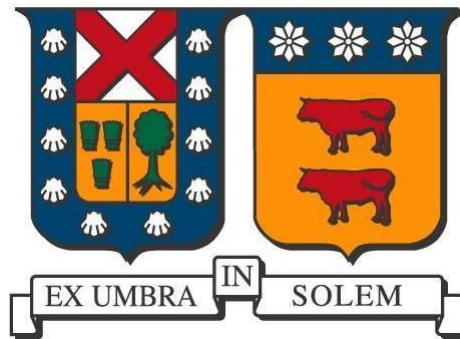


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y DE
MATERIALES



CARACTERIZACIÓN DE LA RUGOSIDAD DE
DISCONTINUIDADES DEL MACIZO ROCOSO Y SU
INFLUENCIA EN EL FRACTURAMIENTO HIDRÁULICO

VICENTE IGNACIO CÉSPEDES BUSTOS

Memoria de Título para optar al título profesional de Ingeniero Civil de Minas

Profesor Guía
Víctor Encina Montenegro

2025

Santiago, Chile



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): Memoria o trabajo de título; Tesis de Postgrado;

Título del trabajo: Caracterización de la rugosidad de discontinuidades del macizo rocoso y su influencia en el fracturamiento hidráulico

Nombre del candidato(a): Vicente Ignacio Céspedes Bustos

Carrera / Grado: Ingeniería Civil de Minas

Campus: Santiago San Joaquin ; Departamento: Departamento de Minas, Metalurgia y Materiales

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Víctor Encina Montenegro, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL

El trabajo **NO** contiene información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (embargo) por:

6 meses; 12 meses; 2 años; 3 años; 5 años; 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 20-08-2025

; Firma:

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 20-08-2025

; Firma:

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a mi familia, amigos, cercanos y a toda la gente que estuvo presente cuando los necesite en estos años.

En primer lugar, a mi papá y a mi mamá, por educarme, darme todos los valores que tengo y forjarme como persona, estuvieron para mí cuando más los necesite y me apoyaron en todo, nunca terminare de agradecerles todo lo que han hecho por mí.

A mi hermana por siempre decirme la realidad de las cosas con el fin de enseñarme a ser mejor persona y mejor hombre, que a pesar de las peleas y que no nos llevemos tan bien a veces, sé que me quiere mucho y lo hace por mi bien, también a mi perro Rocco por siempre animar la casa y alegrarnos a todos.

Agradezco a mis amigos, ellos saben quiénes son, por hacer más amena mi estadía en la universidad, se logró a pesar de los buenos y malos momentos, espero haber estado para ustedes como ustedes estuvieron para mí y poder haberlos alegrado siempre que pude.

Los quiero mucho a todos.

RESUMEN

Actualmente en Chile los métodos de caving son técnicas de extracción utilizadas en la minería subterránea, la importancia del uso de estos métodos es que la minería pronto será solamente subterránea, esto debido a que no será aceptable remover/hacer acopios de estéril y que los yacimientos son cada vez más profundos ya que los superficiales se están agotando, estos métodos a pesar de estar diseñados para recuperar el mineral de manera segura y eficiente presentan desafíos como problemas de control de roca y la dilución del mineral.

El preacondicionamiento en la minería es una serie de medidas de evaluación y preparación del área de trabajo donde su objetivo es minimizar los riesgos asociados a la actividad minera. Las minas evalúan la efectividad de los métodos de preacondicionamiento a través de monitoreos de producción y sísmicos basándose en cifras de producción tales como la tasa de extracción, fragmentación de la roca y porcentaje de obstrucción.

El fracturamiento hidráulico se utiliza principalmente para preacondicionar el cuerpo mineral, donde se logra generar fracturas en el macizo rocoso por medio de la inyección de fluidos a presión, esta técnica ha tenido impactos positivos tales como la mejora en las tasas de hundimiento, la disminución del tamaño de los bloques que genera, lograr una mejor gestión de la sismicidad inducida y la propagación de la cavidad. La implementación de esta técnica será una herramienta esencial en la minería de caving, donde el objetivo principal de este trabajo es caracterizar la rugosidad de las discontinuidades del macizo rocoso a través de la cuantificación de su irregularidad superficial, con el propósito de establecer una metodología que permita clasificar distintos tipos de rugosidad y analizar su impacto en el comportamiento de un fluido dentro de una fractura.

Palabras Clave: Minería Subterránea, Preacondicionamiento, Fracturamiento Hidráulico, Discontinuidades, Rugosidad.

ABSTRACT

Currently, in Chile, caving methods are extraction techniques used in underground mining. The importance of these methods lies in the fact that mining will soon be exclusively underground, as it will no longer be acceptable to remove or stockpile waste material, and ore deposits are becoming deeper as surface deposits are being depleted. Although these methods are designed to recover ore safely and efficiently, they present challenges such as rock control issues and ore dilution.

Preconditioning in mining consists of a series of evaluation and preparation measures aimed at minimizing the risks associated with mining activities. Mines assess the effectiveness of preconditioning methods through production and seismic monitoring, relying on production figures such as extraction rates, rock fragmentation, and blockage percentages.

Hydraulic fracturing is primarily used to precondition the orebody, where fractures are generated in the rock mass through the injection of pressurized fluids. This technique has shown positive impacts such as improved drawpoint caving rates, a reduction in the size of generated blocks, better management of induced seismicity, and enhanced propagation of the cave. The implementation of this technique is expected to become an essential tool in caving mining. The main objective of this work is to characterize the roughness of rock mass discontinuities by quantifying their surface irregularity, with the aim of establishing a methodology to classify different types of roughness and analyze their impact on the behavior of a fluid within a fracture.

Keywords: Underground Mining, Preconditioning, Hydraulic Fracturing, Discontinuities, Roughness.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1. Introducción.....	1
1.1 Hipótesis de investigación.....	2
2. Objetivos y alcances.....	3
2.1 Objetivo general.....	3
2.2 Objetivos específicos.....	3
2.3 Alcances.....	3
3. Marco teórico.....	4
3.1 Macizo rocoso.....	4
3.2 Discontinuidades.....	4
3.3 Minería por hundimiento.....	5
3.4 Preacondicionamiento.....	5
3.4.1 Fracturamiento hidráulico.....	6
3.5 Fluidos.....	12
3.5.1 Viscosidad dinámica.....	12
3.5.2 Densidad de un fluido.....	13
3.5.3 Número de Reynolds.....	13
3.6 Propiedades de la roca.....	14
3.6.1 Densidad de la roca.....	15
3.6.2 Módulo de Young.....	15
3.6.3 Porosidad.....	15
3.6.4 Coeficiente de Poisson.....	16
3.7 Conductividad hidráulica.....	16
3.8 Sismicidad inducida.....	16
4. Metodología.....	17
4.1 Revisión bibliográfica.....	17
4.2 Plan de trabajo.....	18
4.3 Construcción modelo.....	18
4.4 Caracterizar casos de estudio.....	18
4.5 Desarrollo experimentos numéricos.....	19

4.6 Análisis de resultados...	19
4.7 Conclusiones y recomendaciones...	19
5. Desarrollo	20
5.1 Construcción modelo.....	20
5.1.1 Diseño geometría...	20
5.1.2 Configuración parámetros.....	23
5.2 Matriz experimentos numéricos.....	27
5.3 Procesamiento de datos.....	28
6. Resultados y análisis.....	30
6.1 Resultados de las simulaciones.....	30
6.2 Implicaciones y aplicabilidad del estudio.....	39
7. Conclusiones y recomendaciones.....	40
7.1 Conclusiones.....	40
7.1.1 Conclusiones numéricas.....	40
7.1.2 Conclusiones teóricas.....	41
7.2 Recomendaciones.....	42
8. Referencias	43
9. Anexos.....	46

ÍNDICE DE FIGURAS

1. Figura 3.1: Macizo rocoso.....	4
2. Figura 3.2: Discontinuidades macizo rocoso.....	5
3. Figura 3.3: Esquema de Panel caving con fracturamiento hidráulico en mina El teniente.....	6
4. Figura 3.4: Concepto de fractura hidráulica prescrita.....	7
5. Figura 3.5: Fracturación hidráulica experimental.....	8
6. Figura 3.6: Fallo del empaquetador.....	9
7. Figura 3.7: Fractura paredes de la perforación.....	9
8. Figura 3.8: Fragmentación del espécimen fracturado horizontalmente.....	11
9. Figura 3.9: Flujo laminar.....	14
10. Figura 3.10: Flujo turbulento.....	14
11. Figura 4.1: Esquema de metodología de trabajo.....	17
12. Figura 5.1: Representación macizo rocoso.....	20
13. Figura 5.2: Nodos superficie paramétrica.....	22
14. Figura 5.3: Geometría de la fractura.....	23
15. Figura 5.4: Geometría bloque agregado a la fractura.....	23
16. Figura 5.5: Malla con elementos extrafinos.....	25
17. Figura 5.6: Vista x-y del modelo.....	26
18. Figura 5.7: Vista velocidad 3D del modelo.....	26
19. Figura 5.8: Vista 3D ampliada del modelo.....	27
20. Figura 5.9: Representación macizo rocoso en <i>COMSOL Multiphysics</i>	29
21. Figura 5.10: Archivos extraídos desde <i>COMSOL Multiphysics</i>	27
22. Figura 5.11: Código <i>Python</i> para graficar.....	29
23. Figura 6.1: 1 corte plano x-z.....	30
24. Figura 6.2: Gráfico al aplicar 1 corte en el plano x-z.....	31
25. Figura 6.3: Cortes plano x-z en el bloque.....	32
26. Figura 6.4: 3 cortes plano x-z.....	32
27. Figura 6.5: Gráfico de velocidad al aplicar 3 cortes en el plano x-z.....	33

28. Figura 6.6: Influencia cambio de geometría.....	34
29. Figura 6.7: Gráfico para comparar archivos.....	34
30. Figura 6.8: Influencia propiedades de la roca.....	35
31. Figura 6.9: 3 cortes plano y-z.....	35
32. Figura 6.10: Gráfico rangos de velocidad eje y-z.....	36
33. Figura 6.11: 3 cortes plano x-z.....	36
34. Figura 6.12: Gráfico conductividad hidráulica.....	37
35. Figura 6.13: Magnitud velocidad v/s conductividad hidráulica.....	37
36. Figura 6.14: Número de Reynolds según irregularidad de la fractura.....	39
37. Figura 9.1: Geometría 1 de 2 nodos.....	45
38. Figura 9.2: Geometría 2 de 3 nodos.....	45
39. Figura 9.3: Geometría 3 de 4 nodos.....	46
40. Figura 9.4: Geometría 4 de 5 nodos.....	46
41. Figura 9.5: Geometría 5 de 6 nodos.....	47
42. Figura 9.6: Geometría 6 de 7 nodos.....	47
43. Figura 9.7: Geometría 7 de 8 nodos.....	48
44. Figura 9.8: Geometría 8 de 9 nodos.....	48
45. Figura 9.9: Geometría 9 de 10 nodos.....	49
46. Figura 9.10: Geometría 10 de 11 nodos.....	49
47. Figura 9.11: Geometría 11 de 15 nodos.....	50
48. Figura 9.12: Geometría 12 de 20 nodos.....	50
49. Figura 9.13: Geometría 13 de 30 nodos.....	51
50. Figura 9.14: Geometría 14 de 40 nodos.....	51
51. Figura 9.15: Geometría 15 de 50 nodos.....	52
52. Figura 9.16: Geometría 16 de 60 nodos.....	52
53. Figura 9.17: Geometría 17 de 70 nodos.....	53
54. Figura 9.18: Geometría 18 de 80 nodos.....	53
55. Figura 9.19: Geometría 19 de 90 nodos.....	54
56. Figura 9.20: Geometría 20 de 100 nodos.....	54

ÍNDICE DE TABLAS

1. Tabla 5.1: Dimensiones macizo rocoso.....	21
2. Tabla 5.2: Parámetros superficie paramétrica.....	22
3. Tabla 5.3: Funciones paramétricas que generaran las coordenadas.....	22
4. Tabla 5.4: Configuración parámetros fluido.....	24
5. Tabla 5.5: Configuración parámetros de la roca.....	24
6. Tabla 5.6: Variables del modelo.....	24
7. Tabla 5.7: Matriz experimentos numéricos para el tipo de fluido.....	28
8. Tabla 5.8: Matriz experimentos numéricos para el tipo de roca.....	28
9. Tabla 7.1: Caracterización de discontinuidades según comportamiento del fluido	41

1. INTRODUCCIÓN

Al estar agotándose los yacimientos superficiales la minería subterránea se ha vuelto más frecuente, donde a pesar de los avances, se siguen presentando desafíos en términos de la seguridad (Potvin et al., 2010). En la minería subterránea existen varios métodos de extracción diseñados para recuperar el mineral de manera segura y eficiente, se destacan en este trabajo los métodos de Block/Panel Caving los cuáles se caracterizan por ser técnicas que permiten alcanzar altos valores de producción y recuperación, donde se busca crear fracturas controladas, estas fracturas permiten que el material se desplace gravitacionalmente hacia los túneles de acceso, donde es recolectado y transportado para su procesamiento (van As & Guest, 2020). Dado que la minería pronto será solo subterránea esta ha estado avanzando significativamente permitiendo la explotación eficiente y segura de los depósitos minerales, sin embargo, a pesar de su avance, se siguen presentando desafíos tanto en términos de seguridad, impacto ambiental y las relaciones con las comunidades locales de las zonas mineras (Gray & Gibbons, 2022).

El preacondicionamiento en minería subterránea se refiere a una serie de técnicas y prácticas utilizadas para mejorar las condiciones del macizo rocoso antes de llevar a cabo actividades de extracción. Su objetivo es reducir el riesgo de colapso, mejorar la estabilidad del terreno y aumentar la seguridad de los trabajadores. La correcta implementación de estas técnicas contribuye significativamente a la seguridad y la eficiencia de las operaciones mineras (Cumming-Potvin et al., 2018).

La técnica de fracturamiento hidráulico consiste en la inyección de fluido a alta presión en la roca. Su aplicación debilita la masa rocosa para mejorar el hundimiento, disminuye el tamaño de los fragmentos y reduce los riesgos sísmicos, a pesar de que este proceso puede generar sismicidad inducida (Birch & Meyer, 2019; Ghazvinian et al., 2020). Además, esta técnica incrementa la tasa de propagación de hundimiento, lo que mejora la velocidad de extracción del mineral y reduce el riesgo de bloqueos y explosiones de aire (Mejia et al., 2022; Rimmelin, 2022).

a. Hipótesis de Investigación

Se postula que fisuras con mayor rugosidad aumentan la tortuosidad del flujo y generan una distribución no homogénea de esfuerzos en su entorno, todo lo cual puede afectar la distribución de velocidades del fluido dentro de la fractura, la conectividad hidráulica y la propagación requerida.

2. OBJETIVOS Y ALCANCES

a. Objetivo general

Establecer una relación entre distintos tipos de rugosidad y el comportamiento del fluido dentro de una discontinuidad creada con fracturamiento hidráulico.

b. Objetivos específicos

- Configurar un modelo numérico que represente el proceso de creación de fracturas con fracturamiento hidráulico.
- Determinar cómo afecta la rugosidad de las superficies de la fractura a la cantidad de fluido inyectado y alcance de ruptura.

c. Alcances

Las limitaciones presentes en las simulaciones son:

- Se utilizará el software *COMSOL Multiphysics*.
- El modelo físico se considerará isótropo.
- Se analiza el comportamiento del fluido durante el fracturamiento, sin abordar etapas previas ni posteriores.
- No se incorporarán aditivos ni partículas en el fluido inyectado.

3. MARCO TEÓRICO

Este capítulo tiene como objetivo analizar y contextualizar la literatura existente sobre la técnica de fracturamiento hidráulico y su importancia en la minería.

3.1 Macizo rocoso

Volumen de roca intacta que se encuentra en su estado natural, este volumen de roca combina roca intacta y un sistema de discontinuidades, los macizos rocosos constituyen la base estructural de la corteza terrestre y pueden ser encontrados en aplicaciones geotécnicas, mineras, hidráulicas y civiles.



Figura 3.1: Macizo rocoso.

3.2 Discontinuidades

Las discontinuidades en un macizo rocoso son planos o zonas de debilidad donde se ha perdido la cohesión o continuidad del material. Controlan la resistencia, permeabilidad y deformidad del macizo.



Figura 3.2: Discontinuidades macizo rocoso.

3.3 Minería por hundimiento

La minería por hundimiento es un método de extracción en minería subterránea que se aplica en cuerpos minerales cada vez más profundos, resistentes y heterogéneos, este método se basa en el colapso controlado del macizo rocoso donde este se comporta como un material discontinuo, permitiendo que el material fluya naturalmente por efecto de la gravedad y se desplace hacia un punto de extracción (Rimmelín, Chitombo, & Valdivia, 2020). Las condiciones de la superficie deben permitir la subsidencia del área excavada, lograr esto aumenta el riesgo de reservas perdidas en voladizos, el potencial de colgaduras y estallidos de aire, pérdida o rehabilitación de infraestructura y la subsidencia inducida por hundimiento a gran escala (Mejía et al., 2022). Para este método de extracción el flujo de material tiene una parte superior que se desplaza como una masa y una parte inferior en que el flujo es caótico con flujo interactivo entre elipsoides (Ghazvinian et al., 2020).

3.4 Preacondicionamiento

Medidas de evaluación y preparación del área de trabajo con las cuáles se busca minimizar los riesgos asociados a la actividad minera. El preacondicionamiento es el proceso de inducir fracturas in situ en el macizo rocoso con el propósito de modificar sus propiedades geomecánicas y potencialmente permitir un mayor rendimiento en el hundimiento y así mejorar las condiciones de extracción del mineral (Mejía et al., 2022). Las minas evalúan la

efectividad de estos métodos basándose en cifras de producción tales como la tasa de extracción, fragmentación de roca y porcentaje de obstrucción (Jeffrey et al., 2010).

3.4.1 Fracturamiento Hidráulico

Esta técnica de preconditionamiento consiste en la inyección de fluido (agua, petróleo o algún fluido viscoso) en una perforación con el fin de debilitar el macizo rocoso a través de fracturas (Birch & Meyer, 2019). La falla puede interpretarse como tensil, hidro-cizalladura o una combinación de ambas, donde se crea una nueva fractura que luego se desliza como resultado del estrés de la cizalladura actuando sobre el plano (Rimmelin et al., 2020). El fracturamiento hidráulico se utiliza principalmente en minas subterráneas a gran escala con cuerpos minerales de baja ley, donde esta técnica ha evolucionado como una de las más preferidas debido al mejor control de la geometría que proporciona, la orientación de la fractura y la ayuda en la disipación de energía de deformación almacenada en exceso (Ali & Karakus, 2022). Este proceso se puede realizar tanto utilizando perforaciones ascendentes desde el nivel de socavación o perforaciones descendentes desde un nivel superior donde luego se crean fracturas (Ghazvinian et al., 2020).

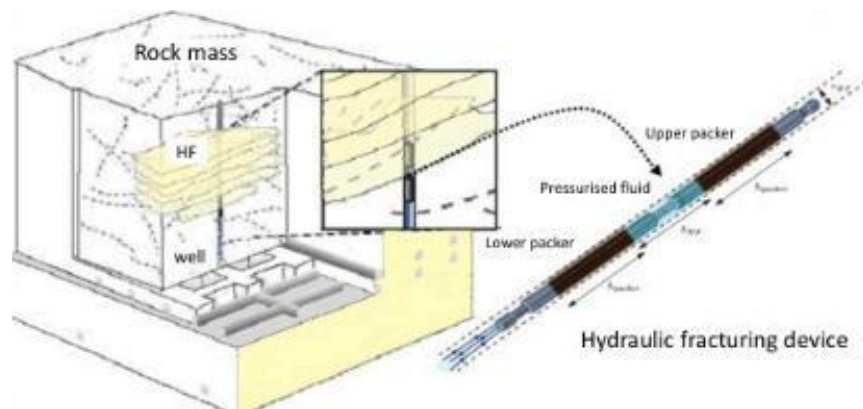


Figura 3.3: Esquema de Panel caving con fracturamiento hidráulico en mina El teniente (Rimmelin, Chitombo, Rojas 2020).

Para iniciar el fracturamiento hidráulico, la presión del fluido inyectado debe ser mayor que la suma de la resistencia de la roca y la tensión principal mínima in situ para inducir la falla. Los requisitos de la presión del fluido vienen dados por el campo de esfuerzos in situ y la

resistencia de la roca. Independientemente de cómo se haya iniciado la fractura, esta se propagará alineada con los esfuerzos principales mayores o se deslizará debido a la tensión cortante que actúa sobre el plano (Mejia et al., 2022). La propagación de la fractura se divide en 3 etapas iniciación, propagación intermedia y propagación estabilizada (Potvin et al., 2010):

- Iniciación de la fractura hidráulica: Se inicia una fractura en dos puntos diametralmente opuestos en la superficie del pozo, creando dos fracturas no conectadas que se propagan de manera independiente de manera paralelas o subparalelas al eje central del pozo.
- Propagación intermedia: Después de la iniciación de la fractura hidráulica las fracturas giran a un plano perpendicular a la orientación del esfuerzo principal menor.
- Propagación estabilizada: La propagación de la fractura hidráulica continua hasta el final de la inyección del fluido.

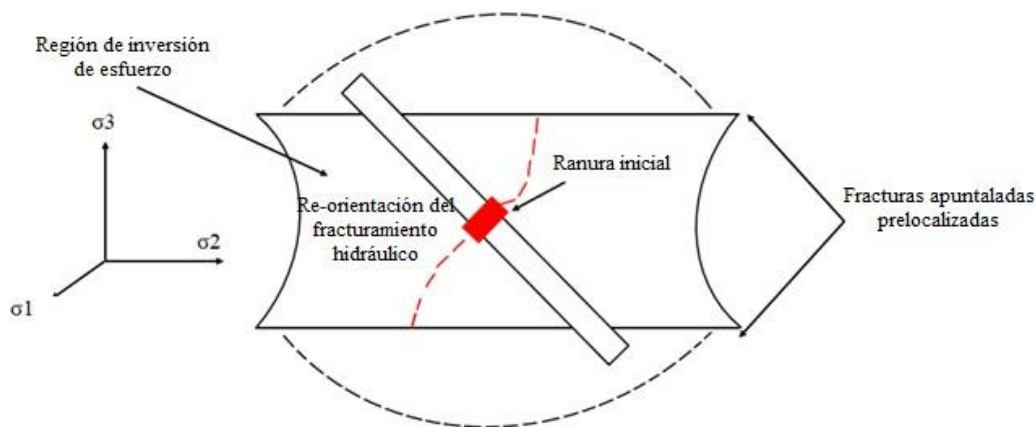


Figura 3.4: Concepto de fractura hidráulica prescrita (He et al. 2016b).

El resultado de este proceso es un aumento en la fragmentación donde se reduce la capacidad del macizo rocoso para acumular energía de deformación, por lo tanto, disminuyendo así el riesgo sísmico (van As & Guest, 2020).

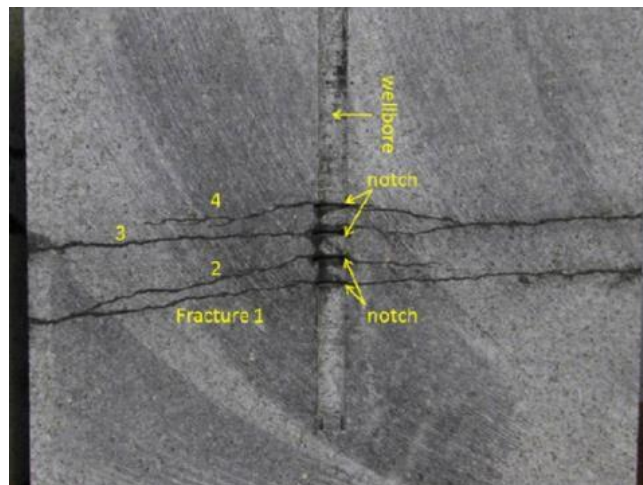


Figura 3.5: Fracturación hidráulica experimental (Rimmelin, R., Chitombo, G., & Valdivia, E. 2020).

A pesar de la cantidad de beneficios que trae el uso del fracturamiento hidráulico este método de preconditionamiento sufre de diversos problemas operativos tales como (Rimmelin, 2022):

- Fallos en los empaquetadores: Esto debido al desgaste del material y la ruptura de los sellos, los empaquetadores sellan la sección de la fracturación.
- Atrapamiento en los empaquetadores: Estos quedan atascados en las grietas generadas por la fracturación, quedan atrapados junto con todas las varillas de inyección.
- Intentos de fracturación: Durante el proceso de fracturamiento hidráulico ciertas secciones pueden no ser fracturadas donde la serie de intentos por lograrlo produce un desgaste excesivo de las herramientas utilizadas para la fracturación.
- Sobreexcavación paredes del pozo: En la presencia de venillas ocurre una mayor sobreexcavación donde puede ocurrir un desprendimiento específico en el pozo dejando forma de limón, donde nuevamente puede ocurrir el atrapamiento de varillas.



Figura 3.6: Fallo del empaquetador (Navarrete, Soto, Henríquez, Godoy 2022).

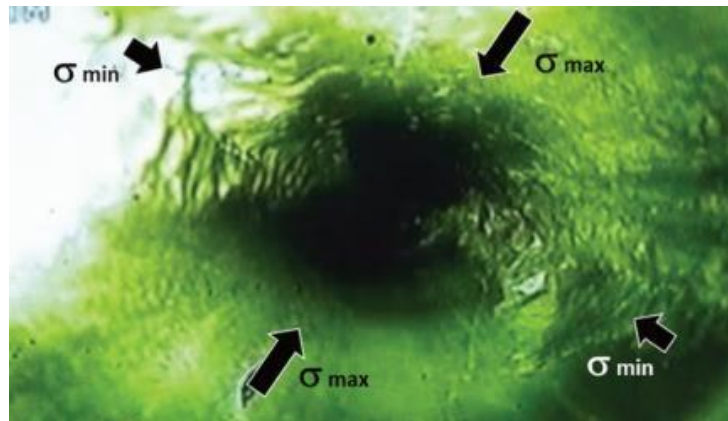


Figura 3.7: Fractura paredes de la perforación (Navarrete, Soto, Henríquez, Godoy 2022).

Este método de fracturamiento se puede utilizar tanto a través de perforaciones ascendentes como descendentes, además de la posibilidad de utilizar tanto agua, petróleo o también se pueden utilizar fluidos viscosos para obtener impactos positivos, este tipo de fluidos logran reducción de fugas debido a la capacidad de sostener las fracturas con el tiempo donde también generan fracturas más extendidas pero planas (Navarrete Vallejos et al.,2022). Sin embargo, a pesar de la cantidad de beneficios que aporta este método hay que tener en cuenta la segregación de las zonas circundantes como medida de protección, además del aislamiento de los sectores por los que se enruta el circuito, esto debido a la sismicidad inducida

producida por la liberación de energía de la roca y las altas presiones que circulan (Jeffrey et al., 2010).

La presencia de fracturas adicionales facilita el proceso de descarga particularmente en una dirección perpendicular a los planos de la fractura, las fracturas hidráulicas están orientadas perpendicularmente al esfuerzo principal mínimo que está presente en la roca confinada al momento de la inyección hidráulica (Haseeb & Lecampion, 2020).

En condiciones confinadas las fracturas en la roca no reducen la rigidez ni la resistencia de esta, las fracturas adicionales en el macizo rocoso resultante del precondicionamiento puede resultar en una menor capacidad de la masa rocosa para almacenar energía, lo cual tendrá el efecto de permitir la disipación de energía a niveles más bajos de estrés, lo que disminuye la magnitud de la sismicidad (Cumming-Potvin et al., 2018). Se observa una efectividad del fracturamiento hidráulico para redistribuir la tensión y propagar la cueva en una zona crítica, donde se generaban grandes eventos como el resultado de la concentración de tensiones, también una reducción del número y gravedad de las explosiones de deformación dañinas (Amorer et al., 2022).

Pruebas simples de laboratorio han demostrado que en condiciones confinadas las fracturas en la roca no reducen la rigidez o resistencia de esta (Guo et al., 2020). El modelo de una masa rocosa fracturada hidráulicamente no es trivial y la direccionalidad, así como criterios de fractura, falla de roca, y la masa rocosa, deben tenerse en cuenta.



Figura 3.8: Fragmentación del espécimen fracturado horizontalmente (Stacey 2010).

La efectividad de la fragmentación producida por el fracturamiento hidráulico en las minas se puede evaluar basándose en las cifras de producción tales como la tasa de extracción, la fragmentación de la roca y el porcentaje de obstrucción para su cuantificación (Gray & Gibbons, 2022). Este aumento en la fragmentación mejora tanto la producción como reduce el riesgo alrededor de los niveles de trabajo.

Para asegurar el correcto funcionamiento de la fracturación hidráulica se debe tener en consideración el entorno geotécnico ya que este puede afectar la implementación y el rendimiento de este proceso, también se requiere una metodología de monitoreo in situ que garantice la correcta implementación del diseño definido en el método de minería (Fitzgerald, 2013), donde los parámetros más importantes de monitorear son la calidad de la perforación, los registros de la presión inyectada y la secuencia de la ejecución, además se necesita una correcta ejecución e implementación en los diseños del fracturamiento hidráulico debido a los problemas operativos que pueden ocurrir, los cuales resultan en interferencias y cambios de en el proceso.

Dentro de un mismo volumen de trabajo se pueden identificar zonas con distinto comportamiento geotécnico de aquí viene la importancia de monitorear y llevar un registro de las presiones y los resultados de las presiones de inyección que provocan tanto la ruptura como la propagación de las fracturas (Hagemann et al., 2017).

Una alta fricción en el canal de la fractura resulta en fracturas más cortas de lo esperado por lo que se necesita una alta presión de tratamiento y un aumento de esta (Schmidt & Eberhardt, 2017), este aumento de presión puede generar altas tasas de fuga ya que estas son dependientes de la presión, esto es más común en materiales naturalmente fracturados como el carbón, por lo tanto, un modelo de diseño de fracturas específico para el carbón debería incluir estas observaciones.

Un análisis exhaustivo de la respuesta sísmica inmediata registrada al fracturamiento hidráulico también es útil para determinar la efectividad y puede realizarse directamente después del tratamiento (Jafari et al., 2022). Beneficios demostrados con esta técnica: mejor respuesta sísmica de la roca sólida, aumento de sismicidad de baja magnitud, mayor capacidad de hundimiento, facilitación proceso de hundimiento, variación en las tendencias de tamaño de fragmentación, mejora en los índices operacionales en las áreas donde se aplica (Feng et al., 2021), además mejora la tasa de extracción en el mineral primario, así como reducir el riesgo de bloqueos y la probabilidad de generación de explosiones de aire (Jeffrey et al., 2010).

3.5 Fluidos

Sustancias que pueden deformarse de manera continua bajo la aplicación de esfuerzos cortantes, ya sea en forma de un líquido o de un gas (Munson, 2012).

3.5.1 Viscosidad Dinámica

Se refiere a la resistencia del fluido al flujo, es la constante de proporcionalidad entre la tensión cortante y la tasa de deformación de un elemento de fluido (Chin, 2016).

$$\tau = \mu\gamma \quad (3.1)$$

τ : es el esfuerzo cortante (fuerza por unidad de área).

μ : es la viscosidad dinámica.

γ : es el gradiente de velocidad o la tasa de cizalladura, que es el cambio de velocidad entre capas adyacentes del fluido.

3.5.2 Densidad de un fluido

La densidad (o densidad de masa) de un fluido, se define como la masa del fluido por unidad de volumen (Chin, 2016), por lo tanto, se expresa como:

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (3.2)$$

ρ : es la densidad del fluido (kg/m^3).

m : es la masa de la sustancia (kg).

v : es el volumen de la sustancia (m^3).

3.5.3 Número de Reynolds

Es un número adimensional que caracteriza el tipo de flujo de un fluido (laminar o turbulento) cuando se desplaza a través de una tubería, alrededor de un objeto o en cualquier medio. Es una de las principales herramientas en mecánica de fluidos para predecir patrones de flujo y comportamientos dinámicos (Chin , 2016).

$$Re = \frac{\rho v L}{\mu} = \frac{v L}{\nu} \quad (3.3)$$

ρ : es la densidad del fluido (kg/m^3).

v : es la velocidad media del flujo (m/s).

L : es la longitud característica del sistema, que depende de la geometría (m).

μ : es la viscosidad dinámica del fluido ($\text{Pa}\cdot\text{s}$ o Ns/m^2).

ν : es la viscosidad cinemática (m^2/s).

A partir de este valor se puede caracterizar el tipo de flujo del fluido donde:

- Flujo laminar: $Re \leq 2000$. Para este caso tenemos que el flujo es suave y ordenado, el flujo se mantiene estacionario y se comporta como si estuviera formado por láminas delgadas que interactúan solo en función de los esfuerzos tangenciales existentes.

Flujo laminar



Figura 3.9: Flujo laminar (Chin 2016).

- Flujo de transición: $2000 \leq Re \leq 4000$. Para este caso el flujo presenta características mixtas.
- Flujo turbulento: $4000 \leq Re$. Para este caso tenemos que el flujo es caótico y con mayor mezcla.

Flujo turbulento

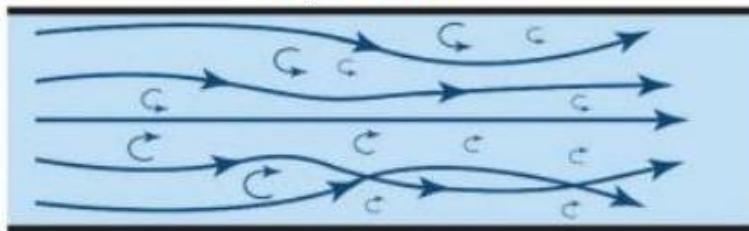


Figura 3.10: Flujo turbulento (Chin 2016).

3.6 Propiedades de la roca

Las propiedades de una roca son las características físicas y mecánicas que determinan su comportamiento ante diferentes condiciones. Estas propiedades permiten entender cómo una roca responde a esfuerzos, presión, temperatura, y su capacidad para almacenar y transmitir

fluidos. Las rocas constan de propiedades físicas, mecánicas, térmicas, eléctricas y magnéticas.

3.6.1 Densidad de la roca

Medida de su masa por unidad de volumen, la densidad de la roca es una propiedad física que está relacionada con su composición mineralógica, porosidad y grado de compactación. Se expresa comúnmente en kilogramos por metro cúbico (kg/m^3) o en gramos por centímetro cúbico (g/cm^3).

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (3.4)$$

ρ : es la densidad de la roca (kg/m^3).

m : es la masa de la roca (kg).

v : es el volumen de la roca (m^3).

3.6.2 Módulo de Young

Medida de rigidez del material, el módulo de Young es una propiedad mecánica que representa la relación entre el esfuerzo y la deformación elástica cuando se aplica una carga, indica cuanta fuerza se necesita aplicar para deformar la roca de manera elástica, en otras palabras, describe la capacidad de la roca para resistir deformaciones cuando se le aplica un esfuerzo.

$$E = \frac{\text{Esfuerzo}}{\text{Deformación}} \quad (3.5)$$

3.6.3 Porosidad

Medida de la cantidad de espacios vacíos presentes en el material rocoso, la porosidad es una propiedad física que representa la capacidad que tiene una roca para almacenar fluidos como

agua o aire. Es una propiedad clave para entender la capacidad de almacenamiento de una roca y su capacidad para transportar fluidos.

$$Porosidad = \frac{Volumen\ de\ vacíos\ (agua+aire)}{Volumen\ sólidos} \quad (3.6)$$

3.6.4 Coeficiente de Poisson

Constante que describe la relación entre la deformación longitudinal y la deformación transversal de un material cuando se somete a una carga, el coeficiente de Poisson es una propiedad mecánica que mide cuanto se encoge o ensancha la roca en dirección perpendicular al esfuerzo aplicado cuando esta se deforma longitudinalmente.

$$\nu = \frac{Deformación\ lateral}{Deformación\ axial} \quad (3.7)$$

3.7 Conductividad hidráulica

Propiedad de los materiales porosos como el suelo o una roca la cual mide la facilidad con la que un fluido puede moverse a través de ellos bajo un gradiente de presión, en otras palabras, es la medida de la capacidad de un material poroso para permitir el paso de un fluido a través de sus poros o fracturas. Diversos factores pueden afectar esta propiedad tales como el tamaño y la distribución de los poros, la viscosidad del fluido, la porosidad, la compactación y la gravedad específica del fluido.

3.8 Sismicidad inducida

Eventos sísmicos provocados por la actividad humana debido a una alteración en el estado tensional, la sismicidad inducida está asociada a acciones tales como operaciones de superficie, extracciones desde la superficie, explosiones de gran tamaño y como es en este caso, como resultado del fracturamiento hidráulico (Birch & Meyer, 2019).

4. METODOLOGÍA

A continuación, se describe la metodología utilizada en este trabajo, representada esquemáticamente en la Figura 4.1. Primero, se realizó una revisión bibliográfica sobre la teoría detrás del fracturamiento hidráulico, lo que permitió formular el modelo y definir los casos de estudio. El proceso seguido consta de seis pasos, los cuales se detallan a continuación.

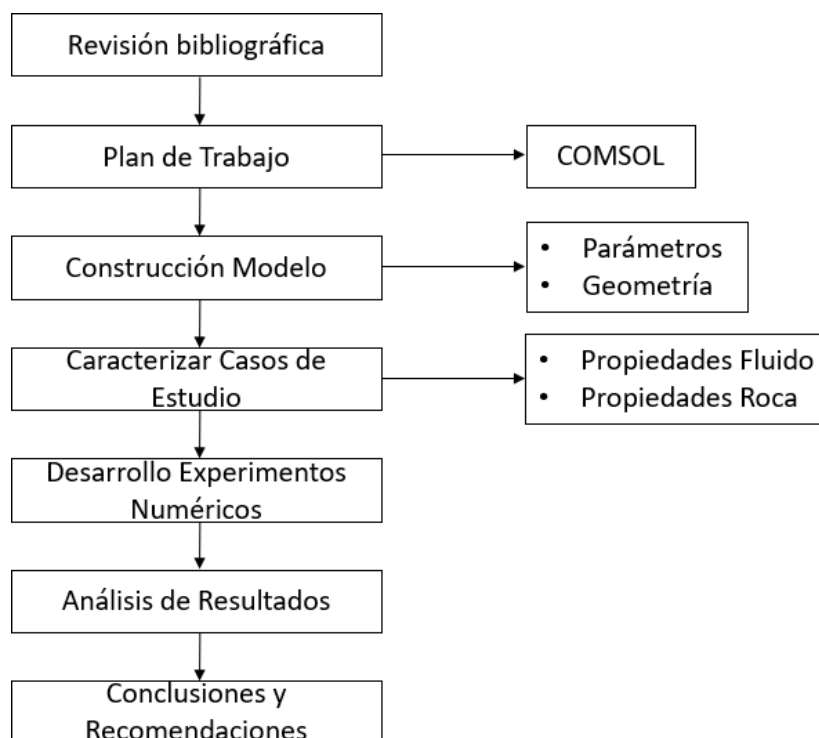


Figura 4.1: Esquema de metodología de trabajo.

4.1 Revisión bibliográfica

El plan de trabajo comenzó con una familiarización del tema de estudio, mediante la búsqueda y recolección de información para comprender esta técnica de preconditionamiento, su aplicación en la minería y el panorama actual de los estudios que hay sobre este tema.

4.2 Plan de trabajo

Luego, se utilizó el software *COMSOL Multiphysics*, una herramienta de simulación que permite modelar y analizar fenómenos físicos. En primer lugar, se estudiaron sus propiedades básicas con el objetivo de desarrollar un modelo que nos permita comprender la técnica de fracturamiento hidráulico. Para ello, se diseñaron casos de estudio con el fin de simular esta técnica y analizar el efecto de las propiedades del fluido y la roca en la eficiencia del fracturamiento hidráulico.

4.3 Construcción modelo

Se creó el modelo con el que se realizarán las simulaciones y los casos de estudio. El diseño geométrico del modelo consistió en dos componentes: una para definir las dimensiones y otra para establecer la geometría de la fractura. Además, se establecieron los parámetros necesarios para caracterizar la rugosidad de la fractura, lo que permitió generar 20 geometrías distintas. Esto nos generará la representación de una fractura dentro de dos placas paralelas donde podremos ir variando la irregularidad para analizar su influencia en el comportamiento del sistema.

4.4 Caracterizar casos de estudio

Se establecieron dos matrices de experimentos numéricos: una para las propiedades de la roca y otra para las propiedades del fluido. Estas matrices se combinarán con las 20 geometrías distintas, dando un total de 500 simulaciones. El propósito de estas matrices es organizar y planificar la ejecución de las simulaciones, abarcando las variables relevantes del fluido y la roca en *COMSOL Multiphysics*. Estos factores fueron seleccionados con el fin de evaluar su influencia en los resultados de interés en las simulaciones, donde también se buscará identificar posibles interacciones entre las variables.

4.5 Desarrollo experimentos numéricos

Se presenta un modelo de una fractura entre dos placas paralelas, donde el fluido presente se considera viscoso e incompresible, obteniendo así un modelo del flujo potencial de un fluido en una fractura de roca. Los resultados permiten estimar el comportamiento del fluido dentro de la fractura en distintos casos de estudio, esto con el fin de recopilar datos para determinar y clasificar las variables de estudio y su incidencia en el modelo.

4.6 Análisis de resultados

Una vez finalizadas las simulaciones y obtenidos los resultados, se procedió al análisis mediante el procesamiento de datos, donde se procesaron los campos de velocidad del flujo y la conductividad hidráulica a lo largo de la fractura. Se identificaron los puntos de máximo valor para cada variable en el eje de flujo, y se compararon entre las distintas simulaciones. Este análisis permitió observar tendencias generales asociadas a la geometría de la fractura, las propiedades del fluido y de la roca presente. El procesamiento de datos se realizó fuera de COMSOL, mediante herramientas de análisis numérico y gráficos, con el fin de facilitar la comparación entre los distintos escenarios definidos.

4.7 Conclusiones y recomendaciones

Se presentan los resultados obtenidos para cada irregularidad de las fracturas y el comportamiento del fluido dentro de ellas. A partir de esto, se exponen las conclusiones del estudio y se proponen posibles recomendaciones para futuras investigaciones.

5. DESARROLLO

Como se mencionó anteriormente, este estudio se basa en la creación de un modelo virtual en *COMSOL Multiphysics* con el fin de ejecutar simulaciones que analicen el comportamiento de un fluido dentro de una fractura en un macizo rocoso. A través de este modelo, se evalúa la influencia de diferentes parámetros del fluido y de la roca en la propagación del fracturamiento hidráulico.

5.1 Construcción modelo

Para ello, se diseñó la geometría del modelo donde se llevarán a cabo las simulaciones, configurando los parámetros de la geometría y las propiedades físicas tanto del macizo rocoso como de la fractura.

5.1.1 Diseño Geometría

El diseño de la geometría se centra en replicar un macizo rocoso con una fractura como zona de interés. La figura se muestra a continuación:

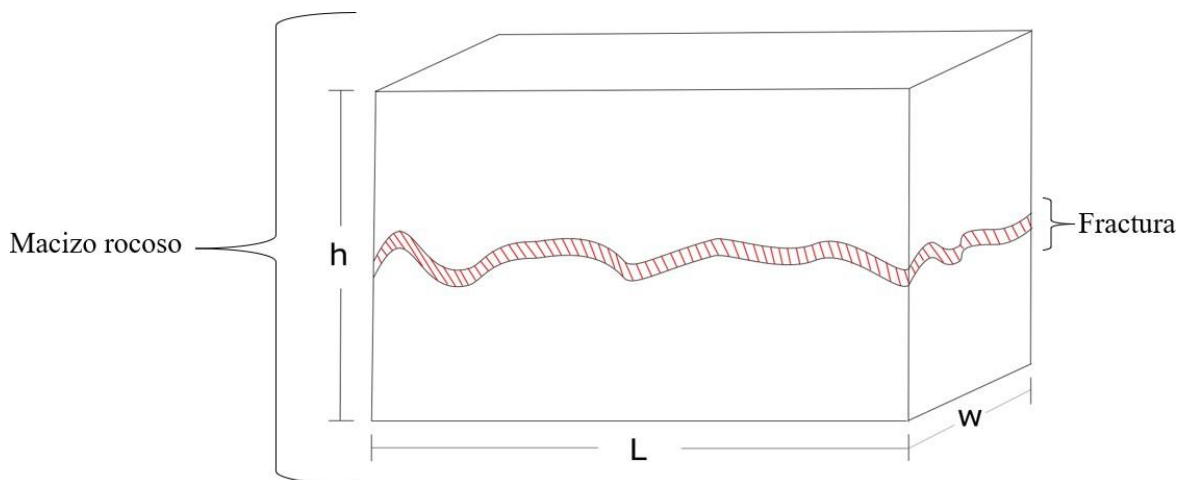


Figura 5.1: Representación de macizo rocoso.

Por consiguiente, se establece como zona de interés la fractura del macizo rocoso, representada por las líneas rojas en la figura. Para modelar esta fractura en *COMSOL Multiphysics*, es necesario definir las dimensiones, crear las componentes geométricas correspondientes, establecer las variables para los cálculos, asignar los parámetros globales y definir las propiedades de los fluidos y de las rocas a utilizar. Además, se debe configurar toda la matemática y física necesarias para ejecutar las simulaciones.

En cuanto a la geometría, se crearán dos componentes que permitirán modelar la fractura. En primer lugar, se definirá la primera componente del modelo, que establecerá las dimensiones de la fractura dentro del macizo rocoso.

Tabla 5.1: Dimensiones macizo rocoso.

Lado	Valor	Unidad
Ancho	80	[mm]
Largo	50	[mm]

Luego, se definirá la segunda componente del modelo, la cual permitirá la variación de la irregularidad de la fractura. Para ello, se generará una superficie paramétrica dentro de las dimensiones establecidas en la primera componente. Esta superficie paramétrica nos permitirá crear superficies en el espacio tridimensional utilizando ecuaciones paramétricas, esto nos permitirá definir geometrías complejas y personalizadas basadas en funciones matemáticas.

La superficie se describirá en términos de dos parámetros independientes, los cuáles definen las coordenadas x , y , z . En este caso, se emplearon los parámetros s_1 y s_2 , que recorren los valores de 10 a 90 y de 20 a 70, respectivamente. Esta metodología permite modelar fracturas con distintos grados de irregularidad que no pueden representarse mediante enfoques geométricos estándar.

Tabla 5.2: Parámetros superficie paramétrica.

Parámetro	Mínimo	Máximo
s1	10	90
s2	20	70

Tabla 5.3: Funciones paramétricas que generaran las coordenadas.

Expresión	Valor
X	s1
Y	s2
Z	Data(s1,s2)

Una vez creado el modelo de la fractura y definida la superficie paramétrica, se utilizarán los nodos para modificar y generar las distintas geometrías internas de la fractura. Los nodos son puntos específicos en el espacio utilizados en definiciones geométricas, especialmente en el contexto de curvas y superficies paramétricas.

Al ajustar el número máximo de nodos en los parámetros de la superficie paramétrica, es posible modificar la geometría de la fractura dentro del modelo. A partir de esta variación, se generarán 20 configuraciones geométricas distintas, estableciendo un rango para el número máximo de nodos entre 2 y 100. El valor mínimo de 2 representa una geometría con menor irregularidad, mientras que el valor máximo de 100 define el umbral a partir del cual no se observan cambios adicionales en la rugosidad de la fractura.

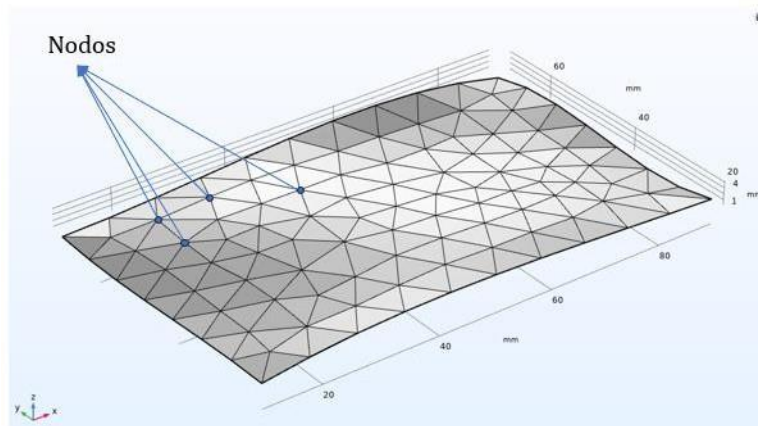


Figura 5.2: Nodos superficie paramétrica.

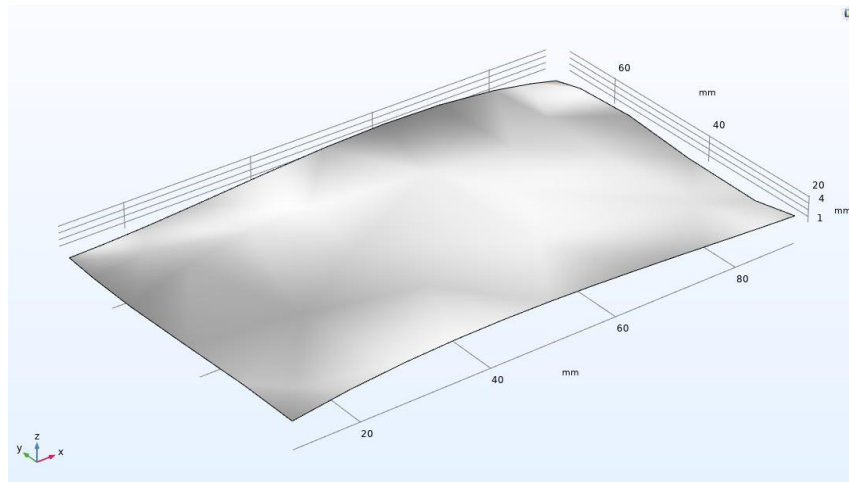


Figura 5.3: Geometría de la fractura.

Con la fractura diseñada en el modelo, se agregó la geometría de un bloque a la fractura, esto con el fin de incorporar propiedades físicas y del material que interactuarán con el fluido. De esta manera se podrá observar cómo influyen las propiedades de la roca en el modelo.

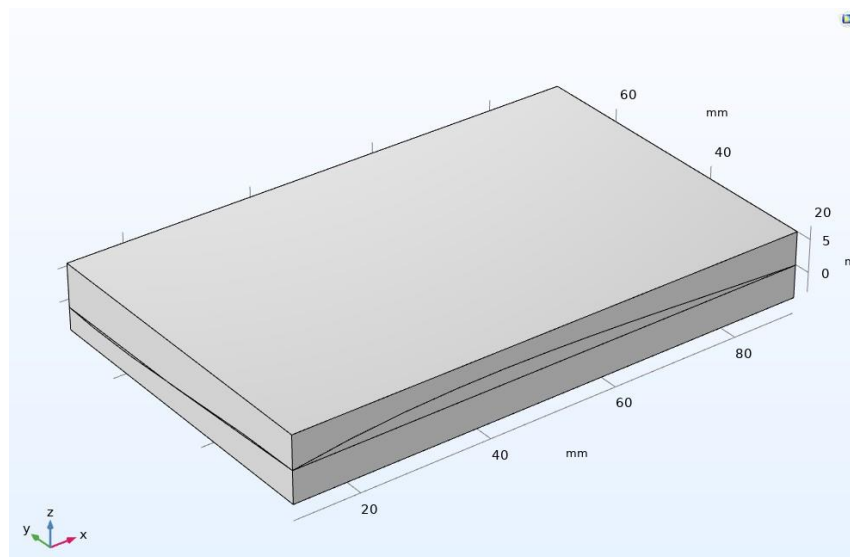


Figura 5.4: Geometría bloque agregado a la fractura.

5.1.2 Configuración parámetros

Una vez diseñada la geometría del modelo, se configuran los parámetros que definen la simulación, en particular, los materiales y sus propiedades. Para ello, se establecen dos matrices de experimentos numéricos con el fin de abarcar las variables relevantes para las

simulaciones en *COMSOL Multiphysics*. Estos factores fueron seleccionados con el fin de evaluar su influencia en los resultados de interés.

Inicialmente, en la configuración de los parámetros del fluido, se definen los siguientes valores de densidad y de viscosidad dinámica del fluido:

Tabla 5.4: Configuración parámetros del fluido.

Nombre	Expresión	Valor	Descripción
rho	1000[kg/m ³]	1000 kg/m ³	Densidad fluido
mu	0.001[Pa*s]	0.001 Pa*s	Viscosidad dinámica

Una vez configurado el fluido, se agrega un material personalizado en el programa y se van ajustando las propiedades según la roca que se vaya a utilizar en la simulación.

Tabla 5.5: Configuración parámetros de la roca.

Propiedad	Variable	Valor	Unidad	Propiedad
Coefficiente de Poisson	un	0,28	1	Básica
Porosidad	epsilon	1	1	Básica
Densidad	rho	2700	kg/m ³	Básica
Módulo de Young	e	50	GPa	Básica

Una vez creada la geometría de la fractura, se definen las variables de cálculo del modelo, las cuales podrán ser representadas gráficamente. A continuación, se presentan dichas variables:

Tabla 5.6: Variables del modelo.

Nombre	Expresión	Unidad	Descripción
a	data(x,y)/1000	m	Apertura
Ks	$a^2 \cdot \rho \cdot g \cdot \text{const} / \mu$	m/s	Conductividad hidráulica
Ts	$Ks \cdot a$	m ² /s	Transmisividad
u	$-Ks \cdot Hx$	m/s	Velocidad, componente x
v	$-Ks \cdot Hy$	m/s	Velocidad, componente y
U	$\sqrt{u^2 + v^2}$	m/s	Magnitud velocidad

El tamaño de los elementos de la malla en *COMSOL Multiphysics* es un aspecto clave para obtener soluciones precisas y eficientes en las simulaciones, ya que influye directamente en la precisión de los resultados y el tiempo de cálculo. Para este modelo, se configuró un tamaño de malla extrafino.

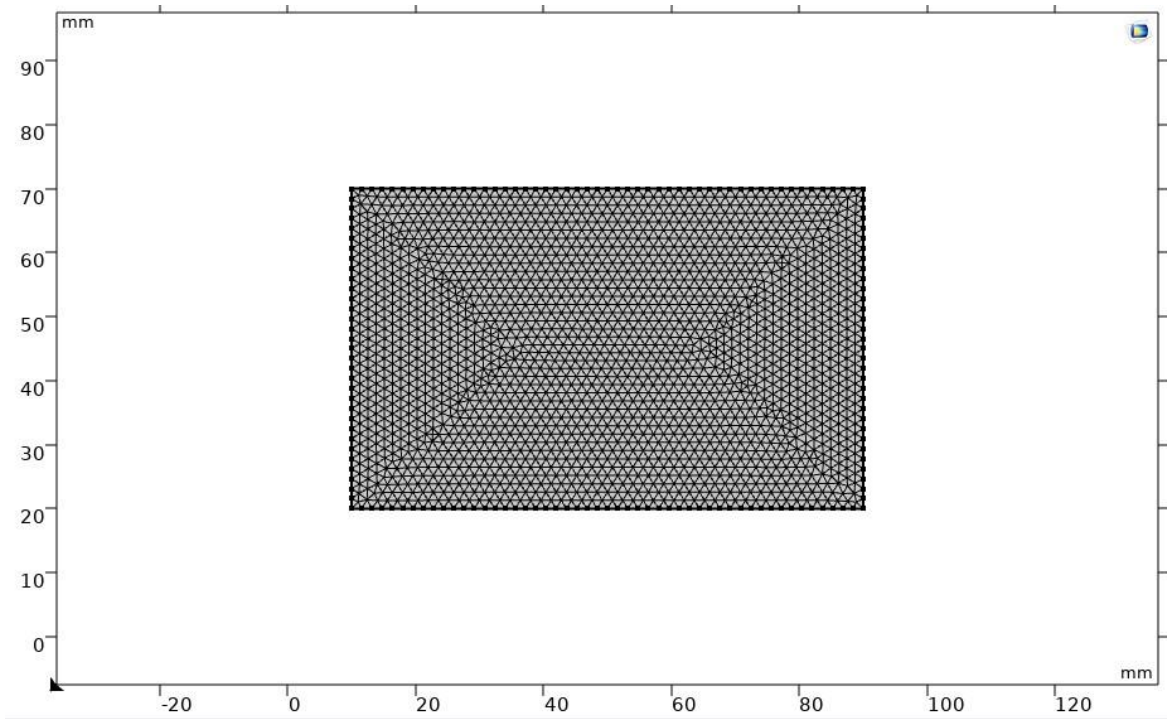


Figura 5.5: Malla con elementos extrafinos.

Una vez creados todos los objetos y configurado el modelo, se ejecuta la simulación. Tras definir la física, la geometría, los materiales, las condiciones de contorno, la malla y el estudio, se inicia el proceso de resolución numérica del problema mediante el Método de Elementos Finitos. Esto permite representar la fractura y su flujo, además de visualizar en la superficie de la fractura las magnitudes de las velocidades las cuáles están representadas por los colores de la tabla ubicada a la derecha de la fractura.

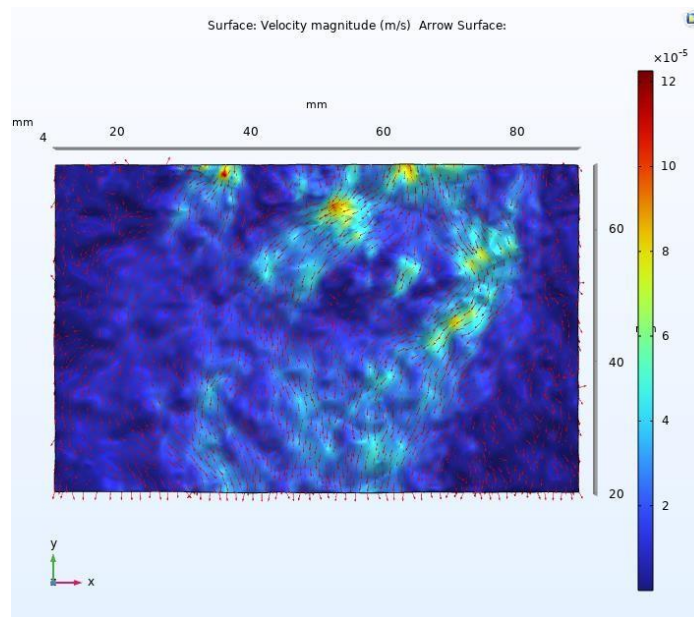


Figura 5.6: Vista x-y del modelo.

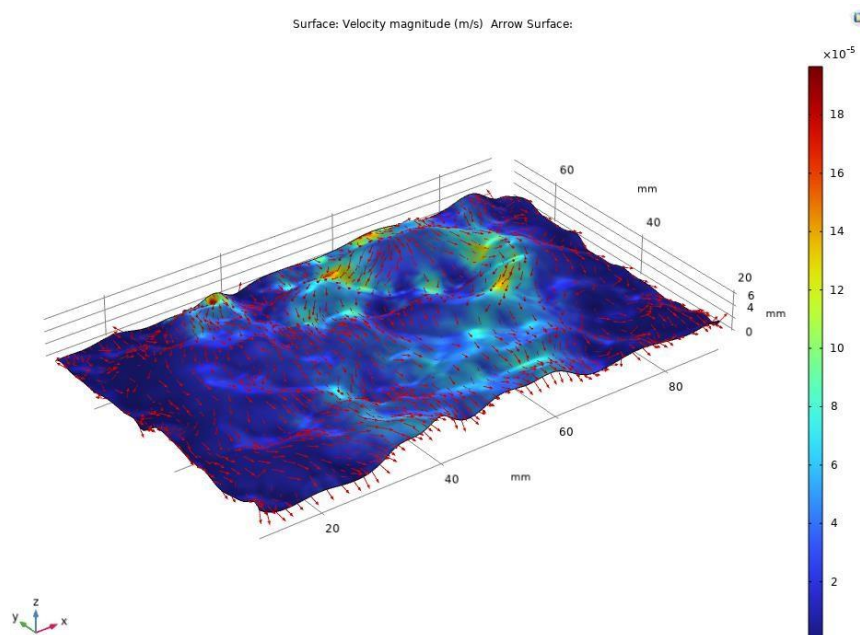


Figura 5.7: Vista velocidad 3D del modelo.

La fractura se modela como dos placas paralelas separadas por una pequeña apertura. El fluido se considera viscoso e incompresible, por lo que se adopta un modelo de flujo potencial en una fractura de roca, basado en la ecuación de Reynolds.

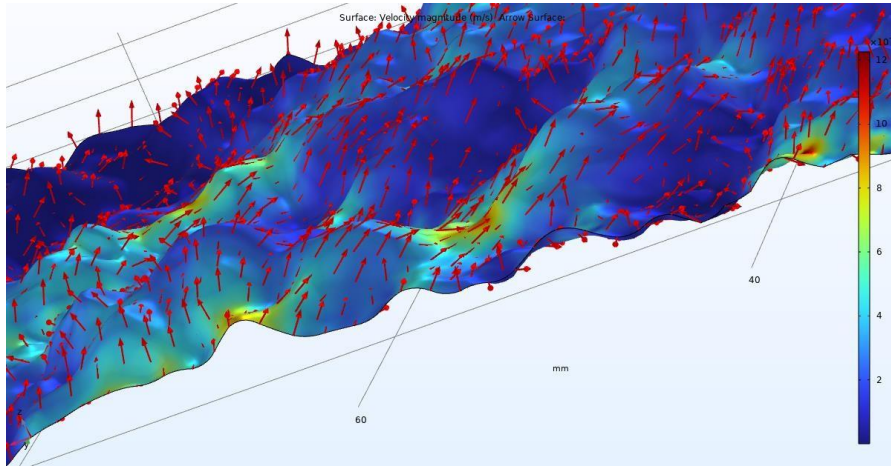


Figura 5.8: Vista 3D ampliada del modelo.

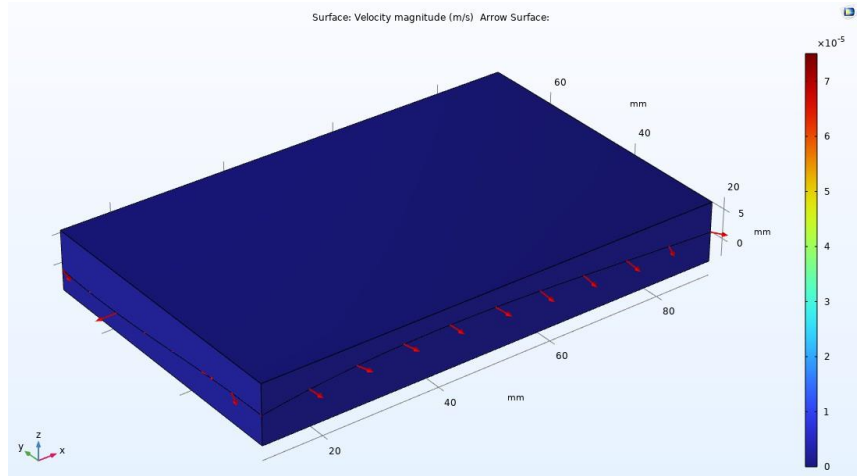


Figura 5.9: Representación macizo rocoso en *COMSOL Multiphysics*.

5.2 Matriz experimentos numéricos

A partir de esto, se presentan dos matrices de experimentos numéricos. Los factores A y B corresponden a las propiedades del fluido inyectado, mientras que los factores C, D, E y F están asociados a las propiedades de la roca. En cuanto al fluido, se trabajará exclusivamente con agua, pero a diferentes temperaturas: 5, 20, 30, 40 y 50 grados. Para las rocas, se considerarán cinco tipos: granito, caliza, cuarcita, arenisca y esquisto.

Tabla 5.7: Matriz experimentos numéricos para el tipo de fluido.

Simulación	Factor A (Densidad fluido)	Factor B (Viscosidad dinámica fluido)
Agua 5°C	1000 $\frac{kg}{m^3}$	1,518 mPa·s
Agua 20°C	998,2 $\frac{kg}{m^3}$	1,002 mPa·s
Agua 30°C	995,7 $\frac{kg}{m^3}$	0,798 mPa·s
Agua 40°C	992,2 $\frac{kg}{m^3}$	0,653 mPa·s
Agua 50°C	988 $\frac{kg}{m^3}$	0,547 mPa·s

Tabla 5.8: Matriz experimentos numéricos para el tipo de roca.

Simulación	Factor C (Coeficiente de Poisson)	Factor D (Porosidad)	Factor E (Módulo de Young)	Factor F (Densidad roca)
Granito	0.28	1 %	50 G·Pa	2700 $\frac{kg}{m^3}$
Caliza	0.21	10 %	55 G·Pa	2400 $\frac{kg}{m^3}$
Cuarcita	0.16	0.3 %	24 G·Pa	2580 $\frac{kg}{m^3}$
Arenisca	0.28	15 %	2.75 G·Pa	2300 $\frac{kg}{m^3}$
Esquisto	0.2	5 %	6,5 G·Pa	2000 $\frac{kg}{m^3}$

5.3 Procesamiento de datos

Procedimiento para la extracción y procesamiento de datos de las simulaciones:

1. Tras finalizar las simulaciones, los datos obtenidos se exportan en formato de texto desde el programa *COMSOL Multiphysics*. Estos archivos contienen información detallada sobre las variables analizadas. La exportación en formato de texto nos permite un análisis adicional en un software externo, facilitando la comparación de los casos de estudio mediante herramientas gráficas.

```

agua 50 100 litros granizo: Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
Modelo: modelo en que se puede evaluar la linea.mph
Version: COMSOL 6.0.0.318
Date: Oct 20 2024, 00:55
Dimension: 3
Nodes: 1244
Expressions: 1
Description: Slice
X Y Z Velocity magnitude
90 20.33333333333333 0.9253009702171011 3.232668373911127E-7
89.45386181384265 20.33333333333333 0.7580475941440866 3.7808169753721184E-7
89.53321128164445 20.33333333333333 0.759440736824583 3.900858157122798E-7
89.55268837530409 20.33333333333333 0.924290737372122 6.666079389951224E-7
89.64303977849476 20.33333333333333 0.7577329582537835 2.82611448977103E-7
88.294423383731 20.33333333333333 1.123070085272324 5.71266743775120E-7
87.7823955644809 20.33333333333333 1.568615883334532 9.25676302025115E-7
86.167619669896 20.33333333333333 1.2268725844669375 6.31113912840995E-7
87.39692833402651 20.33333333333333 1.9368094093180737 1.4697852876186493E-6
87.3783174989122 20.33333333333333 1.950170654734292 1.33149779620184E-6
86.65890720778628 20.33333333333333 2.544518224944316 1.843544587470833E-6
86.72440301581618 20.33333333333333 2.493467577342976 1.7950267921649317E-6
87.0680899649435 20.33333333333333 2.223694413842422 1.5299831553380332E-6
86.01418091248396 20.33333333333333 2.78385604818274096 2.43329812803255E-6
86.38795603513793 20.33333333333333 2.742855090788911 1.9816791783252403E-6
85.82188301890043 20.33333333333333 2.737572952362578 2.346521346808996E-6
85.6404418292991 20.33333333333333 2.68306205266878 2.2107715299999E-6
85.238704620307 20.33333333333333 2.465191406198424 1.888984664056583E-6
84.83095648823405 20.33333333333333 2.3853011663999538 1.57789105386672E-6
84.42320514471742 20.33333333333333 2.395184039036393 1.49591392255405157E-6
83.87132571235517 20.33333333333333 1.832562458954473 8.03246529562373E-7
83.3801832548111 20.33333333333333 2.156678392284559 1.068411588478256E-6
83.4038104472422 20.33333333333333 2.1721910253450665 1.084965058217817E-6
83.9889736539410 20.33333333333333 2.49526349408046135 1.5246883362679356E-6
83.684842081709 20.33333333333333 2.358587396293521 1.3017024626873956E-6
82.7849523251991 20.33333333333333 1.5194186832944099 1.1388796262975085E-6
82.59686995399 20.33333333333333 1.358425416876632 1.080293381647325E-6
82.52027859847418 20.33333333333333 1.2940268354836273 1.7286934593640337E-6
82.25560482442839 20.33333333333333 1.1264904641226445 1.952613730018883E-6
81.60845336434662 20.33333333333333 0.907116097186317 2.7827144959130004E-6
81.6254239200892 20.33333333333333 0.9162730054965903 2.313259361815736E-6
81.94051437225878 20.33333333333333 1.0157203444262979 1.94979364723776E-6
82.042290853225 20.33333333333333 1.062918385374345 2.09263804069085E-6
81.10978366091621 20.33333333333333 0.7675770719135131 3.77885761577826E-6
80.7928450586075 20.33333333333333 0.628923289911867 3.6515675908414315E-6
80.4759253088939 20.33333333333333 0.4823881016199464 2.637866740013678E-6
80.88826725725126 20.33333333333333 0.304804576111958 2.455500389303721E-6
80.0726748613853 20.33333333333333 0.28942087978272 2.45941437954415E-6
79.76215445525818 20.33333333333333 0.283233100173304 2.2720163797365E-6
79.43604171408104 20.33333333333333 0.19240982495345375 2.157242542495713E-6
79.09160266281886 20.33333333333333 0.22473565121978312 1.1239820158932573E-6
78.7555363309002 20.33333333333333 0.2896113403159814 1.056159837646393E-6
78.4722342551109 20.33333333333333 0.40158454123845044 8.798074971549611E-7
77.74276242282613 20.33333333333333 0.639989304170258 2.012419416644887E-6
78.00138329427578 20.33333333333333 0.5546174223846455 1.1983497162101808E-6

```

Figura 5.10: Archivos extraídos desde *COMSOL Multiphysics*.

- Para interpretar los resultados, se generaron gráficos representativos de las simulaciones realizadas. Se desarrollaron códigos para visualizar de los datos exportados y comparar los diferentes escenarios, lo que permitió identificar tendencias claves en la propagación del fluido y su interacción con el medio.

```

1
2 import matplotlib.pyplot as plt
3
4 # Lista de rutas de archivos que quieres abrir
5 archivos = []
6
7 # Leer cada archivo y crear un gráfico por cada uno
8 for i, ruta in enumerate(archivos, start=1):
9     X = []
10    Velocity = []
11
12    with open(ruta, "r") as archivo:
13        for linea in archivo:
14            # Ignorar líneas vacías o comentarios
15            if not linea.strip() or linea.startswith("#"):
16                continue
17
18            columnas = linea.split()
19            if len(columnas) >= 4:
20                try:
21                    X.append(float(columnas[0]))
22                    Velocity.append(float(columnas[3]))
23                except ValueError as e:
24                    print(f"Error al procesar la línea: '{linea.strip()}'. Detalle: {e}")
25
26 # Crear una figura para cada archivo
27 plt.figure(figsize=(8, 5))
28 plt.plot(X, Velocity, marker='o', ms=8, mec='black', color='limegreen', linewidth=0, label='Velocidad')
29
30 # Añadir títulos y etiquetas
31 plt.title(f"Gráfico {i}: {ruta.split('/')[-1]}")
32 plt.xlabel("Eje X (mm)")
33 plt.ylabel("Velocidad (m/s)")
34 plt.grid(True)
35 plt.legend(loc='best')
36
37 # Mostrar la gráfica
38 plt.show()

```

Figura 5.11: Código *Python* para graficar.

6. RESULTADOS Y ANÁLISIS

En este capítulo se presentan y analizan los resultados obtenidos a partir de las simulaciones realizadas en *COMSOL Multiphysics*. Mediante la variación de distintos parámetros, como la irregularidad de la fractura y las propiedades hidráulicas del fluido, se ha evaluado el comportamiento del flujo dentro de la fractura en diferentes condiciones.

El objetivo de este análisis es identificar tendencias, comparar los efectos de las irregularidades en la velocidad del fluido y la conductividad hidráulica, y establecer relaciones entre las características geométricas de la fractura y el comportamiento hidráulico. Para interpretar los resultados, se generaron gráficos representativos de las simulaciones.

6.1 Resultados de las simulaciones

Para analizar con mayor precisión la magnitud de las velocidades y la conductividad hidráulica del fluido, es que se hace uso de la herramienta *Slice* de *COMSOL Multiphysics*. Esta herramienta de visualización permite examinar secciones específicas de un modelo 3D, facilitando el análisis de resultados internos que pueden no ser visibles en la superficie externa del modelo. En este caso, se utiliza esta herramienta para inspeccionar la variable de la velocidad al interior del modelo. A partir de esto, se realizan cortes en el plano x-z para lograr un mejor análisis del flujo en distintos puntos y/o orientaciones.

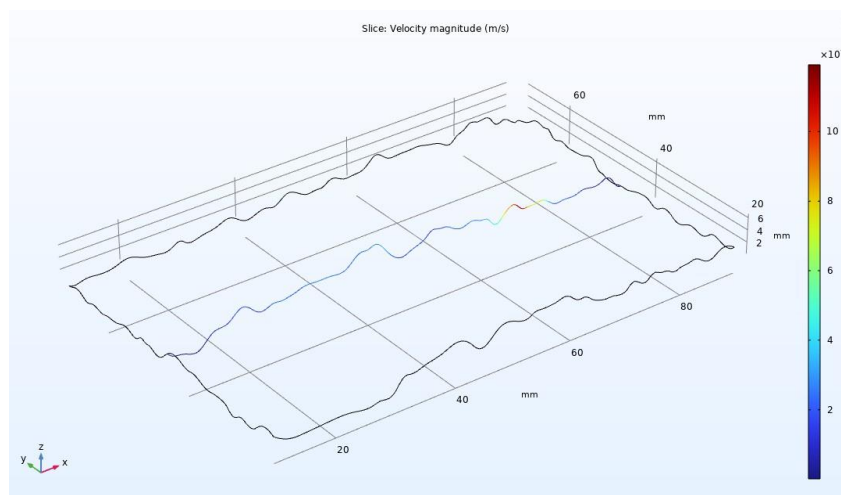


Figura 6.1: 1 corte plano x-z.

Al aplicar el corte y procesar los datos que interceptan con el plano, se obtienen gráficos de la velocidad en función de las coordenadas.

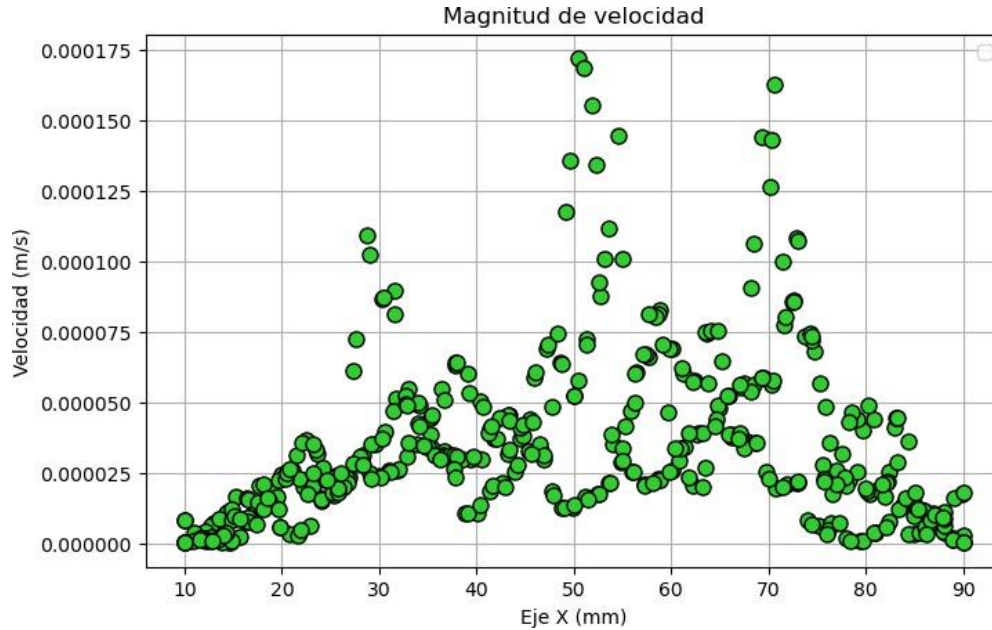


Figura 6.2: Gráfico al aplicar 1 corte en el plano x-z.

Este gráfico muestra la magnitud de la velocidad del fluido a lo largo del eje X de la fractura, relacionando la posición con su velocidad correspondiente. Se observa una distribución irregular de la velocidad del fluido a lo largo del eje X, con variaciones significativas que reflejan los cambios de rugosidad del modelo. Además, en el perfil de velocidad, esta tiende a cero en los bordes de la fractura.

Las fluctuaciones en la velocidad se deben a las variaciones en la geometría de la fractura, lo que genera zonas con mayor o menor restricción al flujo, donde si hay regiones de mayor o menor permeabilidad dentro de la fractura, se generan las diferencias en la velocidad del fluido. El gráfico indica que la velocidad del fluido dentro de la fractura no es uniforme, sino que está influenciada por la rugosidad y las propiedades hidráulicas del medio. La presencia de picos de velocidad sugiere que existen zonas donde el flujo se acelera, lo que puede ser relevante para la caracterización de la fractura.

Para analizar el comportamiento del fluido a lo largo del eje Y, se aplicarán tres cortes en el plano x-z del modelo.

Al aplicar estos cortes, también se aplican al bloque. Sin embargo, dado que no hay flujo en esa zona, las velocidades con valor cero se eliminan del conjunto de datos extraído, permitiendo graficar únicamente las velocidades dentro de la fractura.

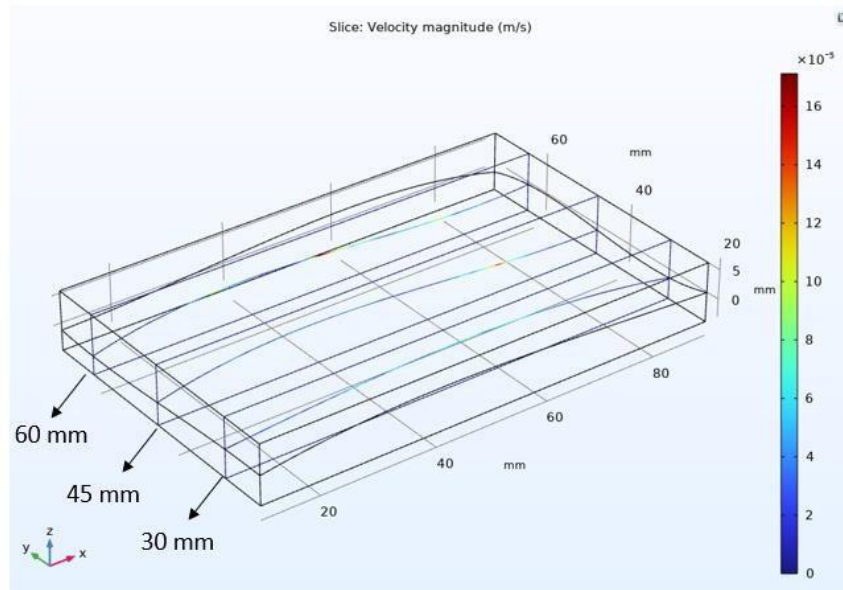


Figura 6.3: Cortes plano x-z en el bloque.

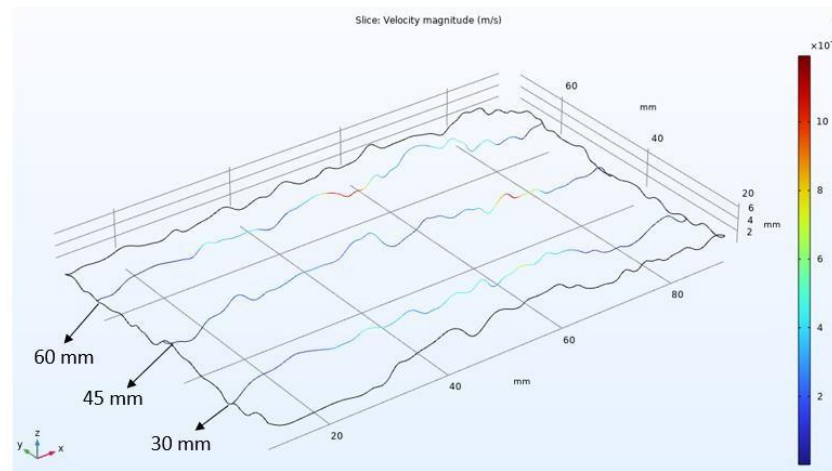


Figura 6.4: 3 cortes plano x-z.

Se observa la variación del flujo en función de la posición en los ejes X e Y, donde se ven patrones ondulatorios en la distribución de velocidad. Esto indica que la fractura presenta variaciones tanto en su apertura como en su rugosidad. Además, se identifican zonas localizadas con mayor velocidad, lo que sugiere la presencia de canales preferenciales dentro de la fractura, donde el fluido se desplaza con menor resistencia.

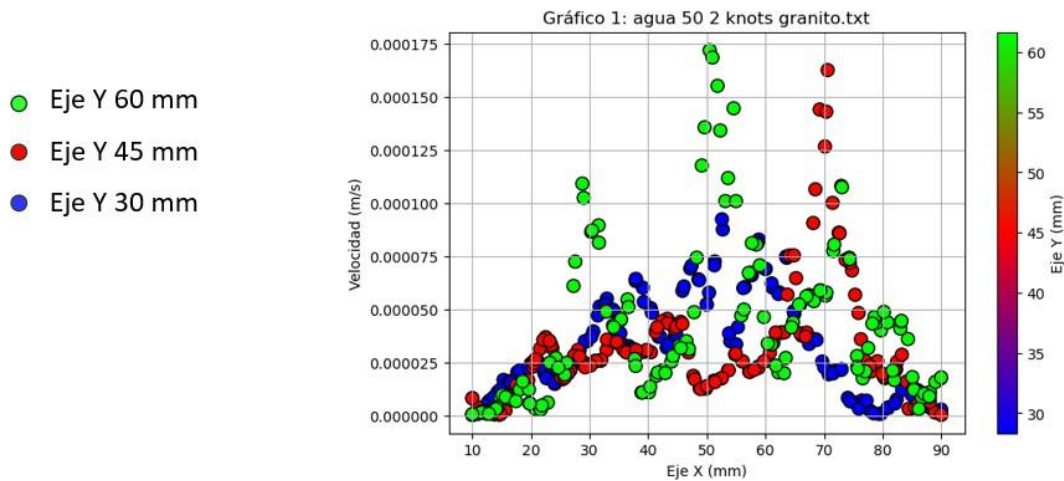


Figura 6.5: Gráfico de velocidad al aplicar 3 cortes en el plano x-z.

Este gráfico representa la magnitud de la velocidad del fluido en función de la posición en el eje X para distintos niveles en el eje Y:

- Inicio de la fractura: Color verde.
- Mitad de la fractura: Color rojo.
- Final de la fractura: Color azul.

Se observa un incremento significativo en la velocidad en torno a $X = 50$ milímetros, lo que indica que en esa región el fluido encuentra menor resistencia y se acelera. Los valores de velocidad más bajos se distribuyen en varias zonas, especialmente en los extremos de la fractura (cuando el eje X es menor 20 milímetros y cuando el eje X es mayor a 80 milímetros), lo que sugiere posibles áreas de menor conductividad hidráulica.

Los datos en la zona final de la fractura presentan velocidades menores en comparación con los otros niveles, lo que podría indicar que la zona final de la fractura tiene una apertura más reducida o mayor rugosidad. Por otro lado, los datos del inicio de la fractura muestran velocidades generalmente más altas, lo que sugiere una mayor apertura en esa zona o una mejor conductividad hidráulica. En la zona intermedia de la fractura se presenta un comportamiento mixto el cual varía dependiendo de la posición en el eje X.

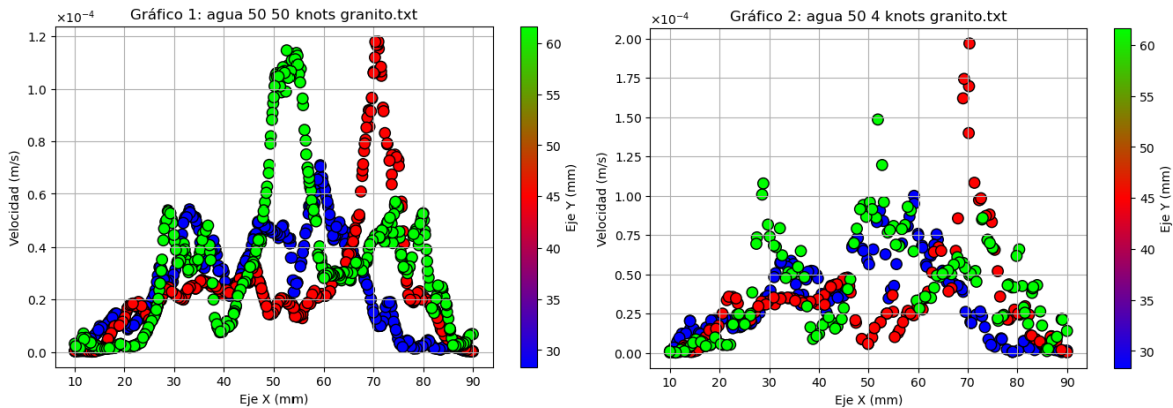


Figura 6.6: Influencia cambio de geometría

- ▲▲▲ Gráfico Agua 50°C 2 knots granito
- Gráfico Agua 40°C 2 knots granito

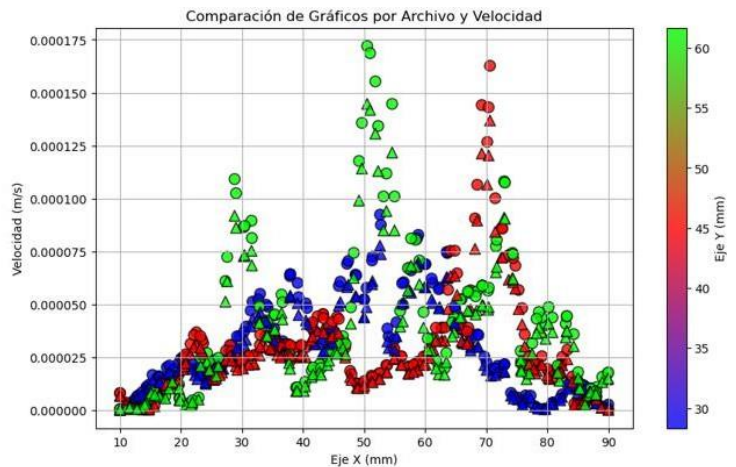


Figura 6.7: Gráfico para comparar archivos.

Al comparar dos simulaciones en las que se varió el tipo de fluido mientras se mantenían constantes tanto la irregularidad de la fractura como el tipo de roca, se observa como el tipo de fluido influye en la magnitud de la velocidad.

Es importante recordar que, a medida que aumenta la temperatura del agua, disminuyen tanto su densidad como su viscosidad dinámica. Considerando esto, los resultados muestran que las propiedades analizadas en este estudio son directamente proporcionales a la magnitud de la velocidad del fluido, se observa que, a menor densidad y viscosidad dinámica, se presentan velocidades más bajas dentro de la fractura.

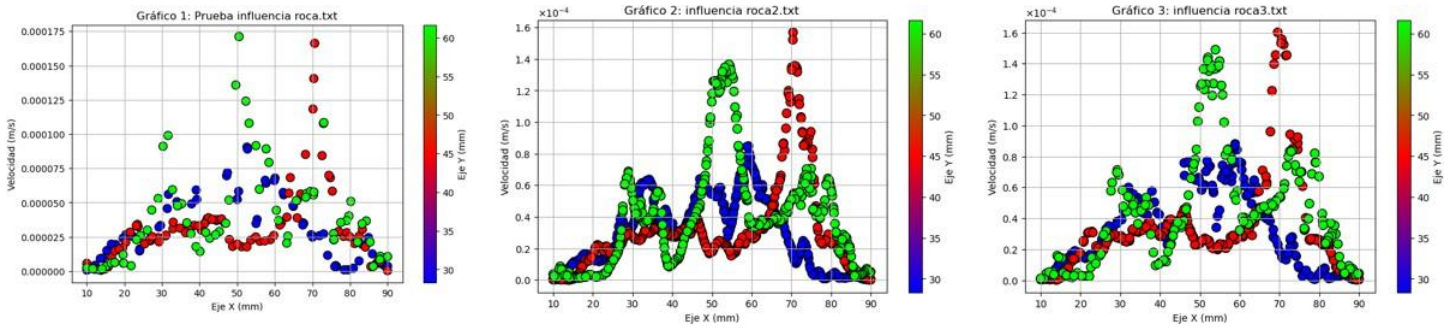


Gráfico 6.8: Influencia propiedades de la roca.

Se aplicaron planos paralelos a la dirección de la velocidad para analizar su comportamiento a lo largo del eje Y del modelo. Esto permite, además, observar los rangos de velocidad que adopta cada slice en el modelo.

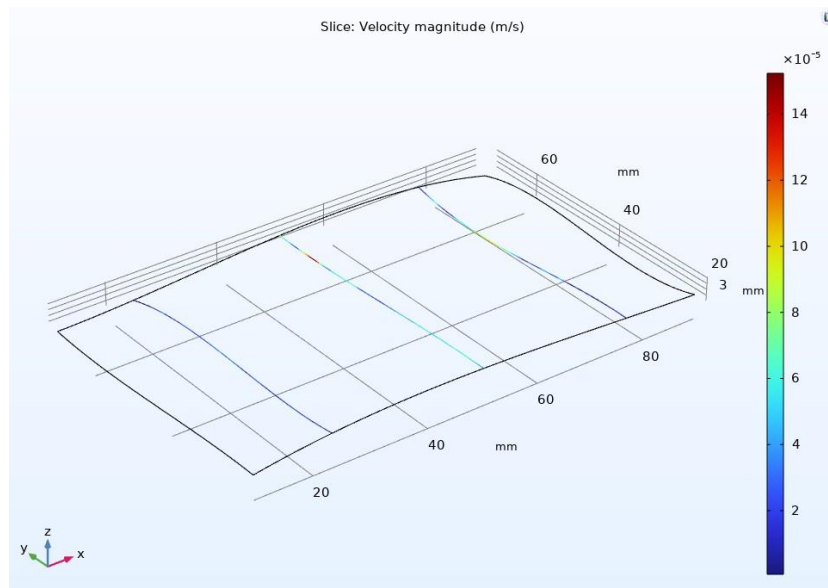


Figura 6.9: 3 cortes plano y-z.

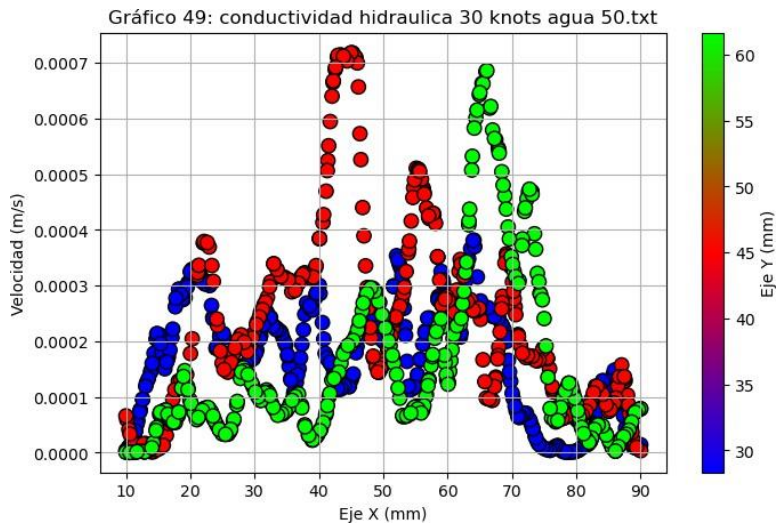


Figura 6.12: Gráfico conductividad hidráulica.

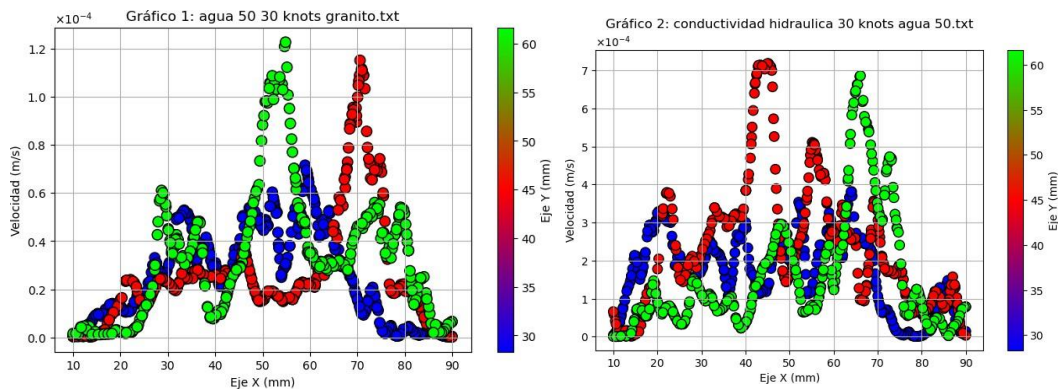


Figura 6.13: Magnitud de velocidad v/s conductividad hidráulica.

Al comparar los gráficos de velocidad y conductividad hidráulica, se observa que los puntos donde se alcanzan las mayores velocidades son distintos. En el caso de los gráficos de velocidad, el máximo se encuentra en los 60 milímetros del eje Y, que corresponde al inicio de la fractura. En cambio, para los gráficos de conductividad hidráulica, el máximo se sitúa a los 45 milímetros del eje Y, que corresponde a la mitad de la fractura.

A pesar de estas diferencias, se mantiene que las menores velocidades y los valores más bajos de conductividad hidráulica coinciden en ambos gráficos, situándose en los 30 milímetros del eje Y, donde termina la fractura.

Para adaptar el cálculo al momento de aplicar Reynolds en fracturamiento hidráulico en vez de una tubería se cambia el diámetro de un tubo por el valor de la apertura de la fractura, al realizar esto se logró comparar el número de Reynolds y los knots de la fractura del modelo para ver como influye la irregularidad de la fractura en el flujo del fluido inyectado.

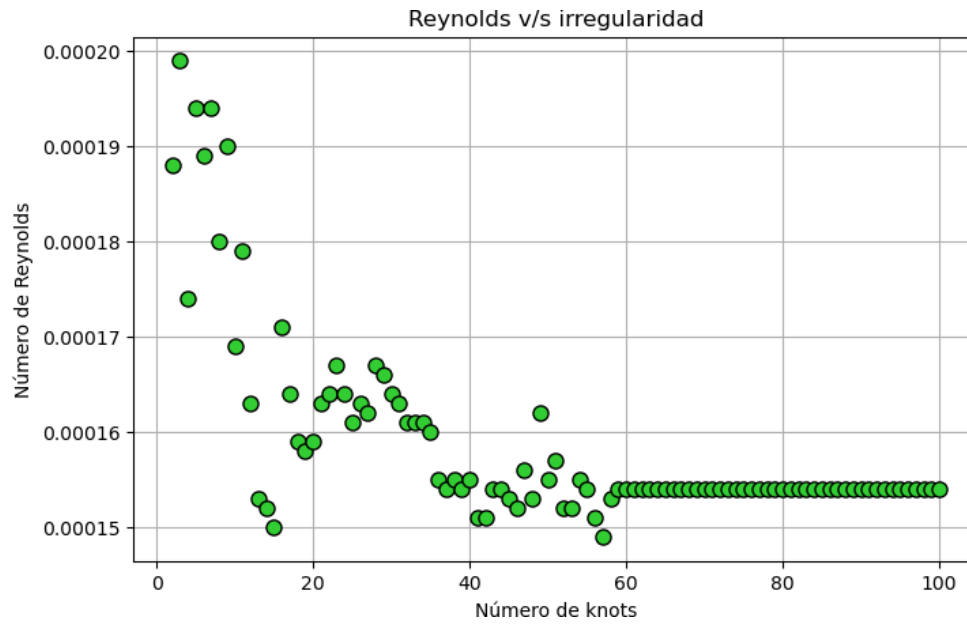


Figura 6.14: Número de Reynolds según irregularidad de la fractura.

A partir de esto se puede ver que a medida que la fractura es más irregular el número de Reynolds disminuye al punto de mantenerse constante en las geometrías con pequeña variación.

Debido a las magnitudes de velocidad de este modelo se puede observar que en todas las geometrías se presenta un flujo laminar, esto significa que las partículas del fluido se mueven en capas paralelas y ordenadas, sin mezclarse entre sí, esto debido a que las fuerzas viscosas predominan sobre las fuerzas inerciales, el flujo laminar nuevamente nos confirma el perfil de velocidad parabólico del modelo. La disminución del número de Reynolds a medida que se hace más irregular la fractura se debe a que las mismas geometrías complejas y cambios bruscos en el contorno provoquen mayor resistencia al flujo además del aumento de la fricción entre el fluido y la superficie fractura.

6.2 Implicaciones y aplicabilidad del estudio

Los resultados obtenidos en este estudio no solo permiten comprender el comportamiento del flujo dentro de una fractura con distintas irregularidades, sino que también pueden tener aplicaciones prácticas en el ámbito del fracturamiento hidráulico en minería. En particular, este análisis puede contribuir a la optimización del monitoreo y control del fluido durante el proceso de inyección, permitiendo anticipar su comportamiento en función de las condiciones geológicas específicas.

La modelación numérica realizada en este estudio puede servir como base para el desarrollo de herramientas de monitoreo. Si se dispone de datos de presión y caudal, el análisis de las tendencias de flujo dentro de las fracturas puede facilitar la predicción del comportamiento hidráulico y la optimización de los parámetros operacionales en tiempo real.

Por ejemplo, si se logra monitorear en tiempo real la evolución del fluido dentro de una discontinuidad, la información de este estudio podría servir como referencia para ajustar las presiones de inyección y evitar el uso de valores inadecuados que puedan generar fracturas no deseadas o una distribución ineficiente del fluido. Esto es especialmente relevante en el precondicionamiento de macizos rocosos en minería, donde el éxito del fracturamiento hidráulico depende de una correcta planificación y ejecución.

Además, este método podría ser utilizado para evaluar distintos escenarios en función de las propiedades del fluido y la roca, proporcionando una herramienta predictiva para la toma de decisiones. Con un análisis adecuado de las condiciones del terreno y las propiedades hidráulicas del fluido, se pueden establecer estrategias que maximicen la eficiencia del fracturamiento, reduciendo costos y minimizando riesgos operacionales.

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 Conclusiones

7.1.1 Conclusiones numéricas

En este estudio se logró simular el flujo de un fluido en fracturamiento hidráulico utilizando el programa *COMSOL Multiphysics*. Esto nos permitió analizar como propiedades tanto del fluido inyectado como de la roca presente afectan al comportamiento del flujo.

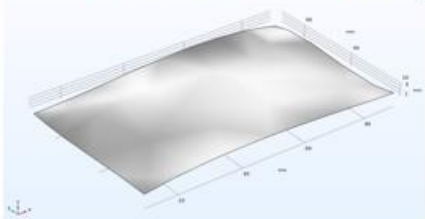
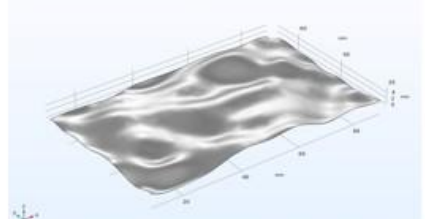
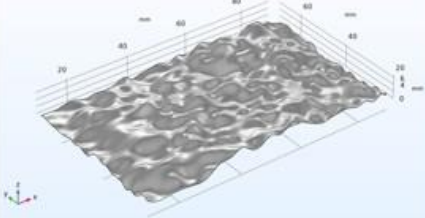
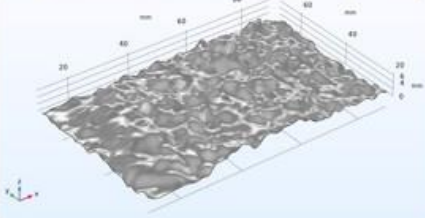
Se observó que las propiedades del fluido son directamente proporcionales a la magnitud de la velocidad del fluido, por lo tanto, a medida que aumenta la temperatura en el agua, disminuye la velocidad del fluido en la fractura.

De las propiedades de la roca, la porosidad es la propiedad que más influye en la magnitud de la velocidad del fluido, esto se debe a que la porosidad es un factor importante de la conductividad hidráulica la cuál es la que permite el flujo del agua a través de sus poros o fracturas, a mayor porosidad mayor conductividad hidráulica.

Es importante señalar que los resultados de este estudio están limitados por las simplificaciones adoptadas en la simulación, aunque se logró simular el comportamiento del flujo de un fluido en la técnica de fracturamiento hidráulico estas simplificaciones hacen que el modelo no logre representar completamente las condiciones reales que hay en la minería de caving. La inclusión de elementos y propiedades más realistas al modelo podría mejorar significativamente la precisión y exactitud del modelo implementado.

Se realizó la compilación de los resultados a través de una tabla que nos servirá para caracterizar las discontinuidades según el comportamiento del fluido, utilizando la velocidad y la conductividad hidráulica como parámetros principales. Se establecen niveles de rugosidad en función de cómo estas propiedades varían dentro de las fracturas.

Tabla 7.1: Caracterización de discontinuidades según comportamiento del fluido.

Nivel de rugosidad	Variabilidad de la velocidad	Velocidad	Descripción de la discontinuidad
Baja	Baja	Alta	Superficie lisa con mínima resistencia al flujo. 
Media	Moderada	Moderada	Superficie con rugosidad moderada, zonas de flujo acelerado y desacelerado. 
Alta	Alta	Baja	Superficie con irregularidades marcadas, generación de turbulencia en ciertas regiones. 
Muy alta	Muy alta	Muy baja	Superficie altamente rugosa con reducción significativa de la velocidad y flujo no uniforme. 

7.1.2 Conclusiones teóricas

Al estudiar el fluido en secciones paralelas al movimiento del fluido se pudo comprobar que el perfil de velocidad concordó con la teoría, por lo que se pudo determinar que el modelo se comporta en relación con la realidad y que no se debería alejar significativamente de esta.

Fracturas más planas generan una propagación más controlada del fluido, en cambio fracturas más irregulares pueden inducir fracturas secundarias y ramificaciones no deseadas.

Mayores velocidades resultan en mayores gradientes de presión, lo que incrementa la presión necesaria para mantener abierta la fractura. A velocidades altas pueden aparecer fenómenos de turbulencia, lo que afectaría la estabilidad del sistema de fracturas.

Altas velocidades podrían inducir esfuerzos adicionales que afecten la estabilidad de las fracturas o la integridad de las capas adyacentes debido a la presión que se necesita para alcanzar esas velocidades.

7.2 Recomendaciones

A continuación, se presentan sugerencias y proyecciones orientadas a futuras investigaciones, enfocadas en mejorar la simulación en COMSOL utilizada para el estudio del fracturamiento hidráulico, donde existe la posibilidad de complementar este trabajo de título respecto a futuros estudios.

- Dimensiones fractura: Se sugiere realizar un estudio donde se analice el efecto de la variación de las dimensiones de la fractura ya que en este estudio la primera componente del modelo se mantuvo constante.
- Apertura fractura: Se sugiere realizar un estudio donde se incluya el análisis del efecto de la variación de la apertura de la fractura para una irregularidad constante.
- Fluido inyectado: Se sugiere incluir más tipos de fluidos o la incorporación de aditivos, también continuar el estudio agregando flujo de partículas en el fluido.

8. REFERENCIAS

- Birch, D., & Meyer, S. (2019). Seismic Response to hydraulic fracturing in caving mines. Proceedings of the Ninth International Conference on Deep and High Stress Mining. https://doi.org/10.36487/acg_rep/1952_33_birch.
- Rimmelin, R., Chitombo, G., & Valdivia, E. (2020). Hydraulic fracturing in cave mining: Opportunities for improvement. 275–288. https://doi.org/10.36487/acg_repo/2063_15.
- Ali, Z., & Karakus, M. (2022). Experimental investigation of hydraulic fracturing in granite under hydrostatic stress conditions. 1241–1252. https://doi.org/10.36487/acg_repo/2205_86.
- Ghazvinian, E., Damjanac, B., Lorig, L., Cavieres Rojas, P., & Madrid, A. (2020). Back analysis of the effect of hydraulic fracturing preconditioning on mining-induced seismicity at the main access of New Mine Level project, CODELCO Chile - El Teniente Division. 249–263. https://doi.org/10.36487/acg_repo/2063_13.
- Mejia, C., Azad, E., Roehl, D., Vallejos, J., & Valdivia, E. (2022). Stress shadowing effects during hydraulic fracturing in block caving operations. 1211–1226. https://doi.org/10.36487/acg_repo/2205_84.
- Potvin, Y., van Sint Jan, Michel., & Australian Centre for Geomechanics. (2010). Deep mining 2010: Proceedings of the fifth International Seminar on Deep and High Stress Mining, 6-8 October 2010, Santiago, Chile. Australian Centre for Geomechanics. https://doi.org/10.36487/ACG_repo/1074_09.
- van As, A., & Guest, A. (2020). *The design & operating philosophies of panel vs block caving*. 207–220. https://doi.org/10.36487/acg_repo/2063_10.

- Rimmelin, R. (2022). *Modelling of fracture initiation near a cave back and its implications for hydraulic fracturing concurrent to cave mining*. 1189-1200. https://doi.org/10.36487/acg_repo/2205_82.

- S Potvin, Y., van Sint Jan, Michel., & Australian Centre for Geomechanics. (2010). *Deep mining 2010 : Proceedings of the fifth International Seminar on Deep and High Stress Mining, 6-8 October 2010, Santiago, Chile*. Australian Centre for Geomechanics.

- Navarrete Vallejos, R., Soto Perez, C., Henriquez, F., & Godoy, H. (2022). *Hydraulic fracturing in the construction of Andes Norte Project*. 1227–1240. https://doi.org/10.36487/acg_repo/2205_85.

- Jeffrey, R., van As, A., Zhang, X., Bungler, A., & Chen, Z. (2010). *Measurement of hydraulic fracture growth in a naturally fractured orebody for application to preconditioning*. 647–662. https://doi.org/10.36487/acg_rep/1002_45_jeffrey.

- Haseeb Zia, Brice Lecampion. (2020). *PyFrac: A planar 3D hydraulic fracture simulator*. <http://dx.doi.org/10.17632/gv7yy9mmwj.1>.

- Cumming-Potvin, D., Wesseloo, J., Jacobsz, S., & Kearsley, E. (2018). *A re-evaluation of the conceptual model of caving mechanics*. 179–190. https://doi.org/10.36487/acg_rep/1815_11_cumming-potvin.

- Valkó, P., & Economides, M. J. (n.d.). *HYDRAULIC FRACTURE MECHANICS*.

- Amorer, G., Duffield, S., de Ross, J., & Viegas Fernandes, G. (2022). *Surface hydraulic fracturing trial at Cadia East*. 1173–1188. https://doi.org/10.36487/acg_repo/2205_81.

- Guo, T., Tang, S., Liu, S., Liu, X., Zhang, W., & Qu, G. (2020). Numerical simulation of hydraulic fracturing of hot dry rock under thermal stress. *Engineering Fracture Mechanics*, 240. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2020.107350>.

- Gray, I., & Gibbons, T. (2022). *Factors influencing caving*. 1367–1386.
https://doi.org/10.36487/acg_repo/2205_95.

- Fitzgerald, T. (n.d.). *Frackonomics: Some Economics of Hydraulic Fracturing*.
<http://ssrn.com/abstract=2267131>Electroniccopyavailableat:<https://ssrn.com/abstract=2267131>Electroniccopyavailableat:<http://ssrn.com/abstract=2267131>.

- Hagemann, B., Wegner, J., & Ganzer, L. (n.d.). *Investigation of Hydraulic Fracture Re-Orientation Effects in Tight Gas Reservoirs*.
- Schmidt, E., & Eberhardt, E. (2017). Numerical investigation of the use of hydraulic stimulation to mitigate fault slip risk in deep mines. *Proceedings of the Eighth International Conference on Deep and High Stress Mining*, 79–88.
https://doi.org/10.36487/acg_rep/1704_03_schmidt.

- Jafari, A., Vahab, M., & Khalili, N. (2022). *Multiphysics modelling of fractures in porous media using eXtended finite element method*. 1201–1210.
https://doi.org/10.36487/acg_repo/2205_83.

- Feng, Y., Haugen, K., & Firoozabadi, A. (2021). Phase-Field Simulation of Hydraulic Fracturing by CO₂, Water and Nitrogen in 2D and Comparison With Laboratory Data. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 126(11).
<https://doi.org/10.1029/2021JB022509>.

- Okiishi, M., & Rothmayer, H. (n.d.). *Fluid Mechanics*. www.wileyplus.com

- Chin, D. A. . (2017). *Fluid mechanics for engineers*. Pearson.

9. ANEXOS

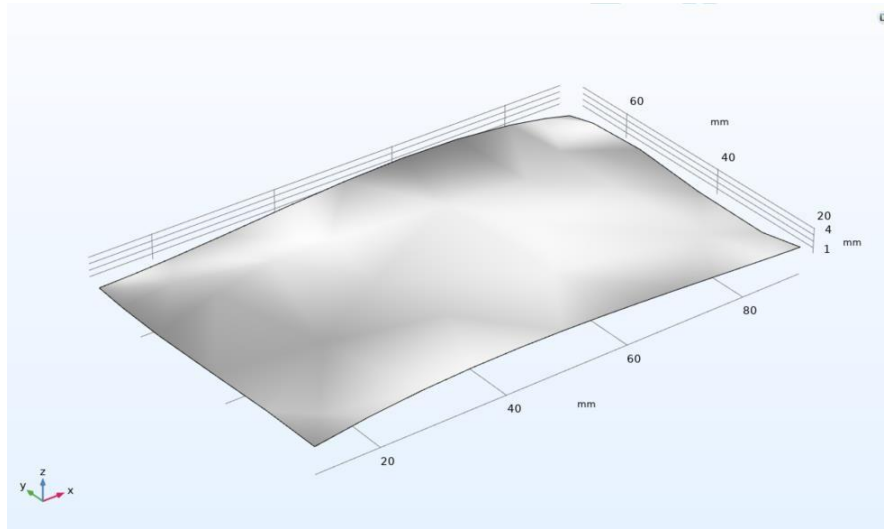


Figura 8.1: Geometría 1 de 2 nodos.

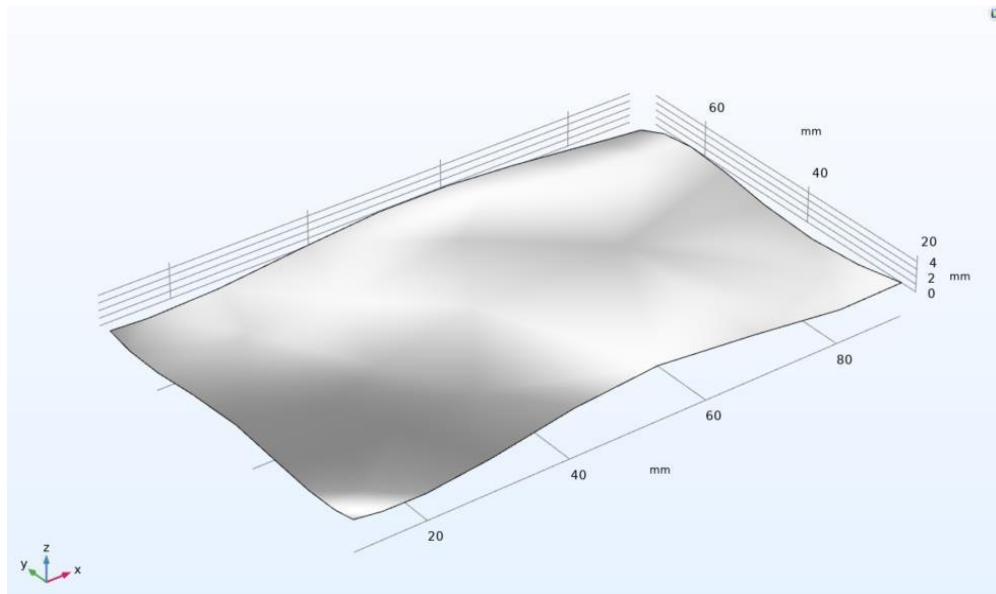


Figura 8.2: Geometría 2 de 3 nodos.

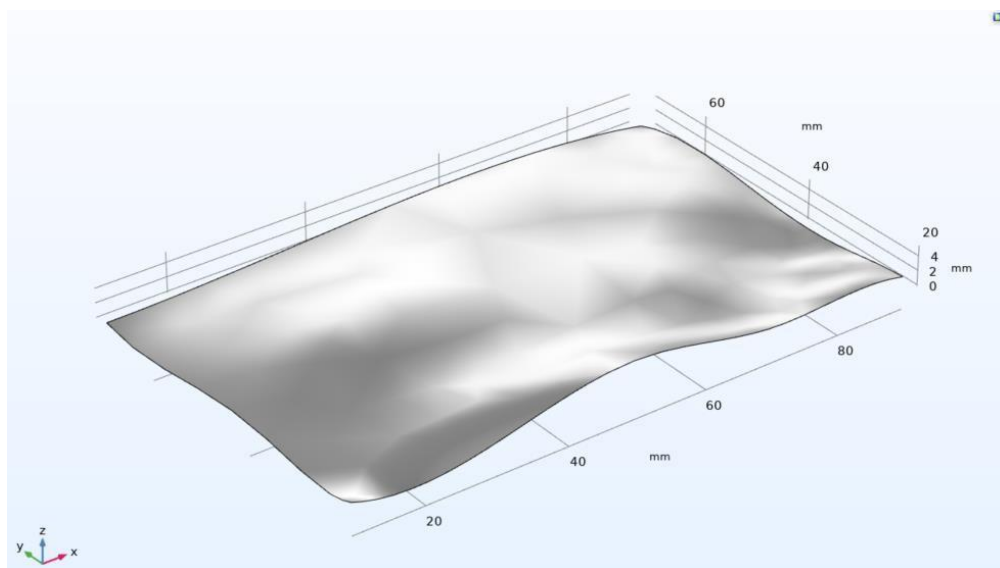


Figura 8.3: Geometría 3 de 4 nodos.

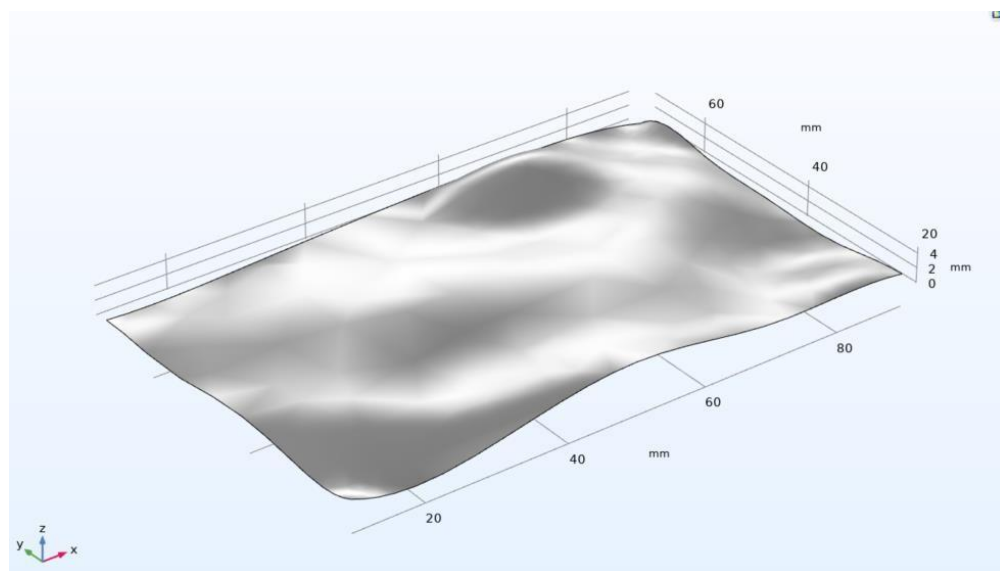


Figura 8.4: Geometría 4 de 5 nodos.

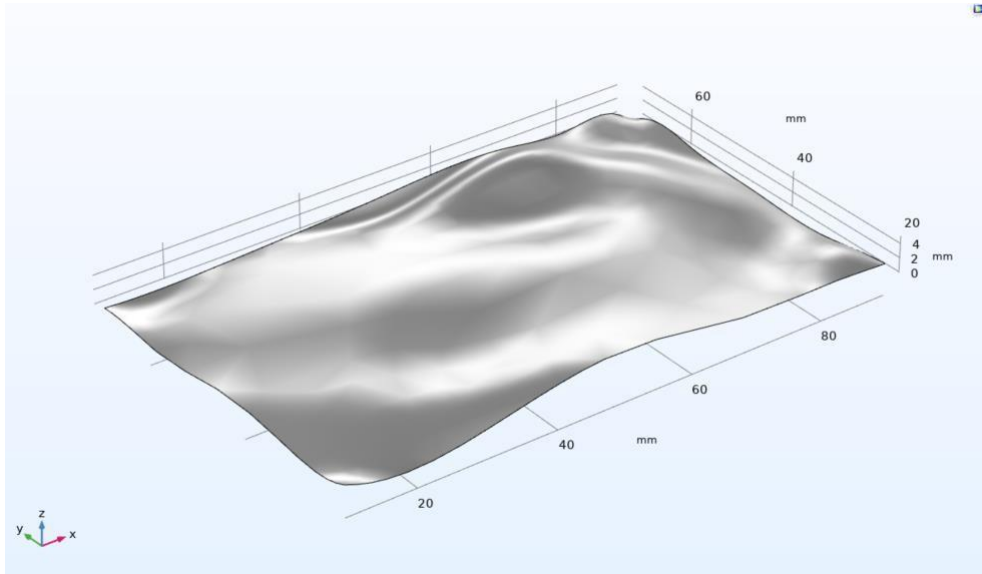


Figura 8.5: Geometría 5 de 6 nodos.

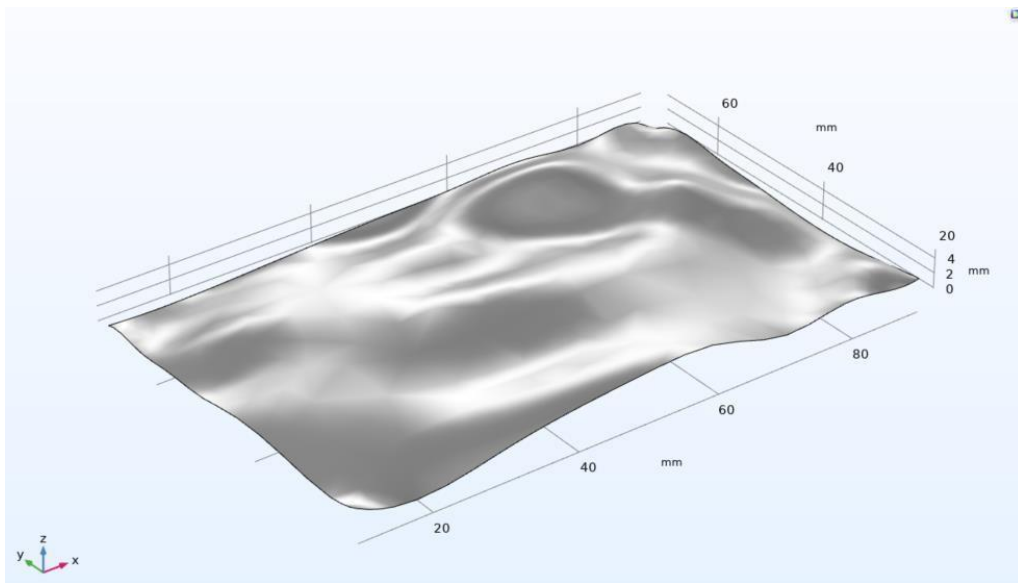


Figura 8.6: Geometría 6 de 7 nodos.

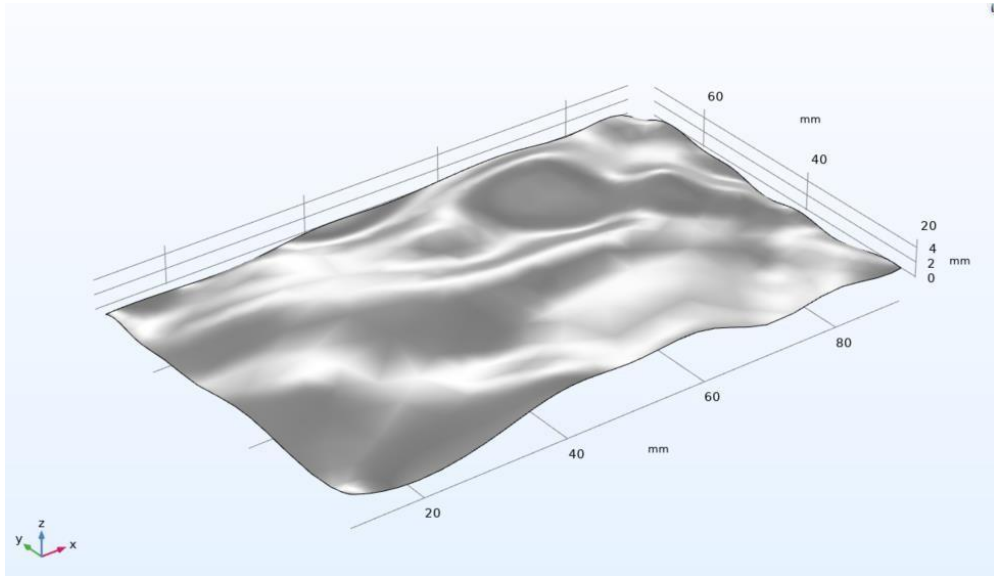


Figura 8.7: Geometría 7 de 8 nodos.

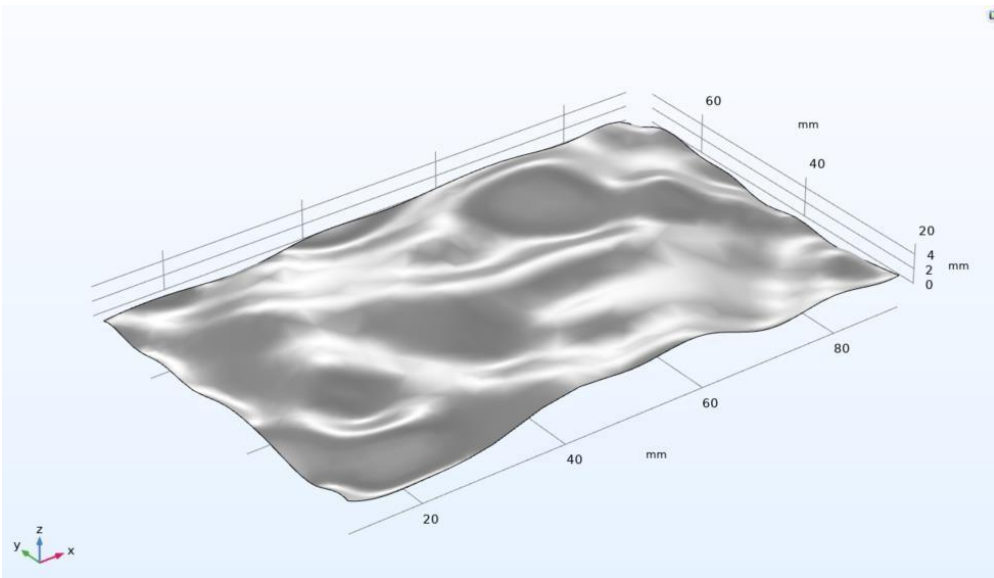


Figura 8.8: Geometría 8 de 9 nodos.

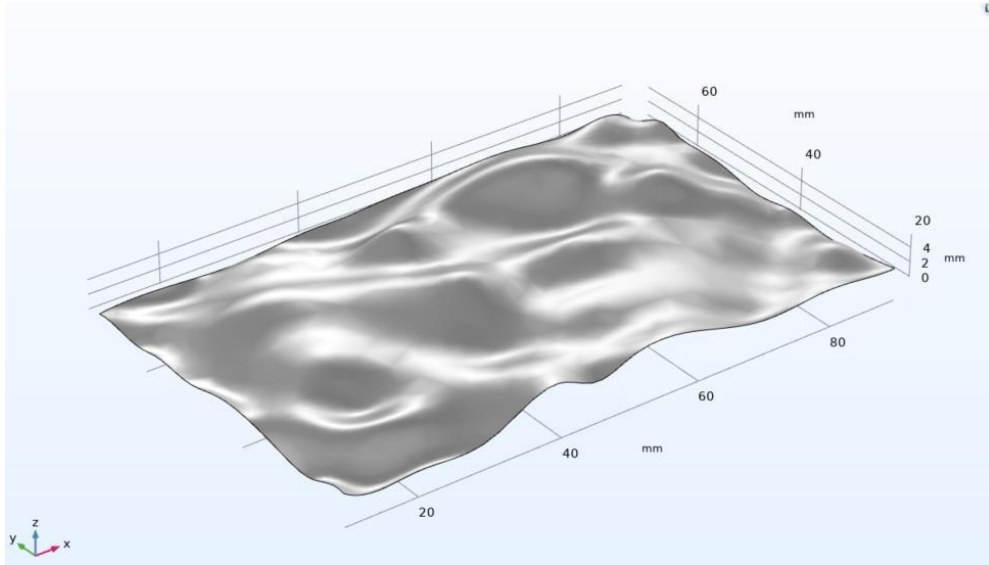


Figura 8.9: Geometría 9 de 10 nodos.

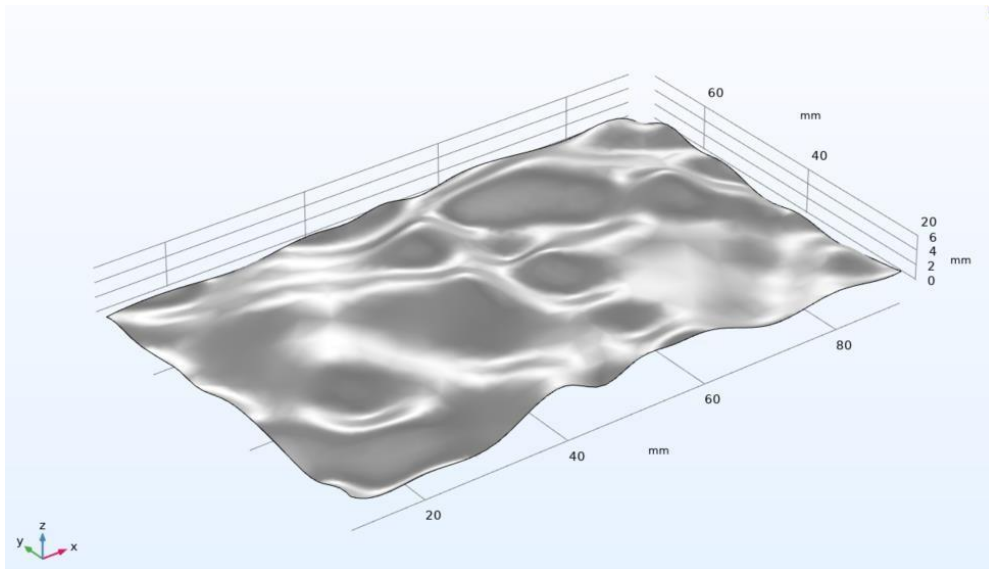


Figura 8.10: Geometría 10 de 11 nodos.

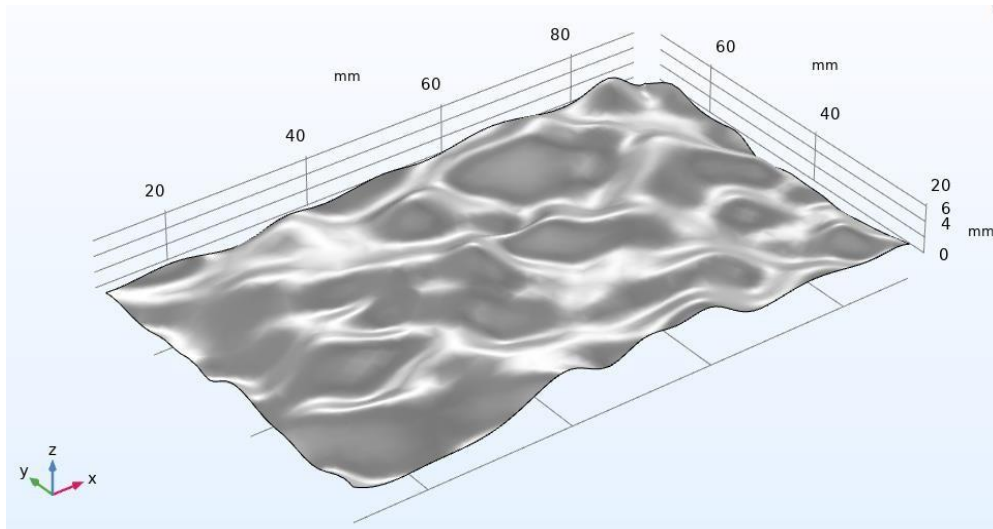


Figura 8.11: Geometría 11 de 15 nodos.

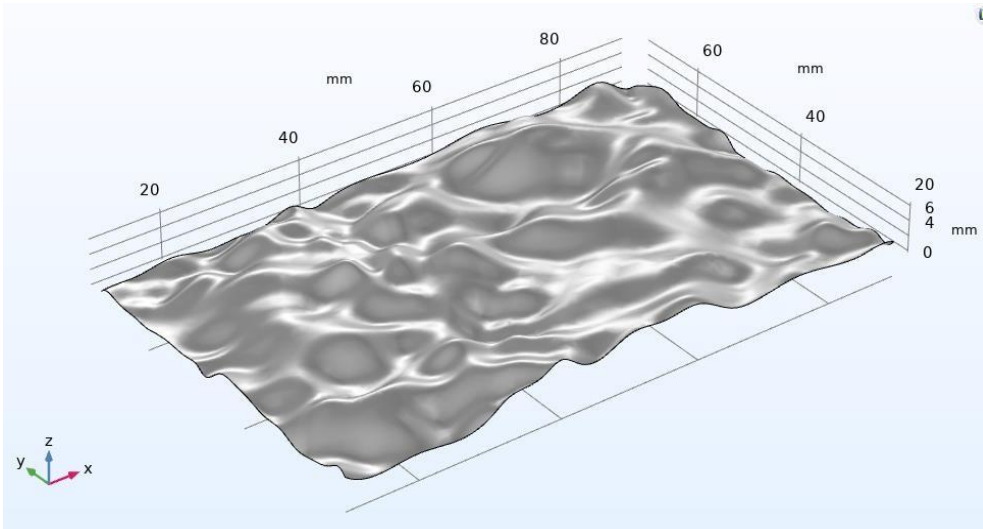


Figura 8.12: Geometría 12 de 20 nodos.

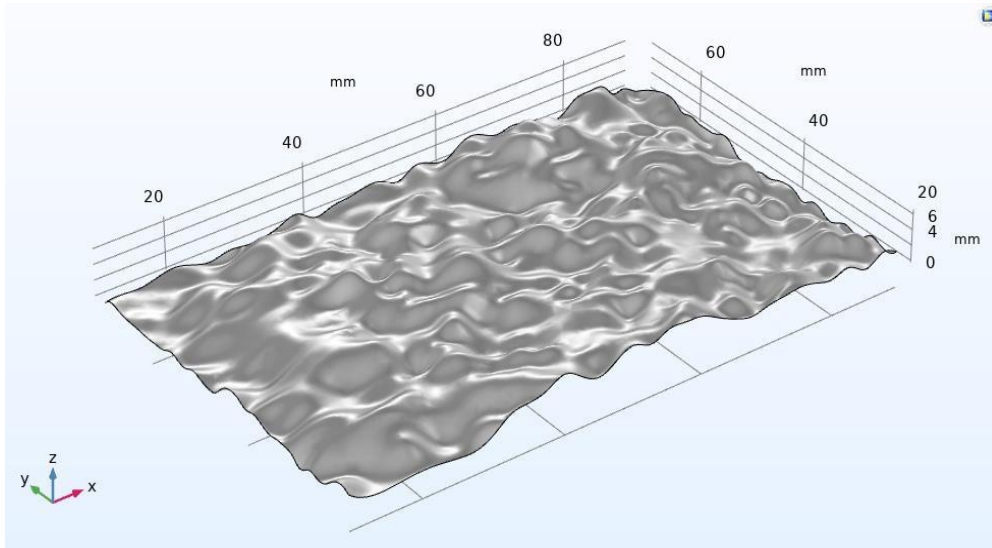


Figura 8.13: Geometría 13 de 30 nodos.

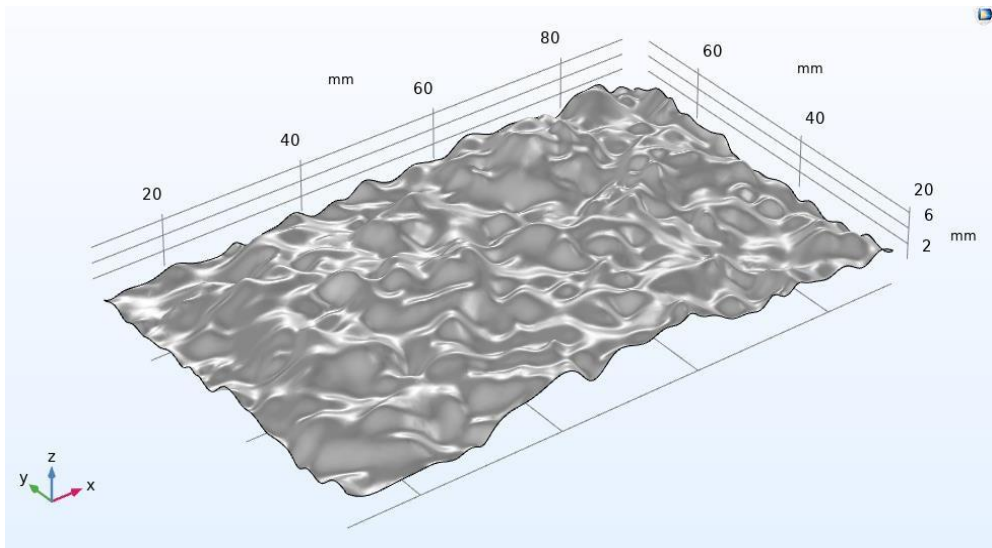


Figura 8.14: Geometría 14 de 40 nodos.

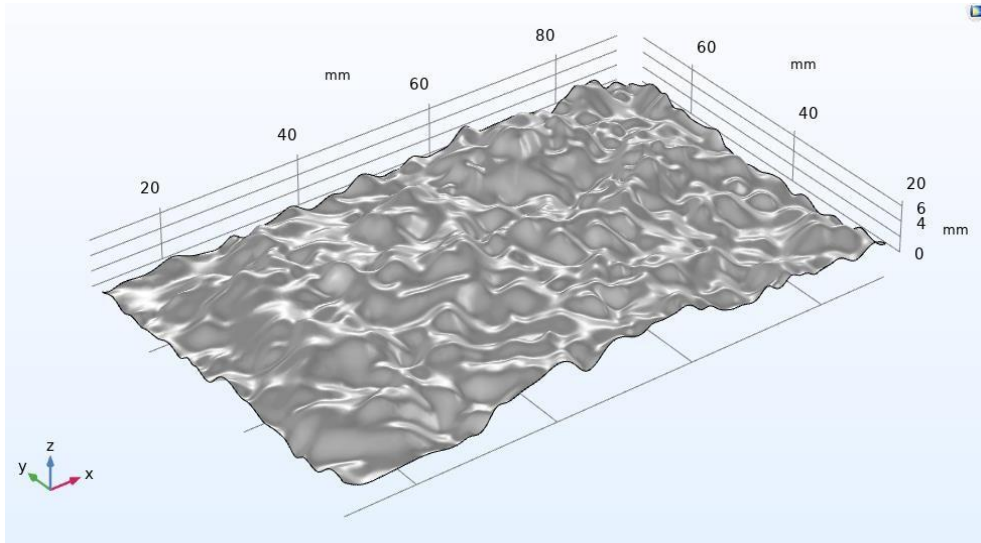


Figura 8.15: Geometría 15 de 50 nodos.

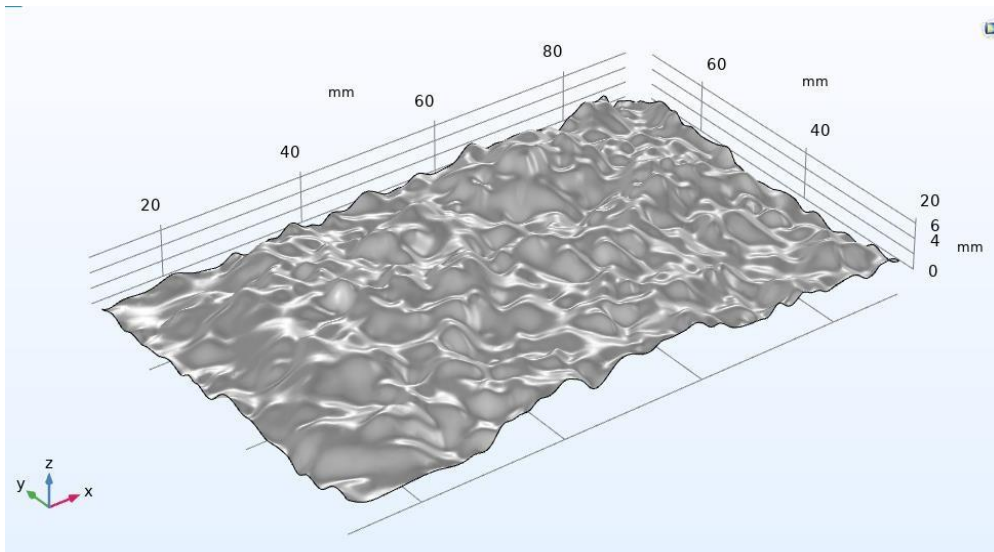


Figura 8.16: Geometría 16 de 60 nodos.

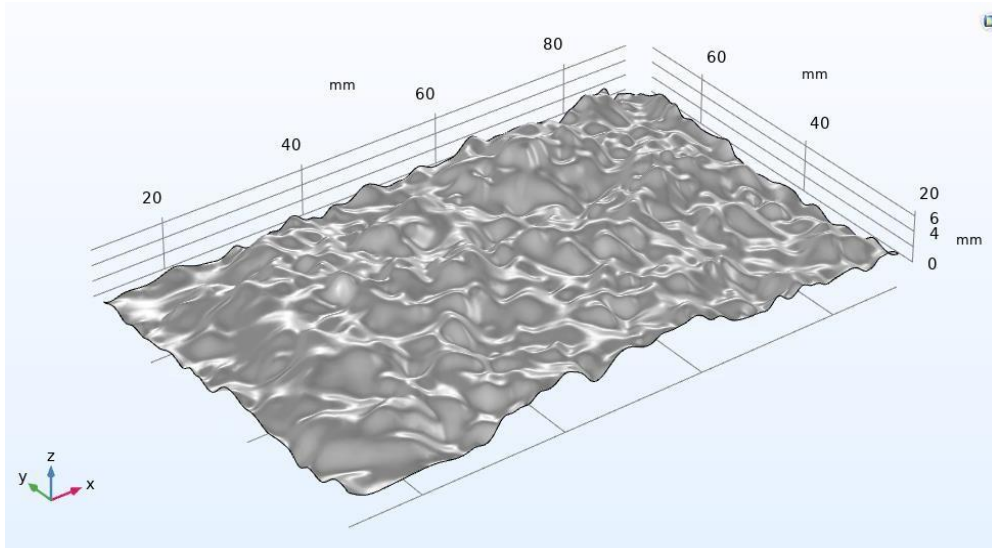


Figura 8.17: Geometría 17 de 70 nodos.

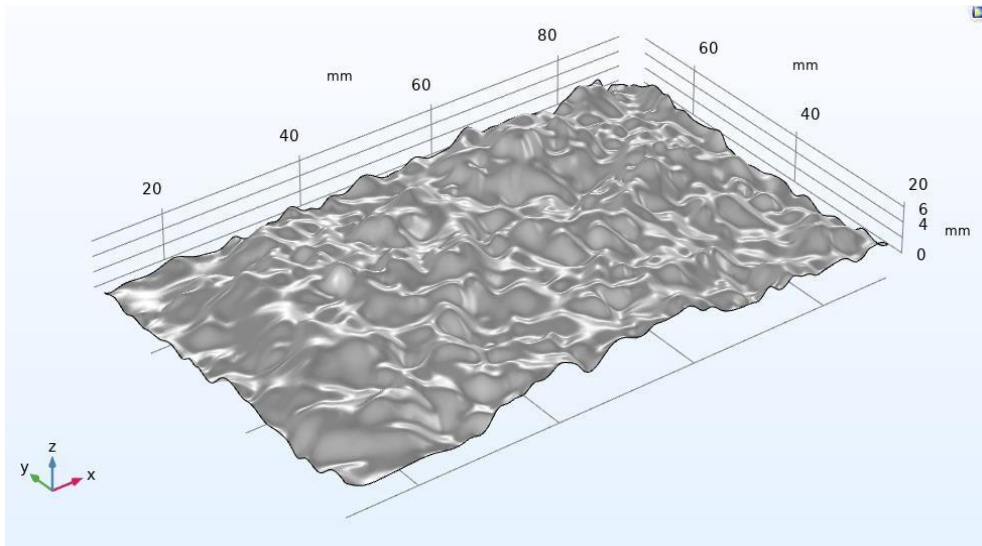


Figura 8.18: Geometría 18 de 80 nodos.

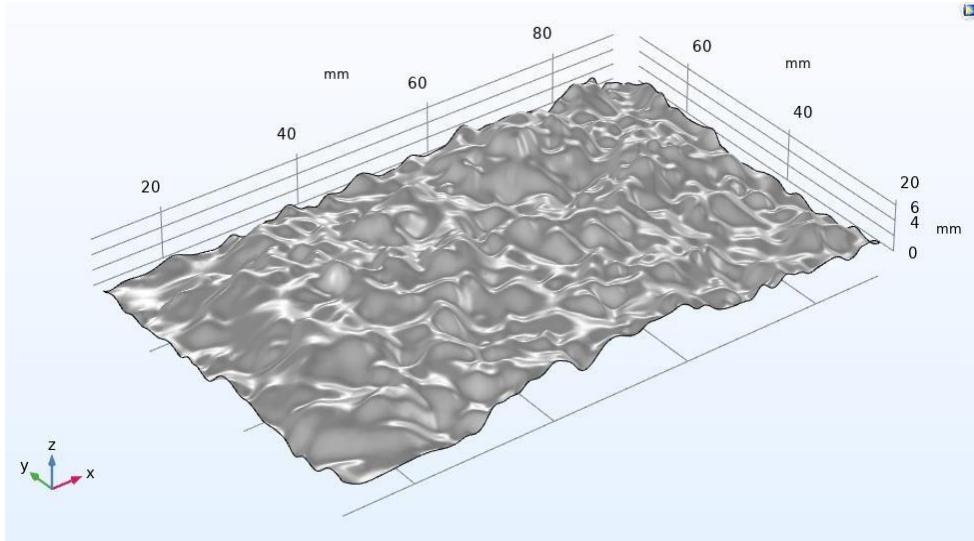


Figura 8.19: Geometría 19 de 90 nodos.

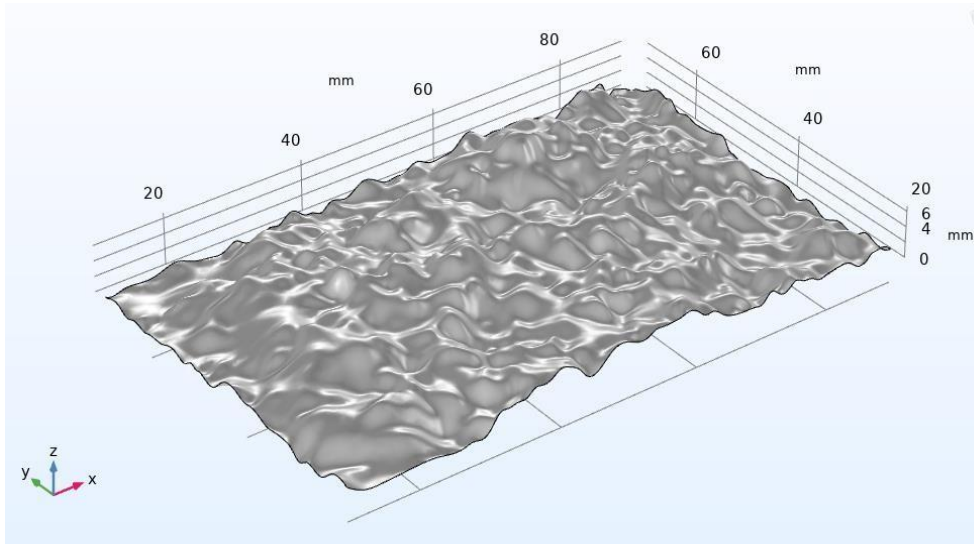


Figura 8.20: Geometría 20 de 100 nodos.