UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA

Repositorio Digital USM **https://repositorio.usm.cl**

Tesis USM TESIS de Pregrado de acceso ABIERTO

2018

ENSAYOS DE CONMINUCIÓN PARA EVALUAR EL EFECTO DE LA APLICACIÓN DE MICROONDAS A MUESTRAS MINERALES

OLMOS GONZÁLEZ, BÁRBARA BELÉN

http://hdl.handle.net/11673/42225

Repositorio Digital USM, UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA

|UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARIA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y DE MATERIALES
VALPARAÍSO - CHILE

ENSAYOS DE CONMINUCIÓN PARA EVALUAR EL EFECTO DE LA APLICACIÓN DE MICROONDAS A MUESTRAS MINERALES

BÁRBARA BELÉN OLMOS GONZÁLEZ

MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL METALÚRGICO

PROFESOR GUÍA:

WALDO VALDERRAMA REYES

Agosto 2018

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARIA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y DE MATERIALES
VALPARAÍSO - CHILE

ENSAYOS DE CONMINUCIÓN PARA EVALUAR EL EFECTO DE LA APLICACIÓN DE MICROONDAS A MUESTRAS MINERALES

BARBARA BELEN OLMOS GONZALEZ

MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL METALÚRGICO

PROFESOR GUÍA:

WALDO VALDERRAMA REYES

Material de referencia, su uso no involucra responsabilidad del autor o de la Institución.

Agosto 2018

AGRADECIMIENTOS

He tenido varios logros en mi vida. Primero salir de mi Catemu a estudiar a otra cuidad y quedar, por méritos propios, en el mejor colegio de la zona. Luego entrar a la universidad y siendo esta una de las más prestigiosas de Chile, que, aunque costo terminar, finalmente se logró. Sin embargo, nada de esto habría sido posible sin el apoyo de mi familia. Un padre sostenedor, una madre alimentadora y una hermana que siempre me saca una sonrisa. Todos pendientes de mis necesidades y con una palabra de aliento (aunque a su estilo) cuando más la necesitaba. Solo me queda agradecerles por el esfuerzo y la paciencia. Por acompañarme en cada paso y por estar siempre que los necesito. Los amo.

Este camino por la universidad estuve acompañada por el hombre mas paciente y cariñoso que conozco, mi amado Victor Iriarte. Agradecerte por las horas de estudio en las que me acompañaste y me enseñaste, por las largas conversaciones en los rincones de la universidad y por sentarte a mi lado a mirar el mar.

Tener la posibilidad de tener amistades es un don que no va muy apegado a mi personalidad, pero logre tener a unas amigas incomparables. Gracias Jenni, Cota, Cony, Cami, Millan, Soleila, Fran, Yarielba y Nancy por permitirme entrar en sus vidas y hacer de estos años en la universidad momentos inolvidables, llenos de risas y fiestas.

Mi parner Camilo, gracias por las largas noches de estudio y bohemia Valpina, fuiste el mejor compañero de ramos que pude tener a pesar de nuestras miles de peleas.

Felipe y Elías, mis complementos. Gracias infinitas por hacerme parte de sus vidas y lograr tantos proyectos juntos.

Me queda agradecer al Profesor Waldo Valderrama, que desde que me conoció (por allá en el 2008) me ha dado aliento para seguir adelante, me enseñó a innovar, a crear y formular proyectos, y que ahora, siendo socios, lograremos vender nuestro equipo y seguir innovando porque Chile lo necesita.

Agradecer a la vida, a Dios y la Virgen del Carmen, que me ha permitido lograr todo lo que me he propuesto.

Dedicada a:

- Elena Figueroa y Rosamel González.
- Diamantina Caro y Humberto Olmos.

RESUMEN

El presente trabajo analiza el desempeño de dos técnicas propuestas para evaluar el efecto de tratamientos con microondas sobre minerales de cobre, con el propósito de reducir el consumo de energía en molienda. Los métodos comúnmente aceptados en la industria no son apropiados ya sea por la cantidad de muestra que demandan, o el tamaño de mineral que requieren. El trabajo de laboratorio que da origen al tema requiere de técnicas para medir y evaluar el resultado de experimentos donde se ensaya muestras de 6 [gr] (masa máxima por prueba), compuestas de partículas cuyos tamaños se encuentran entre 4 y 12 [mm]. Se trata de lograr un ciclo de aprendizaje corto entre formulación de hipótesis, experimentación y análisis, para avanzar a un ritmo adecuado en la investigación y con bajos costos.

La **primera técnica** ensayada es la compresión monopartícula, donde se colecta información sobre fuerza y desplazamiento para colapsar partículas individuales de tamaños similares. La repetición de este ensayo n veces permite obtener una probabilidad de fractura en función de la carga aplicada, la que es usada como caracterización de la conducta del material, y donde sus parámetros característicos (media, mediana, resistencia del 80%, etc.) son usados para evaluar el efecto de los tratamientos.

La **segunda técnica** es una versión en pequeña escala del ensayo Drop Weight Test, propuesto por Schoenert y desarrollado industrialmente en Australia por el centro JK de la Univ. de Queensland. Las partículas de diversos tamaños son trituradas dejando caer bolas de masa conocida desde una altura controlada (es decir, con una energía conocida), y se evalúan los parámetros t_n de la distribución de tamaño de los fragmentos.

Los resultados experimentales muestran que cada una es capaz de producir resultados consistentes, pero a su vez, que los efectos de las microondas son dispares. Las nuevas hipótesis que se derivan del trabajo realizado son que el proceso con microondas no está aún claramente perfilado en sus condiciones, y que su efecto principal y más relevante podría no estar en la energía ahorrada, sino en la liberación de la mena por el tipo de fractura inducida.

ABSTRACT

This thesis studies the performance of two methods about evaluating the effect of microwaves on copper ores, in order to reduce energy consumption on grinding. Widely-accepted methods in the mining industry are not accepted either the amount of sample or size fraction required for the test.

Laboratory work requires of methods for measuring and evaluating experimental results where samples of 6 g (maximum mass per test) are used, composed by particles with size fraction between 4 and 12 mm. the aim is to achieve a short learning cycle between hypothesis, experimental work and analysis, in order to move along a proper work-rhythm for the research and with low costs.

The first tested method is monoparticle compression, where information on force and displacement is collected to collapse single particles of similar sizes. The development of this test n-times can get a probability of fracture as a function of applied load, which is used as a characterization of ore behavior and key-parameters (mean, median, 80%-resistance) are used to evaluate the effect of the treatment.

The second method is a low-scale version of Drop Weight Test, proposed by Schoenert and industrially developed in Australia by JK center of the University of Queensland. Particles of several sizes are crushed by dropping balls of known mass form a controlled height (i.e., with known energy) and the parameters “tn” of size distribution of the fragments are evaluated.

The experimental results show each method is able to produce consistent results, but the effect of microwaves is disparate. New hypothesis from this work state the process with microwaves is not clearly outlined in its conditions, and the main and relevant effect might not be in the saved energy but in ore liberation by the kind of induced fracture.

INDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS 2

RESUMEN 4

ABSTRACT 5

INDICE GENERAL 6

INDICE DE FIGURAS 9

INDICE DE TABLAS 12

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN 13

1.1 Antecedentes reducción de tamaño. 14

1.2 Requerimientos energéticos. 16

1.3 Integrando la innovación a procesos de reducción de tamaño. 17

1.4 Planteamiento del problema. 18

CAPÍTULO 2. REVISION CRITICA DE LA LITERATURA. 24

2.1 Fenómenos de ruptura de minerales. 24

2.2 Ensayo de comportamiento de fractura en conminución. 25

2.3 Ensayos de fractura de partículas individuales. 27

2.3.1 Bond Low Energy Impact Test – LEIT. 27

2.3.2 Drop Weight Tester – DWT. 29

2.3.3 SAG Mill Comminution – SMC. 33

2.3.4 Rotary Breakage Tester (JKRBT) de Shi (JKMRC) 37

2.4 Ensayos de Moliendabilidad. 41

2.4.1 SAG Power Index – SPI. 41

2.4.2 Índice de Trabajo de Bond para Molinos de Bolas – BWI. 43

2.5 ¿Cumplen las técnicas existentes con los requisitos de los ensayos? 45

2.6 Hipótesis. 48

2.7 Objetivos. 48

2.7.1 Objetivo general.....48
2.7.2 Objetivos específicos.....48
2.8 Contribución al estado del arte.....48
2.9 Alcances.....49
CAPÍTULO 3. DISEÑO DE ENSAYO Y EVALUACIÓN DE DESEMPEÑO. 50
3.1 Diseño de ensayo.....50
3.1.1 Contexto ensayos compresivos.....50
3.1.2 Equipos de evaluación comportamiento de fractura.....52
3.2 Evaluación de desempeño.....54
3.2.1 Variabilidad inherente del mineral.....54
3.2.2 Consideraciones estadísticas.....55
CAPÍTULO 4. MATERIALES Y METODOLOGIA EXPERIMENTAL.....58
4.1 Materiales y Equipamiento.....58
4.1.1 Materiales y equipo para aplicación de microondas.....58
4.1.2 Materiales y equipo para utilizar prensa neumática.....59
4.1.3 Materiales y equipo para uso de DWT para partículas pequeña.....60
4.1.4 Materiales y equipo para tamizar.....62
4.1.5 Minerales para prueba experimental.....63
4.2 Metodología experimental.....64
4.2.1 Metodología experimental para aplicación microondas.....64
4.2.2 Metodología experimental para uso prensa neumática.....67
4.2.3 Metodología experimental para uso SSITest.....69
4.2.4 Metodología experimental para uso Tamizador Gilson.....70
CAPÍTULO 5. DISCUSION Y ANÁLISIS DE RESULTADOS EXPERIMENTAL.....71
5.1 Resultados prensa neumática.....71

5.1.1 Aplicación continua de microondas. 71

5.1.2 Aplicación de pulso de microondas. 76

5.1.3 Consideraciones sobre el desempeño del ensayo. 83

5.2 Resultados SSITest, equipo a escala laboratorio.....85

5.2.1 Aplicación de pulso de microondas. 85

5.2.2 Caracterización mineral con prototipo SSITest.....88

CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES. 102

CAPÍTULO 7. BIBLIOGRAFÍA 105

CAPÍTULO 8. ANEXO.....109

8.1 Anexo A.....109

Anexo A. Minerales gestionados por la Superintendencia de Geología Codelco – división Andina.....109

8.2 Anexo B.....111

Anexo B. Diseños de esquema prototipo equipo fractura monopartícula. 111

8.3 Anexo C 120

Anexo C. Diseños de esquema prototipo equipo fractura multipartícula.....120

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Operaciones unitarias de reduccion de tamaño. 15
Figura 1.2 Relación Energía - Tamaño de particulas de acuerdo a la ecuacion. 16
Figura 1.3 Consumo de energía eléctrica por procesos. 18
Figura 1.4 Esquema del mecanismo de acción de las microondas. 19
Figura 1.5 Equipo microondas modificado. 20
Figura 1.6 Guia de ondas de microndas modificado. 20
Figura 1.7 Zona aplicación microondas. 21
Figura 1.8 Dispersión del F80 en estudio de analisis granulométrico de acuerdo al tamaño de muestra. 22
Figura 2.1 Mecanismos de reducción de tamaño. 25
Figura 2.2 Equipo de Impacto de Bond. 28
Figura 2.3 Esquema de un Drop Weight Test. 31
Figura 2.4 Relación entre el producto fino y la energía específica de fractura, para tamaño de particula individual. 32
Figura 2.5 Ejemplo de resultados comparativos, reflejando diferentes valores de A y b. 33
Figura 2.6 Repetitividad del test SMC. 34
Figura 2.7 Estructura de equipo Drop-weight tester. 35
Figura 2.8 Partículas seleccionadas para el método SMC. 36
Figura 2.9 Típicos resultados del test SMC. 36
Figura 2.10 Prototipo y la primera version instalada de JKRBT. 38
Figura 2.11 Esquema de los componentes de la velocidad del rotor al ingresar y al salir del canal de conduccion del rotor. 39
Figura 2.12 Equipo para Prueba de Índice de Energía SAG – SPI. 41
Figura 2.13 Equipo Índice de Trabajo de Bond. 44
Figura 2.14 Ensayos utilizados por la industria v/s ensayo en el rango de operación de microondas. 46
Figura 2.15 Relación entre costo y tipo de ensayos de comportamiento de fractura. 47
Figura 3.1 Esquemas de diseño de ensayos de compresión. 50
Figura 3.2 Ejemplo de precisión y exactitud. 56

Figura 3.3 Resultado de cuatro series de disparos al blanco y sus correspondientes funciones de densidad de probabilidad. ..... **¡Error! Marcador no definido.**
Figura 4.1 Microondas modificado con guía de ondas incorporada en su interior.....58
Figura 4.2 Prensa Neumática.....60
Figura 4.3 Prototipo DWT para ensayos de rocas de pequeño tamaño. 61
Figura 4.4 SSITest. 62
Figura 4.5 Tamizador Gilson SS3. 63
Figura 4.6 Microondas modificado, Control de pulsos de microondas e Instrumento de medición y registro de pulsos de microondas.....66
Figura 4.7 Control de Tiempos Pulso Cíclicos.....67
Figura 4.8 Prensa neumática instrumentada.....68
Figura 4.9 Implementos prensa neumática. 69
Figura 5.1 Fuerza de ruptura aplicada vs Probabilida de fractura para rango de tamaño entre 4,75 a 12,5 [mm]. 72
Figura 5.2 Fuerza vs Probabilidad fractura ([4,75 -6,3] mm). 73
Figura 5.3 Fuerza vs Probabilidad fractura ([6,3 - 9,5] mm). 74
Figura 5.4 Fuerza vs Probabilidad fractura ([9,5 - 12,5] mm). 75
Figura 5.5 Probabilidad de Fractura mineral P-238450. 77
Figura 5.6 Perfil granulométrico mineral P-238450. 78
Figura 5.7 Probabilidad de Fractura mineral P-238606. 79
Figura 5.8 Perfil granulométrico mineral P-238606. 80
Figura 5.9 Probabilidad de Fractura mineral P-238379. 81
Figura 5.10 Perfil granulométrico mineral P-238379. 82
Figura 5.11 Probabilidad de Fractura mineral P-238379 – con 500[ms] pulso. 83
Figura 5.12 Perfil granulométrico mineral P-238379 – con 500[ms] pulso. 83
Figura 5.13 t10 modelado (Sin MW) v/s t10 observado. 86
Figura 5.14 Perfil Granulométrico con y sin aplicación MW. 87
Figura 5.15 Concentración valores de réplicas, rango de tamaño [+4.75 ; -6,3]. 89
Figura 5.16 Concentración valores de réplicas, rango de tamaño [+6,3 ; -9,5]. 91
Figura 5.17 Concentración valores de réplica, rango de tamaño [+9,5 ; -12,5]. 93
Figura 5.18 Resultados SSITest.....101

Figura 5.19 Resultados t10 vs tn. 101

INDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Tamaño caracteristico de particulas en alimentacion y producto de acuerdo a etapas de reduccion de tamaño. 15
Tabla 2.1 Cuadro comparativo de técnicas de medición de consumo de energía de molienda.....27
Tabla 2.2 Rango de Dureza según Valor del Índice de Chancado.....29
Tabla 2.3 Condiciones estándar de DWT.....30
Tabla 2.4 Valores típicos de Bond Work Index para distintos materiales.....44
Tabla 3.1 Comparación de opciones de método de evaluación de comportamiento de fractura. 53
Tabla 4.1 Análisis Químico Muestras Codelco Andina.....64
Tabla 5.1 Modelo de análisis con tratamiento de microondas pulsado. 76
Tabla 5.2 Variación Energia Especifica , rango de tamaño partículas [+4,75 ; -6,3]. 88
Tabla 5.3 Variación Energía Específica , rango de tamaño partículas [+6,3 ; -9,5].....90
Tabla 5.4 Variación Energía Específica, rango de tamaño partículas [+9,5 ; -12,5].....92
Tabla 5.5 Evaluación de resultados Prueba SSITest. 95
Tabla 5.6 Resultados ensayo SSITest. 100

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

La minería chilena requiere innovación disruptiva, gatillada principalmente por la baja de leyes y aumento de dureza de los minerales, falta de agua y los altos consumos de energía. Se requiere introducir nuevas tecnologías, específicamente, realizar separación de partículas de forma distinta a los comportamientos de mojado existentes.

La secuencia actual de procesos de reducción de tamaño está orientado a la flotación de minerales, por lo que se requiere estudiar procesos que logren porcentajes relevantes de liberación utilizando bajos niveles de aplicación de energía y/o procesos de separación temprana de acuerdo con algún otro principio físico.

Opciones para lo planteado anteriormente son las cargas vibratorias, las descargas eléctricas a través de roca y las microondas. Las microondas aplicadas a minerales sulfurado será el foco de atención de estudio.

Para estudiar el efecto de tratamientos en pruebas de laboratorio se requiere medir la relación entre la energía aplicada y la distribución de tamaño obtenida, a una escala que permita ciclos de aprendizaje breves.

Las técnicas ya consagradas para evaluar el desempeño de conminución requieren mucho material, y/o demoran mucho tiempo, lo que abre un espacio para nuevos desarrollos adecuados a este problema.

1.1 Antecedentes reducción de tamaño.

Se denomina reducción de tamaño a una serie de operaciones unitarias y procesos mediante los cuales una cantidad de mineral se reduce de tamaño hasta lograr un tamaño específico, lograse a través de la aplicación de energía necesaria para romper las partículas. Dependiendo de la forma de aplicación de la carga y de la mecánica de la fractura de las partículas, se obtendrá un mecanismo de falla característico y una distribución granulométrica propia.

Es primordial tener conocimiento de la forma y el grado de diseminación del mineral explotado, ya que indica el tamaño a ser molino el mineral para que las especies mineralógicas de interés sean liberadas de la ganga que la acompañan, donde el grado de liberación de las especies útiles es el requisito fundamental para aplicar el método físico de concentración.

Los objetivos de la reducción de tamaño son:

- Generar partículas de tamaño y forma adecuada para los procesos posteriores, ya sea transporte, apilamiento o separación física o química.
- Liberar los materiales valiosos de la ganga de modo que ellos puedan ser concentrados
- Aumentar el área superficial disponible para reacción química.

En general, la reducción de tamaño se rige por el diagrama secuencial apreciado en la Figura 1.1

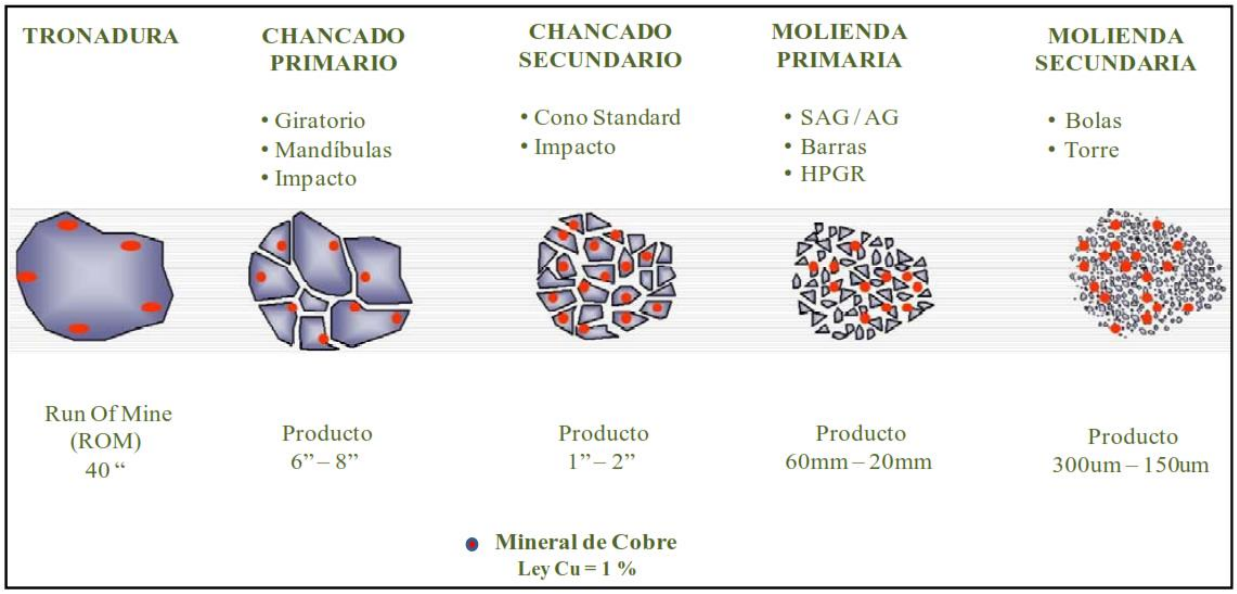


Figura 1.1 Operaciones unitarias de reduccion de tamaño.

El proceso normalmente implica reducir rocas de hasta 1 [m] hasta partículas de 25[µm] o menores, sin embargo, la mayor parte de la energía (aproximadamente el 90%) se utiliza cuando se reduce de 20 [mm] a 100[µm]. Es decir, si nos remitimos a esa granulometría, mostrada en la Tabla 1.1, podemos observar que este rango de partícula de alto consumo energético está asociado a la etapa de molienda.

Tabla 1.1 Tamaño caracteristico de particulas en alimentacion y producto de acuerdo a etapas de reduccion de tamaño.

Etapa de Reducción de Tamaño	Tamaño de Alimentación	Tamaño de Producto
Tronadura	Infinito	1 [m]
Chancado primario	1 [m]	100 [mm]
Chancado secundario	100 [mm]	10 [mm]
Molienda primaria	10 [mm]	1 [mm]
Molienda secundaria	1 [mm]	100 [µm]

1.2 Requerimientos energéticos.

La relación entre la energía necesaria para la fractura y el tamaño de partícula (ver Figura 1.2) ha sido estudiada desde el siglo pasado. La ecuación (1) genérica propuesta por Walker [1] es la siguiente:

$$dE = -C\frac{dX}{X^n} \quad \textbf{(1)}$$

Donde E es la energía específica neta; X es el tamaño de partícula característico; n es un exponente y C es una constante relacionada a las propiedades del material. La ecuación anterior establece que la energía requerida para reducir de tamaño un material es proporcional al cambio de tamaño e inversamente proporcional al tamaño amplificado por n veces.

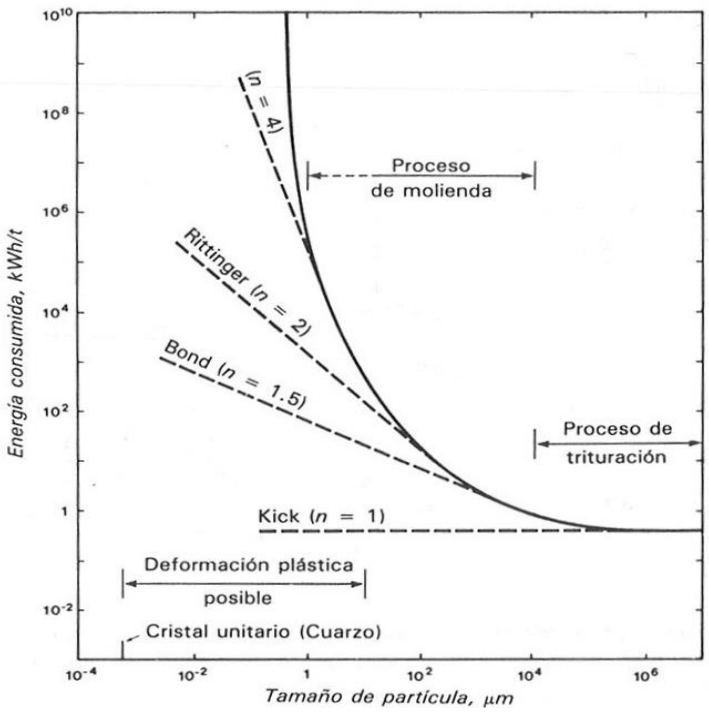


Figura 1.2 Relación Energía - Tamaño de particulas de acuerdo a la ecuacion.

La importancia de las relaciones entre los procesos de conminución y el consumo de energía es que introducen parámetros conceptuales del material sometido a reducción de tamaño, como por ejemplo el índice de trabajo (Wi), el que es ampliamente utilizado en el diseño de procesos y en el cálculo de dimensionamiento de equipos.

1.3 Integrando la innovación a procesos de reducción de tamaño.

En Chile, se ha instalado la idea de innovar en todos los niveles de la vida, como una necesidad de posicionar al país en la ruta del desarrollo. En particular, la minería, requiere materializar nuevas iniciativas, ya que es un mercado altamente competitivo y específicamente el área de reducción de tamaño siendo un proceso bastante ineficiente, energéticamente hablando, requiere incorporar la palabra innovación como una forma de mejorar rendimiento y reducir el consumo energético.

La innovación es un medio y un proceso. Es un medio para expandir la productividad, las posibilidades y las soluciones para alcanzar un desarrollo distinto y mejor al que tenemos hoy. Y es un proceso, pues se requiere de su aplicación continua para que genere resultados. Las empresas y las instituciones requieren desarrollar una cultura de innovación para que esta realmente ocurra. Deben hacer de la innovación parte del negocio de las empresas, que es un proceso iterativo de prueba y error, de testeo permanente [2].

Datos concretos indican que el consumo de energía eléctrica de la etapa concentrada, (Figura 1.3) (incluyendo planta de chancado, molienda tradicional, molienda S.A.G., concentración (Flotación) y filtrado) el año 2015, alcanzó un 52,3% del total nacional [3].

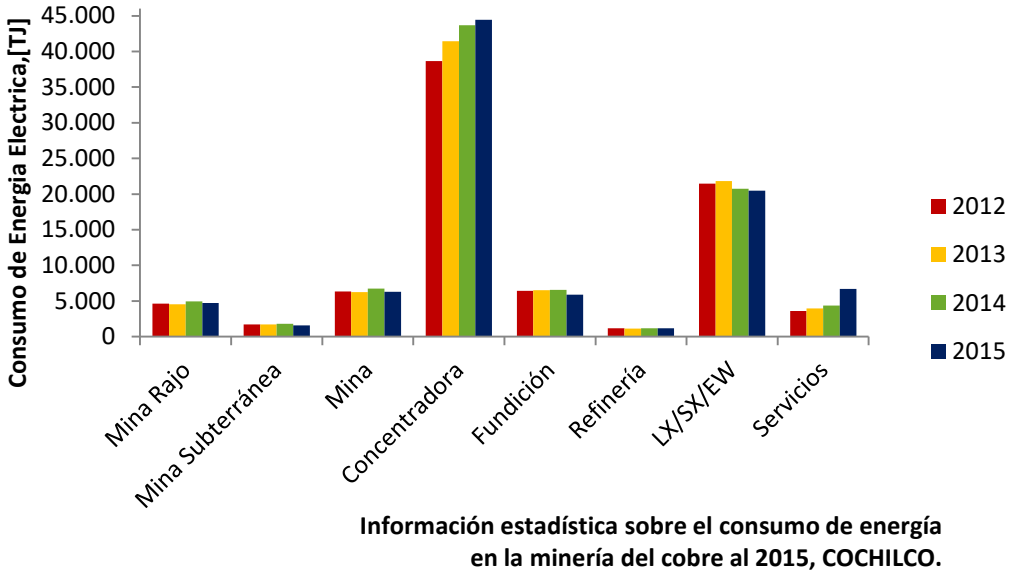


Figura 1.3 Consumo de energía eléctrica por procesos.

En busca de un mecanismo que permita reducir los costos de energía en el área de reducción de tamaño y de esta forma hacerlo un proceso más eficiente, en la UTFSM se estudia la incorporación de un pre-tratamiento con aplicación de microondas a rocas minerales [4] donde el mecanismo de acción consiste en generar o ampliar grietas por efecto de carácter térmico derivado de la interacción con las fases presentes en el mineral, permitiendo debilitarlo y haciendo más eficiente la instancia de moler.

1.4 Planteamiento del problema.

Aplicar microondas a partículas de mineral, trae consigo evaluar experimentalmente el efecto, analizando el comportamiento de fractura de las rocas expuestas. Cada componente mineralógico tiene propiedades específicas de absorción de radiación dependiendo de la opacidad del sulfuro [5]. Los componentes opacos absorben preferencialmente energía, calentándose, dilatándose y generando un campo de esfuerzos sobre su entorno. El agua presente en forma de hidratos también es capaz de absorber cantidades relevantes de energía [6]. Cuando la energía absorbida sobrepasa un cierto umbral, el campo de esfuerzos induce el agrietamiento del mineral en torno a la partícula de mena que se ha calentado [7]. En la Figura 1.4, se presenta un esquema de lo planteado anteriormente como método de acción de las microondas.

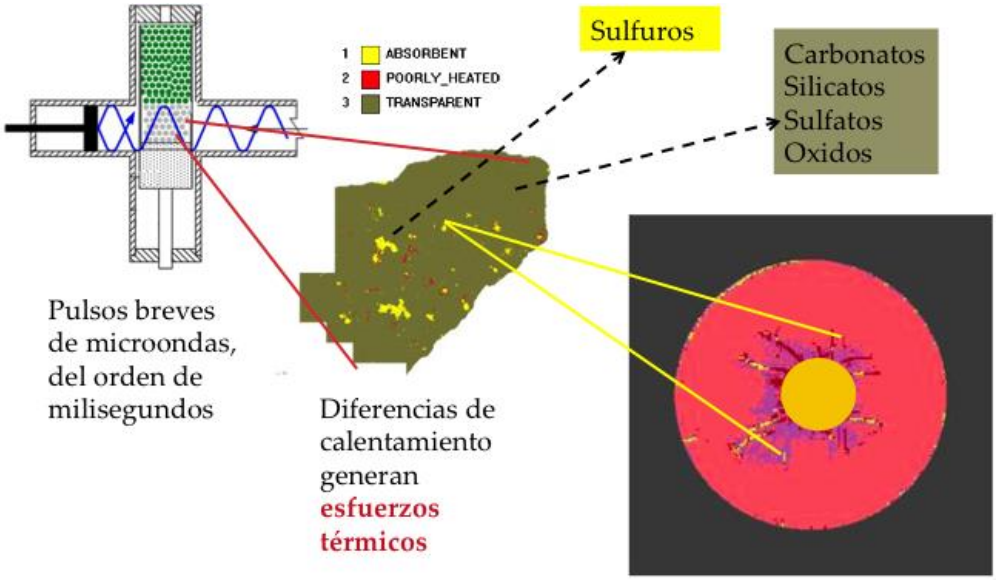


Figura 1.4 Esquema del mecanismo de acción de las microondas.

El aplicador de microondas, es un equipo de uso doméstico modificado (Figura 1.5), que permite generar pulsos de microondas en monomodo (radiación concentrada en un foco) y exponer las partículas mineral por periodos de tiempo definidos. El interior del microondas cuenta para ello con una guía de ondas (Figura 1.6), donde se instala un depósito que lleva el mineral que recibirá el tratamiento.

Figura 1.5 Equipo microondas modificado.

Figura 1.6 Guia de ondas de microndas modificado.

El espacio muestral (Figura 1.7) se definió a traves de simulaciones del aplicador piramidal y de forma experimental, concentrando altos niveles y buena uniformidad de densidad de potencia en el foco de aplicación.

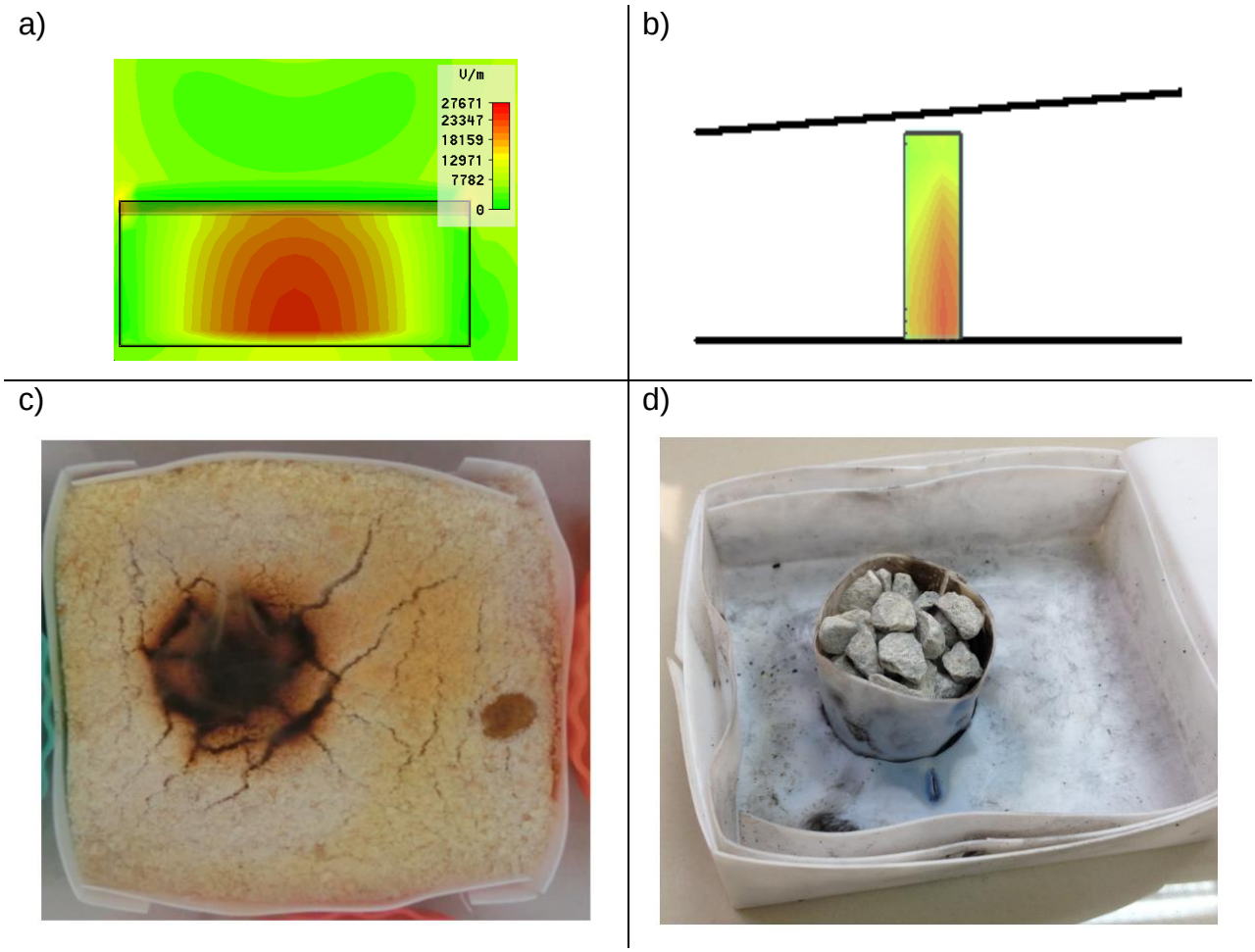


Figura 1.7 Zona aplicación microondas.

Donde a) Simulación de distribución de amplitud de campo eléctrico,

b) Simulación de distribución de densidad de potencia,

c) Observación experimental del foco de aplicación de microondas,

d) Camara de ensayo de aplicación de microondas.

Las dimensiones de la camara de ensayo (Figura 1.7,d)), corresponden a 2 [cm] de diámetro por 1,5 [cm] de alto, equivalente a un volumen muestral de 4,7[cm^3]. Por los tamaños definidos, las partículas individuales no pueden superar los 12,5 [mm] de diametro (- #1/2”), y la masa de muestra en cada ensayo no supera los 6 [gr]. Esta restricción llevó a establecer tres rangos de tamaño a estudiar para analizar el comportamiento de las microondas:

$[-12{,}5\ ;\ +9{,}5]\ [mm]$ $[-9{,}5\ ;\ +6{,}3]\ [mm]$ $[-6{,}3\ ;\ +4{,}75]\ [mm]$

Luego de exponer un set de partículas a microondas, se realiza una fractura compresiva y posteriormente un análisis granulométrico, para lo cual se dispone de un tamizador Gilson SS3. Para definir el volumen mínimo de muestra a analizar en el tamizado, se estudió el efecto del tamaño de muestra sobre la dispersión del parámetro granulométrico F80 (Figura 1.8), usando tamices de 203 [mm] (8 pulgadas) con 90 [gr] de muestra y tamices de 76 [mm] (3 pulgadas) con 10, 20 y 30 [gr] de muestra. Se realizaron cinco ensayos repetidos en cada condición. El estudio mostró que, en todos los casos, el valor medio de F80 se encuentra dentro de la banda de dispersión determinada por la medición en tamiz de 203,2 [mm]. Sin embargo, las muestras de 10 y 20 [gr] presentan una dispersión mayor, lo que llevó a definir 30 [gr] de muestra como masa de trabajo. Esto implica repetir al menos cinco veces el tratamiento con microondas a diferentes muestras para reunir la masa requerida por el tamizado.

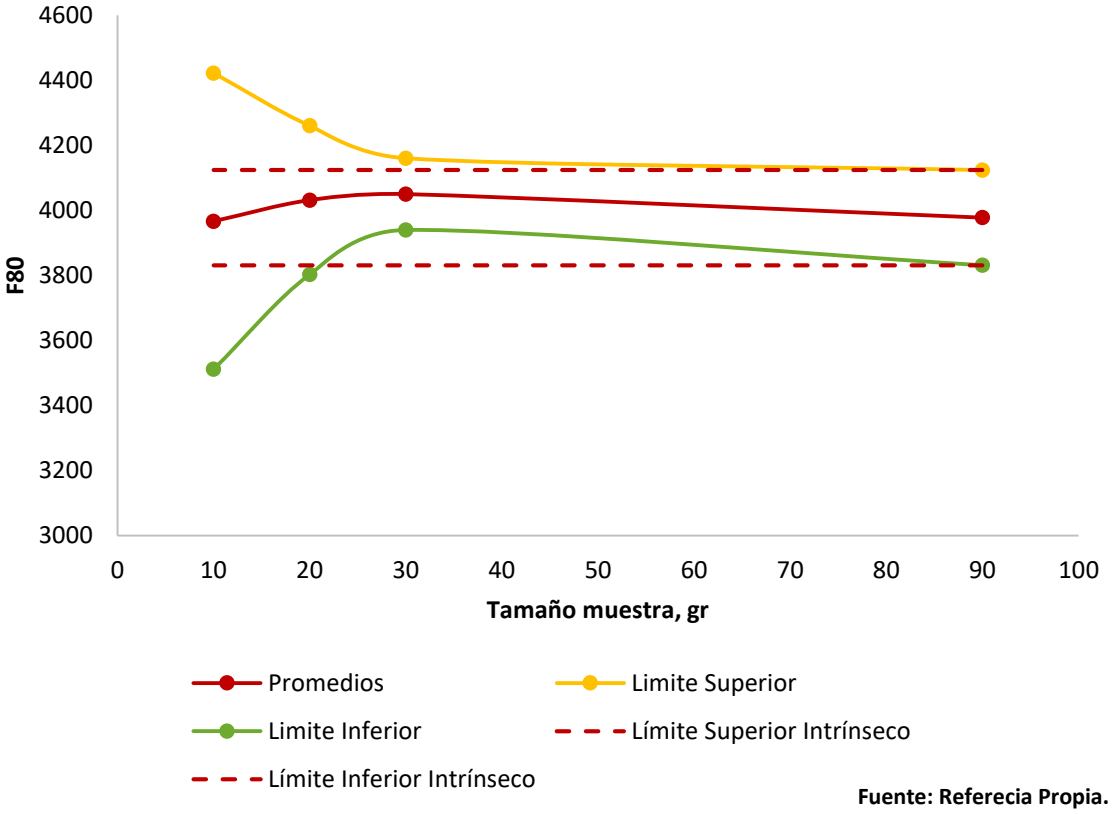


Figura 1.8 Dispersión del F80 en estudio de analisis granulométrico de acuerdo al tamaño de muestra.

En resumen, el tratamiento con microondas incrementa la cantidad de grietas existentes, y con ello, aumenta tanto la probabilidad de fractura como la generación de una granulometría más fina. Sin embargo, para cuantificar este efecto, son necesarias pruebas de laboratorio que midan la relación entre energía aplicada y distribución de tamaño obtenida de las partículas fracturadas. Esto permitirá distinguir el comportamiento del tratamiento en diferentes condiciones, en periodos breves de tiempo y teniendo en consideración el tamaño de las muestras y la capacidad de tamizaje.

El siguiente tema es entonces revisar las técnicas existentes para escoger entre ellas la o las que mejor se adapten a las necesidades de la investigación.

CAPÍTULO 2. REVISION CRITICA DE LA LITERATURA.

Con el fin de identificar y/o desarrollar una(s) metodología(s) que permita(n) cuantificar el nivel de debilitamiento del pretratamiento con microondas, se procede a investigar los mecanismos de ruptura asociados a la reducción de tamaño y los ensayos existentes actualmente que podrían cumplir con los requisitos experimentales.

2.1 Fenómenos de ruptura de minerales.

Los procesos de reducción de tamaño de minerales comprenden una variedad de mecanismos de subdivisión de partículas con una generación de tamaños menores. La Figura 2.1 presenta en forma esquemática la nomenclatura asociada a cada mecanismo. Si bien prácticamente todos estos mecanismos actúan en el procesamiento de minerales, los más relevantes son la fractura y la fatiga. Esta última se refiere al aumento del agrietamiento interno de una partícula, previo a presentar fractura. Los mecanismos superficiales también juegan un rol relevante cuando los esfuerzos aplicados no alcanzan a provocar fractura, pero en términos de eficiencia energética son más bien indeseables.

La *fractura* es la resultante de la aplicación de esfuerzos compresivos, que inducen la propagación de grietas existentes en las partículas, que a su vez generan nuevas grietas. Alcanzado un valor crítico de dicho esfuerzo para cada partícula, se inicia un proceso de fragmentación que da lugar a la generación múltiple de nuevas partículas menores.

La *fatiga* es un proceso de propagación de grietas bajo esfuerzos compresivos de magnitud por debajo del que produce el colapso inmediato, pero que por acción repetida conducen finalmente a la fractura.

La *atrición* es un término ambiguo, que entenderemos en este contexto como la remoción de pequeños trozos desde zonas prominentes de la superficie de una partícula. Principalmente se debe a la interacción de la partícula con otras de similar tamaño y dureza.

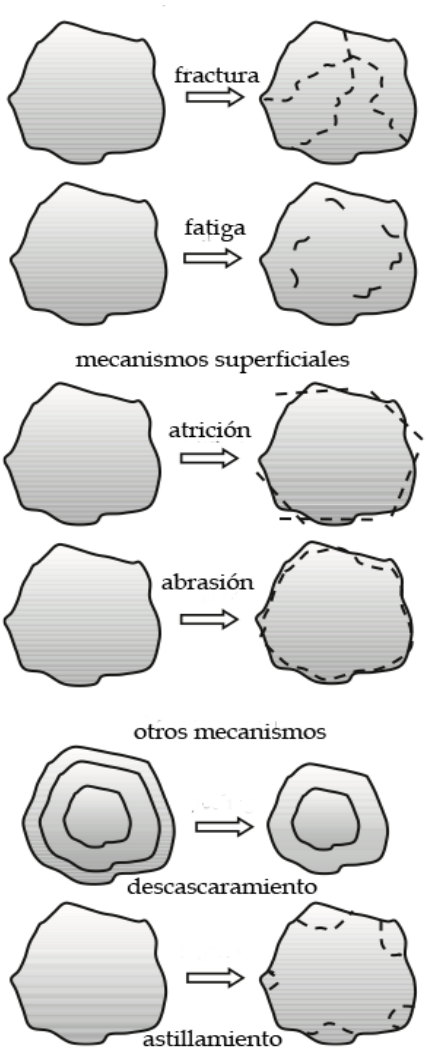


Figura 2.1 Mecanismos de reducción de tamaño.

La *abrasión* es un proceso similar a la atrición, donde se produce una remoción no selectiva de material superficial de la partícula, por la acción de otras partículas de igual o mayor dureza y mucho menor tamaño.

Otros mecanismos mencionados en la Figura 2.1 son menos relevantes en el contexto minero.

2.2 Ensayo de comportamiento de fractura en conminución.

El comportamiento de fractura en conminución es tradicionalmente la relación entre la energía consumida y la distribución de tamaño de los fragmentos. En este ámbito, es posible detectar una gran diversidad de mecanismos de medición [8] que permiten caracterizar un mineral. Los actualmente utilizados pueden clasificarse en tres grupos:

1. *Ensayos de moliendabilidad (SIC),* tales como los de Bond para molinos de bolas y Barras, el test de McPherson de molienda autógena [9], el SAG Power Index (SPI) de Starkey [10], el piloto de SAG o HPGR, o el Hardgrove mill test del ámbito del carbón. Estos métodos encuentran aplicación en procesos de diseño o control operacional de plantas productivas, y su propósito es predecir el consumo energético al procesar el mineral en un equipo dado (molienda AG, SAG, molienda de barras, bola, etc.). Por ello, la medición combina la energía demandada por el mineral con la utilizada por el equipo mismo.
2. *Ensayos de evaluación estructural de resistencia de roca,* tales como el "cylindrical punch test" [11], el "point load test" [12], o el "brazilian test" [13], provenientes del ámbito de la mecánica de rocas, y cuyo propósito es caracterizar el comportamiento del mineral desde un punto de vista estructural. Utilizan mayoritariamente probetas con geometría definida, lo que los hace poco flexibles para estudios de reducción de tamaño.
3. *Ensayos de evaluación de la resistencia a la fractura en la reducción de tamaño*, donde el énfasis está en configurar mecanismos de ruptura específicos, y medir el esfuerzo o la energía demandada intrínsecamente por el mineral para romperse. Aquí se puede citar (entre otros) el test de impacto de Bond [14], el Twin Pendulum de Narayanan [15], el Drop Weight Tester (DWT) en sus variantes [16], la Short Impact Load Cell (SILC) [17], el SAG Mill Comminution (SMC) Test de Morrell, y también el Rotary Breakage Tester (JKRBT) de Shi (JKMRC) [18].

Se profundizará en los ensayos presentados en la Tabla 2.1, destacando la técnica de aplicación de fuerza, características de minerales utilizados y especificaciones del ensayo.

Tabla 2.1 Cuadro comparativo de técnicas de medición de consumo de energía de molienda.

Test de Molienda	Diámetro molino [m]	Tamaño inicial [mm]	Tamaño final [mm]	Muestras requerida [kg]	Muestra consumida [kg]	Tipo
LEITest	N/A	76,2	N/A	25	10	Partícula Individual
JK Drop weight	N/A	63	N/A	75	25	Partícula Individual
Test SMC	N/A	31,5	N/A	20	5	Partícula Individual
JKRBT	0,45	45	N/A	100	15	Partícula Individual
SPI	0,305	38,1	1,7	10	2	Batch
Modelo Bond	0,305	3,35	N/A	2	1,2	Batch
Molino Bond bola	0,305	3,35	0,149	10	5	Ciclo Cerrado

2.3 Ensayos de fractura de partículas individuales.

2.3.1 Bond Low Energy Impact Test – LEIT.

También conocido como Test de baja energía de impacto de Bond o Test de Impacto de Bond, es un equipo que consiste en dos martillos tipo péndulos montados en dos ruedas de bicicleta, con el fin de lograr igualdad de golpes simultáneamente o en lados opuestos de cada muestra mineral (ver Figura 2.2). Inicialmente impacta a las rocas con un nivel bajo de energía, y se incrementa progresivamente elevando el nivel del péndulo, que cada uno pesa 13,6 [kg], hasta lograr la energía suficiente para romper la roca. La energía medida en el momento de la ruptura, en conjunto con el espesor y la gravedad específica de la roca permite determinar el Índice de Chancabilidad o Índice de Trabajo de Impacto (Crusher Work Index – CWI [kWh/t]). El test generalmente se realiza con 20 rocas en la fracción de tamaño [-76,2;+50,8] [mm], para lo cual se requiere de 10 [kg] de muestra [19]. Uno de los tópicos importantes de la prueba es su capacidad para medir la dispersión natural de la muestra. Otra ventaja es que el test se realiza con fracciones gruesas de tamaño, lo que lo hace único en la serie de Bond. El test requiere de rocas de tamaño >76,2[mm] o una perforación.

Figura 2.2 Equipo de Impacto de Bond.

La energía para lograr la rotura de la partícula [19] viene dada por la (2) y (3).

$$E_b = K(1 - \cos\alpha) \quad \textbf{(2)}$$

$$CWI = 53{,}49\frac{\left(\frac{E}{t}\right)}{SG} \quad \textbf{(3)}$$

Donde:

E_b	=	Energía de Chancabilidad de Bond para rocas individuales, [J], promedio de 10 fracturas.
K	=	Constante del equipo.
α	=	El ángulo de caída del péndulo, [grado].
SG	=	Gravedad específica de la roca individual.
t	=	Espesor de la roca, [mm].

El CWI, se emplea en la Tercera Ley de la Conminución, para estimar los requerimientos energéticos necesarios para dimensionar diversos equipos de chancado alcanzando un tamaño P80 determinado. También puede ser empleado para determinar los ajustes de dimensión de lado abierto (para chancadores de mandíbula y giratorios) o los ajustes de abertura de lado cerrado (chancadores de cono) para un tamaño de producto dado.

La Tabla 2.2 indica los rangos de dureza según el Índice de chancabilidad.

Tabla 2.2 Rango de Dureza según Valor del Índice de Chancado.

Propiedades	CWi, [kWh/t]
Suave	<8
Moderadamente duro	8 – 13,5
Duro	13,5 – 20
Muy Duro	>20

El test principalmente se usa para el diseño de Chancadores, pero también se puede usar, junto con los otros test de Bond (BWI y CWI), para diseñar molino SAG [20].

2.3.2 Drop Weight Tester – DWT.

El equipo y la técnica, asociada a la prueba de caída de peso JK, relaciona la energía específica con la distribución de tamaño de producto de ruptura. Este test está dividido en tres componentes. Primero, la prueba mide la resistencia al impacto de partículas gruesas entre el rango de [-63;+13,2][mm] (divididas en cinco fracciones de tamaño). A continuación, se evalúa la resistencia a la rotura por abrasión de las partículas de 53 a 37,5 [mm]. Finalmente, se mide la densidad de 30 partículas, evaluando la densidad media y la dispersión. El test genera un rango de condiciones de impacto y abrasión, que se reduce en tres parámetros: A, b (impacto) y t_a (abrasión) [19].

Para llevar a cabo el ensayo se requiere 75 [kg] de material, aproximadamente de 30-90 partículas en cinco fracciones de tamaño, en el rango de 13,2 a 63 [mm]. Cerca de 25 [kg] de material es actualmente consumido en el test, y todo el producto y el material no utilizado puede ser reutilizado en otras pruebas metalúrgicas. En el test de impacto,

las cinco fracciones de tamaño son sometidas a tres series de impacto con diferentes niveles de energía, para un total de 15 series de pruebas (ver Tabla 2.3). Cada serie de pruebas se compone de 10-30 rocas, que se someten a un impacto de energía conocida, definida por la altura y la masa del peso que cae sobre la roca [19]. Todos los fragmentos generados por los ensayos se recogen y someten a un análisis de tamaño de partícula, lo que es reducido a unos valores “t”, representantes de la reducción de tamaño. Este valor “t” se define como el porcentaje pasante acumulado en el tamaño 1/t del tamaño original. Para el test de abrasión, se requiere 3 [kg] de muestra de rocas de 53 a 37,5 [mm]. La muestra se hace girar en un molino de 30x30 [cm] durante 10 [min], luego el producto se somete a análisis granulométrico. Por conversión, el parámetro de abrasión, t_a, es equivalente a 1/10 del t10 logrado por la prueba de abrasión. La densidad se determina con 30 rocas de muestra, usando la técnica de desplazamiento de agua. La distribución de densidad del mineral es importante para evaluar la molienda autógena y semiautogena, AG y SAG, respectivamente, ya que la densidad aparente afecta la carga y el consumo de energía asociado al molino. Otra característica interesante del procedimiento DWT es que proporciona una medida de la variación de dureza de la muestra por rango de tamaño. Típicamente, el valor t10 se incrementa con el tamaño de roca, lo que significa que la dureza del mineral en realidad disminuye, esto se explica debido a que las rocas de mayor tamaño presentan mayor frecuencia de grietas.

Tabla 2.3 Condiciones estándar de DWT.

Rango de tamaño [mm]	Número de partículas por test	Energía específica aplicada [kWh/t]				
-63,0;+53,0	10	0,10	0,25	0,40		
-45,0;+37,5	15	0,10	0,25		1,0	
-31,5;+26,5	30		0,25		1,0	2,5
-22,4;+19,0	30		0,25		1,0	2,5
-16,0;+13,2	30		0,25		1,0	2,5

El equipo DWT (ver Figura 2.3) contiene un impactador, con masa y altura definidas, y variables. Una vez definida la energía específica de impacto, [kWh/t], se definen los parámetros de masa y altura para llevar a cabo la prueba.

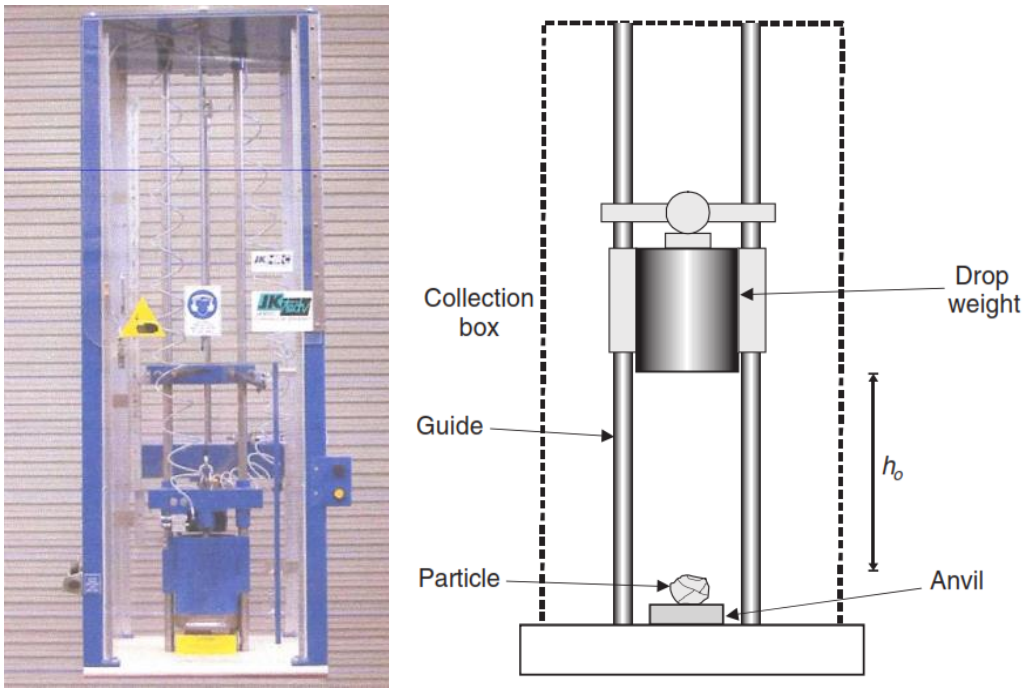


Figura 2.3 Esquema de un Drop Weight Test.

La Figura 2.4 ilustra resultados obtenidos en un test para una fracción de tamaño, [-16;+13,2] [mm], los que son definidos por la ecuación (4). La pendiente del gráfico, interceptada en el origen, indica que Axb está relacionado con la resistencia de la roca. Un Axb o una pendiente mayor indican que la roca es más débil. El parámetro A es la asíntota del t_{10} e indica el grado máximo de rotura. Esto revela que a altas energías se generará poca reducción adicional de tamaño. A medida que aumenta la E_{cs} el proceso de reducción de tamaño se vuelve menos eficiente. El parámetro b se relaciona con la forma de la curva t_{10}-E_{cs}, con valores bajos de b se indica que el mineral es más duro. Como hay una interacción entre A y b en la ecuación de rotura de impacto, JKMRC usa Axb para comparar. Es posible que ambos parámetros, A y b, puedan relacionarse con la textura de la roca (por ejemplo: borde de grano, composición y asociación mineralógica y micro grietas), aunque esto aún no está establecido y continúa siendo objeto de estudios. El ejemplo muestra que 5,4% del producto de la muestra fracturada

en 0,25 [kWh/t] es más fina que 1,45[mm], basado en el tamaño inicial promedio de 14,5 [mm]. Similarmente, la muestra molida a 2,5 [kWh/t] produce un 43,2% de fino (menos que 1,45 [mm]). El grado máximo de rotura, A, para esta muestra fue 100%; por lo tanto b es 0,23, dando un valor relativamente bajo para Axb, de 23, indicando una muy alta resistencia al impacto [19].

$$t_{10} = A(1 - e^{-b \cdot E_{cs}}) \quad \textbf{(4)}$$

Donde:

$A\ y\ b$ = Parámetros específicos de DWT.

E_{cs} = Energía específica de fractura, [kWh/t].

Los parámetros A y b pueden ser usado para comparar la dureza al impacto de diferentes tipos de mineral (ver Figura 2.5). Note que los valores A y b no son usados directamente para estimar la energía requerida en el molino, pero son usados en el modelo JKMRC para simular el rendimiento de molinos AG/SAG.

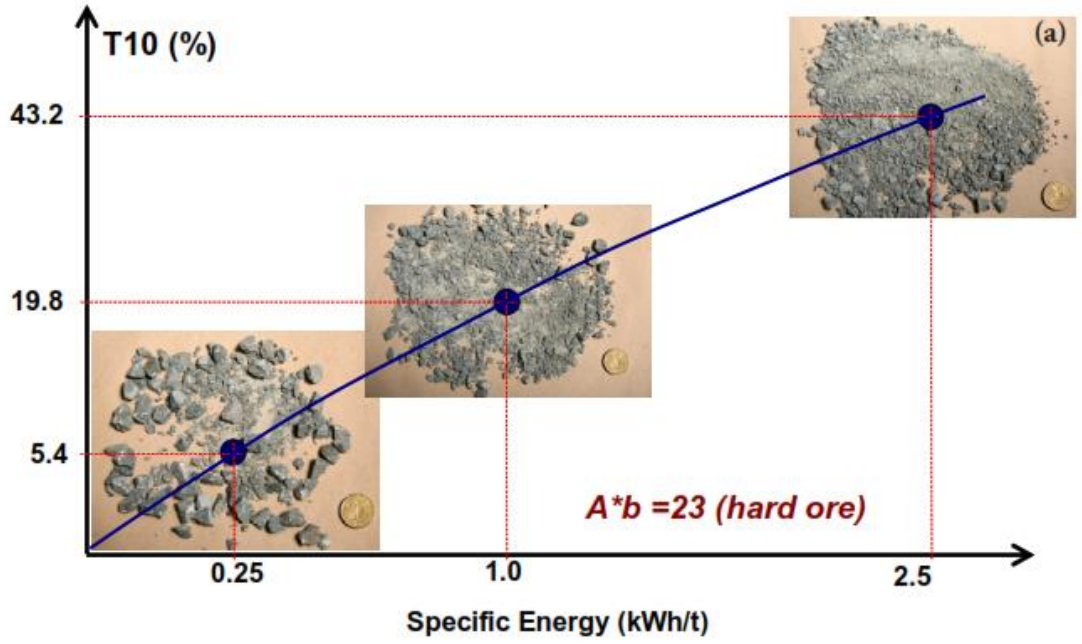


Figura 2.4 Relación entre el producto fino y la energía específica de fractura, para tamaño de particula individual.

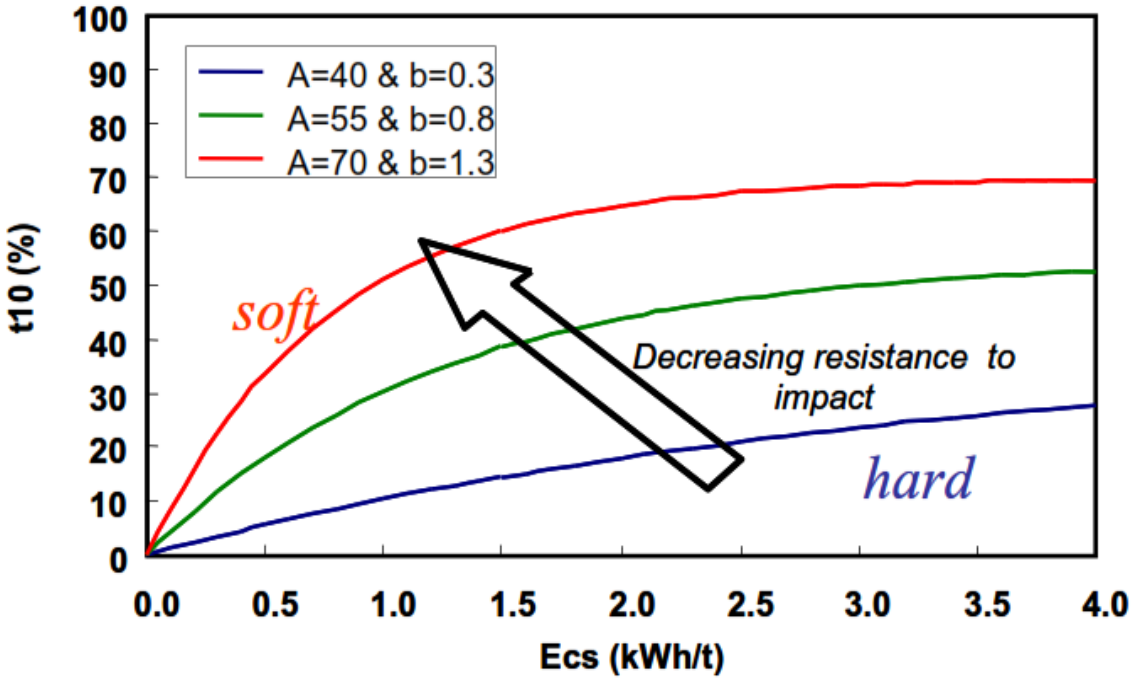


Figura 2.5 Ejemplo de resultados comparativos, reflejando diferentes valores de A y b.

Los parámetros del ensayo DWT se utilizan comúnmente en el modelador y simulador JKSimMet permitiendo analizar, optimizar y diseñar circuitos de procesos de conminución. El software permite simular y calibrar diferentes dispositivos de conminución y separación, sobre todo los chancadores, molino AG/SAG y de bola y ciclones.

2.3.3 SAG Mill Comminution – SMC.

La prueba de trituración en molino SAG (SMC), Test SMC de Impacto o también conocido como test de Morrell es una versión abreviada y menos cara de la prueba de caída de peso JK (DWT). Consiste en caracterizar la molienda Autógena (AG) y Semiautógena (SAG) a través de la evaluación de resistencia a la fractura de impacto del mineral y la relación de la energía de entrada [kWh/t]. Esto permite diseñar, optimizar y prevenir el rendimiento del circuito de molienda.

El test utiliza rocas de tamaño reducido o en testigos de perforación. La prueba genera los parámetros A y b y un índice de caída libre DWi en [kWh/t], lo que permite conocer

la resistencia a la fractura por impacto (Axb) y definir las características del mineral. Se rompen las partículas utilizando una serie de energía de impacto predeterminada. El alto grado de control impuesto, tanto en el tamaño de partículas como en las energías utilizadas para la ruptura, permite que la medición del test sea repetible (ver Figura 2.6). Comúnmente es llevada a cabo en conjunto a la prueba de caída de peso JK y con otras a pequeña escala. Permitiendo de esta forma, definir características del mineral.

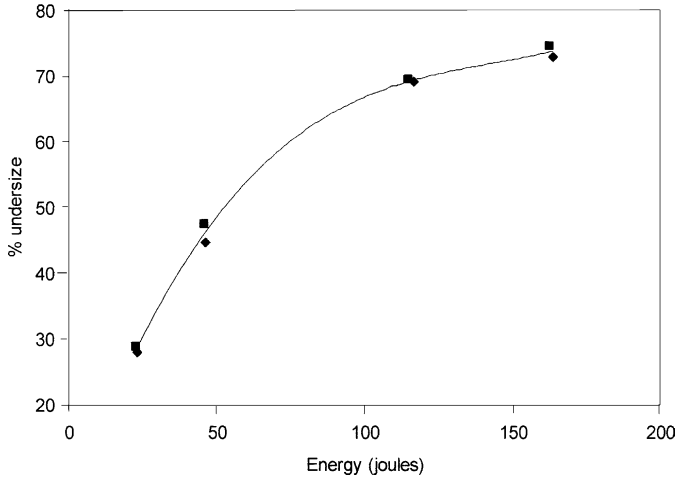


Figura 2.6 Repetitividad del test SMC.

El procedimiento del test consiste en utilizar cualquier rango de tamaño de la prueba de caída de peso JK, utilizando 100 rocas divididas en cinco sets de 20 partículas cada uno. Se puede llegar a utilizar hasta 20 [kg] de masa para alcanzar la granulometría requerida para el test. A cada set se le aplica un nivel de energía específica, usando el equipo Drop-Weight Test de JKMRC, que se muestra en la Figura 2.7. El producto fracturado se tamiza con tamaño de tamiz seleccionado para proporcionar una medida directa para el valor t10.

Las partículas se seleccionan por los siguientes rangos de tamaño: [-31,5;+26,5], [-22,4;+19,0] o [-16,0;+13,2] mm; de preferencia se utiliza la fracción de tamaño más grande, pero requiere de más material. La fracción de tamaño medio tiende a ser utilizado con mayor frecuencia, mientras que la fracción más fina solo se utiliza si hay problemas con el inicio de la distribución de tamaño o la cantidad de material.

Figura 2.7 Estructura de equipo Drop-weight tester.

El método de selección de partículas se elige de manera que sus masas individuales se encuentren dentro del rango ±30% de la masa promedio individual y la masa media para cada set de 20 muestras se encuentra dentro del rango de ±1% de la masa objetivo. Un típico set de partículas se muestra en la Figura 2.8.

Figura 2.8 Partículas seleccionadas para el método SMC.

Un gráfico típico del test SMC se presenta en la Figura 2.9 mostrando la tendencia esperada. Consiste en que a mayor energía aplicada, mayor es la masa de tamaño menor. La pendiente del grafico indica la resistencia a la fractura de la roca, a mayor pendiente, más débil es la roca. La pendiente es usada generalmente como un índice de esfuerzo (DWi).

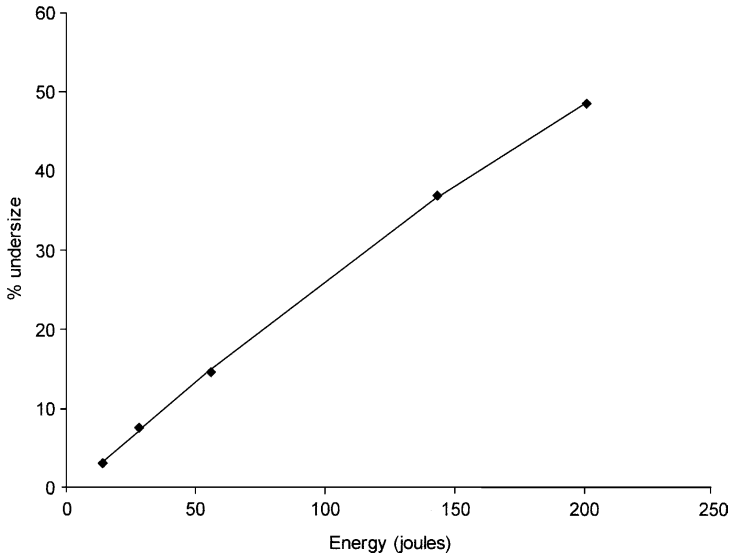


Figura 2.9 Típicos resultados del test SMC.

2.3.4 Rotary Breakage Tester (JKRBT) de Shi (JKMRC)

El equipo fue desarrollado por JKMRC como un ensayo de caracterización de fractura de forma rápida. Utiliza un sistema de impacto rotor-estator, en la cual las partículas obtienen energía cinética controlada que se produce por hacer girar el rotor que luego expulsa e impacta la roca contra el estator, causando la fractura del mineral. El objetivo del test es establecer una relación entre la energía específica de entrada con el producto resultante. Los resultados de la caracterización de fractura del mineral pueden dar en un solo valor de dureza o parámetros de resistencia, o una relación que describa el nivel de reducción de tamaño respecto a la energía aplicada u otras condiciones de la prueba [21].

El concepto de utilizar la energía cinética como alternativa para romper rocas es viable y rápido ya que no requiere del posicionamiento de la muestra manualmente. En la industria se aplica este concepto de chancado por impactos con eje vertical (Vertical Shaft Iimpact – VSI) y pulverizador de laboratorio. Sin embargo, estos equipos se utilizan para reducción de tamaño y no para caracterizar la rotura de la roca.

En la Figura 2.10 se muestra el prototipo del JKRBT, con diámetro de rotor de 360 [mm], en el cual fue posible llevar a cabo la investigación sobre el uso de energía cinética para caracterizar rotura de partículas. El sistema consiste en un alimentador vibratorio, un rotor-estator y una unidad de control de la operación.

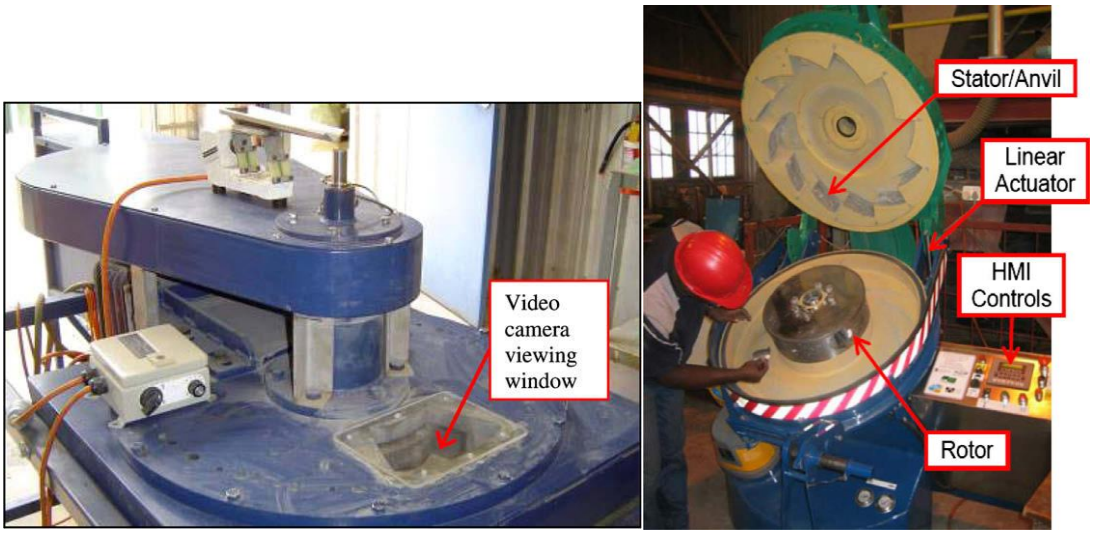


Figura 2.10 Prototipo y la primera version instalada de JKRBT.

La energía específica de cada impacto está definida por la energía cinética y la masa de la partícula, que viene dado por la ecuación (5):

$$E_{cs} = \frac{E_k}{m} = \frac{0{,}5 \cdot m \cdot V_i^2}{m} = 0{,}5 \cdot V_i^2 \quad \textbf{(5)}$$

Donde:

E_k = Energía Cinética.

V_i = Velocidad de impacto.

m = Masa de la partícula.

La masa de la partícula no afecta en la energía específica, a diferencia del caso DWT. La energía específica depende solamente de la velocidad de impacto V_i, como resultado de la velocidad tangencial del rotor V_t y la velocidad radial V_r (se indica en la Figura 2.11 y ecuación (6)).

$$V_i^2 = V_t^2 + V_r^2 \quad \textbf{(6)}$$

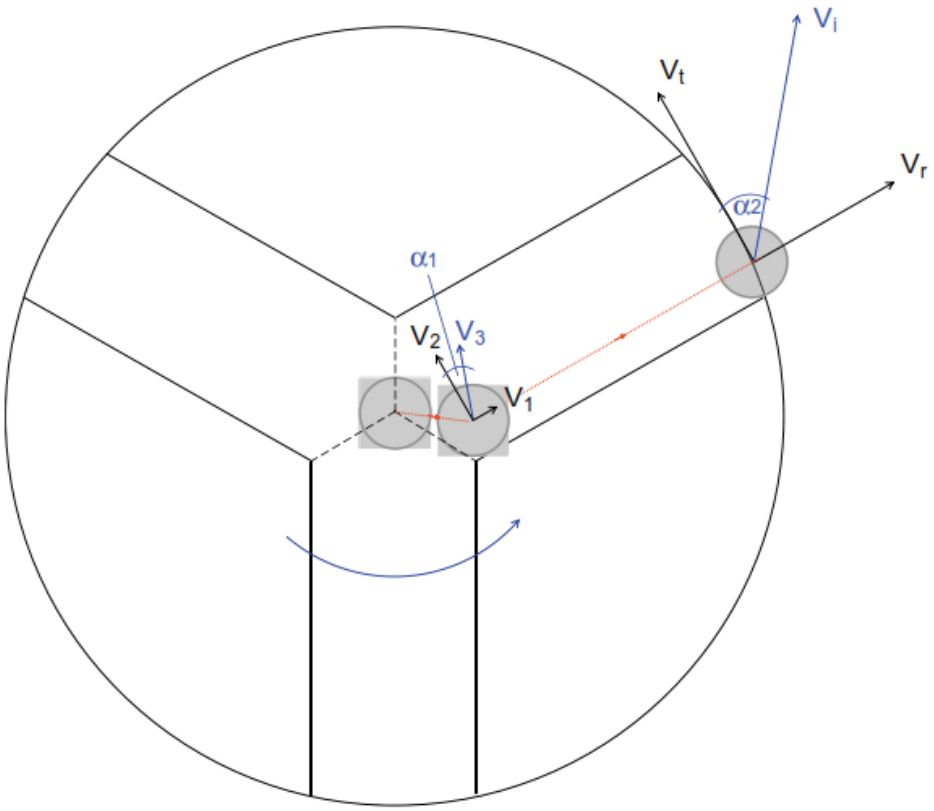


Figura 2.11 Esquema de los componentes de la velocidad del rotor al ingresar y al salir del canal de conduccion del rotor.

Si los dos componentes de la velocidad son iguales, como se supone por la teoría, la velocidad de impacto se puede expresar como:

$$V_{i(teorico)} = \sqrt{2} \cdot V_t \qquad \textbf{(7)}$$

Sin embargo, debido a las pérdidas por fricción ocurridos una vez lanzada la roca, la velocidad de impacto real de la partícula es menor que la propuesta por la teoría (Ecuación (7)), por lo que se introduce una constante C para predecir eficientemente el diseño de transferencia de energía cinética del rotor a la partícula alimentada al equipo. Esta constante rige la máxima velocidad de impacto posible a una velocidad del rotor dado y un conjunto de condiciones operativas. La constante de velocidad, C, varía entre 0,85 a 0,95 y viene dada por la ecuación (8).

$$C = \frac{V_{i(inicial)}}{V_{i(teórica)}} \qquad \textbf{(8)}$$

Por lo tanto, la energía específica viene dada por la ecuación (9):

$$E_{cs} = \frac{0{,}5\left[C \cdot \sqrt{2} \cdot \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot N \cdot r}{60}\right)\right]^2}{3600} = 3046 \times 10^{-6} C^2 N^2 r^2 \quad \textbf{(9)}$$

E_{cs}	=	Energía específica, [kWh/t].
r	=	Radio del rotor, [m].
N	=	Velocidad del rotor, [rpm].
C	=	Constante de diseño del equipo.

Las condiciones de funcionamiento del equipo, rangos de utilización y ventajas son los siguientes:

- Tipo de rocas: minerales de oro, minerales de cobre/oro, carbón y bolas de cerámica.
- Las pruebas con el prototipo utilizaron granulometría:

  [-9,5:+6,7] [mm]

  [-16;+13,2] [mm]

  Para el test comercializado los rangos de tamaño son:

  [-13,2;+11,2] [mm]

  [-22,5;-19] [mm]

  [-31,5;+26,5] [mm]

  [-45;+37,5] [mm]
- El JKRBT industrializado trabaja con un rotor de 450 [mm] de diámetro, puede alcanzar niveles de energía especifica entre 0,001 a 3,8 [kWh/t] [22] y requiere de al menos 100[kg] de muestra para proporcionar suficientes partículas para generar la prueba [23].
- La forma de las partículas debe cumplir con la relación entre longitud y ancho igual a 1 para partículas esféricas y de 2,8 para partículas alargadas.
- La superficie de las partículas varía desde muy suave para bolas o muy rugosa.
- Se puede realizar una comparación entre el comportamiento de partículas secas y húmedas.

- La densidad de la roca puede variar entre 1,3 a 4,5.
- La velocidad del rotor varía entre 300[rpm] a 5000[rpm].
- La velocidad de alimentación de partículas varias desde una partícula por segundo a más de diez por segundo.
- Se usa para tratar muchas partículas, por lo tanto puede generar resultados estadísticamente valiosos [22].
- Control de energía exacta y precisa. Además de excelente reproducibilidad.

2.4 Ensayos de Moliendabilidad.

2.4.1 SAG Power Index – SPI.

La prueba de Índice de Energía SAG o también conocido como test Starkey (Figura 2.12), desarrollado por Minnovex, se lleva a cabo en un molino de trituración de pequeña escala, mide la energía necesaria para realizar una reducción de tamaño estándar y se expresa en forma de índice de dureza del mineral, desde el punto de vista de la molienda SAG o AG [24].

Figura 2.12 Equipo para Prueba de Índice de Energía SAG – SPI.

El ensayo busca establecer el tiempo, en minutos, necesario para reducir una muestra mineral de F_{80} 12,7 [mm] a un P_{80} de 1,7[mm]. Utiliza un molino de 10 [cm] de diámetro por 30 [cm] de largo, cargado con bolas de acero al 15% de 31,8 [mm] de diámetro. Por prueba requiere de 2 [kg] de mineral, generalmente se prefiere mineral con tamaño superior a 19 [mm], pero es necesario un total de muestra de 10 [kg] de 38,1 [mm] (1 ½”), que permite determinar el índice de trituración (Ci), el que es utilizado para estimar la distribución de tamaño de la molienda primaria.

El tiempo determinado, t*, se alcanza generalmente con 4 ciclos de molienda demorando entre ½ a 2½ horas. Una vez establecido t*, se calcula el consumo de energía específica o SAG Power Index, SPI, como la ecuación (10):

$$W\left[\frac{kWh}{t}\right] = 0{,}11 \cdot t^{*}[min] + 0{,}9 \qquad \textbf{(10)}$$

A tiempo de molienda mayor, respecto a la media de la distribución de datos capturados del depósito, para alcanzar un P_{80} de 1,7 [mm], indica mayor resistencia a la molienda, es decir, el mineral es más duro. El SPI tiene la ventaja de requerir un bajo peso de muestra, y por lo tanto es adecuado para un mapeo metalúrgico de los depósitos de mineral. La prueba SPI ha sido ampliamente utilizada en los últimos años y los depósitos que se someten al estudio, por tanto, se pueden comparar con una base de datos en términos de dureza y perfil de variabilidad.

La clave de aplicabilidad a escalas superiores y del amplio éxito de la prueba SPI es que los cuatro mecanismos desmenuzados que se encuentran en el molino industrial SAG están representados en la prueba SPI:

- Rotura por impacto
- Pinzado de partículas individuales
- Rotura por abrasión
- Compresión autógena

La prueba SPI usa el tamaño P_{64} de la distribución de tamaño del producto como indicador. Este parámetro se transforma en [kWh/t] y en combinación con los datos del molino de bolas Bond se usan en el sistema de simulación de molienda con la

avanzada herramienta de evaluación económica de la trituración (CEET2) para estudios de diseño, optimización y previsión del rendimiento. La prueba SPI tiene la ventaja de requerir un peso de muestra pequeño (~5[kg]), y es por tanto adecuada para la cartografía geometalúrgica de los yacimientos.

Se ha ampliado la utilización de este test en los últimos años. Cientos de depósitos de una amplia gama de materias primas se han sometido a pruebas y sus resultados han servido para configurar una extensa base de datos de perfiles de dureza y variabilidad.

2.4.2 Índice de Trabajo de Bond para Molinos de Bolas – BWI.

Esta prueba se realiza de acuerdo al procedimiento original de Bond y se expresa en [kWh/t]. Para ello, se utilizan 10 kg de mineral, sin embargo, se utilizan menos de 5 [kg] 100% bajo 3,35 [mm] (- #6), y el objetivo es alcanzar el estado estacionario, en términos de la razón de reposición de mineral fresco al molino equivalentes a los gramos generados/revolución. Esto para un cierto número de ciclos de molienda. Cada ciclo tiene 100 revoluciones, y se utiliza un tamiz con una abertura dada para definir la malla de corte del producto en cada ciclo. El equipo utilizado para llevar a cabo la prueba se presenta en la Figura 2.13. Es una prueba mundialmente aceptada, en términos de su confiabilidad, repetitividad y reproducibilidad para el diseño y análisis de circuitos de molienda de bolas. En la Tabla 2.4, se observan los valores del Índice de Trabajo de Bond, BWi, para distintas calidades de roca [25].

Figura 2.13 Equipo Índice de Trabajo de Bond.

Tabla 2.4 Valores típicos de Bond Work Index para distintos materiales.

Material	Bond Work Index, [kWh/t].
Barita	7,6
Arcilla	8,6
Dolomita	13,7
Carbón Mineral	13,8
Caliza	14,1
Feldespato	14,2
Cuarzo	15,5
Mineral de Cobre	15,9
Granito	17,4
Mineral de Hierro	18,7
Basalto	24,7

Existe un procedimiento de test modificado, el que requiere de 1,2[kg] de muestra 100% bajo 3,35 [mm]. La prueba se utiliza para programas de variabilidad grandes, ya que proporciona un importante ahorro en términos de costos (utiliza menos material y el

tiempo por prueba disminuye) y tiempo de respuesta, sin poner en peligro la calidad de los resultados.

La teoría del ensayo es la llamada “Tercera ley de Bond”: *La energía consumida para reducir el tamaño 80% de un material es inversamente proporcional a la raíz cuadrada del tamaño 80%; siendo este último igual a la abertura de tamiz que deja pasar el 80% en peso de la partícula*. Como se expresa en la ecuación (11):

$$E_{cs} = W = W_I \left(\frac{10}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{10}{\sqrt{F_{80}}} \right) \quad \textbf{(11)}$$

$E_{cs} = W$	=	Consumo de energía específica, [kWh/t corta].
W_I	=	Índice de trabajo del material, [kWh/t corta].
P_{80}	=	Tamaño 80% pasante del Producto, [μm].
F_{80}	=	Tamaño 80% pasante de la Alimentación, [μm].

El parámetro W_I(índice de trabajo de Bond) depende tanto del material (resistencia a la conminución) como del equipo de conminución utilizado (incluyendo la malla de corte empleada en el clasificador, para circuitos cerrados de conminución/clasificación), debiendo ser determinado experimentalmente (a escala estándar de laboratorio) para cada aplicación requerida. Numéricamente, es en kWh por tonelada requerida para reducir el material a 80% pasante bajo 100 [μm].

La ecuación es usada para determinar el índice de trabajo operacional para una operación de conminución existente, que puede ser comparando la alimentación de tipos de minerales o evaluar el rendimiento del chancado o la molienda en términos relativos.

2.5 ¿Cumplen las técnicas existentes con los requisitos de los ensayos?

Como se indicó anteriormente, existen condiciones en la masa por tamizaje y rango granulométrico (12,5 a 4,75[mm]) a utilizar en las pruebas. El estudio comprende una gran cantidad de muestreo para determinar los puntos de operación, por lo que el tema de costo por prueba es una variable a considerar a la hora de definir el ensayo a utilizar.

Los ensayos que evalúan comportamiento individual de partículas o en su defecto los de moliendabilidad pueden ser considerados como una opción que permita evaluar el método de trabajo con microonda (MW), sin embargo, y tal como se presenta en la Figura 2.14, ninguna de estas técnicas opera en el rango de tamaño utilizado en la cámara de ensayo de microondas.

Además, la masa mínima de operación que se requiere por prueba es de 10 [kg]. Lo que implicaría una exigencia de semanas para lograr tal cantidad de masa.

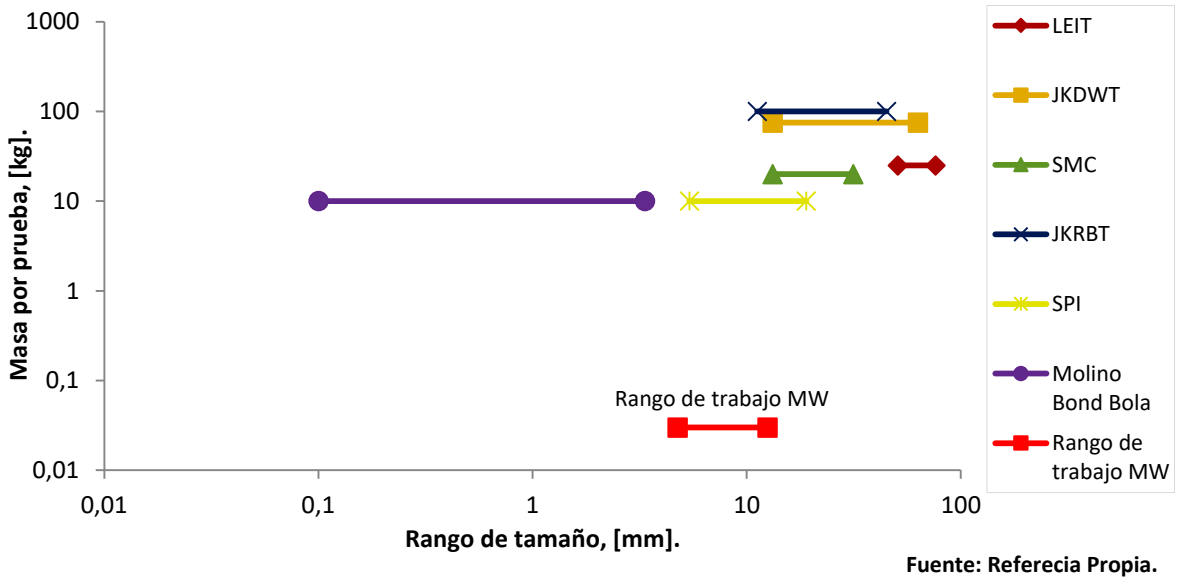


Figura 2.14 Ensayos utilizados por la industria v/s ensayo en el rango de operación de microondas.

En el ámbito económico, los ensayos fluctúan entre $535.000.- a $3.600.000.- por prueba (Figura 2.15), lo que elevaría considerablemente los costos al momento de evaluar el procedimiento de aplicación de MW.

Figura 2.15 Relación entre costo y tipo de ensayos de comportamiento de fractura.

Por lo tanto, ninguna de estas técnicas permite evaluar la operación del pretratamiento en las condiciones de operación de laboratorio propuestas. Dado esto, el objetivo ahora, es plantear un método consistente al procedimiento de estudio para cuantificar resultados de la investigación.

2.6 Hipótesis.

- Que el efecto de las microondas se reflejará en la fuerza de ruptura de partícula.
- Que el comportamiento general conocido del DWT con partículas entre 65 y 13 [mm] se puede extrapolar al rango de tamaño de partícula de 12 a 4 [mm].
- Que el efecto de las microondas se reflejará en un alza del indicador t_{10} para un valor dado de energía específica E_{cs}.

2.7 Objetivos.

2.7.1 Objetivo general.

Desarrollar técnicas de ensayo que permitan cuantificar el efecto de tratamientos con microondas en las propiedades de fractura de los minerales, en rangos de tamaño y cantidades de muestra compatibles con estudios de laboratorio.

2.7.2 Objetivos específicos.

- Diseñar un ensayo de compresión para medir probabilidad de fractura en función de la carga aplicada en partículas de tamaños entre 4 y 12 [mm].
- Evaluar la variabilidad del ensayo y su capacidad de distinguir comportamientos entre minerales diferentemente tratados.
- Diseñar un ensayo DWT aplicable a partículas entre 4 y 12 [mm], que permita evaluar el consumo específico de energía.
- Evaluar la consistencia de su comportamiento respecto de lo conocido para este tipo de ensayo, y la aplicabilidad del tratamiento de datos utilizado en la literatura.

2.8 Contribución al estado del arte.

Plantear un método que permita evaluar de forma rápida, a escala laboratorio, con las restricciones de tamaño y masa, la aplicación de microondas a minerales de cobre. Evaluando cuantitativamente la energía especifica de ruptura y la probabilidad de fractura en función de la carga aplicada. Para determinar el efecto producido en la roca luego de la exposición a microondas, se analizará la información con consistencia y robustez estadística.

Por otra parte, determinar un protocolo adecuado para implementar ensayos de reducción de tamaño a escala laboratorio con rangos de tamaño entre 4 – 12 [mm] y baja o mínima masa tratada. Considerando las dificultades que se presenten antes, durante y después de la prueba, además en la evaluación de la información generada.

2.9 Alcances.

El problema se enmarca en la necesidad de cuantificar o analizar el efecto producido por el pretratamiento con microondas a rocas minerales. No teniendo acceso a ensayos de bajo costo y rápidos, además que permita trabajar en los rangos de tamaño utilizados en laboratorio. Por esta razón, se fabrican equipos con reutilización de implementos de proyectos anteriores y materiales de fácil acceso, como son maderas, tubos de PVC y bolas de molino.

CAPÍTULO 3. DISEÑO DE ENSAYO Y EVALUACIÓN DE DESEMPEÑO.

Considerando las técnicas de operación de los test presentados en el capítulo anterior, se determinó aplicar las ventajas comparativas en dos ensayos: una prensa neumática y un equipo Drop Weight Test (DWT) para partículas pequeñas. Estos permitirán cuantificar, controlar la energía de ruptura y evaluar el ensayo de microondas, no sin antes, ser evaluado los ensayos como método de estudio.

3.1 Diseño de ensayo.

3.1.1 Contexto ensayos compresivos.

Los ensayos compresivos monopartícula difieren entre sí por el parámetro controlador durante la operación de fractura (Figura 3.1):

- Equipos donde se controla la carga o fuerza aplicada, y la respuesta a observar es el desplazamiento y las condiciones de fractura.
- Equipos donde se controla el desplazamiento, y la respuesta a observar es la carga y las condiciones de fractura
- Equipos donde se controla la energía aplicada en la compresión a través de una masa m que cae desde una altura h.

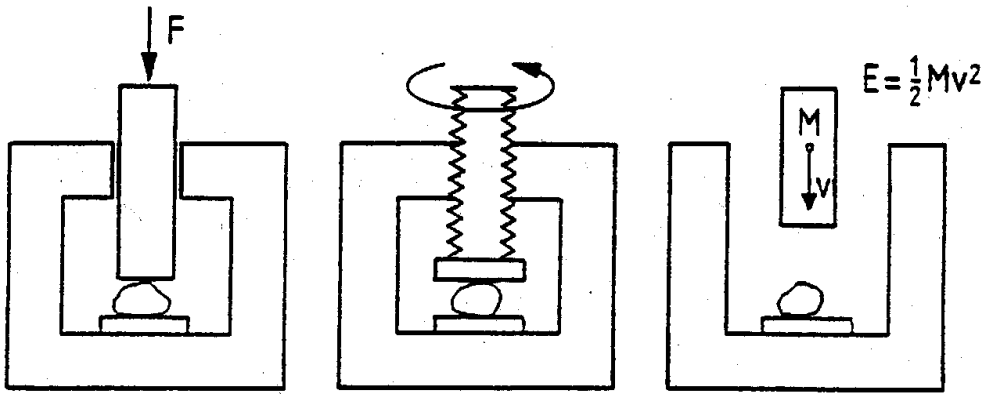


Figura 3.1 Esquemas de diseño de ensayos de compresión.

Los equipos controlados por la fuerza aplicada son más fáciles de construir, pero se tiene un control más limitado de las condiciones de ensayo, en particular, de la carga máxima aplicada a la partícula y la distribución del producto generado. No se puede establecer una relación directa entre la carga de colapso y la distribución de tamaño de

masa producto, a menos que se pueda evitar el avance adicional del pistón luego del colapso. Tampoco es sencillo determinar la energía aplicada a las partículas si es que se comprime hasta una fuerza máxima fija, por el desacople que hay entre desplazamiento y fuerza aplicada durante el colapso primario de las mismas.

Los equipos controlados por el desplazamiento son los que permiten el mayor control del proceso de compresión, ofreciendo mayor calidad de información sobre el proceso con el menor número de muestras ensayadas. Con ellos puede controlarse a voluntad la carga a aplicar, la razón de reducción o incluso la energía de compresión, si se opera con sensores y control automático. Es posible interrumpir el ensayo en el momento que se desee y tener una relación directa entre el nivel de carga o energía aplicada y la distribución de tamaño del producto. Sin embargo, son los de mayor sofisticación mecánica, y para minerales duros, los que requieren mucha sensibilidad y exactitud en el movimiento de desplazamiento.

Los equipos controlados por la energía aplicada pueden ser más o menos fáciles de construir, dependiendo de la instrumentación que contengan. En general, se evalúa la probabilidad de fractura en función de la energía de impacto, usando los datos de distribución de tamaño de los fragmentos para evaluar dicha probabilidad. El ensayo presenta cierta rigidez operacional, porque cada partícula puede ser evaluada solo a un nivel de energía, pero, por otra parte, permite relacionar directamente la energía de compresión aplicada con la reducción de tamaño.

Luego de evaluar las técnicas descritas, y conocer los equipos disponibles en laboratorio, se diseña e implementa dos perfiles de equipo. Una prensa neumática en desuso se pone operativa, y permite evaluar el comportamiento de ruptura hasta alcanzar el colapso de la partícula. Y se desarrolla un prototipo de equipo DWT a pequeña escala que evalúa la distribución de tamaño luego de aplicar una fuerza compresiva conocida.

3.1.2 Equipos de evaluación comportamiento de fractura.

Los criterios de selección de los equipos a evaluar son principalmente la sensibilidad de los ensayos para detectar diferencias menores, junto a un mínimo de volumen de muestra y de tiempo para realizar la medición (también hay ahorros de costo asociados). Un segundo criterio de selección es la flexibilidad respecto del tamaño de las muestras a ensayar, que como se ha planteado anteriormente se busca estudiar minerales de entre 4,75 a 12,5 [mm].

Prensa Neumática

Se habilitó una prensa neumática construida en un proyecto anterior para ser usada como herramienta de evaluación de la carga de ruptura. Cambiando elementos de compresión, construyendo diversas piezas para configurar las superficies de contacto con el mineral, se adquirió un nuevo compresor, instalación de un sensor LVDT de precisión para medir desplazamiento, se desarrolló un software con aplicación en Labview para monitorear y adquirir datos del comportamiento estadístico de las mediciones, además que permita la calibración de los sensores para transformar los datos de salida en unidades significativas.

DWT para partículas pequeñas.

Se decidió implementar un ensayo de tipo Drop Weight Test (DWT) para partículas pequeñas, adaptándose al tamaño de partícula utilizada en los estudios de microondas.

El equipo DWT de JK, opera sometiendo a cinco tamaños de partícula a impactos en tres niveles de energía, con un número de repeticiones de entre 10 y 30 partículas según el tamaño de las mismas. El total de partículas ensayadas es 345. Los datos se ajustan a un modelo que relaciona energía con tamaño de productos, cuyos parámetros son a su vez indicadores de dureza del mineral. Este ensayo estandarizado opera en conjunto con un simulador de procesos que utiliza los parámetros medidos para evaluar el comportamiento del mineral bajo diversas condiciones operacionales, siendo el conjunto una tecnología propietaria. El DWT en general presenta cierta rigidez operacional, porque cada partícula puede ser evaluada solo a un nivel de energía, pero,

por otra parte, permite relacionar directamente energía de compresión aplicada con reducción de tamaño.

Siguiendo el principio de operación del equipo DWT de JK, se diseña un ensayo para partículas pequeñas, operando en tres rangos de tamaño de partícula a cuatro niveles de energía con sus respectivas réplicas y con 30 [gr] de masa indistintamente su tamaño. El resultado es una curva granulométrica (orientada a t10 y valores de A y b) relacionada con la energía específica utilizada en el ensayo, entregando una evaluación más directa del efecto del tratamiento con microondas en el comportamiento del mineral.

La Tabla 3.1, presenta una comparación entre la prensa de desplazamiento controlado y el DWT estándar, con las técnicas que se ensayarán para evaluar el comportamiento de fractura.

Tabla 3.1 Comparación de opciones de método de evaluación de comportamiento de fractura.

Ensayo	Prensa Neumática, controlada por presión	Prensa de desplazamiento controlado	DWT Adaptado	DWT Estándar
Tamaño de Muestra	4 a 12 mm	4 a 12 mm	4 a 12 mm	13 a 63 mm
Cantidad de Muestra	25 a 400 g	25 a 400 g	30 a 400 g	20 kg mínimo
Nº de muestras	100	100	320	345
Duración de ensayo	8 hrs	12 hrs	20 hrs	60 hrs (estim.)
Parámetros medidos	Fuerza de ruptura, desplazamiento, energía de ruptura, probabilidad de fractura	Fuerza de ruptura, desplazamiento, energía de ruptura, probabilidad de fractura	Energía de impacto versus probabilidad de fractura	Energía de impacto versus probabilidad de fractura

Flexibilidad	Alta, con error asociado a la medición de desplazamiento	Alta, con buen control del error en la medición de energía	Niveles discretos de energía	Limitada
Dificultad de Construcción	Moderada a alta, por la instrumentación y automatización requerida	Moderada a alta, por la instrumentación y automatización requerida	Baja	Moderada
Costo de Construcción	Moderado, por el sistema de control e instrumentación	Moderado a alto, por mecánica, instrumentación y control	Bajo	Moderado a alto, por tamaño
Dificultad de Operación	Moderada a alta, requiere entrenamiento e interpretación	Moderada a alta, requiere entrenamiento e interpretación	Simple	Simple

Como se planteó al principio del capítulo, estos ensayos requieren ser estudiados como método de evaluación del comportamiento de fractura de minerales, independiente del tratamiento al que es sometido el mineral, debido a que por su implementación y estructura de fácil manejo permite evaluar de forma rápida el comportamiento, y de esta forma, es posible generar un patrón de estudio consecutivo de investigación.

3.2 Evaluación de desempeño.

3.2.1 Variabilidad inherente del mineral.

La evaluación del comportamiento de los ensayos de fractura requiere tener en consideración la variabilidad de las rocas a estudiar, pudiendo tener réplicas de ensayos con tendencias similares, como variables, lo que dependerá de la cantidad de zona sulfurada existentes en la partícula ensayada y la metodología de muestreo realizada.

Las muestras minerales utilizadas para ensayar el comportamiento de fractura fueron recopiladas luego de una gestión realizada con la Superintendencia de Geología de Codelco – Andina, obteniendo un variado set de 38 muestras, con diversas litologías y porcentaje de cobre total (variando entre 0.5% y 2.4% de cobre, ver 8.1 Anexo A).

Los minerales poseen variabilidad propia, debido a la formación geológica, depósito del que proviene, o composición química. Particularmente los minerales utilizados en el estudio no fueron analizados químicamente por clase de tamaño que permitiera evaluar las características de las rocas, por lo que se presume son diferentes para los variados tamaños de partículas, tanto químicamente como en términos de liberación, asociación, composición textural y morfología de la roca.

Es probable que se aumente la variabilidad de la prueba por errores humanos o variaciones en la masa tamizada, amplitud o tiempo de vibración del tamiz. Lo que trae consigo perdida de selectividad por partículas finas en las distribuciones de tamaño pequeños.

3.2.2 Consideraciones estadísticas.

La exactitud y la precisión son los conceptos más importantes en metrología, con significados diferentes y bien definidos [26].

Precisión, es la proximidad entre los valores medidos de un mismo mensurando, obtenidos en mediciones repetidas, bajo condiciones especificadas.

La precisión de una medida suele expresarse numéricamente mediante medidas de dispersión tales como la desviación estándar o la varianza. Por ello, cuanto más estrecha sea la distribución de resultados, menor será la desviación estándar de la misma y mayor la precisión de la medida. La precisión depende únicamente de la distribución de los resultados y no está relacionada con el valor convencionalmente “verdadero” de la medición.

Es importante resaltar que la automatización de diferentes pruebas o técnicas puede producir un aumento de la precisión. Esto se debe a que, con la automatización, lo que logramos es una disminución de los errores manuales o su corrección inmediata [27].

Por su parte, la exactitud viene definida como la proximidad entre el valor medido y el valor “verdadero” del mensurando. Así pues, una medición es más exacta cuanto más pequeño es el error medido.

Exactitud se refiere a cuán cerca del valor real se encuentra el valor medido. En términos estadísticos, la exactitud está relacionada con el sesgo de una estimación (valor estimado del error sistemático). Cuanto menor es el sesgo, más exacta es una estimación. Cuando se expresa la exactitud de un resultado, se expresa mediante el error absoluto que es la diferencia entre el valor experimental y el valor verdadero.

Cuando tenemos mediciones repetidas, la exactitud depende solamente de la posición del valor medio (resultado) de la distribución de valores, no jugando papel alguno en ella la precisión.

Observando la Figura 3.2 vemos que:

1. La medición individual 1 es más exacta que la medición individual 2, ya que el valor obtenido está más próximo al valor “verdadero”.
2. Cuando se realizan series de mediciones repetidas, solo el valor medio obtenido juega un papel de cara a la exactitud, independientemente de la precisión. Así, el valor medio obtenido en el Caso A es más exacto que el obtenido en el Caso B, por poseer menor sesgo respecto al valor verdadero.

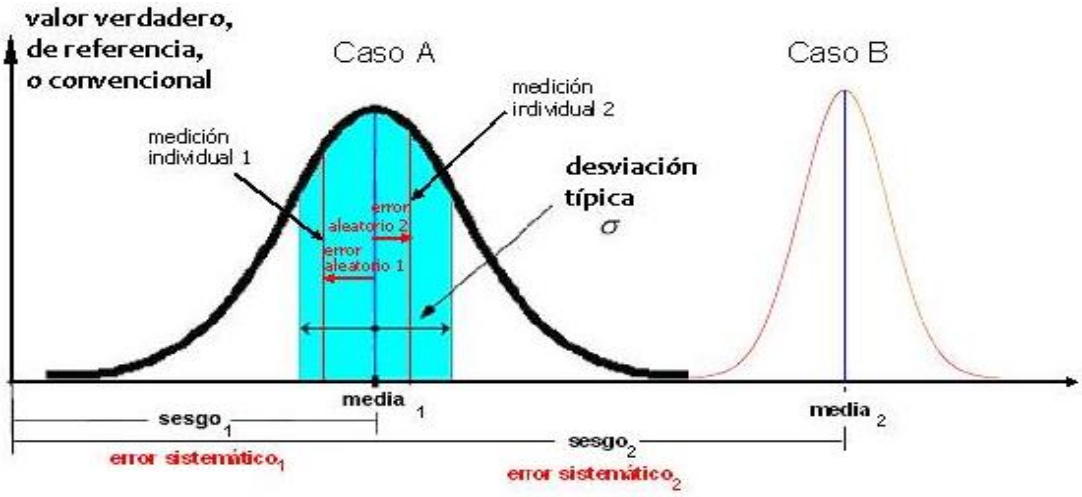


Figura 3.2 Ejemplo de precisión y exactitud.

Estos conceptos son fácilmente asociados de forma gráfica acudiendo a la analogía del juego de lanzamiento de dardos o de disparos sobre una diana, considerando el centro de la diana como el valor verdadero o de referencia (Figura 3.3).

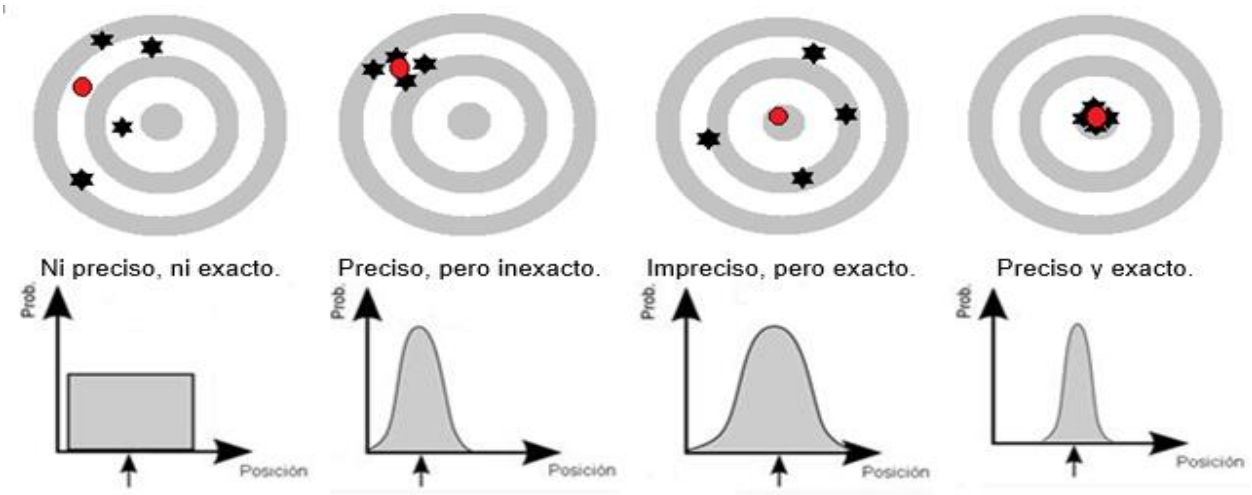


Figura 3.3 Resultado de cuatro series de disparos al blanco y sus correspondientes funciones de densidad de probabilidad.

Para el caso “Ni preciso, ni exacto” se observa una gran dispersión pudiendo asociarle un distribución uniforme o rectangular, reflejando falta de precisión y exactitud dado el sesgo observado al encontrarse el valor central de la distribución alejado del valor verdadero.

Para el caso “Preciso, pero no exacto”, los datos están mucho más agrupados, pero el punto medio se encuentra alejado del valor verdadero (o centro de la diana). Existe buena precisión, sugiriendo una distribución normal del lanzamiento de los dardos, pero falta exactitud debido al error sistemático presentado.

El caso “Impreciso, pero exacto”, el valor medio de los lanzamientos coincide con el centro de la diana, por lo que presenta buena exactitud, aunque con bastante dispersión o falta de precisión, la distribución es considerada normal.

En el último caso donde es “Preciso y exacto”, los lanzamientos están agrupados y en torno al centro de la diana, su distribución es estrecha y los resultados no están sesgados, siendo éste el caso ideal de buena precisión y buena exactitud.

Por lo analizado hasta aquí, es posible concluir que pueden darse todas las combinaciones posibles de exactitud y precisión, siendo compatible la existencia de una de ellas con la falta de la otra.

CAPÍTULO 4. MATERIALES Y METODOLOGIA EXPERIMENTAL.

Este capítulo describirá los materiales, equipos y metodología experimental utilizada en los ensayos compresivos monopartículas para cuantificar el uso de pre-tratamiento con microondas.

4.1 Materiales y Equipamiento.

Para el uso adecuados de los equipos, se describirán los materiales y equipos utilizados para llevar a cabo los ensayos.

4.1.1 Materiales y equipo para aplicación de microondas.

Para el uso del microondas modificado, generador de pulsos electromagnéticos se debe contar con:

- Microondas modificado y recipiente para muestras mineral.
- Control de pulsos de microondas.
- Instrumento de medición y registro de pulsos de microondas.
- Recipiente contenedor de agua al interior del microondas.
- Computador
- Implementos de seguridad:
  - Lentes de seguridad.
  - Guantes de nitrilo.

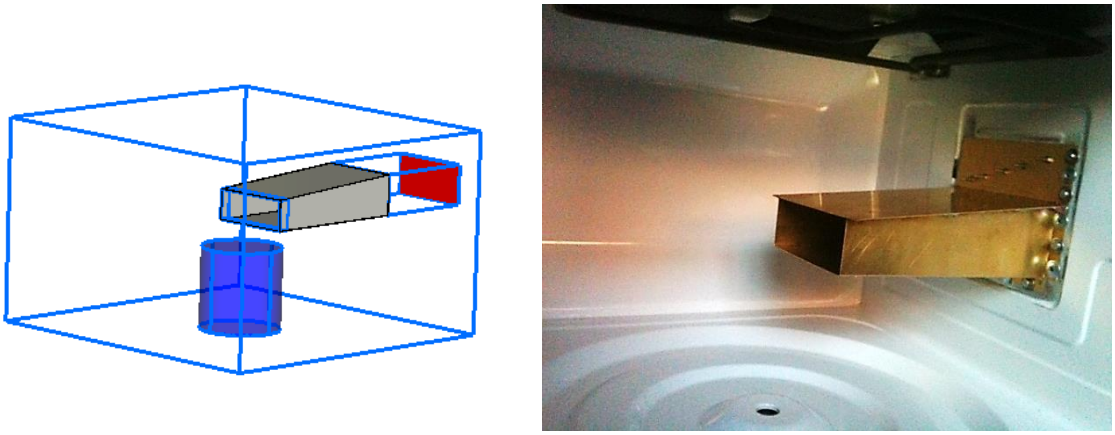


Figura 4.1 Microondas modificado con guía de ondas incorporada en su interior.

La Figura 4.1 muestras un esquema de diseño y el equipo de microondas con la guía de ondas que permite instalar la cámara de acción de microondas.

4.1.2 Materiales y equipo para utilizar prensa neumática.

La prensa neumática requiere los siguientes implementos para su uso:

- Depósito de compresión.
- Celda de carga.
- Sensor de desplazamiento.
- Sensor de presión.
- Manómetro.
- Depósitos para guardar muestras minerales.
- Espátulas, escobillas y pinceles.
- Depósito de aluminio para recoger la muestra una vez producida la fractura.
- Implementos de seguridad:
    - Lentes de seguridad.
    - Guantes de nitrilo.
    - Zapatos de seguridad.

La Figura 4.2 muestra la prensa neumática utilizada para compresión de partículas de granulometría entre 4,75 – 12,5 [mm].

Figura 4.2 Prensa Neumática

4.1.3 Materiales y equipo para uso de DWT para partículas pequeña.

El uso del DWT para partículas pequeñas, requiere los siguientes materiales:

- Equipo DWT de pequeña escala.
- Depósitos para guardar las muestras minerales.
- Bolas de molino (variadas masas).
- Tubos de PVC de las dimensiones de las bolas.
- Espátulas, escobillas y pinceles.
- Recipiente de aluminio para recoger la muestra producida posterior a la fractura.
- Implementos de seguridad:
    - Lentes de seguridad.

- Guantes de nitrilo.
- Zapatos de seguridad.

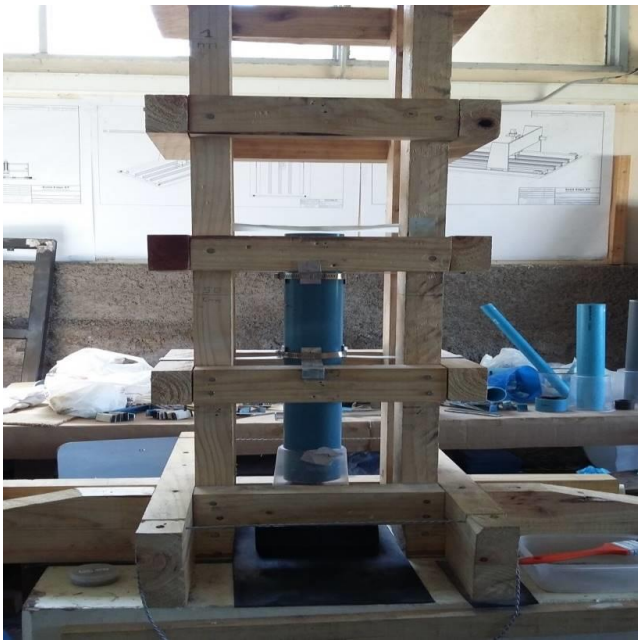


Figura 4.3 Prototipo DWT para ensayos de rocas de pequeño tamaño.

La Figura 4.3 muestra el prototipo inicial diseñado del equipo DWT para partículas pequeñas que permitió evaluar el método de fractura.

Una vez probada la ejecución de la prueba y analizado los resultados, se diseña y construye un prototipo de acero con insertos de plástico (Figura 4.4) que permite desarrollar gran parte de los ensayos presentados en esta memoria. El equipo permite una mejor manipulación de los parámetros controlados y menor vibración del equipo completo. La ejecución del prototipo DWT robusto, que ahora llamaremos SSITest, se financio gracias a la adjudicación de proyecto CORFO 14SSAF-26959-30 “DWType”, postulado durante la ejecución del proyecto de título y siendo adjudicado con el objetivo de comercializar el equipo.

En el Anexo B y Anexo C se puede visualizar los diseños que se esquematizaron para llegar a un prototipo final del equipo de impacto, tanto para fractura monopartícula como multipartícula.

Figura 4.4 SSITest.

4.1.4 Materiales y equipo para tamizar.

Para tamizar la muestra posterior a la fractura, se requiere:

- Tamizador vibratorio Gilson (Figura 4.5).
- Set de tamices.
- Portamuestra.
- Balanza de precisión.
- Implementos de seguridad:
  - Lentes de seguridad.
  - Guantes de nitrilo.
  - Zapatos de seguridad.

Figura 4.5 Tamizador Gilson SS3.

4.1.5 Minerales para prueba experimental.

Codelco División Andina, facilitó mineral para la realización de ensayos exploratorios con aplicación de microondas. Las pruebas realizadas se llevaron a cabo con los minerales expuestos en la Tabla 4.1. El análisis químico presentado se realizó luego de una homogeneización y posterior división por cortadores rifle, reducción de tamaño (con chancador y molienda) y lectura de porcentaje de cobre, molibdeno y fierro utilizando la técnica de espectrometría por absorción atómica, disponible en el departamento de Ingeniería Metalúrgica y de Materiales.

Las muestras fueron elegidas debido a la composición de cobre presente en ellas, considerando una de alta, media y baja ley. La idea es identificar el comportamiento dinámico, en caso de existir, a la hora de aplicar el pre-tratamiento con microondas a minerales con variado contenido de cobre.

Tabla 4.1 Análisis Químico Muestras Codelco Andina.

Tipo de Muestra	%			% Cu según Codelco
	Cu	Mo	Fe	
Muestra P-238379	3,709	0,010	5,749	2,045
Muestra P-238606	2,706	0,019	6,206	1.061
Muestra P-238450	1,470	0,043	4,719	0,546

4.2 Metodología experimental.

Cada equipo requiere su instructivo de operación que permite manipular adecuadamente el dispositivo y no sufrir accidentes. Las metodologías experimentales tienen como objetivo instruir al operador que ejecute las pruebas.

4.2.1 Metodología experimental para aplicación microondas.

Al utilizar el microondas pulsado se debe seguir los siguientes pasos:

1. Conectar cable de alimentación a la red eléctrica del microondas modificado, control de pulsos de microondas e instrumento de medición y registro de pulsos de microondas. (ver Figura 4.6)
2. Comprobar que el Control de Pulsos de microondas funciona de forma normal activando el Control de Pulsos I3 al modo cíclico (debe comenzar a funcionar el dispositivo). Luego de unos segundos volver a modo off.
3. Una vez determinados los tiempos de pulsos de microondas, ajustar el Control de Tiempos Pulso Cíclicos a los requerimientos. Donde T1 controla el Tiempo On (tiempo de generación de microondas), mientras que T2 controla Tiempo Off (tiempo cuando NO existe generación de microondas) (ver Figura 4.7).
4. Comprobar y corregir los tiempos On/Off determinados. Para ello se utiliza el Instrumento de Medición y Registro de Pulsos de Microondas, se enciende, presiona botón “EVENT”, luego el botón “START/STOP”. Se activa el Control de Pulsos I3 al modo Cíclico por algunos segundos y se verifican los tiempos de producción de ondas en el pc.
5. Una vez que se encuentre todo en condiciones de operar el equipo con mineral se debe verificar que el interruptor de Control de Pulsos I3 se encuentre en la posición off y que el interruptor I1 esté en modo OFF.

6. Verificar que los recipientes plásticos dentro del microondas tengan agua.
7. Inserte la muestra en el recipiente correspondiente y cierre el microondas.
8. Encienda el horno microondas accionando Tiempo de cocción, luego ingrese los segundos de la prueba + 10 segundos de seguridad.
9. Presione Inicio del microondas, cambie el interruptor I1 a modo ON, accione el Instrumento de Medición y Registro de Pulsos de Microondas con el botón “START/STOP” y active el Control de Pulsos I3 a modo cíclico.
10. Una vez detenido el microondas, vuelva el Control de Pulsos I3 al modo OFF, y cambie el interruptor I1 de posición al modo OFF y detenga la medición del Instrumento de Medición y Registro de Pulsos de Microondas presionando el botón “START/STOP”.
11. Ahora ya puede abrir el microondas y extraer la muestra mineral procesada.
12. Borre la información registrada en el Instrumento de Medición y Registro de Pulsos de Microondas.

Figura 4.6 Microondas modificado, Control de pulsos de microondas e Instrumento de medición y registro de pulsos de microondas.

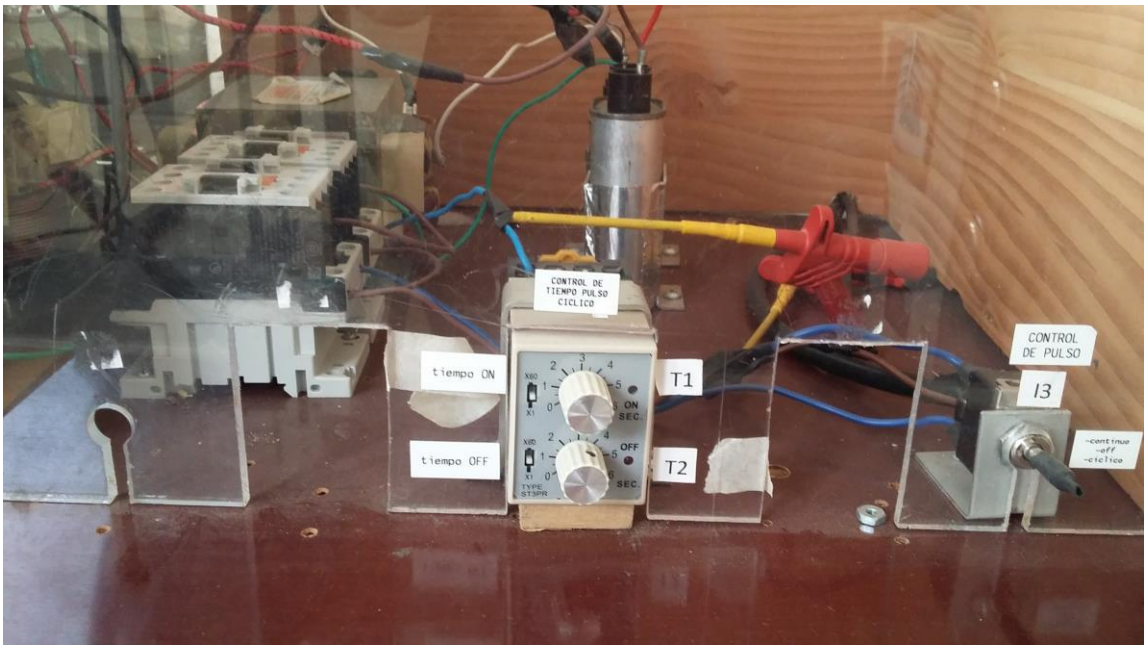


Figura 4.7 Control de Tiempos Pulso Cíclicos.

4.2.2 Metodología experimental para uso prensa neumática.

Para el caso del uso de la prensa neumática, se requiere continuar los siguientes pasos:

1. Definir el rango granulométrico a estudiar y masar cada partícula.
2. Comprobar que el compresor de aire se encuentra cargado.
3. Verificar que las válvulas de la prensa están cerradas.
4. Encender PC, y abrir la aplicación en Labview para monitorear la aplicación de fuerza sobre la partícula (el ensayo solo permite trabajar partículas individuales) (Figura 4.8).
5. Colocar la partícula mineral en el depósito correspondiente para aplicar la compresión y tapar para impedir la perdida de partículas al momento de la fractura.
6. Seleccione “Empezar” en el programa Labview.
7. Abrir la válvula de acercamiento (denotada por el número 1 en la Figura 4.9).
8. Una vez alcanzada la altura máxima de la partícula por el pistón de desplazamiento, se abre la válvula de precisión (número 2 de la Figura 4.9).

9. Mientras se produce la carga sobre la partícula mineral, se debe estar pendiente de movimiento del manómetro para registrar la medición al momento de que se produce la fractura.
10. Una vez producida la fractura, se sueltan ambas válvulas y se detiene el programa computacional.
11. Se registra la información de fractura y se guarda el archivo generado por Labview.

Figura 4.8 Prensa neumática instrumentada.

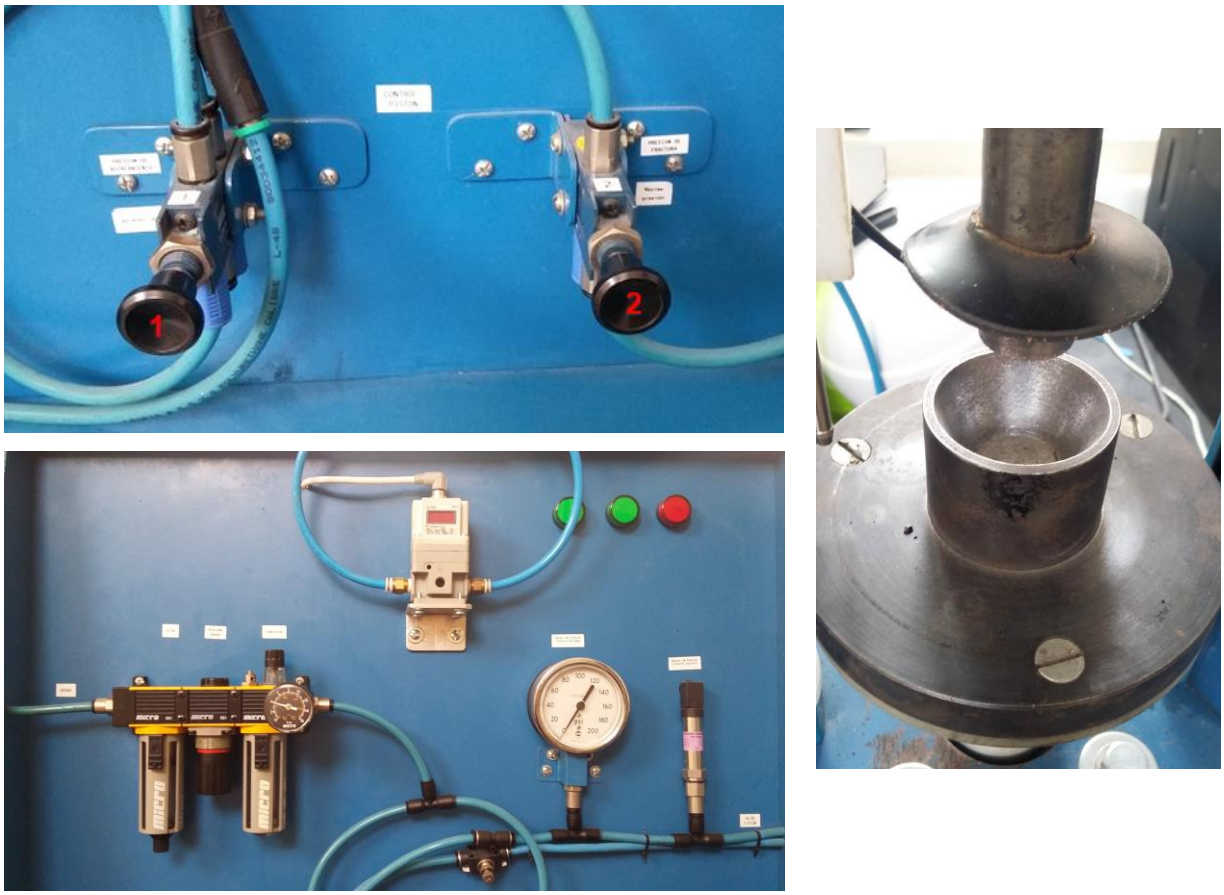


Figura 4.9 Implementos prensa neumática.

4.2.3 Metodología experimental para uso SSITest.

Para el caso del uso del SSITest, se requiere continuar los siguientes pasos:

1. Definir el rango granulométrico a estudiar. Masar y medir altura de cada partícula, registrando la información en la tabla de datos.
2. Determinar la energía específica a utilizar.
3. Una vez determinado los parámetros anteriores, se selecciona la bola de molino, tubo PVC y la altura que permita realizar el ensayo.
4. Instalar el tubo, comprobando mínimo movimiento.
5. Centrar la caída de la bola con la superficie de contacto del mineral.
6. Se instala la roca en el punto central de caída y se cierra la prueba con la carcasa que impide la liberación o perdidas de partículas producto de la fragmentación de la partícula.
7. Se suelta la bola de la altura definida.

8. Se procede a limpiar la superficie y la bola, recopilando en un recipiente de aluminio todas las partículas fragmentadas.

4.2.4 Metodología experimental para uso Tamizador Gilson.

El tamizador funciona de la siguiente forma:

1. Masar la muestra antes de comenzar el tamizaje.
2. Determinar serie de tamices a utilizar. Masar cada tamiz (registrar la información) e instalarlos en el tamizador.
3. Incorporar la muestra a los tamices y tapar el set de tamices.
4. Definir la amplitud, el tiempo y dar inicio al tamizaje.
5. Una vez finalizado el tamizaje, pesar cada tamiz y registrar sus masas con material acumulado.
6. Finalmente, realizar un gráfico de abertura de tamiz [um] v/s % Acumulado pasante.

CAPÍTULO 5. DISCUSION Y ANÁLISIS DE RESULTADOS EXPERIMENTAL.

Para cuantificar el efecto producido por la microondas en las rocas minerales se requirió de equipos y metodologías que permitieran evaluar los resultados. En primera instancia, se utilizó una prensa neumática, que permitía la compresión monopartícula colectando información de fuerza y desplazamiento hasta el colapso de la roca. Posteriormente, se diseñó y fabricó un equipo a escala laboratorio, siguiendo el principio de ruptura del ensayo DWT (Drop Weight Test), que permitió evaluar el nivel de fragilización producido en la partícula mineral a través de una ruptura unipartícula con energía controlada.

5.1 Resultados prensa neumática.

5.1.1 Aplicación continua de microondas.

La prensa se utiliza de forma manual, deteniendo la carga aplicada al momento de sufrir el colapso la partícula mineral. Registrado el avance y la aplicación de fuerza a través de un software diseñado exclusivamente para la utilización del equipo.

El modelo exploratorio de ensayo consistió en trabajar con 3 rangos de tamaño (4,75 a 6,3 [mm], 6,3 a 9,5[mm] y 9,5 a 12,5 [mm]) y tiempos de exposición continuo de microondas de 0, 1, 2, 4, 8 y 16 [s] (SMW, CMW 1, CMW 2, etc). Además, se dejó registro de la masa de la partícula, la forma (I: irregular, R: regular y P: plana) y el tipo de fractura producido (1F: fractura en 2 fracciones de tamaño, FM: fractura mixta o en múltiples tamaños y FT: fractura total denominada así cuando la partícula se pulverizaba).

El software tiene control de la fuerza aplicada a través del sensor de presión y la celda de carga, ambas medidas expresadas en Kilopondio [KP]. La información analizada para evaluar el efecto será la registrada por el sensor de presión debido a que la celda de carga presentó un ruido en la medición que durante las pruebas desarrolladas no se logró eliminar.

A continuación, la Figura 5.1, presentan los resultados obtenidos del modelo exploratorio propuesto.

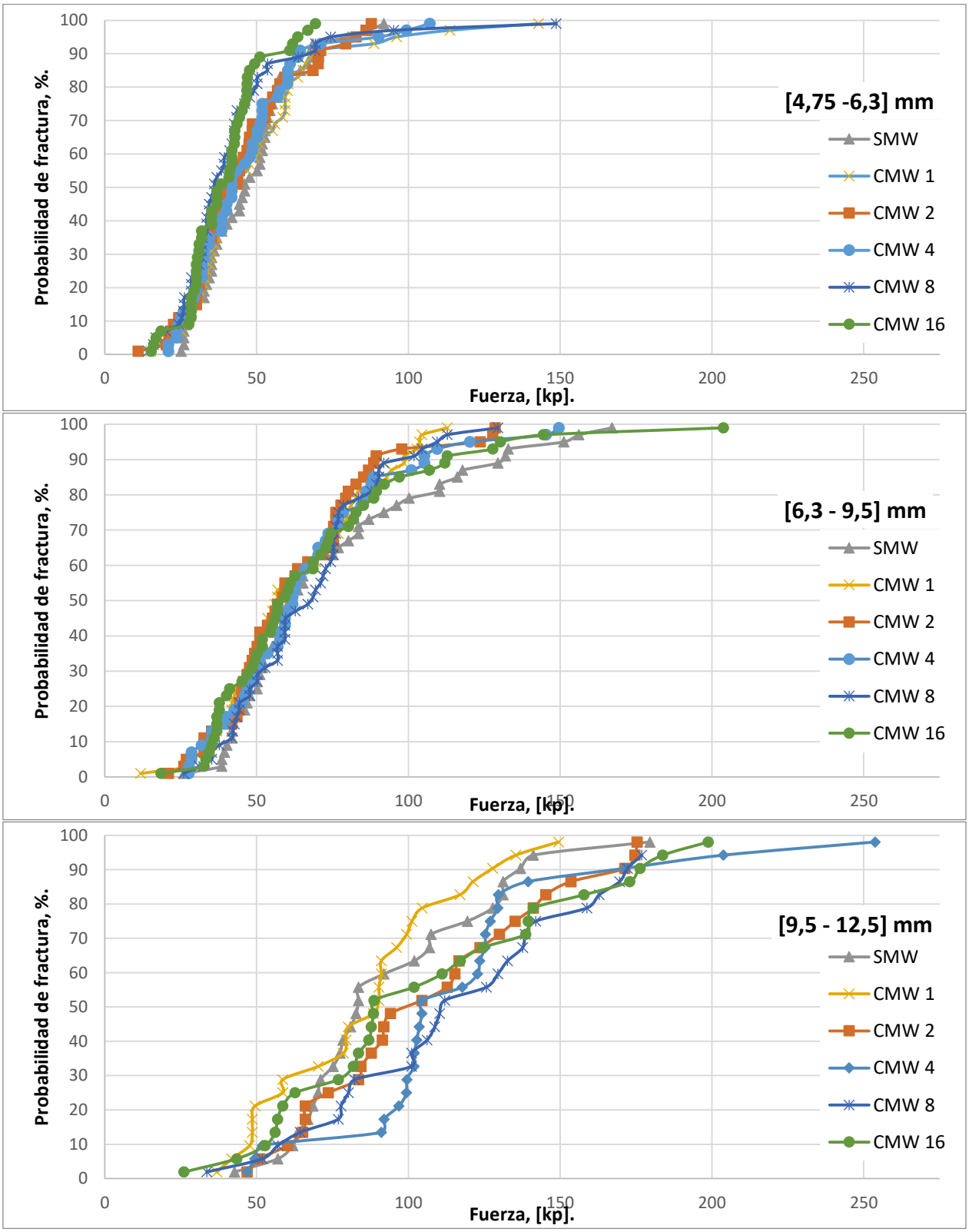


Figura 5.1 Fuerza de ruptura aplicada vs Probabilida de fractura para rango de tamaño entre 4,75 a 12,5 [mm].

A partir de los gráficos presentados, se desprende que se requiere aplicar mayor fuerza a medida que la masa aumenta, por ende, a mayor tamaño de partícula, mayor es la energía requerida para generar la fractura.

Se esperaría, que al exponer las rocas a microonda de forma continua se desarrollen fisuras o grietas durante la exposición externa de energía que reduciría la fuerza requerida para la fractura. Sin embargo, al observar las curvas, resulta complejo extraer una tendencia de la condición de operación debido a la sobreposición de estas.

Para determinar si se presenta alguna tendencia o comportamiento de fractura se desprenden ciertos puntos de probabilidad de fractura y se ajusta el rango de fuerza presentado.

Según lo plantado anteriormente, se obtiene el gráfico presentado en la Figura 5.2, donde se muestran los resultados obtenidos al aplicar microondas continua a partículas de tamaño entre 4,75 a 6,3 [mm]. Se observa que las rocas sometidas a 8 y 16 [s], presentan un debilitamiento de su estructura. Esto se observa cuando a un mismo nivel de fuerza aplicada, la probabilidad de fractura es mayor, alcanzando diferencias de hasta 22% en termino de probabilidad de fractura, respecto al mineral que no fue sometido al tratamiento de microondas.

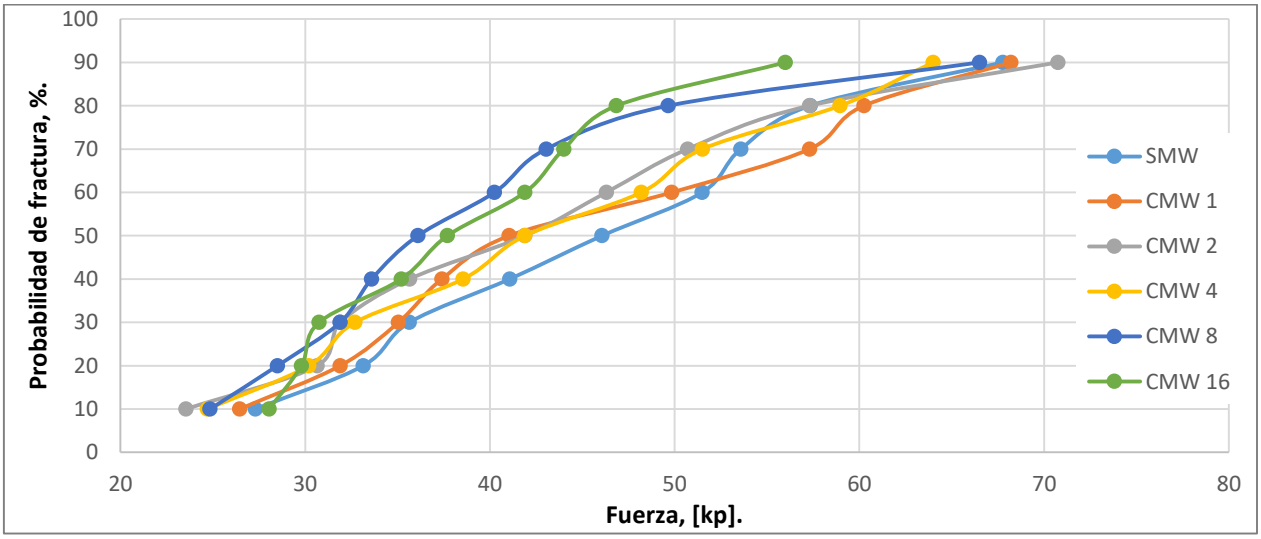


Figura 5.2 Fuerza vs Probabilidad fractura ([4,75 -6,3] mm).

En general, se observa que todas las partículas sometidas a microondas sufren un debilitamiento en su estructura (en comparación a la muestra fracturada que no fue sometida a la exposición de ondas electromagnéticas).

Al aumentar el tamaño de las partículas las curvas se superponen y no presentan una tendencia que permita extraer conclusiones de la aplicación de microondas (Figura 5.3 y Figura 5.4). Es más, contrario al caso anterior, el comportamiento de las partículas de mayor tamaño, entre 9,5 y 12,5 [mm], el mineral sometido a 0[s] y 1[s] de exposición de microonda tienen mejor comportamiento observando desde el perfil de probabilidad de fractura. A partir de esto, se puede pensar que el mineral se “endureció” al estar sometido a una carga energética constante.

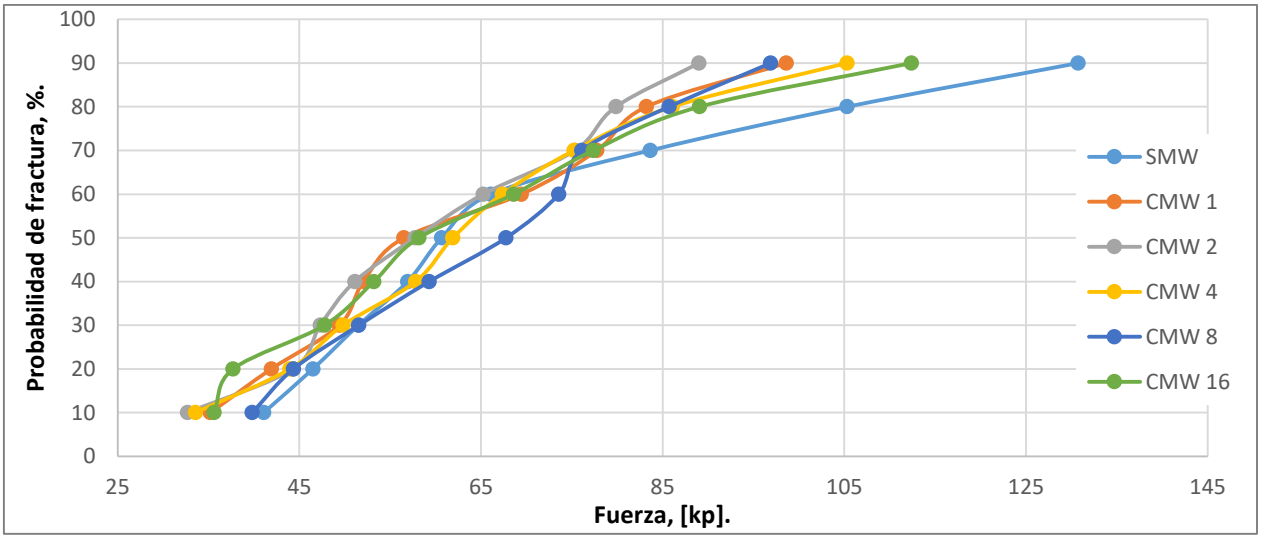


Figura 5.3 Fuerza vs Probabilidad fractura ([6,3 - 9,5] mm).

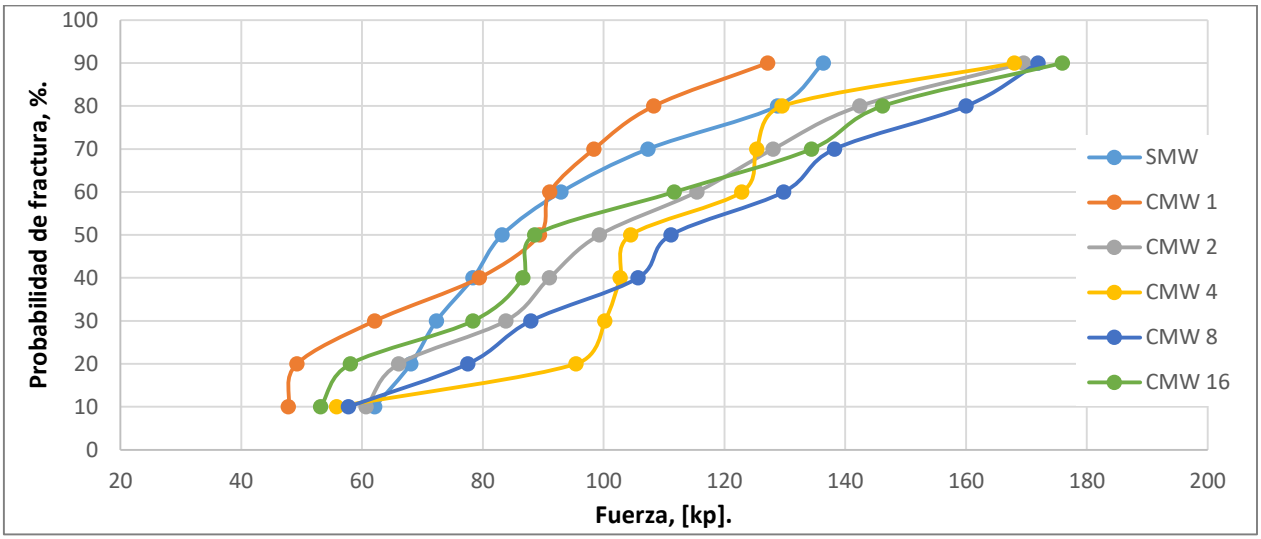


Figura 5.4 Fuerza vs Probabilidad fractura ([9,5 - 12,5] mm).

Por lo observado, el tamaño de la partícula es un factor preponderante al momento de estudiar el comportamiento de fragilización del mineral. Una de las posibles causas de este efecto, es el nivel de oclusión o en su defecto que tan expuesto superficialmente se encuentre el sulfuro. Esta idea surge a partir de la información presentada anteriormente, debido a que las partículas de menor tamaño presentan una tendencia más bien pareja respecto a que con menor tiempo de exposición requieren más fuerza para lograr un nivel de fractura equivalente. Se tiende a pensar que al estar más expuesto el sulfuro a la superficie de la partícula, ésta recibe directamente la energía provocando una dilación de la zona de interés y posteriormente se contrae al momento de enfriarse generando una grieta intergranular de mayor proporción que las partículas que reciben menos tiempo de microondas.

En sentido contrario, las partículas de mayor tamaño tienen el mineral de sulfuro ocluido en el interior de la estructura, lo que provoca que el comportamiento no tenga relación con el nivel de exposición de la onda electromagnética. Se estima, que mientras mayor sea el tamaño de la partícula, la proporción de zona sulfurada expuesta a la microondas será menor y además presenta mayor variación entre una partícula y otra, lo que provocaría las desviaciones presentadas en termino de reducción de energía. Estudiar la proporción de zonas sulfuradas existentes respecto al tamaño de la roca, es un tema pendiente de analizar.

También se cree, que al someter la partícula a un tiempo prolongado de microondas el mineral sufre tal nivel de calentamiento que se “funde” dentro de la estructura, “rellenando” las grietas intergranulares existentes, lo que provocaría un endurecimiento de la roca.

5.1.2 Aplicación de pulso de microondas.

En este caso, se aplica pulsos de microondas a partículas unitarias de mineral con intervalos on-off de 142 [ms] por 0, 4 y 8 [s]. Se utiliza mineral proporcionado por Codelco- Andina y se realiza el modelo de análisis propuesto en la Tabla 5.1 con rocas entre el rango de tamaño de 9,5 – 12,5 [mm] y con alta, media y baja ley de cobre.

Tabla 5.1 Modelo de análisis con tratamiento de microondas pulsado.

		Tratamiento Microondas		
		tiempo pulso, [ms]		
Rango tamaño		142		
[-12,5 ; +9,5]		tiempo exposición, [s]		
Muestra	% Cu	0	4	8
P-238379	2,045	x	x	x
P-238606	1.061	x	x	x
P-238450	0,546	x	x	x

A partir de la Figura 5.5 hasta la Figura 5.12 se presentan los resultados obtenidos de la aplicación pulsada de microondas analizando la probabilidad de fractura y el perfil granulométrico de los distintos minerales estudiados.

La Figura 5.5 muestra el comportamiento de fractura del mineral P-238450 (considerado de baja ley de cobre, 0,546%Cu). Se visualiza que la probabilidad de fractura entre replicas no presenta una conducta similar, alcanzando una diferencia de hasta 30,17% y una media de desviación estándar de 14,72% (particularmente en la réplica de la condición 4s/142ms), lo que permite demostrar la variabilidad de comportamientos a pesar de la caracterización química y rango granulométrico que presentan las partículas. Sin embargo, queda demostrado que el mineral expuesto a pulso de 142[ms] por 4 y 8 [s] no sufre un debilitamiento de su estructura, por el

contrario, se tiende a pensar que se endureció debido a que se requiere mayor fuerza aplicada para generar el mismo nivel de fractura.

En el perfil granulométrico (Figura 5.6), siguiendo la misma tendencia, las réplicas no permiten obtener una tendencia de comportamiento, quedando demostrado en la superposición de las curvas 8s/142ms R2 y sin aplicación de microondas (SMW). La información, hace pensar, que el tratamiento con microondas no genera un efecto en el mineral, esto es posible visualizarlo en la diferencia entre réplicas de 8s/142ms que alcanza una desviación estándar máxima de 14,93%.

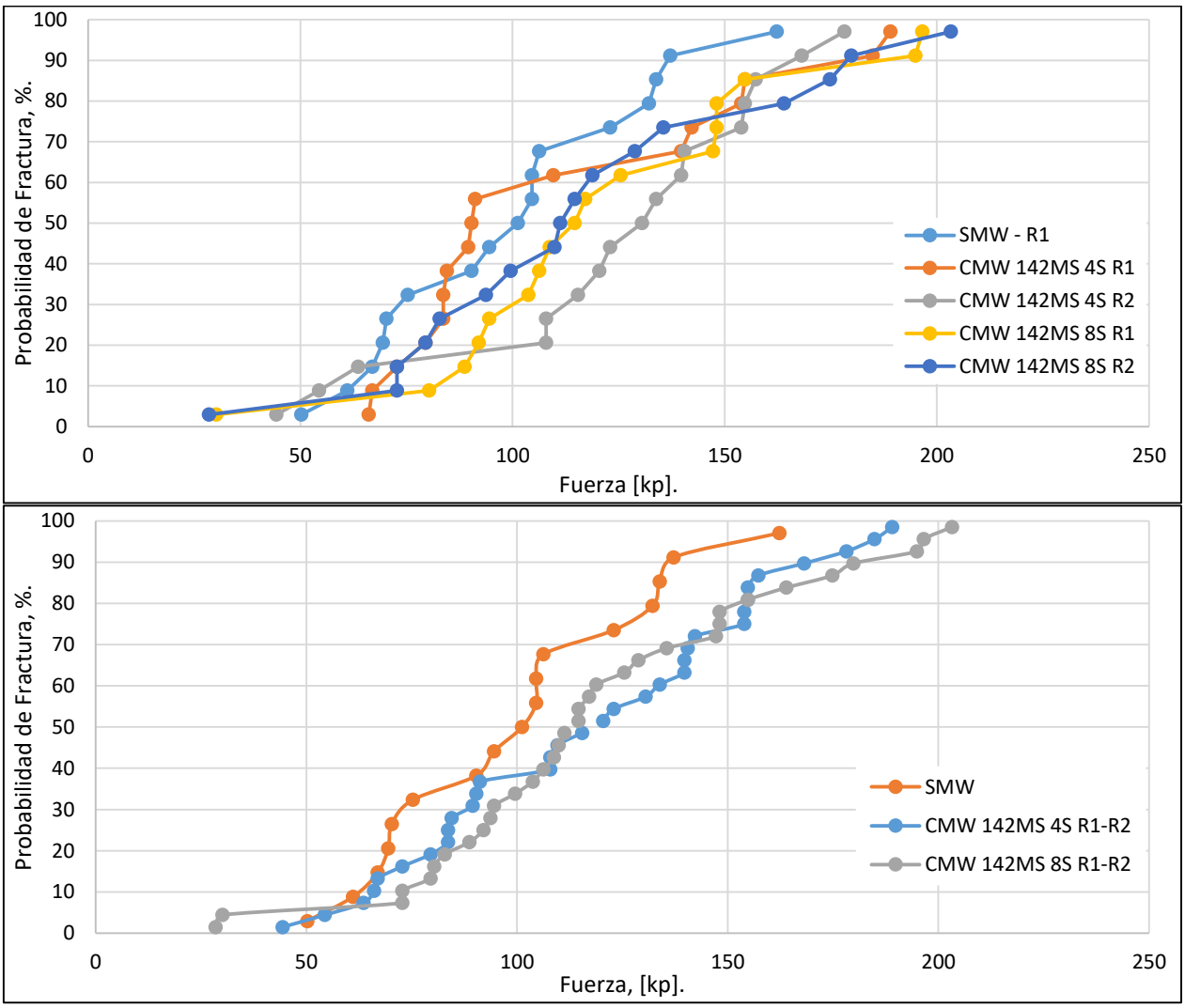


Figura 5.5 Probabilidad de Fractura mineral P-238450.

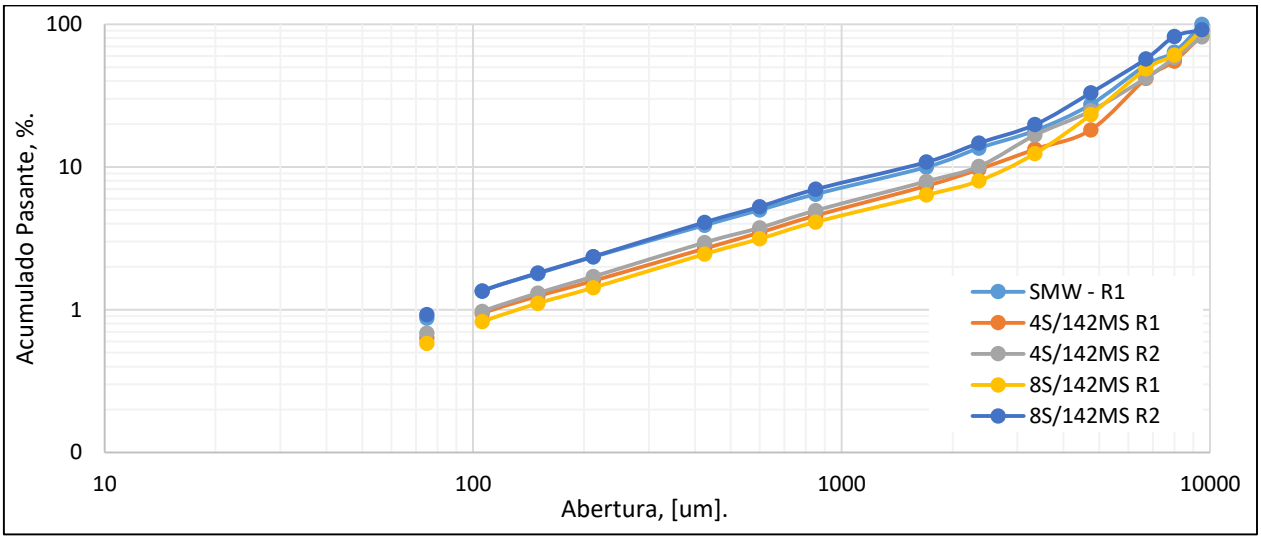


Figura 5.6 Perfil granulométrico mineral P-238450.

La Figura 5.7 muestra el comportamiento del mineral P-238606 con ley de 1,061% Cu. Similar al caso anterior la probabilidad de fractura no presenta una tendencia que permita generar conclusiones. Sin embargo, el gráfico de perfil granulométrico (Figura 5.8) muestra que el mineral que no es sometido a tratamiento tiene una dureza mayor en comparación a las partículas que sufren algún calentamiento producto de la exposición del pulso de microondas. Se infiere, que, para minerales con un nivel mayor de zona sulfurada en su estructura, la exposición a pulsos de microondas genera un efecto que permite generar una fracción mayor de finos, alcanzando una diferencia de 18,68% de acumulado pasante respecto a los minerales sin tratamiento de microondas.

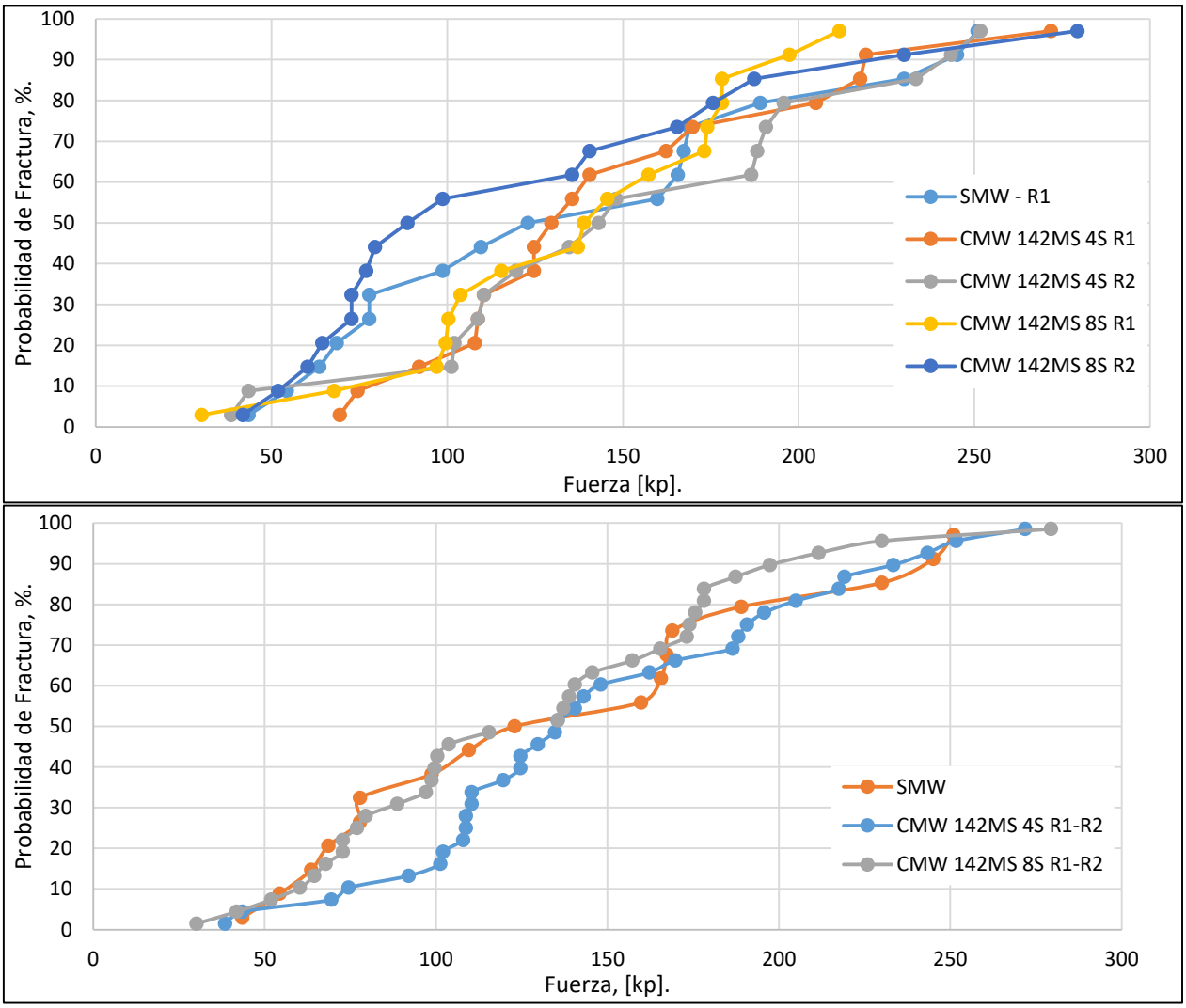


Figura 5.7 Probabilidad de Fractura mineral P-238606.

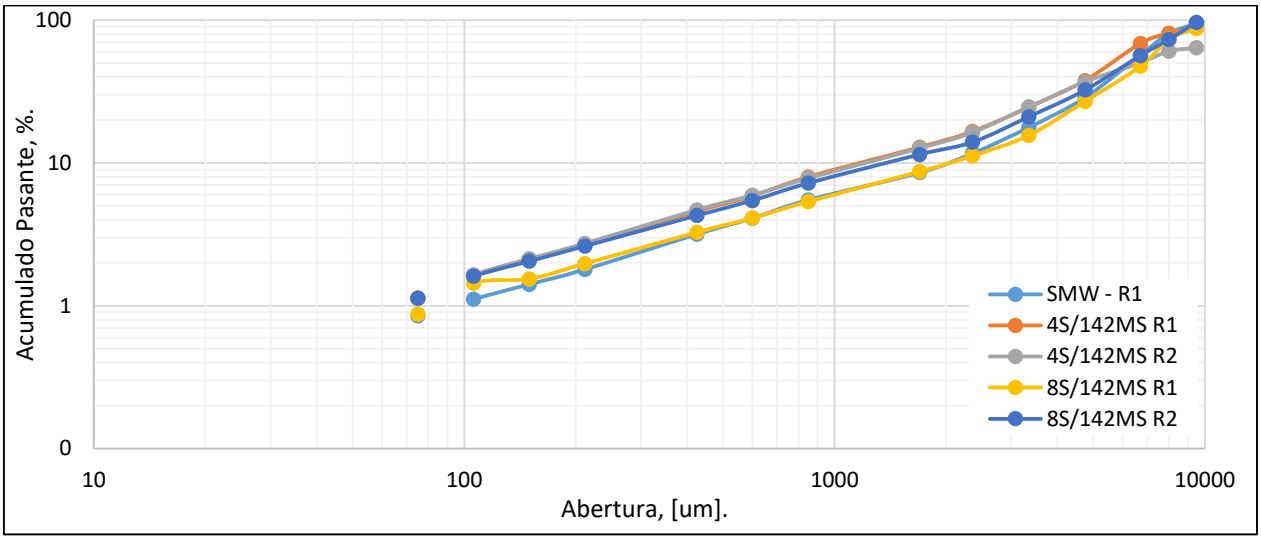


Figura 5.8 Perfil granulométrico mineral P-238606.

De forma similar al caso anterior, el mineral P-238379 (Figura 5.9), no presenta una tendencia de operación con respecto a la probabilidad de fractura. Las curvas obtenidas se superponen y no mantienen un comportamiento constante. Sin embargo, cuando se grafica el promedio de las réplicas, la tendencia muestra que entre el rango de fuerza aplicada de 100 [kp] hasta 200 [kp], el mineral que no fue sometido a tratamiento presenta un comportamiento de fractura mayor respecto a las condiciones con aplicación de pretratamiento.

Al observar el perfil granulométrico (Figura 5.10), se aprecia que el pulso de 142 [ms] por 4 [s] de aplicación genera un debilitamiento de la estructura, en comparación a las partículas mineral que no fue sometida a microondas, esto se debe a la variación de temperatura creada por los pulsos de microondas, que generan contracción y expansión de las zonas sulfuradas permitiendo obtener microgrietas en la estructura. Por su parte, las rocas expuestas a 8[s] presentan una fragmentación mayor luego de aplicar la energía de ruptura, en comparación a las que no fueron sometidas tratamiento, pero no superior a las que estuvieron expuestas por 4[s]. Se estima, que esta condición se debe a que al exponer las partículas minerales a un tiempo mayor de microondas la energía absorbida produce un calentamiento tal de la estructura que no alcanza a enfriarse durante el pulso Off, lo que impediría, en cierta medida, la

contracción de la zona sulfurada, por lo tanto, no permite una fragilización mayor de la partícula mineral.

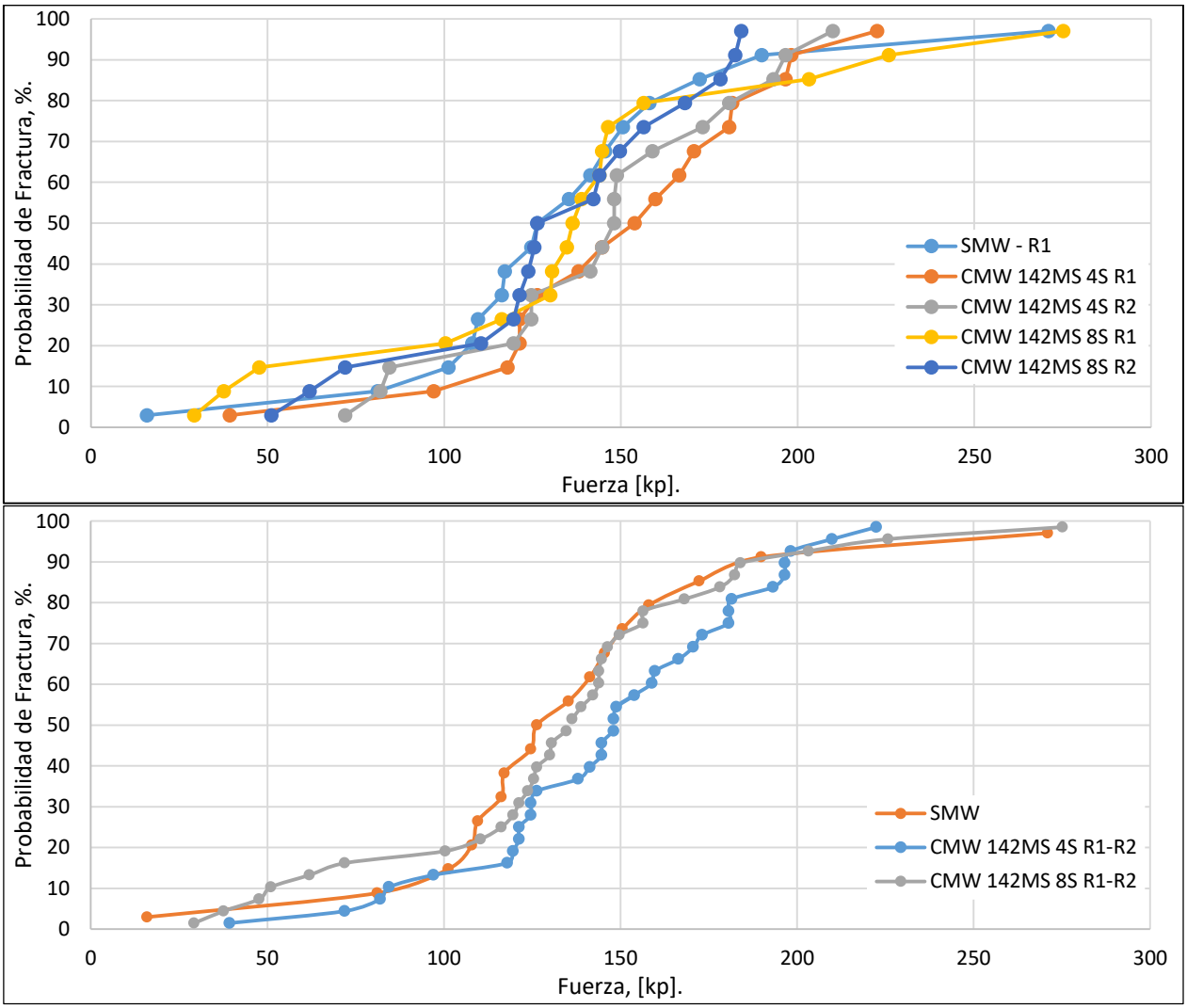


Figura 5.9 Probabilidad de Fractura mineral P-238379.

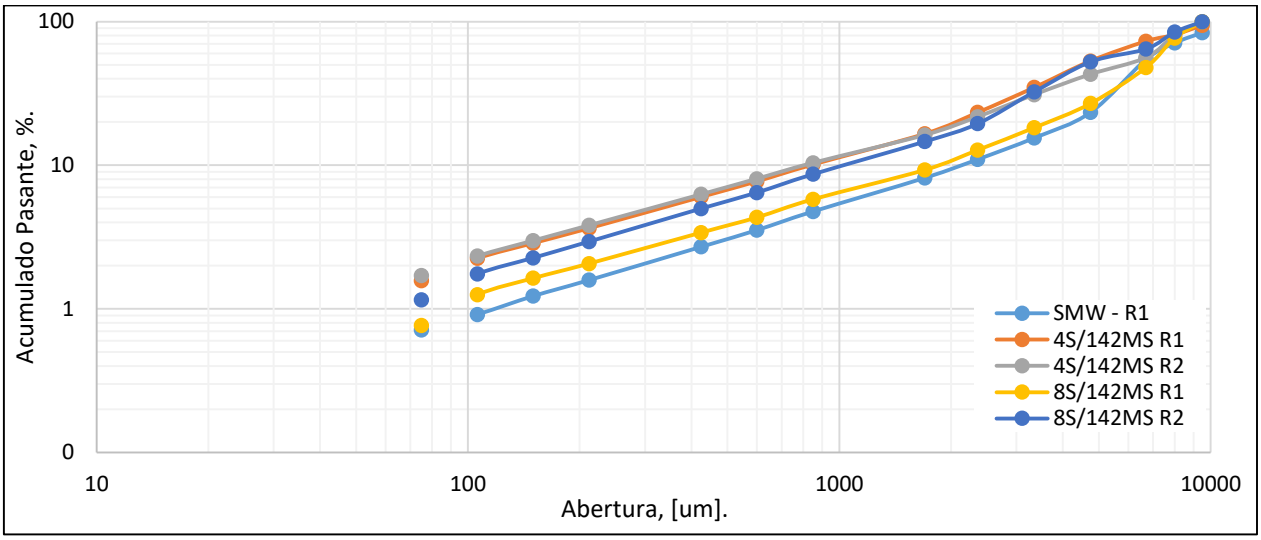


Figura 5.10 Perfil granulométrico mineral P-238379.

Se evaluó aplicar pulsos de microondas on-off de 500[ms]. Los resultados se presentan en Figura 5.11 y **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**. Esta vez, la probabilidad de fractura permite visualizar que la condición con 500[ms] a 4 y 8 [s] de exposición es favorable, respecto a las partículas sometidas a 142[ms]. Sin embargo, al observar el perfil granulométrico el estado de 4[s] y 142[ms] es la condición que presenta mayor reducción de tamaño en función de la energía aplicada; la nueva condición presenta un debilitamiento en la estructura, en comparación al segmento sin exposición de microondas, pero de forma similar a la condición de 142[ms]/8[s] se “endurece” por exceso de energía.

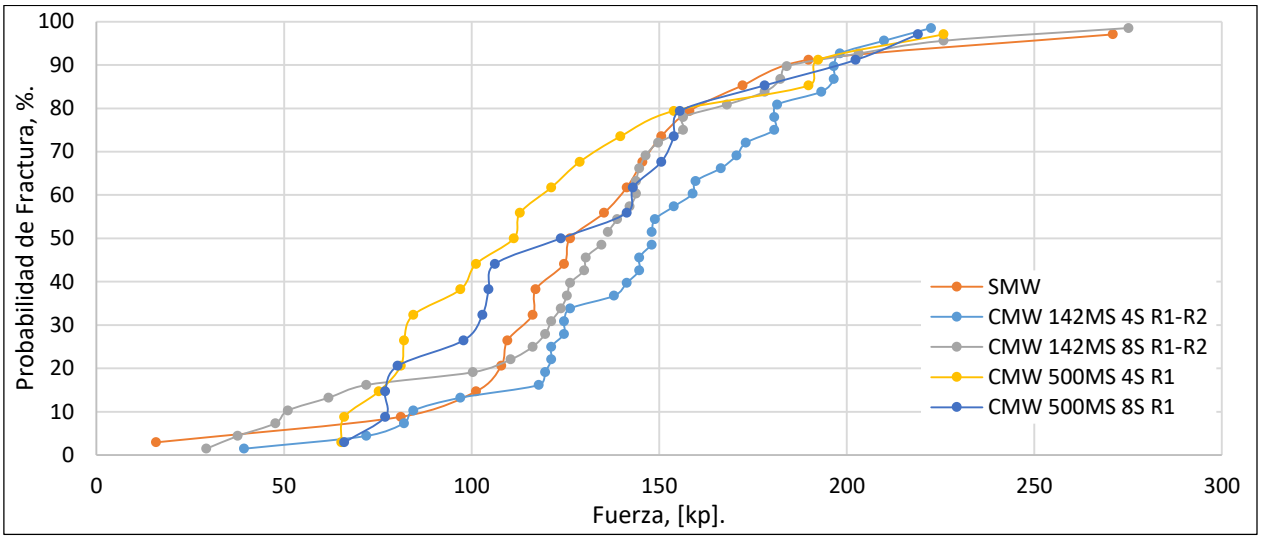


Figura 5.11 Probabilidad de Fractura mineral P-238379 – con 500[ms] pulso.

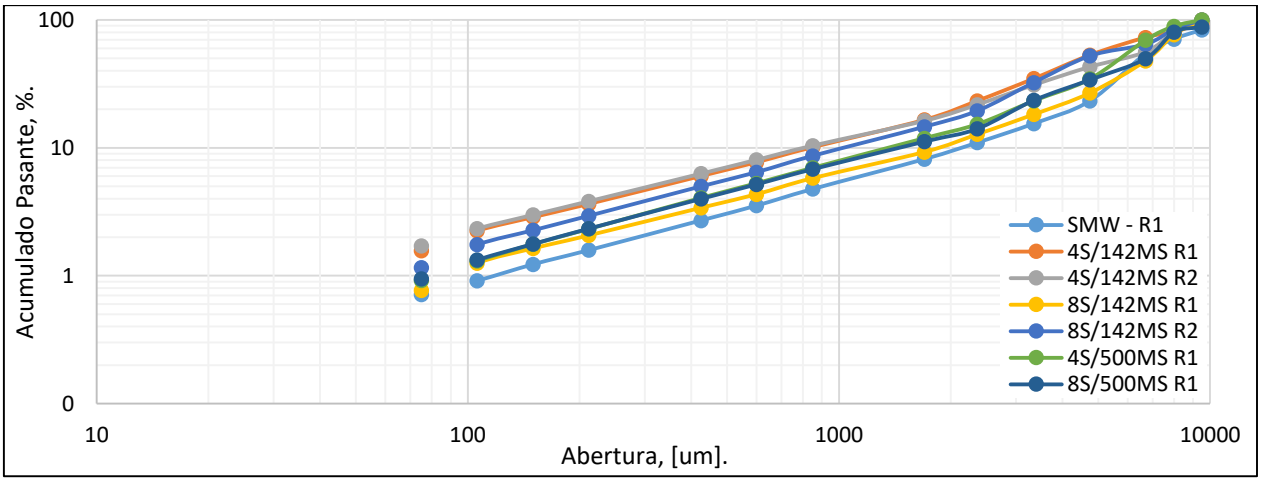


Figura 5.12 Perfil granulométrico mineral P-238379 – con 500[ms] pulso.

5.1.3 Consideraciones sobre el desempeño del ensayo.

El factor de forma de las partículas que se ensayan es un factor relevante en la variabilidad de los datos de ruptura, en particular su espesor respecto de su largo y ancho. Las dos dimensiones mayores determinan mayoritariamente el tamiz en que es retenida una partícula, sin que haya ninguna relación con el espesor. Además, distintos minerales tienen distintos hábitos de fractura, lo que genera variación en la forma de partícula y en su comportamiento en compresión. Para comparar valores de resistencia a la fractura se requiere normalizar los datos. El cálculo de un diámetro esférico

equivalente de partícula en base a la masa o el área proyectada agrega varianza y enmascara el efecto de la forma. Está previsto realizar un experimento en que manualmente se registre este factor en una muestra monotamaño, para evaluar cuantitativamente su efecto. Si se encuentra que genera una reducción relevante en la dispersión, se justifica construir un hardware/software que registre y evalúe fotográficamente los diámetros de Feret de cada partícula, y en una etapa más avanzada, que pueda clasificar (separar) partículas según criterios de forma. Un método alternativo es usar un scanner 3D, aunque aparatos con resolución adecuada para los tamaños de partícula de interés son de muy alto costo.

5.2 Resultados SSITest, equipo a escala laboratorio.

5.2.1 Aplicación de pulso de microondas.

El equipo SSITest, se diseñó estudiando el comportamiento de ruptura del ensayo Drop Weight Test de la empresa australiana JK, pero con dimensiones estructurales y de aplicación de energía menores lo que permite ejecutar ensayos con tiempo de respuesta cortos y replicables.

El prototipo desarrollado permite estudiar partículas de tamaño entre 4,75 a 12,5 [mm] con aplicación de energía de ruptura de 0,1 a 2,5 [kWh/t] (energía aplicada variable debido a que se manipula la altura y masa del objeto contundente que provoca la fractura). Se utilizan 30 [gr] de muestra, compuesto por 15-100 rocas, dependiendo del rango de tamaño analizado.

Dado que la técnica de ruptura tiene como referente el ensayo DWT, se asimila la evaluación del test, reportando la relación de distribución de tamaño con respecto a la energía especifica aplicada a las partículas mineral. Todos los fragmentos generados se someten a análisis de tamaño, obteniendo el perfil granulométrico de las rocas sometidas a la carga de ruptura, reduciendo la información a valores t_n. Este valor se define como el porcentaje pasante acumulado del tamaño 1/n del tamaño original de la partícula, por ejemplo, si la operación es llevada a cabo con partículas de tamaño entre 9,5 a 12,5 [mm], el tamaño medio de partícula es de 10,89[mm], lo que equivale a un tamaño de t_{10} de 1,089[mm] (o 1089,72 [um]), por lo tanto el % acumulado pasante se encuentra entre el tamiz #12 y #20, por ende, el valor de t_{10}, para esta muestra tipo será igual a 2,78%.

Los resultados obtenidos son definidos por la ecuación (12).

$$t_{10} = A(1 - e^{-b \cdot E_{cs}}) \quad \textbf{(12)}$$

Donde:

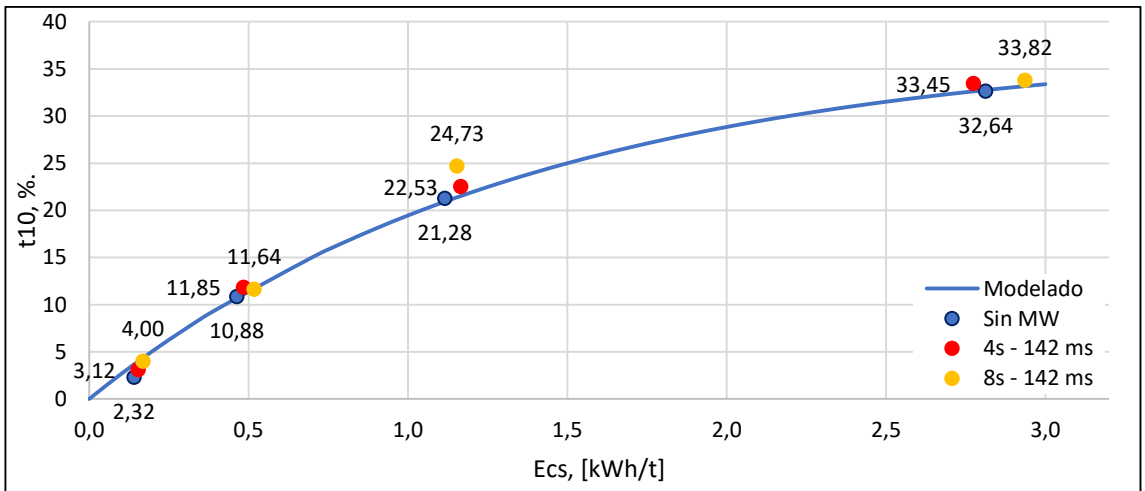
$A\ y\ b$ = Parámetros específicos de DWT.

E_{cs} = Energía especifica de fractura, [kWh/t].

A partir de la ecuación es posible determinar los valores de los parámetros A y b. El producto de estos indicadores, Axb, permite relacionar de forma cualitativa la dureza que presenta el mineral.

Para analizar el comportamiento del equipo, se desarrolla un modelo exploratorio utilizando el mineral P-238450 con tamaño de partículas entre 9,5 a 12,5 [mm] y aplicación de pulsos de microondas de 142[ms] on-off por tiempo de exposición de 0, 4 y 8 [s].

La Figura 5.13, muestra los valores t_{10} para las diferentes condiciones de exposición de microondas. Al observar la data, en los niveles de energía cercano a 0,1 y 1 [kWh/t] es posible apreciar que el mineral sometido por 8s-142ms de microondas sufre un debilitamiento de la estructura. Al analizar los valores Axb, la tendencia cualitativa afirma lo antes anunciado, debido a que a mayores valores de Axb más frágil es la estructura del mineral, por lo tanto, presenta menor nivel de dureza.



Sin MW		4s - 142 ms		8s - 142 ms	
A	37,60	A	38,37	A	37,57
b	0,73	b	0,75	b	0,83
Axb	27,39	Axb	28,65	Axb	31,04

Figura 5.13 t10 modelado (Sin MW) v/s t10 observado.

Los perfiles granulométricos, de la Figura 5.14, indican la fracción acumulado pasante de mineral al aplicar diferentes niveles de energía de ruptura. El gráfico con 0,1 [kWh/t] presenta una tendencia a lo largo de la curva donde nuevamente el mineral con 8s-142[ms] de microondas tiene un mayor nivel de fractura, esto se debe a la fragilización

(o microgrietas generadas) producto del efecto de calentamiento-dilatación y enfriamiento-contracción de la zona sulfurada presente en el mineral. Cuando se aplica energía mayor de ruptura, la diferencia entre las curvas prácticamente no existe, se sobreponen, esto queda claramente identificado en el gráfico de 2,5[kWh/t]. Lo que indica que la energía aplicada fue excesiva, generando pulverización de la partícula mineral, impidiendo determinar un efecto de microondas.

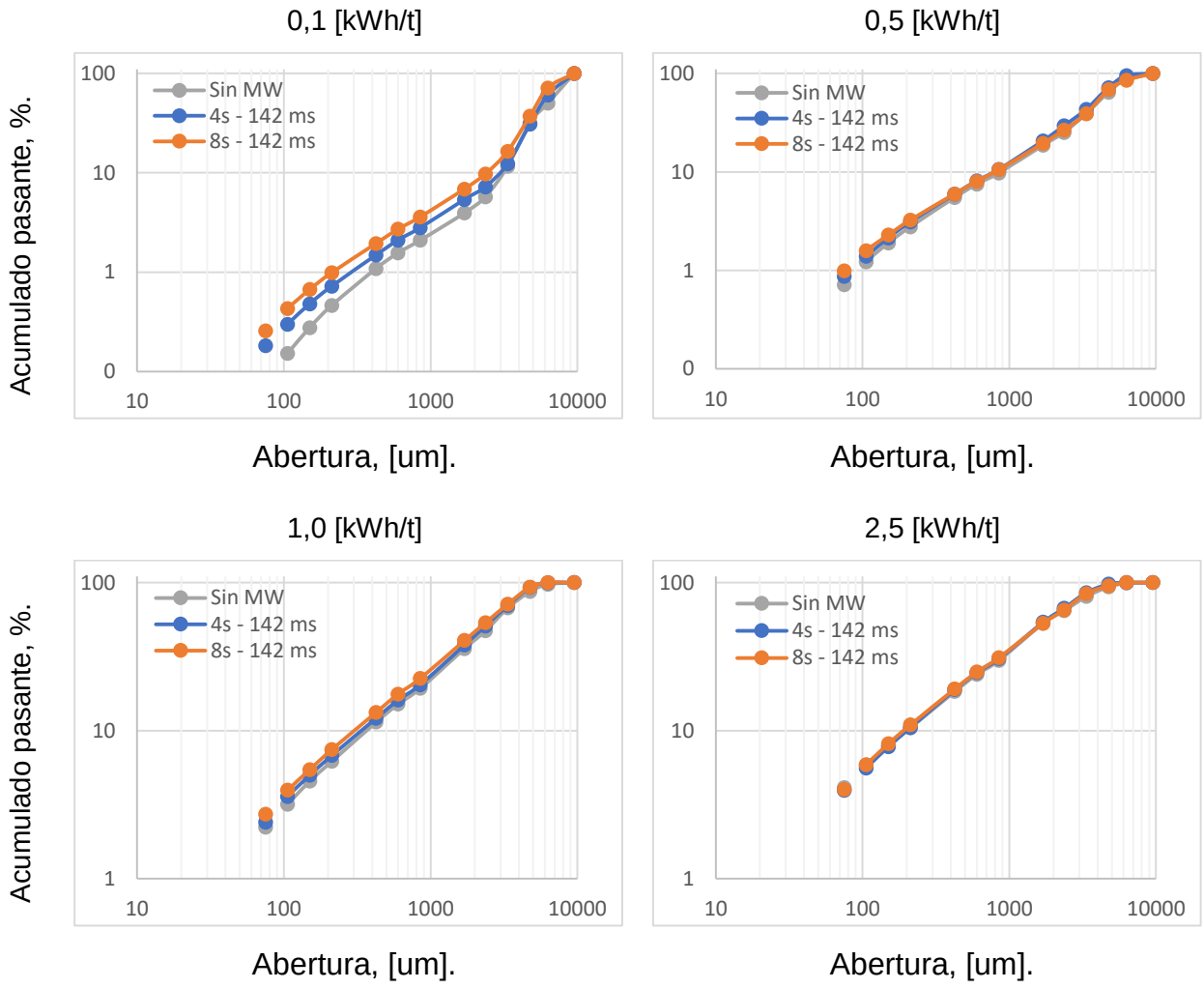


Figura 5.14 Perfil Granulométrico con y sin aplicación MW.

5.2.2 Caracterización mineral con prototipo SSITest.

5.2.2.1 Resultados Energía Especifica.

Se caracterizó mineral (que no fue sometido a la aplicación de microondas) utilizando el prototipo SSITest. Para el rango de tamaño [+4,75 ; -6,3] se utilizaron 100 partículas, en el caso de la muestra de [+6,3 ; -9,5] se fracturaron 30 rocas y para el rango de tamaño mayor entre [+9,5 ; -12,5] se extrajo 15 rocas para la prueba. Cada muestra cuenta con 30 [gr]. A continuación, se presentan los resultados obtenidos para los tres rangos de tamaño.

La Tabla 5.2 presenta la Energía nominal aplicada a las rocas minerales en el rango de tamaño entre 4,75 a 6,3 [mm], además se indica la energía especifica (Ecs) promedio real de fractura utilizada con su respectiva desviación estándar y coeficiente de variación.

De forma adicional, se detalla la tendencia de valor máximo y mínimo, respecto al análisis de promedio y la desviación estándar. En forma paralela se presenta el valor máximo y mínimo obtenido en cada réplica de las pruebas desarrolladas.

Tabla 5.2 Variación Energia Especifica , rango de tamaño partículas [+4,75 ; -6,3].

Tamaño partícula	[+4,75 ; -6,3]							
E° nominal	0,1		0,5		1		2,5	
Replica	R1	R2	R1	R2	R1	R2	R1	R2
Promedio Ecs	0,182	0,196	0,521	0,492	1,204	1,246	2,706	2,719
Desv Stand Ecs	0,062	0,065	0,196	0,164	0,394	0,448	0,905	1,121
Coef variación Ecs	33,90%	33,34%	37,60%	33,41%	32,70%	35,94%	33,45%	41,22%
(x+σ)	0,244	0,262	0,717	0,656	1,597	1,694	3,611	3,839
(x-σ)	0,121	0,131	0,325	0,328	0,810	0,798	1,801	1,598
Error : (x+σ)/x	34%	33%	38%	33%	33%	36%	33%	41%
Error : (x-σ)/x	34%	33%	38%	33%	33%	36%	33%	41%
Valor Max	0,330	0,392	1,031	1,069	2,257	2,706	5,733	7,059
Valor Min	0,064	0,076	0,172	0,201	0,570	0,592	1,294	1,048
Error : (x+vmax)/x	81%	100%	98%	117%	88%	117%	112%	160%
Error : (x+vmin)/x	65%	61%	67%	59%	53%	52%	52%	61%

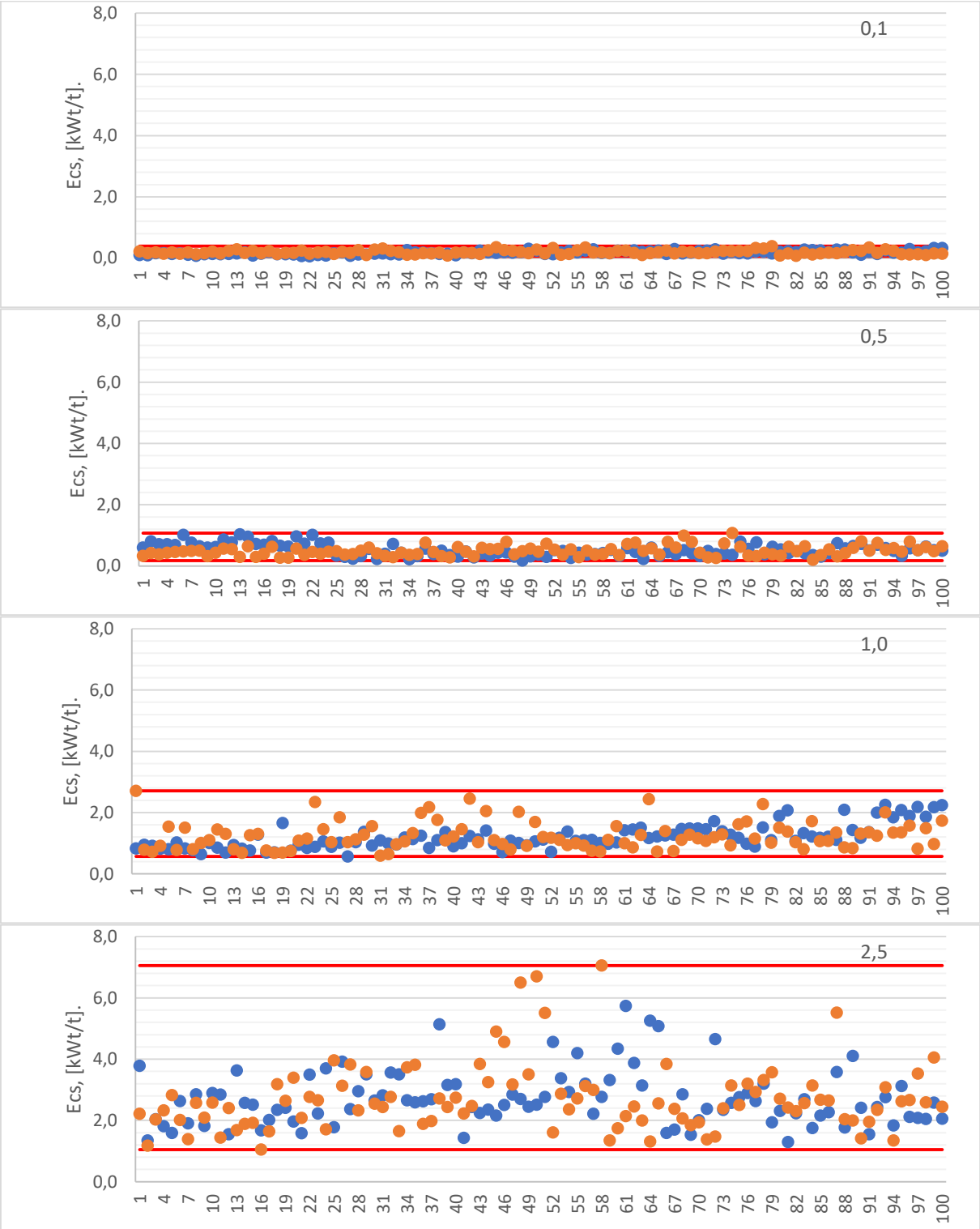


Figura 5.15 Concentración valores de réplicas, rango de tamaño [+4.75 ; -6,3].

Los gráficos presentados en la Figura 5.15 muestran la variación existente entre réplicas y los valores de energía obtenidos al generar la ruptura de las partículas. Al utilizar 2 réplicas por rango de energía se obtiene un coeficiente de variación promedio de 35,2%, con un error respecto a la variación estándar de 35%.

Similar al caso anterior, pero ahora analizando la energía especifica de ruptura de las partículas de tamaño entre 6,3 y 9,5 [mm], se presenta la información obtenida en la Tabla 5.3, desde donde se extrae información del coeficiente de variación promedio que alcanza un valor de 41,3%.

Tabla 5.3 Variación Energía Específica , rango de tamaño partículas [+6,3 ; -9,5].

Tamaño partícula	[+6,3 ; -9,5]											
E° nominal	0,1			0,5			1			2,5		
Replica	R1	R2	R3	R1	R2	R3	R1	R2	R3	R1	R2	R3
Promedio	0,110	0,110	0,127	0,379	0,387	0,368	0,947	0,976	0,930	2,334	1,982	2,233
Desv Stand	0,036	0,030	0,067	0,153	0,165	0,138	0,471	0,459	0,436	1,359	0,419	0,887
Coef variación	32,87%	27,09%	52,57%	40,40%	42,55%	37,57%	49,77%	47,04%	46,85%	58,21%	21,13%	39,73%
(x+σ)	0,146	0,140	0,194	0,533	0,552	0,506	1,419	1,435	1,366	3,693	2,401	3,121
(x-σ)	0,074	0,080	0,060	0,226	0,222	0,229	0,476	0,517	0,494	0,975	1,564	1,346
Error: (x+σ)/x	33%	27%	53%	40%	43%	38%	50%	47%	47%	58%	21%	40%
Error: (x-σ)/x	33%	27%	53%	40%	43%	38%	50%	47%	47%	58%	21%	40%
Valor Max	0,186	0,161	0,285	0,722	0,860	0,716	2,383	2,134	2,369	6,283	2,811	4,290
Valor Min	0,055	0,047	0,035	0,182	0,174	0,189	0,459	0,334	0,498	0,840	0,999	0,680
Error: (x+vmax)/x	69%	47%	124%	90%	122%	95%	152%	119%	155%	169%	42%	92%
Error: (x-vmin)/x	50%	57%	72%	52%	55%	49%	52%	66%	46%	64%	50%	70%

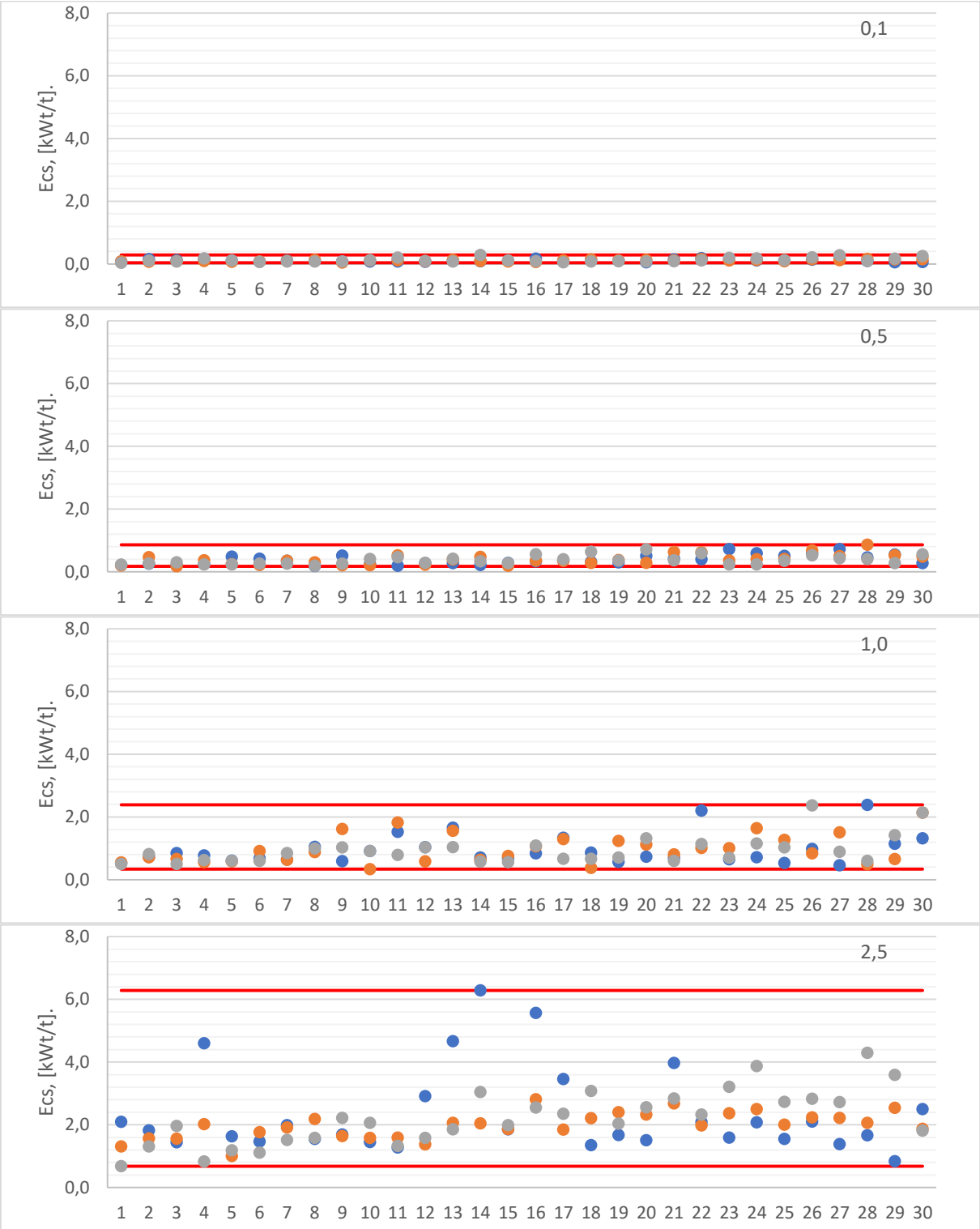


Figura 5.16 Concentración valores de réplicas, rango de tamaño [+6,3 ; -9,5].

De forma gráfica (Figura 5.16) se presenta la dispersión de la energía específica para las tres replicas realizadas. En el caso de energía 1,0 y 2,5 [kWh/t] se identifica de manera clara la zona donde se concentran los datos experimentales, existiendo algunos puntos que se desvían de lo planeado alcanzando como valor máximo de 2,4 y 6,3 [kWh/t], respectivamente, lo que genera un error considerablemente mayor y variable respecto al promedio de los datos.

Por su parte, las partículas de tamaño entre 9.5 y 12,5 [mm] sometidas al ensayo de fractura son estudiadas solamente con una réplica alcanza un coeficiente de variación de 40.8% (ver Tabla 5.4), lo que indica que los datos presentan una dispersión similar independiente del tamaño de las partículas, del tamaño de la muestra o de las réplicas realizas por ensayo. De forma gráfica se aprecia la distribución de los datos en la Figura 5.17.

Tabla 5.4 Variación Energía Específica, rango de tamaño partículas [+9,5 ; -12,5].

Tamaño partícula	[+9,5;-12,5]			
E° nominal	0,1	0,5	1	2,5
Replica	R1	R1	R1	R1
Promedio	0,053	0,177	0,445	1,111
Desv Stand	0,019	0,071	0,203	0,452
Coef variación	36,65%	40,18%	45,65%	40,69%
(x+σ)	0,073	0,248	0,647	1,564
(x-σ)	0,034	0,106	0,242	0,659
Error : (x+σ)/x	37%	40%	46%	41%
Error : (x-σ)/x	37%	40%	46%	41%
Valor Max	0,091	0,301	1,016	1,772
Valor Min	0,032	0,105	0,251	0,507
Error : (x+vmax)/x	71%	70%	129%	59%
Error : (x+vmin)/x	41%	41%	44%	54%

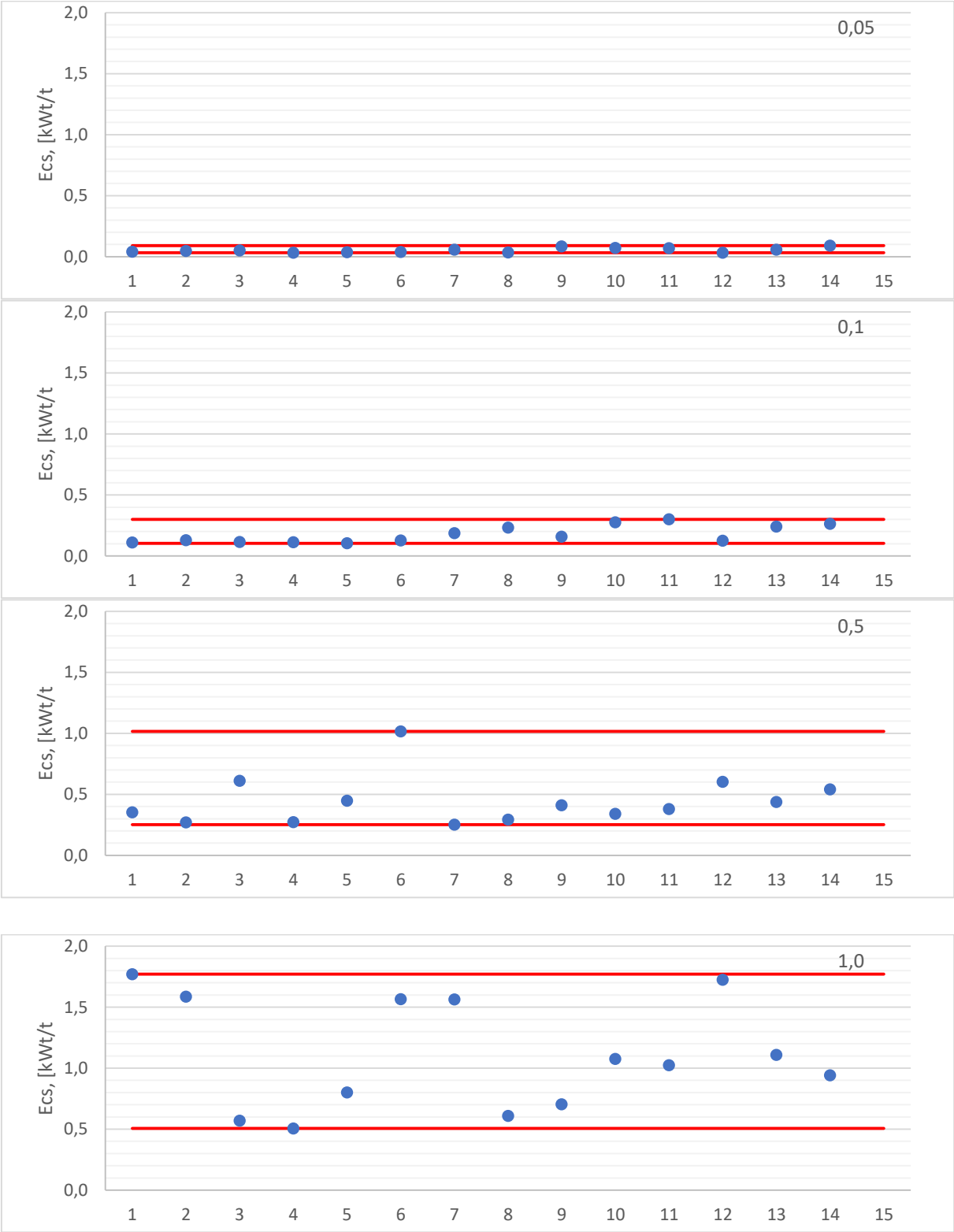


Figura 5.17 Concentración valores de réplica, rango de tamaño [+9,5 ; -12,5].

5.2.2.2 Evaluación de resultados.

Los resultados antes expuestos, en particular la evaluación del coeficiente de variación, tienen su origen en 3 factores preponderantes al momento de evaluar la Energia especifica de fractura. (ver ecuación (13)) estos son: altura de caída del objeto contundente que genera la fractura (h_{caida}), altura máxima de la roca que será sometida a fractura (h_{roca}) y masa de la roca que se some a fractura (m_{roca}). Los valores de masa del objeto contundente que produce la caida (m_{caida}) y aceleración de gravedad (g) son constantes.

$$E_{CS} = \frac{E_p}{m_{roca}} = \frac{m_{caida} \cdot g(h_{caida} - h_{roca})}{m_{roca}} \quad \textbf{(13)}$$

De cada uno de los factores, se determinó el valor promedio de cada replica realizada en el ensayo, su respectiva desviación estándar, coeficiente de variación y varianza, obteniendo los resultados presentados en la Tabla 5.5.

Se aprecia, que el coeficiente de variación que presenta mayor magnitud es el de la masa de la partícula, presentando un promedio de 37,5% considerando todos los ensayos realizados. Por su parte, la altura de la partícula y la altura de caída efectiva, presentan valor de coeficiente de variación de 23,7% y 0,37%, respectivamente.

Tabla 5.5 Evaluación de resultados Prueba SSITest.

			Promedio				Desviación Estándar				Coeficiente de Variación				Varianza			
			m_{roca}	h_{roca}	h_{caida}	Energía Específica	m_{roca}	h_{roca}	h_{caida}	Energía Específica	m_{roca}	h_{roca}	h_{caida}	Energía Específica	m_{roca}	h_{roca}	h_{caida}	Energía Específica
[+4,75 ; -6,3]	0,1	R1	0,251	0,437	19,563	0,182	0,099	0,099	0,099	0,062	39,54%	22,69%	0,51%	33,90%	0,010	0,010	0,010	0,004
		R2	0,230	0,421	19,579	0,196	0,080	0,111	0,111	0,065	35,04%	26,43%	0,57%	33,34%	0,006	0,012	0,012	0,004
	0,5	R1	0,293	0,484	19,517	0,521	0,118	0,104	0,104	0,196	40,41%	21,45%	0,53%	37,60%	0,014	0,011	0,011	0,038
		R2	0,299	0,428	19,572	0,492	0,098	0,115	0,115	0,164	32,74%	26,79%	0,59%	33,41%	0,010	0,013	0,013	0,027
	1	R1	0,317	0,504	49,497	1,204	0,112	0,107	0,107	0,394	35,40%	21,23%	0,22%	32,70%	0,013	0,011	0,011	0,155
		R2	0,240	0,415	39,585	1,246	0,078	0,116	0,116	0,448	32,31%	27,90%	0,29%	35,94%	0,006	0,013	0,013	0,201
	2,5	R1	0,333	0,514	49,486	2,706	0,104	0,091	0,091	0,905	31,23%	17,76%	0,18%	33,45%	0,011	0,008	0,008	0,820
		R2	0,275	0,431	39,569	2,719	0,101	0,115	0,115	1,121	36,66%	26,73%	0,29%	41,22%	0,010	0,013	0,013	1,256
[+6,3 ; -9,5]	0,1	R1	1,029	0,665	49,335	0,110	0,345	0,135	0,135	0,036	33,54%	20,25%	0,27%	32,87%	0,119	0,018	0,018	0,001
		R2	1,005	0,723	49,277	0,110	0,331	0,152	0,152	0,030	32,91%	21,07%	0,31%	27,09%	0,109	0,023	0,023	0,001
		R3	1,011	0,663	49,337	0,127	0,507	0,161	0,161	0,067	50,14%	24,24%	0,33%	52,57%	0,257	0,026	0,026	0,004
	0,5	R1	1,022	0,702	49,298	0,379	0,391	0,158	0,158	0,153	38,25%	22,57%	0,32%	40,40%	0,153	0,025	0,025	0,023
		R2	1,015	0,757	49,243	0,387	0,416	0,155	0,155	0,165	40,96%	20,44%	0,31%	42,55%	0,173	0,024	0,024	0,027
		R3	1,023	0,737	49,263	0,368	0,338	0,163	0,163	0,138	33,04%	22,11%	0,33%	37,57%	0,114	0,027	0,027	0,019
	1	R1	1,005	0,720	49,280	0,947	0,353	0,169	0,169	0,471	35,09%	23,47%	0,34%	49,77%	0,124	0,029	0,029	0,222
		R2	1,021	0,750	49,250	0,976	0,487	0,155	0,155	0,459	47,66%	20,64%	0,31%	47,04%	0,237	0,024	0,024	0,211
		R3	1,006	0,720	49,280	0,930	0,343	0,158	0,158	0,436	34,06%	22,01%	0,32%	46,85%	0,117	0,025	0,025	0,190
	2,5	R1	1,011	0,697	62,303	2,334	0,412	0,147	0,147	1,359	40,74%	21,15%	0,24%	58,21%	0,170	0,022	0,022	1,847
		R2	1,003	0,733	62,267	1,982	0,253	0,130	0,130	0,419	25,23%	17,67%	0,21%	21,13%	0,064	0,017	0,017	0,175
		R3	1,021	0,697	62,303	2,233	0,524	0,185	0,185	0,887	51,32%	26,52%	0,30%	39,73%	0,275	0,034	0,034	0,787
[+9,5 ; -12,5]	0,05	R1	2,054	0,943	49,057	0,057	0,758	0,218	0,218	0,024	36,90%	23,09%	0,44%	42,28%	0,575	0,047	0,047	0,001
	0,1	R1	2,092	0,997	49,003	0,183	0,776	0,232	0,232	0,073	37,08%	23,26%	0,47%	39,81%	0,602	0,054	0,054	0,005
	0,5	R1	2,011	0,943	49,057	0,467	0,740	0,260	0,260	0,215	36,79%	27,60%	0,53%	45,92%	0,547	0,068	0,068	0,046
	1	R1	2,009	0,827	62,173	1,102	0,849	0,344	0,344	0,437	42,25%	41,58%	0,55%	39,68%	0,720	0,118	0,118	0,191

5.2.2.3 Evaluación de la propagación de error.

El error, en la determinación del parámetro t_{10}, se puede estimar mediante la técnica de propagación. De la ecuación (14), es necesario descomponer la energía específica, que viene dada por la ecuación (15):

$$t_{10} = A(1 - e^{-bE_{cs}}) \quad \textbf{(14)}$$

$$E_{CS} = \frac{E_p}{m_{roca}} = \frac{m_{caida} \cdot g(h_{caida} - h_{roca})}{m_{roca}} \quad \textbf{(15)}$$

Combinando ambas ecuaciones se obtiene la ecuación (16):

$$t_{10} = A\left(1 - e^{-b\left[\frac{m_{caida} \cdot g(h_{caida} - h_{roca})}{m_{roca}}\right]}\right) \quad \textbf{(16)}$$

Donde:

$A\ y\ b$	=	Parámetros específicos de DWT.
E_{cs}	=	Energía especifica de fractura, [kWh/t].
E_p	=	Energía potencial, [kWh].
m_{roca}	=	Masa individual de la roca a ensayar, [gr].
m_{caida}		Masa del objeto contundente que cae desde una altura definida, [m].
g	=	Aceleración de gravedad, [m/s].
h_{caida}	=	Altura de caída del objeto contundente, [m].
h_{roca}	=	Altura individual de la roca a ensayar, [cm]

La ecuación (17) puede ser parcialmente derivable con respecto a h_{roca} y m_{roca} , los parámetros de mayor incertidumbre, quedando:

$$\frac{\partial t_{10}}{\partial h_{roca}} = -\frac{A \cdot b \cdot m_{caida} \cdot g \cdot e^{-\frac{b \cdot m_{caida} \cdot g(h_{caida} - h_{roca})}{m_{roca}}}}{m_{roca}} \quad \textbf{(17)}$$

$$\frac{\partial t_{10}}{\partial m_{roca}} = -\frac{A \cdot b \cdot m_{caida} \cdot g(h_{caida} - h_{roca}) \cdot e^{-\cdot\frac{b \cdot m_{caida} \cdot g(h_{caida} - h_{roca})}{m_{roca}}}}{{m_{roca}}^2} \quad \textbf{(18)}$$

La varianza de una función se puede encontrar a partir de sus derivadas según la ecuación (19).

$$V_{F_{(x)}} = \sum_i \left(\frac{\partial F}{\partial x_i}\right)^2 V_{x_i} \quad \textbf{(19)}$$

Por lo tanto queda la ecuación (20),

$$V_{t_{10}} = \left(\frac{\partial t_{10}}{\partial h_{roca}}\right)^2 V_{h_{roca}} + \left(\frac{\partial t_{10}}{\partial m_{roca}}\right)^2 V_{m_{roca}} \quad \textbf{(20)}$$

Al evaluar la expresión con el valor promedio de la varianza de h_{roca} y m_{roca} para un nivel de energía de 0,1 [kWh/t] se tiene que para:

- [+4,75 ; –6,3]:

$$V_{t_{10}} = \left(\frac{\partial t_{10}}{\partial h_{roca}}\right)^2 0{,}011 + \left(\frac{\partial t_{10}}{\partial m_{roca}}\right)^2 0{,}008$$

- [+6,3 ; –9,5]:

$$V_{t_{10}} = \left(\frac{\partial t_{10}}{\partial h_{roca}}\right)^2 0{,}022 + \left(\frac{\partial t_{10}}{\partial m_{roca}}\right)^2 0{,}162$$

- [+9,5 ; –12,5]:

$$V_{t_{10}} = \left(\frac{\partial t_{10}}{\partial h_{roca}}\right)^2 0{,}054 + \left(\frac{\partial t_{10}}{\partial m_{roca}}\right)^2 0{,}602$$

De forma similar, pero ahora evaluando los valores de varianza para el nivel de energía de 1,0 [kWh/t] se obtiene lo siguiente:

- [+4,75 ; –6,3]:

$$V_{t_{10}} = \left(\frac{\partial t_{10}}{\partial h_{roca}}\right)^2 0{,}012 + \left(\frac{\partial t_{10}}{\partial m_{roca}}\right)^2 0{,}009$$

- [+6,3 ; –9,5]:

$$V_{t_{10}} = \left(\frac{\partial t_{10}}{\partial h_{roca}}\right)^2 0{,}026 + \left(\frac{\partial t_{10}}{\partial m_{roca}}\right)^2 0{,}160$$

- [+9,5 ; –12,5]:

$$V_{t_{10}} = \left(\frac{\partial t_{10}}{\partial h_{roca}}\right)^2 0{,}118 + \left(\frac{\partial t_{10}}{\partial m_{roca}}\right)^2 0{,}720$$

La diferencia considerable, respecto a los valores de varianza, se produce principalmente en la muestra de tamaño mayor, entre 9,5 y 12,5 [mm]. Sin embargo, y considerando el factor que acompaña a la varianza como un valor constante, se confirma que la variable que provoca la mayor dispersión en el cálculo de energía especifica de fractura es la masa de la partícula en estudio. Esto nos permite evaluar un error constante de la medición debido a la influencia variable de la masa de la roca ya sea por su densidad o forma (regular, plana, entre otras).

5.2.2.4 Resultados t10 vs Energia especifica.

Los resultados obtenidos son analizados con 0,1 – 0,5 – 1 y 2,5 [kWh/t] de energía de ruptura aplicada teórica (variando en el caso de la muestra [-12,5 ; +9,5] donde se utilizó 0,01 – 0,1 – 0,5 y 1 [kWh/t], esta variación se produce por un error cometido a la hora de realizar la prueba).

Los resultados de energía específica aplicada, presentados en la Tabla 5.6, son calculados y analizados como promedio real del set de datos de prueba de ruptura. Se asocia el término “real” debido a que se midió la altura de cada partícula sometida al test de impacto, además de la altura de caída y la masa del objeto contundente que produce la fractura, lo que permite obtener una energía especifica de ruptura para cada partícula fracturada.

El ensayo con el equipo SSITest permitió obtener un valor de Axb de 52,4 lo que indica que las rocas sometidas al test presentan una alta resistencia al impacto. Resultado esperable, debido a que al utilizar partículas de menor tamaño (en comparación al ensayo DWT de JK), estas presentan menor cantidad de fracturas internas que proporcionen un debilitamiento en la estructura, y por ende, mayor nivel de dureza.

Tabla 5.6 Resultados ensayo SSITest.

Data Base SSITEST

[-12,5 ; +9,5]		[-9,5 ; +6,3]		[-6,3 ; +4,75]	
t10	**Ecs**	**t10**	**Ecs**	**t10**	**Ecs**
2,78	0,06	4,45	0,12	5,73	0,19
11,4	0,18	14,29	0,38	14,41	0,51
23,8	0,47	24,64	0,95	22,38	1,22
28,9	1,1	28,55	2,18	28,34	2,71

Parámetros molienda SAG/FAG

A	b	Axb
28,76	1,82	52,4

Parámetros chancado

t10	t75	t50	t25	t4	t2
10	1,7	2,6	4,5	20,7	52,7
20	3,5	5,9	9,8	45,3	81,3
30	6,2	8,8	18	74,1	101,2

Data potencia

	Mean Size (mm)		
	10,9	7,74	5,47
t10	**Ecs (kWh/t)**		
10	0,16	0,26	0,35
20	0,38	0,69	1,01
30	1,15	2,29	2,87

La Figura 5.18 grafica la curva modelada y los datos obtenidos experimentalmente. El grado máximo de ruptura, indicado por el valor A, o valor asíntota con respecto al t10, revela que, al aplicar altas energías de fractura, se produce una mínima reducción adicional de tamaño en las partículas.

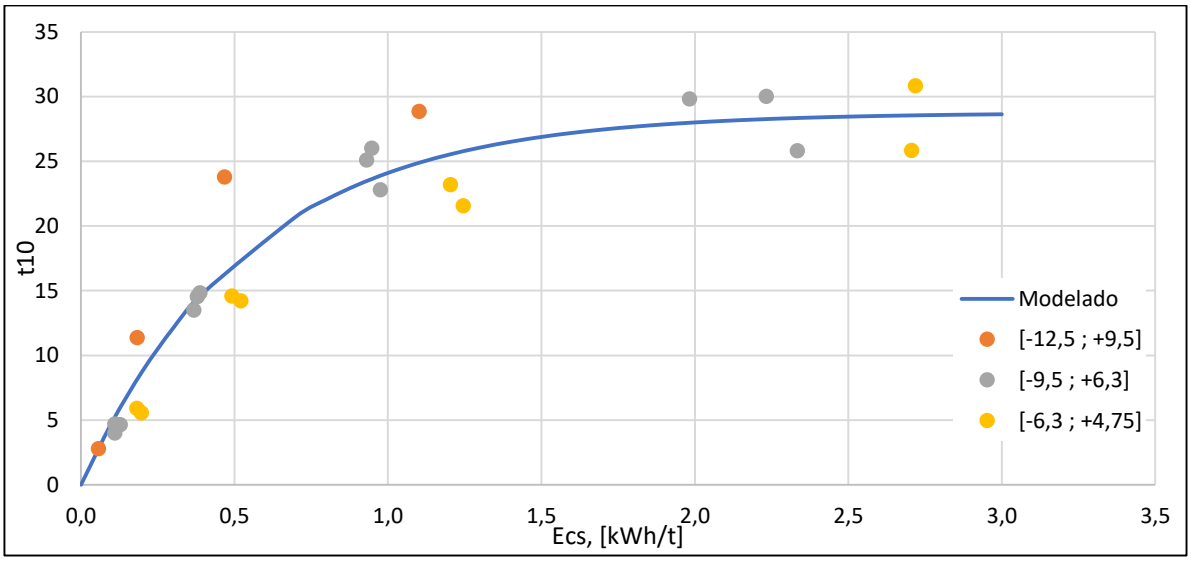


Figura 5.18 Resultados SSITest.

Al graficar t10 vs tn (Figura 5.19) se observa en las curvas la misma correlación reportada para el DWT [28], lo que permite estimar una distribución granulométrica completa de la fragmentación conociendo el dato de t_{10}.

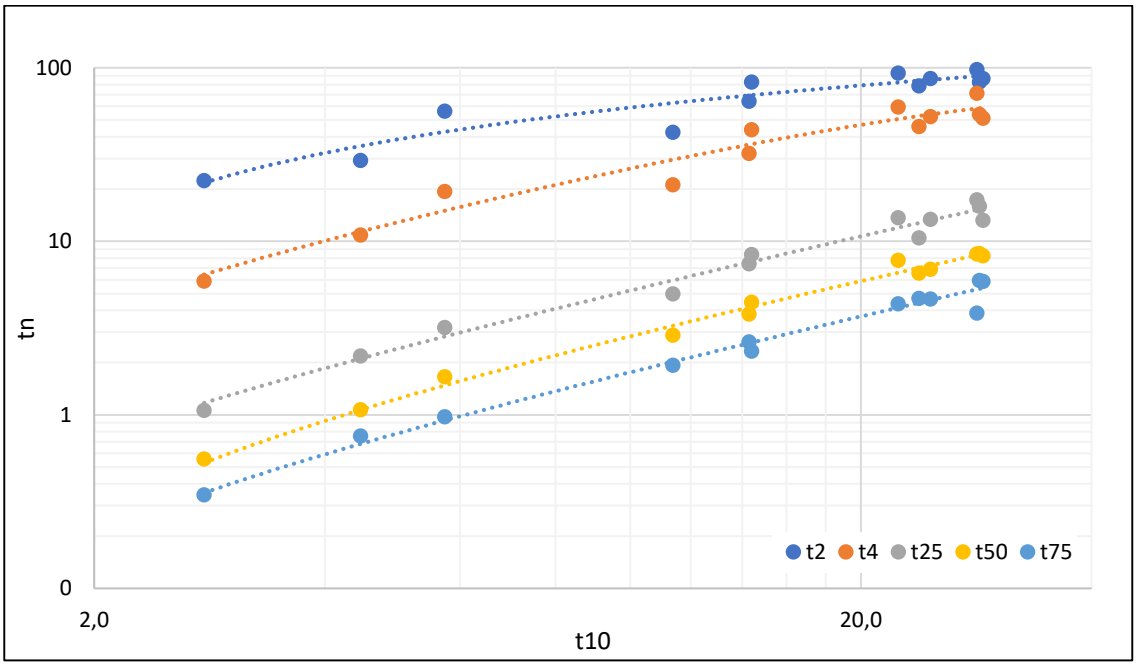


Figura 5.19 Resultados t10 vs tn.

CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

El objetivo de este trabajo fue desarrollar técnicas de medición que permitiera evaluar el efecto de un tratamiento con microondas bajo una carga y energía específica de ruptura de partículas de mineral tratado.

- Con respecto a la hipótesis de que el efecto de las microondas se reflejará principalmente en la fuerza de ruptura de partícula, los resultados refutan esta hipótesis. El promedio de la fuerza de ruptura se mantiene más o menos constante, con una leve tendencia ascendente en gran parte de los experimentos realizados. Cabe destacar que las microondas se aplicaron en régimen continuo y las causas de este fenómeno son desconocidas.
- El comportamiento general conocido del DWT con partículas entre 65 y 13 [mm] se replica en el rango de tamaño de partícula de 12 a 4 [mm]. Sin embargo, se requiere verificar si la coincidencia es completa o solo cualitativa. Esto último requeriría de un factor de ajuste para los resultados obtenidos.
- La aplicación de microondas pulsadas genera un alza del indicador t_{10} para un valor dado de energía específica E_{cs}, lo que corrobora la hipótesis inicial. La magnitud de esta alza depende del material utilizado.

Sobre los métodos de medición desarrollados, caben las siguientes conclusiones específicas:

- La medición de fuerzas de ruptura de partículas permite construir distribuciones de probabilidad de fractura en función del nivel de carga. Los resultados se obtienen con relativa rapidez. Sin embargo, la mediana de la fuerza de ruptura entregada por la prensa es una magnitud que no tiene dimensión de energía, y por ello solo entrega resultados comparativos de tendencia. La capacidad de discriminar de las mediciones requiere de un número de muestras no inferior a 40, lo cual hace que se requiera varias horas para obtener un resultado. Por el hecho de usar un sistema neumático, al colapsar la partícula, el pistón de la prensa continúa avanzando, aplicando carga sobre los fragmentos y generando por ello fractura secundaria, que impide relacionar la carga observada con el tamaño de los fragmentos. Si se hubiese utilizado una prensa con hilo o una que

al momento de la fractura permaneciera estática, sin desplazamiento posterior, claramente habría sido más útil porque se podría tener información de la energía aplicada y la relación con el tamaño generado lo que permitía calcular un t10 o valor de dureza.

- En relación con el DWT miniaturizado, sus resultados muestran la dependencia característica de crecimiento exponencial inverso que converge a un valor máximo. Los valores cuantitativos presentan valores más altos que lo habitual en la industria. Hipótesis explicativas de este resultado son el menor rango de tamaño de partículas ensayadas, que podría presionar al alza de los resultados, y el hecho de usar una bola como cuerpo de impacto en vez de un cilindro de cara plana. Esto minimiza la fractura secundaria, con lo cual se reduce el t10 observado. El trabajo futuro con el ensayo tendría que dilucidar este aspecto.
- La debilidad que presenta el DWT miniaturizado es el número creciente de partículas que es necesario ensayar para reunir una masa que entregue a su vez un tamizado estadísticamente válido, lo que tiende a alargar los tiempos de ensayo y hace recomendable su mecanización y automatización.

La precisión de la prueba dependerá principalmente de la masa de la partícula que será sometida a fractura, pero sin dejar de considerar la altura de la roca como un factor relevante al momento de hacer un análisis estadístico, esta información se desprende del valor de varianza y desviación estándar que presentan los resultados de la prueba realizada con el equipo SSITest a muestra sin aplicación de microondas. La precisión dependerá exclusivamente de la distribución de resultados y debido a la variabilidad en la masa de la partícula y la altura de la roca (que dependerá de la morfología de la partícula) se debe generar un margen de error aceptable en la prueba que permita evaluar los resultados obtenidos.

La exactitud es un tema que aún requiere estudio debido a que es necesario establecer un valor de comparación para ser considerado como “valor real” o definir un valor real, que puede ser el promedio o la energía teórica aplicada al ensayo de ruptura, lo que permitirá definir un error sistemático de la prueba y aplicar los controles automáticos

que disminuyan el error manual y de igual forma aumente el nivel de precisión del ensayo.

Con respecto a las recomendaciones asociadas a ambos ensayos, se detallan las siguientes:

Para Prensa:

- La prensa neumática utilizada se puede mejorar su uso incorporando un control de desplazamiento que permita detener el ensayo una vez producida la fractura de la partícula.
- La superficie de contacto que produce la fractura en la prensa podría tener accesorios removibles e intercambiables tanto de superficies planas como esféricas, lo que permitiría evaluar el comportamiento de fractura a diferentes morfologías minerales y tamaños de muestra.
- Contar con un procedimiento y equipamiento que permita transformar la fuerza aplicada para la fractura en energía específica ([kWht]) permitiría comparar los equipos que operan bajo diferentes mecanismos de ruptura.

Para SSITest:

- Se recomienda evaluar los errores sistemáticos y aleatorios existentes en la prueba y definir un error aceptable de los ensayos. Este error puede ser referido al rango de tamaño de las partículas.
- Automatizar la descarga del objeto contundente, el posicionamiento de las partículas y la limpieza de la zona de impacto son factores claves para acelerar la ejecución del ensayo. Esto permitiría evaluar de forma rápida el comportamiento de dureza de una muestra mineral.
- Determinar factor de correlación o de corrección que permita evaluar la información obtenida en términos de BWI. Esto permitirá tener un lenguaje común con la industria minera y de esta forma llegar a comercializar el servicio brindado por el equipo.

CAPÍTULO 7. BIBLIOGRAFÍA

[1] D. R. &. S. M. C. ,. Walker, «A physical explanation of the empirical laws of comminution,» *AIME Trans.,* vol. 199, pp. 313-320, 1954.

[2] Innovación, «Ministerio de Economía, Fomento y Turismo.,» [En línea].

[3] COCHILCO, «Información estadística sobre el consumo de energía en la minería del cobre al 2015,» 2015.

[4] C. H. Valderrama W., *Proyecto FONDEF-IDEA CA13i10353 Prototipo de laboratorio para inducir la fragmentación de minerales via aplicación continua de pulsos de microondas,* 2014-2016.

[5] J. W. K. G. &. M. S. L. Walkiewicz, «Microwave Heating Characteristics of Selected Minerals and Compounds.,» *Mineral and Metallurgical Processing,* vol. 5, pp. 39-42, 1988.

[6] J. Kobusheshe, «Microwave Enhanced Processing of Ores, PhD Thesis, Univ. of Nottinghan, 2010.».

[7] J. Kobusheshe, «Microwave Enhanced Processing of Ores, PhD Thesis, Univ. of Nottinghan.,» Nottinghan., 2010.

[8] R. P. L., «Recopilación realizada en proyecto de memoria de Ing. Civil Metalúrgico.,» Valparaiso., 2014.

[9] M. A. a. T. R.R., «Autogenous Grinding from Test Work to Purchase of a Commercial Unit.,» *Mineral Processing plant design, A.L. Mular and R.B. Bhappu (eds).,* vol. 13, pp. 279-305, 1978.

[10] G. S. Dobby, Application of the SAG Power Index at Five Canadian SAG Plants. Proceedings Autogenous and Semiautogenous Grinding., Vancouver: UBC, 1996.

[11] D. B. Mishra, «Use of the block punch test to predict the compressive and tensile strengths of rocks.,» *Int. J. Rock Mech. Min.,* vol. 51, p. 119–127, 2012.

[12] S. G. O. Kahraman, «The effect of rock classes on the relation between uniaxial compressive strength and point load index.,» *Bull. Eng. Geol. Environ,* vol. 68, p. 345–353, 2009.

[13] D. W. L. Li, «The Brazilian disc test for rock mechanics applications: review and New insights.,» *Rock Mech. Rock Eng,* vol. 46, p. 269–287, 2013.

[14] S. Narayanan., «Development of a laboratory single particle breakage technique and its application to ball mill scale-up, University of Queensland (JKMRC).,» PhD thesis, Australia, 1985.

[15] T. M. S. M. R. K. T. Napier-Munn, Mineral comminution circuits: their operation and optimisation, Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre., Australia: ISBN 0 646 28861, 1996.

[16] F. B. G. Bourgeois, «A portable load cell for in-situ ore impact breakage testing.,» *Int. J. Miner. Process,* vol. 65, p. 31–54, 2002.

[17] M. S., «Predicting the Specific Energy of Autogenous and Semiautogenous Mills from Small Diameter Drill Core Samples.,» *Minerals Engineering,* vol. 17, pp. 447-451, 2004.

[18] F. T. K. S. L.-B. E. M. Shi, «Development of a rapid particle breakage characterisation device – The JKRBT.,» *Minerals Engineering,* vol. 22, p. 602–612, 2009.

[19] T. Kojovic, «Cap 13: Overview of comminution tests for ore characterisation.,» JK Mineral Research Centre, Univerity of Queensland.

[20] G. C. a. A. M. F.O. Verret, «Sag Mill Testing - An overviewof the test procedures available to characterize ore grindability.».

[21] T. K. S. L.-B. E. M. Fengnian Shi, «Development of a rapid particle breakage characterisation device – The JKRBT.,» *Minerals Engineering.*

[22] T. K. a. F. Shi., «Update on the JKRBT (JKMRC Rotary Breakage Tester) . University of Queensland, JKMRC, QLD.».

[23] L. S. JKtech, «JK Rotary Breakage Test».

[24] S. Chile, «Prueba de Indice de Energia SAG (SPI)».

[25] C. D. R., «Tesis Magister: Evaluación de un cambio tecnologico para el procesamiento de minerales de alta dureza.».

[26] E. Prieto, «E-medida,» 2016. [En línea]. Available: http://www.e-medida.com/documentos/Numero-1/exactitud-no-es-lo-mismo-que-precision.htm.

[27] P. y. exactitud., «Wikipedia, la enciclopedia libre.,» 2016. [En línea]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Precisi%C3%B3n_y_exactitud.

[28] P. C. R.D. Morrison, «Using DEM to model ore breakage within a pilot scale SAG mill,» *Minerals Engineering ,* vol. 17, p. 1117–1124, 2004.

[29] COCHILCO, «Producción Chilena de Cobre de Mina».

[30] COCHILCO, «Producción mundial y chilena de cobre mina (porcentaje y tonelaje)».

[31] COCHILCO, «Proyección del consumo de electricidad en la minería del cobre 2015 - 2026.».

[32] T. T. D. J. E. H. K. E. W. W. &. K. S. Chen, «The relative transparency of minerals to microwave radiation. Canadian Metallurgical Quarterly, 1984, 23, 349-351.».

[33] J. W. K. G. &. M. S. L. Walkiewicz, «Microwave Heating Characteristics of Selected Minerals and Compounds. Mineral and Metallurgical Processing, 1988, 5, 39-42.».

[34] S. y. R. N. Kingman, «Microwave treatment of minerals – A Review, Minerals Eng., 1998, Vol. 11, Nº11, 1081-1087.».

[35] J. Elementos tomados de Kobusheshe, «Microwave Enhanced Processing of Ores, PhD Thesis, Univ. of Nottingham, 2010.».

[36] R. J. Charles, «Energy-size reduction relationships in comminution,» *Trans. AIME,* vol. 208, pp. 80-88, 1957.

CAPÍTULO 8. ANEXO

8.1 Anexo A

Minerales gestionados por la Superintendencia de Geología Codelco – división Andina.

Anexo A. Minerales gestionados por la Superintendencia de Geología Codelco – división Andina.

Bath	Bhid	Lito_1	Cut	Masa Total Húmeda (mg.)
17940	P-238546	BT	0,869	9267,9
17946	P-238730	BT	1,089	8692,3
17946	P-238727	BT	0,98	8721,8
17939	P-238526	BXPR	0,657	8652,3
17939	P-238529	BXPR	0,855	9817,9
17946	P-238735	BXT	1,242	8086,5
17936	P-238433	GDCC	1,02	6877,2
17941	P-238583	GDCC	0,742	8539,2
17941	P-238570	GDCC	0,652	9862,6
17946	P-238709	GDCC	1,15	9712,0
17946	P-238716	GDCC	1,23	8996,7
17946	P-238717	GDCC	0,588	8468,9
17946	P-238723	GDCC	0,603	9539,2
17946	P-238710	GDCC	0,667	10991,6
17946	P-238715	GDCC	1,037	9940,1
17946	P-238720	GDCC	0,95	9225,6
17934	P-238379	GDRB	2,0455	9678,4
17934	P-238373	GDRB	2,38	11917,0
17934	P-238363	GDRB	0,729	7513,5
17934	P-238364	GDRB	0,728	8345,3
17934	P-238374	GDRB	0,755	8944,5
17935	P-238415	GDRB	0,868	8802,4
17935	P-238404	GDRB	1,041	11339,5
17935	P-238395	GDRB	0,55	7702,4
17937	P-238473	GDRB	0,83	7423,7
17937	P-238472	GDRB	0,605	8533,9
17937	P-238450	GDRB	0,546	8337,9
17937	P-238448	GDRB	1,347	7266,8
17938	P-238483	GDRB	1,083	8208,1
17940	P-238560	GDRB	0,73	8263,2

17940	P-238559	GDRB	0,526	8537,2
17940	P-238547	GDRB	0,665	10756,1
17940	P-238548	GDRB	0,524	9964,8
17942	P-238601	GDRB	1,245	10382,6
17942	P-238606	GDRB	1,061	10643,8
17942	P-238613	GDRB	0,585	9928,0
17942	P-238594	GDRB	0,671	11112,9
17937	P-238464	PFELD	1,214	8649,0

INTRUSIVOS

GDRB : Granodiorita Rio Blanco

GDCC : Granodiorita Cascada

PFELD: Porfido Feldespatico

BRECHAS

BXPR : Brecha de Polvo de Roca

BT : Brecha de Turmalina (-) o Granodiorita Brechizada

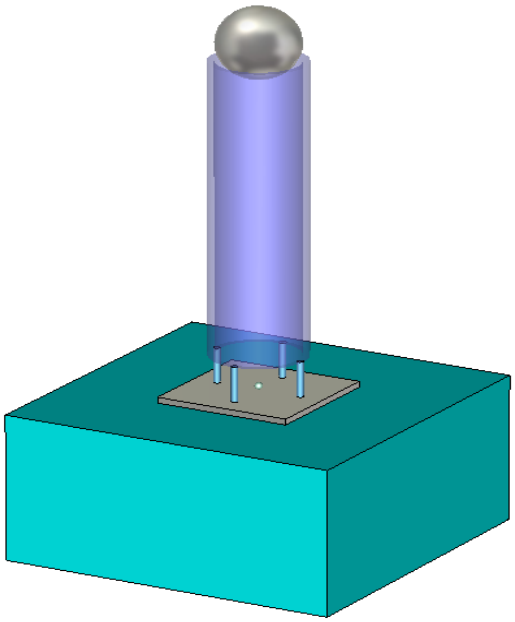
BXT : Brecha de Turmalina

8.2 Anexo B

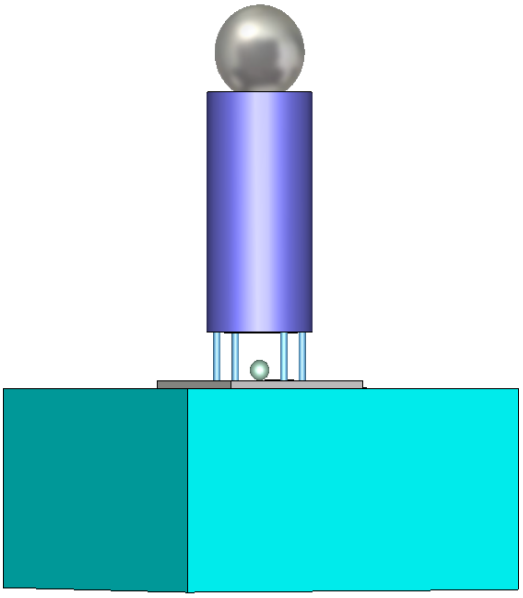
Diagramas de prototipos propuestos buscando la mejor alternativa para la fractura de las rocas mineral.

Anexo B. Diseños de esquema prototipo equipo fractura monopartícula.

Anexo B.1 Diseño Esquema Prototipo 1.

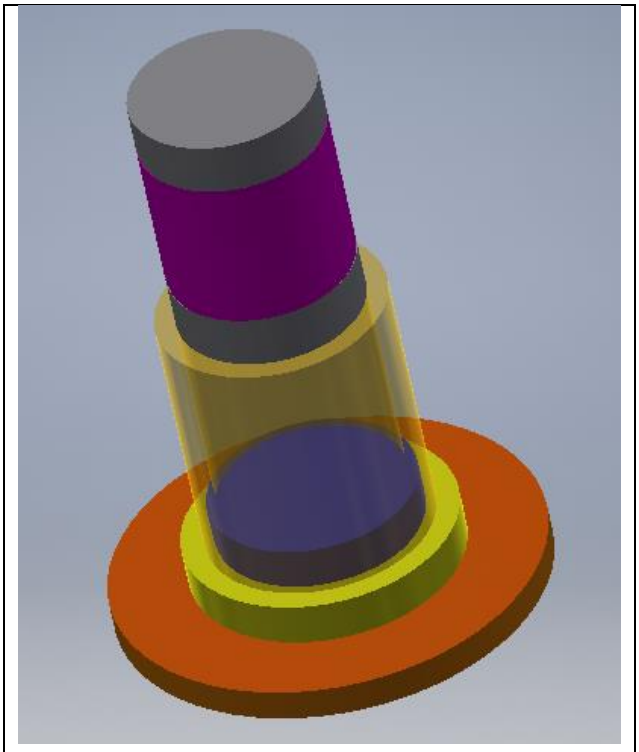


Vista superior



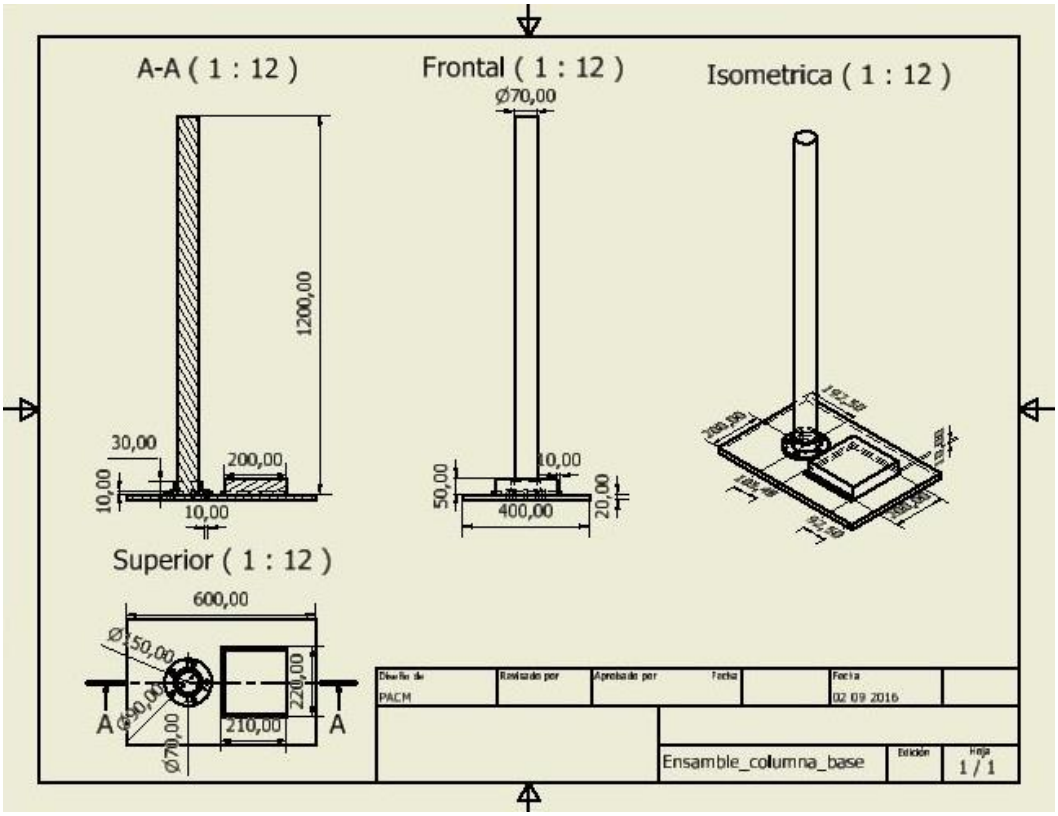
Vista lateral

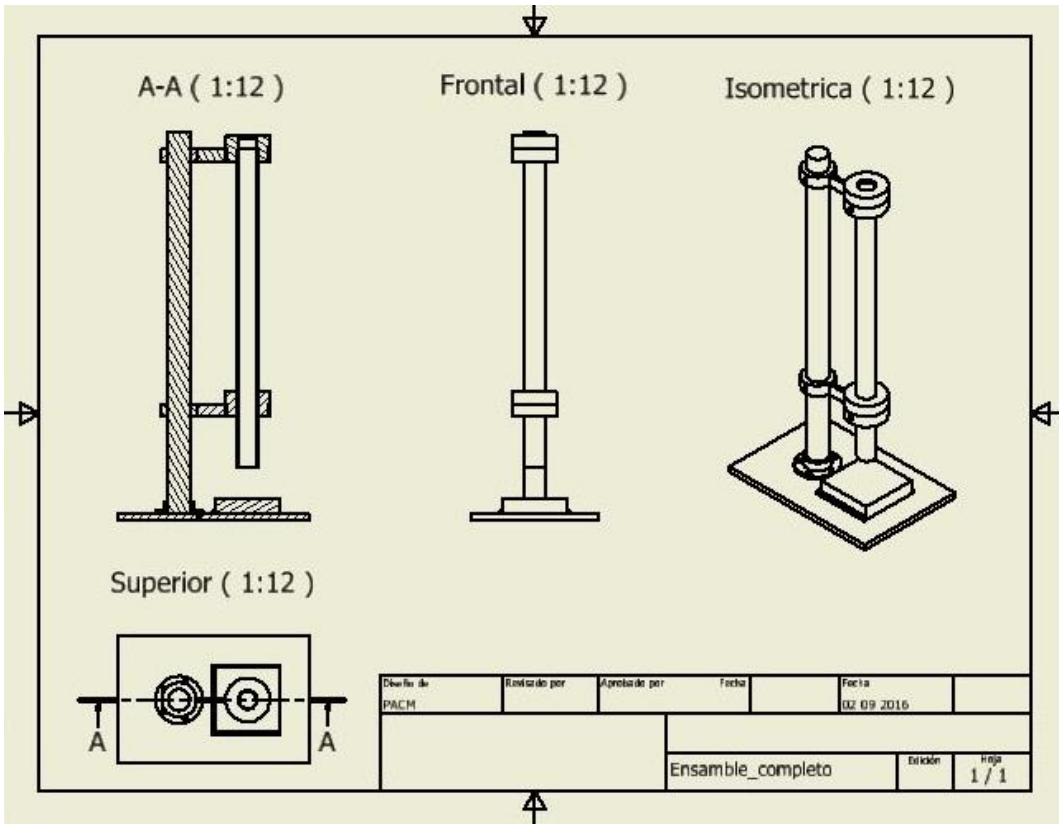
Anexo B.2 Diseño Esquema Prototipo 2.

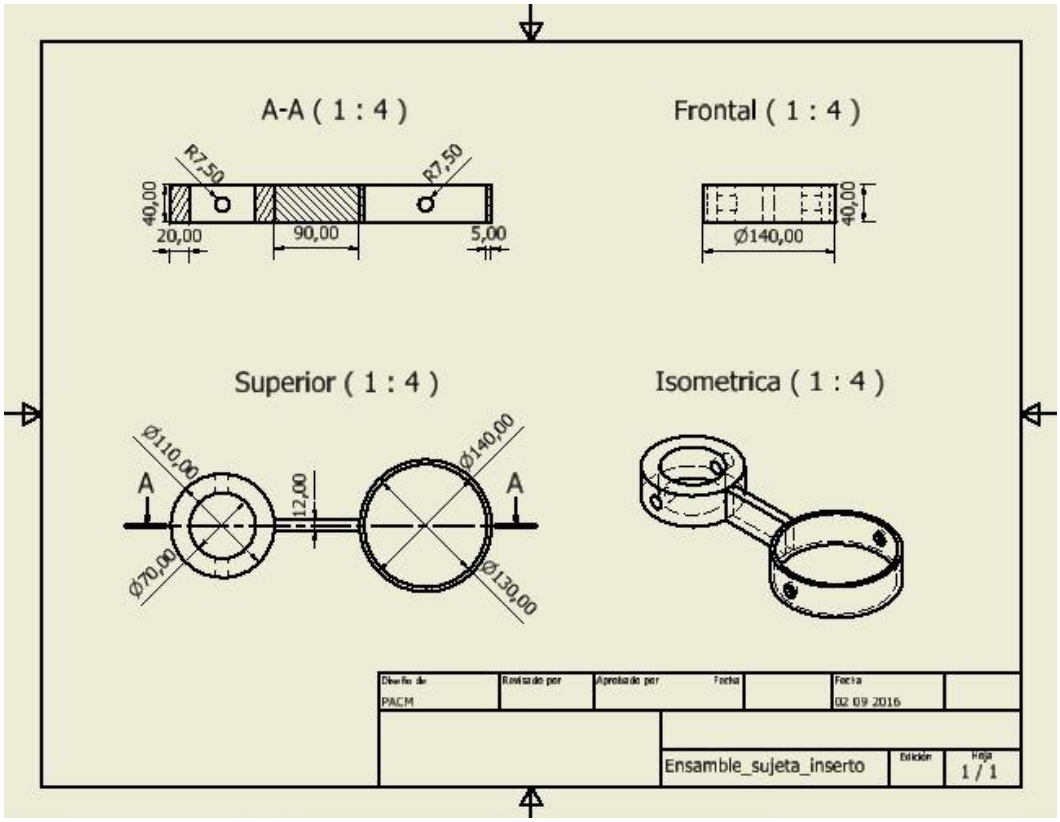


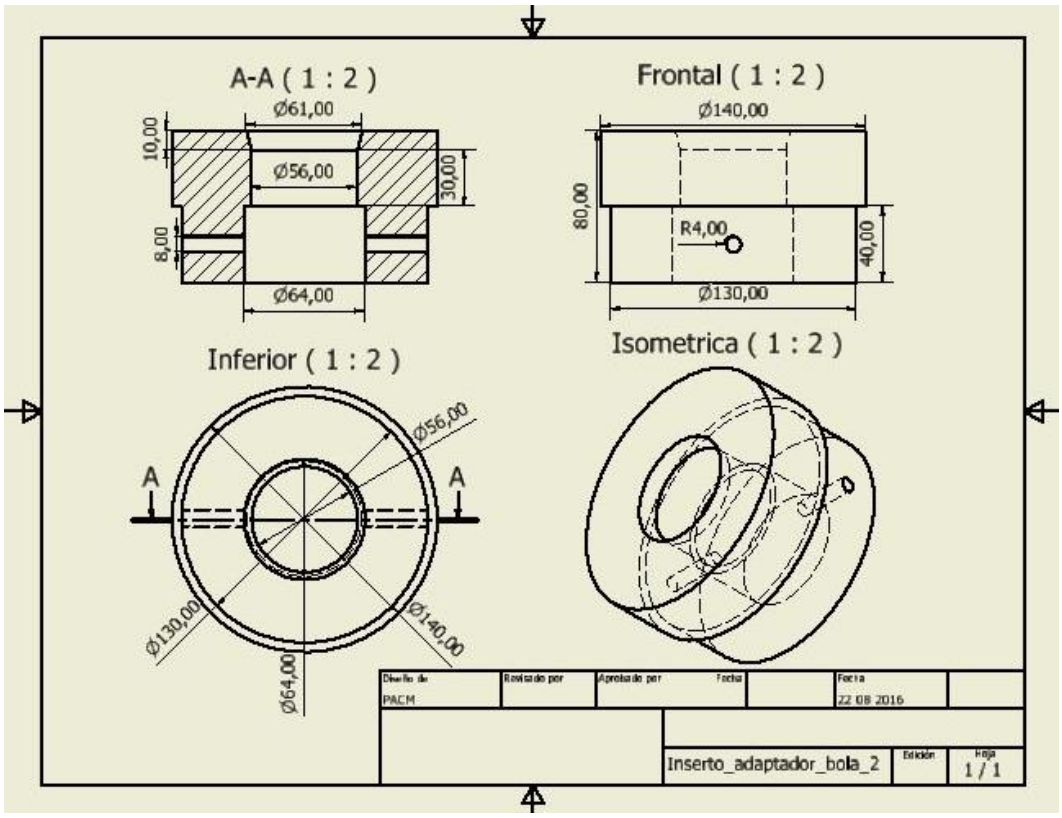
Vista lateral

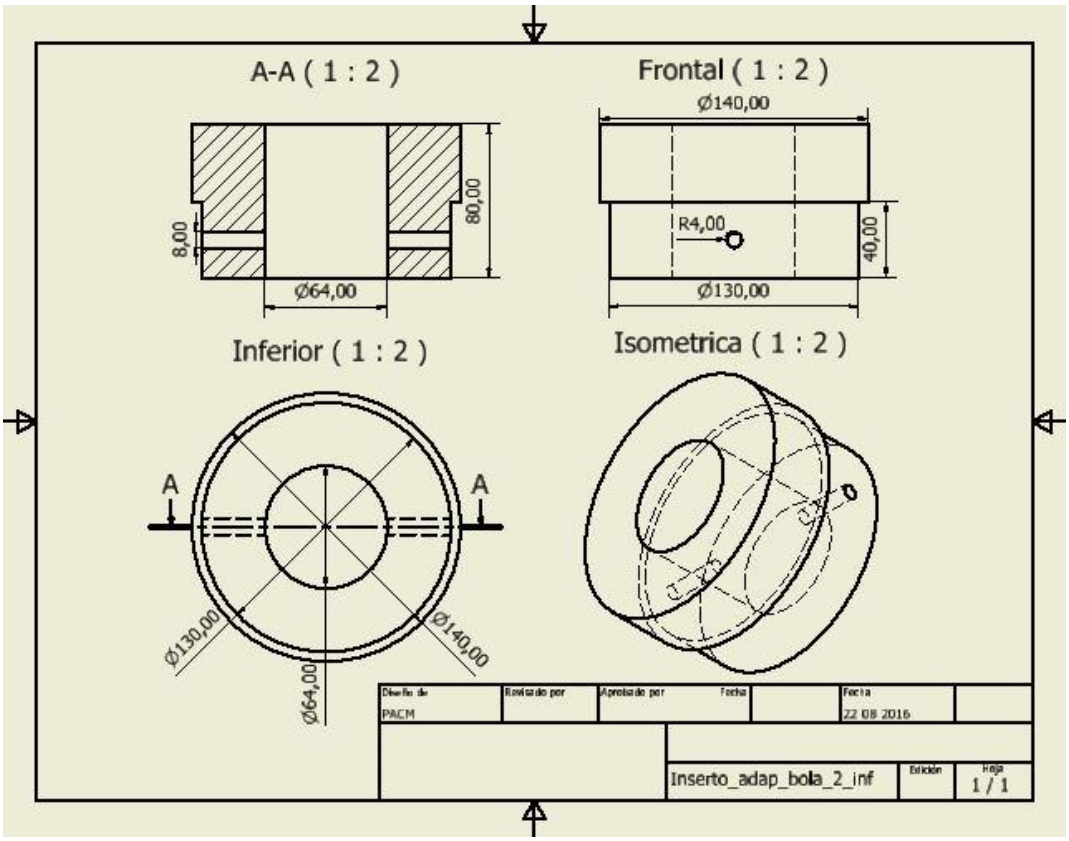
Anexo B.3 Diseño Esquema Prototipo 1.

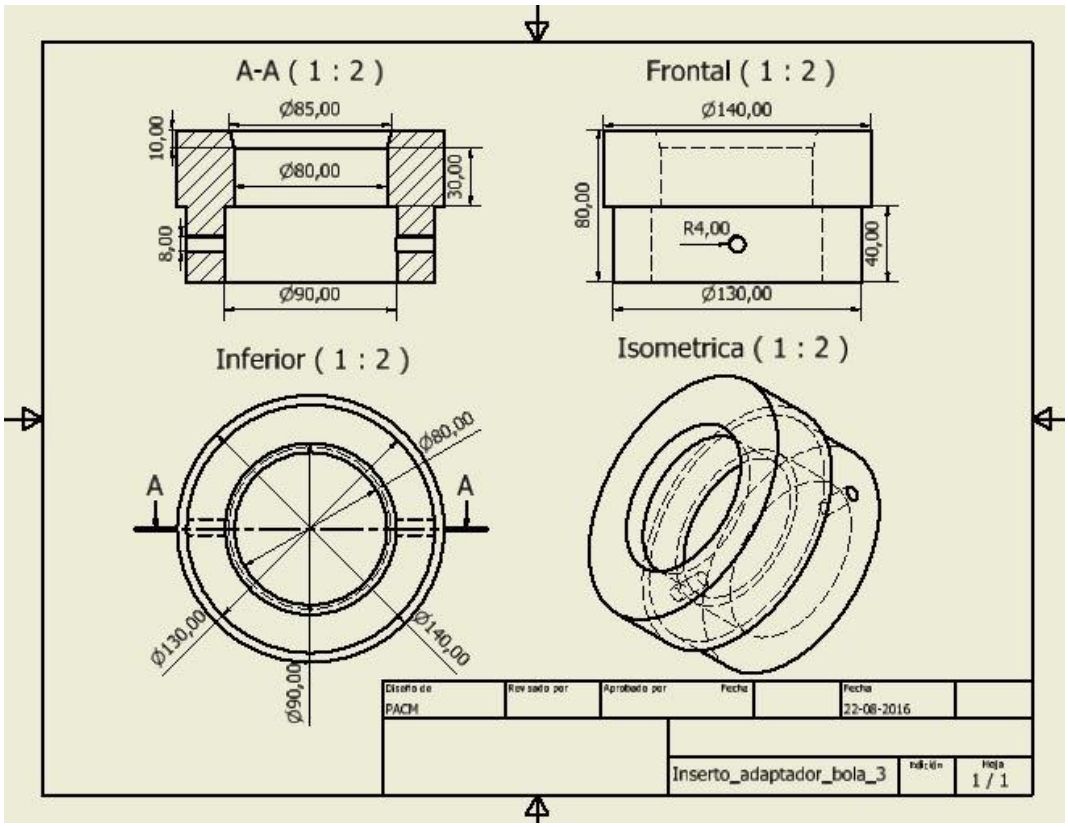


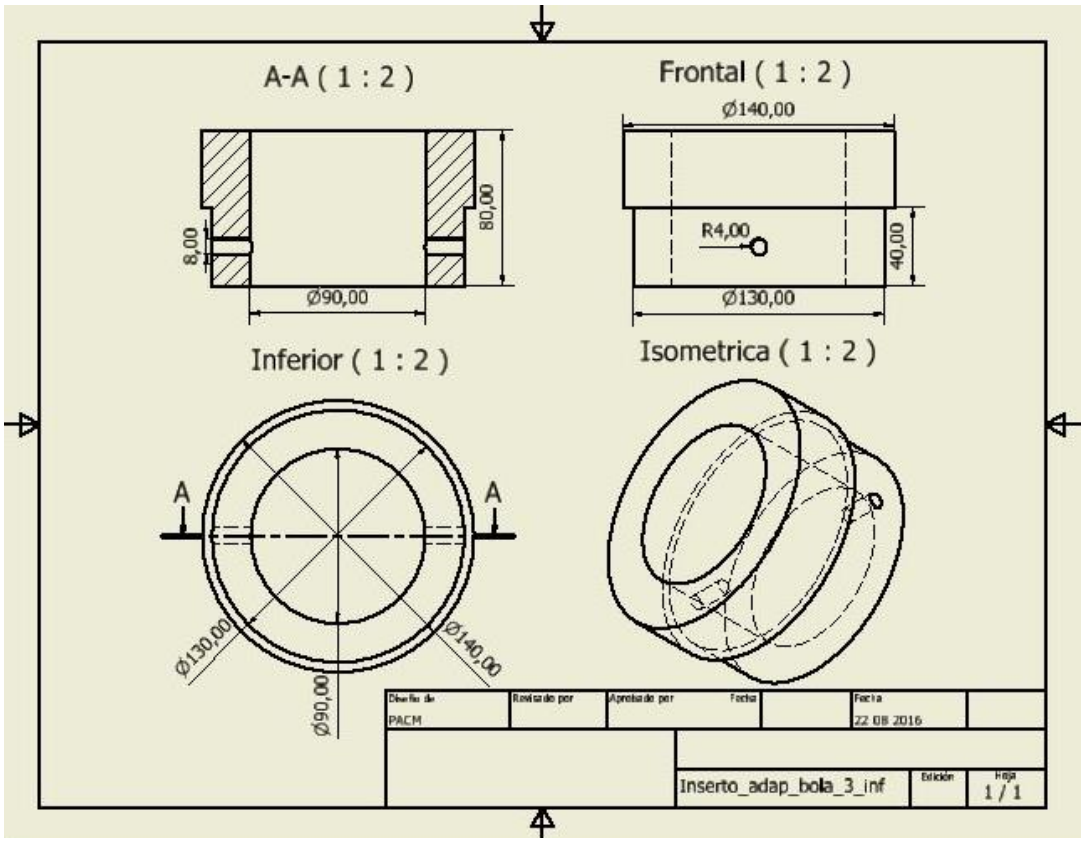

A-A (1:12)
Frontal (1:12)
Isometrica (1:12)
Superior (1:12)
A
A
Diseño de
PACM
Revisado por
Aprobado por
Fecha
Fecha
02 09 2016
Ensamble_completo
Edición
Hoja
1 / 1

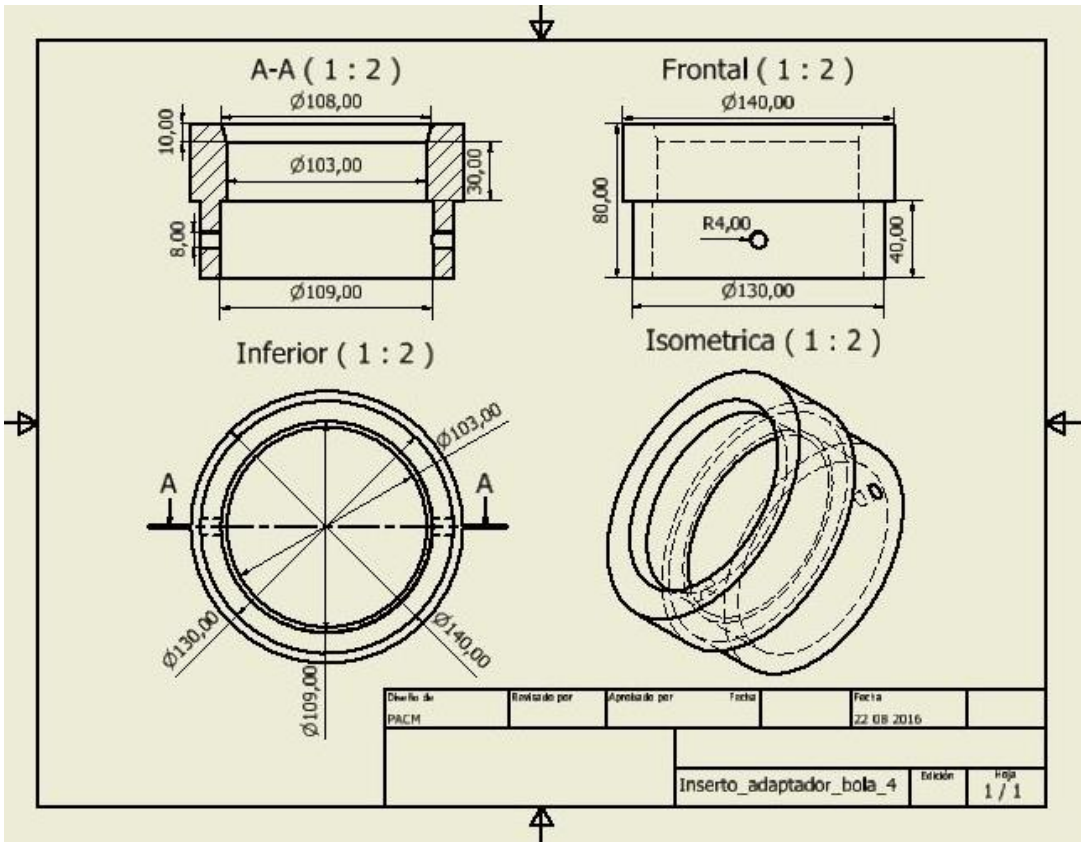

A-A (1 : 4)
R7,50
R7,50
40,00
20,00
90,00
5,00
Frontal (1 : 4)
40,00
Ø140,00
Superior (1 : 4)
Ø110,00
A
12,00
Ø140,00
A
Ø70,00
Ø130,00
Isometrica (1 : 4)
Diseño de
PACM
Revisado por
Aprobado por
Fecha
Fecha
02 09 2016
Ensamble_sujeta_inserto
Edición
Hoja
1 / 1

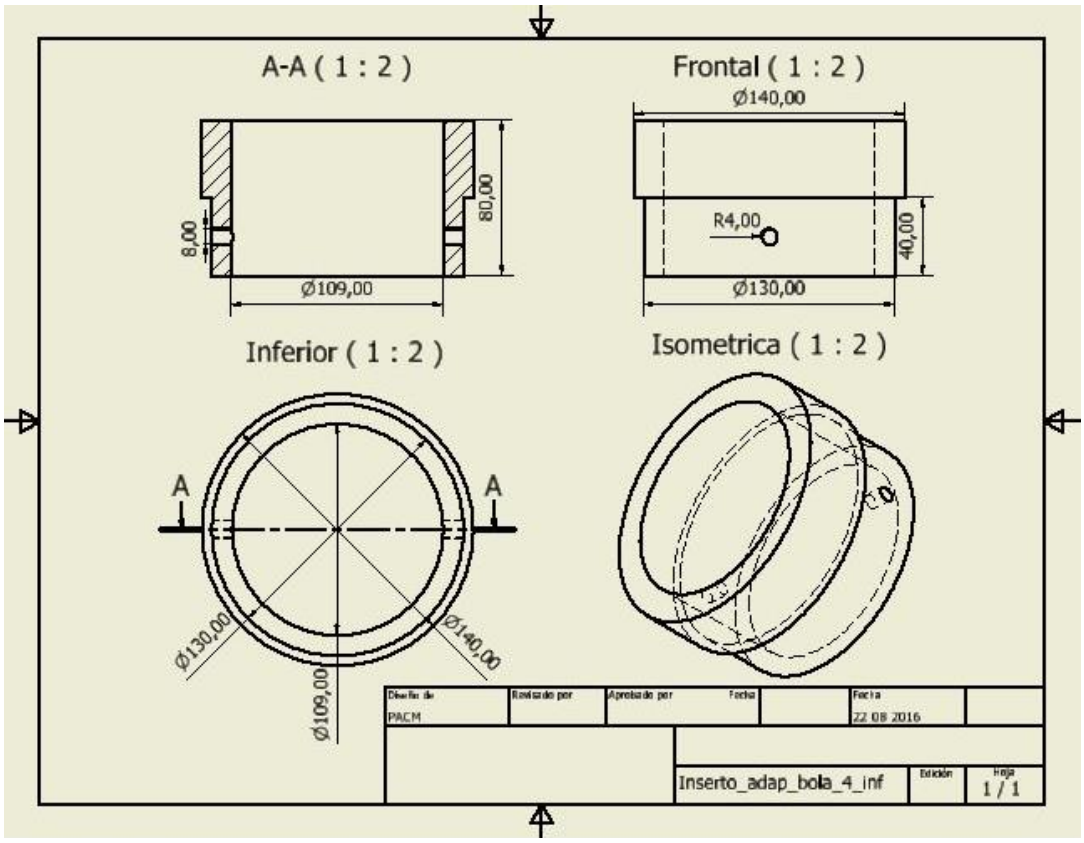

A-A (1 : 2)
Ø61,00
10,00
Ø56,00
30,00
8,00
Ø64,00
Frontal (1 : 2)
Ø140,00
80,00
R4,00
40,00
Ø130,00
Inferior (1 : 2)
Ø56,00
A
A
Ø130,00
Ø140,00
Ø64,00
Isometrica (1 : 2)
Diseño de
PACM
Revisado por
Aprobado por
Fecha
Fecha
22 08 2016
Inserto_adaptador_bola_2
Edición
Hoja
1 / 1

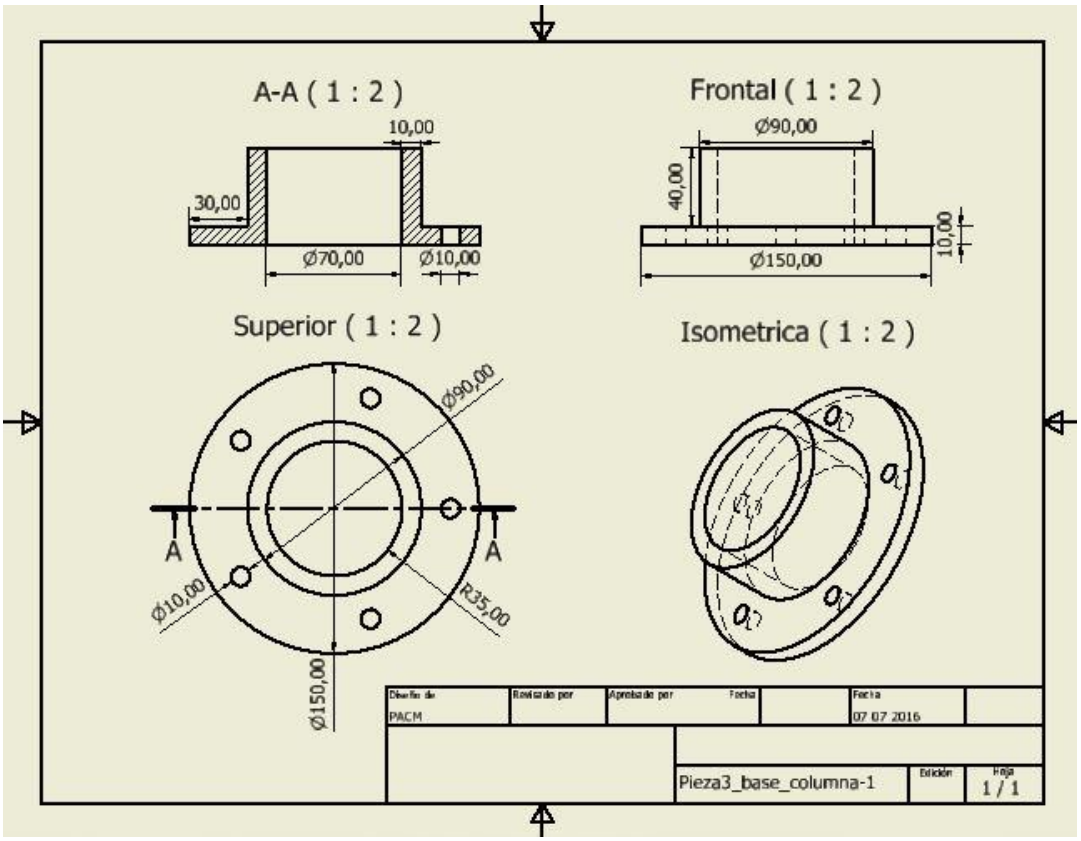

A-A (1 : 2)
8,00
80,00
Ø64,00
Frontal (1 : 2)
Ø140,00
R4,00
40,00
Ø130,00
Inferior (1 : 2)
A
A
Ø130,00
Ø140,00
Ø64,00
Isometrica (1 : 2)
Diseño de
PACM
Revisado por
Aprobado por
Fecha
Fecha
22 08 2016
Inserto_adap_bola_2_inf
Edición
Hoja
1 / 1

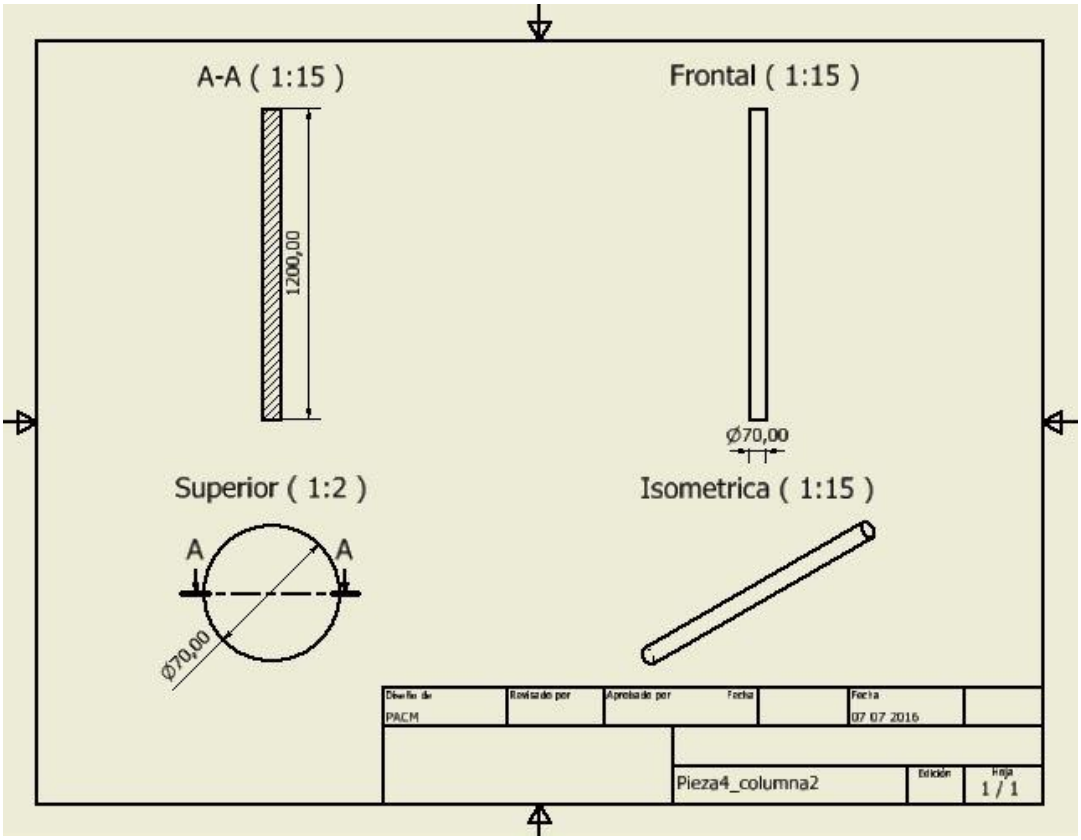

A-A (1 : 2)
Frontal (1 : 2)
Ø85,00
10,00
Ø80,00
30,00
8,00
Ø90,00
Ø140,00
80,00
R4,00
40,00
Ø130,00
Inferior (1 : 2)
Isometrica (1 : 2)
Ø80,00
A
A
Ø130,00
Ø140,00
Ø90,00
Diseño de
PACM
Revisado por
Aprobado por
Fecha
Fecha
22-08-2016
Inserto_adaptador_bola_3
Edición
Hoja
1 / 1


A-A (1 : 2)
Frontal (1 : 2)
Ø140,00
80,00
8,00
Ø90,00
R4,00
40,00
Ø130,00
Inferior (1 : 2)
Isometrica (1 : 2)
A
A
Ø130,00
Ø140,00
Ø90,00
Diseño de
PACM
Revisado por
Aprobado por
Fecha
Fecha
22 08 2016
Inserto_adap_bola_3_inf
Edición
Hoja
1 / 1

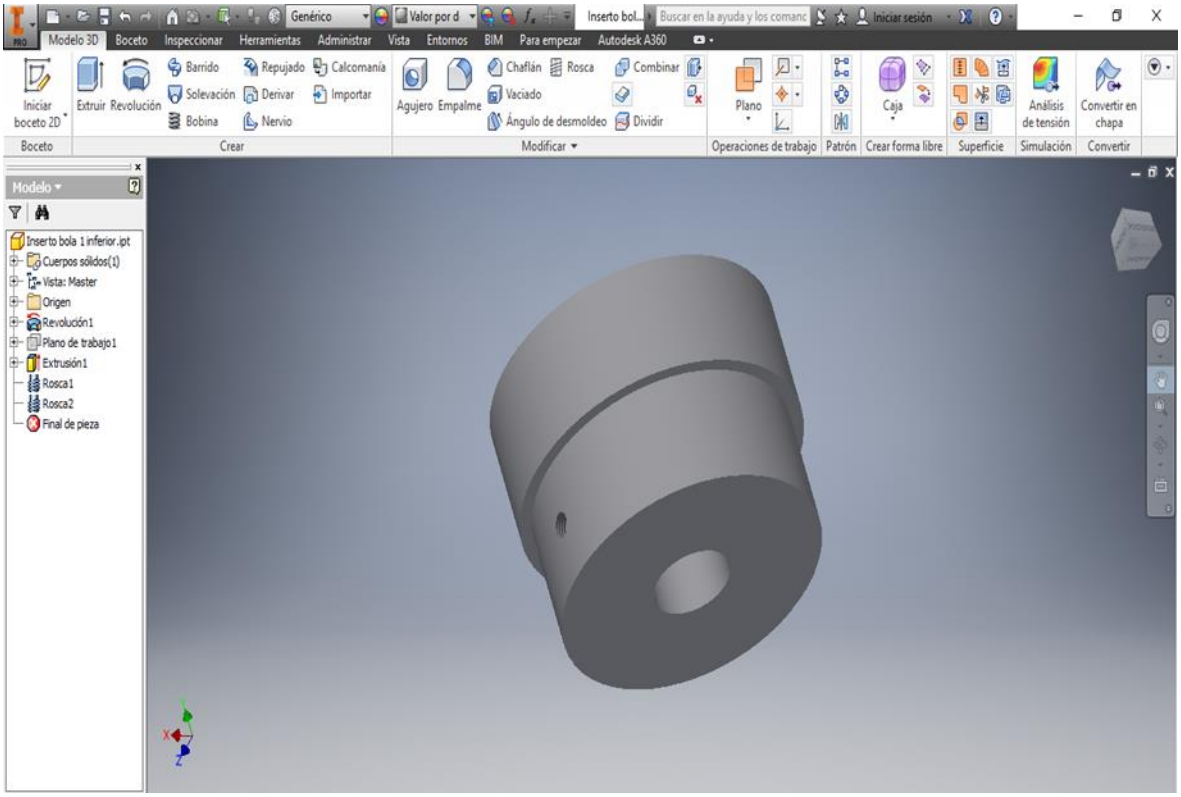

A-A (1 : 2)
Ø108,00
10,00
Ø103,00
30,00
8,00
Ø109,00
Frontal (1 : 2)
Ø140,00
80,00
R4,00
40,00
Ø130,00
Inferior (1 : 2)
Ø103,00
A
A
Ø130,00
Ø140,00
Ø109,00
Isometrica (1 : 2)
Diseño de
PACM
Revisado por
Aprobado por
Fecha
Fecha
22 08 2016
Inserto_adaptador_bola_4
Edición
Hoja
1 / 1


A-A (1 : 2)
8,00
80,00
Ø109,00
Frontal (1 : 2)
Ø140,00
R4,00
40,00
Ø130,00
Inferior (1 : 2)
A
A
Ø130,00
Ø140,00
Ø109,00
Isometrica (1 : 2)
Diseño de
PACM
Revisado por
Aprobado por
Fecha
Fecha
22 08 2016
Inserto_adap_bola_4_inf
Edición
Hoja
1 / 1


A-A (1 : 2)
10,00
30,00
Ø70,00
Ø10,00
Frontal (1 : 2)
Ø90,00
40,00
10,00
Ø150,00
Superior (1 : 2)
Ø90,00
A
A
Ø10,00
R35,00
Ø150,00
Isometrica (1 : 2)
Diseño de
PACM
Revisado por
Aprobado por
Fecha
Fecha
07 07 2016
Pieza3_base_columna-1
Edición
Hoja
1 / 1


A-A (1:15)
1200,00
Frontal (1:15)
Ø70,00
Superior (1:2)
A
A
Ø70,00
Isometrica (1:15)
Diseño de
PACM
Revisado por
Aprobado por
Fecha
Fecha
07 07 2016
Pieza4_columna2
Edición
Hoja
1 / 1

Anexo B.4 Diagrama de los insertos - INVENTOR.

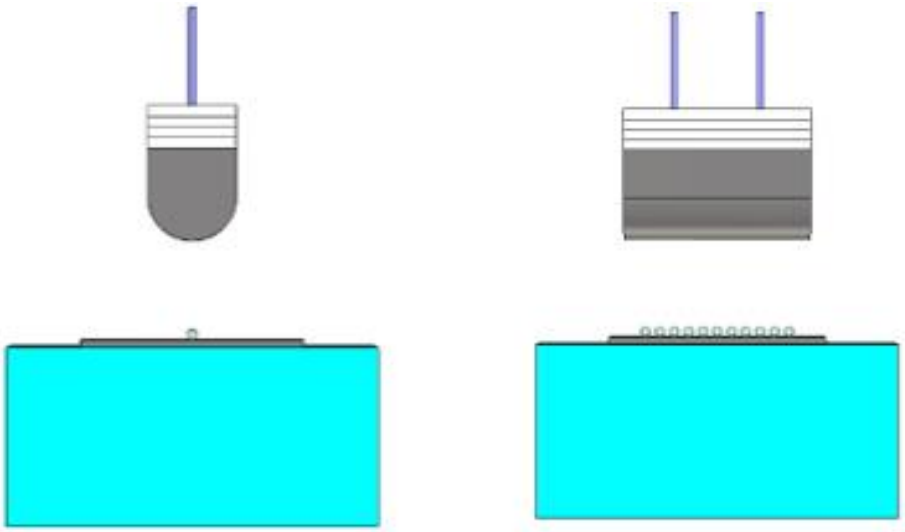


8.3 Anexo C

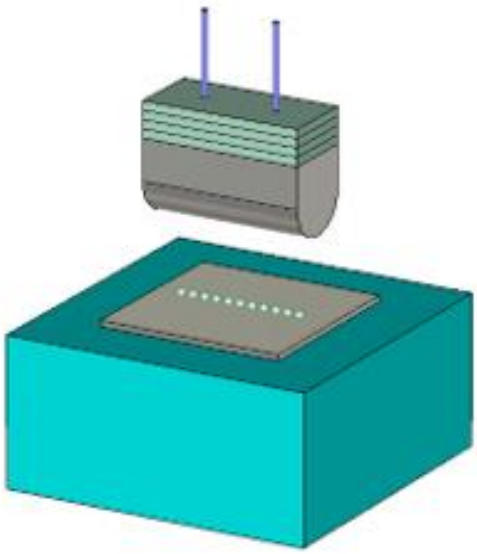
Diagramas de prototipos propuestos buscando la mejor alternativa para la fractura de las rocas mineral.

Anexo C. Diseños de esquema prototipo equipo fractura multipartícula.

Anexo C.1 Diseño Esquema Prototipo 3.

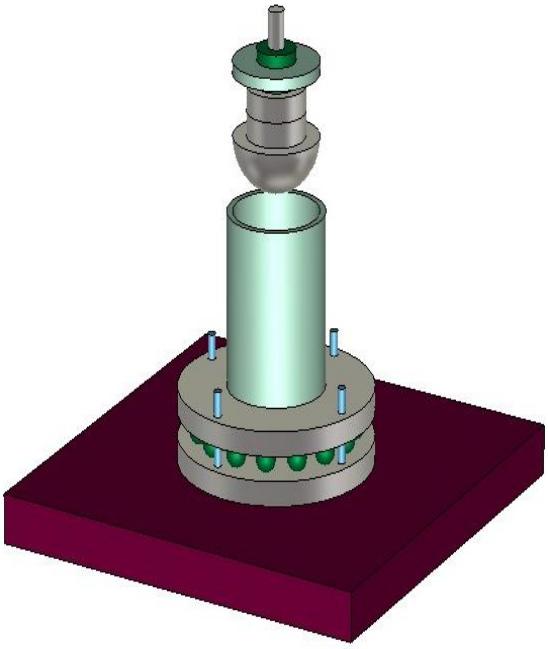


Vista lateral 1 Vista lateral 2

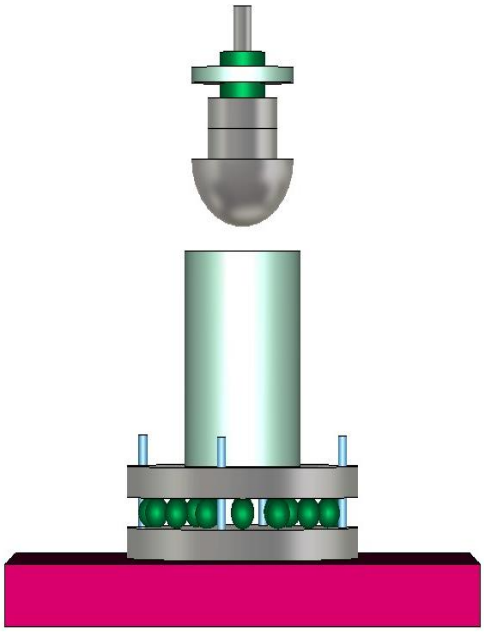


Vista superior

Anexo C.2 Diseño Esquema Prototipo 4.

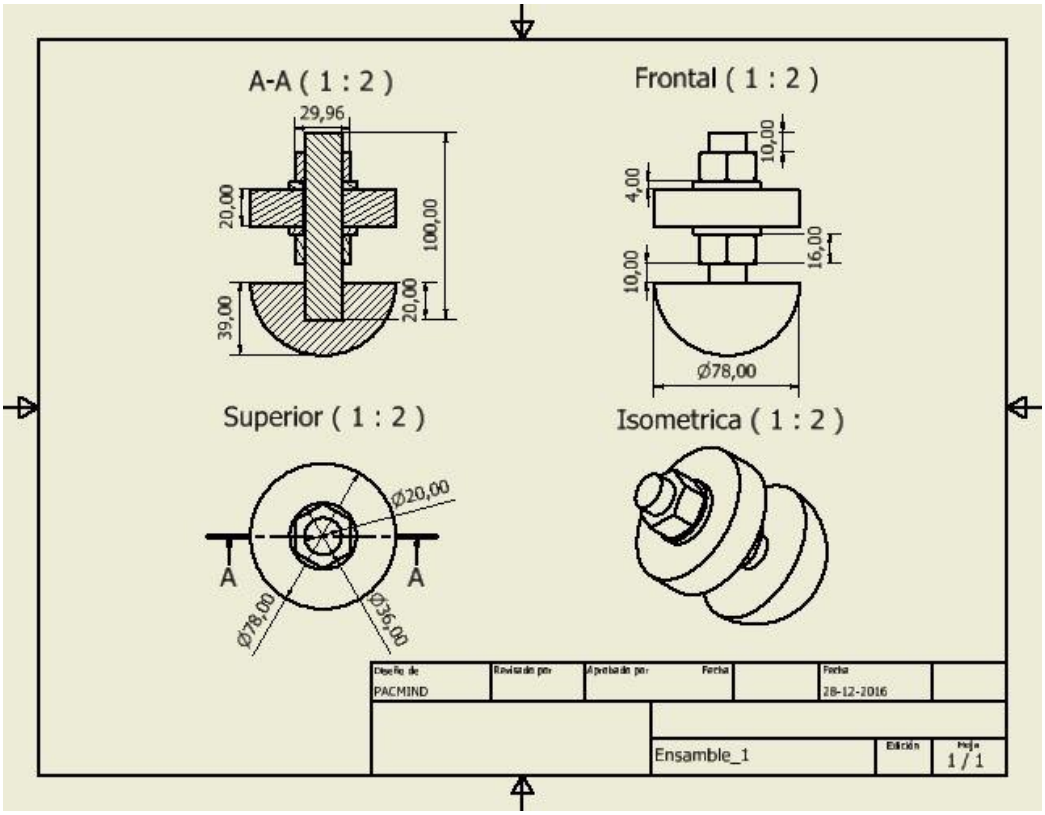


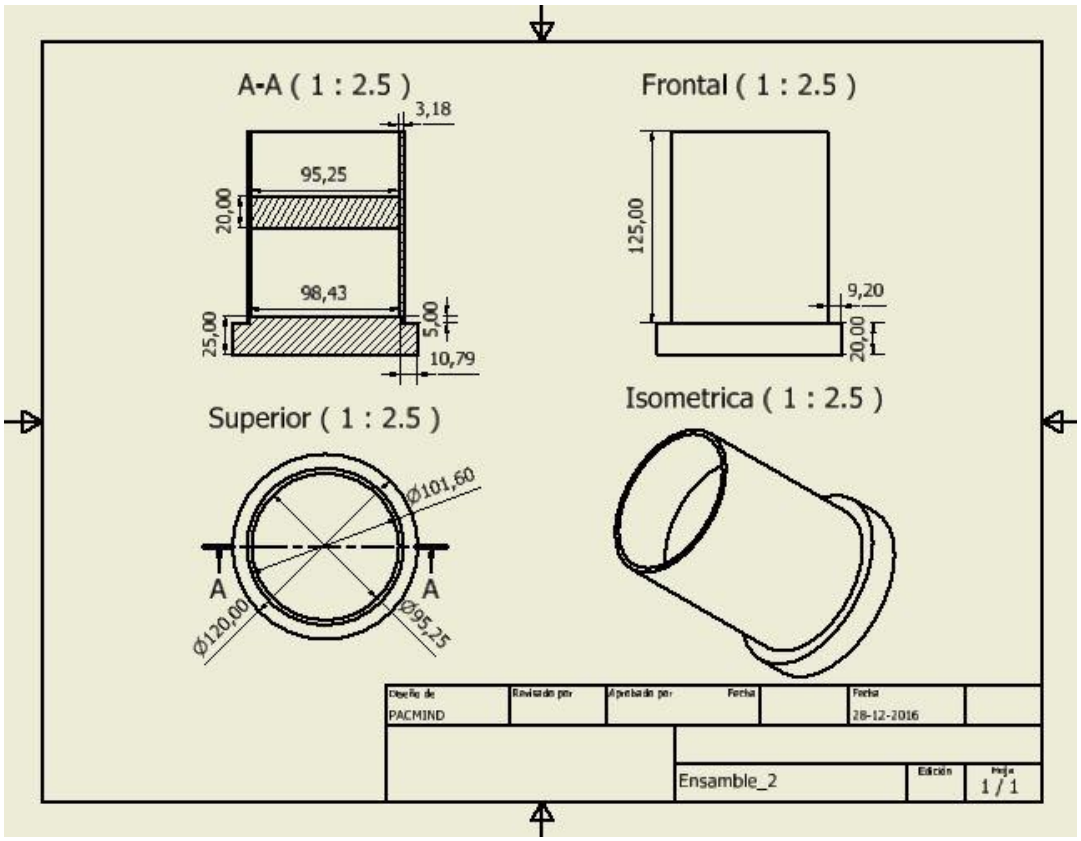
Vista superior

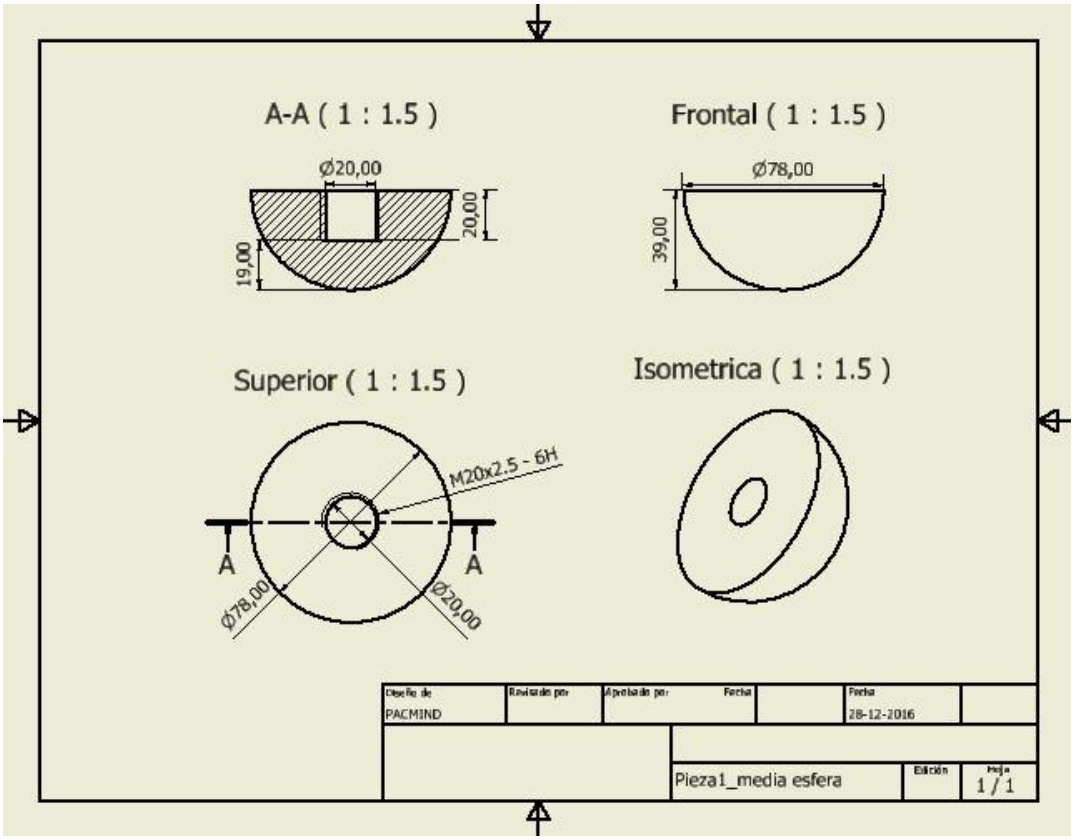


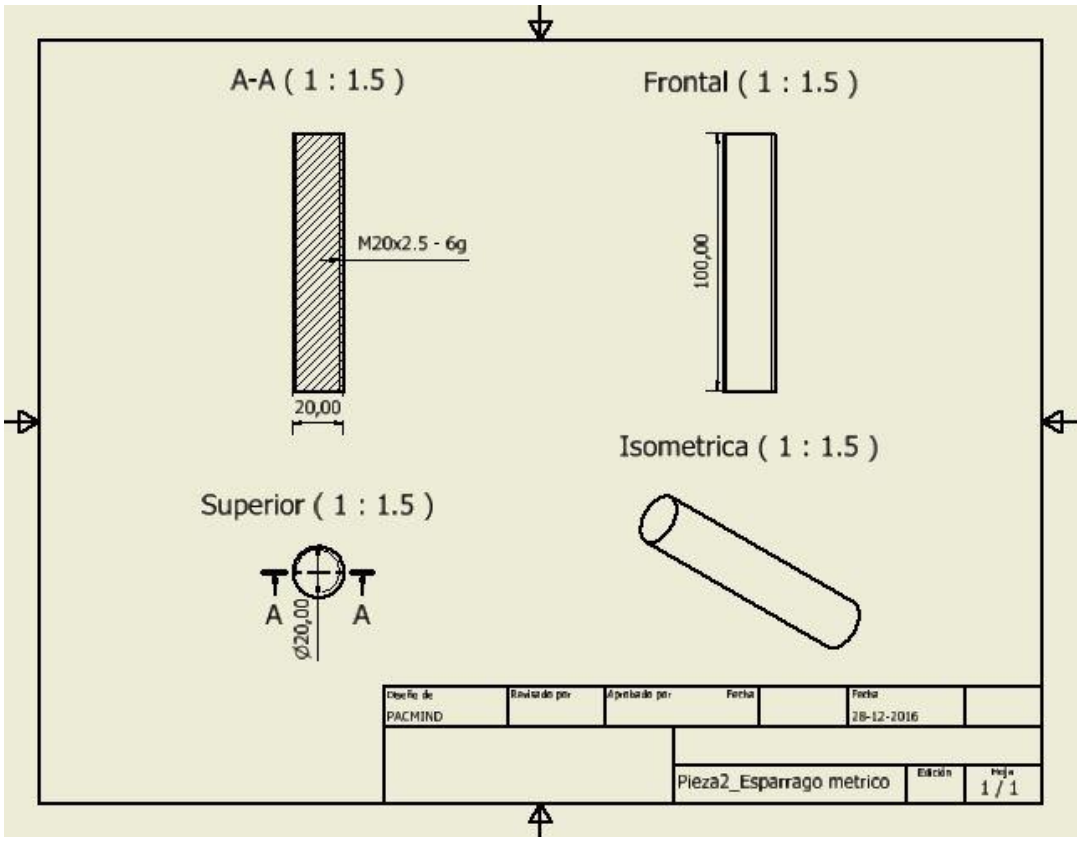
Vista lateral

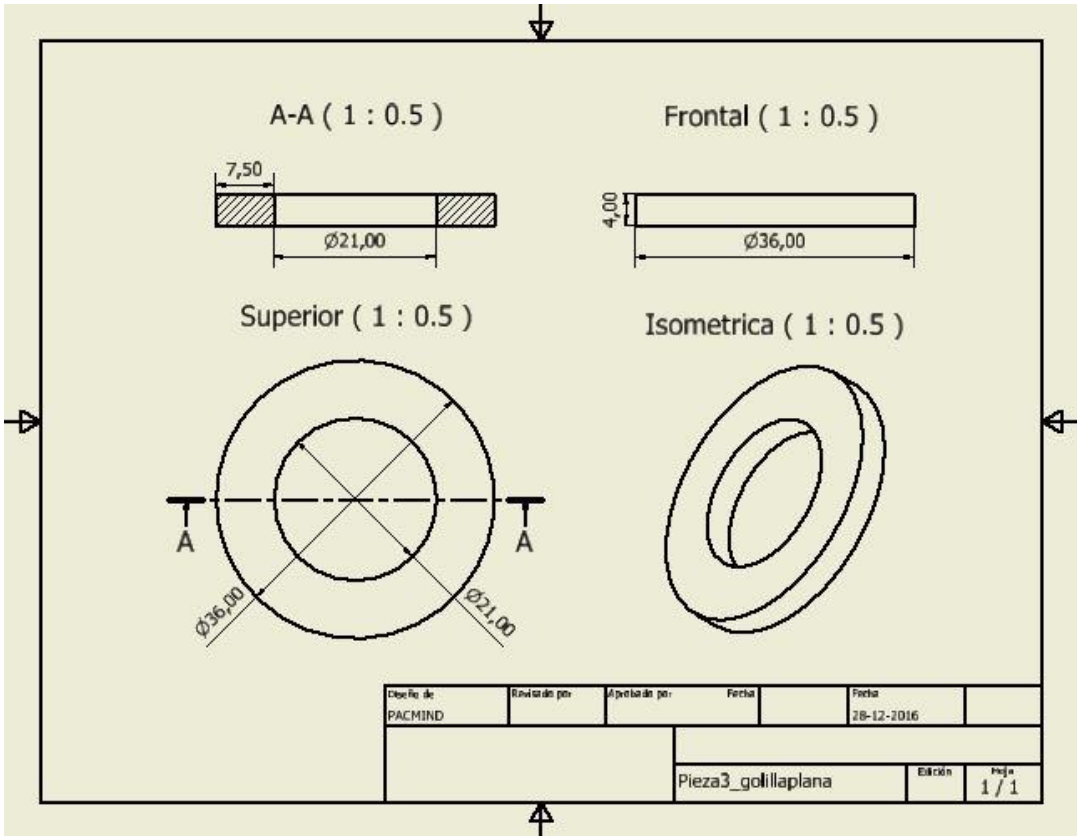
Anexo C.3 Plano de diseño Prototipo 4.

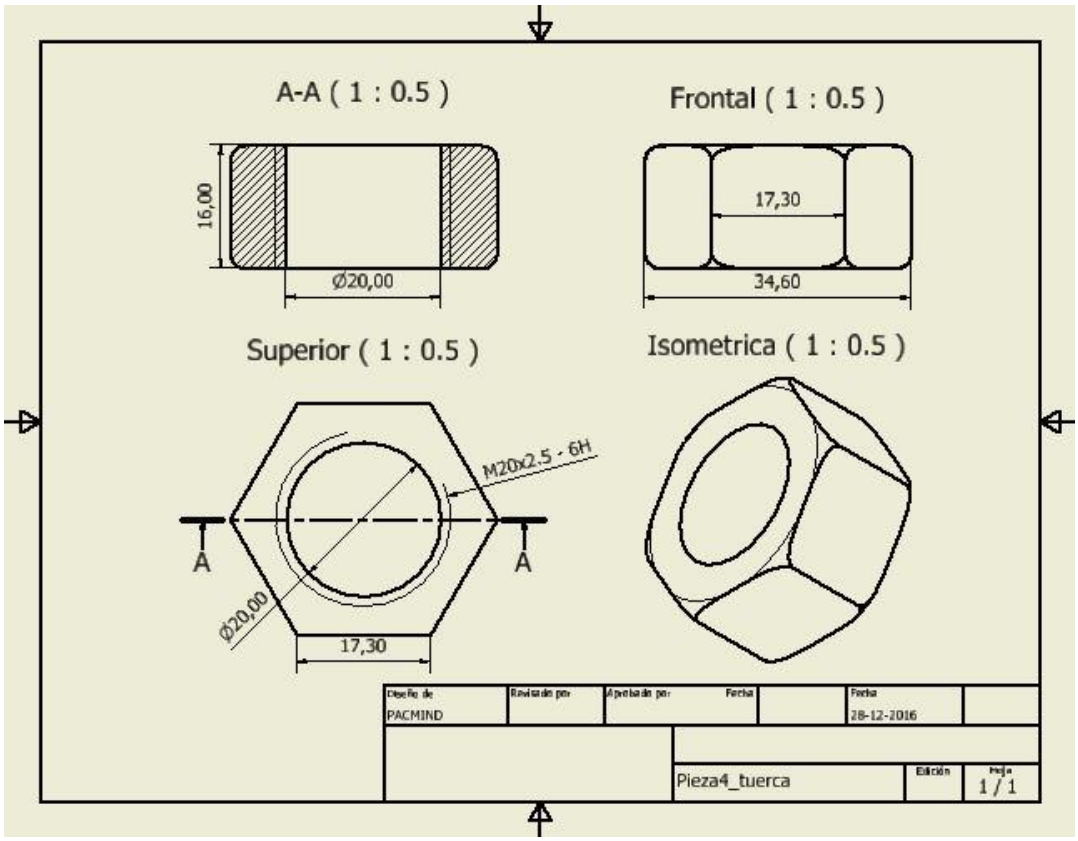


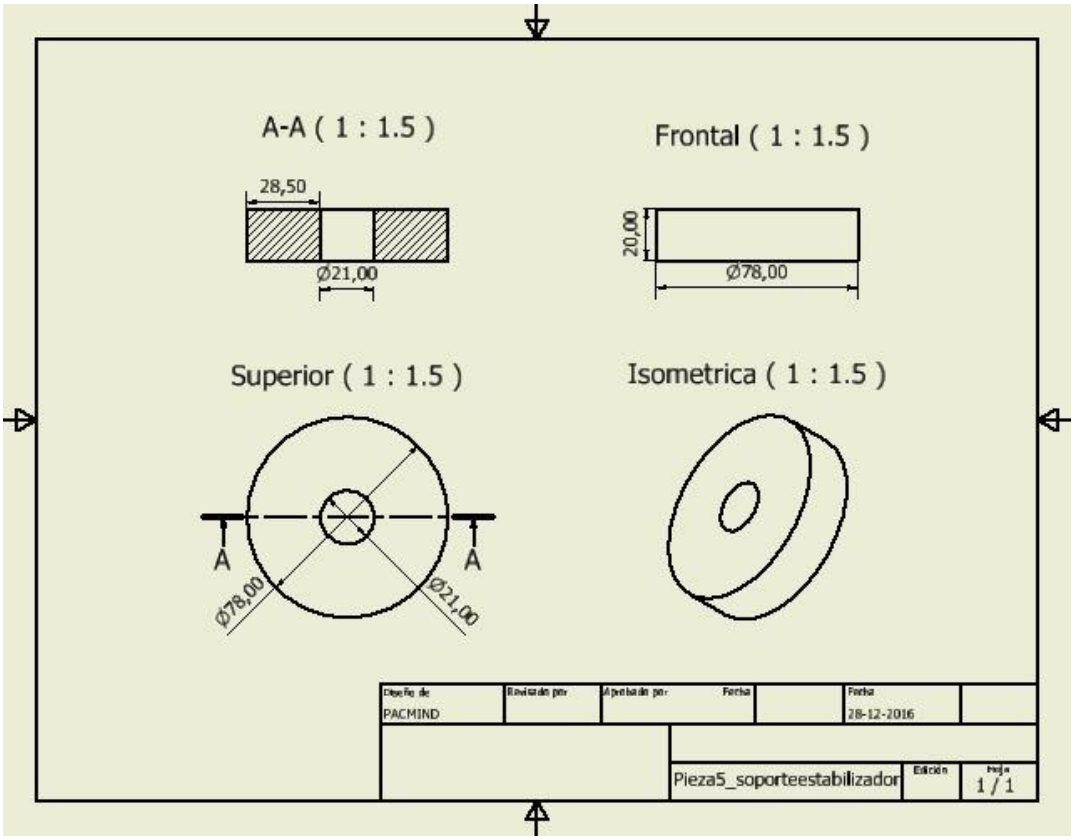

A-A (1 : 2.5)
3,18
95,25
20,00
98,43
25,00
5,00
10,79
Frontal (1 : 2.5)
125,00
9,20
20,00
Superior (1 : 2.5)
Ø101,60
A
A
Ø120,00
Ø95,25
Isometrica (1 : 2.5)
Diseño de
PACMIND
Revisado por
Aprobado por
Fecha
Fecha
28-12-2016
Ensamble_2
Edición
Hoja
1 / 1


A-A (1 : 1.5)
Ø20,00
20,00
19,00
Frontal (1 : 1.5)
Ø78,00
39,00
Superior (1 : 1.5)
M20x2.5 - 6H
A
A
Ø78,00
Ø20,00
Isometrica (1 : 1.5)
Diseño de
PACMIND
Revisado por
Aprobado por
Fecha
Fecha
28-12-2016
Pieza1_media esfera
Edición
Hoja
1 / 1


A-A (1 : 1.5)
M20x2.5 - 6g
20,00
Frontal (1 : 1.5)
100,00
Isometrica (1 : 1.5)
Superior (1 : 1.5)
A
A
Ø20,00
Diseño de
PACMIND
Revisado por
Aprobado por
Fecha
Fecha
28-12-2016
Pieza2_Esparrago metrico
Edición
Hoja
1 / 1


A-A (1 : 0.5)
7,50
Ø21,00
Frontal (1 : 0.5)
4,00
Ø36,00
Superior (1 : 0.5)
A
A
Ø36,00
Ø21,00
Isometrica (1 : 0.5)
Diseño de
PACMIND
Revisado por
Aprobado por
Fecha
Fecha
28-12-2016
Pieza3_golillaplana
Edición
Hoja
1 / 1


A-A (1 : 0.5)
Frontal (1 : 0.5)
16,00
Ø20,00
17,30
34,60
Superior (1 : 0.5)
Isometrica (1 : 0.5)
M20x2.5 - 6H
A
A
Ø20,00
17,30
Diseño de
PACMIND
Revisado por
Aprobado por
Fecha
Fecha
28-12-2016
Pieza4_tuerca
Edición
Hoja
1 / 1


A-A (1 : 1.5)
Frontal (1 : 1.5)
28,50
Ø21,00
20,00
Ø78,00
Superior (1 : 1.5)
Isometrica (1 : 1.5)
A
A
Ø78,00
Ø21,00
Diseño de
PACMIND
Revisado por
Aprobado por
Fecha
Fecha
28-12-2016
Pieza5_soporteestabilizador
Edición
Hoja
1 / 1