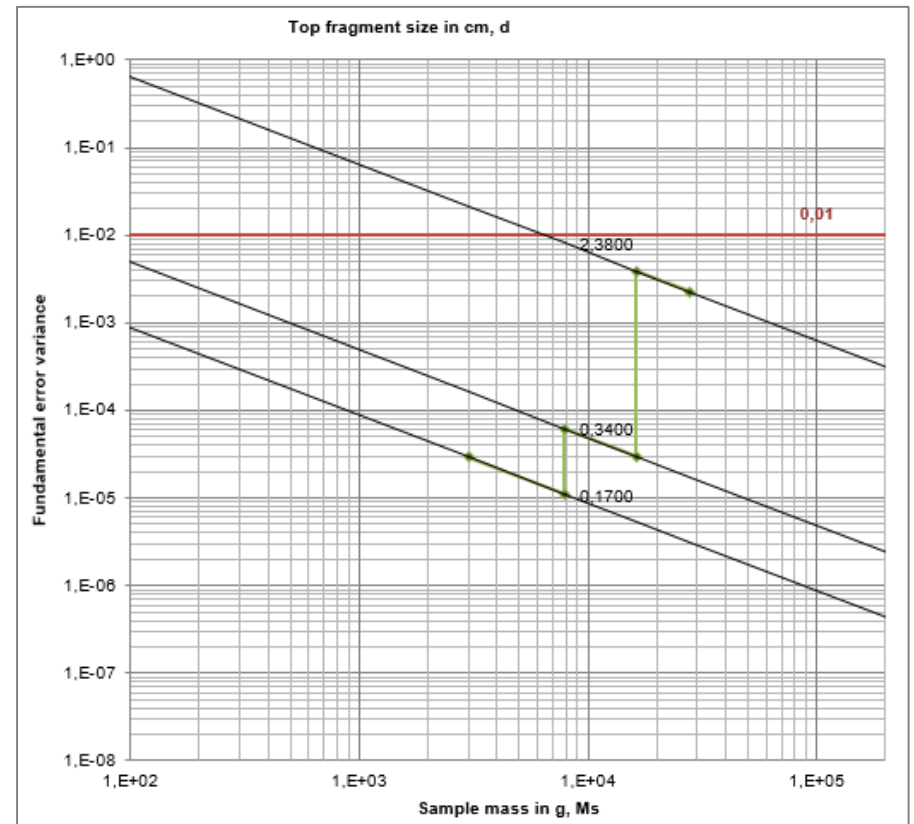
- Protocolo DDH-#5-A



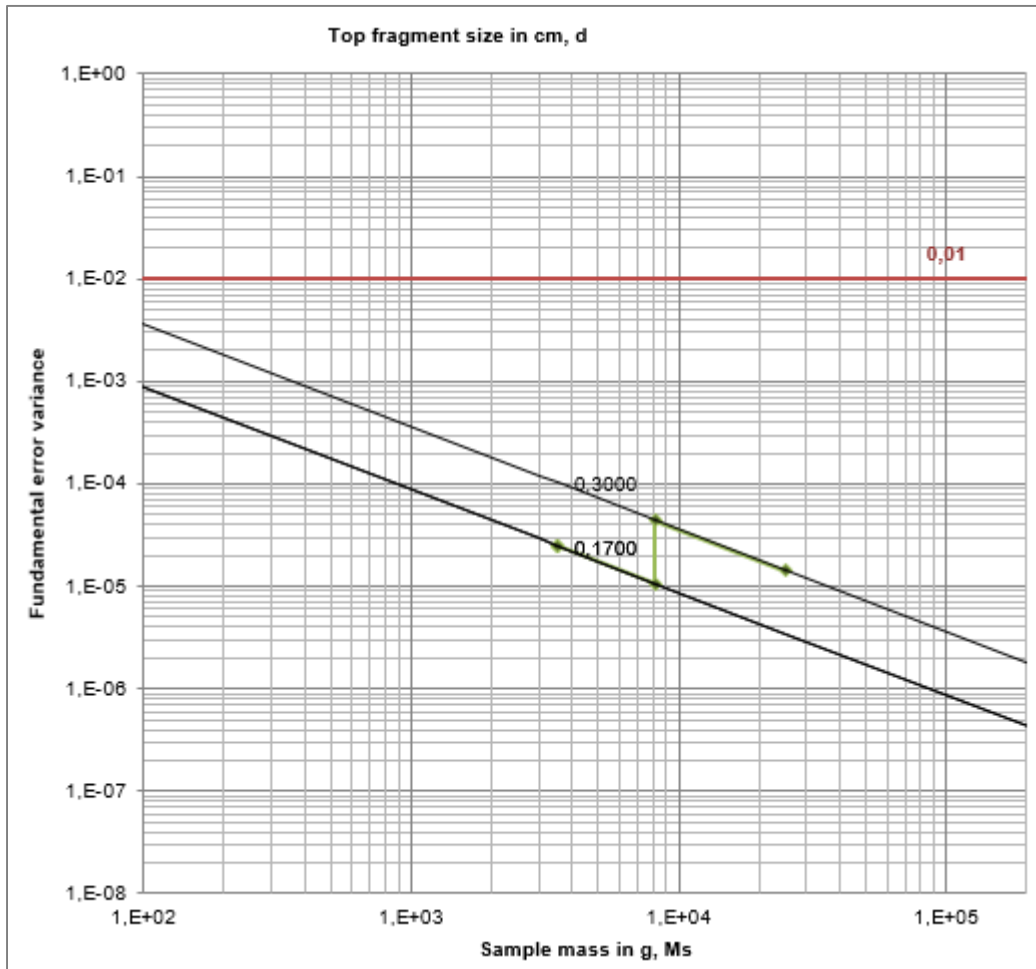
- Protocolo DDH-#5-B



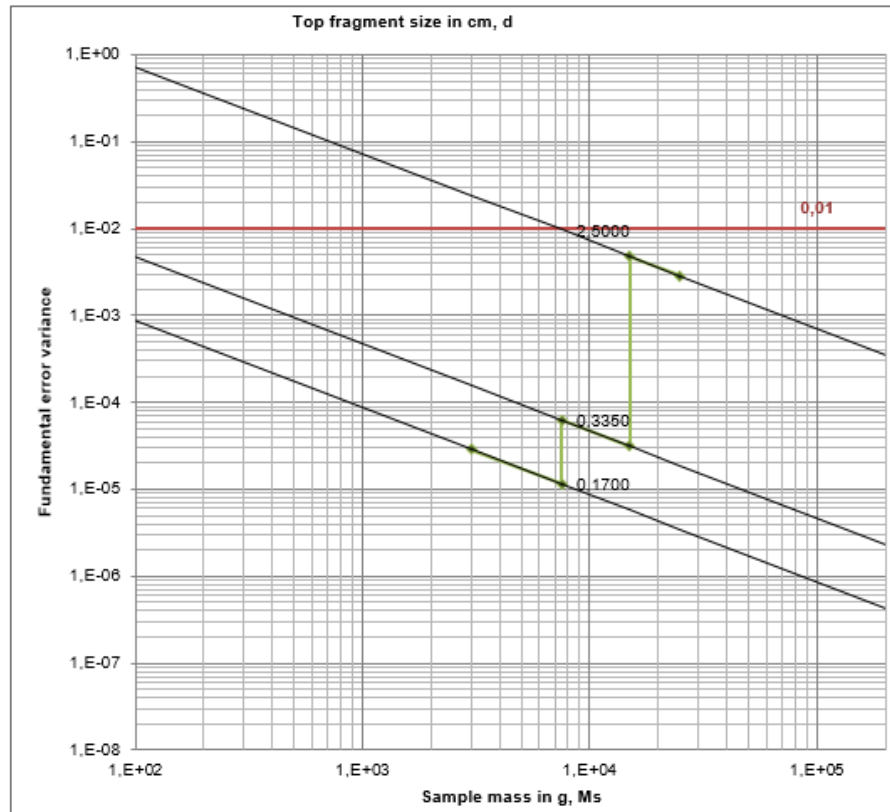
- Protocolo DDH-#6



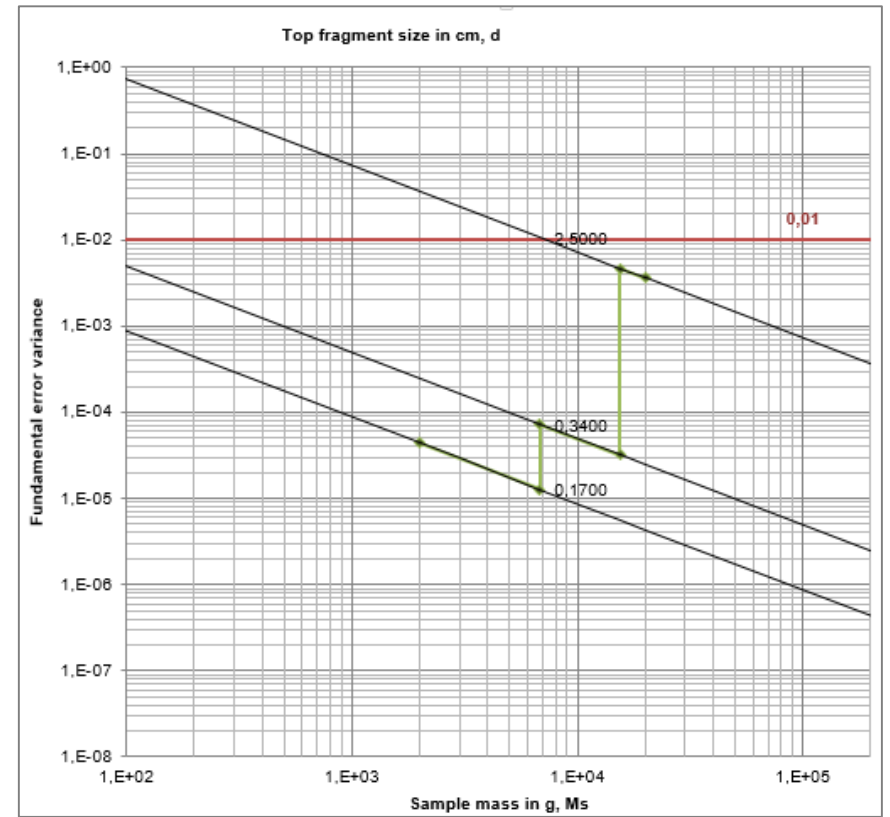
- Protocolo AR-#1



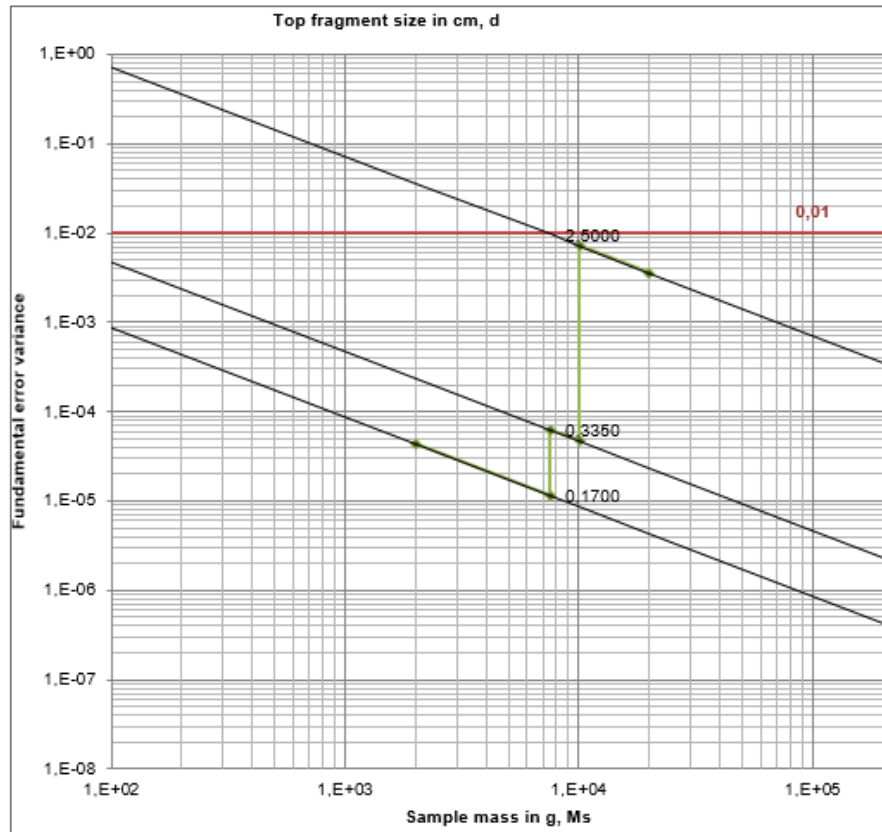
- Protocolo R1''-#1



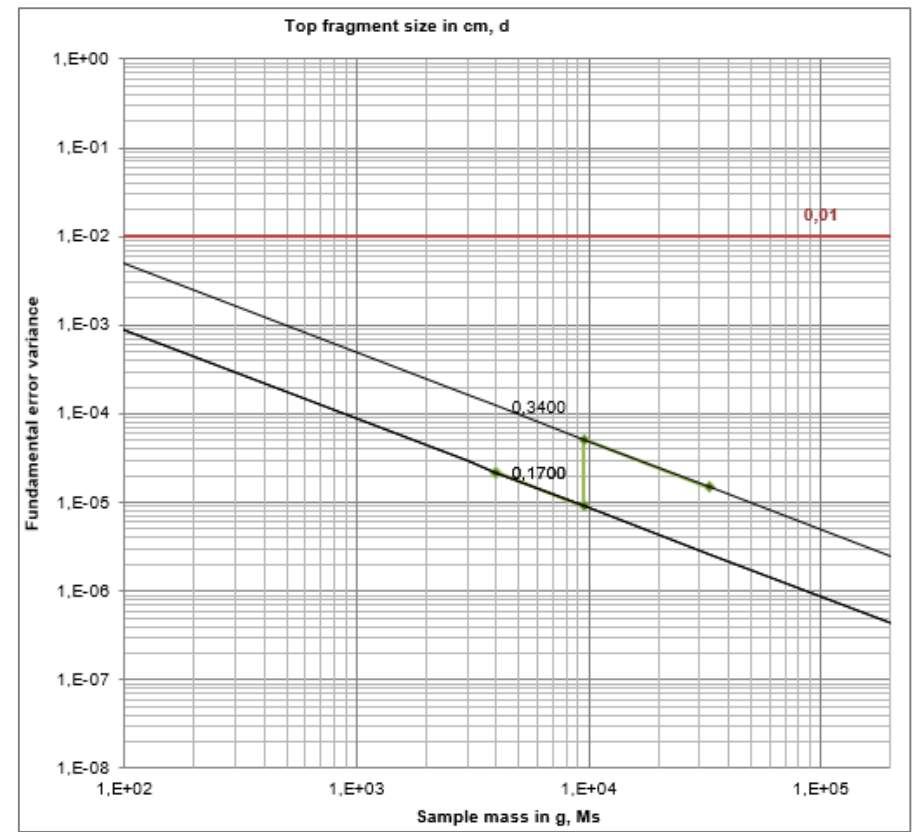
- Protocolo R1''-#2



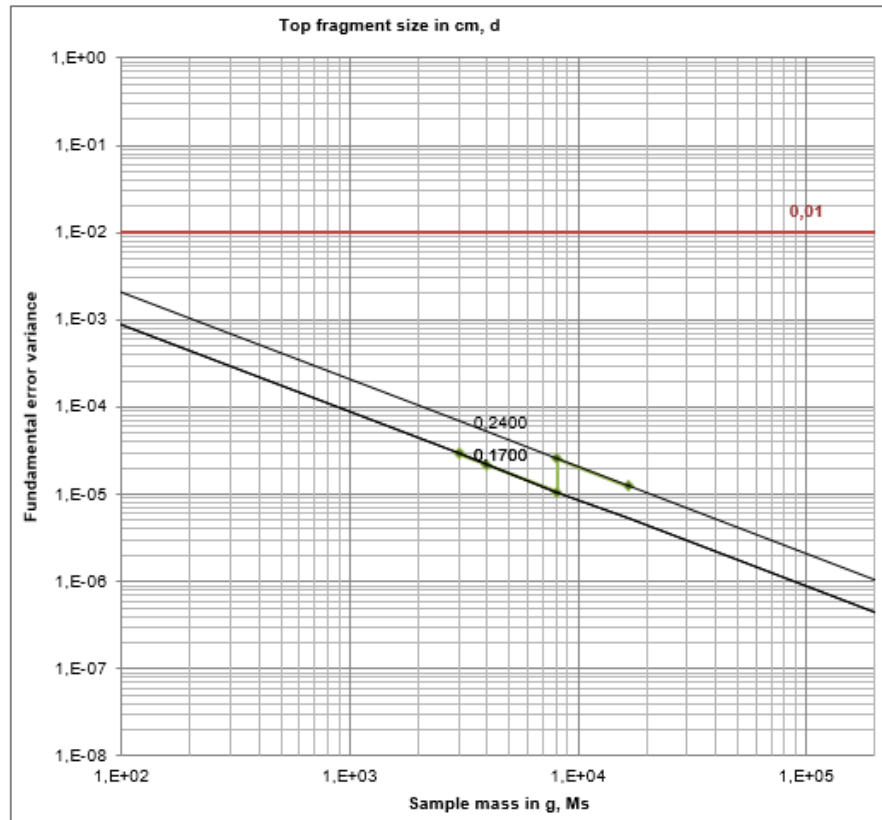
- Protocolo R1"-#3



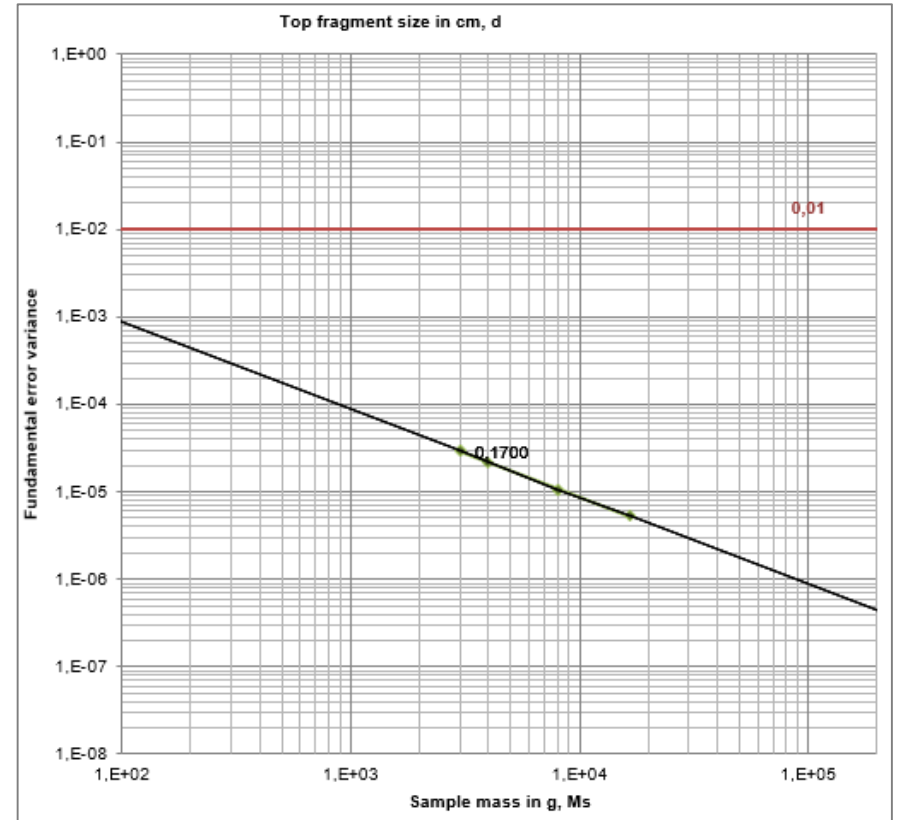
- Protocolo R6#



- Protocolo R8#



- Protocolo R10#



ANEXO B: Metodologías de estimación de parámetros de conminución

Se detallan a continuación las metodologías utilizables para la estimación del consumo específico de energía de distintos circuitos de conminución.

- B.1 Método de S. Morrell (SMC Test)

Utiliza los parámetros entregados por la prueba SMC y Bond Wi de Bolas para la estimación del consumo de energía, en diferentes circuitos que incluyen chancado y molienda.

- Parámetros de entrada:
 - SMC : Mia, Mic, Mih (kWh/t)
 - Bond Wi Bolas : F80, P80, Gbp, BWi (kWh/t)
 - Parámetros de Diseño : Tamaño de alimentación (F80) y producto (P80) para todos los equipos del circuito.
- Método de estimación: Relación desarrollada por S. Morrell (ecuación general de reducción de tamaño), que incluye una función de corrección por tamaño.

$$W_i = M_i 4(x_2^{f(x_2)} - x_1^{f(x_1)})$$

Donde

Wi= Consumo específico de energía, en kWh/t.

Mi= Índice de trabajo relativo a las propiedades de rotura del mineral, en kWh/t.

Mia= molienda gruesa (sobre 750 micrones)

Mib= molienda fina (bajo 750 micrones)

Mic= chancado convencional

Mih= chancado HPGR

X2: 80% pasante del producto, en micrones

X1: 80% pasante de la alimentación, en micrones

$$f(x_j) = -(0,295 + x_j/10^6)$$

- Resultados:
 - Consumo de molinos AG, SAG, Barras y Bolas (kWh/t), según circuito.
 - Consumo de chancadores (de cono, mandíbulas y giratorios) (kWh/t), según circuito.
 - Consumo de HPGR (kWh/t), según circuito.

- B.2 Método de SGS CEET2

Utiliza los parámetros entregados por las pruebas SPI y Bond Wi de Bolas para la estimación del consumo de energía en circuitos SAG-Bolas, mediante la

utilización del software de simulación CEET2 (*Comminution Economic Evaluation Tool*). Este software está basado en la población del modelo de bloques con características del mineral tales como mineralogía, leyes, comportamiento en la molienda, etc.

- Parámetros de entrada:
 - Características geológicas, químicas, físicas y mineralógicas de la muestra.
 - SPI: Ci, SPI (min)
 - Bond Wi Bolas: F80, P80, Gbr, BWi (kWh/t)
- Metodología de estimación: Generación de un modelo de bloques con información geometalúrgica, a través de modelos desarrollados para molinos SAG y Bolas.
 - El consumo del molino SAG (para la reducción del mineral a 10#Ty) es estimado a partir del índice SPI a través de una relación lineal entre ambos, entregado por una calibración de datos de molinos industriales en el mundo.
- Resultados:
 - Rendimiento del mineral, en t/h.
 - Potencia requerida por el circuito, así como también el dimensionamiento de los molinos SAG y de bolas.
 - Estimación de la distribución de tamaños de alimentación, y del producto de molienda (P80) del circuito.

- B.3 Método de Aminpro

Método semi-empírico, que considera fórmulas que asocian el índice SPI y BWi al consumo de molienda SAG y del molino de Bolas, respectivamente, sin la necesidad de utilizar un simulador.

- Parámetros de entrada:
 - Tamaño de alimentación (F80), descarga molino SAG (K80), y producto de molienda deseado (P80).
 - SPI: Ci, SPI (min)
 - Bond Wi Bolas: F80, P80, Gbp, BWi (kWh/t)
 - Porcentaje de pebbles estimado (%) y Css chancador de pebbles (mm).
- Metodología de estimación: Método semi-empírico.
 - Estimación de consumo específico de energía SAG por ecuación empírica, cuya variable de entrada es el SPI, en minutos.
 - Estimación del consumo específico de energía para el molino de bolas mediante el método de Bond, considerando factores de corrección propios de Bond, y por tipo de circuito.

- Resultados:
 - Consumo específico de energía del circuito, en kWh/t.

- B.4 Método de JK MRC

Método desarrollado por Andersen/Awachie/Whiten, que nace de la necesidad de modelar el rompimiento y el consumo de energía en chancadores.

Este modelo ha sido ampliamente probado para chancadores de cono. Utiliza los parámetros entregados por la prueba JK DWT, y son ingresados al simulador JKSimMet.

- Parámetros de entrada:
 - Tamaño de alimentación (F80), descarga molino SAG (K80), y producto de molienda deseado (P80).
 - JK DWT: t_{10} , Ecs (relación tamaño-energía)
 - JK Abrasión: t_a
 - Bond Wi Bolas: F80, P80, Gbp, BWi (kWh/t)
- Metodología de estimación:
 - Estimación de consumo específico de energía para chancadores y HPGR, utilizando distintos factores correctivos para el modelo de Andersen/Awachie/Whiten.
 - Estimación del consumo específico de energía para el molino de bolas mediante el método de Bond
 - Estimación del consumo específico de energía para el molino SAG mediante los métodos de Leung y Morrell.
- Resultados:
 - Consumo específico de energía del circuito, en kWh/t.
 - Estimación de la distribución de tamaños de alimentación, y del producto de molienda (P80) del circuito.

- B.5 Método de D. Barratt (Millpower 2000)

Utiliza los parámetros entregados por las pruebas de Bond (LEIT, Bolas, Barras) para la estimación del consumo de energía en circuitos SAG-Bolas.

- Parámetros de entrada:
 - Tamaño de alimentación (F80), descarga molino SAG (si aplica) (K80), y producto de molienda deseado (P80).
 - Bond LEIT: CWi (kWh/t)
 - Bond Wi Bolas: BWi (kWh/t)
 - Bond Wi Barras: RWi (kWh/t), F80, P80.

- Metodología de estimación: A partir de la fórmula de Bond para el consumo específico de energía. También se pueden realizar simulaciones en la plataforma *Millpower 2000*.
 - Se incluyen correcciones para el consumo específico de energía del molino de Bolas.
 - También utiliza un factor de corrección por tipo de circuito de molienda.
- Resultados:
 - Potencia requerida por el circuito SAG-Bolas escogido.

- B.6 Método de J. Starkey (SAGDesign)

Utiliza los parámetros entregados por las pruebas SAGDesign y Bond de Bolas para la estimación del consumo de energía en circuitos SAG-Bolas.

- Parámetros de entrada:
 - Tamaño de alimentación (F80), descarga molino SAG (si aplica) (K80), y producto de molienda deseado (P80).
 - SAGDesign: Revs (rev), gramos de mineral testeado.
 - Bond Wi Bolas: BWi (kWh/t)
 - Tonelaje a tratar (t/h)
- Metodología de estimación: A partir de la fórmula empírica para la determinación de la energía que debe ser aplicada al piñón del molino SAG.
- Resultados:
 - Potencia requerida por el circuito SAG-Bolas escogido.

- B.7 Método de Bond (Molienda de Bolas)

Utiliza los parámetros entregados por la prueba de Bond para Molino de Bolas para la estimación del consumo de energía en circuitos que incorporen este tipo de molinos..

- Parámetros de entrada:
 - Tamaño de alimentación (F80) y producto de molienda deseado (P80).
 - Bond Wi Bolas: BWi (kWh/t), Gbp (g/rev), P1 (um)
- Metodología de estimación: A partir de la ecuación formulada por F. Bond para la estimación de consumo específico para molinos de Bolas, considerando factores de corrección.
- Resultados:
 - Potencia requerida por el circuito SAG-Bolas escogido.

ANEXO C: Información Metalúrgica Ejemplo de Estudio 1

Se presenta el detalle de la información metalúrgica utilizada para el análisis del caso de estudio N°1.

- C.1 Caracterización Química

	Cu (%)	Mo (ppm)	Au (ppm)	Ag (g/t)
No. Muestras	38	38	38	38
Media	0,36	95	0,04	2,0
Mínimo	0,17	36	0,00	0,0
25%	0,22	45	0,00	2,0
50%	0,26	73	0,04	2,0
75%	0,49	138	0,06	3,0
Máximo	0,92	275	0,21	7,0
Var	0,036	3746	0,003	1,6
Desv. Std.	0,190	61	0,052	1,3

- C.2 Caracterización Física

	Humedad (%)	Gravedad Específica
No. Muestras	38	38
Media	0,15	2,80
Mínimo	0,01	2,73
25%	0,07	2,78
50%	0,13	2,80
75%	0,17	2,83
Máximo	0,54	2,86
Var	0,014	0,001
Desv. Std.	0,117	0,036

- C.3 Caracterización Mineralógica

	Cpy (%)	Cs (%)	Bo (%)	Py (%)	Mo (%)	Mgn (%)	Ganga (%)
No. Muestras	37	37	37	37	37	37	37
Media	1,04	0,00	0,00	4,93	0,03	0,13	93,6
Mínimo	0,49	0,00	0,00	1,62	0,00	0,00	86,7
25%	0,62	0,00	0,00	3,65	0,01	0,03	92,8
50%	0,74	0,00	0,00	4,43	0,02	0,08	93,9
75%	1,42	0,00	0,00	5,89	0,04	0,15	95,2
Máximo	2,54	0,07	0,05	10,76	0,07	0,62	97,3
Var	0,293	0,000	0,000	4,181	0,000	0,026	5,4
Desv. Std.	0,541	0,011	0,009	2,045	0,017	0,161	2,3

- C.4 Liberación y Asociación

	Liberación Cu			Asociación a Ganga			Liberación Mo	
	% Libre	% Asoc. a Ganga	% Asoc. a Py	% Lateral	% Ocluido	% Diseminado	% Libre	% Asoc. a Ganga
No. Muestras	37	37	37	37	37	37	37	37
Media	77,3	22,1	0,6	76,3	18,3	5,5	88,6	22,1
Mínimo	62,2	8,2	0,0	57,1	4,1	0,0	0,0	0,0
25%	72,8	17,0	0,0	68,9	9,4	2,4	100,0	0,0
50%	76,7	22,4	0,0	75,0	17,2	5,9	100,0	0,0
75%	83,0	26,0	0,6	86,4	26,7	8,3	100,0	45,0
Máximo	91,2	36,9	4,9	93,7	35,7	12,5	100,0	100,0
Var	50,2	49,5	1,1	141,0	97,2	10,5	579,1	1075,1
Desv. Std.	7,1	7,0	1,0	11,9	9,9	3,2	24,1	32,8

- C.5 Parámetros de Conminución

	Bond Wi Bolas		SPI		SMC				
	Gbp (g/rev)	BWi (kWh/tc)	Ci	SPI (min)	DWi (kWh/m ³)	Axb	Mia (kWh/t)	Mic (kWh/t)	Mih (kWh/t)
No. Muestras	38	38	32	34	38	38	38	38	38
Media	1,60	14,8	6,8	177,0	10,9	27,2	28,1	11,9	23,0
Mínimo	1,09	11,4	0,5	56,9	4,2	19,0	13,0	4,5	8,8
25%	1,36	13,5	2,9	134,1	8,5	21,0	23,4	9,4	18,2
50%	1,55	14,4	6,4	176,2	11,8	23,3	30,3	12,9	25,0
75%	1,81	16,5	9,9	227,4	13,2	32,0	32,2	14,1	27,3
Máximo	2,26	19,4	13,5	260,5	14,5	65,8	35,5	15,8	30,6
Var	0,10	4,2	16,3	2726,4	7,4	80,8	29,4	8,0	29,9
Desv. Std.	0,31	2,1	4,0	52,2	2,7	9,0	5,4	2,8	5,5

- C.6 Caracterización para Concentración

	180 µm (min)	212 µm (min)	250 µm (min)
No. Muestras	30	30	30
Media	15,8	14,2	12,5
Mínimo	9,6	8,1	6,6
25%	13,0	11,5	10,0
50%	15,1	13,6	12,2
75%	18,8	17,1	15,4
Máximo	24,1	22,0	19,8
Var	14,0	12,8	11,8
Desv. Std.	3,7	3,6	3,4

ANEXO D: Información Metalúrgica Ejemplo de Estudio 2

Se presenta el detalle de la información metalúrgica utilizada para el análisis del caso de estudio N°1.

- D.1 Caracterización Química

	Cu (%)	Mo (ppm)	Au (ppm)	Ag (g/t)
No. Muestras	27	27	27	27
Media	0,37	95	0,04	2,2
Mínimo	0,17	36	0,00	0,0
25%	0,22	52	0,00	2,0
50%	0,28	73	0,04	2,0
75%	0,47	125	0,06	3,0
Máximo	0,92	275	0,21	4,0
Var	0,037	3518	0,002	0,9
Desv. Std.	0,193	59	0,048	0,9

- D.2 Caracterización Física

	Humedad (%)	Gravedad Específica
No. Muestras	27	27
Media	0,16	2,80
Mínimo	0,01	2,73
25%	0,07	2,77
50%	0,13	2,80
75%	0,20	2,82
Máximo	0,54	2,86
Var	0,016	0,001
Desv. Std.	0,126	0,037

- D.3 Caracterización Mineralógica

	Cpy (%)	Cs (%)	Bo (%)	Py (%)	Mo (%)	Mgn (%)	Ganga (%)
No. Muestras	26	26	26	26	26	26	26
Media	1,06	0,00	0,00	4,54	0,03	0,14	94,0
Mínimo	0,49	0,00	0,00	1,62	0,01	0,00	89,8
25%	0,62	0,00	0,00	3,64	0,01	0,03	93,1
50%	0,87	0,00	0,00	4,13	0,02	0,09	94,1
75%	1,37	0,00	0,00	5,45	0,04	0,15	95,5
Máximo	2,54	0,07	0,05	8,34	0,07	0,62	97,3
Var	0,301	0,000	0,000	3,246	0,000	0,028	4,4
Desv. Std.	0,549	0,013	0,010	1,802	0,018	0,167	2,1

- D.4 Liberación y Asociación

	Liberación Cu			Asociación a Ganga			Liberación Mo	
	% Libre	% Asoc. a Ganga	% Asoc. a Py	% Lateral	% Ocluido	% Diseminado	% Libre	% Asoc. a Ganga
No. Muestras	26	26	26	26	26	26	26	26
Media	77,7	21,7	0,6	75,5	18,7	5,7	87,3	24,5
Mínimo	62,2	8,2	0,0	57,1	4,1	0,0	0,0	0,0
25%	73,2	17,0	0,0	63,5	9,5	2,9	100,0	0,0
50%	78,0	21,3	0,0	74,5	16,9	5,8	100,0	0,0
75%	82,9	25,4	0,6	86,2	28,5	8,5	100,0	50,0
Máximo	91,2	36,9	4,9	93,7	35,7	12,5	100,0	100,0
Var	60,9	59,1	1,4	156,7	111,8	10,7	659,1	1225,1
Desv. Std.	7,8	7,7	1,2	12,5	10,6	3,3	25,7	35,0

- D.5 Parámetros de Conminución

	BWi (kWh/tc)
No. Muestras	27
Media	15,2
Mínimo	12,7
25%	14,0
50%	14,9
75%	15,9
Máximo	20,8
Var	3,7
Desv. Std.	1,9

- D.6 Caracterización para Concentración

	180 μm (min)	212 μm (min)	250 μm (min)
No. Muestras	23	23	23
Media	9,1	7,9	6,6
Mínimo	6,0	4,3	2,6
25%	7,8	6,6	5,2
50%	8,3	7,3	6,1
75%	10,0	8,9	7,7
Máximo	15,0	13,5	12,1
Var	5,8	5,7	5,8
Desv. Std.	2,4	2,4	2,4