

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y DE MATERIALES
SANTIAGO - CHILE

EFFECTO EN LA ENERGÍA DE FRACTURA REQUERIDA AL PRE-ACONDICIONAR ROCAS MEDIANTE IMPULSOS ELÉCTRICOS

CAMILA ALEJANDRA MENESES RIQUELME

MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERA CIVIL DE MINAS

PROFESOR GUÍA
RODRIGO ESTAY HUIDOBRO

PROFESOR CORREFERENTE
RODRIGO ROZAS VALDERRAMA

AGOSTO 2023

AGRADECIMIENTOS

A mi familia.

RESUMEN

En minería, el proceso de conminución consiste en la reducción de tamaño de materiales rocosos para su posterior procesamiento. Las etapas que componen este proceso se denominan chancado y molienda, las que requieren de altos niveles de energía eléctrica, con valores cercanos al 70% del consumo energético total utilizado en una planta minera, lo que puede aumentar si se quiere conseguir un tamaño de partícula aún menor.

El objetivo principal de este estudio radica en la importancia de desarrollar nuevas técnicas que permitan una disminución del consumo energético en las distintas etapas del proceso minero. A partir de esto se analiza el impacto en la energía de chancabilidad, también conocida como energía de fractura, de rocas ante la aplicación de impulsos eléctricos que favorecen la propagación de fracturas, con el propósito de reducir el consumo de energía en el proceso de conminución.

El trabajo de laboratorio que se desarrolló en este estudio requiere de un total de 36 muestras de roca, de las cuales 18 son sometidas a la aplicación de impulsos eléctricos y el resto se mantiene en sus condiciones iniciales. El generador de impulsos es cargado inicialmente con un voltaje de 80 kV y se aplican 15 pulsos a cada muestra, con un intervalo de 1 s entre cada uno. Luego, las 36 muestras son sometidas al *Ensayo de impacto de Bond* con el objetivo de determinar la energía de fractura requerida.

El análisis general de los resultados revela que la energía de chancabilidad requerida para fracturar las rocas que fueron sometidas a la aplicación de impulsos eléctricos es menor que la de las rocas que no se sometieron al pretratamiento eléctrico, con un valor promedio de 40,75 J para el primer caso y de 69,56 J para el segundo. Por lo anterior es posible afirmar que el estudio desarrollado comprueba experimentalmente que la aplicación de impulsos eléctricos de alta tensión sí provoca un efecto en la disminución de la energía de fractura requerida en rocas.

ÍNDICE GENERAL

1	Introducción	8
	Contexto	8
	Objetivos	10
2	Marco teórico	11
	2.1 Antecedentes de fractura en sólidos mediante impulsos eléctricos.....	11
	2.2 Ensayo de impacto de Bond.....	15
3	Metodología experimental.....	17
4	Resultados y análisis	25
	4.1 Muestras totales.....	27
	4.2 Muestras con tamaño y forma similar	31
	4.3 Muestras agrupadas	37
5	Discusiones y conclusiones.....	42
6	Referencias	44
7	Anexos.....	45
	A. Cálculo de la constante K utilizada en la ecuación de energía de fractura.....	45
	B. Muestras de roca utilizadas.....	46

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Consumo energético en MJ por tonelada métrica de cobre fino (TMF). Para el caso del proceso asociado a la concentradora, el consumo energético se encuentra en MJ por tonelada métrica de cobre fino en concentrado (Agencia de Sostenibilidad Energética, Ministerio de Energía, s.f.).	9
Figura 2.1 Resistencia eléctrica de la roca en función de la presión y la temperatura: 1 - arenisca, 2 - piedra caliza, 3 - granito, 4 - fluido de perforación (las cifras junto a los puntos son valores de temperatura). En base a las diferentes resistencias eléctricas es posible escoger el tipo de roca que posea una resistencia menor al líquido, para obligar a los impulsos eléctricos a recorrer el interior de la roca (V F Vazhov, 2014).	11
Figura 2.2 Esquema de la tecnología de impulsos eléctricos (EIT) (Voigt & Anders, 2016).	12
Figura 2.3 Vista isométrica del ambiente de simulación (izq.), ambiente general con todas las intrusiones analizadas (der.) (Martínez, 2022).	13
Figura 2.4 Diseño de probeta andesita con intrusiones de calcopirita (Vargas, 2023).	14
Figura 2.5 Modelo en Ansys Electronics de probeta con electrodos plano-plano con diferencia de potencial de 200 kV (Vargas, 2023).	14
Figura 2.6 Equipo empleado para realizar el ensayo de impacto de Bond.	16
Figura 3.1 Muestras de roca correspondientes al grupo 1.	18
Figura 3.2 Muestras de roca correspondientes al grupo 2.	18
Figura 3.3 Muestras de roca correspondientes al grupo 3.	19
Figura 3.4 Muestras de roca correspondientes al grupo 4.	19
Figura 3.5 Muestras de roca correspondientes al grupo 5.	20
Figura 3.6 Muestras de roca correspondientes al grupo 6.	20
Figura 3.7 Muestras de roca correspondientes al grupo 7.	21
Figura 3.8 Muestras de roca correspondientes al grupo 8.	21
Figura 3.9 Generador de impulsos eléctricos utilizado durante este estudio. Entre los electrodos esféricos se encuentra la muestra 6.9.	23
Figura 3.10 Montaje utilizado para desarrollar el Ensayo de impacto de Bond. Entre los martillos se encuentra la muestra 2.1 con dos fracturas considerables.	24
Figura 4.1 Relación entre la energía de fractura y el espesor asociado a cada muestra de roca utilizada en ambos casos: sin y con aplicación de impulsos eléctricos.	27

Figura 4.2 Límite trazado para separar los datos de los dos casos estudiados.	28
Figura 4.3 Muestras 1.3, 1.5, 1.6 y 6.8, respectivamente.	29
Figura 4.4 Muestra 8.1.....	29
Figura 4.5 Líneas de tendencia asociadas a los dos casos estudiados. L1 corresponde a las muestras sin aplicación de impulsos y L2 para las rocas con aplicación de impulsos.	30
Figura 4.6 Energía de fractura asociada a la totalidad de muestras agrupadas por pares de tamaño y forma similares.	32
Figura 4.7 Veta rellena de pirita asociada a la muestra 1.6.	32
Figura 4.8. Discontinuidades presentes en las muestras 3.1 y 3.2, respectivamente.....	33
Figura 4.9. Fracturas provocadas por la aplicación de impulsos eléctricos en la muestra 6.3.	34
Figura 4.10. Contacto litológico presente en las muestras 8.4 y 8.8, respectivamente.	34
Figura 4.11. Fractura superficial provocada por la aplicación de impulsos eléctricos sobre la muestra 8.4.	35
Figura 4.12. Muestras 6.1 y 6.2, respectivamente.	35
Figura 4.13. Muestras 6.7 y 6.10, respectivamente.	36
Figura 4.14 Diferencia porcentual entre las energías de fractura de las rocas con y sin aplicación de impulsos eléctricos.	36
Figura 4.15 Muestras 2.1 y 2.2, respectivamente.	37
Figura 4.16 Energía de fractura promedio asociada a cada grupo de muestras de roca utilizadas.....	38
Figura 4.17 Fractura superficial provocada por la aplicación de impulsos eléctricos sobre la muestra 6.4.	39
Figura 4.18 Muestras 6.9 y 6.10, respectivamente.	40
Figura 4.19 Diferencia porcentual de las energías de fractura entre las muestras con y sin aplicación de impulsos eléctricos.	41

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Consumo de energía asociado a cada sub-etapas de chancado y molienda (Agencia de Sostenibilidad Energética, Ministerio de Energía, s.f.).	9
Tabla 3.1 Tabla resumen de las principales características de cada grupo de rocas.	22
Tabla 3.2. Muestras en las que se observa que el impulso eléctrico recorre su interior o provoca una fractura superficial. En las muestras no mencionadas no se observan cambios, ya que los impulsos recorren la superficie de la muestra.	23
Tabla 4.1 Valores de ángulo de fractura y su equivalencia en energía de fractura, obtenido para cada una de las muestras utilizadas.	25
Tabla 4.2 Resumen de las características de las muestras de roca analizadas en el capítulo 4.	26
Tabla 4.3 Pares de roca con tamaño y forma similar, compuesto por una muestra con impulsos eléctricos y una sin impulsos eléctricos. El número ubicado antes del punto corresponde al grupo al cual pertenece la muestra.	31
Tabla 4.4 Valores de energía de fractura asociados a cada muestra del grupo 6, junto al promedio para ambos casos: con y sin aplicación de impulsos eléctricos.	39
Tabla 7.1 Resumen de las características de las muestras utilizadas.....	46

1 INTRODUCCIÓN

CONTEXTO

En Chile, la minería metálica y no metálica requiere de distintos procesos de conminución para reducir las dimensiones de la roca extraída a un tamaño de partícula específico para los procesos posteriores. Esta reducción de tamaño se realiza mediante una serie de operaciones unitarias que se denominan: chancado y molienda.

El chancado corresponde a la primera etapa del proceso de conminución cuya finalidad es la reducción de tamaño de los fragmentos de roca provenientes de la mina que poseen una granulometría variada. Para este proceso se emplean equipos mecánico-eléctricos, conocidos como chancadores, que mediante movimientos de atrición trituran la roca en seco. Por lo general, el chancado se realiza en 3 etapas: chancado primario, secundario y terciario. Sin embargo, en algunos casos, se considera llevar a cabo un chancado cuaternario.

Con respecto al proceso de molienda, esta corresponde a la etapa posterior al proceso de chancado, en la cual se continúa con la reducción de tamaño de las partículas que constituyen el mineral. En esta etapa, a diferencia del chancado, se emplea agua con el fin de añadir reactivos para dar inicio al proceso de flotación. Los objetivos de la molienda son principalmente dos: liberar minerales individuales y dar paso al enriquecimiento de las especies de interés y, producir finos de fracciones de mineral incrementando la superficie específica, lo cual favorece el proceso físico-químico de la flotación. Este proceso se puede realizar en 2 etapas: molienda primaria y secundaria.

Los procesos de conminución corresponden a una de las etapas con mayor consumo de energía eléctrica, representando en algunos casos cerca del 70% del gasto energético de una planta minera, magnitud que puede aumentar si se desea conseguir un tamaño de partículas más fino. En la Figura 1.1 se presenta el consumo energético asociado a la etapa de concentración, la que considera fundamentalmente los procesos de chancado y molienda. En esta es posible apreciar la elevada intensidad energética respecto con los otros procesos, atribuyendo casi el total del consumo a la energía eléctrica.

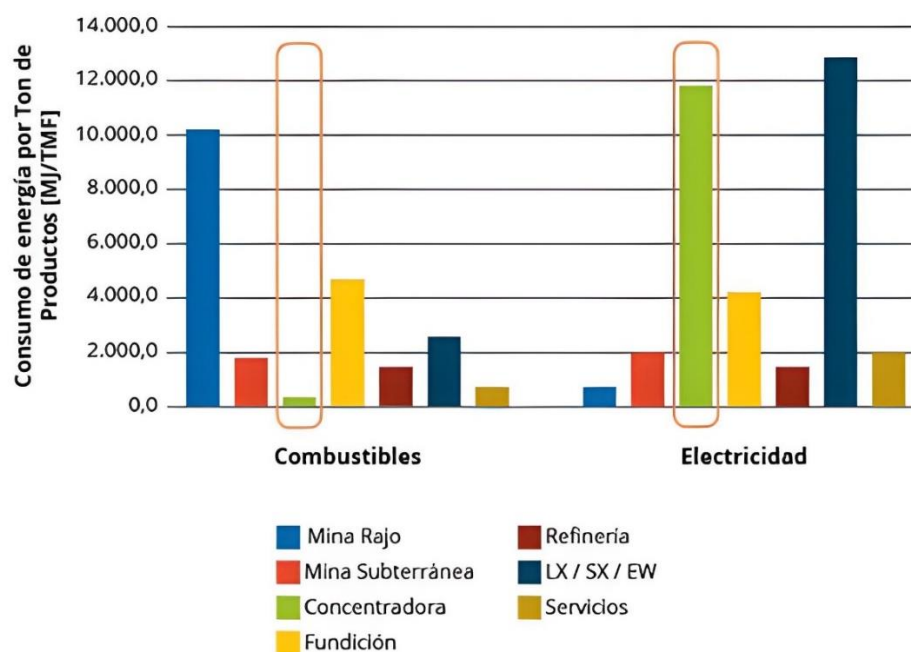


Figura 1.1 Consumo energético en MJ por tonelada métrica de cobre fino (TMF). Para el caso del proceso asociado a la concentradora, el consumo energético se encuentra en MJ por tonelada métrica de cobre fino en concentrado (Agencia de Sostenibilidad Energética, Ministerio de Energía, s.f.).

A continuación, en la Tabla 1.1 se muestran los consumos de energía por tonelada de alimentación para las etapas de chancado y molienda asociados a un rango de tamaño de partícula.

Tabla 1.1 Consumo de energía asociado a cada sub-etapas de chancado y molienda (Agencia de Sostenibilidad Energética, Ministerio de Energía, s.f.).

Etapa	Sub-etapa	Rango de tamaño (referencial)	Consumo de energía (kWh/t)
Chancado	Primario	100 a 10 cm	0,3 a 0,4
	Secundario	10 a 1 cm	0,3 a 2
	Terciario	1 a 0,5 cm	0,4 a 3
Molienda	Primaria	10 a 1 mm	3 a 6
	Secundaria	1 a 0,5 mm	4 a 10

Los consumos de energía asociados al proceso de chancado tienen relación con los motores eléctricos de grandes dimensiones que forman parte de los diferentes tipos de chancadores. Mientras que, el alto consumo energético en el proceso de molienda se puede atribuir a su

reducida eficiencia energética, puesto que el 85% de la energía empleada en la conminución se disipa como calor, el 12% se atribuye a pérdidas mecánicas y sólo el 1% de la energía es utilizada para reducir el tamaño del mineral (Agencia de Sostenibilidad Energética, Ministerio de Energía, s.f.).

Por lo anterior es necesario desarrollar nuevas técnicas y/o tecnologías que aumenten la eficiencia del proceso de conminución. Sin embargo, este proceso tiene algunas limitaciones y se consideran dos factores principales que motivan este estudio: i) el incremento de dureza en las rocas que aumenta de manera significativa el consumo de energía y ii) la disminución de las leyes de cobre en los depósitos minerales, lo que implica la extracción de un mayor volumen con el fin de mantener los niveles de producción de cobre fino.

A partir del incremento en la dureza de las rocas, se ha estudiado mediante simulación numérica el comportamiento de una roca ante la aplicación de impulsos eléctricos de alta tensión y la evaluación de sus efectos ((Martínez, 2022); (Vargas, 2023)). En base a estos estudios, en esta oportunidad se evalúa experimentalmente la aplicación de impulsos eléctricos en rocas con la finalidad de disminuir la energía de fractura requerida en las etapas de chancado y molienda.

OBJETIVOS

El objetivo principal de este estudio consiste en determinar experimentalmente la variación en la energía de fractura necesaria en una muestra de roca, posterior a la aplicación de un impulso eléctrico de alta tensión.

Para lograr lo anterior, se cumplirá con los siguientes objetivos específicos:

- Evaluar cualitativamente el efecto de un impulso de alta tensión en las muestras de roca, observando la generación de posibles fracturas inducidas.
- Calcular la energía de fractura de rocas con y sin aplicación previa de impulsos eléctricos mediante un ensayo de impacto de Bond.

2 MARCO TEÓRICO

En el siguiente capítulo se describen diferentes estudios relacionados con la aplicación de impulsos eléctricos de alta tensión en rocas y sólidos para provocar su fractura. Adicionalmente se describe el ensayo de impacto de Bond, sus características y los parámetros involucrados para el cálculo de la energía de fractura.

2.1 ANTECEDENTES DE FRACTURA EN SÓLIDOS MEDIANTE IMPULSOS ELÉCTRICOS

En Rusia, a través del estudio denominado “*Electric pulse breakdown and rock fracture in a coupled environment of increased pressure and temperature*” (V F Vazhov, 2014) fue descubierta y desarrollada una nueva tecnología que consiste en la aplicación de descargas eléctricas en rocas para inducir fracturas. El fenómeno físico detrás de esta tecnología radica en superar la resistencia de los dieléctricos líquidos sobre las resistencias de dieléctricos sólidos. Tal como se observa en la Figura 2.1, las rocas utilizadas en dicho estudio presentan diferentes resistencias eléctricas.

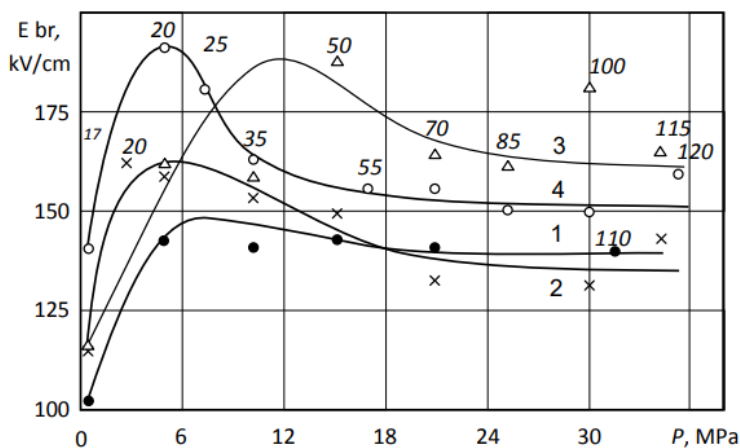


Figura 2.1 Resistencia eléctrica de la roca en función de la presión y la temperatura: 1 - arenisca, 2 - piedra caliza, 3 - granito, 4 - fluido de perforación (las cifras junto a los puntos son valores de temperatura). En base a las diferentes resistencias eléctricas es posible escoger el tipo de roca que posea una resistencia menor al líquido, para obligar a los impulsos eléctricos a recorrer el interior de la roca (V F Vazhov, 2014).

De esta manera, se ubican los electrodos sobre la superficie rocosa y se aplica un alto voltaje a uno de los electrodos, generando una descarga eléctrica que penetra en la muestra de roca.

Esta tecnología de descarga eléctrica puede ser aplicada en la perforación, trituración y cortes de rocas, siendo la perforación la etapa en la que más se utiliza.

En la investigación de Vazhov (2014) se determina la factibilidad de la descarga eléctrica para generar fractura en rocas ubicadas en perforaciones a 3500 metros. Para ello, se estableció un banco de pruebas que permite aplicar una presión de hasta 35 MPa y un voltaje de hasta 400 kV a los bloques de roca. Estos bloques de roca se componen principalmente de granito, piedra caliza y areniscas. Adicionalmente, se utiliza un fluido de perforación como medio de trabajo. En cuanto al montaje, los electrodos se encontraban distanciados por un espacio entre 10-30 mm sobre la superficie de la muestra de roca y se aplicaron 5 pulsos eléctricos. Previo a la realización de las pruebas, los bloques de roca se mantuvieron sumergidos durante una hora en el fluido de perforación (Figura 2.2).

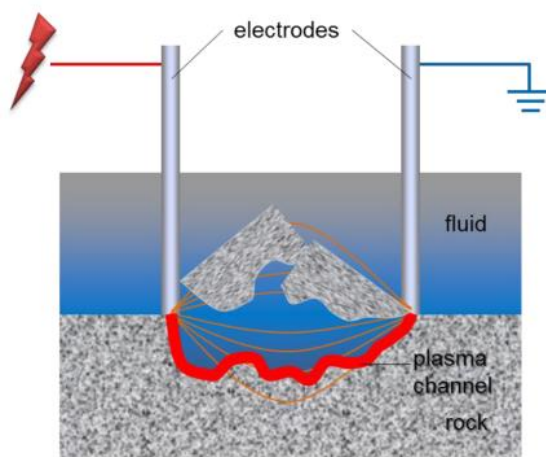


Figura 2.2 Esquema de la tecnología de impulsos eléctricos (EIT) (Voigt & Anders, 2016).

Los resultados de esta investigación demuestran que las rocas pueden ser fracturadas mediante impulsos eléctricos a una profundidad de 3500 [m] y el fluido de perforación utilizado cumple con los requisitos de resistencia eléctrica necesarios para el desarrollo de la tecnología de perforación de descarga eléctrica. Además, los autores destacan las ventajas de este método por sobre los convencionales tales como el alto rendimiento de destrucción cuando se tienen mayores brechas y alcanzar una profundidad significativa de perforación sin reemplazar la broca.

Otro antecedente relevante corresponde a la investigación previa al presente estudio denominada “*Efecto de impulsos de alta tensión en rocas utilizando simulación numérica*”

(Martínez, 2022), en la que se busca simular el comportamiento de una probeta de andesita con intrusiones de calcopirita ante la aplicación de un impulso electromagnético de alto voltaje a través del software ANSYS en un ambiente 3D (Figura 2.3).

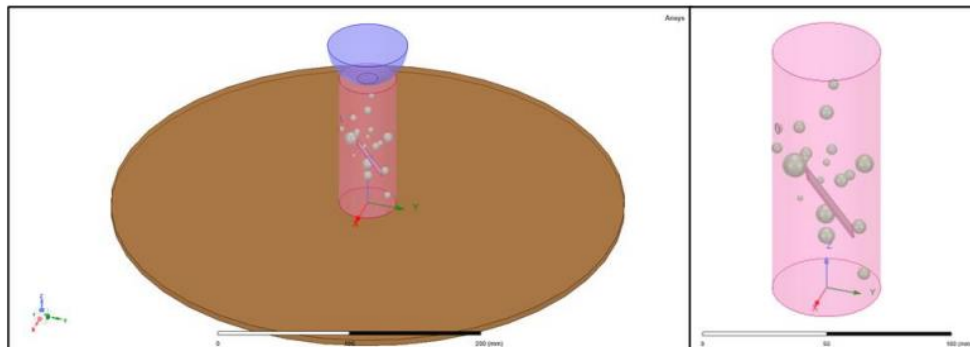


Figura 2.3 Vista isométrica del ambiente de simulación (izq.), ambiente general con todas las intrusiones analizadas (der.) (Martínez, 2022).

La metodología utilizada considera el acoplamiento del módulo eléctrico de Maxwell empleado para la generación del impulso, obteniendo las fuerzas generadas al interior de la probeta, y el módulo estructural de transición para determinar las deformaciones y esfuerzos. La descripción de los materiales considera parámetros físicos (densidad), eléctricos (resistencia eléctrica y permitividad relativa) y mecánicos (módulo de Young y Poisson). Adicionalmente, se consideran las siguientes simplificaciones para el modelo: las intrusiones son tratadas como esferas, se omite la interacción del impulso con el medio y no se considera la duración del impulso eléctrico.

El análisis contempla la caracterización cualitativa de la distribución de los esfuerzos en la probeta, así como la evaluación de esta técnica para la falla del material. Al comparar los resultados obtenidos con mecanismos de falla por fatiga, la magnitud relativa de los esfuerzos, respecto a la resistencia a la tracción según el escalamiento macizo de roca del criterio de Hooke & Brown, resulta en un 53,15%. Este valor es cercano a lo indicado por otros autores, los que corresponden a valores del orden del 60-80%, lo que indica que la metodología propuesta en la simulación es un potencial mecanismo de debilitamiento o de falla en rocas.

Un estudio denominado “*Modelamiento de ruptura de minerales utilizando impulsos de alta tensión*” (Vargas, 2023) que consiste en evaluar los efectos de los impulsos eléctricos de alta

tensión en muestras minerales, mediante el modelamiento por simulación numérica con el método de elementos finitos en el software ANSYS.

Para esto, la simulación se divide en dos etapas de diseño, la primera consiste en el modelo en Ansys Electronic donde se define la geometría, los materiales y condiciones de frontera, obteniendo la distribución de campo eléctrico para una probeta de andesita con intrusiones de calcopirita (Figura 2.4). Se varían los parámetros de tensión, distancia de electrodos, geometría de los electrodos y el medio de la muestra. En la segunda etapa se modela un sistema de análisis estructural transitorio en Ansys Mechanical en base a la teoría de falla por esfuerzo normal máximo y ruptura electromecánica, para luego analizar los efectos de los parámetros en los esfuerzos obtenidos, utilizando el criterio de escalamiento de Hoek-Brown (Figura 2.5).

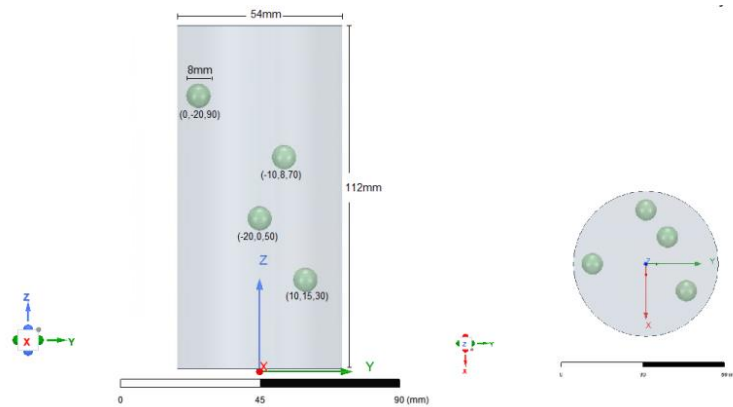


Figura 2.4 Diseño de probeta andesita con intrusiones de calcopirita (Vargas, 2023).

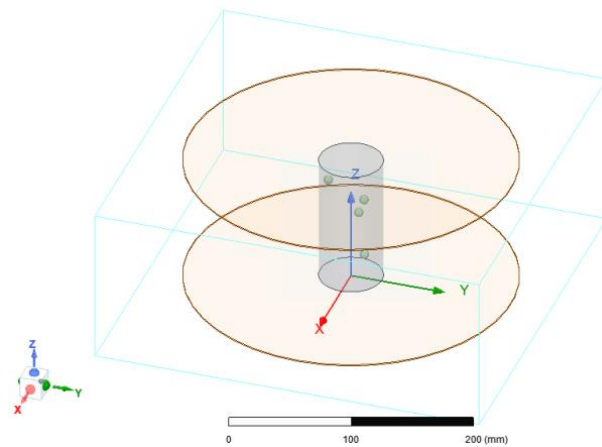


Figura 2.5 Modelo en Ansys Electronics de probeta con electrodos plano-plano con diferencia de potencial de 200 kV (Vargas, 2023).

Como resultado se tienen los esfuerzos principales máximos y mínimos, con los que luego se concluye que los factores analizados si son relevantes en el efecto del impulso eléctrico en la probeta, teniendo mayores esfuerzos a mayor tensión y menor distancia de electrodos. Además, el mejor desempeño se obtuvo con la configuración de electrodos punta2-plano y un medio acuoso. El análisis de sensibilidad señala que los esfuerzos dependen de las propiedades eléctricas del material.

La magnitud de los esfuerzos que resultan de estas simulaciones no es suficiente para provocar la ruptura de la muestra. Sin embargo, se logra evidenciar las tendencias de los esfuerzos ante la variación de los distintos factores mencionados anteriormente.

Como último antecedente, se tiene el estudio denominado “*Fractura de materiales sólidos por medio de la aplicación de impulsos de alta tensión*” (Valles, 2018), analiza la posibilidad de implementar los impulsos de alta tensión para dañar sólidos, entre los que se utilizan: ladrillos, bloques de hormigón y probetas de escoria de cobre. Se emplean dos bancos de prueba: un generador de impulsos portátil y un generador de impulsos de cuatro etapas.

El análisis general de los resultados revela que el generador de impulsos de tensión solo produce daños en las probetas si la corriente circulante es elevada, pero no es posible determinar un valor exacto debido a que solo una probeta de escoria de cobre es destruida.

2.2 ENSAYO DE IMPACTO DE BOND

El ensayo de impacto de Bond (o también conocido como *Bond Low Energy Impact Test*) se utiliza para determinar los requerimientos energéticos necesarios para dimensionar chancadores.

El equipo que se utiliza para desarrollar el ensayo de impacto de Bond se compone de dos péndulos o martillos, de 13,6 kg cada uno, montados en dos engranajes circulares que permiten golpear de manera simultánea y en las caras opuestas a lo largo de su eje menor cada muestra seleccionada (Figura 2.6). Inicialmente se impacta la roca con un bajo nivel de energía, el que se incrementa progresivamente elevando el ángulo de giro del péndulo de los martillos en 5° para cada impacto.

Para realizar este ensayo se requiere de un mínimo de 10 muestras, siendo lo ideal un total de 20, en un rango de tamaño mayor a 2" y menor a 3".

A partir del ángulo medido en el momento de la fractura es posible determinar la energía de chancabilidad de Bond.

$$E_b = K(1 - \cos \alpha) \quad (1)$$

Donde:

E_b : Energía de chancabilidad de Bond para rocas individuales (J).

K : Constante del equipo = 133,42 (J) (detalles en el Anexo A)

α : ángulo de caída del péndulo (°).



Figura 2.6 Equipo empleado para realizar el ensayo de impacto de Bond.

3 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Para el desarrollo de este estudio se utilizan los siguientes materiales y equipos:

- 36 muestras de roca
- Cortadora hidráulica
- Generador de impulsos
- Equipo para pruebas de impacto de Bond

Con el fin de conseguir que las muestras tengan un tamaño adecuado para realizar posteriormente el *Ensayo de impacto de Bond*, es necesario llevarlas a una cortadora hidráulica en la que se disminuyen sus dimensiones. Los tamaños finales del total de muestras se presentan en el Anexo B.

Las muestras de roca utilizadas en este estudio fueron extraídas desde la mina *San Lorenzo IV*, ubicada en la comuna de Alhué, Región Metropolitana, Chile.

Adicionalmente, para desarrollar un estudio adecuado es esencial realizar una caracterización geológica de las muestras de roca seleccionadas. Debido a que estas son extraídas desde distintos puntos de la misma mina son clasificadas en 8 grupos a partir de su composición mineral.

GRUPO 1

Corresponde a 6 rocas ígneas extrusivas de grano fino. Los minerales que componen estas muestras son principalmente: pirita FeS_2 de hábito cúbico, cuarzo SiO_2 de hábito romboédrico y masivo, y presencia escasa de cristales de calcopirita $CuFeS_2$ y esfalerita ZnS .

Adicionalmente, las rocas presentan meteorización por oxidación en colores marrón y amarillo en la superficie (Figura 3.1).



Figura 3.1 Muestras de roca correspondientes al grupo 1.

GRUPO 2

Se compone por 2 rocas ígneas intrusivas. El mineral principal que constituye las muestras de este grupo es pirita FeS_2 de hábito masivo y contiene una escasa presencia de calcopirita $CuFeS_2$.

Las rocas presentan meteorización por oxidación en colores marrón y amarillo en la superficie (Figura 3.2).



Figura 3.2 Muestras de roca correspondientes al grupo 2.

GRUPO 3

Está constituido por 2 por rocas ígneas extrusivas de grano fino. Los minerales que componen principalmente las muestras son: magnetita Fe_3O_4 , calcita $CaCO_3$ y calcopirita $CuFeS_2$.

De igual manera que en los grupos 1 y 2, las rocas presentan meteorización por oxidación en colores marrón y amarillo en la superficie (Figura 3.3).



Figura 3.3 Muestras de roca correspondientes al grupo 3.

GRUPO 4

Este grupo se compone por 4 muestras de roca ígnea intrusiva. Se componen principalmente por los minerales: magnetita Fe_3O_4 , calcita $CaCO_3$, calcopirita $CuFeS_2$ y plagioclasa (Figura 3.4).



Figura 3.4 Muestras de roca correspondientes al grupo 4.

GRUPO 5

Se compone por 2 rocas ígneas intrusivas. Las muestras presentan gran cantidad de cristales de magnetita Fe_3O_4 , y presencia de cristales de cuarzo SiO_2 , plagioclasa y anfíbol (Figura 3.5).



Figura 3.5 Muestras de roca correspondientes al grupo 5.

GRUPO 6

Este grupo se compone por 10 muestras de roca ígnea intrusiva. En ellas se identifican distintos minerales, tales como: magnetita Fe_3O_4 , calcopirita $CuFeS_2$, plagioclasa, calcita $CaCO_3$, clorita y anfíbol (Figura 3.6).



Figura 3.6 Muestras de roca correspondientes al grupo 6.

GRUPO 7

Está constituido por 2 muestras de roca ígnea intrusiva de grano fino. Los minerales que se logran identificar corresponden a: magnetita Fe_3O_4 , plagioclasa, clorita y calcita $CaCO_3$ (Figura 3.7).



Figura 3.7 Muestras de roca correspondientes al grupo 7.

GRUPO 8

Se compone por 8 muestras que corresponden a roca ígnea intrusiva. En las muestras se identifican diferentes minerales, tales como: clorita, feldespato potásico, cuarzo SiO_2 , anfíbol, turmalina y magnetita Fe_3O_4 (Figura 3.8).



Figura 3.8 Muestras de roca correspondientes al grupo 8.

A continuación, en la Tabla 3.1 se presenta un resumen de las principales características asociadas a cada grupo de roca utilizado en este estudio. Para una descripción más detallada de cada una de las muestras se recomienda revisar la Tabla 7.1 ubicada en Anexos

Tabla 3.1 Tabla resumen de las principales características de cada grupo de rocas.

N° Grupo	Mineral principal	Minerales secundarios	Oxidación
1	Pirita	Cuarzo, calcopirita y esfalerita	Sí
2	Pirita	Calcopirita	Sí
3	Magnetita	Calcopirita y calcita	Sí
4	Magnetita	Calcopirita, calcita y plagioclasa	No
5	Magnetita	Cuarzo, plagioclasa y anfíbol	No
6	Magnetita	Calcopirita, plagioclasa, calcita, clorita y anfíbol	No
7	Magnetita	Plagioclasa, clorita y calcita	No
8	Feldespato potásico	Anfíbol, clorita, cuarzo, magnetita, turmalina	No

Del total de 36 muestras de roca, 18 son trasladadas a un generador de impulsos eléctricos con el fin de inducir fracturas, mientras que las rocas restantes se mantienen en su condición inicial con el objetivo de comparar sus resultados. Esta separación se realiza de manera equitativa a partir de las diferentes formas y tamaños de las muestras, de manera que los resultados sean comparables.

La siguiente etapa del estudio consiste en la aplicación de impulsos eléctricos a 18 muestras de roca. El generador de impulsos es cargado inicialmente con un voltaje de 80 kV y se aplica una cantidad de 15 pulsos con un intervalo aproximado de 1 s entre ellos a cada muestra de roca.

El generador de impulsos utilizado se compone de 2 electrodos esféricos y las muestras de roca se disponen de manera horizontal entre ellos (Figura 3.9).



Figura 3.9 Generador de impulsos eléctricos utilizado durante este estudio. Entre los electrodos esféricos se encuentra la muestra 6.9.

A continuación, en la Tabla 3.2 se presenta una breve descripción del comportamiento observado en las muestras de roca posterior a la aplicación de impulsos eléctricos. En las muestras no mencionadas no se observan comportamientos diferentes posterior a la aplicación de impulsos, ya que estos recorren el exterior de la muestra.

Tabla 3.2 Muestras en las que se observa que el impulso eléctrico recorre su interior o provoca una fractura superficial. En las muestras no mencionadas no se observan cambios, ya que los impulsos recorren la superficie de la muestra.

N° Muestra	Comportamiento
6.3	Se genera una fractura posterior a la aplicación de los 15 pulsos eléctricos
6.4	Se observa una fractura superficial
6.7	Los pulsos eléctricos pasan a través de la muestra
8.2	El primer pulso rompe una parte superficial de la muestra
8.4	Los pulsos eléctricos recorren el interior de la muestra

Finalmente, las 36 muestras de roca son llevadas al *Ensayo de impacto de Bond* en el que se prueban distintos ángulos de manera creciente hasta conseguir el valor que provoca una fractura considerable en la roca (Figura 3.10).

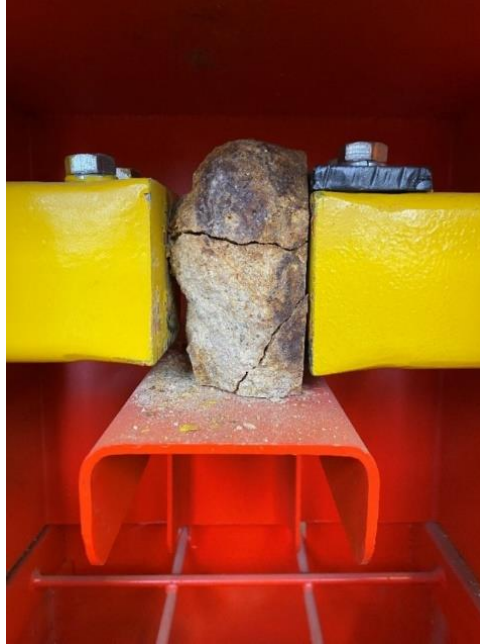


Figura 3.10 Montaje utilizado para desarrollar el Ensayo de impacto de Bond. Entre los martillos se encuentra la muestra 2.1 con dos fracturas considerables.

4 RESULTADOS Y ANÁLISIS

A continuación, en la Tabla 4.1 se presentan los valores de ángulo de fractura obtenido para cada una de las muestras. En la muestra 7.1 no se registran datos debido a que no se genera fractura, por lo que el grupo 7 no es considerado en el análisis posterior.

A partir de los dichos valores de ángulo se calcula el valor de energía de fractura asociado a cada muestra de roca utilizada, mediante la ecuación 1.

Al observar el promedio de la energía utilizada se observa que se cumple experimentalmente con lo esperado, ya que el valor de energía de fractura es considerablemente menor en el caso de las rocas que reciben la aplicación de impulsos eléctricos.

Tabla 4.1 Valores de ángulo de fractura y su equivalencia en energía de fractura, obtenido para cada una de las muestras utilizadas.

Sin impulsos eléctricos			Con impulsos eléctricos		
N° de muestra	Ángulo de fractura (°)	Energía de fractura (J)	N° de muestra	Ángulo de fractura (°)	Energía de fractura (J)
1.3	60	66,71	1.1	30	17,87
1.5	45	39,08	1.2	45	39,08
1.6	35	24,13	1.4	50	47,66
2.2	65	77,03	2.1	30	17,87
3.2	60	66,71	3.1	65	77,03
4.3	75	98,89	4.1	30	17,87
4.4	60	66,71	4.2	40	31,21
5.1	70	87,79	5.2	35	24,13
6.2	60	66,71	6.1	60	66,71
6.5	55	56,89	6.3	40	31,21
6.9	60	66,71	6.4	50	47,66
6.8	40	31,21	6.9	40	31,21
6.10	40	31,21	6.7	65	77,03
7.2	40	31,21	7.1	-	-
8.3	65	77,03	8.1	60	66,71
8.5	90	133,42	8.2	60	66,71
8.7	50	47,66	8.4	60	66,71
8.8	55	56,89	8.6	35	24,13
Promedio energía (J)		69,56	Promedio energía (J)		40,75

A continuación, se presenta la Tabla 4.2 en la que se resumen las características principales de las muestras analizadas en este capítulo.

Tabla 4.2 Resumen de las características de las muestras de roca analizadas en el capítulo 4.

Nº Muestra	Dimensiones (cm)	Oxidación	Discontinuidades	Mineralización
1.3	7,2 x 8,2 x 11,5	Sí	No	Sí, pirita diseminada
1.5	5,0 x 8,1 x 8,2	Sí	Sí	Sí, pirita diseminada
1.6	8,4 x 10,0 x 5,7	Sí	Sí	Sí, pirita diseminada y vetilla rellena de pirita
2.1	9,9 x 6,3 x 5,8	Sí	No	Sí, pirita diseminada
2.2	10,1 x 6,8 x 5,5	Sí	No	Sí, pirita diseminada
3.1	11,8 x 8,1 x 7,2	Sí	No	Sí, magnetita diseminada
3.2	11,9 x 8,0 x 7,0	Sí	No	Sí, magnetita diseminada
6.1	8,4 x 7,6 x 10,7	No	No	Sí, magnetita diseminada
6.2	11,1 x 4,6 x 6,8	No	No	Sí, magnetita diseminada
6.3	11,9 x 6,9 x 4,1	No	Sí	Sí, magnetita diseminada
6.4	8,9 x 7,7 x 6,5	No	No	Sí, magnetita diseminada
6.6	8,4 x 7,0 x 5,1	No	Sí	Sí, magnetita diseminada
6.7	9,7 x 7,7 x 7,3	No	No	Sí, magnetita diseminada
6.8	8,7 x 6,0 x 7,4	No	No	Sí, magnetita diseminada
6.9	8,9 x 9,7 x 5,8	No	No	Sí, magnetita diseminada
6.10	2,8 x 9,1 x 7,2	No	No	Sí, magnetita diseminada
8.1	8,6 x 4,8 x 5,2	No	No	No
8.4	10,5 x 9,5 x 7,0	No	No	No
8.8	4,8 x 8,8 x 7,7	No	No	No

4.1 MUESTRAS TOTALES

Posteriormente, se grafica el comportamiento entre la energía de fractura y el espesor de cada muestra, con el fin de determinar si existe algún tipo de relación entre ambos.

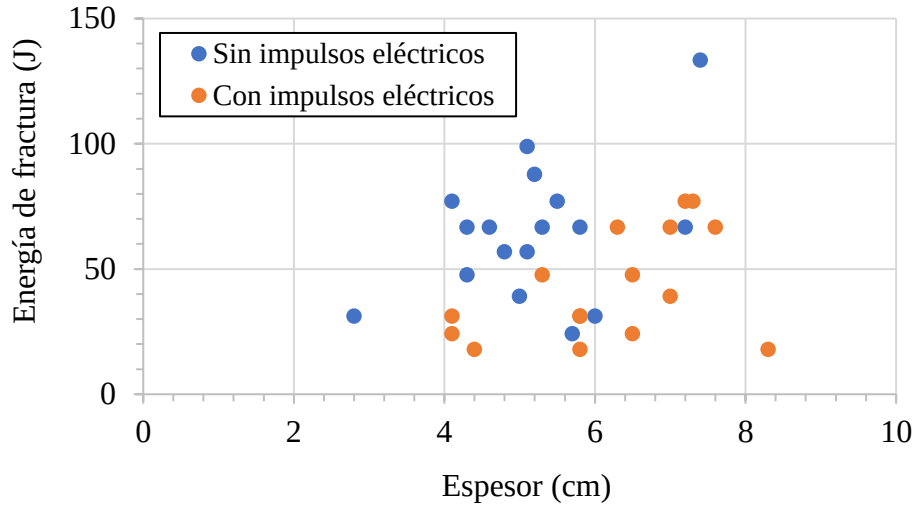


Figura 4.1 Relación entre la energía de fractura y el espesor asociado a cada muestra de roca utilizada en ambos casos: sin y con aplicación de impulsos eléctricos.

A partir de la distribución de datos presentados en la Figura 4.1, es posible observar que si se traza un límite diagonal se puede determinar un comportamiento entre la energía de fractura y el espesor para cada caso estudiado (Figura 4.2).

Inicialmente, la recta límite se ajusta en la intersección (0,0) para que el límite definido tenga sentido físico. Se prueba con distintos valores de pendiente hasta conseguir el que separe de mejor manera los datos, teniendo así una pendiente de valor 10,8.

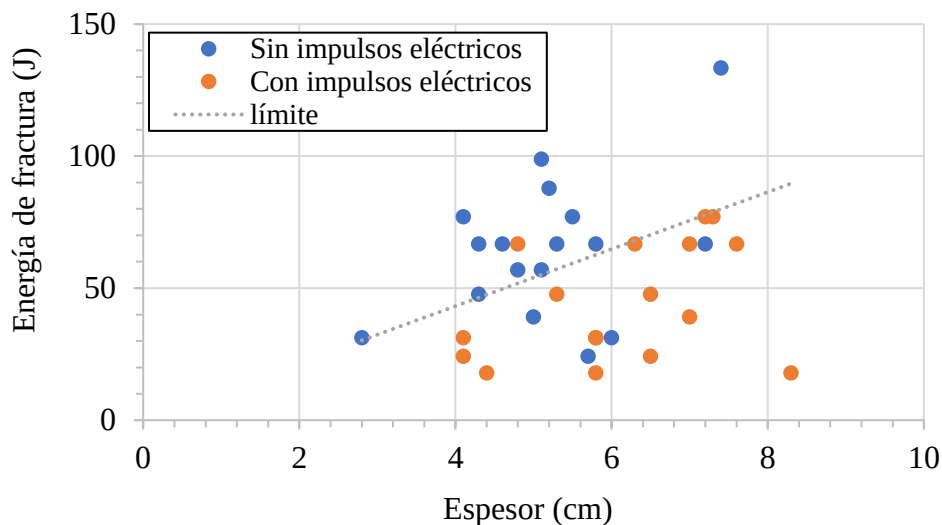


Figura 4.2 Límite trazado para separar los datos de los dos casos estudiados.

Respecto a las muestras a las que se les aplicaron impulsos eléctricos, se observa una relación directa entre la energía de fractura y el espesor, en donde la mayoría de los casos se encuentra bajo el límite definido. Esto muestra que independiente del espesor se necesitó de una menor energía de fractura. Para el caso de las muestras sin aplicación de impulsos esto no se observa de manera tan evidente, ya que la distribución de sus datos presenta mayor aleatoriedad. Sin embargo, la mayoría de los casos se encuentra por sobre el límite definido. Adicionalmente, la máxima energía de fractura requerida para las muestras con impulsos es de 77,8 (J), a diferencia de las muestras sin impulsos que necesitan una energía máxima de 133,4 (J) para inducir fracturas.

El 85,3% de los datos se encuentran correctamente separados por el límite definido. Las muestras que no cumplen esto son: 1.3, 1.5, 1.6 y 6.8 para el caso sin aplicación de impulsos eléctricos, y la muestra 8.1 para el caso con aplicación de impulsos.

Como se observa en la Figura 4.3, las muestras 1.3, 1.5 y 1.6 presentan un alto porcentaje de oxidación superficial, lo que pudo disminuir su dureza y la cantidad de energía requerida para generar fractura. Por otro lado, la muestra 6.8 presenta caras irregulares, lo que probablemente impide una correcta absorción de la energía aplicada.



Figura 4.3 Muestras 1.3, 1.5, 1.6 y 6.8, respectivamente.

Por otra parte, en la Figura 4.4 se observa que la muestra 8.1 presenta caras planas, por lo que se espera que absorba de mejor manera la energía aplicada. Sin embargo, los impulsos aplicados en esta muestra recorren únicamente su superficie y no generan daños observables. Es por esto por lo que se podría esperar que la muestra se comporte de manera similar a una muestra sin impulsos eléctricos ante la aplicación de energía.



Figura 4.4 Muestra 8.1.

Posteriormente, se grafican las líneas de tendencia asociadas a ambos casos (Figura 4.5), ajustándolas a la intersección (0,0). A partir de estas rectas es posible confirmar el análisis anterior de que las rocas sin aplicación de impulsos requieren una mayor energía para ser fracturadas en comparación con las rocas con impulsos eléctricos, debido a que la línea L1 se ubica sobre la línea de tendencia L2.

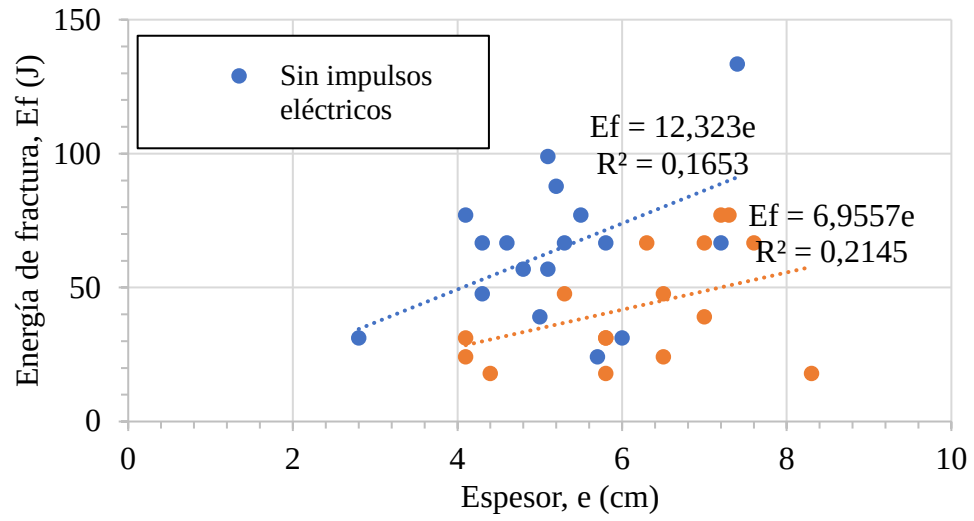


Figura 4.5 Líneas de tendencia asociadas a los dos casos estudiados. L1 corresponde a las muestras sin aplicación de impulsos y L2 para las rocas con aplicación de impulsos.

4.2 MUESTRAS CON TAMAÑO Y FORMA SIMILAR

En la Tabla 4.3 se presentan los pares de muestras de roca que poseen un tamaño y forma similar, por lo que se procede a comparar sus valores de ángulo y energía de fractura.

Tabla 4.3 Pares de roca con tamaño y forma similar, compuesto por una muestra con impulsos eléctricos y una sin impulsos eléctricos. El número ubicado antes del punto corresponde al grupo al cual pertenece la muestra.

Nº Par	Con impulsos eléctricos	Sin impulsos eléctricos
1	1.1	1.5
2	1.2	1.3
3	1.4	1.6
4	2.1	2.2
5	3.1	3.2
6	4.1	4.4
7	4.2	4.3
8	5.2	5.1
9	6.1	6.2
10	6.4	6.5
11	6.6	6.9
12	6.7	6.10
13	6.3	6.8
14	8.1	8.3
15	8.2	8.5
16	8.4	8.8
17	8.6	8.7

A continuación, con base en los datos de la tabla anterior se presentan los valores de energía de fractura asociada a cada par de muestras en la Figura 4.6.

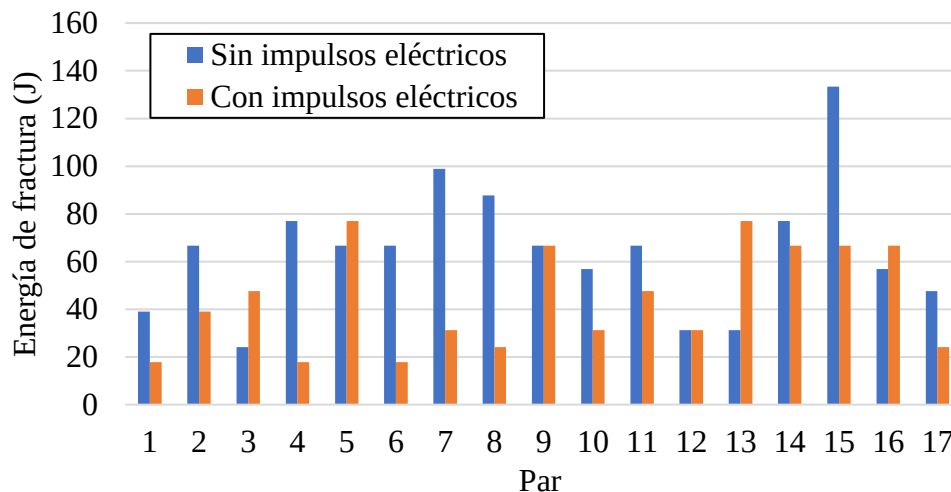


Figura 4.6 Energía de fractura asociada a la totalidad de muestras agrupadas por pares de tamaño y forma similares.

En la figura anterior se observa que en la mayoría de los pares el valor de energía de fractura es mayor para el caso de las muestras a las que no se les aplican impulsos eléctricos, lo que cumple con el comportamiento esperado. Sin embargo, para los pares N°3, 5, 13 y 16 ocurre lo contrario, ya que la energía de fractura asociada a la muestra con impulsos eléctricos posee un valor mayor.

Para el caso del par N°3 el valor de energía de fractura correspondiente a la muestra 1.4, con aplicación de impulsos eléctricos, es mayor que el obtenido para la muestra 1.6, sin aplicación de impulsos eléctricos, lo que se puede explicar debido a que la muestra 1.6 presenta una veta rellena de pirita (Figura 4.7), la que actúa como plano de debilidad y así, posteriormente, requiere una menor cantidad de energía para provocar la fractura, en comparación con la muestra 1.4 que no presenta ninguna discontinuidad.



Figura 4.7 Veta rellena de pirita asociada a la muestra 1.6.

Por otro lado, el par N°5 se compone por las muestras 3.1 y 3.2. Ambas muestras presentan pequeñas grietas con distinta orientación (Figura 4.8) que afectan el comportamiento de la roca ante la energía aplicada, ya que no posee una estructura homogénea. Por otro lado, al comparar los valores de energía para las muestras 3.1 y 3.2, corresponden a 77,03 (J) y 66,71 (J), respectivamente. Estos resultados muestran aparentemente una gran diferencia, sin embargo, los valores de ángulo asociados a cada muestra son de 65° y 60° . Esto muestra un comportamiento similar de las muestras en el *Ensayo de impacto de Bond*, considerando que los impulsos eléctricos aplicados sobre la muestra 3.1 no provocan daño.



Figura 4.8 Discontinuidades presentes en las muestras 3.1 y 3.2, respectivamente.

Con respecto al par N°13 es posible mencionar que la muestra 6.3 se fractura de manera considerable ante la aplicación de pulsos eléctricos (Figura 4.9). Sin embargo, de igual manera el valor de energía obtenido es mayor en comparación con la muestra 6.8. Esto ocurre porque la aplicación de energía sobre la muestra 6.3 en el *Ensayo de impacto de Bond* es complicada debido a la forma de la roca, ya que solo posee una cara plana sobre la cual se puede apoyar, por lo que el impacto de los martillos es aplicado de forma perpendicular sobre su eje de menor tamaño. Esto provoca que los martillos golpeen la muestra únicamente con su borde inferior, por lo que no se aplica la totalidad de energía de impacto sobre la roca. De esta manera, se requiere de un mayor ángulo para que la muestra se fracture de manera considerable.



Figura 4.9 Fracturas provocadas por la aplicación de impulsos eléctricos en la muestra 6.3.

En cuanto al par N°16 que se compone por las muestras 8.4 y 8.8, cabe destacar que ambas presentan un contacto litológico (Figura 4.10), sin embargo, este no se comporta como un plano de debilidad en las muestras al momento de recibir el impacto del *Ensayo de impacto de Bond*, ya que la fractura no se genera en ese eje. Adicionalmente, los pulsos eléctricos aplicados sobre la muestra 8.4 provocan una pequeña fractura superficial (Figura 4.11). Por lo que el comportamiento esperado es que el valor obtenido de energía sea menor para la muestra 8.4, sin embargo, ocurre lo contrario. Para las muestras 8.4 y 8.8 la energía de fractura obtenida es de 66,71 (J) y 56,89 (J), lo que parece ser una gran diferencia, no obstante, el ángulo asociado a cada muestra es de 60° y 55°, respectivamente, lo que corresponde a un comportamiento similar de ambas muestras ante el *Ensayo de impacto de Bond*. Una posible explicación para este comportamiento es que los impulsos eléctricos hayan provocado daño únicamente a nivel superficial sin impactar de manera interna la composición de la roca, por lo que la resistencia de ambas muestras se mantuvo intacta.



Figura 4.10 Contacto litológico presente en las muestras 8.4 y 8.8, respectivamente.



Figura 4.11 Fractura superficial provocada por la aplicación de impulsos eléctricos sobre la muestra 8.4.

Por otro lado, para los pares N°9 y 12 se obtiene el mismo valor de energía de fractura en ambos casos.

Para el caso del par N°9, lo anterior pudo ocurrir debido a que en la muestra 6.1 los pulsos eléctricos aplicados recorren la roca de manera superficial, por lo que no provocan ninguna variación a nivel interno. En la Figura 4.12 se observa que ambas muestras presentan caras irregulares similares, por lo que su comportamiento ante el *Ensayo de impacto de Bond* es comparable.



Figura 4.12 Muestras 6.1 y 6.2, respectivamente.

Por otra parte, para el caso del par N°12, la muestra 6.10 presenta una cara plana debido al corte realizado en la etapa de preparación de muestras (Figura 4.13), esto pudo provocar diferencias con la muestra 6.7 al momento de absorber la energía de impacto aplicada por los martillos. Adicionalmente, cabe mencionar que los pulsos eléctricos aplicados sobre la

muestra 6.7 pasan a través de ella (Tabla 3.2), sin embargo, no generan cambios apreciables a simple vista.



Figura 4.13 Muestras 6.7 y 6.10, respectivamente.

Por otra parte, se analizan los pares de muestras en las que la energía de fractura de las rocas con aplicación de impulsos es mayor que la de las rocas que se mantienen en sus condiciones iniciales.

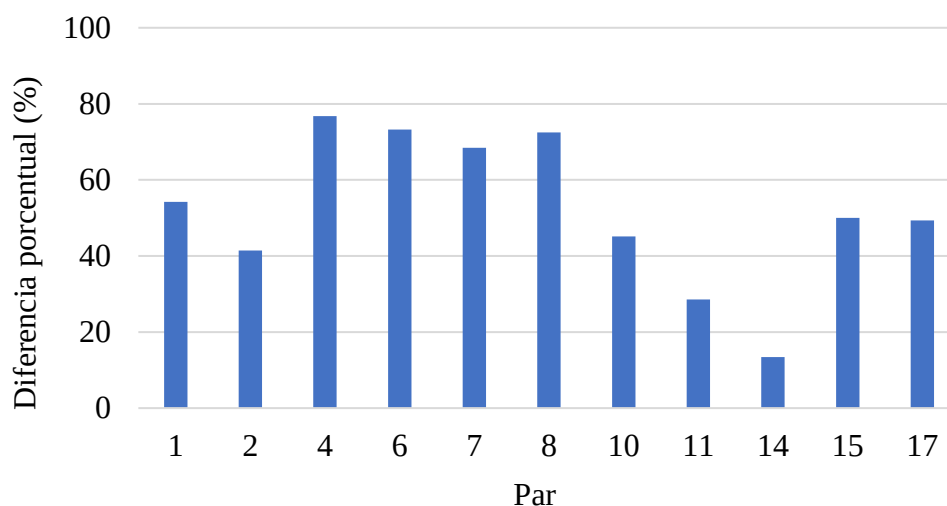


Figura 4.14 Diferencia porcentual entre las energías de fractura de las rocas con y sin aplicación de impulsos eléctricos.

En la Figura 4.14 se observa que los pares de roca con mayor diferencia porcentual corresponden a los N°4, 6, 7 y 8, con valores cercanos al 70%, siendo el par N°4 el que presenta el valor mayor, correspondiente a un 76,8%.

Las muestras 2.1 y 2.2 (Figura 4.15) que componen el par N°4, son las que poseen las dimensiones más similares y ambas provienen del mismo bloque de roca, por lo que su

composición mineral es idéntica. Lo anterior pudo favorecer el resultado obtenido, ya que se logra determinar de manera clara el efecto de los impulsos eléctricos con una menor cantidad de factores variables.



Figura 4.15 Muestras 2.1 y 2.2, respectivamente.

4.3 MUESTRAS AGRUPADAS

A continuación, en la Figura 4.16 se comparan los valores promedio de energía de fractura asociada a cada grupo de rocas descrito anteriormente en el capítulo de *Metodología experimental*.

En la mayoría de los grupos se cumple con el resultado esperado, el cual consiste en que los valores obtenidos de energía de fractura sean mayores en el caso de las rocas a las que no se les aplican impulsos eléctricos. Sin embargo, en los grupos 3 y 6 ocurre lo opuesto.

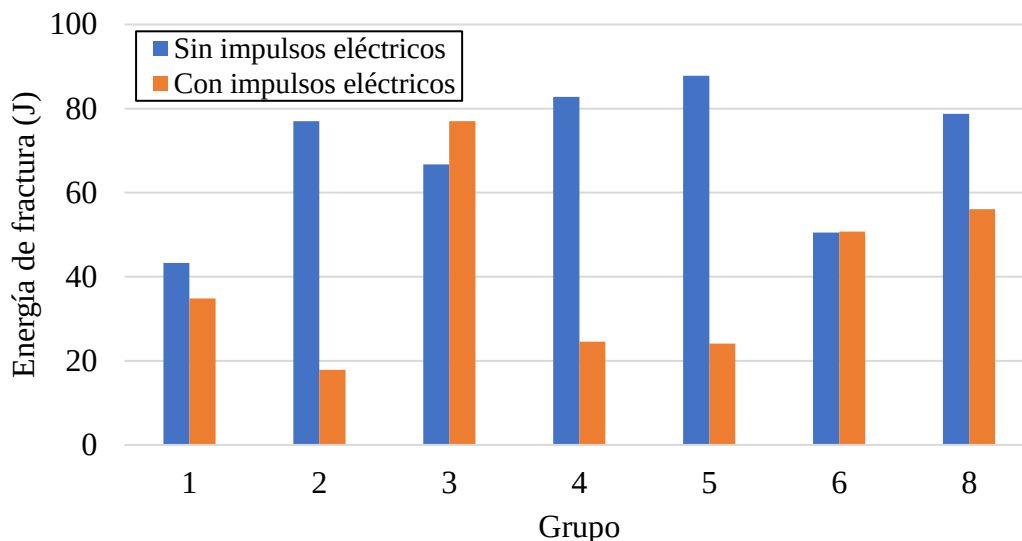


Figura 4.16 Energía de fractura promedio asociada a cada grupo de muestras de roca utilizadas.

Debido a que el grupo 3 se compone únicamente por dos muestras, el análisis comparativo de sus valores es el mismo que el expuesto en el subcapítulo anterior. La diferencia de los resultados obtenidos con lo esperado pudo ser provocado por las pequeñas grietas existentes en el interior de ambas muestras. También, es necesario mencionar que las muestras poseen un alto porcentaje de oxidación superficial como consecuencia del entorno húmedo en el cual se encontraban. Sin embargo, y pese a todo lo mencionado anteriormente, la diferencia de los valores obtenidos es pequeña, siendo una energía de 66,71 (J) para la muestra 3.2, sin aplicación de impulsos eléctricos, y una energía de 77,03 (J) para la muestra 3.1, con aplicación de impulsos eléctricos. Si bien, la muestra 3.1 recibe impulsos eléctricos, estos la recorren de manera superficial sin provocar daños significativos. Por lo tanto, el comportamiento de ambas muestras ante el *Ensayo de impacto de Bond* es similar.

Por otra parte, el grupo 6 obtiene casi el mismo promedio de energía en ambos casos. A continuación, en la Tabla 4.4 se presentan los valores asociados a cada muestra perteneciente a este grupo.

Tabla 4.4 Valores de energía de fractura asociados a cada muestra del grupo 6, junto al promedio para ambos casos: con y sin aplicación de impulsos eléctricos.

Con impulsos eléctricos		Sin impulsos eléctricos	
<i>Nº de muestra</i>	<i>Energía de fractura (J)</i>	<i>Nº de muestra</i>	<i>Energía de fractura (J)</i>
6.1	66,71	6.2	66,71
6.3	31,21	6.5	56,89
6.4	47,66	6.8	66,71
6.6	31,21	6.9	31,21
6.7	77,03	6.10	31,21
Promedio	50,76		50,55
Desviación estándar	20,73		18,10

A partir de los valores de desviación estándar se puede afirmar que la dispersión de los datos es similar en ambos casos, ya que son valores cercanos, siendo de 20,73 para las muestras con impulsos y de 18,10 para las muestras sin impulsos eléctricos.

Para el caso de las rocas afectadas por impulsos eléctricos, es posible mencionar que en la muestra 6.3 se provoca una fractura considerable (Figura 4.9) y en la muestra 6.4 se produce una pequeña fractura superficial (Figura 4.17). Adicionalmente, en la muestra 6.7 los pulsos pasan a través de ella sin presentar variaciones evidentes. En las muestras 6.1 y 6.6 no se aprecian cambios considerables provocados por los pulsos eléctricos.



Figura 4.17 Fractura superficial provocada por la aplicación de impulsos eléctricos sobre la muestra 6.4.

A pesar de lo mencionado anteriormente, la muestra 6.7 presenta el valor de energía más alto de todo el grupo, lo que se puede explicar debido a que posee una mayor dureza que las demás y/o la fuerza de los martillos al momento de impactar no es recibida de manera correcta debido a sus caras irregulares (Figura 4.13).

Por otro lado, las muestras 6.9 y 6.10 presentan valores de energía bajos en comparación al resto del grupo. Tal como se observa en la Figura 4.18 ambas muestras presentan dos caras planas sobre las cuales impactan los martillos, esto puede provocar que las dos rocas recibieran una mayor cantidad de la energía liberada de los péndulos en comparación con las muestras que tienen caras irregulares, lo que se traduce en que las muestras 6.9 y 6.10 requieren de un menor ángulo para ser fracturadas.



Figura 4.18 Muestras 6.9 y 6.10, respectivamente.

Por otra parte, se analizan los grupos de roca en los que la energía de fractura de las muestras con aplicación de impulsos es menor.

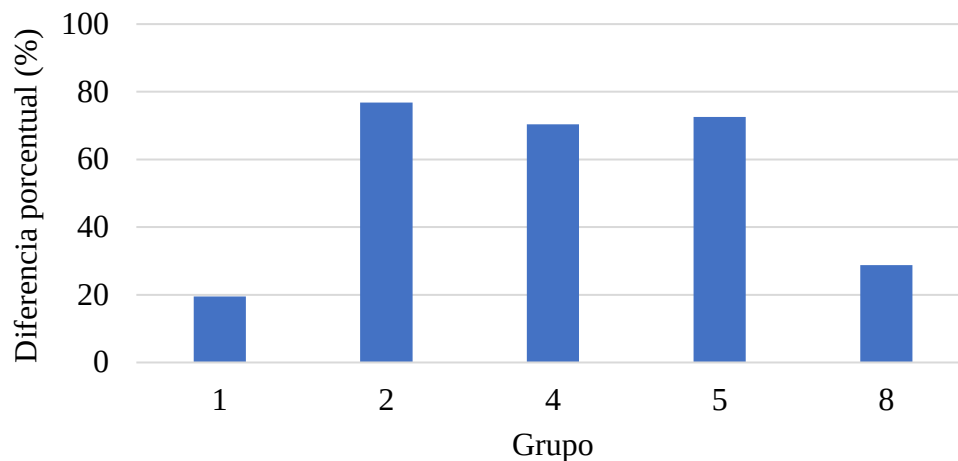


Figura 4.19 Diferencia porcentual de las energías de fractura entre las muestras con y sin aplicación de impulsos eléctricos.

En la Figura 4.19 se observa que los grupos que presentan una mayor diferencia porcentual, superiores al 70%, corresponden a los grupos 2, 4 y 5. Estos grupos son los únicos en los que la totalidad de las muestras que los componen cumplen con el comportamiento esperado. Adicionalmente, el grupo que presenta la mayor diferencia porcentual corresponde al grupo 2, lo que coincide con el análisis del par N°4 descrito en el punto anterior.

5 DISCUSIONES Y CONCLUSIONES

De manera general, los resultados obtenidos cumplen con lo esperado, que las rocas con aplicación de impulsos requieran una menor cantidad de energía para generar una fractura, con un promedio de 40,75 (J) para este caso y de 69,56 (J) para las rocas sin impulsos eléctricos.

Respecto a la aplicación de los impulsos eléctricos, estos no penetran a la mayoría de las muestras debido a que no contienen minerales altamente conductores, por lo que los pulsos eléctricos recorren únicamente la superficie de estas. Si bien la pirita (FeS_2) y la magnetita (Fe_3O_4) pueden conducir la electricidad por estar compuestos del elemento Fe , son los minerales compuestos de Cu los que podrían tener una mayor efectividad en base al estudio “*Efecto de impulsos de alta tensión en rocas utilizando simulación numérica*” (Martínez, 2022) que utiliza el mineral calcopirita ($CuFeS_2$) como medio conductor.

Adicionalmente, en cuanto a la composición de las rocas utilizadas, las distintas litologías y minerales presentes afectan de manera directa un correcto análisis de los resultados, ya que lo anterior provoca que existan diferentes resistencias eléctricas y durezas en las muestras, tal como se muestra en la Figura 2.1, los distintos tipos de roca presentan diferentes resistencias eléctricas.

Por otra parte, con relación a la diferencia de forma y tamaño de las muestras de roca es posible mencionar que esto afecta directamente en la correcta aplicación de impulsos eléctricos, ya que los electrodos presentan un bajo porcentaje de contacto con la superficie en las caras irregulares de las muestras, y, por otro lado, el golpe de los martillos no impacta de manera adecuada en las caras irregulares, provocando que la energía de impacto se acumule en una zona determinada y no sea absorbida completamente. Sin embargo, también existen muestras que poseen caras planas debido a los cortes realizados en la etapa de preparación de muestras, por lo que en esos casos el impacto de energía si ocurre de forma adecuada, lo que genera diferencias entre los resultados obtenidos para las muestras con caras irregulares y las que presentan caras planas.

Para evitar los problemas planteados anteriormente, es necesario utilizar muestras de tamaño y forma similares con el objetivo de que los resultados obtenidos sean comparables entre sí y no afecten características externas al estudio, y que posean una composición mineral comparable para que no se requiera separar las muestras en diferentes grupos. Lo mostrado en este estudio, sin embargo, describe el comportamiento de rocas con formas irregulares tal como si vinieran de la tronadura, obteniéndose resultados satisfactorios y esperados en base al requerimiento de una menor necesidad de energía de fractura con las muestras sometidas a los impulsos eléctricos.

En cuanto al voltaje y la cantidad de pulsos eléctricos aplicados, es necesario realizar un estudio con la aplicación de un mayor voltaje y una menor cantidad de pulsos de manera que sea un proceso replicable a escala industrial, ya que la aplicación de una gran cantidad de pulsos retrasaría por completo el proceso minero.

6 REFERENCIAS

- Agencia de Sostenibilidad Energética, Ministerio de Energía. (s.f.). *Conminución de Sulfuros*. Obtenido de <https://www.energiaenmineria.cl/procesos/conminucion-sulfuros/>
- Benavente, C. (2019). *Propagación de microfracturas en la conminución y métodos de caracterización*. Concepción, Chile.
- Hanna, V. (2017). *Evaluación de tecnologías hiperespectrales en la caracterización mineral de yacimientos para aplicaciones geometalúrgicas: Caso aplicado a mina Florida, distrito minero Alhué, Región Metropolitana, Chile*. Santiago, Chile: Universidad de Chile.
- Martínez, C. (2022). *Efecto de impulsos de alta tensión en rocas utilizando simulación numérica*. Santiago, Chile: Universidad Técnica Federico Santa María.
- V F Vazhov, S. Y. (2014). Electric pulse breakdown and rock fracture in a coupled. *International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects*.
- Valles, D. (2018). *Fractura de materiales sólidos por medio de la aplicación de impulsos de alta tensión*. Valparaíso, Chile: Universidad Técnica Federico Santa María.
- Vargas, C. (2023). *Modelamiento de ruptura de minerales utilizando impulsos de alta tensión*. Santiago, Chile: Universidad Técnica Federico Santa María.
- Voigt, M., & Anders, E. (2016). Electric Impulse Technology: Less Energy, Less Drilling Time, Less Round Trips. *Society of Petroleum Engineers* .

7 ANEXOS

A. CÁLCULO DE LA CONSTANTE K UTILIZADA EN LA ECUACIÓN DE ENERGÍA DE FRACTURA

La constante K se calcula como la energía potencial que impacta a la muestra de roca al liberar los péndulos.

$$K = 2 mgh = 133,42 J$$

Donde:

m : masa de un martillo = 13,6 (kg).

g : fuerza de gravedad = 9,81 (m/s²).

h : distancia desde el centro del péndulo hasta el punto de impacto con la muestra = 0,5 (m).

B. MUESTRAS DE ROCA UTILIZADAS

Tabla 7.1 Resumen de las características de las muestras utilizadas.

N° Muestra	Imagen	Dimensiones [cm]	Oxidación	Discontinuidades
1.1		4,4 x 10,1 x 8,5	Sí	No
1.2		10,9 x 8,4 x 7,0	Sí	Sí
1.3		7,2 x 8,2 x 11,5	Sí	No
1.4		8,6 x 12,7 x 5,3	Sí	No

1.5		5,0 x 8,1 x 8,2	Sí	Sí
1.6		8,4 x 10,0 x 5,7	Sí	Sí
2.1		9,9 x 6,3 x 5,8	Sí	No
2.2		10,1 x 6,8 x 5,5	Sí	No
3.1		11,8 x 8,1 x 7,2	Sí	No

3.2		11,9 x 8,0 x 7,0	Sí	No
4.1		8,3 x 10,9 x 8,9	No	No
4.2		6,6 x 11,0 x 5,8	No	No
4.3		11,0 x 10,1 x 5,1	No	No
4.4		10,4 x 7,5 x 4,3	No	No

5.1		10,9 x 7,5 x 5,2	No	No
5.2		8,8 x 7,4 x 6,5	No	No
6.1		8,4 x 7,6 x 10,7	No	No
6.2		11,1 x 4,6 x 6,8	No	No
6.3		11,9 x 6,9 x 4,1	No	Sí

6.4		8,9 x 7,7 x 6,5	No	No
6.5		9,9 x 5,1 x 10,0	No	No
6.6		8,4 x 7,0 x 5,1	No	Sí
6.7		9,7 x 7,7 x 7,3	No	No
6.8		8,7 x 6,0 x 7,4	No	No

6.9		8,9 x 9,7 x 5,8	No	No
6.10		2,8 x 9,1 x 7,2	No	No
7.1		10,8 x 5,9 x 7,2	No	No
7.2		10,8 x 6,0 x 6,0	No	No
8.1		8,6 x 4,8 x 5,2	No	No

8.2		10,0 x 6,5 x 6,3	No	No
8.3		7,0 x 4,1 x 6,4	No	No
8.4		10,5 x 9,5 x 7,0	No	No
8.5		7,4 x 8,8 x 7,8	No	No
8.6		8,1 x 6,9 x 4,1	No	No

8.7



10,7 x 5,3 x 4,3

No

No

8.8



4,8 x 8,8 x 7,7

No

No