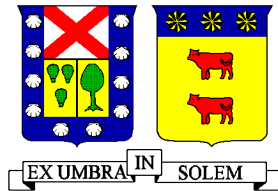


UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA METALURGICA

VALPARAISO – CHILE



EFFECTO DE IMPULSOS DE ALTA TENSIÓN EN ROCAS UTILIZANDO SIMULACIÓN NUMÉRICA

Memoria de titulación presentado por
CARLOS ENRIQUE MARTÍNEZ ORELLANA

Como requisito parcial para optar al título de
Ingeniero Civil de Minas

Profesor Guía:
Rodrigo Estay Huidobro

Profesor Co-guía:
Rodrigo Rozas Valderrama

Profesor Invitado:
Jorge Ipinza Abarca

Octubre 2022

Tabla de contenidos

1. Resumen	1
2. Introducción.....	2
3. Objetivos	4
4. Antecedentes.....	5
4.1. Esfuerzo, tensor de esfuerzo y deformación	5
4.1.1. Esfuerzo y tensor de esfuerzo.....	5
4.1.2. Deformaciones.....	6
4.1.3. Criterio de falla de Hoek & Brown.....	7
4.2. Campo eléctrico.....	8
4.3. Modelación de elemento finito (FEM)	9
4.4. Molienda por impulso de alta tensión.....	9
4.5. Caracterización de la roca.....	11
5. Metodología.....	13
5.1. Ambiente de simulación	13
5.2. Simulaciones	14
6. Resultados	15
6.1. Campo eléctrico.....	17
6.2. Esfuerzos.....	18
6.3. Análisis y discusiones.....	20
7. Conclusiones y recomendaciones	25
8. Bibliografía.....	27
A. Anexos.....	1
A.1. Hoek & Brown	1
A.2. Resultados generales.....	2
A.2.1. Campo eléctrico.....	2
A.2.2. Esfuerzos	7

Índice de Figuras

Figura 4-1: Diagrama conceptual del cubo infinitesimal de esfuerzos (Brady & Brown, 2004).	5
Figura 4-2: Diagrama de posibles escenarios para el campo eléctrico (Valles Herrera, 2018).	8
Figura 4-3: Diagrama de métodos de fracturamiento mediante impulso de alta tensión (Sperner et al., 2014).	10
Figura 4-4: Diagramas de voltajes de rotura vs tiempo de generación del pulso en distintos medios. (a) Generación de impulsos en diferentes medios y a qué tipo de fracturamiento corresponderán. (b) Generación de impulsos en algunos tipos de rocas y agua (Sperner et al., 2014).	10
Figura 4-5: Roca Muestrario Laboratorio ICMIN de UTFSM, (a) Andesita de Textura Porfídica, (b) Muestra N°1 Mayor Cristalización del Mineral acompañado de una matriz cuarcífera, y (c) Muestra N°2 Matriz de Andesita con Textura Afanítica, Calcopirita Oxidada por Aire y Presencia de Vetillas.	11
Figura 5-1: Vista isométrica ambiente de simulación (Izq.): ambiente general, (Der.): acercamiento a la probeta de probeta con todas las intrusiones analizadas.	13
Figura 6-1: Vista isométrica del campo eléctrico considerando todas las intrusiones, vista vectorial. Impulso de 100[KV](a), 150[KV](b) y 1.000[KV](c).	17
Figura 6-3: Vista isométrica del campo eléctrico considerando todas las intrusiones, vista iso-superficies de magnitud. Impulso de 100[KV] (a), 150[KV] (b) y 1.000[KV] (c).	18
Figura 6-4: Vista isométrica con corte de sección de la magnitud del esfuerzo principal máximo y un impulso de (a) 100 [KV], (b) 150 [KV] y (c) 1000 [KV], considerando todas las intrusiones.	19
Figura 6-5: Acercamiento a las intrusiones. Los vectores corresponden al (izq) esfuerzo principal máximo y (der) esfuerzo principal menor, con un impulso de 150 [KV], considerando todas las intrusiones.	19
Figura 6-6: Gráfica comparativa para esfuerzo principal máximo ($\text{Max } \sigma_1$).	20
Figura 6-7: Gráfica comparativa para esfuerzo principal mínimo ($\text{Max } \sigma_3$).	21
Figura 6-8: Vista en planta del máximo esfuerzo S_1 , considerando intrusiones tipo esferas con un impulso de 150 [KV].	21
Figura 6-9: Vista isométrica con cortes con máximo esfuerzo S_1 , considerando intrusiones tipo esferas con un impulso de 150 [KV].	22
Figura A-1(Izq.): Carta de valores GSI. (Der.) Carta de valores de daño por tronadura (D). Fuente: Hoek (2006).	1
Figura A-3: Campo eléctrico caso solo vetilla con impulso de 100 [KV] - (a): Vista vectorial (b): Vista iso-superficies.	2
Figura A-4: Campo eléctrico caso solo vetilla con impulso de 150 [KV] - (a): Vista vectorial (b): Vista iso-superficies.	2
Figura A-5: Campo eléctrico caso 4 esferas con impulso de 100 [KV] - (a): Vista vectorial (b): Vista iso-superficies.	3
Figura A-6: Campo eléctrico caso 4 esferas con impulso de 150 [KV] - (a): Vista vectorial (b): Vista iso-superficies.	3
Figura A-7: Campo eléctrico caso solo esferas con impulso de 100 [KV] - (a): Vista vectorial (b): Vista iso-superficies	4

Figura A-8: Campo eléctrico caso solo esferas con impulso de 150 [KV] - (a): Vista vectorial (b): Vista iso-superficies.	4
Figura A-9: Campo eléctrico caso todas las intrusiones con impulso de 100 [KV] - (a): Vista vectorial (b): Vista iso-superficies.	5
Figura A-10: Campo eléctrico caso todas las intrusiones con impulso de 150 [KV] - (a): Vista vectorial (b): Vista iso-superficies.	5
Figura A-11: Campo eléctrico caso todas las intrusiones con impulso de 1000 [KV] - (a): Vista vectorial (b): Vista iso-superficies.	6
Figura A-12: Vista isométrica con corte de sección de la magnitud del esfuerzo principal máximo σ_1 y un impulso de (a) 100 [KV], (b) 150 [KV].	7
Figura A-13: Vista isométrica con corte de sección de la magnitud del esfuerzo principal máximo σ_1 y un impulso de (a) 100 [KV] y (b) 150 [KV], considerando 4 esferas.	7
Figura A-14: Vista isométrica con corte de sección de la magnitud del esfuerzo principal máximo σ_1 y un impulso de (a) 100 [KV] y (b) 150 [KV], considerando solo esferas.	8
Figura A-15: Vista isométrica con corte de sección de la magnitud del esfuerzo principal máximo σ_1 y un impulso de (a) 100 [KV] y (b) 150 [KV], considerando todas las intrusiones.	8
Figura A-16: Vista isométrica con corte de sección de la magnitud del esfuerzo principal máximo σ_3 y un impulso de (a) 150 [KV] y (b) 150 [KV], considerando solo vetilla.	9
Figura A-17: Vista isométrica con corte de sección de la magnitud del esfuerzo principal máximo σ_3 y un impulso de (a) 150 [KV] y (b) 150 [KV], considerando solo 4 esferas.	9
Figura A-18: Vista isométrica con corte de sección de la magnitud del esfuerzo principal máximo σ_3 y un impulso de (a) 150 [KV] y (b) 150 [KV], considerando solo esferas.	10
Figura A-19: Vista isométrica con corte de sección de la magnitud del esfuerzo principal máximo σ_3 y un impulso de (a) 150 [KV] y (b) 150 [KV], considerando todas las intrusiones.	10

Índice de Tablas

Tabla 4.1: Recopilación de parámetros mecánicos de Rocas (Eial Salinas Riveros, 2018; Marambio et al., 2000, Martinez et al., 1988; Hoek, 2006).	11
Tabla 4.2: Recopilación de parámetros eléctricos de rocas (Avendaño Cortés, 2017, Martinez et al., 1988).	12
Tabla 5.1: Descripción de volúmenes y ley de cobre de los casos de estudio.	14
Tabla 6.1: Recopilación de resultados obtenidos de las simulaciones.	15
Tabla 6.2: Resultados escalamiento a macizo rocoso.	15

1. Resumen

El presente trabajo presenta la simulación de una probeta de andesita con diferente cantidad y distribución de intrusiones de calcopirita, se simulan los esfuerzos generados al ser estimulada por un impulso electromagnético de alto voltaje, esto se realizó a través del software ANSYS de ESSS, en un ambiente 3D.

La metodología utilizada contempla el acoplamiento del módulo eléctrico Maxwell, usado para la generación del impulso, obteniendo las fuerzas generadas al interior de la probeta, y el módulo estructural de transición, para determinar las deformaciones y esfuerzos. La descripción de los materiales considero parámetros físicos (densidad), eléctricos (resistencia eléctrica y permitividad relativa) y mecánicos (módulo de Young y Poisson). Para efectos de la simulación se consideraron simplificaciones para el modelo: las intrusiones fueron tratadas como esferas, se omite la interacción del impulso con el medio y no se consideró la duración del impulso eléctrico. Se estudió el instante peak tanto para los valores de campo eléctrico como de esfuerzos.

El análisis contempló la caracterización cualitativa de la distribución de los esfuerzos en la probeta, así como la evaluación de esta técnica para generar el fallamiento del material. Al comparar los resultados obtenidos con mecanismos de fallamiento por fatiga, la magnitud relativa de los esfuerzos, respecto a la resistencia a la tracción según el escalamiento macizo de roca del criterio de Hooke & Brown, resultó en un 53.15%. Este valor es cercano a lo indicado por otros autores (valores del orden de 60-80%). Esto indicaría que la metodología propuesta en la simulación es potencialmente un mecanismo de debilitamiento o incluso falla a través este fenómeno.

Los resultados de este trabajo dan pie a una serie de trabajos posteriores enfocados en la mejora, calibración y validación del modelo creado, mediante la utilización de resultados experimentales de comparación y verificando el efecto en los resultados de las diferentes simplificaciones. Específicamente se detecta el potencial de aplicar esta técnica experimentalmente como método de fractura a través de fatiga o bien como un pretratamiento para la reducción de las capacidades resistentes del material y permitir mejoras en el consumo energético de los procesos mineros de conminución.

2. Introducción

En el marco de la ingeniería 4.0, las herramientas informáticas de modelación computacional han tomado gran presencia e importancia en proyectos de investigación y de diseño. Dentro de las herramientas de modelación existen diferentes métodos, con sus respectivas ventajas, desventajas y limitaciones, siendo la modelación de elementos finitos (Finite Elements Model – FEM) escogida para la modelación del fenómeno estudiado.

Los procesos de conminución, a escala de planta de procesamiento de minerales, se realizan mediante la aplicación de una carga compresiva al material, con magnitud tal de generar el fracturamiento y la reducción de tamaño. Usualmente para los procesos de chancado se utilizan chancadores de cono invertido con eje descentrado, para molienda se utilizan molinos con bolas de acero que fragmentan el material tras ser izadas por las paletas al interior del molino e impactar el material en la parte inferior.

Los equipamientos necesarios para realizar los procesos descritos tienen un alto consumo energético (50KWh/t conminución convencional - Andres et al. (2001)). Considerando la tendencia a nivel mundial por la reducción del consumo de energía, desde un punto de vista ambiental y pensando en el negocio, se genera la búsqueda de mejoras al proceso. Estas pueden ser radicales, con un proceso diferente a lo utilizado actualmente, o complementarias, con tecnologías que faciliten el trabajo del proceso actual.

Dicho lo anterior, el presente estudio muestra los resultados de la simulación de un impulso electromagnético de alto voltaje y el análisis de los esfuerzos en una probeta de roca con diferentes concentraciones y distribución de material conductor (en este caso matriz de andesita con intrusiones de calcopirita). La aplicación del impulso electromagnético generará en la roca una concentración de campo eléctrico alrededor del material conductor, por acción del campo eléctrico surge la fuerza eléctrica, descrita por el fenómeno de electrostricción, y por consiguiente se generan esfuerzos a ser analizados en este estudio.

La electrostricción corresponde al fenómeno de generación de fuerzas debido a las altas corrientes eléctricas. Las solicitudes muy elevadas de campo eléctrico a un material dan origen a fuerzas electroestáticas en la sección de la probeta, es decir, presión o esfuerzo. La presión eléctrica se expresa por la siguiente ecuación:

$$\frac{F}{A} = \frac{1}{A} \int E dq = \epsilon_0 \epsilon_r \int \frac{V}{d^2} dv = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{E^2}{2} \quad (1)$$

En donde:

- F : Fuerza generada.
- A : Área transversal.
- E : Magnitud de campo eléctrico.
- dq : Diferencial de carga eléctrica.
- ϵ_0 : Permitividad eléctrica del vacío.
- ϵ_r : Permitividad eléctrica relativa del material al vacío.
- V : Voltaje.
- d : Distancia.

dv : Diferencial de voltaje.

Para el estudio de este fenómeno el modelo planteado analiza la incidencia en los esfuerzos respecto a la variación de la magnitud del impulso electromagnético, así como la cantidad y distribución de las intrusiones en la probeta, comprobando cualitativamente el fenómeno de electrostricción, así como la concentración del campo eléctrico y los esfuerzos en la matriz entre intrusiones.

Finalmente, al ser un modelo de simulación computacional, da la posibilidad de incorporar análisis estocásticos para las distintas variables, permitiendo una mejor caracterización del fenómeno y por ende la construcción de un modelo con mayor confiabilidad a la hora de describir el fenómeno.

3. Objetivos

El presente trabajo mostrará los estudios realizados en la simulación de la interacción de un impulso electromagnético de alto voltaje con una probeta de roca típica en la geología de la Cordillera de Los Andes. Esto se realiza con el fin de analizar los esfuerzos inducidos en la probeta ante distintos impulsos.

Por consiguiente, el objetivo general de este trabajo es analizar la interacción entre un impulso electromagnético de alto voltaje y una probeta de roca utilizando modelación computacional.

Los objetivos específicos son:

- Modelar computacionalmente la interacción impulso-sólido para el estudio de los esfuerzos generados en una probeta de roca, considerando diferentes cantidades, distribuciones y formas de material conductor.
- Con los resultados de la modelación estudiar el comportamiento del campo eléctrico en la probeta y la relación de la magnitud de este con los esfuerzos resultantes.
- A partir de los resultados de la modelación computacional, estudiar los esfuerzos generados a partir del impulso electromagnético con la resistencia a la fractura y mecanismos de falla por fatiga.

4. Antecedentes

En esta sección se presentan las bases del trabajo realizado, presentado los lineamientos para los análisis. Se abarcan los conceptos de esfuerzos, deformaciones, criterios de falla, campo eléctrico, electrostricción, modelamiento finito y caracterización de los materiales.

4.1. Esfuerzo, tensor de esfuerzo y deformación

Ahora se presentarán los conceptos de esfuerzo, el tensor de esfuerzo en un sólido y las deformaciones en consecuencia a la aplicación de estos, según lo presentado por Brady & Brown (2004).

4.1.1. Esfuerzo y tensor de esfuerzo

El concepto de esfuerzo corresponderá a la cantidad de fuerza aplicada por unidad de área, esta tendrá unidades de presión, en el sistema internacional en Pascales y es denominado por la letra griega sigma (σ).

$$\sigma = \frac{\text{fuerza}}{\text{Área}} \quad (2)$$

Al considerar este fenómeno en una disposición espacial y realizando una discretización del sólido o cuerpo de estudio se llega a un cubo infinitesimal de área unitaria donde actuaran estos esfuerzos, este contara con esfuerzos normales en las caras y esfuerzos paralelos a esta, estos últimos corresponden a esfuerzos de corte. En la Figura 4-1 se presenta el proceso de discretización de una partícula sólida, descrito anteriormente.

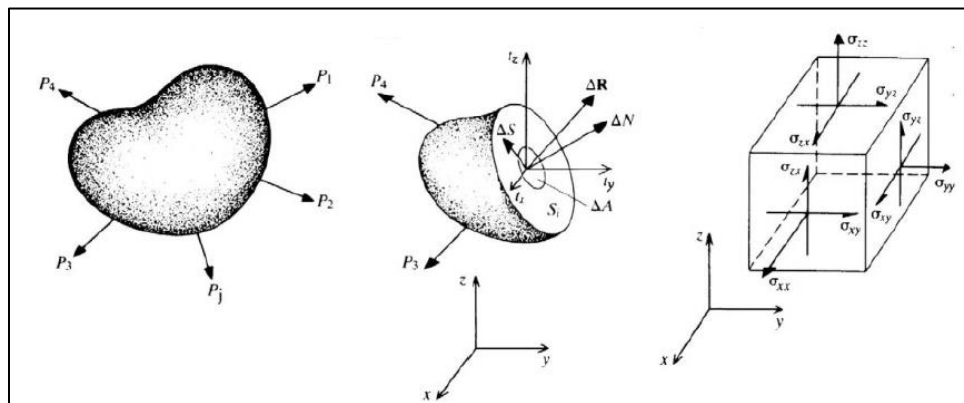


Figura 4-1: Diagrama conceptual del cubo infinitesimal de esfuerzos (Brady & Brown, 2004).

Dichos esfuerzos varían en magnitud dependiendo del sistema de referencia utilizado, existirá una orientación específica en donde las magnitudes de los esfuerzos normales se maximicen, a costa de la reducción de los esfuerzos cortantes, esta orientación corresponderá al sistema de los esfuerzos principales y se denominarán sigma 1, 2 y 3, de mayor a menor magnitud respectivamente. A continuación, se presenta el tensor de esfuerzo como notación matricial y el procedimiento para la rotación de estos en uno de los ejes.

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Notar que, para cumplir una condición de estabilidad dinámica, es decir, el cuerpo este estático, el tensor de esfuerzo debe ser simétrico respecto a la diagonal. Para la rotación del sistema de referencia se utiliza la siguiente ecuación:

$$[\sigma^*] = [R][\sigma][R^*]^T \quad (4)$$

En donde R corresponde al rotor en θ grados, en sentido antihorario y esta descrito según:

$$[R] = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) & 0 \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

4.1.2. Deformaciones

Para establecer la relación entre los esfuerzos y las deformaciones se aplican los teoremas de modelos elásticos, estos son la ley de Hooke y coeficiente de Poisson.

La ley de Hooke describe la deformación de los materiales al someterse a esfuerzos, siendo proporcional a ellos. Además, cada material cuenta con una constante que representa el esfuerzo necesario para lograr una unidad de deformación (Modulo de Young). Esta relación se describe según la siguiente ecuación:

$$\sigma = E_Y * \varepsilon \quad (6)$$

En donde:

σ : Esfuerzo.

E_Y : Modulo de Young, esfuerzo por unidad de deformación.

ε : Deformación, diferencia dimensión sobre dimensión original.

Por otro lado, el coeficiente de Poisson describe la relación entre la deformación en transversal generada a partir de una deformación axial, según:

$$\nu = \frac{\varepsilon_{Transversal}}{\varepsilon_{Axial}} \quad (7)$$

Ya establecido lo anterior, se puede establecer el tensor de deformaciones respectivo para el cubo infinitesimal descrito en la sección anterior, obteniendo las expresiones para la deformación axial a los esfuerzos (ε) y las deformaciones de corte (γ).

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{bmatrix} = \frac{1}{E} \begin{bmatrix} 1 & -\nu & -\nu & 0 & 0 & 0 \\ -\nu & 1 & -\nu & 0 & 0 & 0 \\ -\nu & -\nu & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2(1+\nu) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2(1+\nu) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2(1+\nu) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \sigma_{xy} \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} \end{bmatrix} \quad (8)$$

4.1.3. Criterio de falla de Hoek & Brown

El criterio de falla de Hoek & Brown determina la estabilidad de una condición de esfuerzos, además de este criterio hay de muchos autores con diferentes consideraciones, en particular este utiliza la condición de esfuerzo máximo de un estado tensional, en conjunto a una serie parámetros característicos de cada roca para determinar la estabilidad o no del sistema. El criterio generalizado de falla sigue la siguiente ecuación:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_c \left(m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_c} + S \right)^{a'} \quad (9)$$

En donde σ_c : es la resistencia a la compresión simple de la roca; σ_1 : es el esfuerzo principal máximo; σ_3 : es el esfuerzo principal mínimo; m_b, S, a' : son parámetros característicos de cada estado de la roca. En caso de no contar con los parámetros de la roca, estos se pueden determinar a partir de los valores de roca intacta, según las siguientes relaciones conocidas como su escalamiento a macizo rocoso.

$$m_b = m_i * \exp\left(\frac{GSI - 100}{24 - 14D}\right) \quad (10)$$

$$S = \exp\left(\frac{GSI - 100}{9 - 3D}\right) \quad (11)$$

$$a' = \frac{1}{2} - \frac{1}{6} \left(\exp\left(-\frac{GSI}{15}\right) - \exp\left(-\frac{20}{3}\right) \right) \quad (12)$$

$$\sigma_c = \sigma_{ci} * S^{a'} \quad (13)$$

$$\sigma_t = -\frac{S * \sigma_{ci}}{m_b} \quad (14)$$

En ecuaciones anteriores, m_i : corresponde a una constante característica de la roca; σ_{ci} : corresponde a la resistencia de la roca intacta a la compresión simple, el GSI y D son valores tabulados según las condiciones de la roca, estos se encontrar en la sección Anexos (sección A.1).

4.2. Campo eléctrico

La intensidad del campo eléctrico depende del voltaje aplicado, la geometría de los electrodos y la separación de estos. Cada material tiene un valor límite de campo eléctrico, este se denomina “rigidez dieléctrica” E_D . De este modo el campo eléctrico se puede determinar con:

$$E = f \frac{V}{d} \quad (15)$$

En donde

E: intensidad del campo eléctrico

V: Voltaje de ruptura

d: distancia entre electrodos

f: factor de forma de electrodos

La situación que se espera simular es en donde el campo atraviesa todo el material de manera transversal, sin embargo, esta puede ser de forma transversal o longitudinal, como se muestra en el siguiente diagrama:

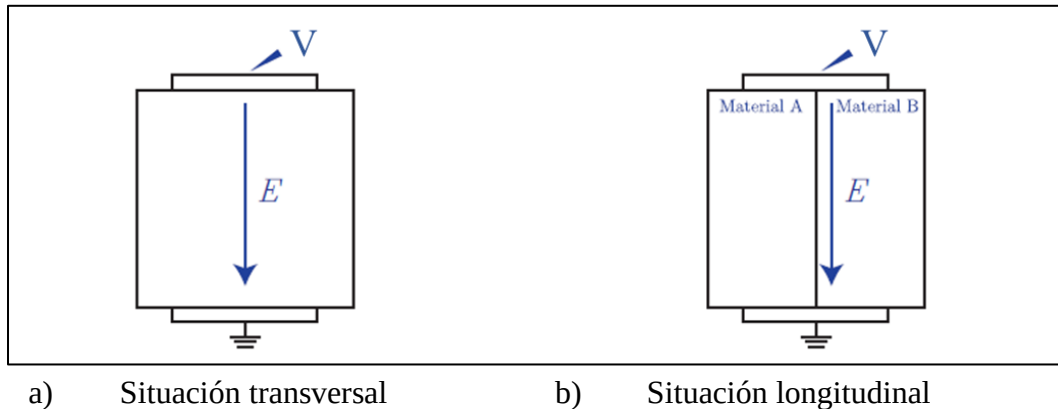


Figura 4-2: Diagrama de posibles escenarios para el campo eléctrico (Valles Herrera, 2018).

Para el caso de estudio estuvieron presentes ambas situaciones, (a) en los casos de flujo a través de la interfaz del material y (b) al enfrentarse a las intrusiones.

4.3. Modelación de elemento finito (FEM)

El modelamiento numérico se realizó mediante el software ANSYS ®, en particular mediante los módulos eléctricos (Maxwell) y análisis estructural.

Este método de análisis permite la resolución de ecuaciones diferenciales complejas a través de aproximaciones numéricas, junto a un mallado que determina las dimensiones de los elementos de estudio. Este último definirá el grado de detalle en los resultados del modelo y la calidad de estos.

De acuerdo con el libro “Finite Element Procedures”, (Bathe, 2019), se describe el uso del análisis de elementos finitos como, (Inglés):

“The finite element method is used to solve physical problems in engineering analysis and design. The physical problem typically involves an actual structure or structural component subjected to certain loads. The idealization of the physical problem to a mathematical model requires certain assumptions that together lead to differential equations governing the mathematical model. The finite element analysis solves this mathematical model. Since the finite element solution technique is a numerical procedure it is necessary to assess the solution accuracy. If the accuracy criteria are not met, then numerical (i.e., finite element) solution has to be repeated with refined solution parameters (such as finer meshes) until a sufficient accuracy is reached.

It is clear that the finite element solution will solve only the selected mathematical model and that all assumptions in this model will be reflected in the predicted response. We cannot expect any more information in the prediction of physical phenomena than the information contained in the mathematical model. Hence the choice of an appropriate mathematical model is crucial and completely determines the insight into the actual physical problem that we can obtain by the analysis”.

En este caso se optó por la simulación tridimensional, a pesar de los mayores requerimientos computacionales esta permite generar de mejor manera el comportamiento dentro del material de estudio.

4.4. Molienda por impulso de alta tensión

La tecnología de la molienda por impulsos de alto voltaje se remonta a los años 1990's, en donde se realizaron diversas investigaciones, en universidades de Londres y Alemania, con la intención de aplicar esta tecnologías en la industria de minerales (Van Der Wielen et al., 2013).

El método consiste en la aplicación de un impulso de alto voltaje a la roca para producir la liberación de los minerales de interés, esto se logra mediante la onda de alta presión generada por el plasma de la corriente, existen dos métodos de aplicación, electrohidráulico y eléctrico (Figura 4-3).

La diferencia entre ambos métodos es el tipo de esfuerzo inducido en la roca. El método electrohidráulico contempla que el impulso viaje a través de un medio, por lo que la onda de presión avanzará a través de este hasta impactar la roca. Este fenómeno aplicaría esfuerzos compresivos a la roca. Por otro lado, el método de fragmentación eléctrica contempla que el impulso y la corriente viajen a través de la roca, donde la onda de presión avanzara desde el interior a la superficie, aplicando esfuerzos de tracción a la roca.

La onda de alta presión, responsable de generar la fractura de la roca en ambos casos, se produce por el flujo de corrientes de alto voltaje, alcanzando un estado de plasma con temperaturas entre 10000 y 30000 °K¹.

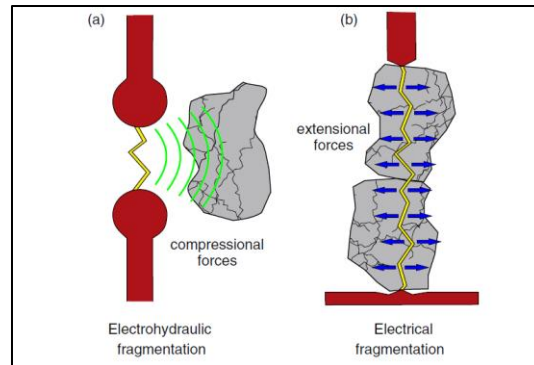


Figura 4-3: Diagrama de métodos de fracturamiento mediante impulso de alta tensión (Sperner et al., 2014).

El factor crucial para determinar el recorrido del impulso de alto voltaje es el tiempo de carga del impulso, es decir cuánto se demora en generar la diferencia de potencial eléctrico necesario para producir el impulso en el material. Esta situación se puede apreciar en la Figura 4-4. En la Figura 4-4 (a), se desprende que para aplicar la técnica de fracturamiento eléctrico, este debe realizarse bajo agua para asegurar el paso del impulso de alto voltaje en la roca. En la Figura 4-4.(b), se aprecian los voltajes de quiebre para diferentes formaciones de rocas, como cuarcitas, andesitas, mármol y esquistos.

De la simulación se omite la interacción con el medio, esto con el fin de asegurar el flujo del pulso por el interior de la probeta. Por lo anterior, la duración del impulso no será considerado para el presente estudio, evaluando el momento peak del impulso para todos los análisis.

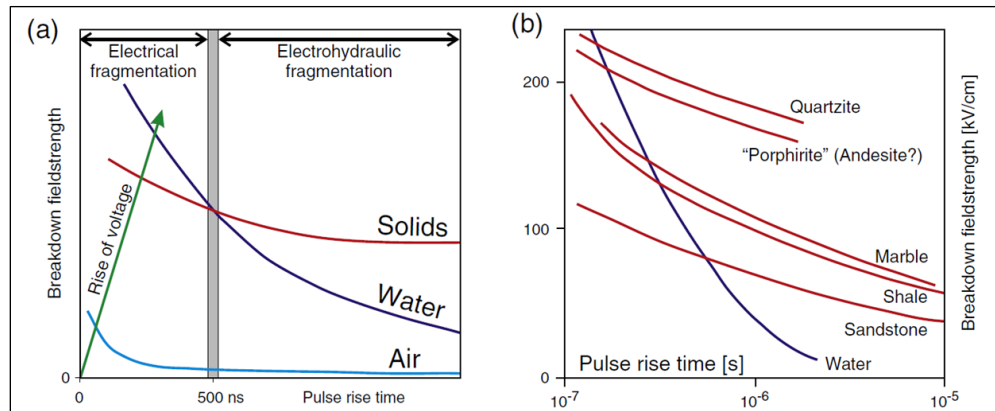


Figura 4-4: Diagramas de voltajes de rotura vs tiempo de generación del pulso en distintos medios. (a) Generación de impulsos en diferentes medios y a qué tipo de fracturamiento corresponderán. (b) Generación de impulsos en algunos tipos de rocas y agua (Sperner et al., 2014).

¹ Temperatura alcanzada por un rayo de generación atmosférica en aire (Falcon, 2017).

4.5. Caracterización de la roca

La *Andesita* es una roca de color gris medio, de grano fino y de origen volcánico. Su nombre procede de los Andes de América del Sur, donde numerosos volcanes están formados por este tipo de roca. Además de los volcanes de los Andes, muchas de las estructuras volcánicas que rodean el océano Pacífico son de composición andesítica. La andesita muestra frecuentemente una textura porfídica (Tarbuck & Lutgens, 2005).

La *Calcopirita* corresponde al grupo mineral de sulfuros de cobre, es un mineral de principalmente hidrotermal asociado a vetas hidrotermales y depósitos del tipo pórfidos cupríferos, de color dorado, dentro de su composición química el 34.6% de su masa corresponde a cobre. Dentro del mercado de la minería es una mena importante debido a su composición y la efectividad de los procesos extractivos existentes.



Figura 4-5: Roca Muestrario Laboratorio ICMIN de UTFSM, (a) Andesita de Textura Porfídica, (b) Muestra N°1 Mayor Cristalización del Mineral acompañado de una matriz cuarcífera, y (c) Muestra N°2 Matriz de Andesita con Textura Afánítica, Calcopirita Oxidada por Aire y Presencia de Vetillas.

Los parámetros mecánicos de la andesita determinarán sus condiciones de elasticidad, y comportamiento ante la simulación, por ende, son claves para obtener un correcto desempeño de ella. Dicho esto, los parámetros mecánicos para la andesita se detallan a continuación:

Tabla 4.1: Recopilación de parámetros mecánicos de Rocas (Eial Salinas Riveros, 2018; Marambio et al., 2000, Martinez et al., 1988; Hoek, 2006).

Propiedad	Valores		Unidad
	Andesita	Calcopirita	
Densidad	2.75	4.2 – 4.3	gr/cm ³
Módulo de Young (E)	50 – 70	140-330	GPa
Resistencia a la compresión simple roca intacta (UCS)	120 – 140	200 - 460	MPa

Resistencia a la tracción roca intacta	5 – 20	27-31	MPa
Coeficiente de Poisson	0.11 – 0.6	0.4	-
Módulo de corte (G)	25 – 33	117	GPa
Constante m_i	25 ± 5	25 ± 5	-

Adicionalmente a estos parámetros para el escalamiento a un macizo rocoso de los parámetros resistivos de roca intacta se considera un valor de GSI y D de 65 y 0.3, respectivamente.

Por último, las características eléctricas y térmicas para la andesita y calcopirita son las que se presentan en la tabla 4.2

Tabla 4.2: Recopilación de parámetros eléctricos de rocas (Avendaño Cortés, 2017, Martínez et al., 1988).

Propiedad	Valores		Unidad
	Andesita	Calcopirita	
Resistencia eléctrica	100-200	0.013	$\Omega \cdot m$
Permitividad relativa	11	81	-

5. Metodología

En esta sección se describe el procedimiento utilizado para el desarrollo de este trabajo, donde se referirá a la creación del material y ambiente donde se realizarán las simulaciones, la realización misma de estas y el trabajo de los datos obtenidos.

5.1. Ambiente de simulación

El ambiente de simulación será construido dentro de ANSYS, en donde en primer lugar se agregaron los materiales de estudio a la biblioteca con todas las propiedades detalladas en la sección 4.5, luego para el análisis se consideró un modelamiento 3D del sistema.

La disposición general del sistema se presenta en la Figura 5-1(Izq.). Consiste en una probeta cilíndrica del material de estudio, en este caso corresponde a una matriz de andesita con intrusiones de calcopirita, y dos electrodos encargados de la generación del campo eléctrico en la probeta, además, estos electrodos corresponderán a los puntos fijos del sistema, simulando la situación en laboratorio

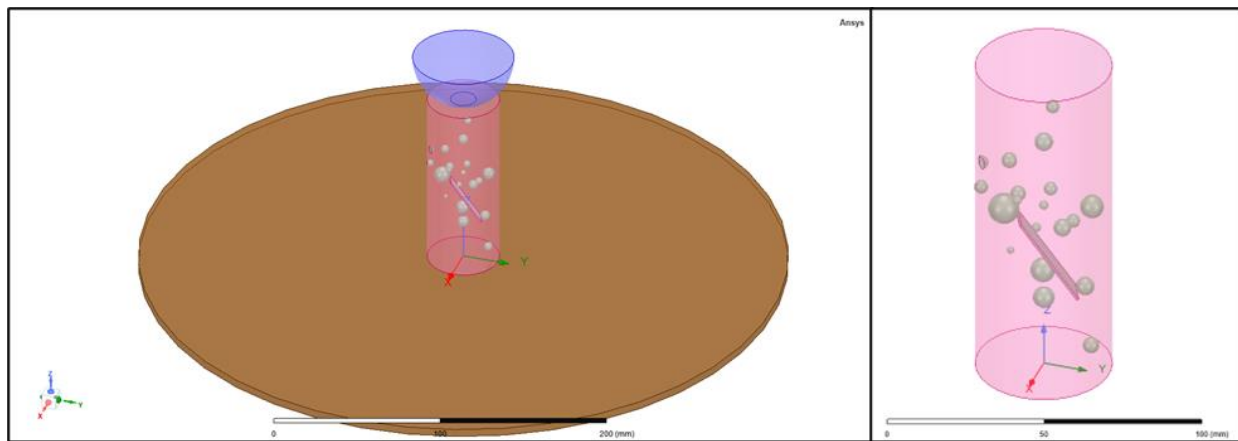


Figura 5-1: Vista isométrica ambiente de simulación (Izq.): ambiente general, (Der.): acercamiento a la probeta de probeta con todas las intrusiones analizadas.

Dentro de las consideraciones en la disposición general del sistema, en el ambiente de simulación se omite la interacción con el medio, esto con la finalidad de simular el comportamiento directo entre el impulso electromagnético de alto voltaje y la probeta de material.

Las dimensiones generales de la probeta buscan ser lo más cercanas a los estándares de ensayos de la mecánica de rocas y las mediciones de parámetros para este trabajo, con una razón de longitud: diámetro de 2:1, con una longitud de 112 [mm] y diámetro de 54.2 [mm].

La geometría para las intrusiones de calcopirita consiste mayormente en esferas con radio entre 1-4 [mm]. Dentro de la probeta se disponen 19 esferas, obteniéndose una ley de cobre de aproximadamente 0.4 %. Además de las esferas, para el estudio planteado en el documento se consideró una intrusión planar, tipo vetilla, de calcopirita para analizar los efectos de este tipo de estructura, consiste en un

paralelepípedo de espesor 0.75[mm] con su cara mayor no paralela ni perpendicular a las caras de la probeta como se puede apreciar en la Figura 5-1.

Por último, como se observó en la ecuación (1) la magnitud de los esfuerzos generados por el campo eléctrico será proporcional a la intensidad del campo eléctrico, por lo que la selección de la geometría de electrodos es en base al trabajo realizado por Cynthia Vargas (trabajo de memoria en desarrollo del Departamento de Ingeniería Eléctrica, 2022).

Las intrusiones de calcopirita en la probeta varían para la generación de distintos casos de estudio, se analizaron 4 casos de intrusiones, todas las intrusiones de la Figura 5-1, 4 esferas, solo esferas y solo la vetilla. Las leyes de cobre de los casos mencionados anteriormente se presentan en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1: Descripción de volúmenes y ley de cobre de los casos de estudio.

Caso	Volumen [cm ³]		Ley de Cu [%]
	Calcopirita	Andesita	
Solo vetilla	0.44	257.49	0.09%
4 esferas	0.75	257.19	0.16%
Solo esferas	2.01	255.92	0.43%
Todas las intrusiones	2.45	255.48	0.52%

5.2. Simulaciones

Una vez finalizado el ambiente de simulación, se procede a la incorporación del impulso y las posteriores simulaciones. En primera instancia se debe revisar de manera cualitativa el comportamiento de la simulación, esto es, verificar que el campo vectorial dentro de la probeta se vea concentrado en las intrusiones de calcopirita, siendo un material más conductor que la matriz de esta.

Una vez validado el comportamiento del impulso en la probeta, se procederá con las simulaciones de los diferentes casos de intrusiones para un impulso de 100 y 150 [KV].

Para el análisis de los resultados de la simulación, se revisarán secciones de la probeta en donde se aprecie el comportamiento de los esfuerzos en las cercanías de las intrusiones y puntos de interés. Para ello, en cada caso se presentarán el diagrama de los esfuerzos principales, esfuerzos principales máximos y mínimos en la probeta y de ser necesario alguna vista en detalle a la intrusión.

En base a lo anterior se comparan los valores de los esfuerzos obtenidos en las simulaciones con datos bibliográficos de ensayos de fatiga para rocas. Para ello se procede a ajustar los parámetros de roca intacta mediante el criterio de falla de Hoek & Brown. En particular su escalamiento a macizo rocoso descrito entre las ecuaciones (10) a (14). Con este procedimiento se procederá al análisis de los resultados obtenidos de las simulaciones.

6. Resultados

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de las simulaciones, en particular se exponen los resultados correspondientes a la simulación de todas las intrusiones para impulsos de 100 y 150 [KV]. Adicionalmente se presentará el mismo caso, con un impulso de 1000 [KV]. La totalidad de los resultados obtenidos se observan en la Tabla 6.1, los resultados específicos excluidos de esta sección se presentan en la sección 0 de Anexos.

Se debe aclarar que los valores presentados a lo largo de este documento se encuentran en el sistema de referencia de diseños estructurales y no en la orientación típica de estudios de roca, esto significa que los valores negativos corresponden a esfuerzos compresivos y en consecuencia los valores positivos corresponderán a esfuerzos de tracción (celdas destacadas).

Tabla 6.1: Recopilación de resultados obtenidos de las simulaciones.

Caso	Voltaje Impulso [KV]	Campo Eléctrico [MV/m]	Esfuerzos [KPa]					
			Min σ_1	Max σ_1	Promedio σ_1	Min σ_3	Max σ_3	Promedio σ_3
Todas	100	1.58 a 23.66	-0.30	1.49	0.03	-1.47	0.28	-0.01
	150	2.36 a 35.48	-19.97	182.25	0.46	-225.07	35.64	-0.44
	1000	15.77 a 236.59	-658.09	444.27	5.52	-714.61	131.08	-7.54
4 esferas	100	1.97 a 14.80	-0.24	1.07	0.03	-0.71	0.30	-0.02
	150	1.48 a 22.20	-0.53	2.43	0.06	-1.60	0.69	-0.04
Solo esferas	100	1.14 a 17.13	-1.03	-4.29	0.03	-3.39	0.66	-0.01
	150	1.71 a 25.70	-2.26	9.79	7.83	-7.58	1.54	-0.04
Solo vetilla	100	1.11 a 16.66	-0.40	1.12	0.03	-0.84	0.36	-0.02
	150	1.95 a 29.20	-0.60	3.01	5.94	-1.80	0.58	-0.04

Con el fin de comparar los resultados obtenidos con literatura técnica se realizó el escalamiento de los parámetros de roca intacta al macizo rocoso para la matriz de andesita, considerando los parámetros especificados en la sección 4.5, los resultados del escalamiento a macizo rocoso se presentan en la Tabla 6.2.

Tabla 6.2: Resultados escalamiento a macizo rocoso.

Parámetro	Valor	Unidad
m_b	7.163	-
S	0.0205	-
a	0.502	-
σ_c	44.319	MPa
σ_t	342.9	KPa

Para terminar con la sección de resultados, si realizamos un cociente entre la magnitud de los esfuerzos presentados en la Tabla 6.1 y las resistencias de falla correspondientes (Tabla 6.2) se obtienen los resultados presentados en la Tabla 6.3.

Tabla 6.3: Comparación de esfuerzos con resistencia a la falla respectiva.

Caso	Voltaje Impulso [KV]	Esfuerzos [KPa]					
		Min σ_1	Max σ_1	Promedio σ_1	Min σ_3	Max σ_3	Promedio σ_3
Todas	100	0,001%	0,435%	0,009%	0,003%	0,080%	0,000%
	150	0,045%	53,150%	0,133%	0,508%	10,394%	0,001%
	1000	1,485%	129,563%	1,610%	1,612%	38,227%	0,017%
4 esferas	100	0,0005%	0,313%	0,008%	0,002%	0,089%	0,00004%
	150	0,0012%	0,708%	0,017%	0,004%	0,200%	0,00009%
Solo esferas	100	0,0023%	1,250%	0,010%	0,008%	0,194%	0,00003%
	150	0,0051%	2,856%	2,284%	0,017%	0,449%	0,00009%
Solo vetilla	100	0,0009%	0,327%	0,008%	0,002%	0,105%	0,00004%
	150	0,0014%	0,878%	1,732%	0,004%	0,168%	0,00010%

6.1. Campo eléctrico

Ahora se presentarán los resultados de campo eléctrico específicos de las simulaciones considerando todas las intrusiones al verse enfrentados a impulsos eléctricos de 100, 150 y 1000 [KV], como vistas en sección relevante, vista vectorial de la distribución en la probeta e iso-superficies para ver las zonas de concentración de esta magnitud en la probeta.

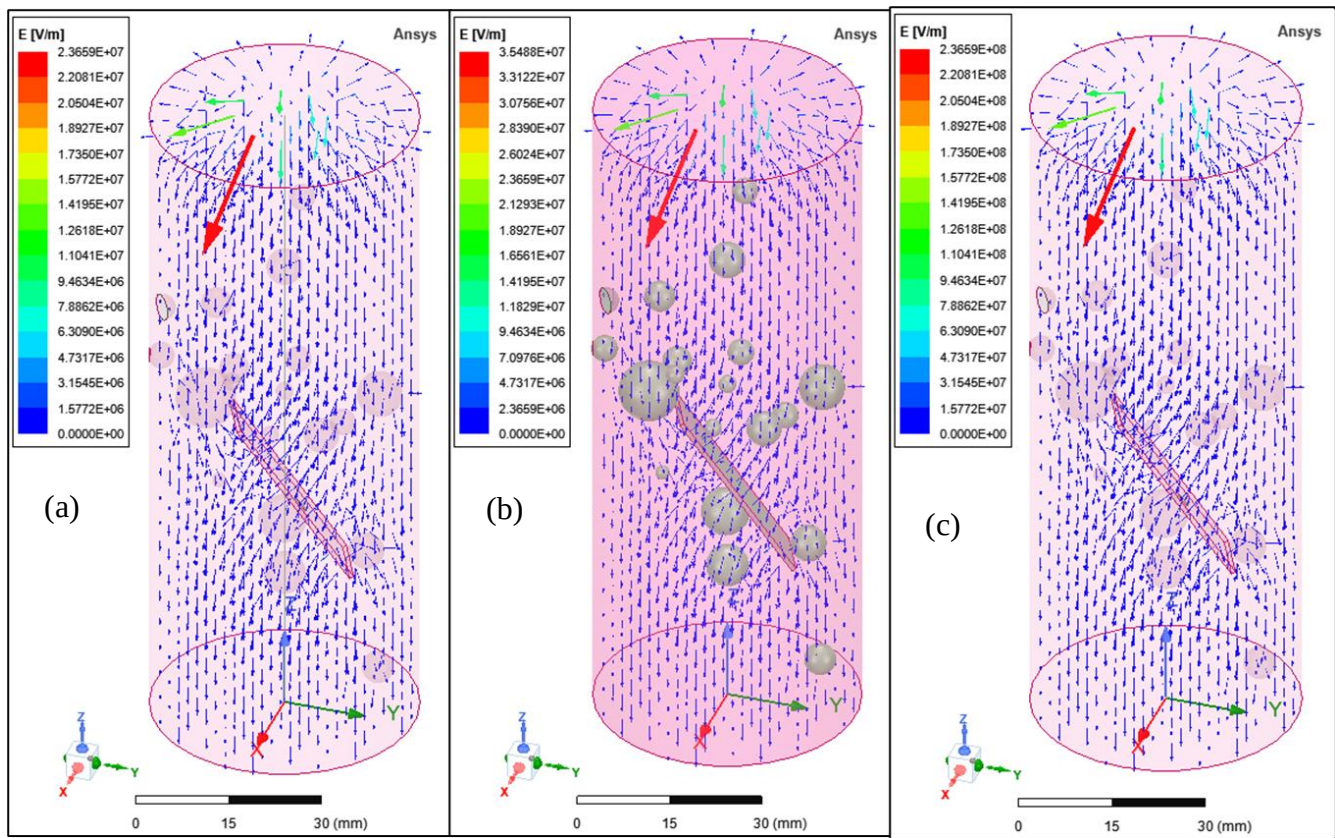


Figura 6-1: Vista isométrica del campo eléctrico considerando todas las intrusiones, vista vectorial. Impulso de 100[KV](a), 150[KV](b) y 1.000[KV](c).

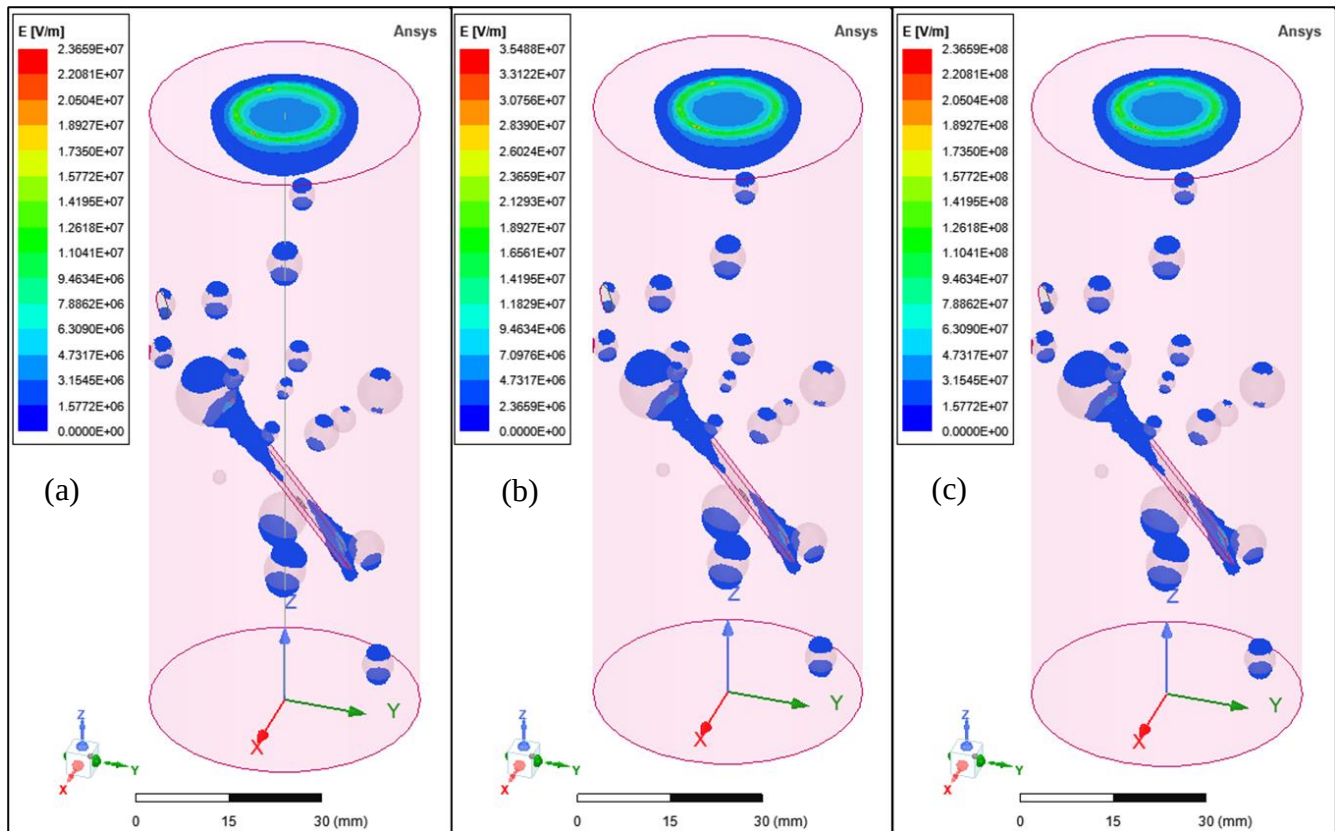
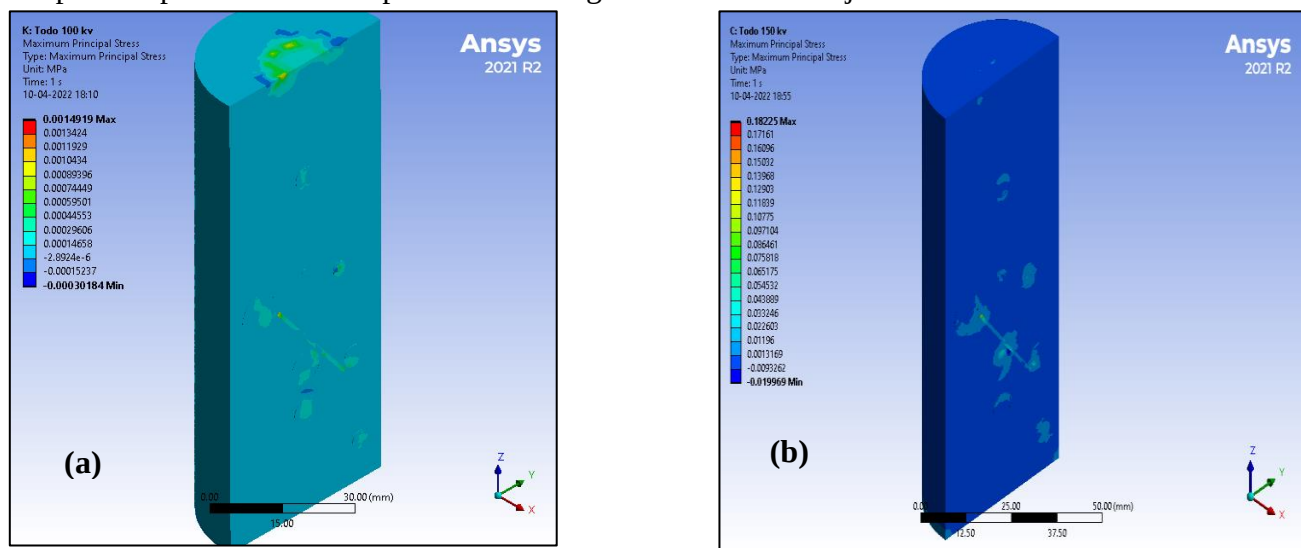


Figura 6-2: Vista isométrica del campo eléctrico considerando todas las intrusiones, vista iso-superficies de magnitud. Impulso de 100[KV] (a), 150[KV] (b) y 1.000[KV] (c).

6.2. Esfuerzos

En el caso de los esfuerzos, dentro de los resultados de la simulación nos interesan las vistas en sección y campo vectorial del sistema de esfuerzo máximo, para el posterior análisis del estado tensional de la probeta por acción del impulso electromagnético de alto voltaje.



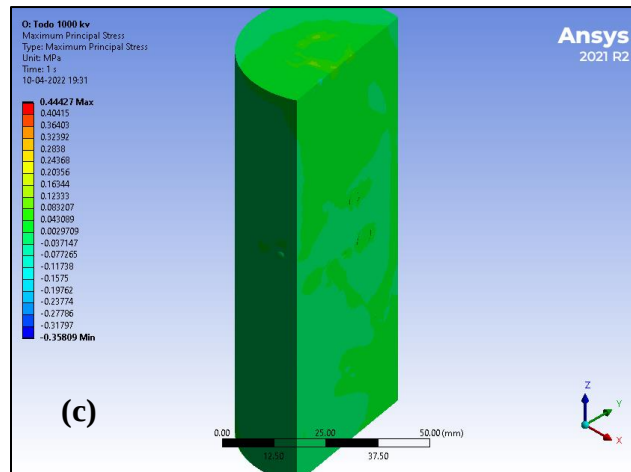


Figura 6-3: Vista isométrica con corte de sección de la magnitud del esfuerzo principal máximo y un impulso de (a) 100 [KV], (b) 150 [KV] y (c) 1000 [KV], considerando todas las intrusiones.

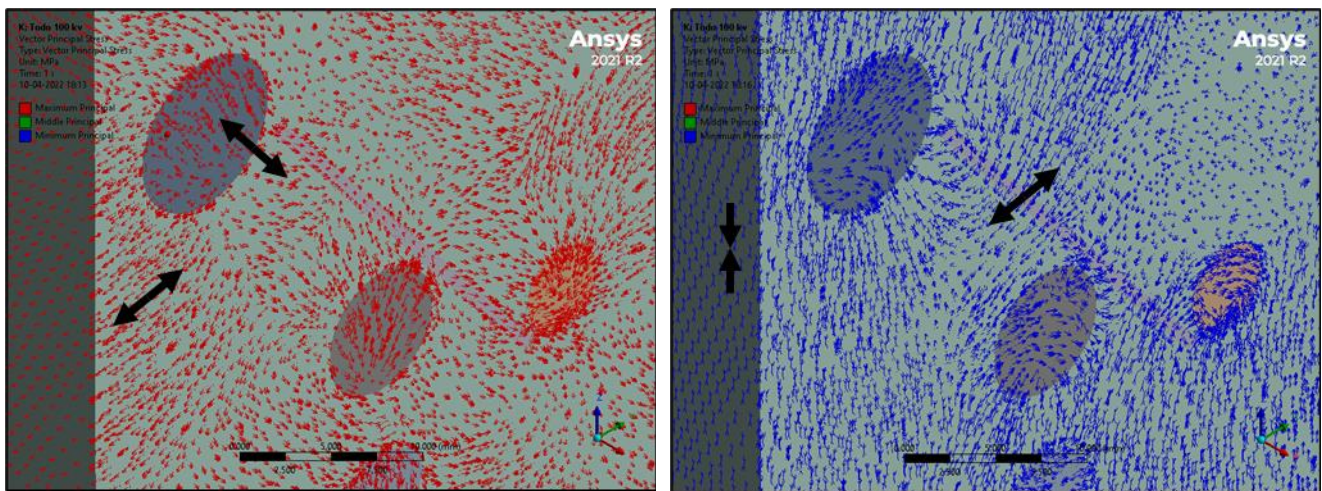


Figura 6-4: Acercamiento a las intrusiones. Los vectores corresponden al (izq) esfuerzo principal máximo y (der) esfuerzo principal menor, con un impulso de 150 [KV], considerando todas las intrusiones.

6.3. Análisis y discusiones

En esta sección se presenta el análisis de los resultados obtenidos y se discutirán las debilidades y fortalezas de estos, identificando las oportunidades de mejora para el ambiente de simulación modelado.

En primer lugar, se analiza el efecto de las principales variables consideradas en las simulaciones. Estos son: (1) el cumplimiento cualitativo del principio fundamental de la fuerza generada en la probeta (ecuación (1)), la cual describe que la magnitud de la fuerza será proporcional a la magnitud del campo eléctrico y (2) la cantidad de material conductor en la muestra y la incidencia sobre los esfuerzos generados en la probeta.

Con respecto al primer punto, se observa que los esfuerzos aumentan con el aumento de la magnitud del campo eléctrico. Esta situación se cumple en todos los casos simulados. El esfuerzo principal máximo aumenta con el voltaje del impulso aplicado, como se observa en la Figura 6-6. Los valores específicos se encuentran en la Tabla 6.1.

Con respecto al segundo punto, se aprecia una tendencia clara entre el contenido de material conductor, ley de cobre, y la magnitud de los esfuerzos generados, en donde los esfuerzos van en aumento con la ley de cobre para todos los casos simulados. Esto puede ser observado en la Figura 6-5 y la Figura 6-6.

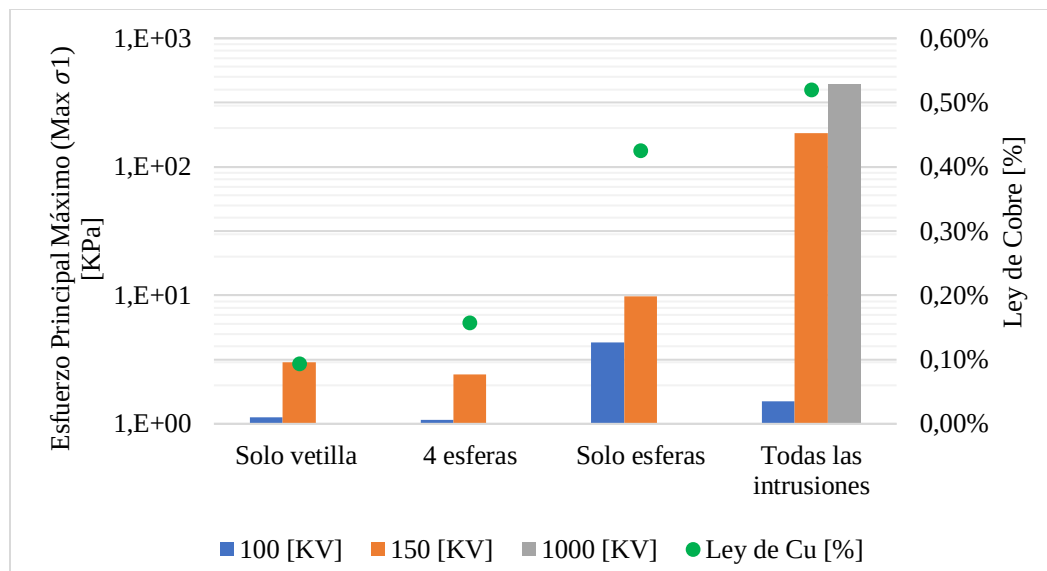


Figura 6-5: Gráfica comparativa para esfuerzo principal máximo ($Max \sigma_1$).

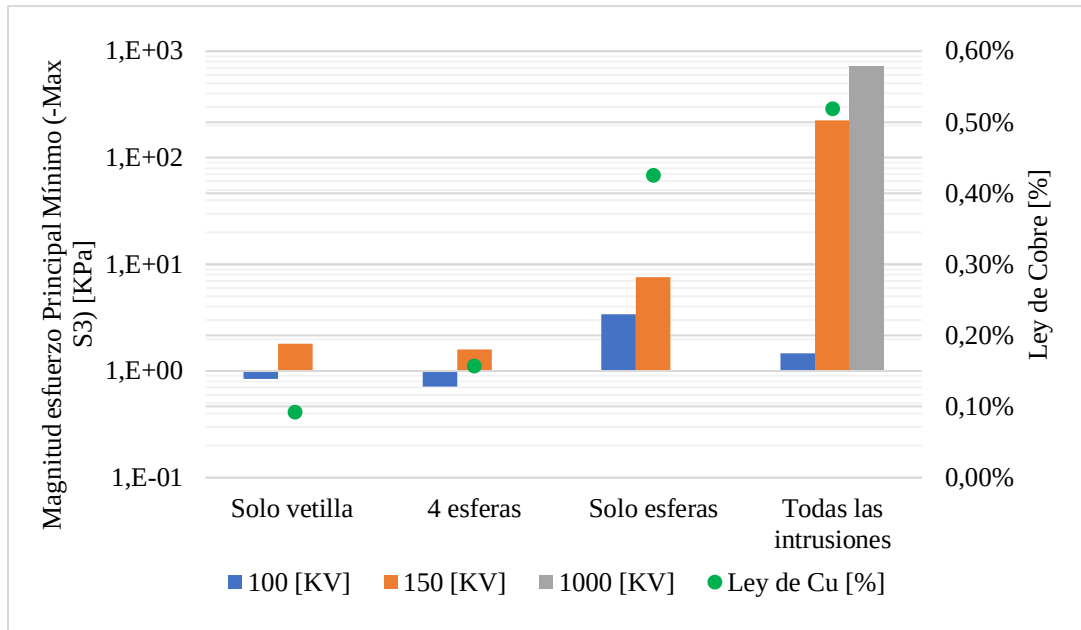


Figura 6-6: Gráfica comparativa para esfuerzo principal mínimo ($\text{Max } \sigma_3$).

Otro punto que revisar es la incidencia de la distribución espacial de las intrusiones. Al tratarse de un material conductor estas favorecerán el transporte de las cargas eléctricas y actuarán como concentradores del campo eléctrico. El análisis se apoyará en secciones trasversales de la probeta donde se identifiquen concentraciones de los esfuerzos generados. En la Figura 6-7 se presenta el caso de la simulación solo esferas con un impulso de 150 [KV], destacando la ubicación del máximo global del esfuerzo principal máximo (σ_1).

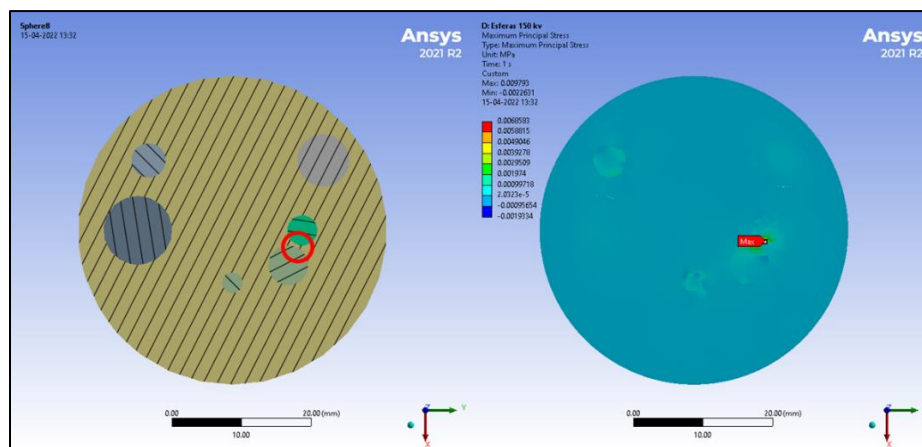


Figura 6-7: Vista en planta del máximo esfuerzo S_1 , considerando intrusiones tipo esferas con un impulso de 150 [KV].

El punto descrito en el párrafo anterior corresponde a un sector intermedio de la probeta (ver Figura 6-8), por lo que se descartan efectos de la cercanía del electrodo u condiciones límites del modelo (ver Figura 6-8). Esto es consecuente a lo expresado en la sección 4.4 de los antecedentes, en donde se menciona que la tendencia del impulso es viajar a través de la interfaz de los materiales, en este caso entre la matriz de andesita y las intrusiones de calcopirita, produciendo la concentración de esfuerzos en el material entre dichas intrusiones.

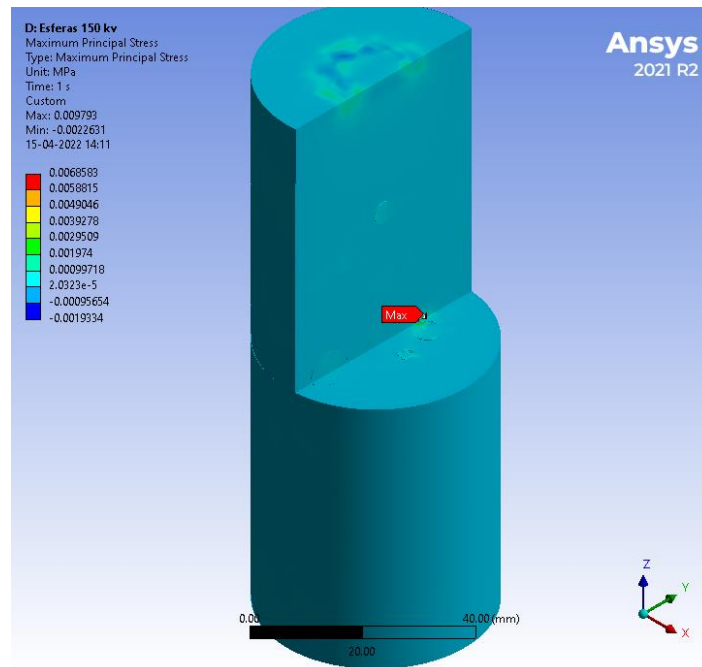


Figura 6-8: Vista isométrica con cortes con máximo esfuerzo S_1 , considerando intrusiones tipo esferas con un impulso de 150 [KV].

Además de la evidencia mencionada en el párrafo anterior, se aprecia la dependencia de los esfuerzos de la magnitud del campo eléctrico, si bien esto se ha mencionado a lo largo de esta sección, ahora se verá en detalle la incidencia directa de estos en relación con los esfuerzos.

En primer lugar, al revisar los resultados se identifican dos zonas de concentración del campo eléctrico (ver Figura 6-2): la parte superior de la probeta en las cercanías del punto de contacto del electrodo y una segunda zona en las cercanías de las intrusiones. El primer caso se explica por la geometría del electrodo, teniendo un punto de contacto de menor superficie que la probeta se produce una concentración del campo eléctrico en la interfaz electrodo-probeta, por lo que la zona de mayor magnitud en la probeta se le asocia a la redistribución del campo eléctrico en la sección transversal de la probeta.

Respecto a la segunda zona de concentración del campo eléctrico, se identifican dos tipos. En primer lugar, en los extremos superior e inferior de las intrusiones, donde se produce un efecto similar a la zona identificada en el párrafo anterior. En este caso la concentración del campo eléctrico se debe a un efecto de cuello de botella, donde la corriente preferirá el camino de menor resistencia. Las intrusiones de

calcopirita actúan como conductores a lo largo de la probeta, por esta razón se ve una concentración del campo eléctrico longitudinal y no transversal (respecto al eje de la probeta).

Por el contrario, la segunda zona de concentración se presenta en el espacio de matriz entre intrusiones y tiende a generar una geometría con una tendencia transversal. Esta se produce por el mismo fenómeno que en el caso descrito en el párrafo anterior, donde la corriente y por consiguiente el campo eléctrico tomará el camino de menor resistencia o menor consumo de energía, en este caso, hacia la intrusión más cercana.

Considerando la magnitud de los esfuerzos generados a partir del impulso electromagnético de alto voltaje, y al comparárselos con la resistencia a la tensión escalada de los materiales utilizados en este trabajo, es claro que esta magnitud de impulsos no genera esfuerzos suficientes para producir la fragmentación directamente.

Al revisar el estudio realizado por Gomez (2014), quien en su trabajo comenta que teniéndose una magnitud de los esfuerzos entre un 60% y 80% de la resistencia a la tracción (σ_t), se puede alcanzar el fallamiento de la probeta por fatiga, esto fue determinado a través de ensayos de tracción indirecta (o ensayo Brasileño), en una cantidad de ciclos del orden de $10^{3.4}$ (2500 ciclos).

En el trabajo realizado por Erarslan & Williams (2012), quienes analizaron el mecanismo de daño por fatiga y su relación con la resistencia de la roca, obtuvieron una resistencia por fatiga un 46% menor respecto a la resistencia estática del material, es decir, la resistencia de la roca por fatiga se encuentra en el orden del 54%, valor cercano a lo presentado en el párrafo anterior y desarrollado por Gomez (2014).

No será considerada para el análisis de la magnitud de los esfuerzos generados en la simulación de todas las intrusiones con un impulso de 1000 [KV], debido a las dificultades técnicas para la generación de un impulso con un voltaje de esa magnitud, es decir, la alta complejidad para ser realizado tanto en laboratorio como en un ambiente de procesamiento de minerales.

Al analizar las simulaciones restantes se identifica un esfuerzo máximo de 182.25 [KPa], el que corresponde al 53.15% de la resistencia a la tracción de la andesita (ver Tabla 6.3), con el escalamiento correspondiente de los parámetros de roca intacta a macizo rocoso. Este resultado podría indicar un alto potencial de generar el fracturamiento a través de fatiga, puesto que los resultados son un poco menores al umbral presentado por Gomez (2014).

Como análisis de los resultados y la aplicabilidad de estos a los procesos de molienda convencionales, se analizan los resultados presentados por Andres et al. (2001), donde compara la molienda por impulso con la molienda convencional para minerales de platino. En su trabajo compara los consumos energéticos de ambos procesos, siendo mayor el consumo en la molienda por impulso eléctrico, con la ventaja de lograr concentrados de mayor ley.

Se debe aclarar que el mecanismo de fracturamiento utilizado en su trabajo corresponde al arco de plasma generado por el impulso eléctrico y no a los esfuerzos asociados al campo eléctrico. Además, dicho impulso tiene como finalidad el fracturamiento de la roca.

Por lo anterior, se considera que, para efectos comparativos de sus resultados con el presente estudio, se acepta como posible mejora a los procesos mineros:

- Mejoramiento de las leyes de cobre de los concentrados, lo que permite una reducción de las masas asociadas a escoria y el consumo energético asociado a la fundición.
- Una reducción en los tiempos de molienda convencional al utilizarse como pretratamiento, permitiendo la reducción del consumo energético por parte de los molinos aumentar la tasa de molienda de los equipos.

7. Conclusiones y recomendaciones

A modo de síntesis, en el presente trabajo se logra la simulación de los esfuerzos en una probeta de roca asociados a su estimulación a través de un impulso electromagnético de alto voltaje.

En particular se ve una dependencia de la cantidad de material conductor en la probeta con respecto a la magnitud de los esfuerzos obtenidos al interior de esta, donde los esfuerzos generados con un impulso de igual magnitud aumentarían en función de la cantidad de material conductor, en este caso particular, el aumento de la ley de cobre.

Se ve una dependencia de la forma y distribución de las intrusiones a la magnitud de los esfuerzos, en donde los esfuerzos máximos tienden a producirse en la matriz entre las intrusiones en la sección transversal de la probeta.

Luego se logra probar de forma cualitativa que la magnitud de los esfuerzos producidos sigue la relación establecida por la electrostricción, ya que los esfuerzos presentan un aumento directo en relación con la magnitud del impulso y por ende el campo eléctrico generados en la probeta.

Por otro lado, al comparar los esfuerzos obtenidos en las simulaciones, con resultados obtenidos por otros autores sobre el fallamiento de la roca por fatiga, se puede decir que los esfuerzos generados a través de esta técnica potencialmente pueden generar el fallamiento de la roca por fatiga.

Al comparar los resultados del presente trabajo con estudios previos, se identifica la potencial aplicación del fenómeno como pretratamiento a los procesos de molienda, siendo las potenciales mejoras el aumento de la ley de mineral valioso en los concentrados y la disminución de los tiempos de molienda.

A modo de recomendaciones se presentan las oportunidades de mejora al presente estudio, que serán mencionados junto a la debilidad que se busca mitigar. En primer lugar, tenemos la poca cantidad de datos de entrada para la construcción de los materiales en un ambiente digital, esto se vio a la hora de determinar los parámetros eléctricos de las rocas estudiadas. Además, debido a la naturaleza heterogénea de las rocas distintas, diferentes investigaciones presentan una gran variación de los datos, dificultando la correcta modelación del fenómeno estudiado.

Como punto desfavorable a este estudio, está la falta de datos experimentales que permitan la calibración de los modelos, así como evaluar la calidad de los resultados. En base al punto anterior, este estudio presenta las bases para realizar un análisis de sensibilidad de las distintas variables del modelo. En primera instancia esto fue realizado mediante la simulación de todas las intrusiones con el impulso de 1000 [KV], en el cual los esfuerzos máximos generados no son mucho mayores que en el caso de 150 [KV], lo que indica un comportamiento no lineal del fenómeno. Esto permitiría, por ejemplo, evaluar la existencia de un comportamiento asintótico o exponencial de los esfuerzos en función de la magnitud de la tensión del impulso electromagnético.

Además del punto mencionado anteriormente, se realizó una prueba para verificar la sensibilidad de los resultados ante una variación importante en un parámetro eléctrico, la permitividad relativa del material, la cual, al variar en aproximadamente 2 órdenes de magnitud, generó esfuerzos del orden de los 10 a 15 [MPa] en tracción.

Otro punto desfavorable es la simplificación de las intrusiones de minerales valiosos como esferas, siendo que este tipo de mineralización puede ser a través de intrusiones más pequeñas, de formas no esféricas, elipsoidales o sistemas de vetillas. Se espera que esto alterará la interacción de los esfuerzos de diferentes maneras.

Otra oportunidad de mejora al presente estudio es la posibilidad de incorporar variables aleatorias a la actual simulación, tales como la forma, tamaño y ubicación de las intrusiones, dar variabilidad a los parámetros mecánicos de roca intacta. De este modo se pueden generar estadísticas y modelos de distribuciones para cada uno de los correspondientes resultados a través de la realización de procesos Monte Carlo.

8. Bibliografía

- Andres, U., Timoshkin, I., & Soloviev, M. (2001). Energy consumption and liberation of minerals in explosive electrical breakdown of ores. *Transactions of the Institutions of Mining and Metallurgy, Section C: Mineral Processing and Extractive Metallurgy*, 110(SEP./DEC.). <https://doi.org/10.1179/mpm.2001.110.3.149>
- Avendaño Cortés, J. (2017). *Modelo térmico y de conductividad eléctrica en la caldera Tulancingo-Acocolco, Puebla* [Centro de Investigación Científica y de Educación Superior]. <https://colecciondigital.cemiegeo.org/xmlui/handle/123456789/1991>
- Bathe, K.-J. (2019). *Finite element procedures* (Second Edi). MIT.
- Brady, B. H. G., & Brown, E. T. (2004). Rock mechanics for underground mining. In *Rock mechanics and rock engineering* (third edit). <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-99789-0.50014-5>
- Eial Salinas Riveros. (2018). Análisis de propiedades geotécnicas de algunas rocas comunes en Chile. In *Journal of Materials Processing Technology* (Vol. 1, Issue 1). Universidad de Chile.
- Erarslan, N., & Williams, D. J. (2012). The damage mechanism of rock fatigue and its relationship to the fracture toughness of rocks. In *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* (Vol. 56, pp. 15–26). <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2012.07.015>
- Falcon, N. (2017). La electricidad atmosférica y el relámpago del río Catatumbó. *Meteorología y Física Atmosférica*, 113–130.
- Gomez, Á. (2014). *Caracterización de Rocas y Análisis de su Resistencia a fatiga por hendimiento*. Universidad Austral de Chile.
- Hoek, E. (2006). *Practical rock engineering*.
- Marambio, F., Pereira, J., & Russo, A. (2000). *Caracterización de las propiedades geotécnicas de las "andesitas de la mina". yacimiento El Teniente. Chile central* (p. 4).
- Martínez, N., Montoto, M., & Coyill, R. (1988). Evaluación de la fragmentación industrial de sulfuros polimetálicos mediante emisión acústica. *Boletín Geológico y Minero*, 99(5), 802–808.
- Sperner, B., Jonckheere, R., & Pfänder, J. A. (2014). Testing the influence of high-voltage mineral liberation on grain size, shape and yield, and on fission track and ⁴⁰Ar/³⁹Ar dating. *Chemical Geology*, 371, 83–95. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2014.02.003>
- Tarbut, E. J., & Lutgens, F. K. (2005). *Ciencias de La Tierra* (M. Martín-Romo & M. Caicoya (eds.); Octava). [https://doi.org/10.1016/0196-0709\(91\)90073-O](https://doi.org/10.1016/0196-0709(91)90073-O)
- Valles Herrera, D. M. (2018). *Fractura de materiales sólidos por medio de la aplicación de impulsos de alta tensión*. Universidad Técnica Federico Santa María.
- Van Der Wielen, K. P., Pascoe, R., Weh, A., Wall, F., & Rollinson, G. (2013). The influence of equipment settings and rock properties on high voltage breakage. *Minerals Engineering*, 46–47, 100–111. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2013.02.008>

A. Anexos

A.1. Hoek & Brown

En esta sección se presentan los complementos del criterio de falla de Hoek & Brown. Particularmente se muestran los criterios para la elección de GSI y el valor de daño por tronadura, D, utilizados para los resultados mostrados en la Tabla 6.2.

GEOLOGICAL STRENGTH INDEX FOR JOINTED ROCKS (Hoek and Marinos, 2000) From the lithology, structure and surface conditions of the discontinuities, estimate the average value of GSI. Do not try to be too precise. Quoting a range from 33 to 37 is more realistic than stating that GSI = 35. Note that the table does not apply to structurally controlled failures. Where weak planar structural planes are present in an unfavourable orientation with respect to the excavation face, these will dominate the rock mass behaviour. The shear strength of surfaces in rocks that are prone to deterioration as a result of changes in moisture content will be reduced if water is present. When working with rocks in the fair to very poor categories, a shift to the right may be made for wet conditions. Water pressure is dealt with by effective stress analysis.		SURFACE CONDITIONS VERY GOOD Very rough, fresh unweathered surfaces GOOD Rough, slightly weathered, iron stained surfaces FAIR Smooth, moderately weathered and altered surfaces POOR Slackensided, highly weathered surfaces with compact coatings or fillings or angular fragments VERY POOR Slackensided, highly weathered surfaces with soft clay coatings or fillings	
STRUCTURE		DECREASING SURFACE QUALITY →	
	INTACT OR MASSIVE - intact rock specimens or massive in situ rock with few widely spaced discontinuities	90	N/A
	BLOCKY - well interlocked undisturbed rock mass consisting of cubical blocks formed by three intersecting discontinuity sets	80	N/A
	VERY BLOCKY - interlocked, partially disturbed mass with multi-faceted angular blocks formed by 4 or more joint sets	70	N/A
	BLOCKY/DISTURBED/SEAMY - folded with angular blocks formed by many intersecting discontinuity sets. Persistence of bedding planes or schistosity	60	N/A
	DISINTEGRATED - poorly interlocked, heavily broken rock mass with mixture of angular and rounded rock pieces	50	N/A
	LAMINATED/SHEARED - Lack of blockiness due to close spacing of weak schistosity or shear planes	40	N/A
		30	N/A
		20	N/A
		10	N/A
		N/A	N/A

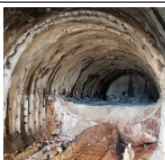
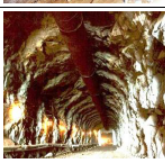
Appearance of rock mass	Description of rock mass	Suggested value of D
	Excellent quality controlled blasting or excavation by Tunnel Boring Machine results in minimal disturbance to the confined rock mass surrounding a tunnel.	D = 0
	Mechanical or hand excavation in poor quality rock masses (no blasting) results in minimal disturbance to the surrounding rock mass. Where squeezing problems result in significant floor heave, disturbance can be severe unless a temporary invert, as shown in the photograph, is placed.	D = 0 D = 0.5 No invert
	Very poor quality blasting in a hard rock tunnel results in severe local damage, extending 2 or 3 m, in the surrounding rock mass.	D = 0.8
	Small scale blasting in civil engineering slopes results in modest rock mass damage, particularly if controlled blasting is used as shown on the left hand side of the photograph. However, stress relief results in some disturbance.	D = 0.7 Good blasting D = 1.0 Poor blasting
	Very large open pit mine slopes suffer significant disturbance due to heavy production blasting and also due to stress relief from overburden removal. In some softer rocks excavation can be carried out by ripping and dozing and the degree of damage to the slopes is less.	D = 1.0 Production blasting D = 0.7 Mechanical excavation

Figura A-1(Izq.): Carta de valores GSI. (Der.) Carta de valores de daño por tronadura (D). Fuente: Hoek (2006).

A.2. Resultados generales

Los resultados generales se presentan a través de las vistas isométricas de las variables de campo eléctrico (vista vectorial e iso-superficies de magnitud), esfuerzo principal máximo y mínimo, el orden dentro de cada variable responde al contenido de cobre y el voltaje generador del impulso en aumento.

A.2.1. Campo eléctrico

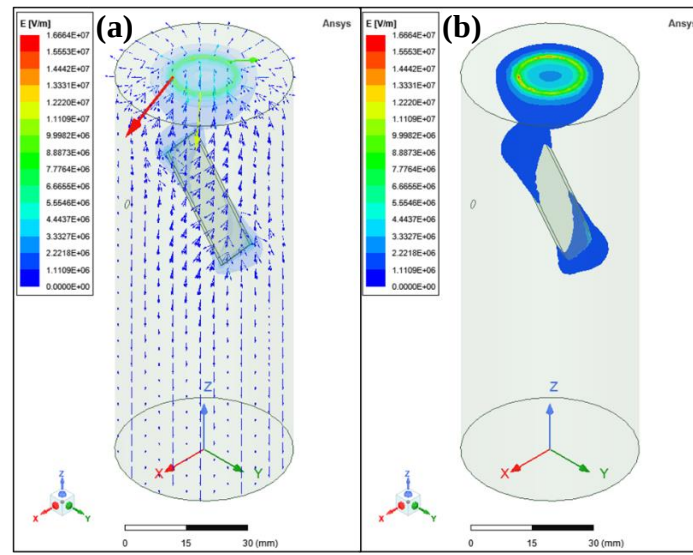


Figura A-2: Campo eléctrico caso solo vetilla con impulso de 100 [KV] - (a): Vista vectorial (b): Vista iso-superficies.

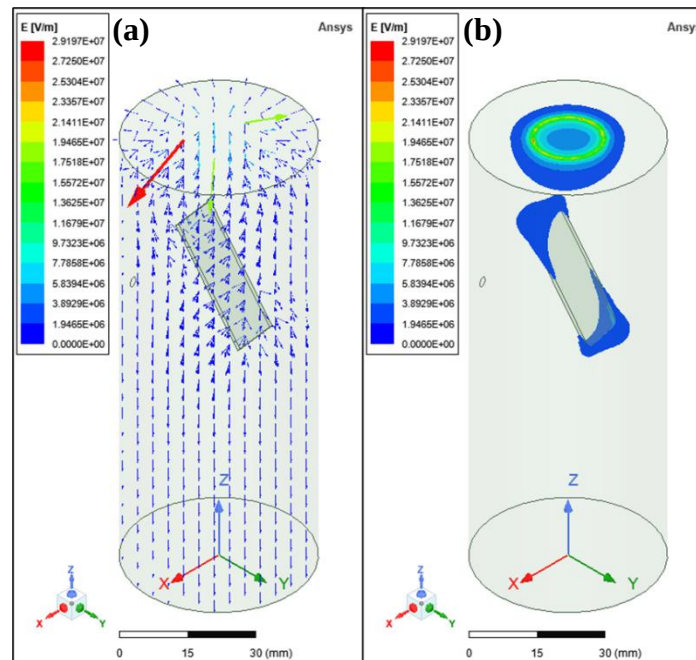


Figura A-3: Campo eléctrico caso solo vetilla con impulso de 150 [KV] - (a): Vista vectorial (b): Vista iso-superficies.

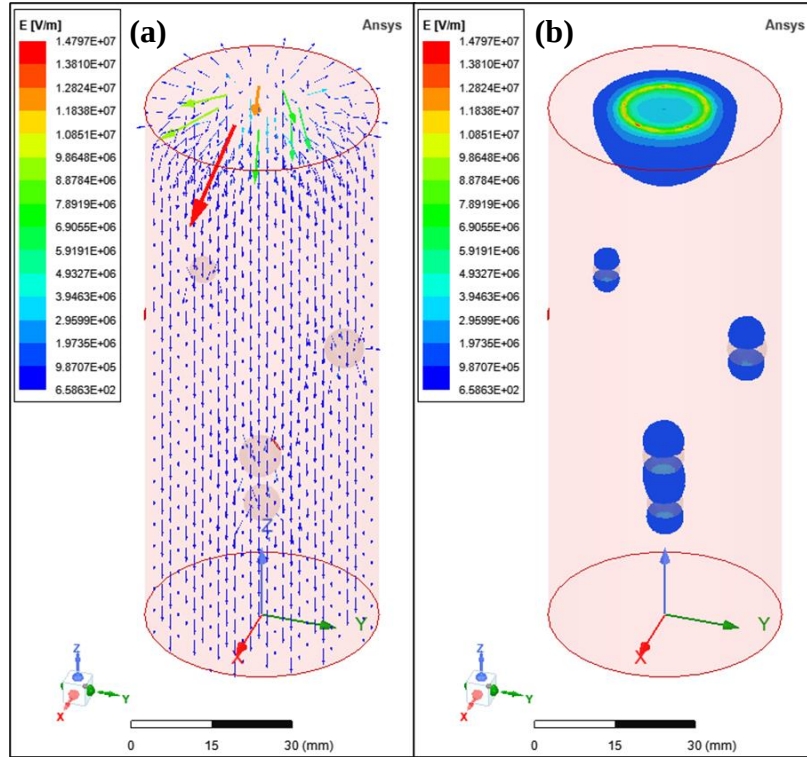


Figura A-4: Campo eléctrico caso 4 esferas con impulso de 100 [KV] - (a): Vista vectorial (b): Vista iso-superficies.

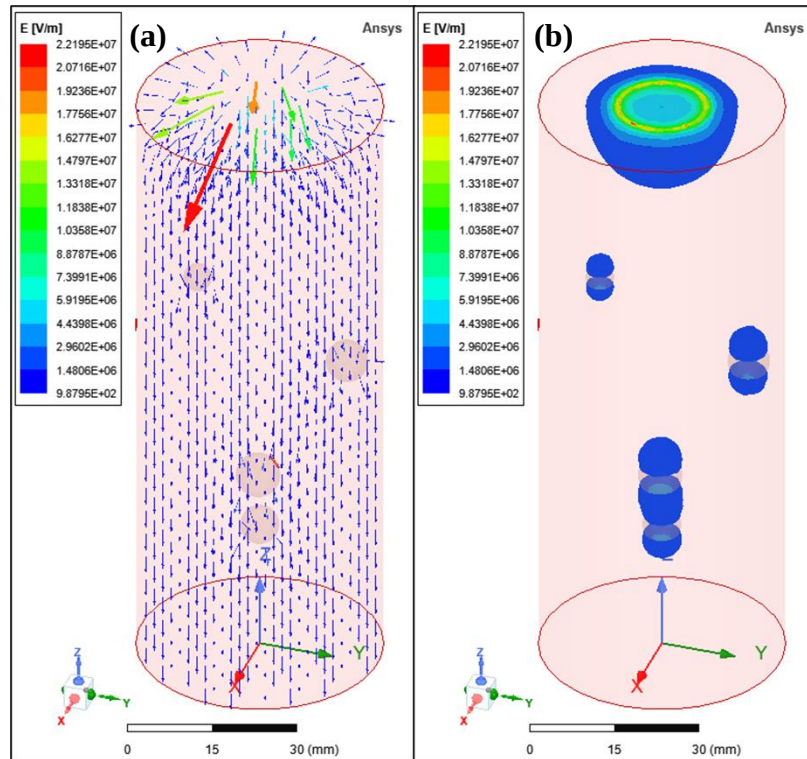


Figura A-5: Campo eléctrico caso 4 esferas con impulso de 150 [KV] - (a): Vista vectorial (b): Vista iso-superficies.

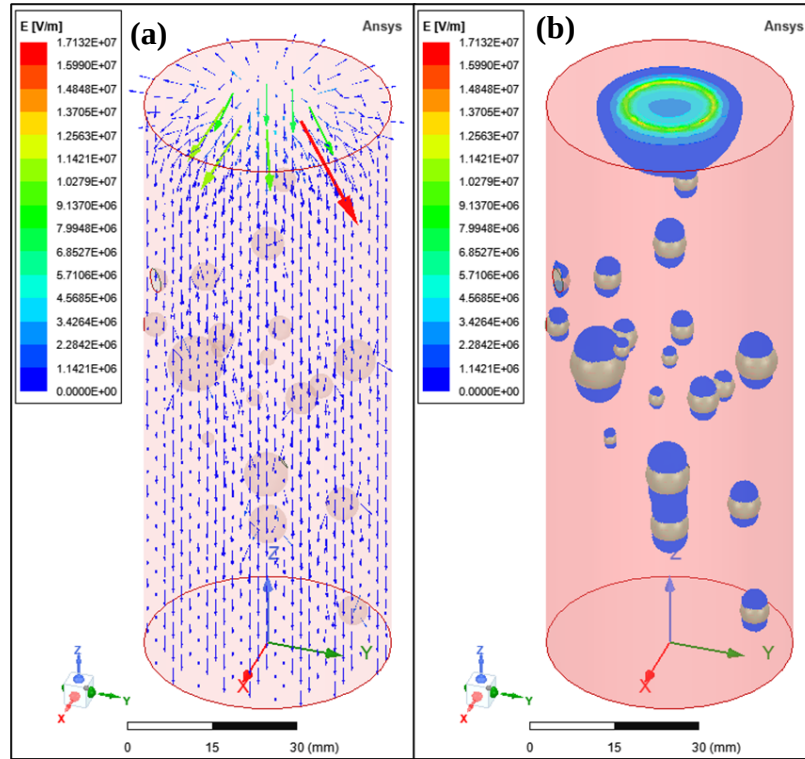


Figura A-6: Campo eléctrico caso solo esferas con impulso de 100 [KV] - (a): Vista vectorial (b): Vista iso-superficies

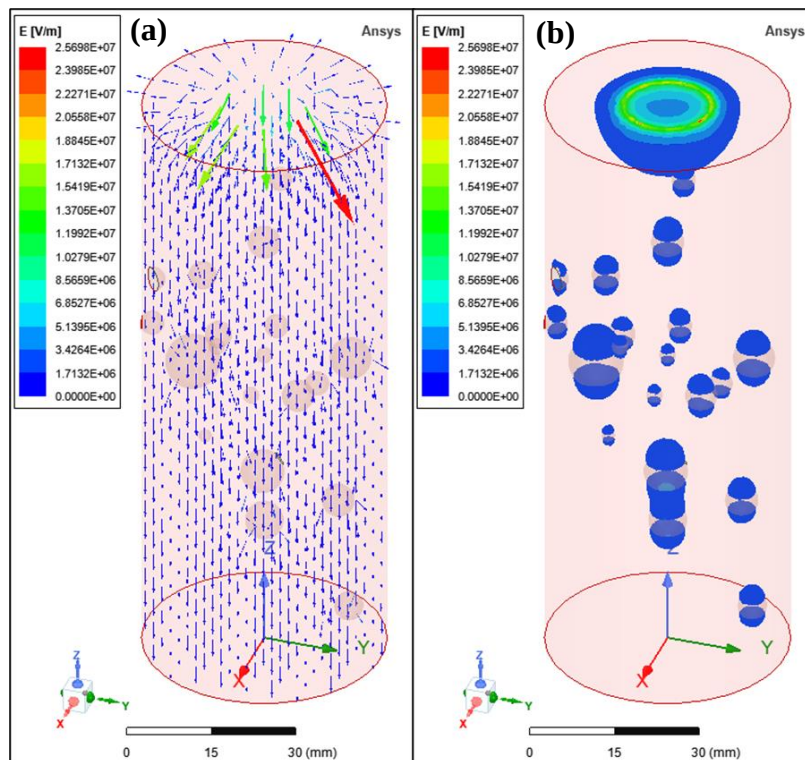


Figura A-7: Campo eléctrico caso solo esferas con impulso de 150 [KV] - (a): Vista vectorial (b): Vista iso-superficies.

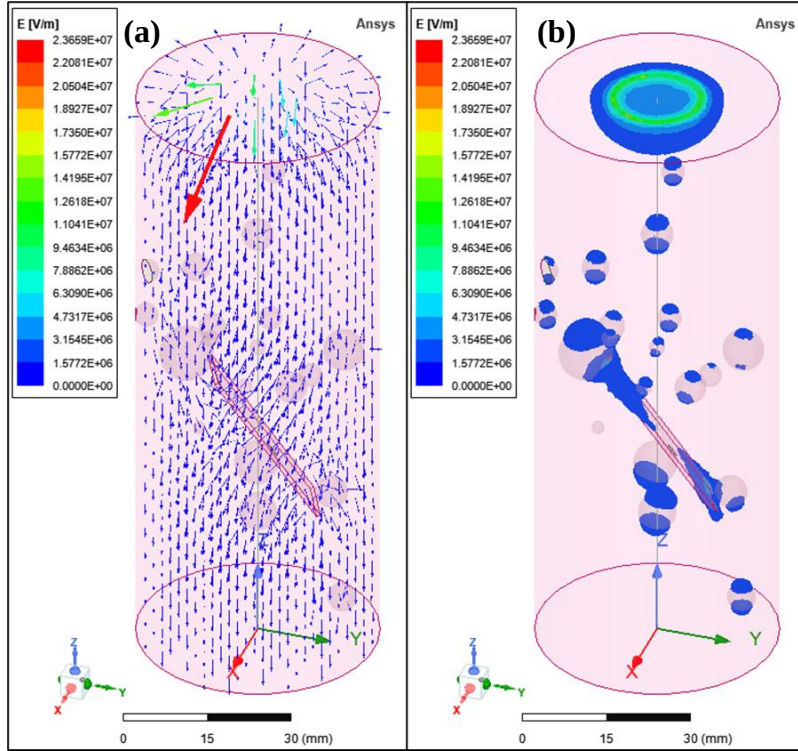


Figura A-8: Campo eléctrico caso todas las intrusiones con impulso de 100 [KV] - (a): Vista vectorial (b): Vista iso-superficies.

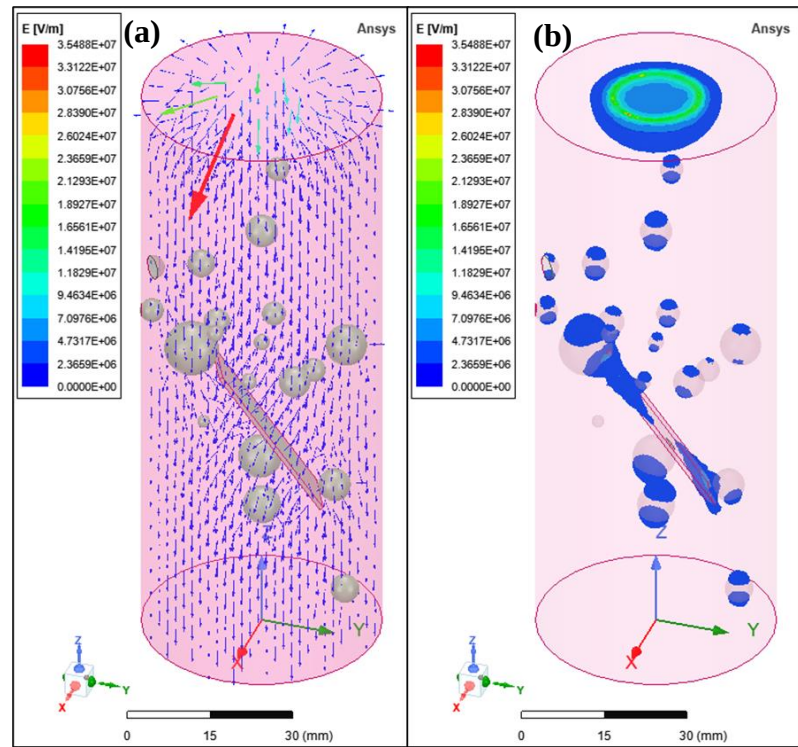


Figura A-9: Campo eléctrico caso todas las intrusiones con impulso de 150 [KV] - (a): Vista vectorial (b): Vista iso-superficies.

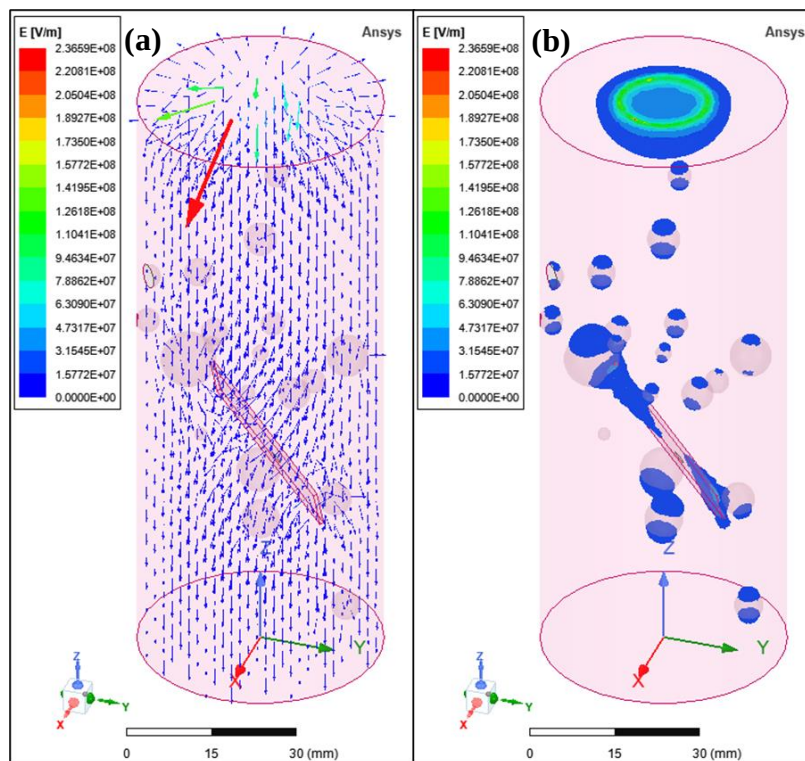


Figura A-10: Campo eléctrico caso todas las intrusiones con impulso de 1000 [KV] - (a): Vista vectorial (b): Vista iso-superficies.

A.2.2. Esfuerzos

Para los resultados asociados a los esfuerzos se presentan una vista comparativa para las componentes principales (máximo y mínimo) para los esfuerzos de 100 y 150 [KV].

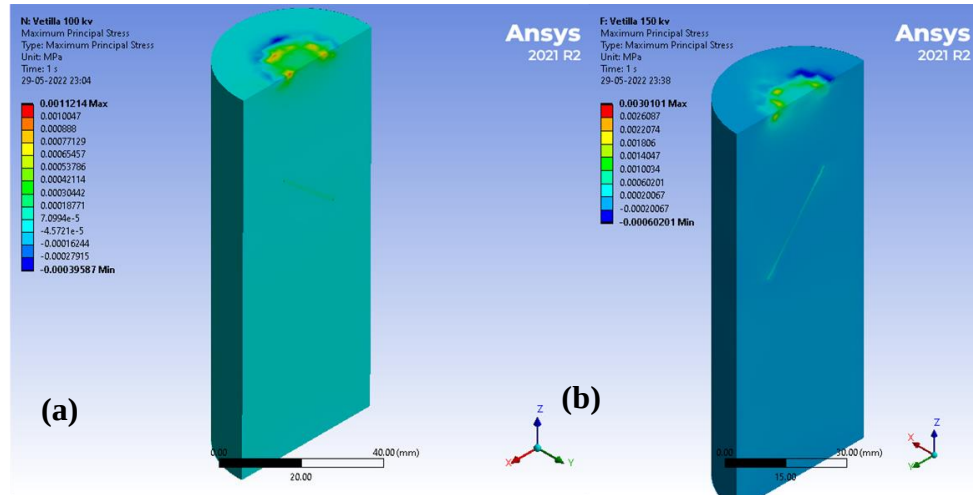


Figura A-11: Vista isométrica con corte de sección de la magnitud del esfuerzo principal máximo σ_1 y un impulso de (a) 100 [KV], (b) 150 [KV].

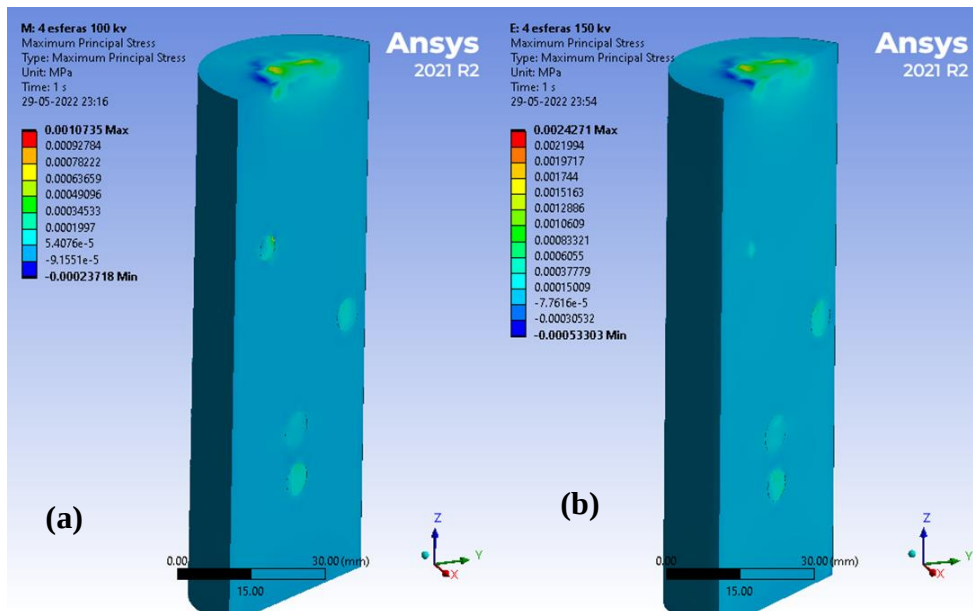


Figura A-12: Vista isométrica con corte de sección de la magnitud del esfuerzo principal máximo σ_1 y un impulso de (a) 100 [KV] y (b) 150 [KV], considerando 4 esferas.

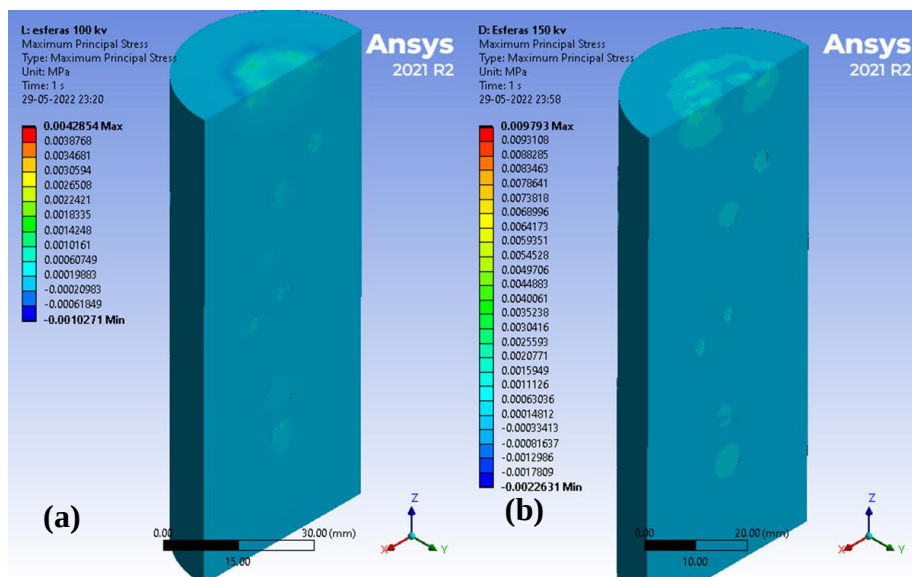


Figura A-13: Vista isométrica con corte de sección de la magnitud del esfuerzo principal máximo σ_1 y un impulso de (a) 100 [KV] y (b) 150 [KV], considerando solo esferas.

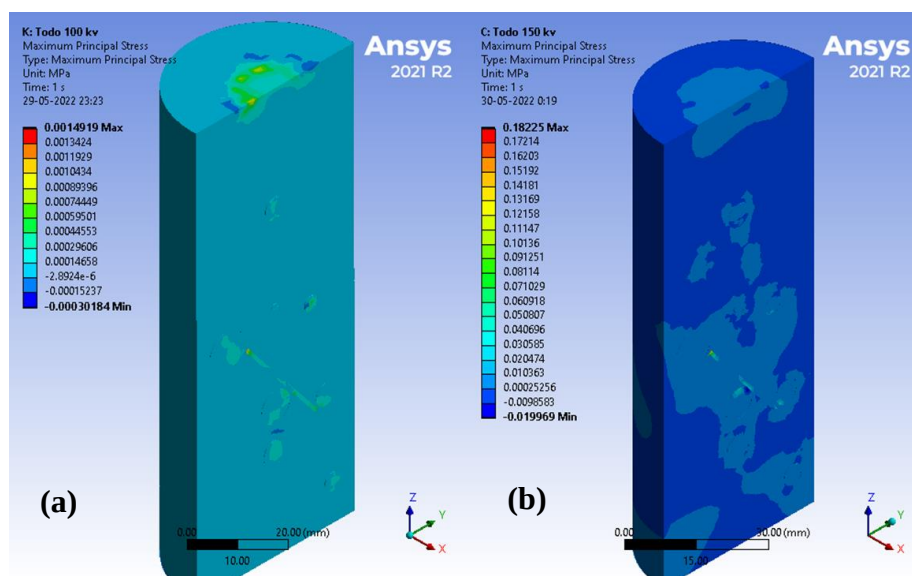


Figura A-14: Vista isométrica con corte de sección de la magnitud del esfuerzo principal máximo σ_1 y un impulso de (a) 100 [KV] y (b) 150 [KV], considerando todas las intrusiones.

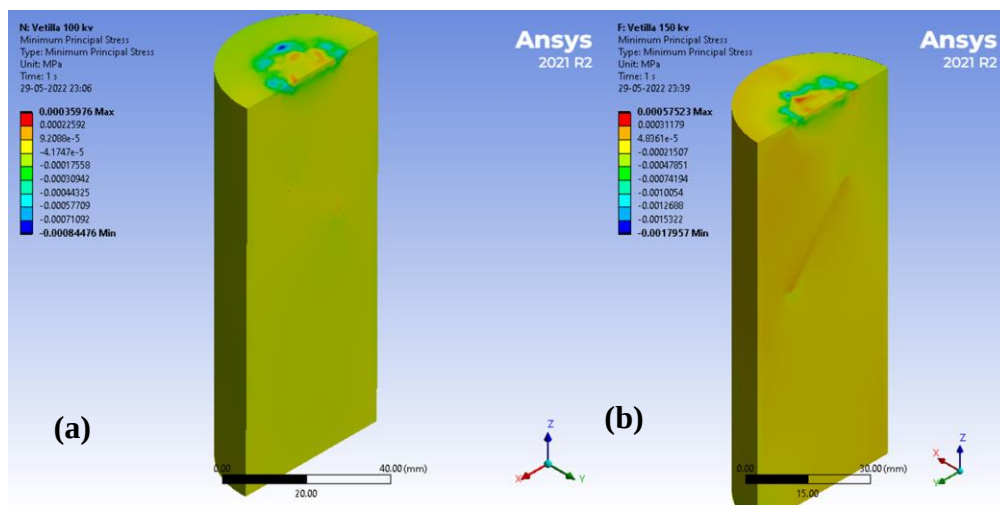


Figura A-15: Vista isométrica con corte de sección de la magnitud del esfuerzo principal máximo σ_3 y un impulso de (a) 150 [KV] y (b) 150 [KV], considerando solo vetilla.

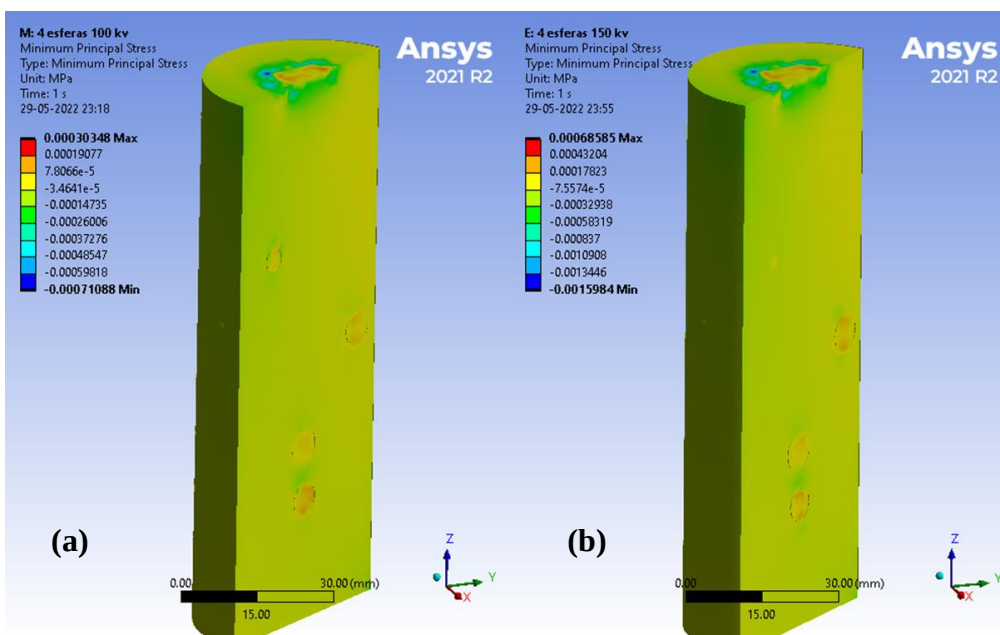


Figura A-16: Vista isométrica con corte de sección de la magnitud del esfuerzo principal máximo σ_3 y un impulso de (a) 150 [KV] y (b) 150 [KV], considerando solo 4 esferas.

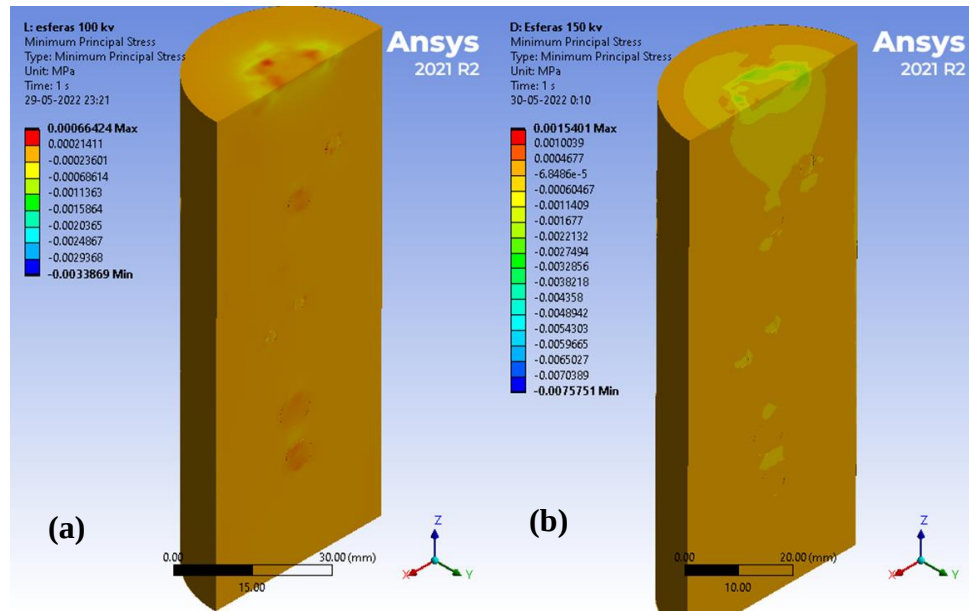


Figura A-17: Vista isométrica con corte de sección de la magnitud del esfuerzo principal máximo σ_3 y un impulso de (a) 150 [KV] y (b) 150 [KV], considerando solo esferas.

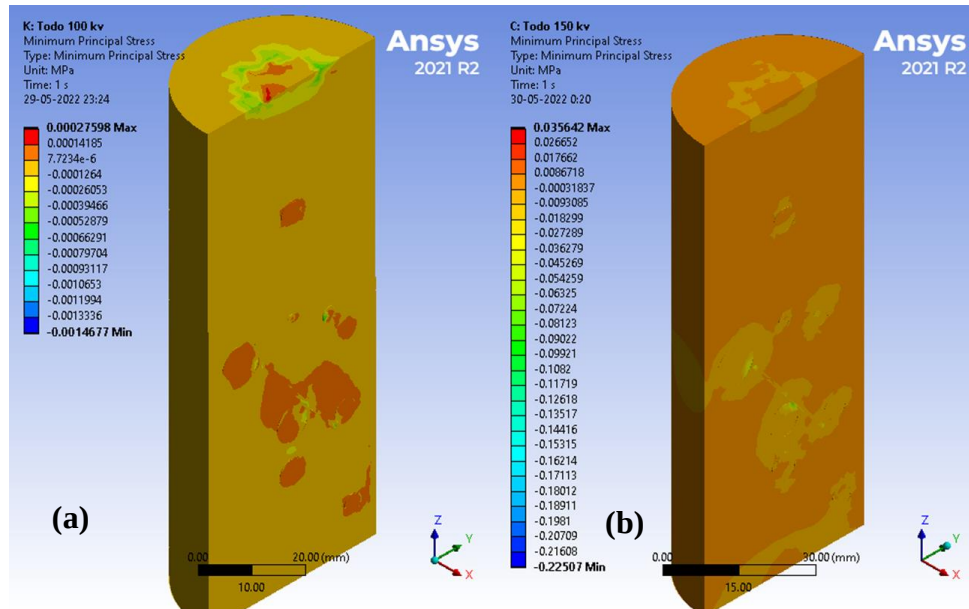


Figura A-18: Vista isométrica con corte de sección de la magnitud del esfuerzo principal máximo σ_3 y un impulso de (a) 150 [KV] y (b) 150 [KV], considerando todas las intrusiones.