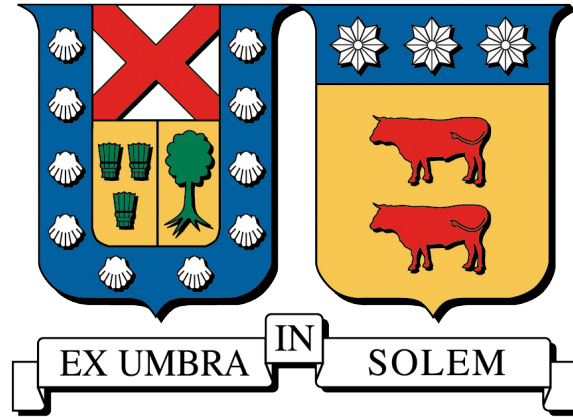




Modelamiento de ruptura de minerales utilizando impulsos de alta tensión

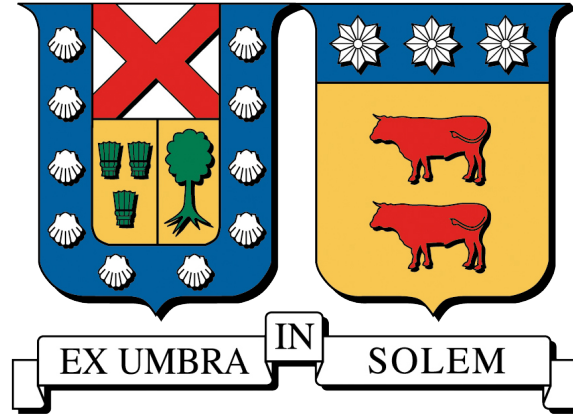
Cynthia Carolina Vargas Quezada

2023

Requisito parcial para obtener el título de:
Ingeniero Civil Electricista

Profesores Guías:
Jorge Ardila Rey (UTFSM)
Rodrigo Rozas Valderrama (UTFSM)

Santiago, 18 de enero de 2023.



Modelamiento de ruptura de minerales utilizando impulsos de alta tensión

Cynthia Carolina Vargas Quezada

2023

*“Yo era un caracol persiguiendo sus sueños. Incluso si iba lento, continuaba creyendo que
si trabajaba duro mis sueños se harían realidad. Lo creía con persistencia”*
— Yoon Ji Ho

Agradecimientos

Gracias mamá y papá por ser ejemplos de resiliencia y tenacidad.

A mis amigos Carlos, Checo, Rusio y Franco por ser un apoyo constante, por los desahogos y su disposición a estudiar juntos.

A mis amigas por siempre escucharme, mis queridas Mariscales, las chiquillas del colegio y la Maca y Kimmy por acompañarme en este proceso.

Agradezco a mis profesores sus consejos y palabras de aliento. Al apoyo de laboratorio, a Romina por darme ánimo.

Quiero agradecer al mejor compañero que tuve en la universidad, Matías, que se transformó en mi compañero de vida.

Finalmente agradezco a mis hijas Tuto y Chica por el cariño y apoyo incondicional.

Cynthia Vargas Quezada

Índice de Contenidos

Índice de Contenidos	I
Índice de Figuras	III
Índice de Tablas	V
Resumen	1
1. Introducción	2
1.1. Objetivos	3
1.2. Estructura del documento	3
2. Estado del Arte	4
3. Marco Teórico	11
3.1. Métodos de ruptura	11
3.1.1. Ruptura Intrínseca	12
3.1.2. Ruptura de Avalancha	12
3.1.3. Ruptura Electromecánica	12
3.1.4. Ruptura por arborescencia	13
3.1.5. Ruptura Térmica	14
3.1.6. Ruptura Electroquímica	15
3.1.7. Desintegración eléctrica experimental	15
3.2. Teoría de falla	17
3.2.1. Esfuerzo normal máximo	17
3.2.2. Criterio generalizado de Hoek-Brown	18
4. Desarrollo	20
4.1. Metodología	20
4.1.1. Materiales	21
4.1.2. Diseño	22
4.1.3. Casos de Estudio	26
4.2. Resultados	27
4.3. Análisis	35
4.3.1. Nivel de tensión	35
4.3.2. Distancia electrodos	36
4.3.3. Medio	38
4.3.4. Configuración de electrodos	40
4.3.5. Sensibilidades	44

5.	Conclusiones	47
A.	Anexo Marco Teórico	49
A.1.	Campo Eléctrico	49
A.2.	Método de elementos finitos	49
A.3.	Generador de impulso de alta tensión	50
A.3.1.	Generador de una etapa	51
A.3.2.	Generador Multietapas	52

Índice de Figuras

2.1.	Esquema de la unidad SELFRAG lab [10]	6
2.2.	Esquema Pre weaking testing station PWTS [11]	6
2.3.	Esquema HVEPC [12]	8
2.4.	Diagrama esquemático y fotografía de equipo HVEP [14]	9
3.1.	Mecanismos de falla y variación de rigidez dieléctrica en sólidos con el tiempo de sollicitación. [17]	11
3.2.	Canales de ruptura en plexiglass entre electrodos punta-plano.[17]	14
3.3.	Estabilidad o inestabilidad térmica debido a campos aplicados.[17]	14
3.4.	Tensión de ruptura versus tiempo de frente de pulsos en aire, agua y sólidos. Curvas 1, 2 y 3 aumento de tensión de pulsos en el tiempo; 4, 5 y 6 ruptura eléctrica del aire, sólidos y agua, como función de la tensión y tiempo de subida. [6]	16
3.5.	Tipos de fragmentación por alta tensión. (a) Fragmentación electrohidráulica (b) Fragmentación eléctrica. [18]	17
3.6.	Teoría del esfuerzo normal máximo en tres dimensiones.	18
3.7.	Teoría del esfuerzo normal máximo en dos dimensiones.	18
4.1.	Procedimiento para simulación en software Ansys.	21
4.2.	Diseño de probeta andesita con intrusiones de calcopirita.	23
4.3.	Electrodo plano.	23
4.4.	Electrodo punta 1.	24
4.5.	Electrodo esfera.	24
4.6.	Electrodo punta 2.	25
4.7.	Diseño de los electrodos de cobre a) plano b) punta1 c) esfera d)punta2 .	25
4.8.	Modelo en Ansys Electronics de probeta con electrodos plano-plano con diferencia de potencial de 200kV	26
4.9.	Esfuerzos máximos principales de tracción obtenidos para distintas distancias de electrodos y medios a 200kV.	30
4.10.	Esfuerzos mínimos principales de compresión obtenidos para distintas distancias de electrodos y medios a 200kV.	31
4.11.	Esfuerzos máximos principales de tracción obtenidos para distintas distancias de electrodos y medios a 150kV.	34
4.12.	Esfuerzos mínimos principales de compresión obtenidos para distintas distancias de electrodos y medios a 150kV.	35
4.13.	Esfuerzos máximos de tracción según nivel de tensión	35
4.14.	Esfuerzos máximos de compresión según nivel de tensión	36
4.15.	Campo eléctrico en escala logarítmica para electrodos Punta2-plano,tensión 200kV, medio aire y distancia a)112mm b)117mm c)122mm	37

4.16.	Esfuerzos máximos principales para electrodos Punta2-plano, tensión 200kV, medio aire y distancia a)112mm b)117mm c)122mm	37
4.17.	Campo electromagnético para electrodos Punta2-plano, tensión 200 kV, electrodos a distancia 112mm y medio; a) Aire b) Aceite c) Agua.	38
4.18.	Campo electromagnético caso a)Aire a lo largo de una línea.	39
4.19.	Campo electromagnético caso b)Aceite a lo largo de una línea.	39
4.20.	Campo electromagnético caso c)Agua a lo largo de una línea.	39
4.21.	Campo electromagnético y vectores de esfuerzo en configuración plano-plano.	40
4.22.	Configuración de electrodos plano-plano a) Campo electromagnético b) Esfuerzos máximo principales c) Esfuerzos mínimos principales	41
4.23.	Campo electromagnético y vectores de esfuerzo en configuración punta2-plano	41
4.24.	Configuración de electrodos punta2-plano a) Campo electromagnético b) Esfuerzos máximos principales c) Esfuerzos mínimos principales	42
4.25.	Campo electromagnético y vectores de esfuerzo en configuración esfera-plano	42
4.26.	Configuración de electrodos esfera-plano a) Campo electromagnético b) Esfuerzos máximos principales c) Esfuerzos mínimos principales	43
4.27.	Enmallado del electrodo esférico en Ansys Electronic.	43
4.28.	Campo electromagnético y vectores de esfuerzo en configuración punta1-plano	44
4.29.	Configuración de electrodos punta1-plano a) Campo electromagnético b) Esfuerzos máximos principales c) Esfuerzos mínimos principales	44
4.30.	Esfuerzos principales máximos y mínimos para sensibilidad $10\% \varepsilon_R$	45
4.31.	Esfuerzos principales máximos y mínimos para sensibilidad $200\% \varepsilon_R$	46
A.1.	Forma general y definiciones de un impulso de tensión.[17]	50
A.2.	Circuito Generador de una etapa (a) y (b). C_1 :condensador de impulso. C_2 :condensador de carga. R_1 :resistencia de frente. R_2 :resistencia de cola.[17]	51
A.3.	Forma de onda del impulso.[30]	52
A.4.	Generador de impulso multietapas. R'_2 :resistencias de descarga. R'_1 :resistencias de frente internas. R''_1 :resistencia de frente externa. [17]	52
A.5.	Circuito equivalente del generador de impulsos. [30]	53

Índice de Tablas

4.1.	Propiedades eléctricas de los materiales utilizados para la simulación en Ansys Electronic.	21
4.2.	Propiedades mecánicas de las rocas para análisis estructural transitorio[24] [25] [26][20].	22
4.3.	Resultados escalamiento Hoek-Brown[27]	22
4.4.	Casos de estudio	27
4.5.	Máximo esfuerzo principal para un nivel de tensión de 200kV y distancia de electrodos 112mm.	27
4.6.	Mínimo esfuerzo principal para un nivel de tensión de 200kV y distancia de electrodos 112mm.	28
4.7.	Máximo esfuerzo principal para un nivel de tensión de 200kV y una distancia de electrodos de 117mm.	28
4.8.	Mínimo esfuerzo principal para un nivel de tensión de 200kV y una distancia de electrodos de 117mm.	29
4.9.	Máximo esfuerzo principal para un nivel de tensión de 200kV y una distancia de electrodos de 122mm.	29
4.10.	Mínimo esfuerzo principal para un nivel de tensión de 200kV y una distancia de electrodos de 122mm.	30
4.11.	Máximo esfuerzo principal para un nivel de tensión de 150kV y distancia de electrodos 112mm.	31
4.12.	Mínimo esfuerzo principal para un nivel de tensión de 150kV y distancia de electrodos 112mm.	32
4.13.	Máximo esfuerzo principal para un nivel de tensión de 150kV y una distancia de electrodos de 117mm.	32
4.14.	Mínimo esfuerzo principal para un nivel de tensión de 150kV y una distancia de electrodos de 117mm.	33
4.15.	Máximo esfuerzo principal para un nivel de tensión de 150kV y una distancia de electrodos de 122mm.	33
4.16.	Mínimo esfuerzo principal para un nivel de tensión de 150kV y una distancia de electrodos de 122mm.	34
4.17.	Esfuerzos máximo y mínimo principal promedios para distintas configuraciones de electrodos en distintos medios a nivel de tensión 200kV y distancia de electrodos 112mm.	40
4.18.	Esfuerzos principales para distintas razones de permitividades.	45

Resumen

Este trabajo busca aportar en el desarrollo tecnológico asociado a la fragmentación de minerales mediante impulsos de alta tensión, para su futura aplicación en procesos mineros.

Este estudio se evalúan 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. Se varían los parámetros 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.

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 son 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.

Palabras Claves: Impulso de alta tensión, fragmentación de rocas, conminución eléctrica, simulación numérica.

Capítulo 1

Introducción

El propósito de este trabajo es aportar al desarrollo tecnológico asociado a la extracción de minerales, mediante la aplicación de impulsos eléctricos de frente escarpado de alta tensión para microfracturar o fragmentar las rocas y disminuir los requerimientos energéticos del proceso de obtención de minerales.

La minería es uno de los sectores más importantes de la economía de Chile, ya que este rubro representa el 10 % del PIB del país. Chile es el líder en la industria del cobre con un 29 % de la participación en la producción mundial de éste mineral y dónde más del 52 % de las exportaciones corresponden a productos mineros[1]. En la minería la energía eléctrica es un componente importante puesto que es necesaria en distintos procesos productivos. En la obtención del cobre su valor significa un 8 % de los costos operacionales, además su efecto es relevante en el consumo eléctrico nacional.

El consumo en la industria es ascendente en el tiempo, se calcula que la minería sea responsable de un 34 % a 37 % del consumo eléctrico anual en Chile en el período comprendido entre 2020 y 2031 [2]. Si bien el crecimiento esperado en la producción es de un 23 % la alza en los consumos responde a factores estructurales de la matriz productiva de la industria. Esto debido a que la mayor parte de los proyectos nuevos y de expansión están enfocados en la obtención de concentrados de cobre, en desmedro de la producción de cátodos electro-obtenidos que proyecta un decrecimiento, lo que se atribuye al decaimiento de las reservas minerales oxidables del país. El enfoque en producción de concentrados prevé un uso intensivo de energía eléctrica. Además el envejecimiento de las minas, mayor dureza del mineral y decaimiento de las leyes de cobre, implican que haya una mayor cantidad de mineral a procesar. Para sostener la producción de cobre fino esperado, las empresas tendrán que extraer grandes volúmenes de mineral, creciendo así la energía en procesos como molienda y chancado[2], siendo el proceso de molienda uno de los de mayor demanda energética con alrededor de 50-70 % del consumo total [3].

En consecuencia, son necesarios cambios tecnológicos que puedan influir en los procesos mineros, por lo que la motivación de este estudio es abordar posibles avances en la eficiencia energética que puedan implementarse a futuro tanto en operaciones existentes como en proyectos nuevos lo que repercutiría en un menor consumo de electricidad.

En el desarrollo de este trabajo se modelará la ruptura de minerales utilizando impulsos de alta tensión en el software de simulación Ansys, se estudiarán los efectos de las descargas en las muestras minerales utilizando distintos tipos de impulsos, variando los niveles de

tensión, tipos de electrodos y la distancia de estos.

Este estudio pretende optimizar los parámetros de la descarga eléctrica para mejorar la eficiencia en la fragmentación de las rocas. Luego, en base a los resultados obtenidos proponer un procedimiento de fracturación de minerales.

1.1. Objetivos

Objetivo General

Evaluar a través de herramientas de simulación numérica los efectos de impulsos eléctricos de alta tensión en muestras minerales utilizando distintos tipos de impulso de alta tensión.

Objetivos Específicos

- Realizar una revisión bibliográfica de la experiencia internacional en molienda por impulso con énfasis en las características de los impulsos.
- Revisar la literatura que define el nivel de ruptura o molienda necesario para distintas etapas del proceso de extracción de mineral.
- Definir diversos perfiles y magnitudes de impulso a modelar.
- Modelar el efecto de la descarga de un impulso de alta tensión en una muestra mineral.
- Proponer un impulso tipo que permita el nivel de ruptura del mineral adecuado para su aplicación en distintas etapas del sistema extractivo.

1.2. Estructura del documento

Para el cumplimiento de los objetivos de esta memoria en el Capítulo 2 se realizará una revisión del estado del arte de las investigaciones realizadas con impulsos de alta tensión para la fragmentación de distintas rocas. En el Capítulo 3 se presentarán métodos de ruptura en dieléctricos sólidos. El capítulo 4 consistirá en el modelamiento del fenómeno a partir de la revisión de la literatura, se realizarán las simulaciones en Ansys Electronics considerando las dimensiones, materiales, geometría, enmallado y condiciones de borde. Se expondrán los resultados y se analizarán para identificar el impacto del impulso en el mineral. A partir de ese análisis se variarán las características de los pulsos, cambiando los niveles de tensión, configuración de electrodos y la distancia entre ellos, lo cual afectará en la energía de la descarga. Finalmente en el Capítulo 5 se dan a conocer las conclusiones de este trabajo y recomendaciones futuras.

Capítulo 2

Estado del Arte

La liberación de los minerales valiosos de la ganga se logra por medio de la reducción de tamaño o conminución, lo que involucra trituración y molienda a un tamaño tal que el producto sea una mezcla de partículas de mineral y ganga. El objetivo de la conminución es la reducción del tamaño del material a partículas pequeñas. Si el objetivo se logra las siguientes etapas de separación se vuelven más fáciles y económicas de operar[4].

El proceso de concentración consume por sí solo actualmente 54 % de la energía consumida en la industria minera del cobre[2]. Siendo molienda el proceso de más consumo con casi el 50 % de la energía del concentrador[5]. Es por esto que se han buscado formas de reducir el consumo y una de esas alternativas es el pretratamiento para debilitar las propiedades mecánicas de la roca antes de someterlas a conminución. Se han probado alrededor del mundo varios métodos de pretratamiento para debilitar las propiedades mecánicas de las rocas antes del proceso de trituración. En los métodos que se han documentado están: ruptura térmica, calentamiento por microondas, ruptura por impulsos de alta tensión, choque térmico y ruptura ultrasónica. Aunque estos procedimientos arrojaron resultados positivos en la reducción del consumo de energía en la trituración, su aplicación industrial sigue siendo un desafío [5].

El pretratamiento eléctrico se basa en el paso de un impulso de alta tensión en la roca para causar fragmentación. La variación en la conductividad eléctrica de la roca provoca la expansión y explosión de ésta cuando pasa un impulso de alta tensión. La parte no conductora de la roca resiste el flujo de corriente, lo que conduce a un cambio estructural debido al impulso. La expansividad del mineral varía por lo que se pueden generar microgrietas, también se acumula alta presión dentro de la matriz de la roca de modo que se supera la resistencia de tracción de ésta [3].

En [6] se explica el mecanismo de desintegración de la roca y el efecto de las diferencias en las propiedades eléctricas. Se estudian los efectos de la desintegración eléctrica sobre varios minerales, donde los datos de granulometría mostraron que ésta producía un producto más fino que la conminución convencional, teniendo una mejor liberación para el mismo tipo de mineral, demostrando así la efectividad de la liberación de mineral por impulsos de alta tensión, rocas de 300mm de tamaño fueron fragmentados en productos de tamaño micrométrico. Sin embargo el consumo de energía específica de la desintegración eléctrica fue de más de $90[kWh/t]$, siendo en promedio 2-3 veces mayor que la consumida por la conminución mecánica convencional que consume alrededor de $50[kWh/t]$. Es por

esto que los estudios luego se direccionaron en pretratar el mineral para hacer más eficiente energéticamente la conminución.

Para desarrollar una técnica de conminución eléctrica se han creado dos equipos de impulsos de alta tensión; Spark por CNT-MC en Canadá y Selfrag por SELFRAG LAB en Suiza. Este último dispositivo SELFRAG lab high voltage pulse power fragmentation system se basa en un transformador que alimenta un generador de Marx, los pulsos de alta tensión generados se descargan en un recipiente que se asienta sobre una mesa elevadora que lo mueve en un área de procesamiento, el recipiente de proceso puede estar cerrado o abierto, ya que tiene fondos intercambiables para evitar romper el mineral más de lo deseado. La unidad está diseñada para procesar muestras de hasta 1kg y en el dispositivo se pueden variar los siguientes parámetros: la tensión de descarga es entre 90 y 200kV, la distancia de electrodos de 10 a 40mm, la frecuencia de descarga de 1 a 5 Hz y número de pulsos de 1 a 1000 [7].

En [8] Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre (JKMRC) en colaboración con SELFRAG, testó cuatro muestras de mineral usando impulso de alta tensión con baja energía específica $1 - 3 \text{ kWh/t}$ y trituración convencional en forma paralela para comparación. Mostrando que las partículas de minerales tratadas con impulsos de alta tensión evidencian grietas y microgrietas medidas con tomografía de rayos x y porosimetría de mercurio. Para cada muestra se comparó la ruptura por impulso de alta tensión y la ruptura mecánica mediante un indicador de suavidad del mineral, a mayor indicador el mineral es más blando o menos resistente a la ruptura. El tratamiento con impulsos de alta tensión logró una variación de dureza 9 a 52% evidenciando debilitamiento de la roca ya que aumentó su factor de suavidad y se predice un ahorro de energía de 24% en el proceso aguas abajo.

Los factores relacionados con la operación del equipo SELFRAG se podían probar de forma experimental. En [9] se estudian los factores que afectan el rendimiento de la conminución eléctrica tanto de forma experimental con el equipo SELFRAG como a través de simulación numérica con el uso del software Coulomb 3D basado en el método de elementos de frontera. Se estudia la relación entre la distribución e intensidad del campo eléctrico y las propiedades mecánicas y eléctricas del mineral. Los resultados muestran que el campo eléctrico inducido depende fuertemente de las propiedades de los minerales. Las siguientes características de los minerales pueden mejorar la conminución eléctrica: el tamaño de grano grueso, locación de material conductor incrustado en rocas, partículas de forma angular y gran diferencia entre las propiedades eléctricas del mineral y la ganga.

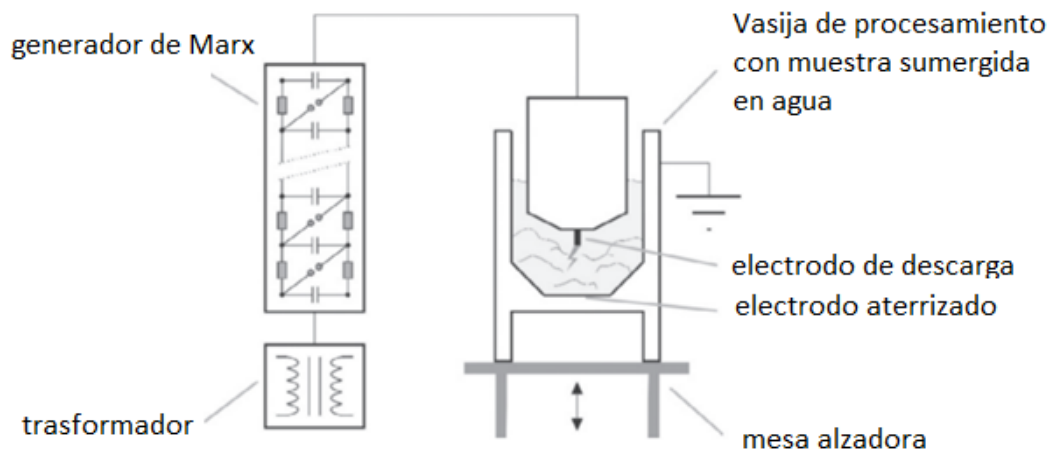


Figura 2.1: Esquema de la unidad SELFRAG lab [10]

En [10] se tratan 20 tipos de rocas en el dispositivo SELFRAG para determinar la influencia de los parámetros del equipo en el producto resultante. Se determinaron las propiedades y el índice de trabajo para cada tipo de roca y así identificar su comportamiento de ruptura. Los resultados señalan que variar la energía de entrada, el número de descargas y la tensión son las que tienen mayor influencia en el producto final. Además señala que las muestras de mayor tamaño son más susceptibles a la ruptura por impulsos de alta tensión.

En [11] SELFRAG desarrolla una estación de prueba de predebilitamiento en escala piloto que utiliza impulsos de alta tensión, la ventaja de esta estación de prueba es que ofrece más flexibilidad en la configuración del generador. Este estudio investigó el comportamiento de la ruptura con impulso de alta tensión de tres muestras de minerales, dos de cobre-oro y una de hierro con la máquina de escala piloto Pre-weaking testing Station PWTS bajo diferentes condiciones de operación.

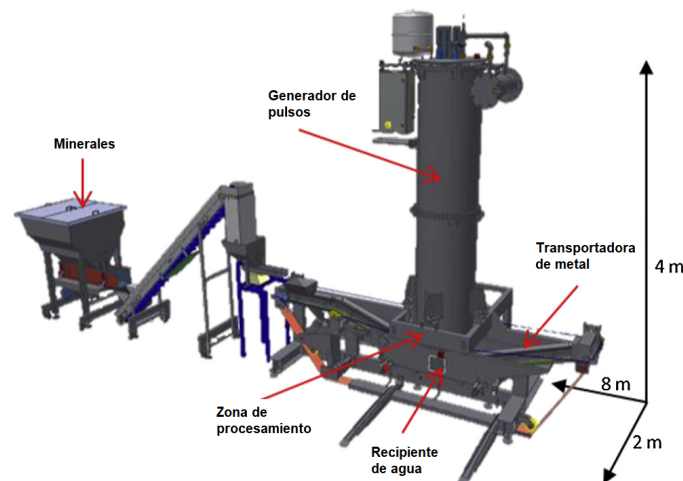


Figura 2.2: Esquema Pre weaking testing station PWTS [11]

La máquina consiste en un generador de pulsos, una transportadora de placas de metal, un recipiente de agua y una zona de procesamiento. El electrodo superior está conectado al generador de impulsos, justo encima de la sección inferior plana del transportador de placas de metal, la cual es guiada por un material aislante y sumergido en agua, actuando como contra electrodo durante la descarga del pulso. La estación piloto permite operar en pulsos de 50kV a 200kV, puede usar diferentes polaridades de la descarga, la zona de procesamiento puede utilizar distintas formas y tamaño de electrodos superiores, siendo usado la forma de disco y polaridad negativa en el electrodo superior. El volumen de la zona de procesamiento es capaz de ser ajustado por la distancia de electrodos y la distancia entre las guías laterales. El tratamiento por impulsos de alta tensión se puede realizar en modo continuo con la transportadora móvil o con la transportadora estacionaria. En esta investigación se estudia el comportamiento de la ruptura de los minerales en términos de tres índices de ruptura, la probabilidad de ruptura de cuerpo, refinamiento del producto y grado de predebilitamiento.

La investigación revela que la energía específica del impulso de alta tensión es uno de los factores más significativos que afectan el comportamiento de ruptura en el PWTS, donde la mayor energía específica produce la mayor probabilidad de ruptura del cuerpo, tamaño del producto más fino y el mayor efecto de predebilitamiento. Los resultados además confirman la influencia de las propiedades del mineral en el comportamiento de ruptura, tales como composición, textura y tamaño de partículas.

En [12] diseñan, desarrollan y testean un triturador de impulsos de alta tensión en Irán para pretratar el mineral fosfato y comparar la efectividad con un triturador convencional mecánico. Los resultados mostraron que aplicar impulsos de alta tensión de energía específica de $3 - 5 \text{ kWh/t}$ puede aumentar las grietas y microgrietas dentro de la roca, reduciendo en el mineral pretratado la energía consumida en el proceso de molienda en $7,8 - 10,6\%$, elaborando un producto más fino. Se usaron varias muestras de rocas de mineral fosfato para investigar el efecto del capacitor y nivel de tensión. El triturador de impulso eléctrico de alta tensión (HVEPC) diseñado en esta investigación consta de tres partes principales: el generador de impulsos de alta tensión, la cámara de trituración y los accesorios de seguridad. En la figura 2.3 se muestra el esquema del HVEPC, los parámetros principales como son la tensión, capacitancia y tiempo de subida, afectan la operación del equipo. Usando un transformador de alta tensión 220V del circuito AC se convierten a un máximo de 100kV AC. Luego la tensión aumenta a un valor máximo de 140 kV DC. Otro parámetro es la capacitancia del capacitor antes del explosor que tiene relación directa con el pulso de descarga. El capacitor es lentamente cargado por una fuente DC hasta la ruptura en el explosor. La segunda parte del HVEPC, idicado como EPC es la cámara de trituración, que consiste en un electrodo de cobre en forma de varilla, además el sistema tiene un transformador de corriente y un amperímetro toroidal conectado a un osciloscopio. La tensión entre el generador y el electrodo plano de acero a tierra es medido por una punta conectada al osciloscopio. El electrodo a tierra tiene agujeros circulares para prevenir el sobre trituramiento de la muestra. La muestra está inmersa en agua en la cámara entre los dos electrodos. La tercera parte está relacionada a los accesorios de seguridad necesarios para trabajar con equipos de alta tensión.

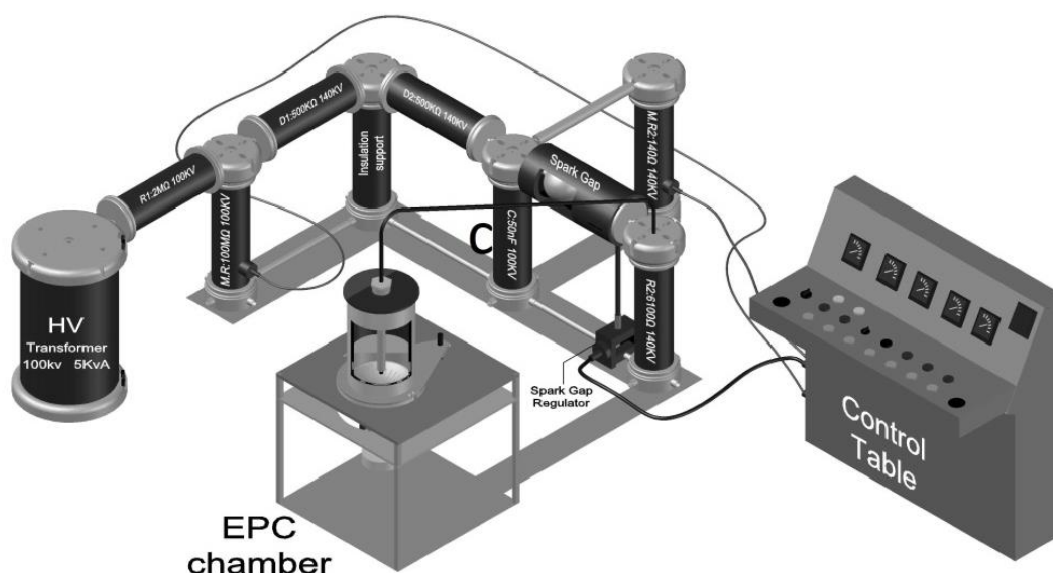


Figura 2.3: Esquema HVEPC [12]

Cada prueba de pulsos de alta tensión se realiza con muestras de 200 g y el número de pulsos tiene un consumo total de energía acumulada de 50 kWh/t. Las pruebas se realizaron cambiando la fracción del tamaño de la partícula, el voltaje y la capacitancia. El aumento del voltaje y la capacitancia resultó en una mejora de la trituración, esto se debió a la energía de descarga de cada pulso, aunque la energía consumida total fuera la misma en todos los ensayos, la energía de cada pulso es el factor efectivo para una mejor trituración. Se encontró que la elección del capacitor era más importante que la tensión en la creación del impulso ya que el aumento de la tensión fue más relevante en la energía de descarga del pulso, pero el tipo de capacitor afectó la forma en que se descargó el pulso. Se observó que cuanto mayor era el capacitor mayor era el rango efectivo de la energía de descarga, pudiendo tener un mayor efecto de ruptura especialmente para grandes fracciones de tamaño de partículas cuando se aplicó la misma energía de descarga de pulso. Además se logró una reducción del índice de abrasión obtenido a través del test de bond para abrasión estandarizado, disminuyendo en un 28.1 % para la muestra de mineral fosfato con respecto a la conminución sin pretratamiento, este índice determina el desgaste de los medios y revestimiento de acero en trituradoras, molinos de barras y bolas.

En [13] se tenía de objetivo fracturar la escoria del cobre, donde en los ensayos no se logró destruir a través de impulsos de alta tensión, también se utilizaron probetas de ladrillo y hormigón, donde en el primero se logran pequeñas fisuras mientras que en el hormigón se logra la fractura. Plantea la posibilidad de obtener mejores resultados mediante impulsos de corriente debido a que logra destruir dos probetas de escoria con una corriente de 35 kA. Además, propone aplicar impulsos a minerales de otras etapas del proceso minero.

En [7] se resume el progreso y desafíos en la trituración eléctrica por pulsos de alta tensión. Las tecnologías de alta tensión generalmente tienen a los materiales inmersos en líquido dieléctrico como agua, que tiene una rigidez dieléctrica alta cuando el tiempo de frente de la tensión se mantiene bajo los 500 ns, actuando como un aislante eléctrico para

prevenir que la descarga ocurra fuera de la roca.

En [14] se estudia de forma experimental el efecto del pretatamiento con impulsos de alta tensión en la liberación y separación del mineral magnetita. El propósito es estudiar la magnetita sin pretratar y pretratada antes de la molienda, la influencia de los factores de operación que afectan la eficiencia de molienda y el posterior rendimiento en la separación. El mineral usado en los experimentos se obtiene de minas de hierro de China y a través de difracción por rayos X se caracteriza la muestra, siendo el mineral principal magnetita y la ganga cuarzo. El equipo de impulsos de alta tensión (HVEP) desarrollado se esquematiza en la imagen 2.4. Este contiene un transformador, un capacitor, un explosor, un electrodo de aguja y la cavidad de ruptura. Los electrodos aguja-plano son instalados dentro de la cavidad de descarga. Agua desionizada es usada como líquido dieléctrico para inducir los canales de plasma en las muestras. Cuando la capacitancia es 5600 pF la máxima tensión de salida es de 50 kV.

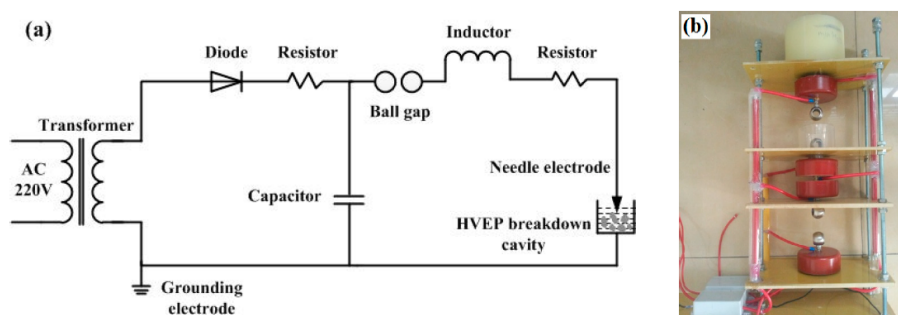


Figura 2.4: Diagrama esquemático y fotografía de equipo HVEP [14]

El procedimiento experimental incluye HVEP, prueba de molienda y separación magnética. Para la comparación del comportamiento de las muestras en la molienda, se utiliza el índice de triturbilidad relativo donde se calcula la razón entre el tiempo de molienda de las muestras tratadas y las no pretratadas para alcanzar un tamaño de $-74 \mu m$, así un menor índice indica que las muestras tienen mayor eficiencia en triturbilidad y menor consumo de energía. El estudio muestra que la triturbilidad de las muestras de magnetita mejora incrementando el número de pulsos, disminuyendo la tensión de salida y acercando el espacio entre los electrodos del HVEP. Además las muestras pretratadas tienen mayor grado de liberación de mineral que las no tratadas, siendo el grado de liberación de mineral al menos 10 % mayor en todo el rango de tamaños investigados. También se concluye que el pretatamiento HVEP puede permitir obtener un mayor grado de hierro en la separación magnética. Además las características morfológicas del mineral verifican una alta intensidad de campo eléctrico en las fronteras de dos fases de mineral, lo que también puede reducir el tiempo de trituración y mejorar la liberación de mineral.

En [15] se utilizó el mismo equipo de la figura 2.4 diseñado en China, para analizar las características de la conminución del mineral galena con el pretratamiento de impulsos de alta tensión. Se evaluaron los efectos del espaciamiento del explosor, número de pulsos y tensión. Se estudió la distribución y tamaño de liberación de partículas para evaluar el HVPD.

Para tener todos los beneficios de esta tecnología aún quedan desafíos por resolver, aún no se tiene una aplicación a escala industrial con operación continua, faltan avances

en cómo maximizar la eficiencia en la llegada del pulso de energía a todas las partículas logrando mejores resultados para la industria minera. Otro problema para desarrollar es la integración en el circuito tradicional mecánico de trituración para lograr beneficios técnicos y económicos óptimos. La variación de resultados en la microfragmentación en las muestras de mineral presenta otro desafío ya que para muestras de un mismo mineral se pueden tener distintos porcentajes de partículas fragmentadas bajo las mismas condiciones operativas[7].

Capítulo 3

Marco Teórico

3.1. Métodos de ruptura

Muchos investigadores han estudiado la ruptura en sólidos y un número de detalladas teorías han salido adelante con el objetivo a explicar cuantitativamente el proceso de ruptura en sólidos. Sin embargo, el estado de conocimiento en esta área es todavía inconcluso.

El proceso responsable de la ruptura en dieléctricos gaseosos es gobernado por el rápido crecimiento de la corriente debido a la emisión de electrones desde el cátodo, ionización de las partículas de gas y el acelerado desarrollo del proceso de avalancha. Cuando la ruptura ocurre, el gas recupera su rigidez dieléctrica, los líquidos la recuperan parcialmente y los sólidos pierden su rigidez completamente [16].

La ruptura en sólidos no sólo depende de la magnitud de la tensión sino que el tiempo de aplicación juega un rol importante, es por eso que se divide la escala de tiempo convenientemente en regiones donde operan diferentes mecanismos del proceso de ruptura.

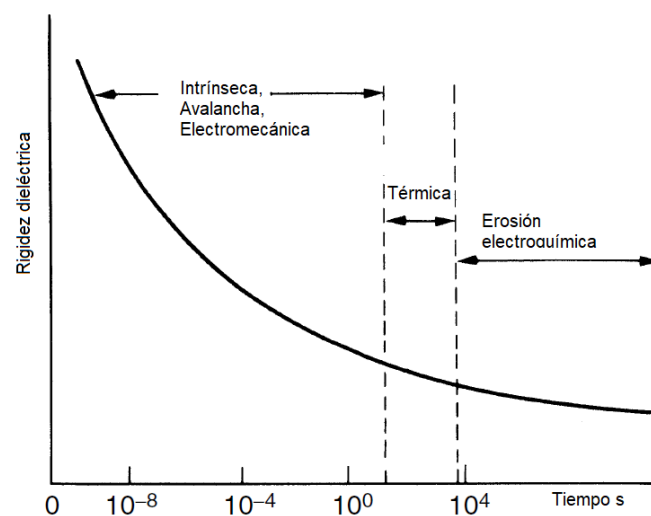


Figura 3.1: Mecanismos de falla y variación de rigidez dieléctrica en sólidos con el tiempo de solicitación. [17]

La tensión de ruptura medida es influenciada por diversos factores externos como la temperatura ambiente, la humedad, duración del test, impurezas o defectos estructurales, la tensión de impulso aplicada, presión aplicado de electrodos y muchos otros factores. Si bien el mecanismo de ruptura en sólidos es menos claro y entendido que en gases, distintos mecanismos han sido identificados y tratados de manera teórica.

3.1.1. Ruptura Intrínseca

Si el material dieléctrico es puro y homogéneo, la temperatura y entorno controlado son adecuados y el voltaje es aplicado por un corto tiempo, la rigidez dieléctrica del espécimen se eleva rápidamente a un límite superior conocido como rigidez dieléctrica intrínseca. La rigidez intrínseca depende del material y la temperatura. Experimentalmente la rigidez intrínseca es raramente alcanzada. La ruptura intrínseca se obtiene en tiempos del orden de 10^{-8} segundos, se ha considerado que es de naturaleza electrónica. El esfuerzo requerido es del orden de $10^6 V/cm$. Generalmente se asume que la rigidez intrínseca es alcanzada cuando los electrones en la banda de valencia ganan suficiente energía del campo eléctrico para cruzar el escalón de energía entre la banda de valencia y la banda de conducción. En materiales puros y homogéneos, las bandas de valencia y conducción están separadas por un escalón de gran energía a temperatura ambiente, los electrones no pueden adquirir la energía suficiente para hacer la transición de la banda de valencia a la de conducción. En la práctica no hay material aislante puro, ya que tienen impurezas o imperfecciones en su diseño estructural, las impurezas pueden actuar como trampas para los electrones libres en los niveles que están justo debajo de la banda de conducción. La agitación térmica impulsa los electrones atrapados a la banda de conducción ya que el escalón energético que deben cruzar es más pequeño y son acelerados por el campo eléctrico. Cuando la energía de los electrones supera las pérdidas de roce, se produce la ruptura de avalancha [17].

3.1.2. Ruptura de Avalancha

Bajo ciertas condiciones controladas en campos estrictamente uniformes con los electrodos incrustado en la muestra, la ruptura se puede lograr después del paso de una sola avalancha. Un electrón que entra en la banda de conducción del dieléctrico en el cátodo se desplazará hacia el ánodo bajo la influencia del campo, ganando energía entre colisiones y perdiéndola en colisiones. En ocasiones el camino libre puede ser lo suficientemente largo para que la ganancia de energía exceda la energía de ionización de la red y un electrón adicional se produce en la colisión. El proceso se repite y puede conducir a la formación de una avalancha de electrones similar a los gases. La ruptura se producirá si la avalancha supera un cierto tamaño crítico [17].

3.1.3. Ruptura Electromecánica

Cuando un material dieléctrico se somete a un campo eléctrico, se inducen cargas de naturaleza opuesta en las superficies opuestas del material, por lo tanto, una fuerza de atracción se desarrolla y la muestra se somete a fuerzas de compresión electroestáticas, fenómeno conocido como electro-estricción [16]. Cuando estas fuerzas superan la resistencia mecánica del material, la muestra colapsa. Si d_0 es el espesor inicial de la muestra de un material con módulo de Young Y y es comprimido a un espesor d bajo la aplicación de una

tensión V , entonces la compresión desarrollada debido al campo eléctrico está en equilibrio con la fuerza de compresión mecánica si:

$$\varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{V^2}{2d^2} = Y \ln \left(\frac{d_0}{d} \right) \quad (3.1)$$

Al diferenciar la expresión con respecto a d se tiene un máximo cuando $d/d_0 = 0,6$. Para cualquier valor de tensión, la reducción en espesor de una muestra no puede ser mayor al 40 %. Entonces ningún valor de V puede producir un valor estable d/d_0 menor a 0,6. Si la rigidez intrínseca no es alcanzada a este valor, un aumento adicional en V hace el espesor inestable y la muestra colapsa. La rigidez más alta entonces está dada por:

$$E_D = \frac{V}{d_0} = 0,6 \sqrt{\frac{Y}{\varepsilon_0 \varepsilon_r}} \quad (3.2)$$

Este mecanismo ignora la posibilidad de inestabilidad que ocurre con un campo promedio más bajo debido a la concentración de esfuerzos en las irregularidades de la muestra, la dependencia del módulo de Young del tiempo y el esfuerzo, además no considera la deformación plástica.

3.1.4. Ruptura por arborescencia

Cuando un material sólido tiene algunas impurezas en términos de algunos huecos de gas o de líquido, la resistencia dieléctrica del sólido será más o menos igual a la resistencia de las impurezas más débiles. Si suponemos que algunas burbujas de gas están atrapadas en el material sólido, el gas tiene una permitividad relativa de 1 unidad y el material sólido ε_r , el campo eléctrico en el gas será ε_r veces el campo en el material sólido. Como resultado, el gas rompe a una tensión relativa más baja. La concentración de carga en el espacio hará el campo menos uniforme. La concentración de carga en esos huecos es bastante grande para dar campos del orden de $10MV/cm$ que es más alto incluso que la ruptura intrínseca. Estas concentraciones de carga en los huecos dentro del dieléctrico conducen a la ruptura paso a paso y finalmente a la ruptura completa del dieléctrico. Dado que la avería no es causada por un sólo canal de descarga se asume una estructura similar a un árbol como en la figura 3.2. El fenómeno de arborescencia puede demostrarse en laboratorio aplicando una tensión impulso entre electrodos punta plano con la punta incrustada en el dieléctrico transparente sólido. Este fenómeno se puede observar en todos los dieléctricos donde prevalecen los campos no uniformes.

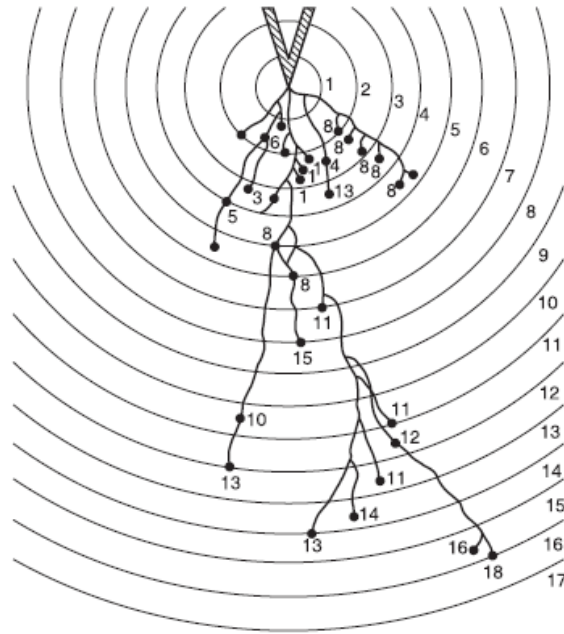


Figura 3.2: Canales de ruptura en plexiglass entre electrodos punta-plano.[17]

3.1.5. Ruptura Térmica

Cuando un material aislante es sometido a un campo eléctrico, el material se calienta debido a las corrientes de conducción y las pérdidas dieléctricas por la polarización. La conductividad del material aumenta con el aumento de la temperatura y se alcanzan condiciones de inestabilidad cuando la velocidad de calentamiento excede la velocidad de enfriamiento y la muestra puede sufrir la ruptura térmica. La situación se ilustra gráficamente en la figura 3.3 en donde el enfriamiento de la muestra es representado por una línea recta y el calentamiento por distintas sollicitaciones de campo eléctrico por curvas[17].

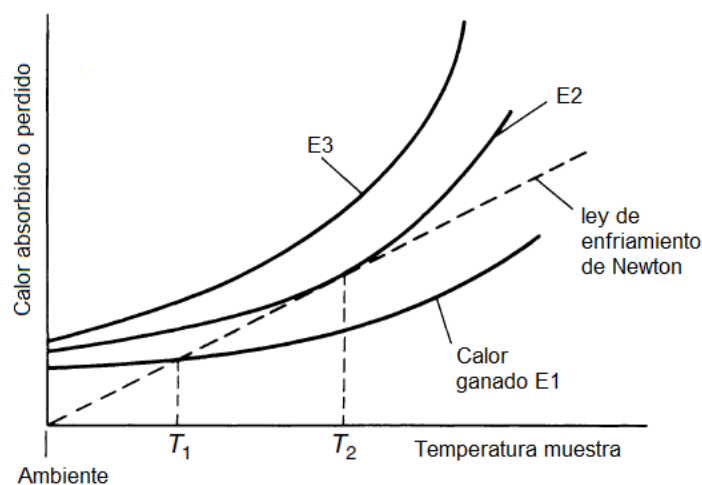


Figura 3.3: Estabilidad o inestabilidad térmica debido a campos aplicados.[17]

El campo E_1 está en equilibrio a la temperatura T_1 , el campo E_2 está en estado de

equilibrio inestable a temperatura T_2 y el campo E_3 no alcanza el estado de equilibrio y la muestra alcanza la ruptura térmica.

3.1.6. Ruptura Electroquímica

Cuando se forman cavidades en los dieléctricos sólidos, la rigidez dieléctrica disminuye. Cuando el gas en la cavidad se rompe, las superficies de la muestras proporcionan instantáneamente un ánodo y cátodo. Alguno de los electrones que chocan contra el ánodo con suficiente energía romperán los enlaces químicos de la superficie de aislamiento. Del mismo modo, los iones positivos que bombardean contra el cátodo pueden aumentar la temperatura de la superficie y producir inestabilidad térmica local. La degradación química puede también ocurrir a partir de los productos de la descarga por ejemplo O_3 y NO_2 formados por el aire. El efecto neto de estos procesos es una erosión lenta del material y la consiguiente reducción de espesor de la muestra. Normalmente, se desea que con el envejecimiento la rigidez dieléctrica de la muestra no disminuya. Sin embargo, debido a los defectos en los procesos de fabricación o diseño, la rigidez dieléctrica disminuye con el tiempo [16].

3.1.7. Desintegración eléctrica experimental

En [6] se explica el mecanismo de desintegración eléctrica por impulsos de tensión. La desintegración eléctrica en materiales sólidos es un proceso estocástico que se produce por la expansión explosiva del plasma. El plasma se genera por el proceso de ionización provocado por el campo, en la transferencia directa de sólidos a gas ionizado en los canales de streamers de plasma. La corriente de desplazamiento de cargas durante el proceso de ionización y el flujo de cargas a través del canal de ruptura generan gas ionizado a una temperatura del orden de $10^4 K$. En la desintegración eléctrica de los dieléctricos compuestos, dos procesos distintos contribuyen a la fragmentación de los sólidos. Una es la expansión radial del plasma desde el centro del canal a presiones que exceden la resistencia a la tracción del material, ondas de compresión generadas sobre las paredes del canal por la rápida expansión del canal de descarga. El esfuerzo de compresión, producido por pulsos, no suele ser suficiente para romper el material, pero es capaz de producir desintegración a través de grietas radiales de tracción en las áreas adyacentes al canal. Los otros esfuerzos de tracción que contribuyen al proceso de fragmentación son una reflexión de las ondas de presión de las inclusiones cuya impedancia acústica es diferente de la del material de la matriz. La reflexión de las ondas de presión también tienen lugar desde la interfaz de los sólidos con el medio externo, pero estas interfaces se encuentran generalmente más lejos del canal de descarga y las reflexiones de ellas son débiles, generando solo fisuras finas. Debido a las diferencias en los mecanismos de conducción de cargas y la tasa de ionización en sólidos, gases y líquidos, la ruptura eléctrica ocurre en diferentes etapas del desarrollo del pulso en diferentes campos eléctricos.

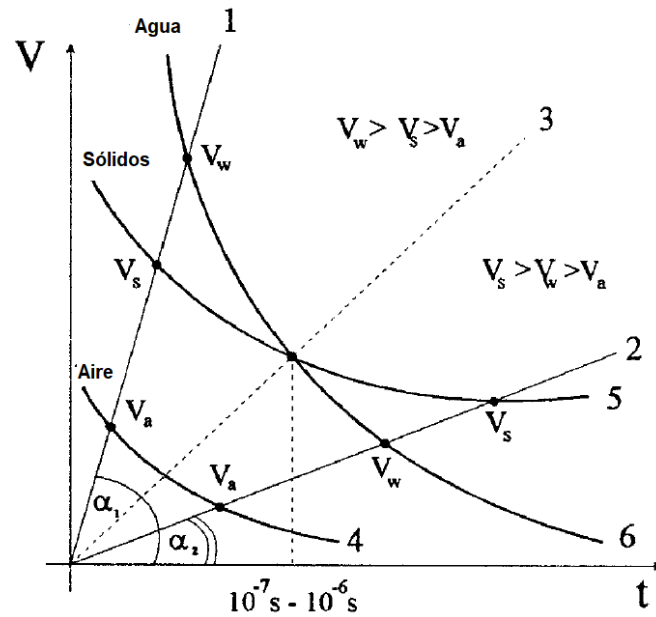


Figura 3.4: Tensión de ruptura versus tiempo de frente de pulsos en aire, agua y sólidos. Curvas 1, 2 y 3 aumento de tensión de pulsos en el tiempo; 4, 5 y 6 ruptura eléctrica del aire, sólidos y agua, como función de la tensión y tiempo de subida. [6]

En la figura 3.4 se resumen datos experimentales sobre la ruptura eléctrica versus la duración de los pulsos en aire, agua y sólidos. La línea dos corresponde a un pulso de bajo potencial y largo tiempo de frente. Con ese pulso la ruptura del aire y el agua ocurre antes que la de los sólidos, por lo que si el aire o el agua se emplean como medio para la tecnología de desintegración eléctrica, la ruptura no se provocaría en el sólido. La línea 1 representa un pulso de alto potencial y un tiempo de frente corto, induciendo la ruptura de los sólidos antes que la del agua. La ruptura en el aire siempre tendrá lugar en las primeras etapas del pulso. Esto significa que el aire no puede emplearse como medio para la tecnología de desintegración eléctrica, mientras que el agua permite la desintegración eficiente de una amplia gama de sólidos compuestos. La línea 3 corresponde al pulso que induce la ruptura del agua y de los sólidos con la misma probabilidad.

De esta forma, existen dos métodos que se han utilizado para fragmentación de materiales sólidos usando impulsos de alta tensión: fragmentación electrohidráulica y fragmentación eléctrica. En el primer método el material sólido es inmerso en un medio líquido (ej: agua o aceite) lo que permite que el canal de plasma se expanda rápidamente, produciendo eventualmente fuertes ondas de choque en el medio líquido. El frente de onda de choque actúa sobre la superficie del sólido, triturándolo por fuerzas de compresión. En el método de fragmentación eléctrica, el pulso de alta tensión es guiado a través de la roca, lo que causa que el canal de plasma se expanda y propague las fracturas de forma radial, eventualmente provocando la ruptura del material de la roca por fuerzas tensionales.

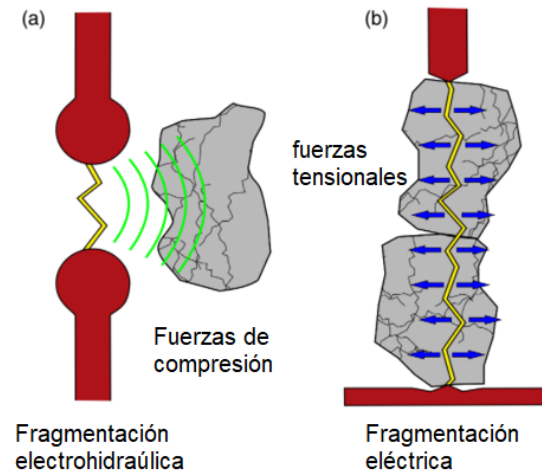


Figura 3.5: Tipos de fragmentación por alta tensión. (a) Fragmentación electrohidráulica (b) Fragmentación eléctrica. [18]

3.2. Teoría de falla

Para analizar el efecto de los esfuerzos provocados en la probeta debido a el impulso de alta tensión, es necesario establecer un criterio para pronosticar la falla del material al ser sometido a una carga [19].

3.2.1. Esfuerzo normal máximo

La teoría del esfuerzo normal máximo establece que la falla suele ocurrir siempre que uno de los tres esfuerzos principales sea igual a la resistencia del material[19].

Si se ordenan los tres esfuerzos principales para cualquier estado de esfuerzo del material en la forma

$$\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3 \quad (3.3)$$

Luego esta teoría pronostica que la falla ocurre siempre que:

$$\sigma_1 = S_t \quad \text{o} \quad \sigma_3 = -S_c \quad (3.4)$$

Dónde :

S_t : resistencia a la tensión

S_c : resistencia a la compresión

σ_1 : esfuerzo máximo principal

σ_2 : esfuerzo medio principal

σ_3 : esfuerzo mínimo principal.

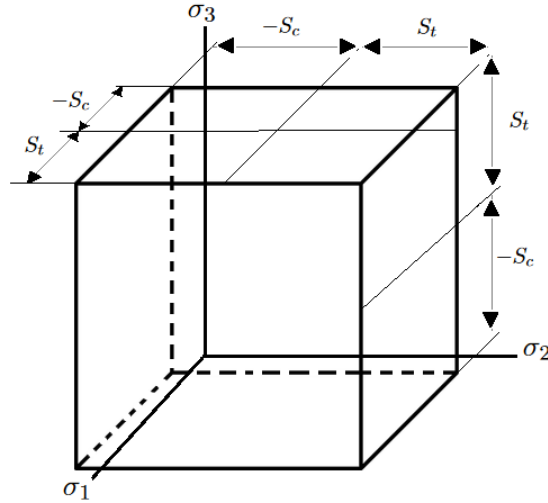


Figura 3.6: Teoría del esfuerzo normal máximo en tres dimensiones.

En la figura 3.6 se muestran los esfuerzos principales y el prisma rectangular contiene todos los valores seguros de las combinaciones de los componentes del esfuerzo. La resistencia de compresión S_c no necesita ser igual a la resistencia de tensión S_t . En 3.7 se muestra la teoría de esfuerzo normal máximo para esfuerzos biaxiales usando $S_c > S_t$. Mientras los estados de esfuerzo estén dentro de la gráfica no se presenta falla.

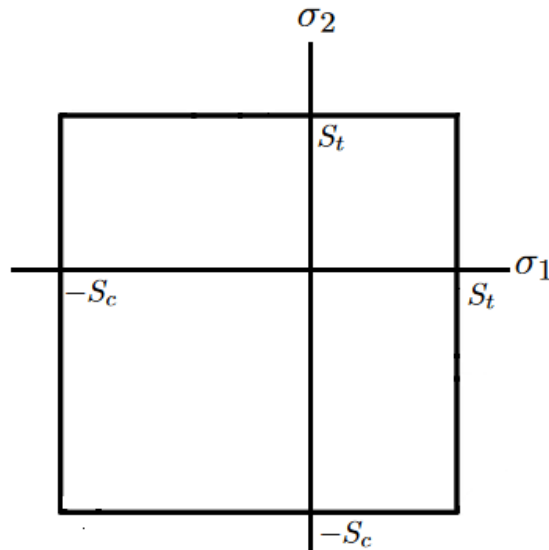


Figura 3.7: Teoría del esfuerzo normal máximo en dos dimensiones.

3.2.2. Criterio generalizado de Hoek-Brown

Para el análisis de falla del macizo rocoso son necesarias estimaciones confiables del comportamiento mecánico y deformación. Por esto se escalan las propiedades de la roca intacta a las del macizo rocoso, considerando los factores que afectan el comportamiento de este[20]. El criterio de Hoek-Brown es meramente empírico, desde su introducción en 1980, este criterio de falla ha evolucionado en sus aplicaciones [21]. El criterio comprende

todo rango de tipos de macizo rocoso y ha funcionado bien en la práctica [21]. Éste está definido por :

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma'_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a \quad (3.5)$$

Donde σ'_1 y σ'_3 son los esfuerzos efectivos principales mayor y menor, en la condición de falla m_b es el valor de la constante m_i de Hoek-Brown para el macizo rocoso, s y a son constantes que dependen de las características de la roca y σ_{ci} es la resistencia a la compresión uniaxial de los trozos o bloques de roca intacta que conforman el macizo rocoso[21]. Para conocer el daño en las propiedades del macizo rocoso se tiene[20]:

$$m_b = m_i \cdot \exp \left(\frac{GSI - 100}{28 - 14D} \right) \quad (3.6)$$

$$s = \exp \left(\frac{GSI - 100}{9 - 3D} \right) \quad (3.7)$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left(e^{-GSI/15} - e^{-20/3} \right) \quad (3.8)$$

Dónde GSI es el valor del índice de resistencia geológica, m_i la constante de Hoek-Brown para roca intacta y D es un factor que depende del grado de diturbación por tronadura. Luego al hacer $\sigma'_3 = 0$ en 3.5 la resistencia a la compresión uniaxial de la masa de roca se obtiene:

$$\sigma_c = \sigma_{ci} s^a \quad (3.9)$$

Por otra parte la resistencia a la tracción se obtiene fijando $\sigma'_1 = \sigma'_3 = \sigma_t$ en 3.5, lo que representa una condición de tensión biaxial, para materiales frágiles Hoek muestra que la resistencia a la tracción uniaxial es igual a la tracción biaxial.

$$\sigma_t = -\frac{s\sigma_{ci}}{m_b} \quad (3.10)$$

Capítulo 4

Desarrollo

4.1. Metodología

Para el desarrollo de este estudio se realizan simulaciones numéricas haciendo uso del software Ansys para identificar los esfuerzos que se generan en la roca a partir de impulsos de alta tensión. La simulación se divide en dos etapas de diseño. En la primera etapa se utiliza Ansys Electronics donde se modela en Maxwell3D, se define la geometría, los materiales y las condiciones de frontera. El software a través de método de elementos finitos A.2 calcula la distribución de campo eléctrico en los elementos del modelo bajo varias condiciones de interés. Estas son el nivel de tensión, la configuración de electrodos, distancia de electrodos y el medio en el cual se realiza el ensayo. En la segunda etapa se utiliza Ansys Mechanical en donde se modela un sistema de análisis estructural transitorio en base a la teoría de falla por esfuerzo normal máximo con el criterio de Hoek-Brown y ruptura electromecánica, en el cual se calculan los esfuerzos máximos principales en la probeta a partir de la densidad de fuerza obtenida de las fuerzas de Lorentz en Maxwell3D.

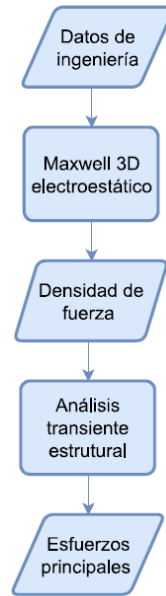


Figura 4.1: Procedimiento para simulación en software Ansys.

4.1.1. Materiales

Para el modelo se utiliza una probeta de andesita con incrustaciones del mineral calcopirita, el cual representa el mineral que se desea extraer mediante la fragmentación por impulsos de alta tensión. Los electrodos son de cobre y los medios serán aire, agua o aceite mineral. Las propiedades eléctricas de interés para el diseño en Maxwell3D son la conductividad y la permitividad relativa, los que se resumen en la siguiente tabla donde los materiales señalados son proporcionados por la librería del software.

Material	Permitividad Relativa ε_r	Conductividad S/m
Cobre*	1	5.979.E+07
Andesita [22]	11	1.279.E-06
Calcopirita [9]	81	7.500.E+01
Agua*	81	1.000.E-02
Aire*	1.0006	0
Aceite mineral [23]	1.535	8.354.E-15

Tabla 4.1: Propiedades eléctricas de los materiales utilizados para la simulación en Ansys Electronic.

En el estudio transitorio son necesarios los datos estructurales de la probeta, las propiedades mecánicas se tienen en la siguiente tabla.

Propiedad	Andesita	Calcopirita
Densidad [kg/m^3]	2750	4200
Módulo de Young [GPa]	50-70	140-330
Coeficiente De Poisson	0.11-0.6	0.4
Módulo de Corte [GPa]	25-33	117
Constante m_i	25	25
Resistencia a la compresión roca intacta [MPa]	120-140	200-460
Resistencia a la tracción roca intacta [MPa]	5-20	27-31

Tabla 4.2: Propiedades mecánicas de las rocas para análisis estructural transitorio[24] [25] [26][20].

Para analizar los resultados y conocer el nivel de esfuerzos obtenidos en las simulaciones se utiliza el escalamiento de los parámetros de roca intacta al macizo rocoso 3.2.2 para la andesita con un valor $GSI = 65$ y $D = 0,3$ en [27] se tiene:

Parámetro	Valor
m_b	7,163
s	0,0205
a	0,502
σ_c [MPa]	44,319
σ_t [KPa]	342,9

Tabla 4.3: Resultados escalamiento Hoek-Brown[27]

4.1.2. Diseño

El modelo de la probeta consiste en un cilindro de andesita de radio $27mm$ con una altura de $112mm$ el cual presenta cuatro intrusiones de calcopirita modeladas como esferas de $4mm$ de radio las cuales se posicionaron de forma aleatoria dentro de la probeta. Por lo tanto se tiene $255,432cm^3$ de andesita y $1,072cm^3$ de calcopirita siendo esta 0,43 % del volumen total de la probeta.

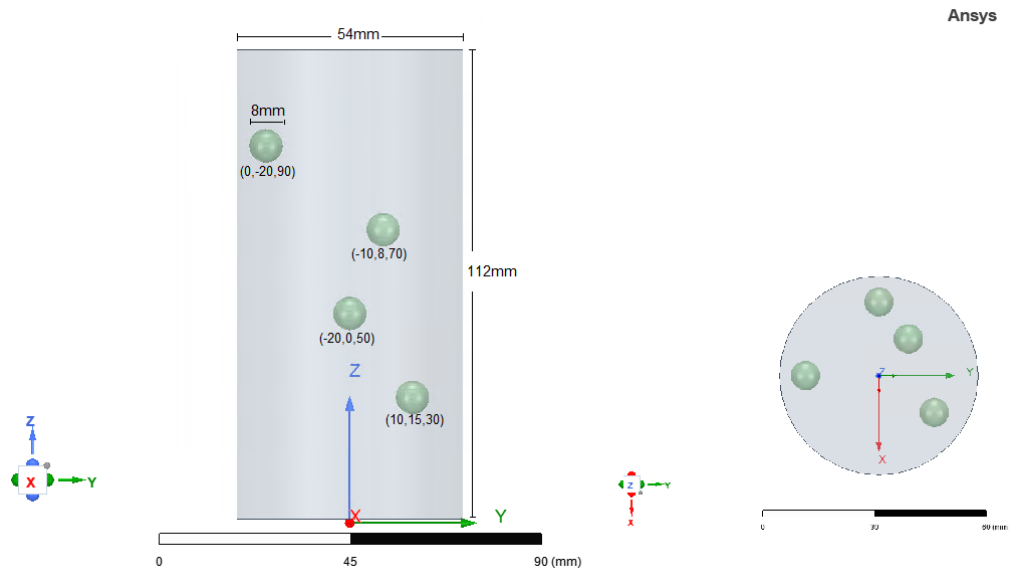


Figura 4.2: Diseño de probeta andesita con intrusiones de calcopirita.

Se utilizan cuatro tipos de electrodos de cobre. El primero consiste en un plano que se modela como un cilindro de 1mm de altura y 140mm de radio, el segundo es una punta compuesta por un cilindro de 1cm de diámetro y 4cm de altura unido a un cilindro de 1mm de diámetro y 1cm de altura, el electrodo esférico consiste en una esfera de 2cm de diámetro unida a un cilindro de altura 30mm y radio $2,5\text{mm}$, el último electrodo es otra punta compuesta por un cilindro de 40mm de altura y 10mm de radio unido a un cono de altura 20mm y radio inferior 2mm .

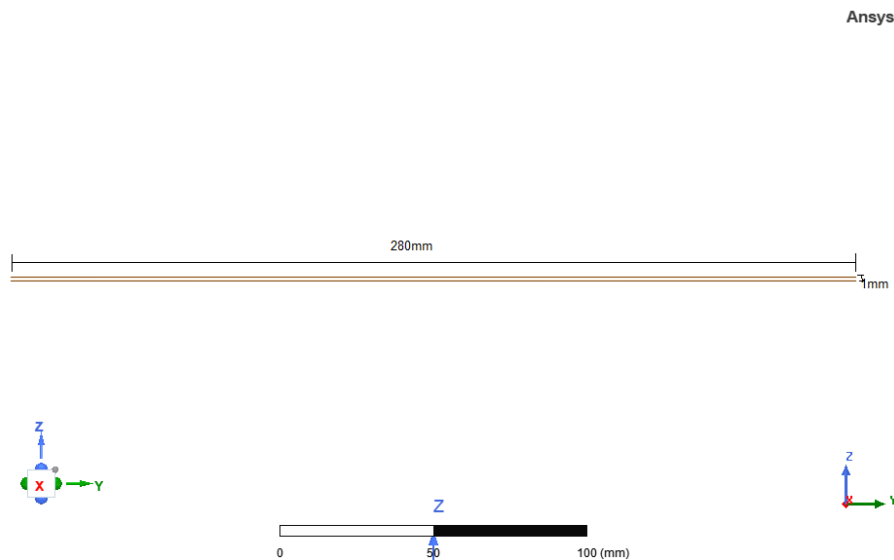


Figura 4.3: Electrodo plano.

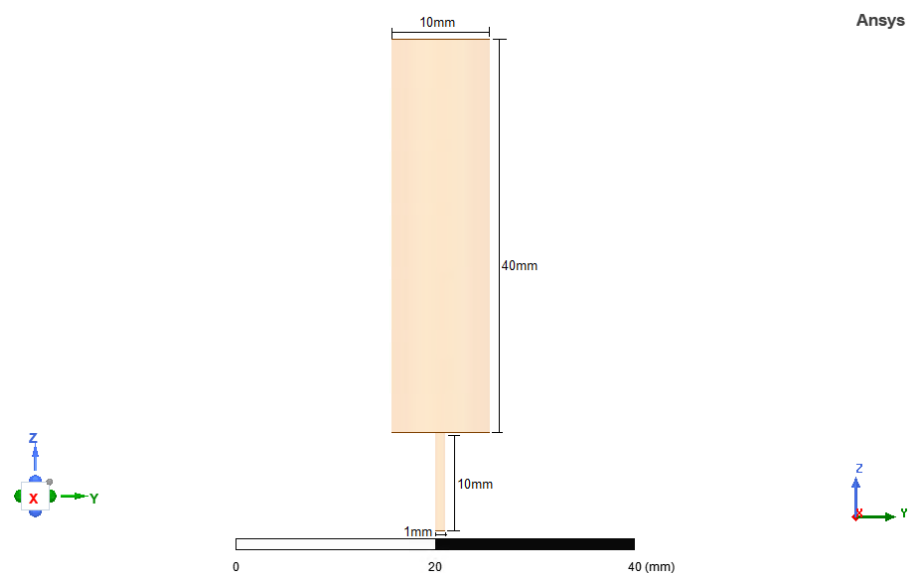


Figura 4.4: Electrodo punta 1.

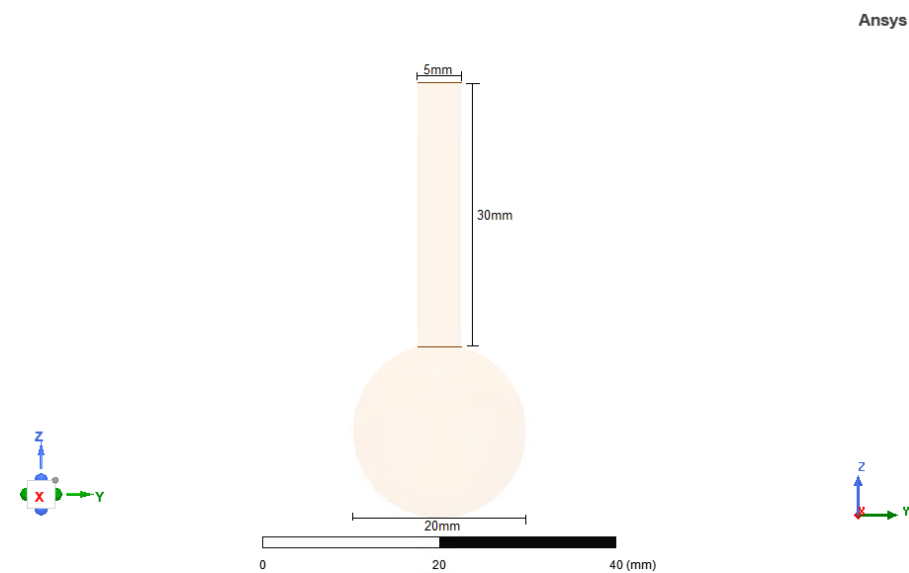


Figura 4.5: Electrodo esfera.

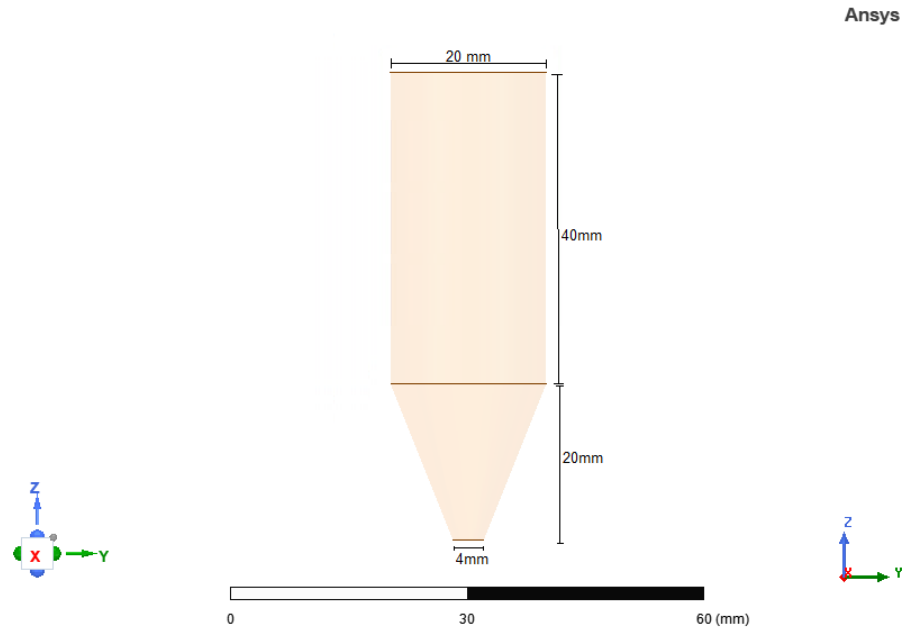


Figura 4.6: Electrodo punta 2.

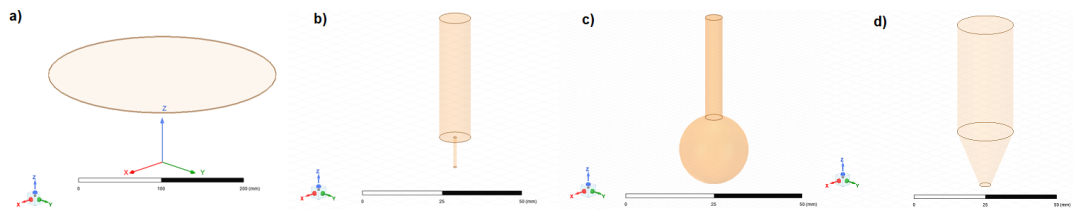


Figura 4.7: Diseño de los electrodos de cobre a) plano b) punta1 c) esfera d) punta2

Las condiciones de frontera del modelo se definen en la tensión de los electrodos. Al electrodo inferior se le asigna una tensión de $0V$ y al electrodo superior se le asigna alta tensión entre $150kV$ o $200kV$, esta tensión respresenta el valor peak del impulso. La solución es de tipo electroestática y se considera una región 10 % mayor en todos los ejes al espacio ocupado por el modelo.

En el enmallado se le asigna a la probeta un refinamiento basado en la longitud del elemento, restringiendo la longitud de estos a un máximo de $5mm$. Tanto a la probeta como a las incrustaciones se le asigna como parámetro la fuerza de lorentz. Para la configuración de la solución en Ansys Electronic se establece un máximo de 30 pasos con 5 % de error, con un refinamiento de 30 % por paso.

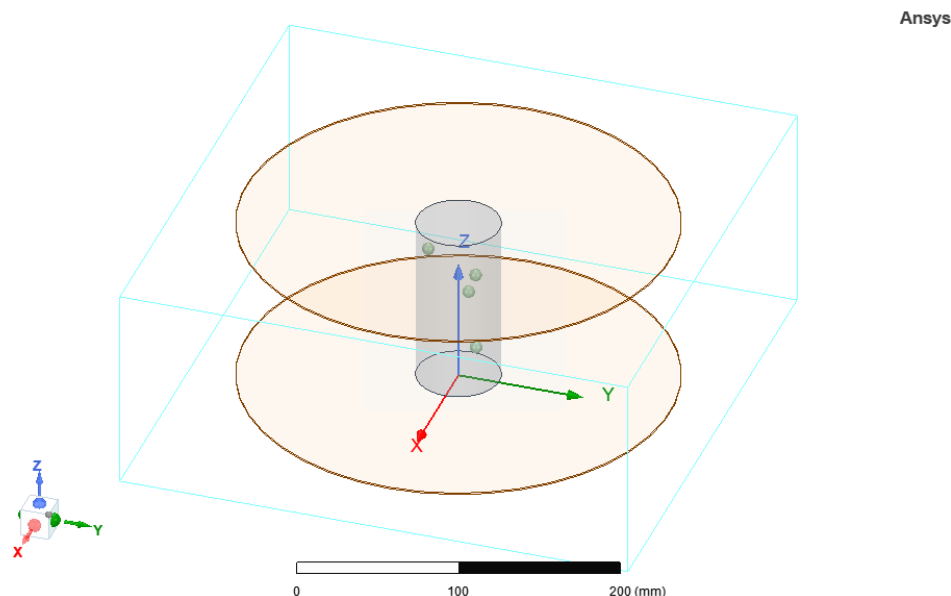


Figura 4.8: Modelo en Ansys Electronics de probeta con electrodos plano-plano con diferencia de potencial de 200kV

Por otra parte para el diseño en Ansys Mechanical se transfiere la geometría y configuración desde Ansys Maxwell, en el modelo se le asignan los materiales a cada geometría. Se configura un enmallado con un tamaño de elemento de $5mm$ tanto en la probeta como intrusiones. En la cara superior e inferior del cilindro de la probeta se aplican soportes de solo compresión para aplicar una restricción de compresión normal a ambas caras. Para la configuración del tiempo de análisis se utiliza $1\mu s$ representando el tiempo del impulso. Además se importan los datos de densidad de fuerza obtenidos en Ansys Maxwell. En la solución se establece obtener el esfuerzo máximo principal y esfuerzo mínimo principal.

4.1.3. Casos de Estudio

Con el objetivo de estudiar los efectos de los impulsos de alta tensión en las muestras minerales se varían distintos parámetros en las simulaciones para analizar el efecto que tienen estos en los esfuerzos que se generan en la probeta. La magnitud del impulso es uno de los parámetros a estudiar, por lo que se varía el nivel de tensión aplicado en el electrodo superior del modelo en Ansys Maxwell asignando una excitación de $150kV$ y $200kV$. También se analizará la configuración de los electrodos dónde se varía tanto la forma como la distancia de estos. En 4.1.2 se especifica la geometría de los electrodos a utilizar siendo los casos de estudio las configuraciones: plano-plano, punta1-plano, esfera-plano y punta2-plano. La distancia en las que se disponen los electrodos son $112mm$, $117mm$ y $122mm$. Por último es relevante estudiar en qué medio realizar el ensayo por lo que se varía éste pudiendo ser aire, agua o aceite mineral.

Nivel de tensión [kV]	150
	200
Configuración de electrodos	Plano-plano
	Punta1-plano
	Esfera-plano
	Punta2-plano
Distancia electrodos[mm]	112
	117
	122
Medio	Aire
	Agua
	Aceite

Tabla 4.4: Casos de estudio

4.2. Resultados

Una vez realizado el diseño, se ejecuta el procedimiento esquematizado en 4.1. De esta forma se obtienen los siguientes esfuerzos principales, para una tensión en el electrodo superior de $200kV$ a distintas distancias de electrodos y en distintos medios.

Configuración electrodos	Medio	Máximo esfuerzo principal [Pa]	
		Compresión	Tracción
Plano - plano	agua	-298.99	980.73
	aire	-64.081	929.87
	aceite	-67.703	782.65
Punta1 - plano	agua	-1967.3	2471.90
	aire	-354.26	452.87
	aceite	-136.99	290.33
Esfera - plano	agua	-2853.1	2592.60
	aire	-1818	3684.90
	aceite	-1716.6	2994.60
Punta2 - plano	agua	-1784.3	5001.70
	aire	-797.08	4757.90
	aceite	-514.37	1707.90

Tabla 4.5: Máximo esfuerzo principal para un nivel de tensión de $200kV$ y distancia de electrodos 112mm.

Configuración electrodos	Medio	Mínimo esfuerzo principal [Pa]	
		Compresión	Tracción
Plano - plano	agua	-493.22	505.05
	aire	-202.06	484.81
	aceite	-192.50	438.66
Punta1 - plano	agua	-4159.30	121.13
	aire	-572.01	239.86
	aceite	-238.72	144.08
Esfera - plano	agua	-5400.80	1270.60
	aire	-3245.30	1722.70
	aceite	-2894.50	1521.00
Punta2 - plano	agua	-3157.10	857.33
	aire	-2088.00	1219.40
	aceite	-1144.90	488.87

Tabla 4.6: Mínimo esfuerzo principal para un nivel de tensión de 200kV y distancia de electrodos 112mm.

Configuración electrodos	Medio	Máximo esfuerzo principal [Pa]	
		Compresión	Tracción
Plano - plano	agua	-302.88	810.01
	aire	-38.70	510.50
	aceite	-45.46	678.69
Punta1 - plano	agua	-788.90	305.40
	aire	-1.83	184.83
	aceite	-2.83	145.13
Esfera - plano	agua	-1431.80	421.88
	aire	-4.36	938.11
	aceite	-6.52	549.15
Punta2 - plano	agua	-1047.10	466.36
	aire	-2.98	432.88
	aceite	-4.68	391.06

Tabla 4.7: Máximo esfuerzo principal para un nivel de tensión de 200kV y una distancia de electrodos de 117mm.

Configuración electrodos	Medio	Mínimo esfuerzo principal [Pa]	
		Compresión	Tracción
Plano - plano	agua	-572.36	381.55
	aire	-115.89	298.52
	aceite	-148.47	367.95
Punta1 - plano	agua	-1128.50	138.43
	aire	-7.92	106.15
	aceite	-9.62	77.42
Esfera - plano	agua	-2321.10	169.51
	aire	-20.34	537.37
	aceite	-23.09	340.70
Punta2 - plano	agua	-1483.80	189.14
	aire	-11.15	238.16
	aceite	-15.03	207.24

Tabla 4.8: Mínimo esfuerzo principal para un nivel de tensión de 200kV y una distancia de electrodos de 117mm.

Configuración electrodos	Medio	Máximo esfuerzo principal [Pa]	
		Compresión	Tracción
Plano - plano	agua	-328.58	716.98
	aire	-23.55	497.56
	aceite	-39.51	640.50
Punta1 - plano	agua	-487.29	302.78
	aire	-1.55	53.00
	aceite	-2.39	49.34
Esfera - plano	agua	-1195.10	432.20
	aire	-2.35	254.99
	aceite	-3.85	119.47
Punta2 - plano	agua	-790.25	245.20
	aire	-2.57	128.85
	aceite	-4.23	80.45

Tabla 4.9: Máximo esfuerzo principal para un nivel de tensión de 200kV y una distancia de electrodos de 122mm.

Configuración electrodos	Medio	Mínimo esfuerzo principal [Pa]	
		Compresión	Tracción
Plano - plano	agua	-474.45	423.63
	aire	-95.94	280.30
	aceite	-121.93	374.19
Punta1 - plano	agua	-676.85	98.29
	aire	-4.88	33.67
	aceite	-6.75	21.71
Esfera - plano	agua	-1734.10	177.32
	aire	-8.41	150.50
	aceite	-11.09	82.24
Punta2 - plano	agua	-1102.70	103.92
	aire	-10.19	83.19
	aceite	-13.96	52.11

Tabla 4.10: Mínimo esfuerzo principal para un nivel de tensión de 200kV y una distancia de electrodos de 122mm.

Con los resultados se generan los siguientes gráficos de barra. Se grafican los máximos esfuerzos de tracción obtenidos en los máximos esfuerzos principales y los máximos esfuerzos de compresión obtenidos en los mínimos esfuerzos principales. Estos se presentan en pascals y como fracción de la resistencia a la tracción y compresión en 4.3.

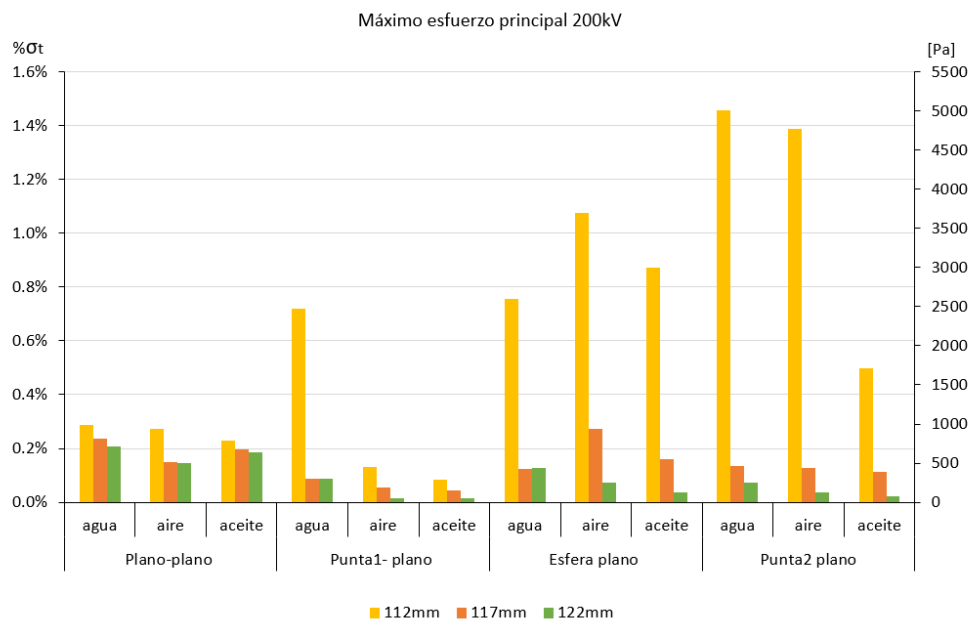


Figura 4.9: Esfuerzos máximos principales de tracción obtenidos para distintas distancias de electrodos y medios a 200kV.

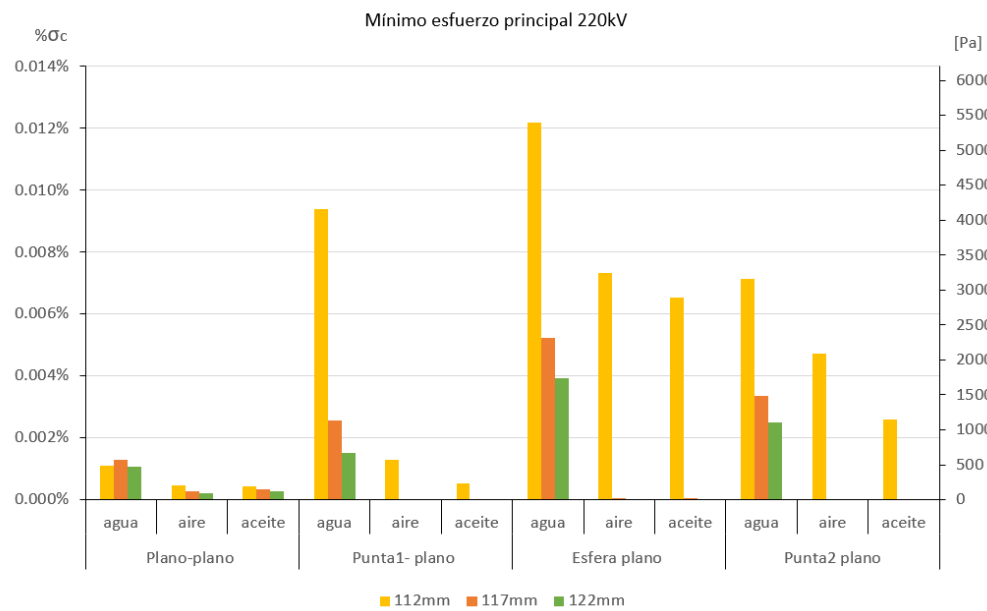


Figura 4.10: Esfuerzos mínimos principales de compresión obtenidos para distintas distancias de electrodos y medios a 200kV.

De la misma forma se ejecutan las simulaciones para obtener los esfuerzos principales para una tensión de 150kV en el electrodo superior.

Configuración electrodos	Medio	Máximo esfuerzo principal [Pa]	
		Compresión	Tracción
Plano - plano	agua	-165.82	590.64
	aire	-32.38	584.40
	aceite	-38.25	402.67
Punta1 - plano	agua	-639.47	749.37
	aire	-73.11	102.41
	aceite	-32.22	41.05
Esfera - plano	agua	-1463.60	1395.90
	aire	-1022.60	2072.80
	aceite	-965.57	1684.50
Punta2 - plano	agua	-967.32	3490.20
	aire	-445.99	3267.90
	aceite	-289.33	960.71

Tabla 4.11: Máximo esfuerzo principal para un nivel de tensión de 150kV y distancia de electrodos 112mm.

Configuración electrodos	Medio	Mínimo esfuerzo principal [Pa]	
		Compresión	Tracción
Plano - plano	agua	-293.59	318.86
	aire	-98.50	301.04
	aceite	-101.07	264.03
Punta1 - plano	agua	-1163.80	73.05
	aire	-115.36	54.54
	aceite	-48.43	19.67
Esfera - plano	agua	-2713.80	663.50
	aire	-1825.50	969.01
	aceite	-1628.10	855.58
Punta2 - plano	agua	-2011.80	619.12
	aire	-1249.20	684.07
	aceite	-643.99	274.99

Tabla 4.12: Mínimo esfuerzo principal para un nivel de tensión de 150kV y distancia de electrodos 112mm.

Configuración electrodos	Medio	Máximo esfuerzo principal [Pa]	
		Compresión	Tracción
Plano - plano	agua	-156.59	477.26
	aire	-17.51	328.00
	aceite	-33.92	409.43
Punta1 - plano	agua	-406.36	171.64
	aire	-1.03	99.47
	aceite	-1.61	81.43
Esfera - plano	agua	-833.62	221.58
	aire	-3.12	499.79
	aceite	-3.92	294.07
Punta2 - plano	agua	-600.72	262.33
	aire	-1.80	219.68
	aceite	-2.97	213.45

Tabla 4.13: Máximo esfuerzo principal para un nivel de tensión de 150kV y una distancia de electrodos de 117mm.

Configuración electrodos	Medio	Mínimo esfuerzo principal [Pa]	
		Compresión	Tracción
Plano - plano	agua	-303.61	228.93
	aire	-66.84	185.98
	aceite	-85.58	215.43
Punta1 - plano	agua	-634.18	77.54
	aire	-4.49	56.27
	aceite	-5.36	41.94
Esfera - plano	agua	-1322.40	96.06
	aire	-12.15	285.71
	aceite	-13.48	182.78
Punta2 - plano	agua	-964.67	107.61
	aire	-6.45	130.12
	aceite	-8.99	116.91

Tabla 4.14: Mínimo esfuerzo principal para un nivel de tensión de 150kV y una distancia de electrodos de 117mm.

Configuración electrodos	Medio	Máximo esfuerzo principal [Pa]	
		Compresión	Tracción
Plano - plano	agua	-178.93	412.93
	aire	-17.82	293.40
	aceite	-31.85	368.63
Punta1 - plano	agua	-297.63	169.50
	aire	-0.88	29.52
	aceite	-1.35	27.92
Esfera - plano	agua	-670.72	245.04
	aire	-1.22	143.00
	aceite	-2.29	65.24
Punta2 - plano	agua	-415.04	134.75
	aire	-1.57	73.27
	aceite	-2.43	49.40

Tabla 4.15: Máximo esfuerzo principal para un nivel de tensión de 150kV y una distancia de electrodos de 122mm.

Configuración electrodos	Medio	Mínimo esfuerzo principal [Pa]	
		Compresión	Tracción
Plano - plano	agua	-276.79	25.61
	aire	-62.36	170.96
	aceite	-94.75	212.32
Punta1 - plano	agua	-470.76	55.10
	aire	-2.75	18.78
	aceite	-3.86	12.14
Esfera - plano	agua	-974.08	98.21
	aire	-4.73	84.75
	aceite	-6.39	45.47
Punta2 - plano	agua	-616.79	58.76
	aire	-5.65	48.28
	aceite	-7.65	29.03

Tabla 4.16: Mínimo esfuerzo principal para un nivel de tensión de 150kV y una distancia de electrodos de 122mm.

Para el nivel de tensión de 150kV se generan los siguientes gráficos.

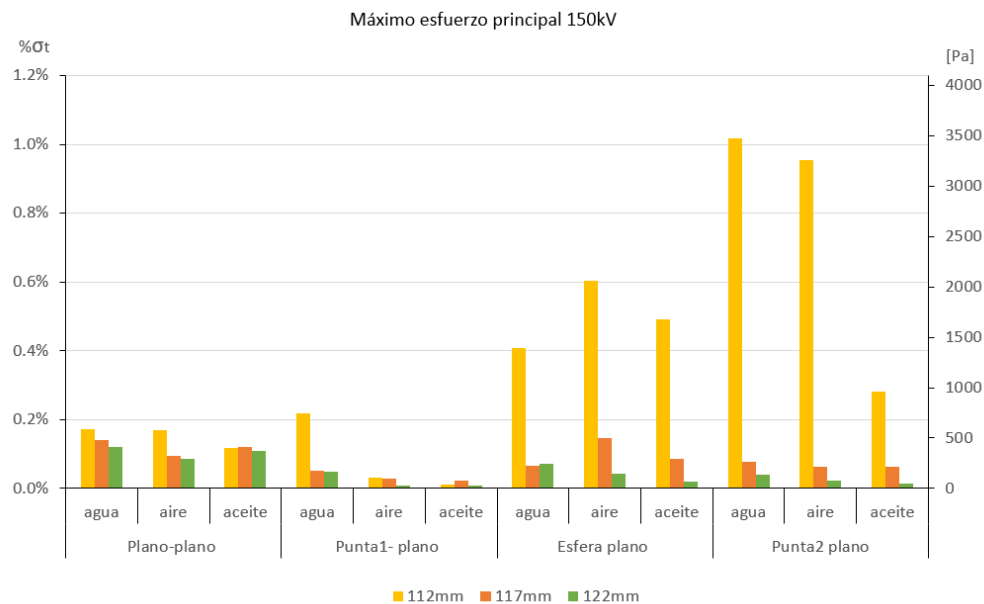


Figura 4.11: Esfuerzos máximos principales de tracción obtenidos para distintas distancias de electrodos y medios a 150kV.

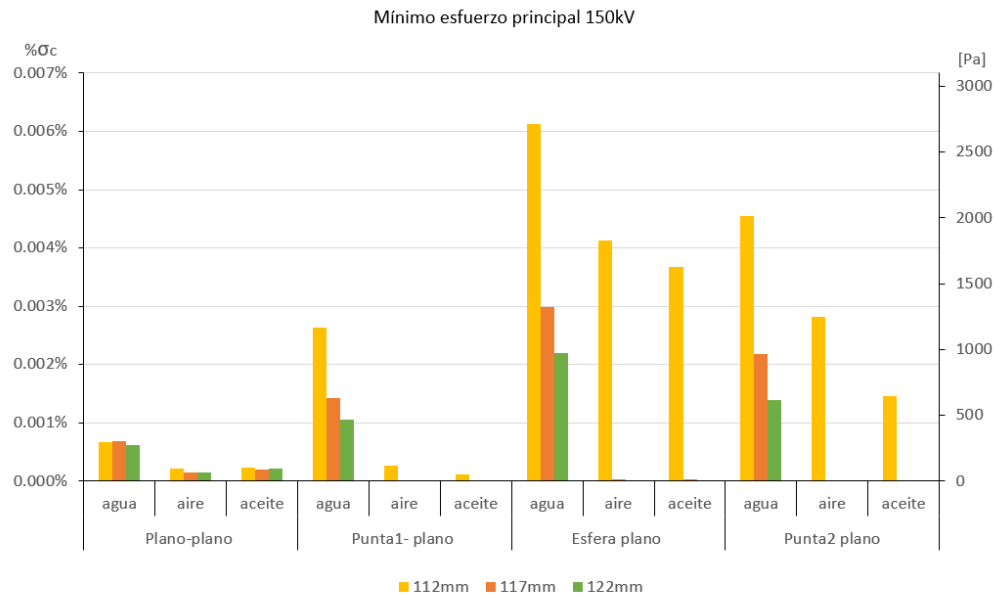


Figura 4.12: Esfuerzos mínimos principales de compresión obtenidos para distintas distancias de electrodos y medios a 150kV.

4.3. Análisis

4.3.1. Nivel de tensión

Al graficar los máximos esfuerzos de tracción obtenidos en las simulaciones a diferentes medios y distancias, se logra apreciar que a 200kV se obtuvieron mayores esfuerzos que a 150kV, esto también sucede con los máximos esfuerzos de compresión. Es importante notar que esta tendencia se registra en todas las distancias, medios y electrodos que se variaron en las simulaciones.

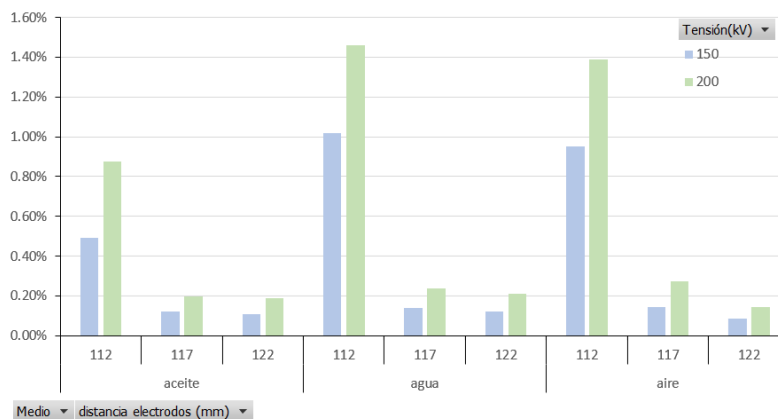


Figura 4.13: Esfuerzos máximos de tracción según nivel de tensión

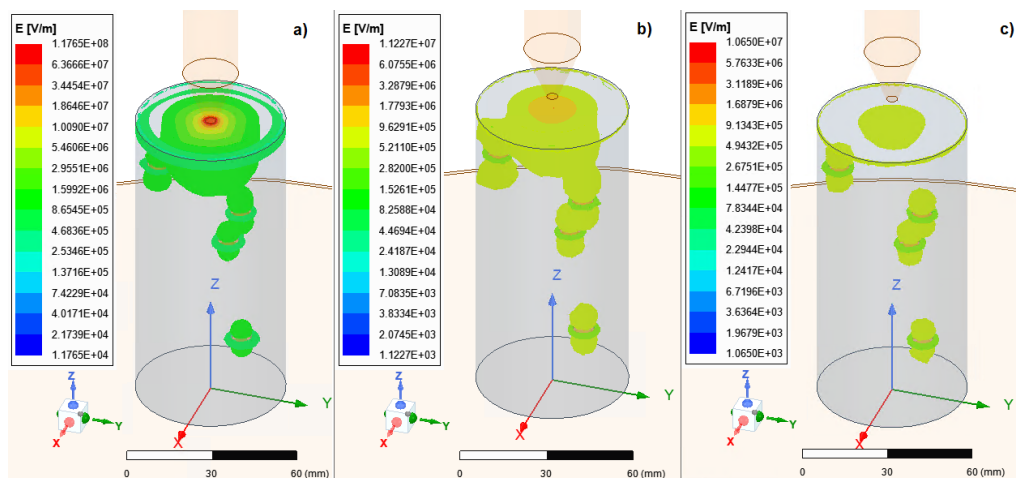


Figura 4.15: Campo eléctrico en escala logarítmica para electrodos Punta2-plano, tensión 200kV, medio aire y distancia a)112mm b)117mm c)122mm

Si se compara la imagen anterior con los esfuerzos máximos principales, se observa un comportamiento similar al del campo eléctrico, donde los mayores esfuerzos se obtienen en las zonas dónde se registra mayor intensidad del campo. En el caso del electrodo en contacto directo con la probeta se tienen los mayores esfuerzos en el punto de contacto, mientras que en los casos b y c la mayor intensidad está en la parte superior de la probeta y la compresión máxima se da en la frontera de una incrustación, sin embargo al comparar los valores en la frontera de la incrustación, siguen siendo mayores en el caso de menor distancia. A mayor distancia de electrodos también se abre la posibilidad de que el campo electromagnético cause más efectos en el medio en el que se encuentra, que en la probeta. En la unidad SELFRAG de [7] la distancia entre electrodos es de 10 a 40mm, en este estudio, la distancia mínima es 112mm. Este análisis evidencia la tendencia a mayores esfuerzos con menor distancia, por lo que este factor es uno de los índices que pueden explicar el no alcanzar la resistencia del material para la falla. Sin embargo tal como señala [10] la disminución de la distancia puede causar restricciones en el volumen de material que se puede pretratar.

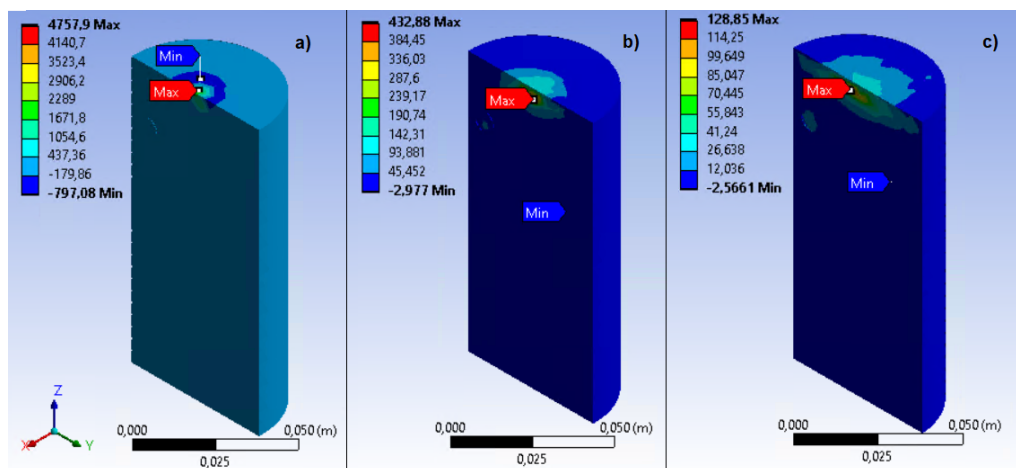


Figura 4.16: Esfuerzos máximos principales para electrodos Punta2-plano, tensión 200kV, medio aire y distancia a)112mm b)117mm c)122mm

4.3.3. Medio

Para el análisis de la influencia del medio en el que se encuentra la probeta para ser tratada con impulsos de alta tensión, los resultados 4.2 muestran que los mayores esfuerzos se dan en con la región de agua, siendo seguida por el aire y luego el aceite con los resultados de esfuerzos más bajos. Este comportamiento se registra en todas las configuraciones de electrodos, a excepción de la configuración esfera plano, dónde en aire se tiene mayor tracción que en agua pero no mayor compresión, esto se retomará más adelante. De forma ilustrativa se tiene el campo eléctrico de la configuración Punta2-plano con regiones de distintos medios, a una distancia de electrodos 112mm y tensión 200kV.

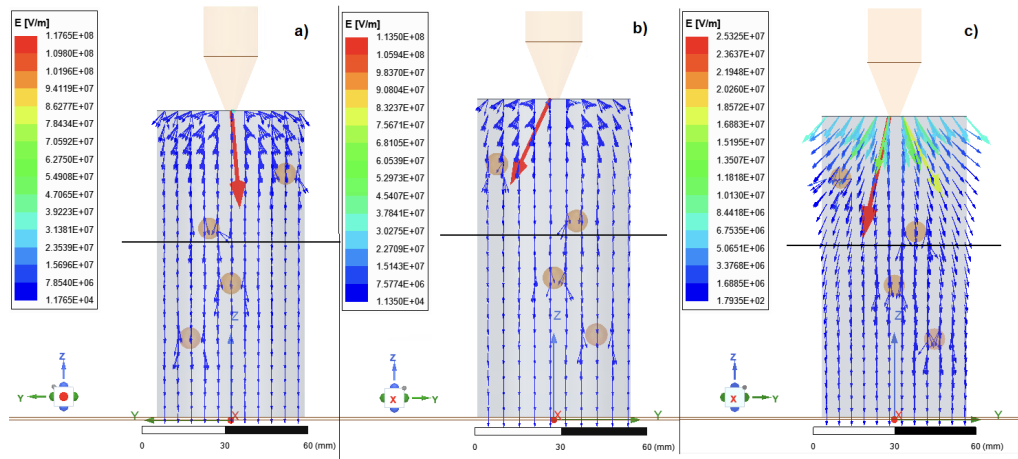


Figura 4.17: Campo electromagnético para electrodos Punta2-plano, tensión 200 kV, electrodos a distancia 112mm y medio; a) Aire b) Aceite c) Agua.

Como se ha mencionado anteriormente, la concentración de esfuerzos se genera en las zonas donde hay mayor intensidad de campo eléctrico. En la sección 4.3.2 se plantea que cuando mayor es el campo eléctrico, se tienen mayores esfuerzos, esto se cumple cuando todas los otros factores se mantienen constantes (tensión, medio y configuración de electrodos). En la imagen anterior se evidencia que en las simulaciones para un mismo caso donde sólo se varía el medio, en agua se tienen mayores esfuerzos pero no mayor campo eléctrico, ya que se puede ver en c) que la máxima intensidad de campo para el medio agua es menor que aire y aceite. Esto se explica por las diferencias de permitividades entre la probeta y el medio, lo que influye en la magnitud del campo eléctrico y cómo este se comporta entre la frontera de la probeta y el medio. Para analizar esto se traza una línea paralela al eje y entre $y = -40\text{mm}$ y $y = 40\text{mm}$ a una altura $z = 65\text{mm}$, la cual tiene el propósito de graficar el campo eléctrico a lo largo de la línea sin intervenir en el modelo.

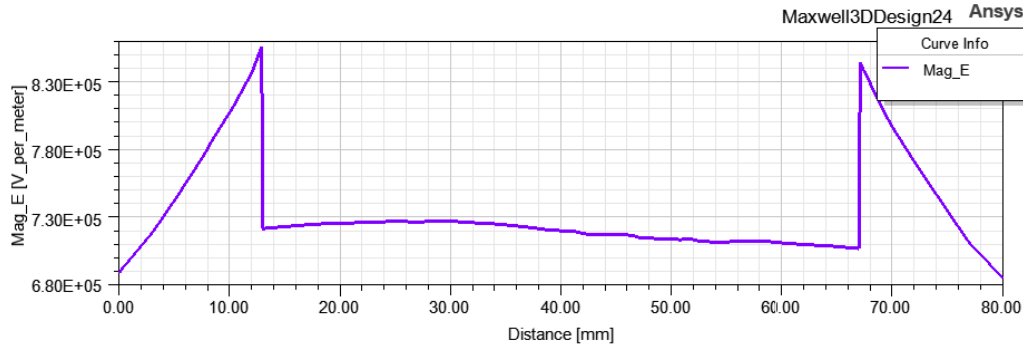


Figura 4.18: Campo electromagnético caso a) Aire a lo largo de una línea.

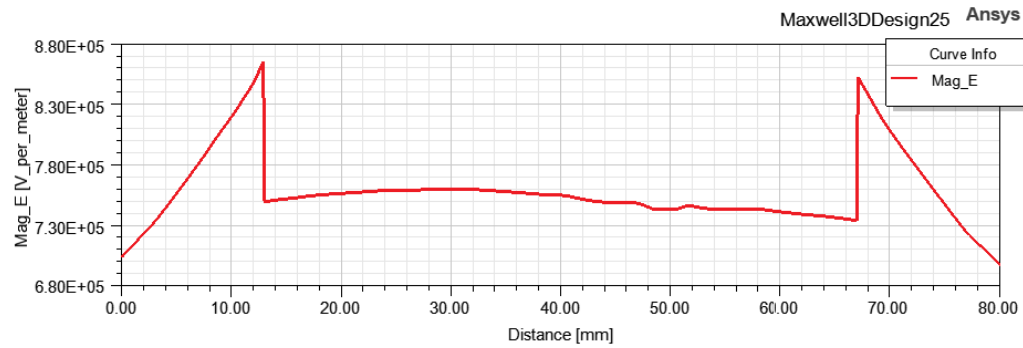


Figura 4.19: Campo electromagnético caso b) Aceite a lo largo de una línea.

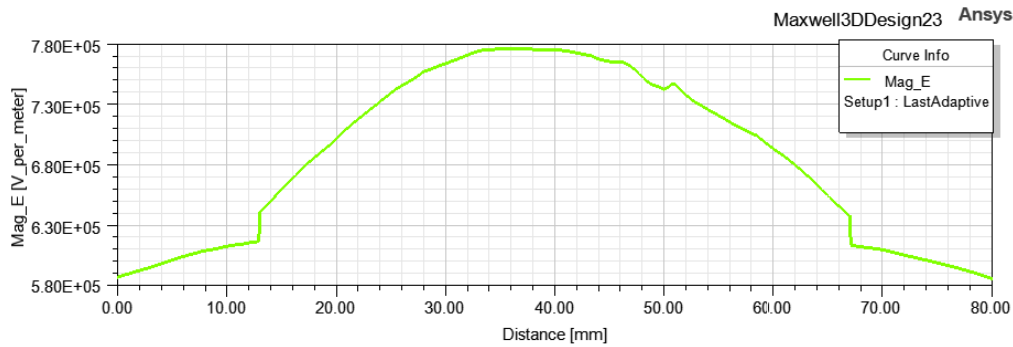


Figura 4.20: Campo electromagnético caso c) Agua a lo largo de una línea.

Para los casos de aire y aceite se observa que el campo eléctrico va en aumento a lo largo de la línea, luego en la frontera de la probeta disminuye su valor y en la frontera con el medio vuelve a aumentar, por lo que las mayores intensidades del campo se dan en la frontera de la probeta con el medio. En cambio en el caso del agua en el medio el campo es menor que en el interior de la probeta donde alcanza su máximo. Este comportamiento se debe a que la permitividad de la probeta ε_p es menor que la permitividad del medio ε_m cuando el medio es agua, pero cuando el medio es aire o aceite $\varepsilon_p > \varepsilon_m$ teniendo el máximo en las fronteras y no en el interior. Esto se refleja en los resultados de esfuerzos obtenidos donde para el caso del medio agua se tenían esfuerzos principales promedios negativos en la probeta, lo que indica que los esfuerzos son de compresión, mientras que en el caso de aire y aceite los esfuerzos promedios eran de tracción.

Configuración electrodos	Medio	Promedio σ_1 Pa	Promedio σ_3 Pa
Plano plano	agua	-14.934	-23.173
	aire	9.4376	4.994
	aceite	5.6929	2.1069
Punta1 plano	agua	-12.553	-20.988
	aire	1.0904	0.41553
	aceite	0.87275	0.29432
Esfera plano	agua	-30.664	-47.15
	aire	3.4312	0.60903
	aceite	2.6713	0.33681
Punta2 plano	agua	-18.628	-31.382
	aire	4.0741	-0.029
	aceite	2.6199	0.18219

Tabla 4.17: Esfuerzos máximo y mínimo principal promedios para distintas configuraciones de electrodos en distintos medios a nivel de tensión 200kV y distancia de electrodos 112mm.

4.3.4. Configuración de electrodos

Preliminarmente en la sección 4.2 se tiene un mayor porcentaje de la resistencia de falla a tracción en el caso de Punta2-plano, sin embargo este no es suficiente para provocar la falla con el método que se está modelando. El porcentaje de la resistencia de falla a compresión se logra con la configuración esfera-plano siendo punta2-plano la de segundo mejor desempeño. En ningún caso se logra un nivel de esfuerzo que provoque la falla. Para el análisis de la configuración de electrodos de forma ilustrativa se incluyen imágenes de las distintas configuraciones manteniendo el agua como medio, una distancia de electrosos de 112mm y una tensión de 220kV.

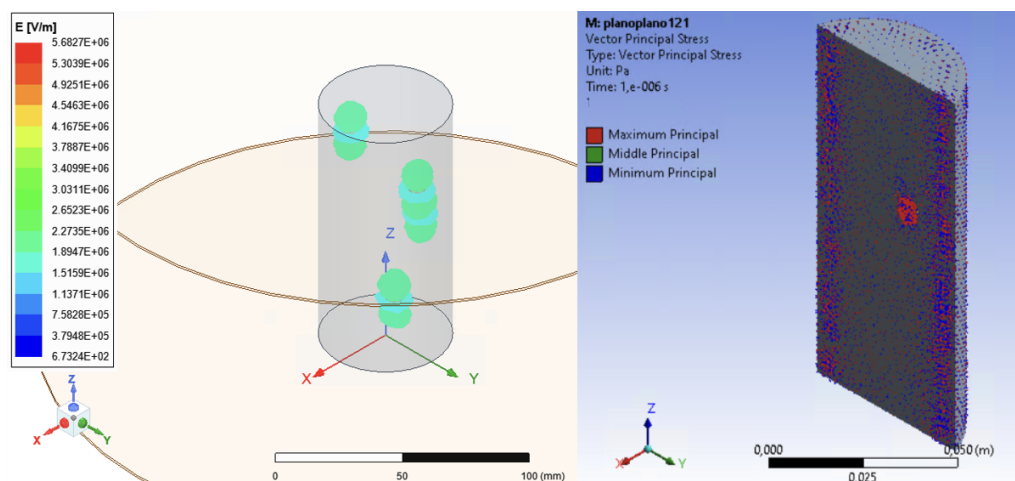


Figura 4.21: Campo electromagnético y vectores de esfuerzo en configuración plano-plano.

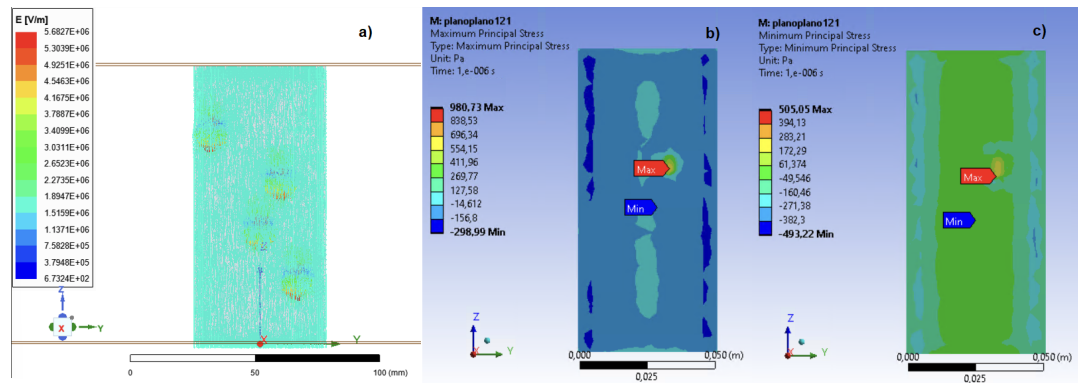


Figura 4.22: Configuración de electrodos plano-plano a) Campo electromagnético b) Esfuerzos máximo principales c) Esfuerzos mínimos principales

Como se ha mencionado en los mayores esfuerzos se ocasionan en donde ocurre la mayor intensidad de campo eléctrico, y el caso plano-plano, sigue la misma tendencia al igual que el resto de las configuraciones de electrodos. En el caso plano-plano se observa que el campo es mayor en la frontera entre las incrustaciones y la probeta, logrando los mayores esfuerzos en las incrustaciones que están más próximas entre sí, el cómo afecta la distribución y cantidad de intrusiones en la muestra no es parte del alcance de este estudio. Dada la uniformidad del campo que se da entre dos planos, esta configuración de electrodos fue la de peor desempeño en cuanto a esfuerzos. Sin embargo se logra delucidar claramente como se comporta el campo en la frontera de las incrustaciones.

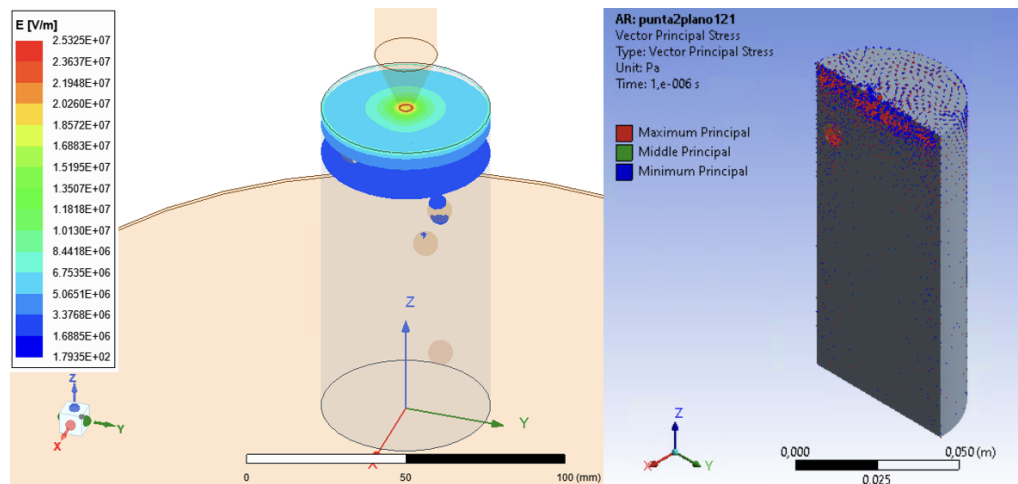


Figura 4.23: Campo electromagnético y vectores de esfuerzo en configuración punta2-plano

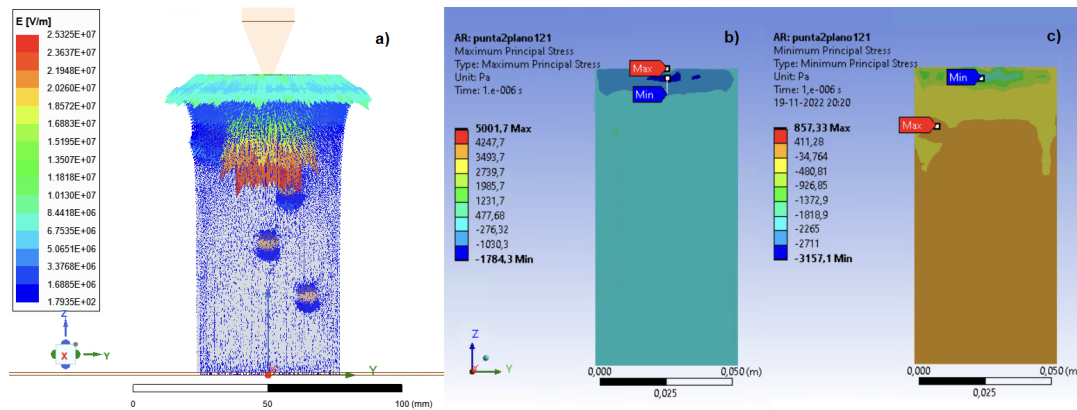


Figura 4.24: Configuración de electrodos punta2-plano a) Campo electromagnético b) Esfuerzos máximos principales c) Esfuerzos mínimos principales

El caso punta 2-plano es el que obtuvo mejor desempeño de esfuerzos, sin alcanzar el nivel necesario para la ruptura. Una de las limitaciones de este estudio es que modela los esfuerzos generados a partir de las fuerzas electroestáticas provocadas por el campo eléctrico. Sin embargo como se señala en el marco teórico existen otros métodos de ruptura que no forman parte del alcance del modelo. Según [29] las fuerzas electroestáticas por si solas no pueden causar la liberación del mineral, porque antes que se alcance el campo necesario para causar los esfuerzos de la falla electromecánica, el material va a ser ionizado y la ruptura eléctrica dará lugar por la explosiva expansión del plasma que se menciona en 3.1.7. Dicho esto, el estado del arte sugiere que la fragmentación o ruptura se dará en las zonas con mayor intensidad de campo, es por esto que las simulaciones realizadas y los niveles de esfuerzos nos dan noción de dónde se podría provocar la ruptura, ya que si bien no falla por el método aquí modelado, existe la probabilidad de que falle o no por otro método abordado en el marco teórico.

Los mayores esfuerzos en punta2-plano se dan en el punto de contacto entre la probeta y el electrodo, por lo que si llegase a fallar el material, probablemente sería en esa zona. Las incrustaciones más próximas al electrodo superior son aquellas que tienen mayor valor de campo eléctrico en su frontera.

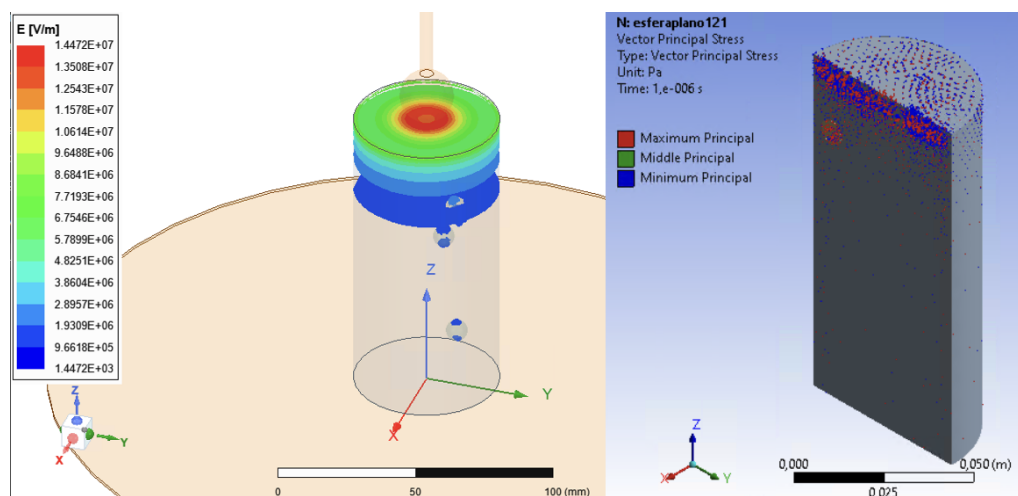


Figura 4.25: Campo electromagnético y vectores de esfuerzo en configuración esfera-plano

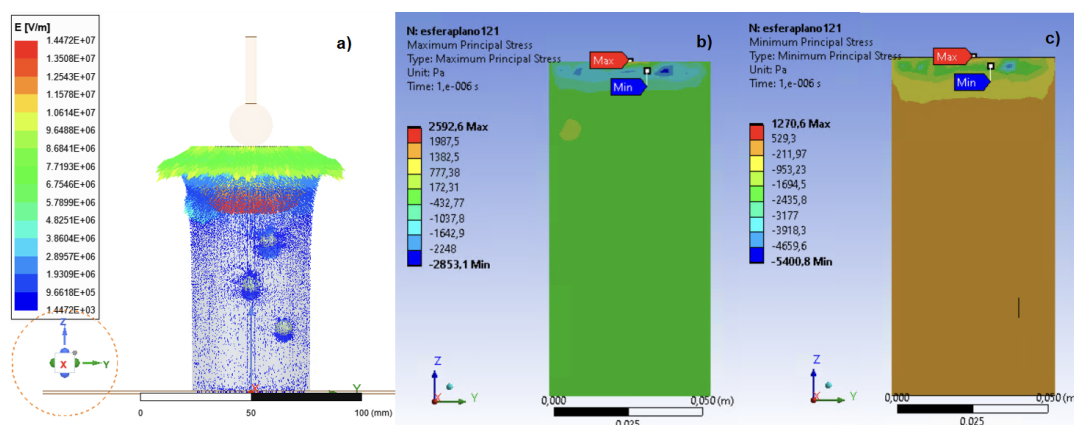


Figura 4.26: Configuración de electrodos esfera-plano a) Campo electromagnético b) Esfuerzos máximos principales c) Esfuerzos mínimos principales

El caso de la configuración esfera-plano es uno que se escapaba de las tendencias señaladas al analizar el medio en donde se encuentra la probeta en estudio, al alcanzar su máximo esfuerzo de tracción con la región de aire. Además se alcanzan mayores esfuerzos de compresión que en la configuración punta2-plano. La selección de la mejor configuración de electrodos se inclina a punta2-plano si se trata de esfuerzos de tracción y a esfera-plano si se trata de esfuerzos de compresión. Algo particular de la configuración con esfera es como se comporta esta en el espacio de simulación. Dado que los resultados presentaban grandes diferencias dependiendo del enmallado elegido, lo que no ocurrió notoriamente con el resto de configuraciones. Como se ve en la siguiente imagen la esfera tiene contacto en un único punto con la probeta, el enmallado se realiza en todo el volumen a través de líneas rectas lo que se transforma en una dificultad para superficies curvas, además al tener de contacto un único punto los resultados se ven influenciados por el enmallado. Para que los resultados entre configuraciones sean comparables se utilizó el mismo nivel de enmallado a pesar de que los resultados de esta configuración se escapa de las tendencias, lo que podría deberse a lo mencionado.

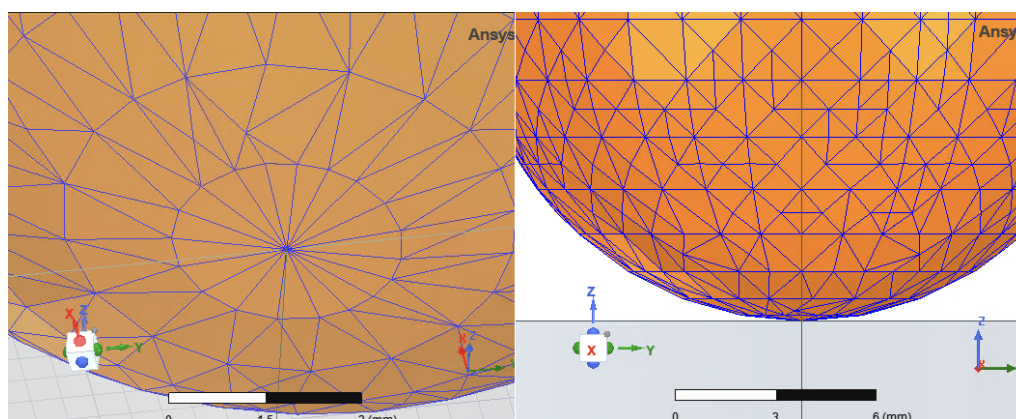


Figura 4.27: Enmallado del electrodo esférico en Ansys Electronic.

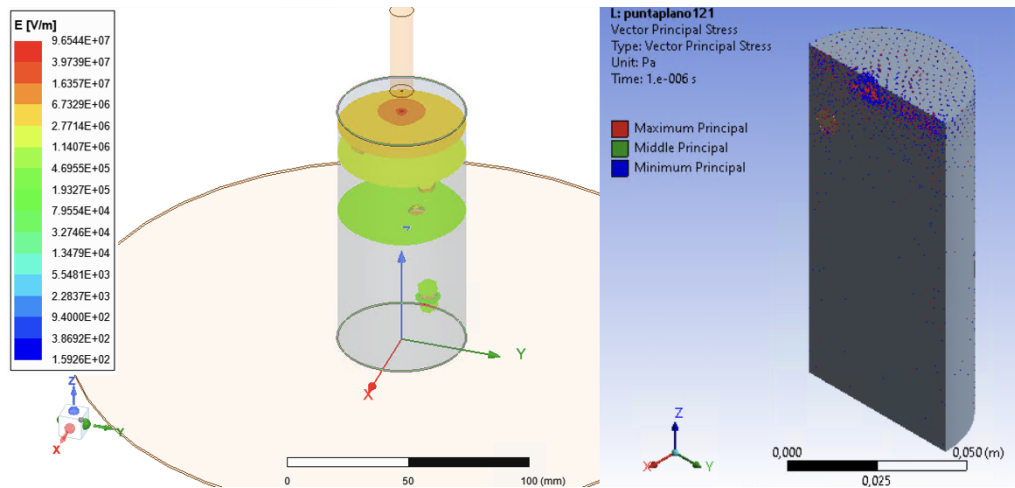


Figura 4.28: Campo electromagnético y vectores de esfuerzo en configuración punta1-plano

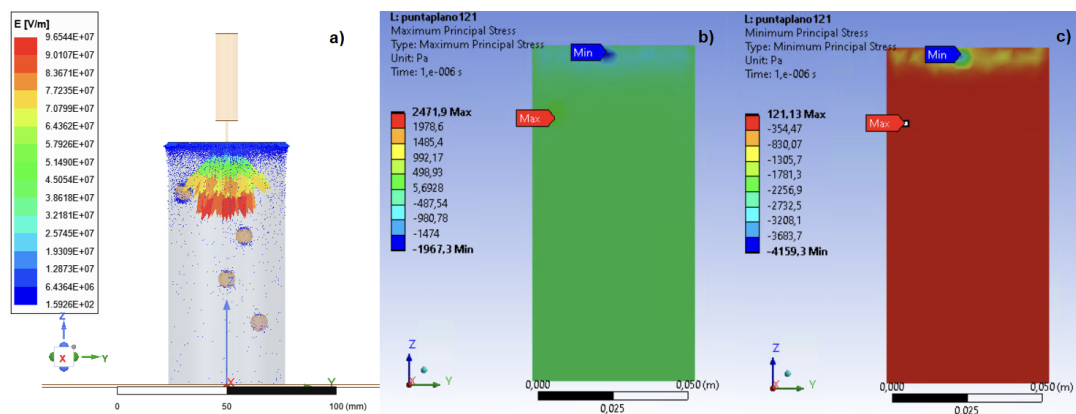


Figura 4.29: Configuración de electrodos punta1-plano a) Campo electromagnético b) Esfuerzos máximos principales c) Esfuerzos mínimos principales

Finalmente con el electrodo punta1-plano se tienen resultados cualitativamente similares a los de punta2-plano, siendo el impacto en los esfuerzos menor.

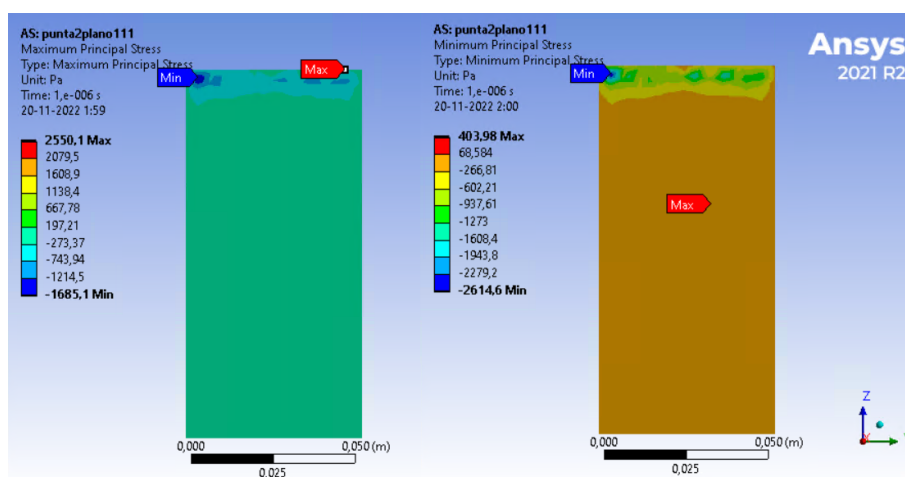
4.3.5. Sensibilidades

Dado que las permitividades de la andesita y calcopirita se obtuvieron desde otros estudios, para evaluar como afecta la variación de las permitividades relativas en los esfuerzos que se generan, se evalúan las sensibilidades en torno a la relación entre la permitividad relativa de la andesita ϵ_a y la permitividad relativa de calcopirita ϵ_c , considerando un $10\% \epsilon_a / \epsilon_c$ y un $200\% \epsilon_a / \epsilon_c$ para el caso punta2-plano a 220kV, distancia de electrodos 112mm y región de agua, dato que fue el caso donde se obtuvieron mayores esfuerzos.

Caso	Máximo esfuerzo principal Pa			Mínimo esfuerzo principal Pa		
	Mínimo	Máximo	Promedio	Mínimo	Máximo	Promedio
10 %	-1685,1	2550,1	-21,102	-2614,6	403,98	-31,814
200 %	-2673,4	11753	45,591	-5495,5	2788,4	13,329
Caso base	-1784.3	5001.70	-18.628	-3157.1	857.33	-31.382

Tabla 4.18: Esfuerzos principales para distintas razones de permitividades.

Se evidencia una disminución de los esfuerzos principales para el caso de 10 % de la razón de las permitividades pero un incremento del esfuerzo promedio con respecto al caso base, esto se debe a que la diferencia de permitividades entre el medio y la probeta aumentó. Para el caso de 200 % de la razón del caso base, se tiene un aumento de los esfuerzos, sin alcanzar el valor de falla. Algo relevante en este caso es que cambia el signo del esfuerzo promedio, esto se debe a que la permitividad relativa de la andesita, pasa a ser mayor que la del agua (como se analizó previamente con el aire y aceite), por lo que el campo máximo se da en la frontera entre el agua y la andesita y no en el interior de la probeta. Al existir mayor diferencia entre las permitividades de la calcopirita y la andesita se observa en las siguientes imágenes como se concentran los esfuerzos en los límites de la calcopirita para este caso, mientras que en el de 10 % los esfuerzos se dan en la parte superior de la probeta.

Figura 4.30: Esfuerzos principales máximos y mínimos para sensibilidad 10 % ε_R

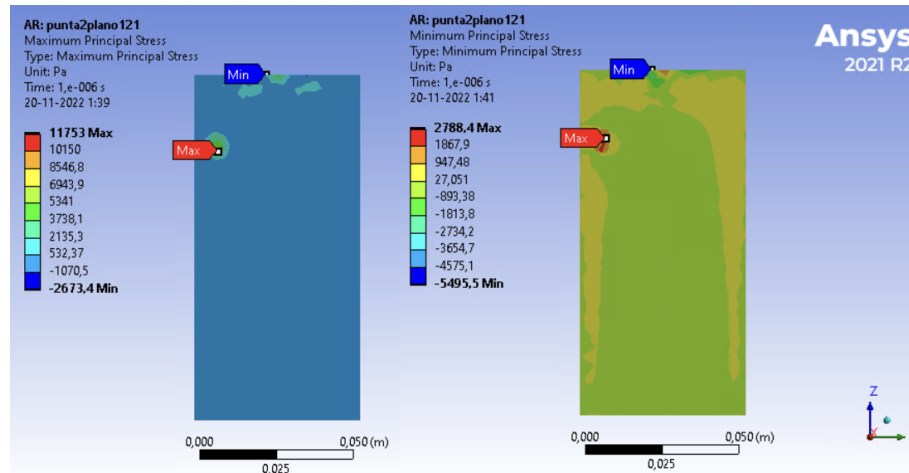


Figura 4.31: Esfuerzos principales máximos y mínimos para sensibilidad $200\% \varepsilon_R$

Capítulo 5

Conclusiones

En este trabajo se evaluó el efecto de la aplicación de impulsos eléctricos de alta tensión en muestras minerales mediante simulación numérica en la fragmentación de rocas. Se generaron distintas distribuciones de campo eléctrico bajo distintas condiciones de interés para conocer la influencia estos en los esfuerzos generados por las fuerzas electroestáticas.

En la literatura se encontraron distintas incursiones en la fragmentación de rocas mediante impulsos de alta tensión, haciendo un resumen de los avances que se han realizado respecto al pretratamiento de rocas en el estado del arte. En este se señala que la desintegración eléctrica logra producto más fino y mejor liberación de mineral que la conminución convencional. Sin embargo, el consumo de energía es 2-3 veces mayor que el de la conminución mecánica. Por esta razón, los estudios se direccionaron a pretratar el mineral a través de impulsos de alta tensión para debilitar las propiedades mecánicas de éste y hacer más eficiente la conminución.

En este contexto se han elaborado equipos a escala de laboratorio para estudiar los factores que afectan la fragmentación por impulsos de alta tensión, se han creado equipos tanto en Canadá, Suiza, Irán y China, siendo el equipo de Suiza llamado SELFRAG LAB el que registra mayor desarrollo. Se han realizado comparaciones entre el comportamiento de muestras pretratadas por impulsos de alta tensión y muestras sin pretratar, analizando las variaciones en su factor de suavidad, liberación de mineral y consumo de energía, dónde en [8] se predice un 24 % de ahorro en el proceso de conminución aguas abajo.

Los diversos estudios analizan las características de los minerales, el efecto de las propiedades eléctricas y mecánicas, la influencia de los parámetros del equipo y su influencia en la fragmentación. Además, se registra el desarrollo de una estación de prueba de predebilitamiento a escala piloto que utiliza impulsos de alta tensión. Sin embargo, aún quedan desafíos por resolver, entre ellos la aplicación industrial y la inclusión del pretratamiento en el circuito de conminución convencional.

En esta investigación se realizaron 74 simulaciones en el software Ansys para analizar los efectos de los impulsos, teniendo como resultado los esfuerzos generados en la probeta, sin lograr en ningún caso superar la resistencia a la tracción o compresión del material obtenidas mediante el escalamiento de Hoek-Brown. Sin embargo a partir de los resultados obtenidos se pueden detectar las tendencias de algunos factores que influyen en los niveles de esfuerzos.

Se identificó que todos los factores analizados son relevantes en el efecto del impulso

eléctrico de alta tensión en la probeta. El nivel de tensión influye en la energía del pulso y en la magnitud del campo eléctrico obtenido por lo que a mayor tensión se tienen mayores esfuerzos. Por otra parte, la influencia de la distancia de los electrodos también se hizo evidente en los resultados, siendo a menor espaciamiento de los electrodos, mayores esfuerzos en la probeta.

También se analizó el efecto del medio en el desempeño del impulso, siendo el agua el medio en el cual se generaron los mayores esfuerzos, indicando también que este medio eran mayores los esfuerzos de compresión y que los mayores valores de campo se obtenían en el interior de la probeta, caso contrario al agua y aceite donde el mayor campo eléctrico se da en la frontera, es decir la superficie de la probeta.

En cuanto a la configuración de electrodos, punta2-plano tuvo mayor efecto en los esfuerzos. Se analizaron las distribuciones de campo y esfuerzo para todas las configuraciones siendo ésta la de mejor desempeño.

Luego el análisis de sensibilidades muestra que los esfuerzos si dependen de las propiedades eléctricas del material, por lo que la precisión de estos es relevante en para los resultados.

En cuanto a las limitaciones de este trabajo, se consideró una aplicación de tensión constante para evaluar el campo eléctrico, representando esta la tensión peak del impulso. No se analizó el efecto de la variación de tensión en el tiempo y la duración del impulso se aplicó solo en el análisis transitorio estructural. Además se consideran solo intrusiones esféricas distribuidas de forma aleatoria y del mismo tamaño, no se consideran otras intrusiones de un mineral distinto a la calcopirita en la probeta, por lo que se sugiere un diseño más elaborado de ésta para trabajos futuros, además la probeta no posee burbujas ni porosidad, sabiendo que éstas se pueden traducir en una concentración de campo importante, se sugiere incluirlas para el diseño en el futuro. Por otra parte, la probeta no cambia su permitividad relativa dependiendo del medio, el análisis de sensibilidad muestra que es necesaria la precisión en este parámetro eléctrico.

Finalmente este trabajo no se logra la falla o fragmentación de la andesita para la liberación del mineral calcopirita mediante la ruptura electromecánica modelada en Ansys con las limitaciones antes mencionadas. Se tiene una magnitud de esfuerzos de hasta 1,46 % de la resistencia a la tracción, de modo que con ésta magnitud de esfuerzo tampoco fallaría por fatiga en las condiciones señaladas en [28]. Sin embargo, se logra evidenciar las tendencias de los esfuerzos ante la variación de los distintos factores antes expuestos. Como el mejor desempeño se obtuvo para un menor espaciamiento de electrodos, a mayor nivel de tensión con configuración de electrodo punta2-plano en un medio de agua, se sugiere profundizar esto en trabajos futuros analizando otros métodos de ruptura como por ejemplo la ruptura térmica, además de agregar variables como la cantidad de impulsos aplicados a la probeta y la incursión en un prototipo experimental que tenga como objetivo predebilitar la muestra y no la ruptura de ésta como se hizo en [13], para luego analizar las microfisuras y el debilitamiento de la roca para su posterior trituración mediante métodos convencionales.

Apéndice A

Anexo Marco Teórico

A.1. Campo Eléctrico

Se denomina intensidad de Campo Eléctrico a la sollicitación que afecta a cada volumen microscópico del material dieléctrico. Se mide en V/m y su símbolo es E . La sollicitación depende del voltaje aplicado y la geometría de los electrodos. Cada material se caracteriza por un valor límite de tolerancia a la sollicitación de campo, denominada Rigidez Dieléctrica E_D [30].

Para conocer la distribución del campo eléctrico $\vec{E}$, el potencial Φ en un punto juega un papel importante ya que el campo eléctrico se obtiene del gradiente del potencial.

$$\vec{E} = -\nabla\Phi \quad (\text{A.1})$$

La densidad de flujo eléctrico para un medio de permitividad ε se tiene con la relación

$$\vec{D} = \varepsilon\vec{E} \quad (\text{A.2})$$

La divergencia de la densidad de flujo resulta en la densidad de carga volumétrica

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho_v \quad (\text{A.3})$$

Luego el potencial en términos de la configuración de la carga se obtiene con la ecuación de Poisson:

$$\nabla^2\Phi = -\frac{\rho_v}{\varepsilon} \quad (\text{A.4})$$

Si en un medio no hay carga espacial, se le denomina ecuación de Laplace

$$\nabla^2\Phi = 0 \quad (\text{A.5})$$

Para determinar la distribución de potencial se usan distintos métodos, el programa Ansys Maxwell utiliza el método de elementos finitos.

A.2. Método de elementos finitos

Este método divide el dominio de solución en pequeñas regiones o elementos. Se puede desarrollar una solución aproximada para la ecuación diferencial parcial de cada uno de

estos elementos. La solución total se genera enlazando las soluciones individuales cumpliendo continuidad en las fronteras de estos. Así los valores de las incógnitas se generan continuamente en todo el dominio. Primero se divide el espacio en elementos finitos donde las líneas de los lados de los elementos se intersectan en nodos, luego se desarrollan ecuaciones para aproximar la solución en cada elemento. Las ecuaciones de cada elemento consisten generalmente en un conjunto de ecuaciones algebraicas lineales y se pueden expresar matricialmente de la forma:

$$[k]\{u\} = \{F\} \quad (\text{A.6})$$

Donde k contiene las propiedades del elemento, u es el vector de incógnitas de los nodos y F el vector de influencias externas. Luego las ecuaciones de cada elemento se ensamblan para caracterizar el sistema unificado determinado por continuidad y se acoplan de forma que los valores en los nodos sean equivalentes obteniendo:

$$[K]\{u'\} = \{F'\} \quad (\text{A.7})$$

Siendo K las propiedades de ensamblaje y los vectores prima, los mencionados anteriormente cumpliendo condiciones de continuidad. Finalmente se toman en cuenta las condiciones de frontera obteniendo

$$[\bar{K}]\{\bar{u}'\} = \{\bar{F}'\} \quad (\text{A.8})$$

Donde la barra indica los parámetros cumpliendo las condiciones de frontera[31]. El método de elementos finitos es útil para estimar campos eléctricos en electrodos muy curvos y delgados ya que puede discretizar el dominio en elementos lo cual es una ventaja al momento de aplicarlo a geometrías irregulares y condiciones de frontera más complejas.

A.3. Generador de impulso de alta tensión

Un impulso de tensión es una tensión unidireccional que sin oscilaciones apreciables, asciende rápidamente hasta su valor máximo y luego cae a cero. Si se desarrolla un impulso de tensión sin causar flash over se denomina impulso completo, si se produce flash over o punción esto causa un colapso repentino en la tensión de impulso, teniendo un impulso cortado, puede estar cortado en el frente o en la cola del impulso.

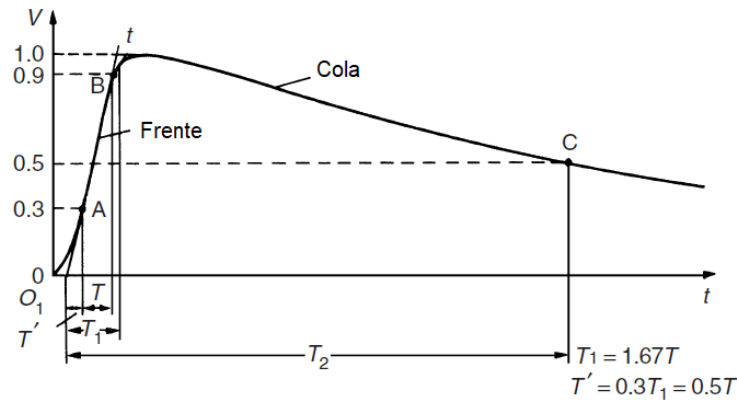


Figura A.1: Forma general y definiciones de un impulso de tensión.[17]

El impulso se caracteriza por su tensión máxima y sus dos intervalos de tiempo , el tiempo de frente T_1 y el tiempo de cola T_2 . Generalmente es difícil identificar los puntos de inicio y peak. Por eso se crea una línea entre el punto B donde se alcanza el 90 % del peak y el punto A con 30 % creando un origen virtual. El tiempo de frente se define como 1.67 veces el tiempo entre los instantes de 30 % y 90 % de la tensión peak y el tiempo de cola es el transcurrido entre el origen virtual y el 50 % del peak tras superar la cresta.

Un generador de impulsos está compuesto por un circuito de carga y uno de descarga separados por un espinterómetro. La carga del generador será un capacitor, esta carga contribuirá al almacenamiento de energía. Una segunda fuente de energía puede ser proveída por una inductancia o un capacitor adicional. Sin embargo para una descarga rápida el circuito consistirá esencialmente de dos capacitores.

A.3.1. Generador de una etapa

En la figura A.3 se muestran dos circuitos de generadores de impulso de una etapa. El capacitor C_1 se carga lentamente desde una fuente dc hasta que se genera la ruptura en el espinterómetro G que actúa como limitador de tensión. Las resistencias R_1 , R_2 y la capacitancia C_2 forman parte del circuito de descarga y definen la forma de la onda. R_1 amortiguará y controlará el tiempo de frente y R_2 descargará los capacitores y controlará el tiempo de cola. La capacitancia C_2 representa la carga.

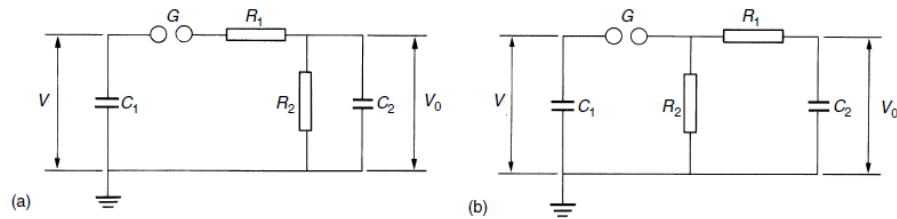


Figura A.2: Circuito Generador de una etapa (a) y (b). C_1 :condensador de impulso. C_2 :condensador de carga. R_1 :resistencia de frente. R_2 :resistencia de cola.[17]

Los dos circuitos son ampliamente utilizados y difieren solo en la posición de la resistencia de control del tiempo de cola R_2 . Cuando está al lado de la carga, las dos resistencias forman un divisor de tensión que reduce el voltaje de salida pero cuando está en el lado del generador(a) esta pérdida en la salida está ausente.

La forma de onda está compuesta por la superposición de dos funciones exponenciales, la exponente de frente y la exponente de cola.

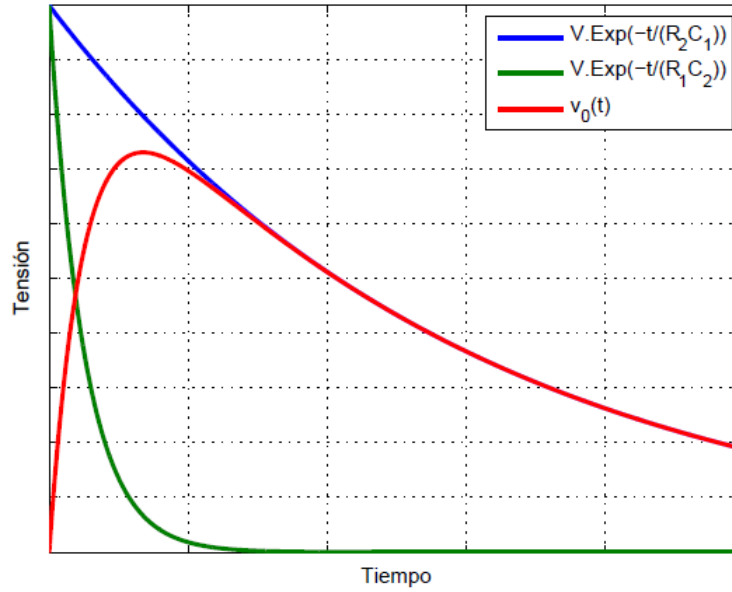


Figura A.3: Forma de onda del impulso.[30]

El rendimiento del circuito de impulso se define como:

$$\eta = \frac{\hat{V}_o}{V} = \frac{C_1}{C_1 + C_2} \quad (\text{A.9})$$

La energía total almacenada está dada por

$$W = \frac{1}{2}C_1V^2 \quad (\text{A.10})$$

A.3.2. Generador Multietapas

Los circuitos de una etapa están limitados a 200kV de tensión de carga, ya que el tamaño físico de los elementos del circuito se vuelven muy grandes y se requiere mayor voltaje de carga. Para impulsos de mayor tensión se emplea el modelo del generador multi-etapas diseñado por Marx A.5. En este arreglo un número de condensadores son cargados en paralelo a través de resistencias y luego descargados en serie por los espinterómetros de modo que la tensión de salida resulta ser la suma de las tensiones de carga de cada condensador.

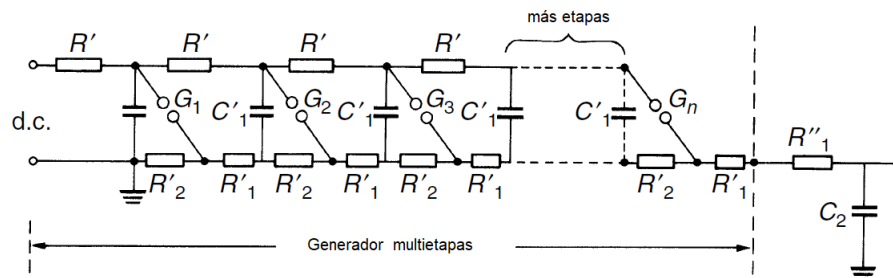


Figura A.4: Generador de impulso multietapas. R'_2 :resistencias de descarga. R'_1 :resistencias de frente internas. R''_1 :resistencia de frente externa. [17]

Para el generador de la figura A.5 se puede formular un circuito equivalente

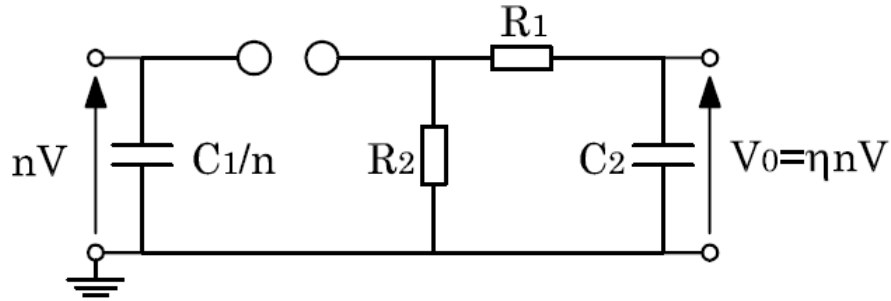


Figura A.5: Circuito equivalente del generador de impulsos. [30]

La tensión total de carga que acepta el generador es nV , con n el número de etapas y V la tensión de carga por etapa. La tensión de salida tiene una amplitud $\hat{V}_o < nV$. La capacidad nominal es la capacidad del impulso equivalente C_1/n , siendo C_1 la capacidad por etapas, normalmente oscila entre $100nF$ y $1\mu F$. La capacidad debe ser a lo menos cinco veces mayor que la capacidad de carga total, incluyendo la probeta sino el rendimiento se afecta considerablemente.

La energía total almacenada en los condensadores de impulso, cuando su tensión de carga es la nominal es

$$W_c = \frac{1}{2}nCV^2 \quad (A.11)$$

Bibliografía

- [1] Consejo Minero. “Minería en números”. En: *Santiago: Ograma* (2020).
- [2] Comisión Chilena del Cobre. “Proyección del consumo de energía eléctrica en la minería del cobre 2020-2031”. En: (2020).
- [3] Sefiu O Adewuyi, Hussin AM Ahmed y Haitham Ahmed. “Methods of ore pretreatment for comminution energy reduction”. En: *Minerals* 10.5 (2020), pág. 423.
- [4] Barry A Wills y James A Finch. *Wills’ mineral processing technology: an introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery*. Butterworth-Heinemann, 2015.
- [5] Aditya Somani, Tapas K Nandi, Samir K Pal y Arun K Majumder. “Pre-treatment of rocks prior to comminution—a critical review of present practices”. En: *International journal of mining science and technology* 27.2 (2017), págs. 339-348.
- [6] U Andres, I Timoshkin y M Soloviev. “Energy consumption and liberation of minerals in explosive electrical breakdown of ores”. En: *Mineral Processing and Extractive Metallurgy* 110.3 (2001), págs. 149-157.
- [7] Fengnian Shi, Emmy Manlapig y Weiran Zuo. “Progress and challenges in electrical comminution by high-voltage pulses”. En: *Chemical Engineering & Technology* 37.5 (2014), págs. 765-769.
- [8] Eric Wang, Fengnian Shi y Emmy Manlapig. “Pre-weakening of mineral ores by high voltage pulses”. En: *Minerals Engineering* 24.5 (2011), págs. 455-462.
- [9] Eric Wang, Fengnian Shi y Emmy Manlapig. “Factors affecting electrical comminution performance”. En: *Minerals Engineering* 34 (2012), págs. 48-54.
- [10] Klaas Peter van der Wielen, Richard Pascoe, Alex Weh, Frances Wall y Gavyn Rollinson. “The influence of equipment settings and rock properties on high voltage breakage”. En: *Minerals Engineering* 46 (2013), págs. 100-111.
- [11] Weiran Zuo, Fengnian Shi, Klaas Peter van der Wielen y Alexander Weh. “Ore particle breakage behaviour in a pilot scale high voltage pulse machine”. En: *Minerals Engineering* 84 (2015), págs. 64-73.
- [12] Seyed Mohammad Razavian, Bahram Rezai y Mehdi Irannajad. “Investigation on pre-weakening and crushing of phosphate ore using high voltage electric pulses”. En: *Advanced Powder Technology* 25.6 (2014), págs. 1672-1678.
- [13] Valles D. “Fractura de materiales sólidos por medio de la aplicación de impulsos de alta tensión”. Tesis de mtría. Valparaíso: Universidad Técnica Federico Santa María, 2018.

- [14] Peng Gao, Shuai Yuan, Yuexin Han, Yanjun Li y Hongyun Chen. “Experimental study on the effect of pretreatment with high-voltage electrical pulses on mineral liberation and separation of magnetite ore”. En: *Minerals* 7.9 (2017), pág. 153.
- [15] Yong-hong Qin, GAO Peng, YUAN Shuai, Ning-yu Zhang y Li-ren Han. “A novel technology of high-voltage pulse discharge for comminution of galena ore”. En: *Transactions of Nonferrous Metals Society of China* 31.8 (2021), págs. 2479-2492.
- [16] CL Wadhwa. *High voltage engineering*. New Age International, 2006.
- [17] John Kuffel y E Kuffel. *High voltage engineering fundamentals*. Elsevier, 2000.
- [18] Blanka Sperner, Raymond Jonckheere y Jörg A Pfänder. “Testing the influence of high-voltage mineral liberation on grain size, shape and yield, and on fission track and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating”. En: *Chemical Geology* 371 (2014), págs. 83-95.
- [19] Roberto Alberto Mireles Palomares. “Teorías de falla y sus aplicaciones”. Tesis doct. Universidad Autónoma de Nuevo León, 1992.
- [20] Evert Hoek. “Practical rock engineering”. En: *Internet reference: www.rocscience.com* (2000).
- [21] Evert Hoek y E Brown. “Estimación de la Resistencia de Macizos Rocosos en la Práctica”. En: *Primer Taller Geotécnico Interdivisional. Chuquicamata-Chile* (1997).
- [22] Michal Lovás, Milota Kováčová, Georgios Dimitrakakis, Silvia Čuvanová, Ingrid Znamenáčková y Štefan Jakabský. “Modeling of microwave heating of andesite and minerals”. En: *International Journal of Heat and Mass Transfer* 53.17-18 (2010), págs. 3387-3393.
- [23] NAM Amin, MT Ishak, MHA Hamid y MS Abd Rahman. “Partial discharge investigation on palm oil using needle—Plane electrode configuration and electric field distribution using ANSYS Maxwell”. En: *2017 International Conference on High Voltage Engineering and Power Systems (ICHVEPS)*. IEEE. 2017, págs. 440-445.
- [24] N Martínez, M Montoto y Ramón Coy Yll. “Evaluación de la fragmentación industrial de sulfuros polimetálicos mediante emisión acústica.” En: (1988).
- [25] Eial Salinas Riveros. “Análisis de propiedades geotécnicas de algunas rocas comunes en Chile”. Tesis doct. Universidad de Chile, 2018.
- [26] F Marambio, J Pereira y A Russo. “Caracterización De Las Propiedades Geotécnicas De Las Andesitas De La Mina, Yacimiento El Teniente, Chile Central”. En: *Proceedings of the IX Congreso Geológico Chileno*. Vol. 1. 2000, págs. 279-282.
- [27] Martínez C. “Efecto de impulsos de alta tensión en rocas utilizando simulación numérica.” Tesis de mtría. Santiago: Universidad Técnica Federico Santa María, 2022.
- [28] Gómez A. “Caracterización de rocas y análisis de su resistencia a fatiga por hendiimiento.” Tesis de mtría. Valdivia: Universidad Austral de Chile, 2014.
- [29] U Andres, J Jirestig e I Timoshkin. “Liberation of minerals by high-voltage electrical pulses”. En: *Powder Technology* 104.1 (1999), págs. 37-49.
- [30] Juan Luis Dinamarca. *Técnicas de Alta Tensión: Teoría y aplicaciones*. Valparaíso, 2007.

-
- [31] Steven C Chapra, Raymond P Canale, Reyna Susana García Ruiz, Víctor Hugo Ibarra Mercado, Enrique Muñoz Díaz y Guillermo Evangelista Benites. *Métodos numéricos para ingenieros*. Vol. 5. McGraw-Hill, 2011.