



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA METALÚRGICA



**ESTUDIO DEL IMPACTO DE LA FORMA DE LOS BLOQUES EN EL  
COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE MUESTRAS DE ROCA USANDO  
UN MODELO DEM A ESCALA DE LABORATORIO**

POR

**MATÍAS NICOLÁS SÁNCHEZ SAGREDO**

Memoria de Título presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción para  
optar al título profesional de Ingeniero Civil de Minas

Profesor guía:  
Rene Gómez Puigpinos  
Profesora co-guía:  
Kimie Suzuki Morales

Diciembre 2024

Concepción Chile

© 2024 Matías Nicolás Sánchez Sagredo

## **AGRADECIMIENTOS**

En primer lugar, quiero expresar mi más profundo agradecimiento a mis padres Manuel Sánchez y Pamela Sagredo, cuyo apoyo incondicional ha sido fundamental en cada una de las decisiones a lo largo de este camino. Gracias por entregarme todo lo que necesitaba, y mucho más, siempre creyendo en mí y en mis metas.

A mi hermana Stefanía Sánchez, quiero agradecerle por su comprensión y por caminar junto a mí en cada etapa. Su ejemplo de perseverancia y resiliencia ha sido una guía constante, mostrándome la importancia de afrontar los desafíos con valentía y determinación.

A mi amada Emilia Reyes, quien ha estado a mi lado en estos últimos años, le debo un agradecimiento especial por su apoyo incondicional, su motivación diaria y su capacidad de brindarme sensatez y templanza en los momentos más difíciles. Gracias por ser una inspiración y por recordarme siempre la importancia de seguir adelante.

También quiero reconocer a los amigos que la universidad me regaló, en especial a Joaquín Hermosilla, Ramón Salazar, María Paz Troncoso, Javiera Farías, Sofía Sanhueza, Alberto Martínez, Carlos Rebolledo, Andrés Constanzo, Marcial Carreño y, en general, al querido “GRUPETE”. Agradezco profundamente los momentos compartidos y la certeza de que nuestra amistad perdurará más allá de esta etapa, acompañándonos también en nuestra vida profesional.

Finalmente, quiero agradecer a mis profesores guía, Kimie Suzuki y René Gómez, por su invaluable apoyo durante el desarrollo de esta memoria. Su conocimiento, orientación y las herramientas que me proporcionaron fueron esenciales para completar este desafío y cerrar mi formación universitaria de la mejor manera.

A todos ustedes, gracias. Este logro no habría sido posible sin su apoyo y confianza.

## RESUMEN

El análisis del comportamiento mecánico de las rocas bajo carga mediante modelos constituye una herramienta valiosa en el diseño de estructuras geotécnicas y en la planificación de operaciones mineras. Estos modelos permiten simular cómo las propiedades de las rocas, tales como la cohesión, la fricción interna y el módulo de Young, entre otras, influyen en la resistencia y deformación del material. A pesar de contar con estas herramientas de modelado y de contar con información, aún persiste una brecha en el conocimiento sobre cómo las propiedades interactúan en función de la configuración geométrica interna del material y afectan las curvas de esfuerzo-deformación. Estos puntos son relevantes en el contexto de la estabilidad estructural, además de establecer una manera de predecir los comportamientos, donde una modelación precisa del comportamiento mecánico puede optimizar los diseños reales aplicables al campo civil o minero.

Para abordar esta problemática, este trabajo desarrolla un estudio exhaustivo a través de simulaciones numéricas basadas en el método de elementos discretos (DEM), utilizando el software 3DEC. La investigación se enfoca en dos configuraciones geométricas: bloques de tipo Voronoi y tetraédricos. Se evalúa cómo la forma y disposición de estos bloques afectan los parámetros mecánicos de interés y el comportamiento en las fases *pre* y *post-peak*. Además, se analizan combinaciones de micro propiedades que, aunque directamente no son propias del comportamiento macro, son necesarias para ejecutar el modelo y resultan críticas para comprender su influencia en la interacción.

Se ejecutan 256 simulaciones, distribuidas entre las dos configuraciones, a las cuales se les aplica un análisis estadístico mediante ANOVA en el cual se aplica una regresión lineal estimando la repuesta de parámetros mecánicos, identificando así los parámetros más significativos y las interacciones relevantes. Los resultados indican que la configuración Voronoi presenta comportamientos duales, exhibiendo tanto *strain softening* como *strain hardening*. En cambio, la configuración tetraédrica mostró exclusivamente *strain softening*, en términos generales.

La investigación aporta al campo de la mecánica de rocas y al modelamiento numérico, al proporcionar una comprensión más detallada de cómo las micro propiedades y la configuración geométrica afectan el comportamiento estructural bajo carga. Las conclusiones de esta investigación tienen implicaciones directas para la calibración de modelos numéricos relacionados con la mecánica de rocas y para el diseño de estructuras geotécnicas más seguras, proporcionando herramientas prácticas para sus análisis.

## ABSTRACT

The analysis of the mechanical behavior of rocks under load using models is a valuable tool in the design of geotechnical structures and in the planning of mining operations. These models allow simulating how rock properties, such as cohesion, internal friction, and Young's modulus, among others, influence the strength and deformation of the material. Despite having these modeling tools and information, there is still a gap in knowledge about how properties interact based on the internal geometric configuration of the material and affect the stress-strain curves. These points are relevant in the context of structural stability, in addition to establishing a way to predict behaviors, where accurate modeling of mechanical behavior can optimize real designs applicable to the civil or mining field.

To address this problem, this work develops an exhaustive study through numerical simulations based on the discrete element method (DEM), using the 3DEC software. The research focuses on two geometric configurations: Voronoi and tetrahedral blocks. The shape and arrangement of these blocks affect the mechanical parameters of interest and the behavior in the pre- and post-peak phases. In addition, combinations of micro properties are analyzed that, although they are not directly part of macro behavior, are necessary to run the model and are critical to understand its influence on the interaction.

256 simulations are run, distributed between the two configurations, to which a statistical analysis is applied using ANOVA in which a linear regression is applied estimating the response of mechanical parameters, thus identifying the most significant parameters and the relevant interactions. The results indicate that the Voronoi configuration presented dual behaviors, exhibiting both strain softening and strain hardening. In contrast, the tetrahedral configuration showed exclusively strain softening, in general terms.

The research contributes to the field of rock mechanics and numerical modeling by providing a more detailed understanding of how micro properties and geometric configuration affect structural behavior under load. The findings of this research have direct implications for the calibration of numerical models related to rock mechanics and for the design of safer geotechnical structures, providing practical tools for their analysis.

# Índice

|       |                                                                      |    |
|-------|----------------------------------------------------------------------|----|
| 1     | INTRODUCCIÓN .....                                                   | 1  |
| 1.1   | Objetivo general .....                                               | 2  |
| 1.2   | Objetivo específico.....                                             | 2  |
| 1.3   | Alcance.....                                                         | 2  |
| 1.4   | Metodología .....                                                    | 3  |
| 1.5   | Estructura .....                                                     | 4  |
| 2     | MARCO TEORICO .....                                                  | 5  |
| 2.1   | Mecánica de rocas .....                                              | 5  |
| 2.1.1 | Propiedades de la roca.....                                          | 5  |
| 2.1.2 | Esfuerzos en rocas.....                                              | 6  |
| 2.2   | Ensayo UCS .....                                                     | 6  |
| 2.2.1 | Normativa aplicada .....                                             | 6  |
| 2.3   | Modelamiento numérico .....                                          | 8  |
| 2.3.1 | Modelamiento numérico en mecánica de rocas .....                     | 9  |
| 2.4   | Modelamiento numérico con 3DEC.....                                  | 11 |
| 2.5   | Herramientas de análisis estadístico.....                            | 13 |
| 2.5.1 | Análisis ANOVA .....                                                 | 14 |
| 3     | METODOLOGÍA .....                                                    | 16 |
| 3.1   | Confección del modelo.....                                           | 16 |
| 3.1.1 | Creación de la probeta.....                                          | 16 |
| 3.1.2 | Asignación de propiedades y ensayo .....                             | 17 |
| 3.2   | Diseño experimental.....                                             | 20 |
| 3.2.1 | Variación de parámetros.....                                         | 21 |
| 3.2.2 | Combinaciones para simular .....                                     | 22 |
| 3.3   | Interpretación de los resultados.....                                | 23 |
| 3.3.1 | Estudios estadísticos.....                                           | 23 |
| 3.3.2 | Representación física de la evolución del daño .....                 | 25 |
| 4     | RESULTADOS Y ANÁLISIS.....                                           | 27 |
| 4.1   | Comportamiento mecánico a partir de curvas esfuerzo-deformación..... | 27 |
| 4.1.1 | Bloques Voronoi .....                                                | 27 |
| 4.1.2 | Bloques tetraédricos .....                                           | 29 |
| 4.1.3 | Resultados de macro parámetros.....                                  | 29 |

|       |                                                                      |    |
|-------|----------------------------------------------------------------------|----|
| 4.2   | Análisis estadístico ANOVA .....                                     | 30 |
| 4.2.1 | Análisis estadístico inicial .....                                   | 31 |
| 4.2.2 | Análisis estadístico final con interacciones.....                    | 32 |
| 4.2.3 | Análisis estadístico general .....                                   | 34 |
| 4.3   | Comparación de la evolución del daño .....                           | 35 |
| 4.3.1 | Comportamiento con parámetros base en la zona <i>pre-peak</i> .....  | 35 |
| 4.3.2 | Comportamiento con parámetros base considerando curva completa ..... | 37 |
| 4.3.3 | Estudio con comportamiento <i>strain hardening</i> .....             | 39 |
| 4.4   | Discusión final.....                                                 | 40 |
| 4.4.1 | Metodología propuesta .....                                          | 41 |
| 5     | CONCLUSIONES .....                                                   | 42 |
| 5.1   | Recomendaciones y trabajo futuro .....                               | 43 |
|       | REFERENCIAS .....                                                    | 44 |
| 6     | Anexos.....                                                          | 46 |
| 6.1   | Anexo A .....                                                        | 46 |
| 6.2   | Anexo B.....                                                         | 51 |
| 6.3   | Anexo C.....                                                         | 57 |
| 6.4   | Anexo D .....                                                        | 58 |

## Índice de Tabla

|                                                                                                                                                                                              |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 3.1: Parámetros usados para el modelo base.....                                                                                                                                        | 20 |
| Tabla 3.2: Parámetros de variación para la ejecución de las simulaciones.....                                                                                                                | 22 |
| Tabla 3.3: Distribución de las combinaciones de los parámetros evaluados en distintos niveles.....                                                                                           | 22 |
| Tabla 4.1: Análisis de varianza del modelo inicial para el macro parámetro resistencia peak en la configuración tetraédrica.....                                                             | 31 |
| Tabla 4.2: Resumen del análisis para el modelo inicial en la configuración tetraedro. ....                                                                                                   | 32 |
| Tabla 4.3: Análisis de varianza del modelo final para el macro parámetro resistencia peak en la configuración tetraédrica, solo con parámetros significativos incluidas las interacciones. . | 33 |
| Tabla 4.4: Resumen del modelo final para la resistencia peak con configuración tetraédrica. ....                                                                                             | 34 |
| Tabla 4.5: Comparación de $R^2$ entre modelo inicial y final para cada una de las configuraciones. ..                                                                                        | 34 |
| Tabla 4.6: Micro parámetros significativos para cada configuración y macro parámetro relacionado. ....                                                                                       | 35 |
| Tabla 4.7: Comparación de resultados estimados visualmente de las representaciones de comportamiento pre-peak de la muestra. ....                                                            | 37 |
| Tabla 6.1: Combinaciones de las 128 simulaciones para la configuración Voronoi y tetraedro. ....                                                                                             | 46 |
| Tabla 6.2: Resultado de macro parámetros de la zona pre-peak para la configuración Voronoi en sus 128 simulaciones.....                                                                      | 47 |
| Tabla 6.3: Resultado de macro parámetros de la zona post-peak para la configuración Voronoi en sus 128 simulaciones.....                                                                     | 48 |
| Tabla 6.4: Resultado de macro parámetros de la zona pre-peak para la configuración tetraédrica en sus 128 simulaciones.....                                                                  | 49 |
| Tabla 6.5: Resultado de macro parámetros de la zona post-peak para la configuración tetraédrica en sus 128 simulaciones.....                                                                 | 50 |
| Tabla 6.6: Análisis de varianza del modelo inicial para el macro parámetro módulo de Young en la configuración Voronoi. ....                                                                 | 51 |
| Tabla 6.7: Análisis de varianza del modelo inicial para el macro parámetro resistencia peak en la configuración Voronoi. ....                                                                | 51 |
| Tabla 6.8: Análisis de varianza del modelo inicial para el macro parámetro módulo de caída en la configuración Voronoi. ....                                                                 | 51 |

|                                                                                                                                        |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 6.9: Análisis de varianza del modelo inicial para el macro parámetro resistencia residual en la configuración Voronoi. ....      | 52 |
| Tabla 6.10: Análisis de varianza del modelo final para el macro parámetro módulo de Young en la configuración Voronoi. ....            | 52 |
| Tabla 6.11: Análisis de varianza del modelo final para el macro parámetro resistencia peak en la configuración Voronoi. ....           | 52 |
| Tabla 6.12: Análisis de varianza del modelo final para el macro parámetro módulo de caída en la configuración Voronoi. ....            | 53 |
| Tabla 6.13: Análisis de varianza del modelo final para el macro parámetro resistencia residual en la configuración Voronoi. ....       | 53 |
| Tabla 6.14: Análisis de varianza del modelo inicial para el macro parámetro módulo de Young en la configuración Tetraédrica. ....      | 54 |
| Tabla 6.15: Análisis de varianza del modelo inicial para el macro parámetro resistencia peak en la configuración Tetraédrica. ....     | 54 |
| Tabla 6.16: Análisis de varianza del modelo inicial para el macro parámetro módulo de caída en la configuración Tetraédrica. ....      | 54 |
| Tabla 6.17: Análisis de varianza del modelo inicial para el macro parámetro resistencia residual en la configuración Tetraédrica. .... | 55 |
| Tabla 6.18: Análisis de varianza del modelo final para el macro parámetro módulo de Young en la configuración tetraédrica.....         | 55 |
| Tabla 6.19: Análisis de varianza del modelo final para el macro parámetro resistencia peak en la configuración tetraédrica.....        | 55 |
| Tabla 6.20: Análisis de varianza del modelo final para el macro parámetro módulo de caída en la configuración tetraédrica.....         | 56 |
| Tabla 6.21: Análisis de varianza del modelo final para el macro parámetro resistencia residual en la configuración tetraédrica.....    | 56 |
| Tabla 6.22: Macro parámetros resultantes para las simulaciones con micro parámetros base. ....                                         | 58 |

## Índice de Figuras

|                                                                                                                                                                                                                         |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1.1: Etapas de la metodología para cumplir objetivos planteados. ....                                                                                                                                            | 3  |
| Figura 2.1: Instrumento de medición de deformación, (a) strain gauge previo a su instalación y (b) strain gauge instalado en probeta para el ensayo con disposición de sus orientaciones a medir. ....                  | 7  |
| Figura 2.2: LVDT dispuestos en prensa servo-controlada para ensayo UCS con obtención de curva completa. ....                                                                                                            | 8  |
| Figura 2.3: Gráfico de clasificación para problemas de modelamiento [17]. ....                                                                                                                                          | 9  |
| Figura 2.4: Representación de una masa rocosa fracturada mostrada en (a), por FDM o FEM mostrada en (b), BEM mostrada en (c) y DEM mostrada en (d) [18]. ....                                                           | 11 |
| Figura 2.5: Configuración de un modelo por bloques de 3DEC, a) representa el modelo con macro propiedades a partir de un conjunto de bloques y b) visualización de los bloques con sus micro propiedades [6]. ....      | 12 |
| Figura 3.1: Estructura rectangular 3D: (a) granos tipo Voronoi (bloques totales generados 20 770) y (b) granos tipo tetraedro (bloques totales generados 77 342) ....                                                   | 17 |
| Figura 3.2: Probeta cilíndrica: (a) granos tipo Voronoi (contempla 11 380 bloques) y (b) granos tipo tetraedro (contempla 46 327 bloques).....                                                                          | 17 |
| Figura 3.3: Extracto del código para la confección del modelo con la asignación de propiedades... ..                                                                                                                    | 18 |
| Figura 3.4: Representación de vectores de fuerza axial para ensayo UCS .....                                                                                                                                            | 19 |
| Figura 3.5: Curva esfuerzo deformación con parámetros base obtenidos de la literatura, resultado obtenido directamente del software 3DEC. ....                                                                          | 21 |
| Figura 3.6: Ejemplo de curva esfuerzo-deformación obtenida con delimitación de los cuatro macro parámetros de interés .....                                                                                             | 23 |
| Figura 3.7: Estado de la muestra en la simulación 2, correspondiente al fin de la simulación a los 100 000 ciclos de ejecución, coeficiente de deformación de 5, para configuración (a) Voronoi y (b) tetraédrica. .... | 26 |
| Figura 4.1: Curva esfuerzo-deformación para configuración Voronoi, simulación 10 con comportamiento strain softening.....                                                                                               | 27 |
| Figura 4.2: Curva esfuerzo-deformación para configuración Voronoi, simulación 13 con comportamiento strain hardening.....                                                                                               | 28 |

|                                                                                                                                                                                                                                      |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 4.3: Curva esfuerzo-deformación para configuración tetraédrica, comportamiento strain softening con diferencia en deformación necesaria para alcanzar la resistencia peak (a) menor deformación y (b) mayor deformación. .... | 29 |
| Figura 4.4: Medias ajustadas para el modelo de resistencia peak, para la muestra con bloques tetraédricos, considerando efectos principales. ....                                                                                    | 32 |
| Figura 4.5: Medias ajustadas para el modelo de resistencia peak considerando las micro propiedades significativas, para la muestra con bloques tetraédricos, considerando (a) efectos principales y (b) interacciones. ....          | 33 |
| Figura 4.6: Curva esfuerzo-deformación con representaciones gráficas de desplazamiento en plano Y, enfoque en comportamiento pre-peak, simulación base para configuración tetraedro. ....                                            | 36 |
| Figura 4.7: Curva esfuerzo-deformación con representaciones gráficas de desplazamiento en plano Y, enfoque en comportamiento pre-peak, simulación base para configuración Voronoi. ....                                              | 36 |
| Figura 4.8: Curva esfuerzo-deformación con representaciones gráficas de desplazamiento en plano Y, enfoque en comportamiento post-peak, simulación base para configuración tetraedro. ....                                           | 38 |
| Figura 4.9: Curva esfuerzo-deformación con representaciones gráficas de desplazamiento en plano Y, enfoque en comportamiento post-peak, simulación base para configuración Voronoi. ....                                             | 38 |
| Figura 4.10: Curva esfuerzo-deformación con representaciones gráficas de desplazamiento en plano Y, enfoque en comportamiento general para simulación 1 para configuración Voronoi. ...                                              | 39 |
| Figura 4.11: Curva esfuerzo-deformación con representaciones gráficas de desplazamiento en plano Y, enfoque en comportamiento general para simulación 1 para configuración tetraédrica. ....                                         | 40 |
| Figura 6.1: Curva esfuerzo-deformación con representaciones gráficas de desplazamiento en plano Y, enfoque en comportamiento pre-peak, simulación 1 para configuración Voronoi. ....                                                 | 58 |
| Figura 6.2: Curva esfuerzo-deformación con representaciones gráficas de desplazamiento en plano Y, enfoque en comportamiento post-peak, simulación 1 para configuración Voronoi. ....                                                | 59 |
| Figura 6.3: Curva esfuerzo-deformación con representaciones gráficas de desplazamiento en plano Y, enfoque en comportamiento pre-peak, simulación 128 para configuración Voronoi. ....                                               | 59 |
| Figura 6.4: Curva esfuerzo-deformación con representaciones gráficas de desplazamiento en plano Y, enfoque en comportamiento post-peak, simulación 128 para configuración Voronoi. ....                                              | 60 |
| Figura 6.5: Curva esfuerzo-deformación con representaciones gráficas de desplazamiento en plano Y, enfoque en comportamiento pre-peak, simulación 1 para configuración tetraédrica. ....                                             | 60 |
| Figura 6.6: Curva esfuerzo-deformación con representaciones gráficas de desplazamiento en plano Y, enfoque en comportamiento post-peak, simulación 1 para configuración tetraédrica. ....                                            | 61 |

- Figura 6.7: Curva esfuerzo-deformación con representaciones gráficas de desplazamiento en plano Y, enfoque en comportamiento pre-peak, simulación 128 para configuración tetraédrica. .... 61
- Figura 6.8: Curva esfuerzo-deformación con representaciones gráficas de desplazamiento en plano Y, enfoque en comportamiento post-peak, simulación 128 para configuración tetraédrica..... 62

# 1 INTRODUCCIÓN

El comportamiento mecánico de las rocas bajo carga depende de diversas propiedades que pueden clasificarse como geológicas o mecánicas, observadas tanto a nivel micro como macroscópico [1]. Las propiedades geológicas están relacionadas con la composición y estructura interna del material, mientras que las propiedades mecánicas, como la fricción interna, la cohesión y el módulo de Young, determinan la capacidad del material para resistir esfuerzos y deformarse [2]. Estas últimas son esenciales para predecir el comportamiento estructural de las rocas, particularmente cuando se someten a cargas uniaxiales [3]. Si bien se cuenta con un conocimiento considerable sobre estas propiedades, aún es necesario profundizar en cómo las micro propiedades y su interacción afectan las curvas de esfuerzo-deformación, especialmente considerando diferentes configuraciones geométricas que representan la estructura interna del material.

Para abordar esta complejidad, el modelado numérico se emplea como una herramienta clave para estudiar el comportamiento mecánico de las rocas de manera simplificada [4]. Un modelo representa el comportamiento de la roca real, pero para simplificarlo, se asume que su volumen puede ser idealizado como un conjunto de bloques con distintas formas geométricas. Estas representaciones simplificadas permiten analizar cómo las propiedades internas del material influyen en su respuesta a condiciones de carga [5]. Cada bloque dentro del modelo se define con propiedades geométricas y mecánicas específicas que buscan capturar la interacción y el comportamiento global del material bajo distintas configuraciones.

Este trabajo busca reducir la brecha de conocimiento existente mediante el uso del modelado numérico basado en el método de elementos discretos (DEM) utilizando el software 3DEC [6]. La investigación se enfoca en evaluar cómo distintas configuraciones geométricas de bloques, específicamente bloques Voronoi y tetraédricos, afectan los resultados del modelo [7]. Cada una de estas configuraciones presenta características únicas que influyen de manera diferente en los parámetros mecánicos, tales como la resistencia *peak*, el módulo de Young y el comportamiento *post-peak* de las muestras.

El análisis numérico con estas configuraciones busca que se permita identificar cuáles son los ajustes más apropiados para representar materiales con comportamientos complejos, centrándose en la roca intacta. Los resultados obtenidos tendrán un avance significativo en el diseño de estructuras geotécnicas más seguras, al permitir una mejor calibración para el comportamiento del material bajo carga, lo que podrá culminar en la optimización de métodos de modelamiento numérico en rocas [1].

En este contexto, esta investigación se alinea con la necesidad de avanzar en la comprensión del comportamiento mecánico de las rocas mediante herramientas numéricas. Estas permiten simular situaciones complejas y evaluar la respuesta del material en las fases *pre* y *post-peak* de la curva de esfuerzo-deformación, así como analizar los modos de falla representados en el modelo. De esta forma, al implementar el uso de modelos DEM, se busca proporcionar directrices que permitan tomar decisiones más informadas en proyectos de ingeniería civil y minería, donde anticipar el desempeño de las estructuras bajo condiciones adversas es crucial para garantizar su estabilidad y eficiencia.

## **1.1 Objetivo general**

Evaluar el impacto de representar la estructura interna de una roca mediante bloques de distintas formas en su comportamiento mecánico, utilizando el método de elementos discretos (DEM) a escala de laboratorio, entendiendo que el comportamiento macroscópico de un modelo depende de propiedades microscópicas y del arreglo de los bloques.

## **1.2 Objetivo específico**

1. Analizar la influencia de la configuración geométrica de bloques de una muestra, para distintas configuraciones de micro propiedades (como la fricción interna, cohesión, módulo de Young, etc.) en las curvas esfuerzo-deformación generadas a partir de los modelos numéricos.
2. Evaluar el impacto de la configuración geométrica de los bloques en la evolución del daño de la muestra en la zona *pre* y *post-peak*, determinando cómo cada configuración afecta la respuesta mecánica general de la roca.
3. Determinar los parámetros clave que controlan el comportamiento mecánico en el modelo DEM y cómo estos varían entre diferentes configuraciones de parámetros y sus interacciones.
4. Desarrollar una metodología para la implementación de modelos de elementos discretos que integre diferentes configuraciones geométricas de bloques y que pueda aplicarse en la calibración de distintos tipos de problemas.

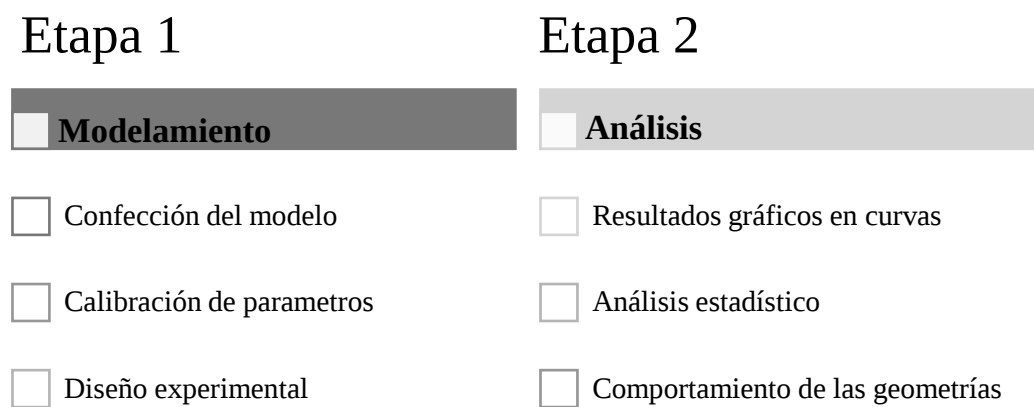
## **1.3 Alcance**

El problema central de esta investigación radica en la necesidad de entender cómo las diferentes representaciones geométricas de bloques, específicamente las configuraciones geométricas tetraédricas y Voronoi, influyen en el comportamiento mecánico de las rocas a nivel de laboratorio.

Es importante destacar que dentro de la investigación los bloques entregaran una simulación del comportamiento macro a partir de la simplificación de la realidad, considerando que no es posible ejecutar el nivel de detalle real de la muestra, ya que es el comportamiento el que se acerca a lo real más que la geometría en sí.

## 1.4 Metodología

La metodología empleada para cumplir con los objetivos planteados inicialmente se divide en 2 etapas como se puede ver en la Figura 1.1.



*Figura 1.1: Etapas de la metodología para cumplir objetivos planteados.*

En la primera etapa se confecciona y calibran los modelos a ensayar, empleando el uso de dos tipos de configuraciones geométricas distintas, donde, para ambos casos se establecen los mismos parámetros base de estudio a partir de lo mencionado por Lan et al. [7]. De dicho estudio se utilizan parámetros para crear un modelo base.

La segunda etapa analiza los resultados del modelo desde el punto de vista estadístico y de la representación física de la evolución del daño, en primera instancia se usa el test de ANOVA para discriminar las micro propiedades que resultan significativas en el estudio y cálculo de las macro propiedades de la curva. El estudio de la representación física incluirá gráficos que ilustrarán la secuencia de evolución de la muestra a lo largo de la curva esfuerzo-deformación, dichos gráficos destacarán puntos clave que reflejan el comportamiento de la muestra en distintas etapas del ensayo, proporcionando una visualización clara de su respuesta mecánica.

## **1.5 Estructura**

El documento estará segmentado en capítulos, a continuación, se presenta una descripción breve del contenido de cada uno de estos:

El capítulo 2 es la recopilación bibliográfica, se exponen los conceptos necesarios para el entendimiento del estudio y experimento, se mencionan desde los aspectos más generales como la mecánica de rocas hasta lo particular como lo es el ensayo en específico a realizar, los modelos y los tipos de análisis.

En el capítulo 3 se desarrolla la metodología, contemplando la etapa 1 de modelamiento numérico y la etapa 2 de análisis. En la primera se explica la confección del modelo, los datos usados como parámetros base y los lineamientos que se siguieron para la ejecución de simulaciones posterior, en la segunda se detallan los tipos de análisis a realizar, donde se consideran los análisis estadísticos y de la representación física de la muestra.

En el capítulo 4 se condensan los resultados con sus respectivos análisis y discusiones, con el fin de tener mayor claridad de la interpretación. En esta parte se encontrará el cumplimiento de los objetivos específicos, desglosando los resultados del modelo numérico enfocado en los macro parámetros de las gráficas obtenidas incluyendo las discusiones de aspectos estadísticos y geomecánicos del modelo confeccionado.

Por último, las conclusiones se encuentran en el capítulo 5 donde además se incluyen algunas observaciones, recomendaciones y propuestas para trabajo futuro.

## **2 MARCO TEORICO**

El presente estudio analiza el impacto de la forma de los bloques además de sus propiedades físicas con cambios que permitan establecer una priorización para la representación del comportamiento mecánico de muestras de roca a escala de laboratorio, utilizando modelos de elementos discretos (DEM). Para llevar a cabo esta investigación, es crucial comprender los lineamientos en los que se sustentan el análisis.

### **2.1 Mecánica de rocas**

La mecánica de rocas es la ciencia que estudia el comportamiento de las rocas y a gran escala del macizo rocoso que está bajo influencia constante de esfuerzos y condiciones específicas de su entorno [8]. De esta manera, en el ámbito de la ingeniería, esta área se enfoca en entender cómo es que la roca responde a fuerzas aplicadas, evaluando su resistencia, deformación, tipo de fractura y estabilidad de las estructuras geológicas en general [2].

#### **2.1.1 Propiedades de la roca**

Las propiedades son las características que permiten comprender el comportamiento mecánico bajo condiciones de carga, las cuales incluyen: resistencia a la compresión, elasticidad, tenacidad y anisotropía. Según Brady y Brown [1], la deformabilidad y resistencia son aspectos que determinan la respuesta de un macizo rocoso a los esfuerzos [1]. La resistencia a la compresión uniaxial (UCS) es una de las medidas estándar para evaluar la resistencia de la roca a la carga axial, por lo que al efectuar este tipo de ensayo se obtienen valores cuantitativos. La elasticidad se mide a través del módulo de Young, parámetro que describe la capacidad elástica para deformarse que tiene la roca antes de alcanzar la fractura debido a la carga que se le aplica [8].

Debido a la composición mineralógica y estructural de las rocas es que sus propiedades varían, afectando la respuesta mecánica. Las rocas pueden presentar anisotropía relacionada directamente con los minerales y como se orientan, lo que lleva a evaluar la importancia de los granos de cada una de las rocas afectando directamente en el comportamiento. En estas circunstancias es importante entender las propiedades para el diseño y análisis de ingeniería para predecir el comportamiento de estructuras rocosas bajo cargas [2].

### 2.1.2 Esfuerzos en rocas

El estudio de esfuerzos permite comprender como las estructuras geológicas responden a las cargas. Los esfuerzos pueden ser inducidos naturalmente por tectónica de placas o por interferencia humana tales como excavaciones mineras. La mecánica de rocas busca modelar estos esfuerzos para tener mejores predicciones del comportamiento evitando fallas sustanciales en alguna obra o estructura [1]. Una de las herramientas clave para el análisis de esfuerzos es el criterio de falla de Mohr-Coulomb, el cual, en el contexto de las rocas, permite evaluar la resistencia y la capacidad de soportar cargas sin fracturarse [9]. Los esfuerzos pueden ser compresivos, tensionales o cortantes. Su aplicación puede determinar la respuesta del macizo bajo cargas, por lo que es importante comprender como esto puede inducir fallas principalmente en áreas donde las condiciones de carga son complejas [10].

## 2.2 Ensayo UCS

El ensayo de compresión uniaxial (UCS) es una prueba usada para determinar la resistencia a la compresión de una muestra cilíndrica de roca sin confinamiento lateral, básicamente consiste en la aplicación de una carga axial progresiva a la muestra hasta alcanzar la falla por lo que es considerado un ensayo destructivo [11]. La resistencia de la roca es un indicador vital para determinar el rendimiento de la roca en aplicaciones prácticas, tales como diseño de túneles, taludes y otras estructuras tanto mineras como civiles, así es que se puede aplicar clasificación en cuanto a calidad de roca de manera segura y eficiente [1].

### 2.2.1 Normativa aplicada

Para realizar estos ensayos en laboratorio se aplican normativas con estándares internacionales, lo que permite que los ensayos sean admisibles, representativos y replicables en cualquier instancia o lugar, las principales normas aplicables son la ASTM International y la ISRM. La norma ASTM D7012 entrega directrices para la realización del ensayo UCS, donde incluye los requisitos de preparación relacionado a las dimensiones y características superficiales, la aplicación de las cargas y la interpretación de resultados [12].

La normativa ASTM D 3148-72 establece el procedimiento estandarizado para determinar el módulo elástico y la resistencia a la compresión uniaxial (resistencia *peak*) [13]. El lineamiento fundamental es el dimensionamiento de la muestra, cilíndrica para este ensayo, con una relación altura-diámetro

de 2:1, y es sometida a una carga axial continua hasta que esta falle. Es crucial que la carga se aplique de manera uniforme y controlada para garantizar los resultados [14].

Los parámetros de deformabilidad y la resistencia *peak* se obtienen a partir de la curva esfuerzo-deformación registrada durante el ensayo aplicando los cálculos correspondientes. La resistencia *peak* corresponde a la máxima carga soportada por la muestra antes de que esta falle, dividida por el área de la sección transversal inicial. El módulo de Young el cual representa la elasticidad de la muestra se determina a partir de la pendiente de la curva esfuerzo-deformación evaluando una porción lineal relevante, mientras que el módulo de Poisson se calcula midiendo la relación entre la deformación diametral y la deformación axial [11].

Para medir con precisión las deformaciones, la norma determina el uso de *strain gauges* o galgas extensométricas, las cuales son instaladas en la superficie lateral de la roca, tal como se ve en la Figura 2.1. Estos dispositivos permiten registrar la deformación de manera precisa y continua, lo que es fundamental para calcular los módulos de elasticidad y Poisson. Además, se necesita un sistema de adquisición de datos para registrar la carga y las deformaciones en intervalos regulares, asegurando una representación precisa de la curva esfuerzo-deformación [13].

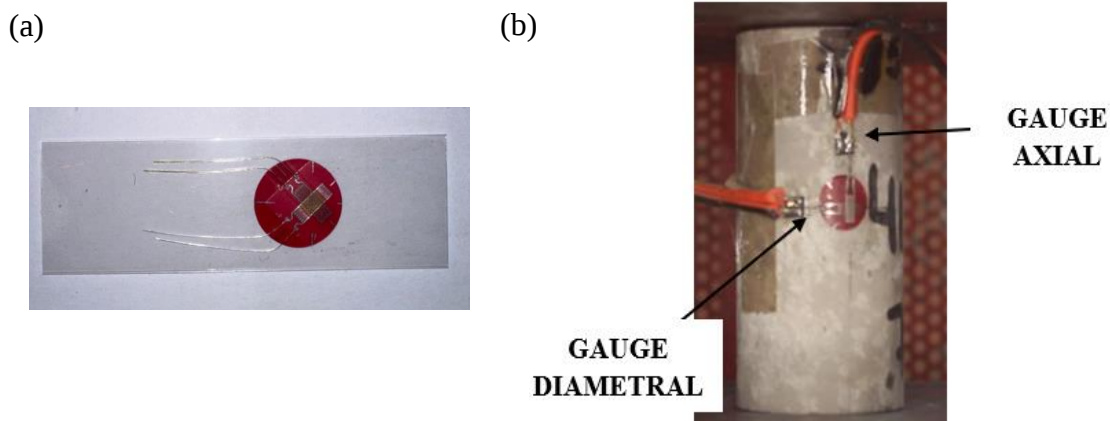


Figura 2.1: Instrumento de medición de deformación, (a) strain gauge previo a su instalación y (b) strain gauge instalado en probeta para el ensayo con disposición de sus orientaciones a medir.

En el caso del estudio de la región *post-peak* se sugiere el método de Fairhurst y Hudson, respaldado por la ISRM, que describe un procedimiento estandarizado para obtener la curva completa de esfuerzo-deformación. Esta curva captura inicialmente la fase *pre-peak*, donde la roca se deforma elásticamente hasta alcanzar su resistencia *peak*, posterior a esta se registra la fase *post-peak*, donde ocurre una degradación de la resistencia hasta llegar a la resistencia residual. Entender el comportamiento *post-peak* es crucial para predecir la estabilidad y durabilidad de estructuras

geotécnicas, ya que refleja cómo la roca soporta cargas una vez que ha fallado, a través del análisis de módulos como el módulo de caída y la resistencia residual [3].

Para capturar dicha curva completa, el ensayo requiere la implementación de máquinas servo-controladas [15], que permiten mantener un control a precisión sobre la aplicación de la carga evitando una falla abrupta [15], especialmente durante la fase *post-peak*. Además, se emplean transductores de desplazamiento (LVDTs) como los que se muestran en la Figura 2.2 para medir tanto la deformación axial como la diametral, y sistemas de adquisición de datos para registrar los resultados en tiempo real. Estos equipos deben cumplir con normativas internacionales como las de la ISRM y ASTM para asegurar la precisión y reproducibilidad de los ensayos, garantizando que los datos obtenidos sean fiables y comparables a nivel global [3].

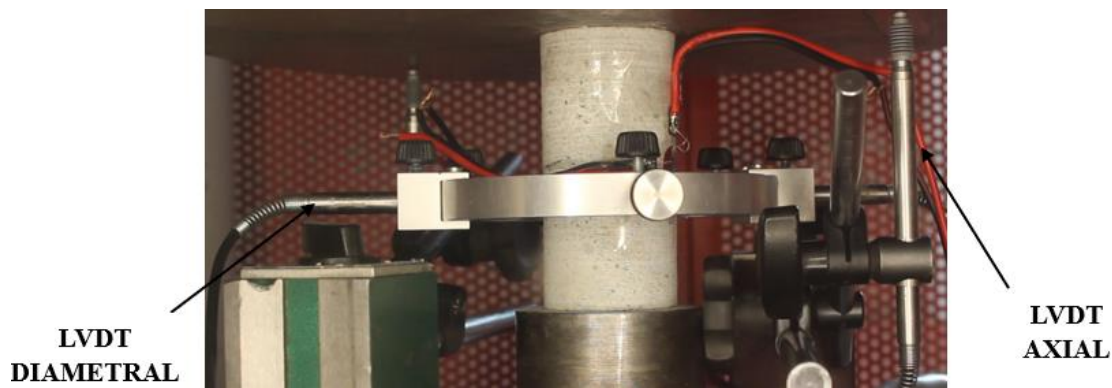


Figura 2.2: LVDT dispuestos en prensa servo-controlada para ensayo UCS con obtención de curva completa.

Según las normativas, es necesario utilizar equipos específicos para llevar a cabo los ensayos y obtener los resultados esperados. Sin embargo, el uso de modelos numéricos y software ofrece una ventaja considerable, ya que no requiere de dichos equipos.

## 2.3 Modelamiento numérico

El uso del modelamiento numérico se emplea fundamentalmente para comprender los mecanismos dominantes que afectan el comportamiento del sistema modelado, posterior a la comprensión del sistema se propone realizar cálculos simples para un proceso de diseño [5]. Algunos modelos se pueden usar netamente para predecir cuándo predomina la existencia basta de datos, en caso contrario se implementa como un laboratorio numérico. La analogía que se hace para entender y respetar el funcionamiento de un modelo es que no funciona como una caja negra con entrada de datos y producción de comportamiento, por lo tanto, se recomienda analizar diferentes muestras y comprender el problema [6].

### 2.3.1 Modelamiento numérico en mecánica de rocas

El modelado numérico en rocas involucra la creación de modelos matemáticos y computacionales que representan la geometría de las formaciones rocosas, las propiedades mecánicas de los materiales, las condiciones de contorno y las cargas aplicadas. Según Starfield y Cundall [4], se establece que el estudio en mecánica de rocas estaba centrado en lo que es la medición de laboratorio y de campo, visión que cambia por tres razones: la facilidad de acceso a paquetes informáticos, aumento en la capacidad de incluir detalles geológicos en la confección y el éxito de la aplicación de modelos en otras áreas. Con esto es importante diferenciar que las herramientas para modelado de mecánica de rocas no son la solución si no la vía para obtenerla [4].

Con el estudio de problemas con limitación de datos, Holling propone el grafico observado en la Figura 2.3 en el cual se establecen dos ejes: uno mide la comprensión del problema, mientras que el otro mide la calidad y/o cantidad de datos [17]. Se obtienen así 4 regiones, siendo la región 2 y 4 las que más limitaciones tienen ya que los datos relevantes no estarían disponibles. De esto, resulta interesante pensar en cómo aplicar herramientas para la confección de modelos a los modelos de mecánica de rocas, que se caracterizan por pocos datos, en general.

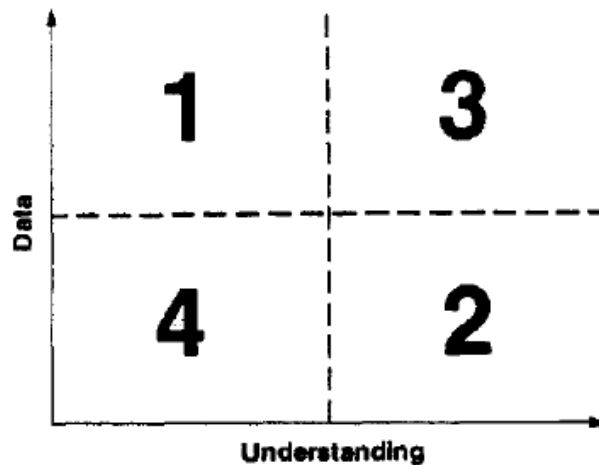


Figura 2.3: Gráfico de clasificación para problemas de modelamiento [17].

Una de las directrices que se deben tener en el modelamiento de esta área sería la simplificación de la realidad, es decir, basar el modelo en la pregunta que se quiere responder en lugar de incorporar detalles del sistema a modelar. De esto se propone construir modelos simples que se relacionen con aspectos del problema y/o abordar la pregunta con distintos enfoques. En el modelado de mecánica de rocas no es útil la validación, sino más bien la ganancia de confianza que se tiene en el modelo haciendo modificaciones en la medida que sea necesario. No se buscan necesariamente predicciones

absolutas, sino una comprensión y conocimiento de las distintas alternativas. Esto se resume con el concepto de “modelado adaptativo”, donde se construye un modelo simple, y en donde los resultados son para obtener datos o nuevas interpretaciones, entregando mejoras al modelo o la creación de nuevos modelos. Por otra parte, siempre se debe tener en cuenta las limitaciones y el alcance que puede tener el modelo planteado realmente, de esta manera se puede tener una idea más aterrizada de los resultados que este arrojará.

Un ejemplo de esto es la implementación de modelos basados en el concepto de plasticidad, en donde se implementa un modelo de aspereza simplificado para relacionar los esfuerzos en las superficies de fractura en conjunto a características consecuentes al proceso de corte, y los modelos de comportamiento global, en donde se destaca la simplificación de modelos y en palabras sencillas aterrizar las ideas y resultados a la pregunta que se busca resolver [18].

Se identifican 4 técnicas de modelado las cuales tienen su propia funcionalidad y enfoque de estudio:

- **Modelos de elemento finitos (FEM):** analiza los esfuerzos y deformaciones de la roca simulando el comportamiento de estructuras en el entorno, aplicable a estabilidad de taludes y excavaciones subterráneas.
- **Modelos de elementos de contorno (BEM):** estudia las interacciones entre estructuras y el medio circundante, la aplicación más relevante es la propagación de ondas en medios rocosos.
- **Modelos de elementos discretos (DEM):** simulan la interacción de partículas individuales, una de las aplicaciones más relevantes es el análisis de respuesta del macizo a cargas dinámicas.
- **Modelos Híbridos:** emplea dos tipos de modelos integrando sus ventajas, un ejemplo de resultado sería la resolución para problemas geotécnicos complejos.

En la Figura 2.4 se puede apreciar la discretización de los modelos mencionados anteriormente, FEM, BEM y DEM para las rocas [18].

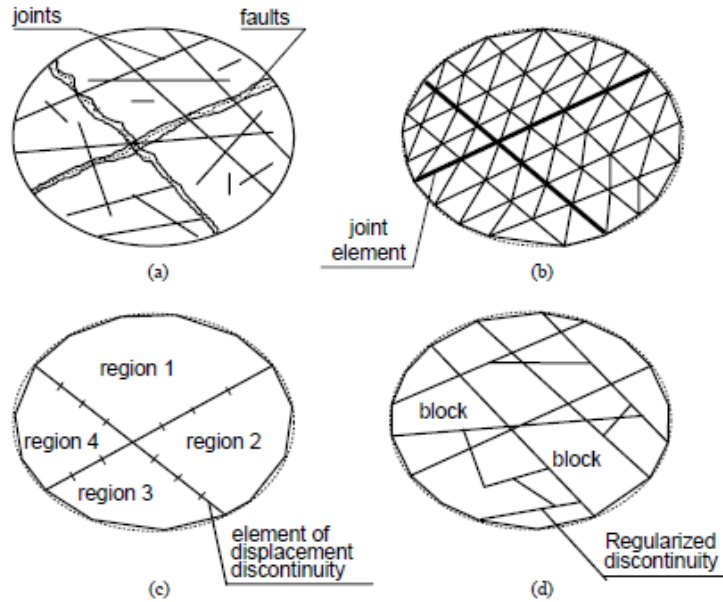


Figura 2.4: Representación de una masa rocosa fracturada mostrada en (a), por FDM o FEM mostrada en (b), BEM mostrada en (c) y DEM mostrada en (d) [18].

## 2.4 Modelamiento numérico con 3DEC

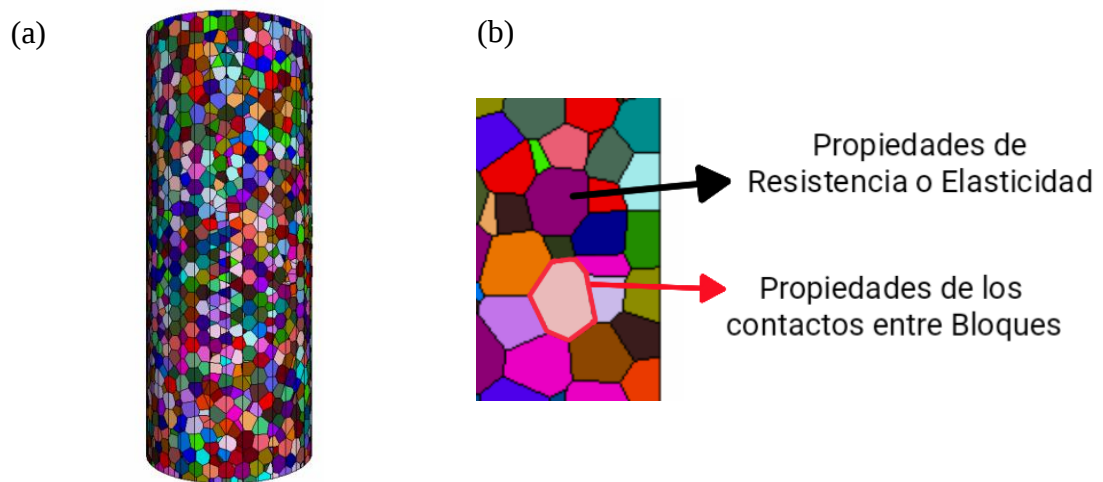
El modelamiento numérico con 3DEC se basa en el uso de Método de Elementos Distintos (DEM), utilizado ampliamente en geomecánica para modelar medios discontinuos, como macizos rocosos fracturados y sistemas de bloques discretos [6]. Este enfoque permite representar interacciones complejas mediante grandes desplazamientos y rotaciones entre bloques, lo que es crucial en problemas geotécnicos donde las discontinuidades, como juntas y fallas, afectan la estabilidad estructural. 3DEC se destaca por su capacidad para modelar tanto cargas estáticas como dinámicas, lo que lo convierte en una herramienta versátil para abordar diferentes escenarios en ingeniería geotécnica y estructural [6].

El software permite representar bloques rígidos o deformables, estos últimos subdivididos en mallas de elementos finitos que responden a leyes de comportamiento elástico o plástico, dependiendo de las propiedades asignadas. Las discontinuidades entre los bloques se comportan de forma no lineal, permitiendo fenómenos similares como el desplazamiento, la apertura o la separación de bloques en función de las condiciones de carga [6]. Esta flexibilidad permite analizar deformaciones complejas y considerar la geometría real del medio, lo que facilita la generación de modelos tridimensionales más representativos de las condiciones reales.

La confección de bloques en 3DEC que mejor se adapta al análisis de fallas consiste en la generación de un conjunto de bloques ajustados a un volumen definido. Estos bloques deben ser caracterizados

asignando propiedades específicas de resistencia o elasticidad según corresponda [6]. Asimismo, es necesario configurar las interacciones (contactos) entre los bloques para determinar su comportamiento. En este contexto, estas propiedades se denominan micro parámetros.

Por otro lado, para evaluar el comportamiento del modelo, es fundamental analizar el conjunto de las partículas que lo componen. Esto permite obtener resultados que representan el comportamiento global del modelo, definidos como macro parámetros, los cuales emergen del conjunto de micro parámetros previamente caracterizados. Una forma gráfica de entender la configuración del software se representa en la Figura 2.5 donde en (a) se observa un modelo confeccionado por agrupación de bloques y en (b) se tiene una vista micro de los bloques donde se identifican los bloques y sus contactos.



*Figura 2.5: Configuración de un modelo por bloques de 3DEC, a) representa el modelo con macro propiedades a partir de un conjunto de bloques y b) visualización de los bloques con sus micro propiedades [6].*

Para el uso eficiente de 3DEC es fundamental definir con precisión las propiedades físicas y mecánicas de los bloques y las discontinuidades, lo que permite construir modelos tridimensionales ajustados a las características específicas del proyecto [6]. El software incluye herramientas interactivas para construir, visualizar y ajustar el modelo durante la simulación, facilitando la interpretación de los resultados. Además, el lenguaje de programación integrado FISH permite desarrollar funciones personalizadas, automatizar procesos y realizar estudios de sensibilidad, adaptando el análisis a las necesidades específicas de cada proyecto [6]. Esta capacidad de personalización amplía el potencial del software, permitiendo realizar ajustes sobre la marcha para explorar diferentes escenarios y optimizar la toma de decisiones.

En 3DEC, el procesamiento por ciclos es el método iterativo mediante el cual el software calcula el comportamiento de los bloques y contactos en cada paso de tiempo. Este enfoque es necesario porque 3DEC utiliza un método explícito basado en el tiempo, donde las ecuaciones de movimiento se resuelven progresivamente en pequeños intervalos de tiempo [6]. Una característica destacada del software es su capacidad para reconocer automáticamente nuevos contactos durante las simulaciones, lo que incrementa su precisión al modelar situaciones en las que las superficies se desplazan y generan interacciones inesperadas.

El enfoque explícito en el dominio del tiempo es ideal para analizar escenarios con grandes desplazamientos y deformaciones rápidas, como graduales o excavaciones, permitiendo evaluar tanto condiciones estáticas como dinámicas. Para lograr simulaciones precisas, especialmente en casos complejos como fallas en taludes o excavaciones dinámicas, es necesario ejecutar el modelo en miles o incluso cientos de miles de pasos, ya que cada ciclo representa un pequeño intervalo de tiempo. Esto lo convierte en una herramienta adecuada para evaluar la respuesta de las estructuras en condiciones tanto estáticas como dinámicas, mejorando la capacidad de anticipar problemas y optimizar soluciones.

Entre sus aplicaciones se encuentran el análisis de taludes y laderas, la planificación y diseño de excavaciones subterráneas, y la evaluación de la interacción entre las estructuras de soporte y los macizos rocosos [6]. 3DEC también permite generar patrones de juntas y fallas de forma manual o estadística, lo que facilita la incorporación de datos geológicos en los modelos. Su capacidad para integrar estos patrones y evaluar el comportamiento de los materiales bajo distintas condiciones de carga es especialmente útil en proyectos de minería, construcción subterránea y obras civiles.

La interfaz gráfica de este software facilita la manipulación y visualización de los modelos tridimensionales, permitiendo al usuario explorar en tiempo real los efectos de diferentes parámetros. La combinación de gráficos, contornos y vistas tridimensionales permite interpretar los resultados de manera intuitiva y documentar cada etapa del análisis de forma eficiente pudiendo además exportar los datos y documentos necesarios de manera rápida [6].

## **2.5 Herramientas de análisis estadístico**

El análisis estadístico es la herramienta predilecta para interpretar y comprender los datos en estudios científicos y experimentales [19]. Estos análisis permiten llegar a conclusiones significativas a partir de la información que el conjunto de datos entrega, evaluando si los patrones observados son

resultado de factores controlados o simplemente producto del azar [20]. Los análisis estadísticos se utilizan esencialmente para identificar tendencias, comparar grupos, evaluar relaciones y hacer inferencias que guíen las decisiones que se requieren tomar a partir del uso de un análisis. Los métodos estadísticos aplicados dependen del tipo de datos y de la estructura del experimento, ya que diferentes situaciones requieren técnicas específicas para asegurar que los resultados sean válidos y confiables [20].

Para aplicar un análisis estadístico a un experimento, este debe poseer un diseño planificado haciendo compatible su uso, teniendo en cuenta a su vez el tipo de análisis a realizar [19]. Esto implica definir las variables dependientes e independientes, asegurando que las muestras sean representativas y que el experimento tenga principios tales como la replicación, lo que permite evaluar la variabilidad característica en los datos [19]. Además, el diseño del experimento debe contemplar un número suficiente de observaciones para que los resultados tengan poder estadístico, es decir, la capacidad de detectar efectos reales cuando estos existen. De este modo, se maximiza la validez y precisión de las conclusiones extraídas a partir del análisis.

### **2.5.1 Análisis ANOVA**

El análisis de varianza (ANOVA) es una prueba estadística empleada para comparar las medias de tres o más grupos de datos, para identificar si existen diferencias significativas entre ellos. Su propósito principal al ser una herramienta de análisis estadístico es determinar si las variaciones observadas en los datos pueden atribuirse a factores reales o si son el resultado del azar, así el test de ANOVA es particularmente efectivo en estudios donde se manipulan una o más variables independientes, entendiéndose estas como factores, y se mide su efecto sobre una variable dependiente continua [19].

ANOVA tiene dos tipos de diseño que varían fundamentalmente en la cantidad de factores que tienen implicancia en el modelo, el diseño más común es el ANOVA de un factor, en el que se evalúa el impacto que tiene un solo factor categórico en la variable dependiente, un modelo más complejo, es el ANOVA de dos o más factores, donde se contemplan interacciones entre múltiples factores. La construcción del modelo comienza con la recolección de datos de diferentes grupos, donde cada grupo corresponde a un nivel del factor, niveles que se deben definir previamente. Luego, se analiza la varianza total de los datos, dividiéndola en dos componentes: la varianza entre los grupos, que mide

las diferencias entre las medias de los grupos, y la varianza dentro de los grupos, que refleja la variabilidad dentro de cada grupo.

Los resultados de la prueba ANOVA se basa en los indicadores F y P-value, el primero mide la proporción de la varianza explicada por las diferencias entre los grupos en comparación con la varianza no explicada es decir dentro de los grupos. Un valor elevado de F indica que no es probable que las diferencias entre los grupos se deban al azar, lo que puede llevar al rechazo de la hipótesis nula, que sostiene que no existen diferencias entre las medias de los grupos. El P-value indica la probabilidad de que las diferencias observadas entre las medias de los grupos ocurran por azar si la hipótesis nula es cierta, un P-value bajo indica una alta probabilidad de que las diferencias sean reales, mientras que un P-value alto indica que las diferencias no son lo suficientemente grandes como para considerarse significativas. Es importante establecer un nivel de significancia, comúnmente 0.05, antes de realizar la prueba, para determinar si las diferencias observadas son estadísticamente significativas [20].

### **3 METODOLOGÍA**

La representación interna de la roca mediante bloques con distintas configuraciones geométricas y ajustes es esencial en el modelado numérico, ya que las heterogeneidades y anisotropías internas afectan significativamente su comportamiento mecánico bajo carga. Para ello, se utiliza un modelo DEM implementado en 3DEC, que permite generar bloques de formas definidas, los cuales pueden moverse, deformarse e interactuar entre sí. Esto facilita la simulación detallada de la interacción entre bloques durante un ensayo de compresión uniaxial, capturando fenómenos de contacto y fracturamiento a escala microscópica que influyen directamente en el comportamiento macroscópico de la roca.

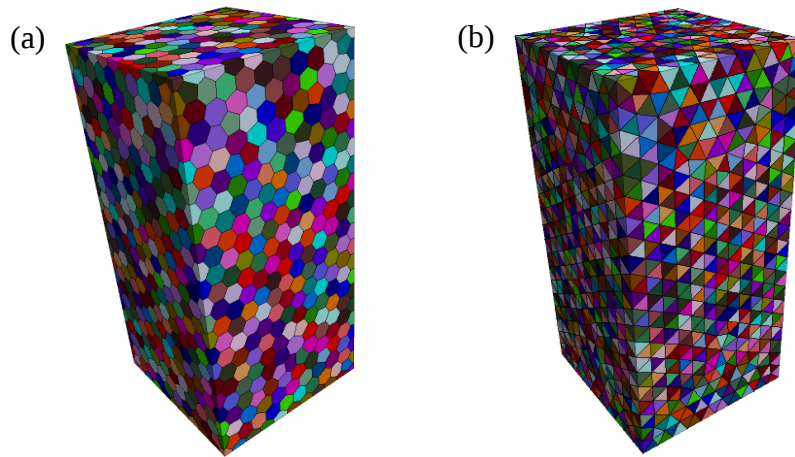
#### **3.1 Confección del modelo**

La creación del modelo se divide en dos etapas. La primera consiste en la elaboración de la muestra a ensayar, representada por una probeta cilíndrica con dimensiones específicas, acorde a las pruebas realizadas en el laboratorio de mecánica de rocas. Esta probeta está compuesta por bloques más pequeños, cuyas configuraciones, tetraédrica y Voronoi, se seleccionan para el estudio. En la segunda etapa, se asignan propiedades variables a estos bloques según las condiciones de cada simulación, permitiendo analizar su comportamiento bajo distintos parámetros.

Es importante mencionar que el modelo de la probeta para cada configuración no cambia su estructura al efectuarse las simulaciones, en otras palabras, es la misma probeta para todos los ensayos, lo que cambia son las propiedades que poseen los bloques que componen la probeta los cuales se determinan como iguales dentro de una misma estructura.

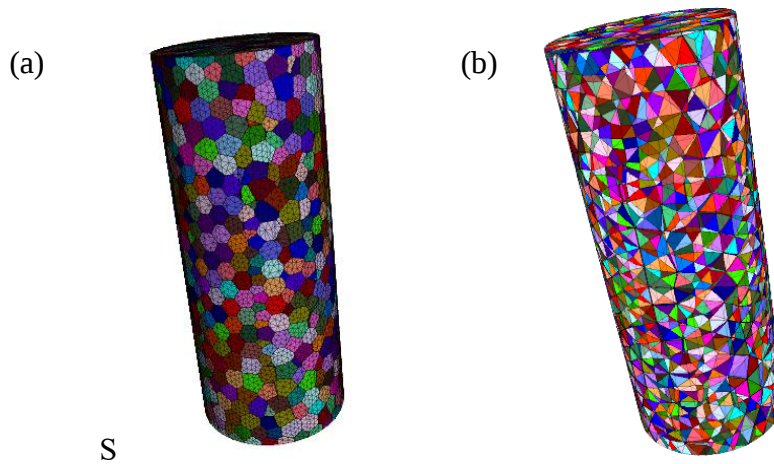
##### **3.1.1 Creación de la probeta**

La confección de los modelos se realiza a partir de cuerpos sólidos con volumen definido los cuales se importan al software 3DEC. Inicialmente se trabaja con un bloque rectangular con dimensiones 6 cm x 6 cm x 12.5 cm en el cual, se generan bloques que tengan 6 mm como largo máximo, para ambas configuraciones propuestas para el estudio apreciables en la Figura 3.1. La primera configuración geometría es un grano con mallado tipo Voronoi lo que se asemeja a una forma y distribución de panal de abeja, la segunda configuración se define como tetraédrica la cual es un polígono con forma triangular con volumen. Para la creación del modelo se utiliza como referencia un código presentado como ejemplo titulado “Prueba UCS con bloques Voronoi” de Itasca Consulting Group [6].



*Figura 3.1: Estructura rectangular 3D: (a) granos tipo Voronoi (bloques totales generados 20 770) y (b) granos tipo tetraedro (bloques totales generados 77 342)*

Posterior a esto se realiza un corte al modelo para obtener la forma cilíndrica asemejándose de mejor manera a las muestras con el que se trabajaría en ensayos convencionales de laboratorio, el corte realizado permite mantener un diámetro de 6 cm y altura de 12.5 cm, la Figura 3.2 muestra el modelo resultante al cual se le aplicará en ensayo UCS.



*Figura 3.2: Probeta cilíndrica: (a) granos tipo Voronoi (contempla 11 380 bloques) y (b) granos tipo tetraedro (contempla 46 327 bloques)*

### **3.1.2 Asignación de propiedades y ensayo**

Con las probetas confeccionadas se procede con la configuración de propiedades para los bloques y los contactos entre ellos, en esta sección se toman algunas consideraciones para el comportamiento del modelo.

```

5 ; Propiedades
6 block zone cmodel assign elastic
7 block zone prop young (A) pois (B) density (C)
8 block contact jmodel mohr
9 block contact prop stiffness-normal 7.6e13 stiffness-shear (D) ...
8 10 cohesion (E) tension (F) friction (G)
11 block contact material-table default prop stiffness-normal 7.6e13 ...
8 12 stiffness-shear (D) friction (G)

```

Figura 3.3: Extracto del código para la confección del modelo con la asignación de propiedades.

La Figura 3.3 es un extracto del código para las propiedades del modelo. La línea 6 indica que el modelo es elástico, lo que significa que los bloques no tienen propiedades de resistencia al corte o tracción de esta manera únicamente influyen los parámetros elásticos. Los bloques se definen por 3 propiedades elásticas (línea 7), que son los micro parámetros del modelo y representan las características mecánicas de los granos individuales:

1. Módulo de Young (*young*) (GPa): describe cuán rígida es la roca al ser sometida a esfuerzos, es decir, cuánta deformación elástica experimentará bajo una carga determinada.
2. Razón de Poisson (*pois*): es la relación entre la deformación lateral y la deformación axial cuando el material es sometido a una carga. Este parámetro ayuda a describir cómo se comporta la roca en términos de expansión lateral al ser comprimida.
3. Densidad (*density*) ( $\text{kg/m}^3$ ): es la masa por unidad de volumen del material. Este parámetro es importante para simular el comportamiento dinámico de la roca, ya que influye en cómo responde a las fuerzas gravitacionales y otras cargas externas.

La línea 8 asigna un modelo constitutivo Mohr-Coulomb para los contactos de los bloques explicado en el Anexo C, considerando que este criterio se usa para definir cuando ocurrirá la falla por corte, se tiene la necesidad de definir 5 micro parámetros (línea 9 y 10) para los contactos:

1. Rigidez de corte (*stiffness-shear*) (GPa/m): identificado como  $k_n$ , representa la resistencia al desplazamiento tangencial entre los bloques en el modelo DEM, controlando cómo los bloques resisten el acercamiento o la separación normal al plano de contacto.
2. Rigidez normal (*stiffness-normal*) (GPa/m): identificado como  $k_s$ , mide la resistencia al desplazamiento entre dos superficies en contacto en la dirección normal o perpendicular al plano de contacto.

3. Cohesión (*cohesion*) (MPa): describe la fuerza interna que mantiene unida la roca. En el contexto de la mecánica de rocas, la cohesión es fundamental para modelar la resistencia al corte de la roca, especialmente cuando se simula el inicio de fracturas.
4. Resistencia a la tracción (*tension*) (MPa): se refiere a la resistencia a la tracción de la roca. La roca generalmente tiene una resistencia menor a la tracción que a la compresión, por lo que este parámetro es esencial para predecir en qué punto la roca puede comenzar a fracturarse bajo tensiones de tracción.
5. Ángulo de fricción (*friction*) ( $^{\circ}$ ): es una medida de la resistencia al deslizamiento entre superficies dentro de la roca o entre bloques en el modelo.

Las últimas dos líneas (11 y 12) aseguran el funcionamiento del modelo, generando una tabla de datos predeterminados para cualquier contacto que no tenga propiedades específicas, completando con los parámetros que se señalan.

Para el ensayo UCS, ambas caras basales tendrán desplazamiento de manera que convergen para hacer el esfuerzo axial como se muestra en la Figura 3.4. El código sigue la lógica de tomar los puntos extremos de la probeta y aplica un desplazamiento en el eje Z de -0.05 m/s en la cara superior y 0.05 m/s en la cara inferior.



Figura 3.4: Representación de vectores de fuerza axial para ensayo UCS

## 3.2 Diseño experimental

Para el diseño experimental del modelo de UCS, se considera necesario utilizar siete micro parámetros, esto se debe a que la rigidez de corte y la normal como parámetro base tienen el mismo valor, lo que significaría hacer la misma variación en ambos niveles por lo que en algún punto las combinaciones que se realicen considerando estos dos parámetros no tendrán diferencia significativa en el comportamiento. De este modo se opta por variar 7 de los parámetros mencionados anteriormente y la rigidez de corte se mantiene constante para todos los ensayos, basados en lo descrito por Lan et al. [7]. En su trabajo, se detalla un experimento de modelamiento numérico similar en cuanto al ensayo, aunque diferente en la configuración geométrica de los granos del experimento actual. No obstante, su estudio resulta útil para trabajar con propiedades de roca previamente analizadas. El uso de estos micro parámetros, detallados en la Tabla 3.1, permite obtener resultados de un ensayo UCS dentro de los márgenes esperados para ambas geometrías, generando curvas esfuerzo-deformación con segmentos bien definidos en relación con los macro parámetros necesarios para los análisis posteriores, como el módulo de Young de la muestra, la resistencia máxima, el módulo de caída y la resistencia residual. La curva esfuerzo-deformación resultante se presenta en la Figura 3.5.

Tabla 3.1: Parámetros usados para el modelo base.

| Micro parámetro               | Base   |
|-------------------------------|--------|
| Módulo de Young [GPa]         | 76     |
| Poisson [-]                   | 0.25   |
| Densidad [kg/m <sup>3</sup> ] | 2 000  |
| Rigidez de corte [GPa/m]      | 76 000 |
| Cohesión [MPa]                | 40     |
| Tensión [MPa]                 | 14.4   |
| Fricción [°]                  | 10     |

Para poder validar el diseño experimental se comparan las magnitudes de variables usadas entre el ejemplo de Itasca antes mencionado, el estudio de Lan et al. [7] y el ensayo propio efectuado llegando al hecho de usar las unidades vistas en la tabla anterior. El ensayo se logra validar al obtener una curva dentro de los márgenes comúnmente aceptados y, como se muestra en la Figura 3.5 ,con un comportamiento mecánico característico de la probeta frente a condiciones de compresión uniaxial.

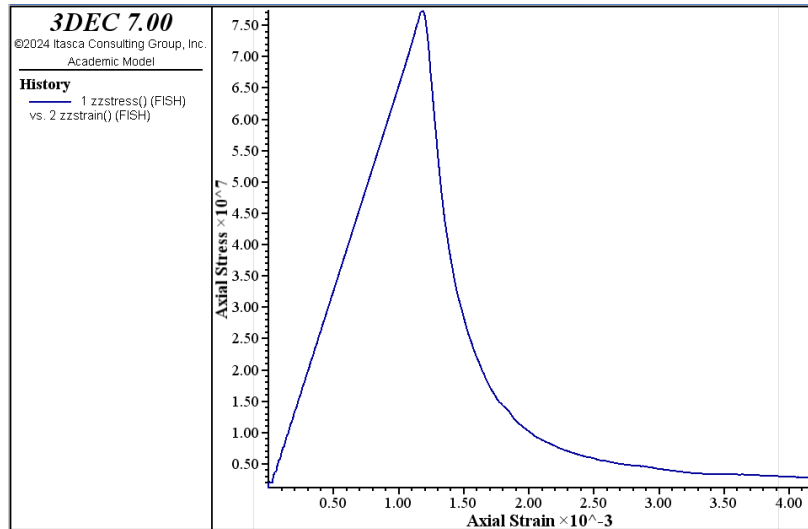


Figura 3.5: Curva esfuerzo deformación con parámetros base obtenidos de la literatura, resultado obtenido directamente de la software 3DEC.

### 3.2.1 Variación de parámetros

Para analizar la influencia de la geometría de los bloques en una muestra, con distintos ajustes de propiedades microscópicas, se realizaron variaciones en los parámetros creando dos niveles agrupados de valores. Estos niveles se categorizan como -1, 0 y +1. El nivel -1 corresponde a valores inferiores al valor base determinado, el nivel 0 representa los valores base, y el nivel +1 corresponde a valores superiores a los valores base.

Los términos se variaron de forma heurística dentro de límites razonables a lo que se puede obtener en la realidad de manera que se pudieran evaluar cambios significativos en las muestras modeladas. En un inicio se probó una variación del diez puntos porcentuales para todos los parámetros base manteniendo un enfoque más bien conservador. Sin embargo, los resultados esperados no suponían cambios significativos para un análisis posterior, por consiguiente, se optó por aumentar la variación de algunos parámetros en treinta por ciento con respecto al parámetro base, de esta manera los cambios son más perceptibles y con mejor oportunidad de análisis.

La configuración resultante se muestra en la Tabla 3.2, donde la mayoría de los parámetros se varían en las cantidades mencionadas anteriormente. La densidad, en ambos niveles, se ajustó con una variación del diez por ciento, manteniendo valores típicos para muestras de rocas en este contexto. Por otro lado, el parámetro de fricción se mantuvo igual al valor base en el nivel negativo, mientras que en el nivel positivo se incrementó a cuatro veces su valor base.

Tabla 3.2: Parámetros de variación para la ejecución de las simulaciones.

| Micro parámetro               | -1 |        | +1 |        |
|-------------------------------|----|--------|----|--------|
| Módulo de Young [GPa]         | A- | 53.2   | A+ | 98.8   |
| Poisson [-]                   | B- | 0.175  | B+ | 0.325  |
| Densidad [kg/m <sup>3</sup> ] | C- | 1 800  | C+ | 2 200  |
| Rigidez de corte [GPa/m]      | D- | 53 200 | D+ | 98 800 |
| Cohesión [MPa]                | E- | 28     | E+ | 52     |
| Tensión [MPa]                 | F- | 10.1   | F+ | 18.7   |
| Fricción [°]                  | G- | 10°    | G+ | 40°    |

Los dos niveles presentados darán paso al uso del análisis estadístico multivariado, llevado a cabo por la mencionada prueba de ANOVA en el título 2.5.1, la cual requiere esta diferenciación en los valores para señalar significancia en los parámetros ocupados.

### 3.2.2 Combinaciones para simular

Para darle cumplimiento al primer objetivo específico, donde se plantea el análisis a distintas configuraciones de las micro propiedades se crean todas las combinaciones posibles entre los niveles planteados en el título anterior (Tabla 3.2). De esta manera se obtiene un total de 128 combinaciones, las cuales se traducen en propiedades que tendrán los granos de un modelo confeccionado bajo la configuración de diseño. La ejemplificación de las combinaciones se visualiza en la Tabla 3.3 donde se hace la conexión del rotulado que se emplea en la Tabla 3.2.

Tabla 3.3: Distribución de las combinaciones de los parámetros evaluados en distintos niveles.

| Simulaciones | Young | Poisson | Densidad | Rigidez de corte | Cohesión | Tensión | Fricción |
|--------------|-------|---------|----------|------------------|----------|---------|----------|
| 1            | A+    | B+      | C+       | D+               | E+       | F+      | G+       |
| 2            | A+    | B+      | C+       | D+               | E+       | F+      | G-       |
| 3            | A+    | B+      | C+       | D+               | E+       | F-      | G+       |
| ...          | ...   | ...     | ...      | ...              | ...      | ...     | ...      |
| 128          | A-    | B-      | C-       | D-               | E-       | F-      | G-       |

Se formulan todas las combinaciones posibles a partir de los 7 micro parámetros, esto resulta en un total de 128 combinaciones aplicables para las dos configuraciones. Es decir, se deben simular 128 combinaciones para la configuración Voronoi y otras 128 para la configuración de tetraedro lo que entrega un total de 256 simulaciones para el estudio.

### 3.3 Interpretación de los resultados

A partir de cada modelo configurado, con sus parámetros y condiciones definidas, es posible obtener distintos resultados según lo que se busca analizar. En consecuencia, se opta por fijar interés en analizar el comportamiento de la muestra mediante la curva esfuerzo deformación completa, es decir, el estudio de la zona *pre* y *post-peak*.

Frente a la necesidad de tener una curva más descriptiva respecto a la resultante del software, se confecciona una nueva grafica con los datos obtenidos incorporando además marcadores como se aprecia en la Figura 3.6 la cual es la curva obtenida para la configuración Voronoi con los parámetros base. Los cuatro marcadores se identifican como los macro parámetros de interés, es decir las propiedades que tiene la probeta como estructura completa.

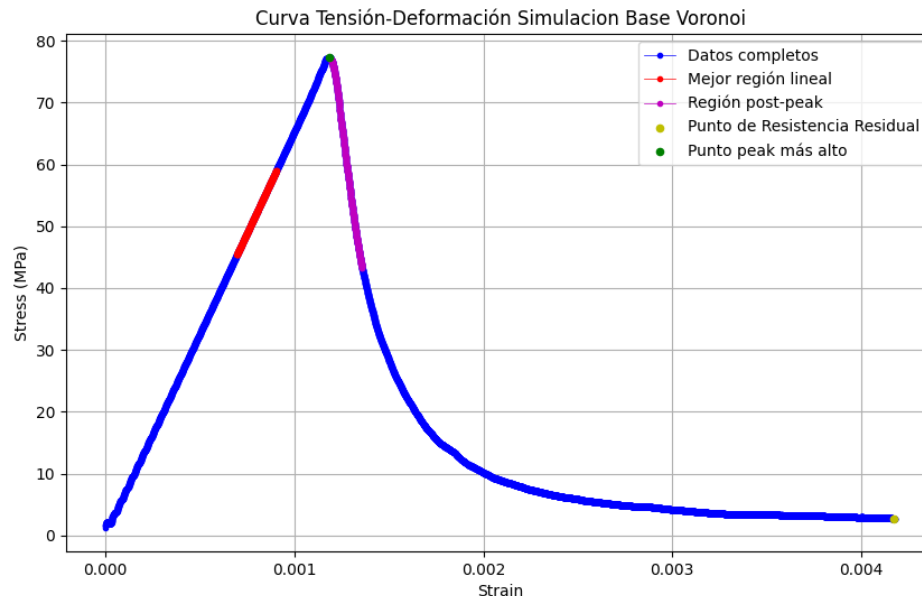


Figura 3.6: Ejemplo de curva esfuerzo-deformación obtenida con delimitación de los cuatro macro parámetros de interés

Esta es la primera forma de interpretación de resultados, luego se procede al trabajo más específico con la obtención de parámetros mecánicos necesarios para un análisis estadístico. Luego, se revisa como quedaron las muestras del modelo numérico para analizar la respuesta física de la roca.

#### 3.3.1 Estudios estadísticos

El análisis estadístico es una herramienta para interpretar los resultados numéricos obtenidos del ensayo. Para ello, primero se debe seleccionar un método de análisis adecuado y determinar qué datos son necesarios para aplicarlo correctamente. Dado el planteamiento del problema y el trabajo

con variables en múltiples niveles, se ha optado por un análisis estadístico multivariado mediante la prueba de ANOVA. Este estudio permitirá identificar los parámetros clave en el control del comportamiento mecánico del modelo propuesto.

Los resultados de la prueba ANOVA permitirán determinar cuál de los siete micro parámetros identificados en la Tabla 3.2 y sus interacciones tienen un efecto significativo en los resultados de un macro parámetro. En este estudio, se aplicará el análisis individualmente a los cuatro macro parámetros de la muestra con el fin de evaluar la validez de los resultados en un contexto general, para así llegar a considerar los modelos como representativos.

Es importante comprender cómo la prueba de ANOVA presenta los resultados, los cuales se organizan principalmente en tablas. De estas, destacan dos que se analizarán a continuación. La primera corresponde al análisis de varianza, que se compone de seis columnas, descritas individualmente a continuación:

- **Fuente:** Representa los factores o variables independientes que estás evaluando.
- **Grados de Libertad (GL):** Indica cuántos valores pueden variar dentro de cada fuente de variación sin perder información.
- **Suma de Cuadrados Ajustada. (SC Ajust.):** Mide la variabilidad total asociada con cada factor. Representa cuánto contribuye cada fuente al total de la variabilidad en los datos.
- **Media Cuadrática Ajustada. (MC Ajust.):** Calculada como la SC Ajustada dividida por sus grados de libertad (GL). Es una medida de la variabilidad promedio explicada por cada factor.
- **Valor F:** Es el resultado de dividir la MC Ajustada de cada factor por la MC del Error. Representa la razón entre la variabilidad explicada por el factor y la variabilidad no explicada (error). Un valor alto indica que el factor tiene un efecto significativo.
- **Valor P:** Determina si el factor tiene un efecto significativo en el modelo. Un valor p menor que 0.05 suele indicar que el factor es estadísticamente significativo.

Por otra parte, se tiene la tabla del resumen del análisis estadístico, la cual nos entrega una información acotada pero precisa de cómo se está comportando el modelo a partir del estudio de sus variables. Esta tabla se compone de cuatro columnas, descritas de la siguiente manera:

- **Desviación estándar residual (S):** Es una medida de la dispersión de los datos residuales, es decir, cuánto se desvían los datos observados de los valores predichos por el modelo. Un valor

bajo de S indica que el modelo ajusta bien los datos y que las predicciones son cercanas a los valores observados.

- **R<sup>2</sup>**: Mide la proporción de la variabilidad total en la variable dependiente que es explicada por el modelo. Es una métrica útil para evaluar qué tan bien el modelo captura las tendencias generales en los datos.
- **R<sup>2</sup> ajustado**: Es una versión corregida del R-cuadrado que penaliza el uso de demasiadas variables en el modelo. Al agregar más predictores, el R-cuadrado estándar puede aumentar incluso si las variables no son significativas. El R-cuadrado Ajustado corrige esto, considerando el número de predictores y la cantidad de datos.
- **R<sup>2</sup> predictivo**: Mide la capacidad del modelo para predecir datos nuevos que no fueron incluidos en el ajuste. Este valor es esencial para evaluar el desempeño del modelo fuera de la muestra utilizada para construirlo.

### 3.3.2 Representación física de la evolución del daño

El ensayo de compresión uniaxial es un ensayo destructivo. En un laboratorio de ensayos convencional además de los parámetros mecánicos que se obtienen, se hace la inspección visual determinando el modo de falla y el comportamiento de la muestra. Es por esto por lo que resulta necesario observar el comportamiento de la muestra durante y hacia el final del ensayo, para las muestras que se construyen con los distintos tipos de bloque, haciendo además la diferenciación en como falla la roca a partir de las geometrías de los bloques que la componen.

Las representaciones a y b de la

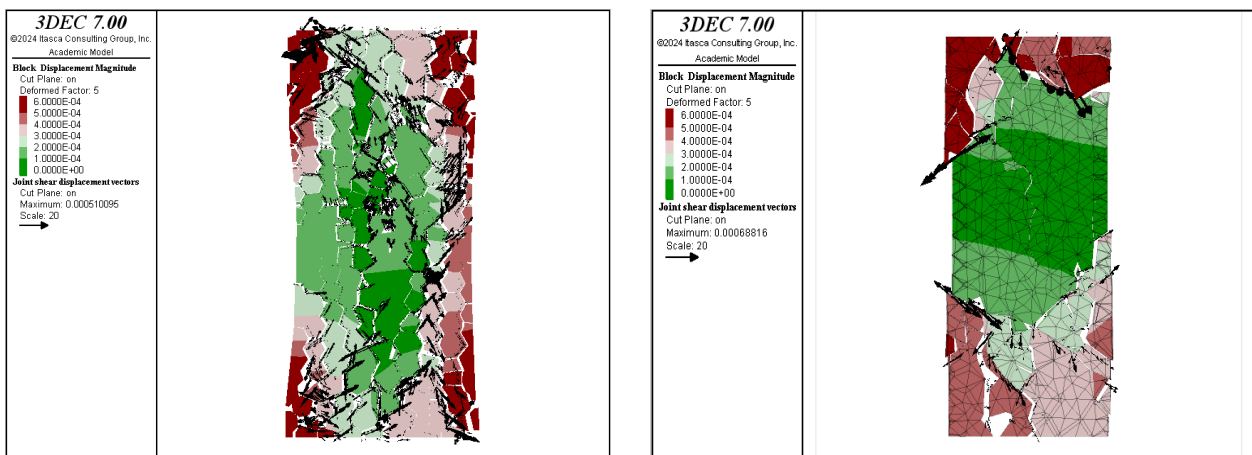


Figura 3.7 ejemplifican dos de las 256 simulaciones totales efectuadas desde una perspectiva de falla de muestra. Si bien solo muestran el resultado final de una simulación en específico, se hace la diferenciación en cuanto a la cuanto se deforman las muestras entre ambas configuraciones.

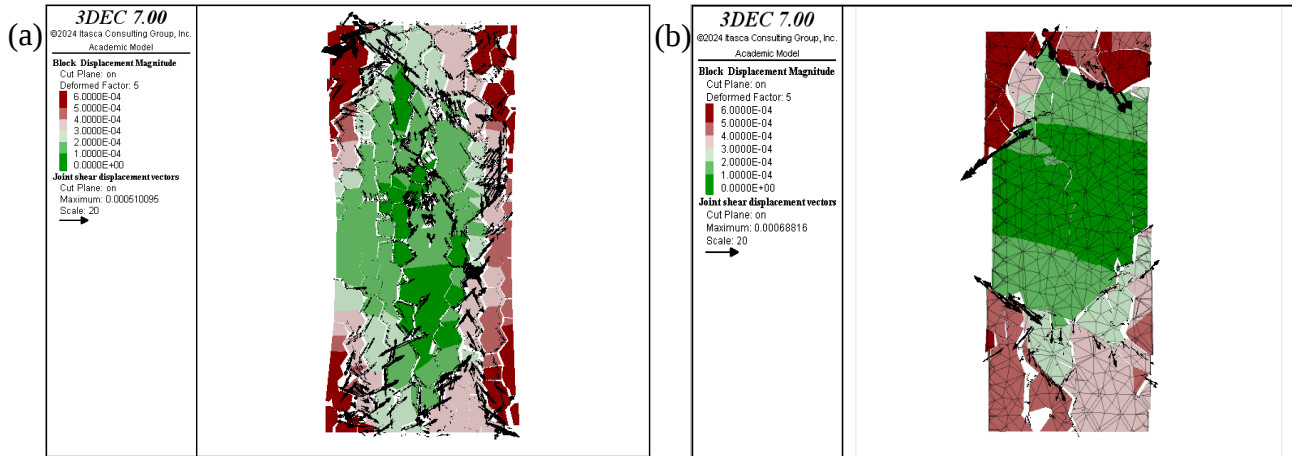


Figura 3.7: Estado de la muestra en la simulación 2, correspondiente al fin de la simulación a los 100 000 ciclos de ejecución, coeficiente de deformación de 5, para configuración (a) Voronoi y (b) tetraédrica.

La correcta interpretación del comportamiento de las muestras está condicionada por los cambios que estos experimentan durante el ensayo, los cuales se pueden registrar y analizar mediante el uso del software, diferenciando las dos partes de la curva completa, pre y *post-peak*. Para lograr esto, el análisis de resultados incluye un resumen del comportamiento de las muestras a lo largo del ensayo, haciendo un seguimiento en puntos clave de la curva y evaluando el nivel de fracturamiento de la muestra.

Con el fin de unificar criterios en la interpretación de resultados, se opta por mantener una leyenda consistente que represente adecuadamente todas las muestras, minimizando los cambios salvo en casos excepcionales donde se priorizó la visualización detallada.

## 4 RESULTADOS Y ANÁLISIS

### 4.1 Comportamiento mecánico a partir de curvas esfuerzo-deformación

Para analizar la influencia de la geometría de los bloques en el modelo confeccionado y, a partir de las configuraciones de las micro propiedades identificadas y especificadas en la Tabla 3.2, se estudia el resultado de las 128 simulaciones para cada modelo, basándose principalmente en los parámetros que se pueden interpretar de las curvas.

#### 4.1.1 Bloques Voronoi

Para el modelo con configuración de Voronoi, el análisis inicial de las curvas resultantes y los parámetros obtenidos muestran dos comportamientos mecánicos distintos y específicos en las muestras. El primer comportamiento corresponde al denominado *strain softening*, el cual hace referencia a la disminución del esfuerzo que soporta un material después de haber alcanzado su resistencia *peak* durante el ensayo de carga. En este comportamiento a medida que la deformación aumenta posterior al *peak*, el esfuerzo empieza a reducirse gradual y rápidamente, lo que indica que el material pierde su capacidad de carga. Esto ocurre debido a la evolución de daños internos, tales como micro fisuras o fallas locales. Por lo que se caracteriza como un comportamiento frágil por parte de la muestra y representa el cambio de una etapa elástica a una de falla progresiva, donde el material se debilita con el aumento de la deformación. Dicho fenómeno se ve ejemplificado en la Figura 4.1, este comportamiento se ve representado en 83 de las 128 simulaciones (lo que equivale al 62.5% de las simulaciones) para esta configuración.

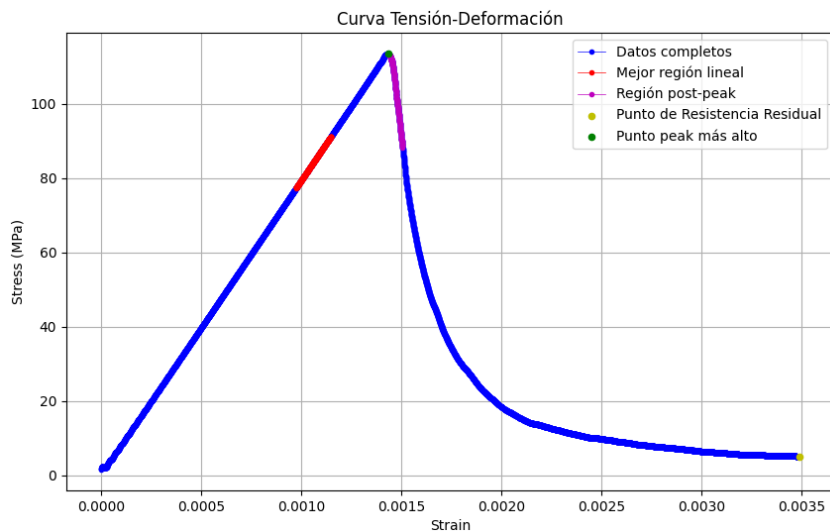


Figura 4.1: Curva esfuerzo-deformación para configuración Voronoi, simulación 10 con comportamiento *strain softening*.

Además, también se puede observar el comportamiento *strain hardening*, el cual corresponde al incremento continuo del esfuerzo que un material puede soportar a medida que aumenta la deformación después de haber superado el límite de fluencia, donde, para el caso de estudio planteado, se grafica como una inflexión leve. En este caso, el modelo se vuelve más resistente y requiere un esfuerzo adicional para seguir deformándose, lo que implica el efecto en la curva de la Figura 4.2 donde a pesar de contar con 100 000 ciclos de procesamiento la curva no muestra indicios de un descenso en la resistencia soportada. Este comportamiento se observa en 45 de las 128 simulaciones (representando el 37.5% restante de las simulaciones).

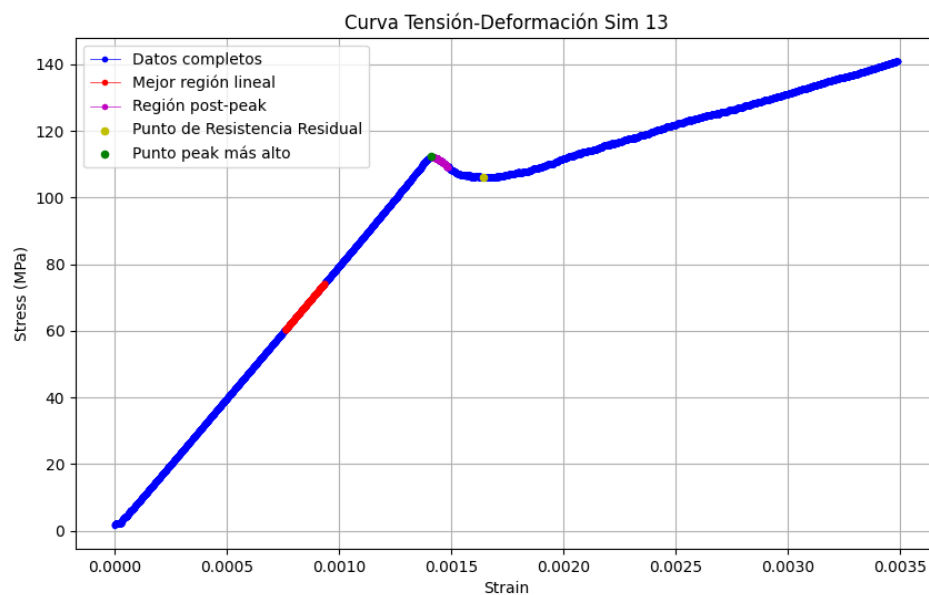


Figura 4.2: Curva esfuerzo-deformación para configuración Voronoi, simulación 13 con comportamiento *strain hardening*.

La diferencia en los comportamientos se debe principalmente al cambio de propiedades de los granos del modelo. A partir de observaciones, del origen del comportamiento *strain hardening* se atribuye a la variación positiva de la fricción, que tiene un valor de  $40^\circ$ , lo supone un valor alto y coincide con las 45 simulaciones que tienen este comportamiento. Sin embargo, aún no se logra identificar otra configuración de variable que se repita en todos los casos, por lo que se asume que ciertas configuraciones inducen este comportamiento debido al ángulo de fricción interna del modelo. En la Tabla 6.1 del Anexo A

se encuentra la tabla de combinaciones indicadas alfabéticamente, donde las simulaciones destacadas corresponden a las configuraciones con este tipo de comportamiento en su curva.

En el caso de los macro parámetros, se determina que el valor de resistencia residual no es representativo para identificar las curvas de *strain hardening* de manera rigurosa. Sin embargo, dicho valor sí fue utilizado en el análisis estadístico posterior, con el fin de analizar el espectro.

#### 4.1.2 Bloques tetraédricos

El modelo con bloques tetraédricos, a diferencia de la configuración Voronoi, solo presenta el comportamiento *strain softening*, explicado en el segmento anterior, con lo que se podría determinar que esta configuración se comporta más estable en general. En cuanto a las curvas, se observan variaciones importantes en la deformación necesaria para que las muestras ensayadas alcancen la resistencia *peak*, según el caso como se ejemplifica en la Figura 4.3. En esta figura, la simulación 2 alcanza el punto máximo en una deformación de 0.00126 y la simulación nueve se desplaza hasta una deformación de 0.00256, diferencia que se replica en múltiples simulaciones.

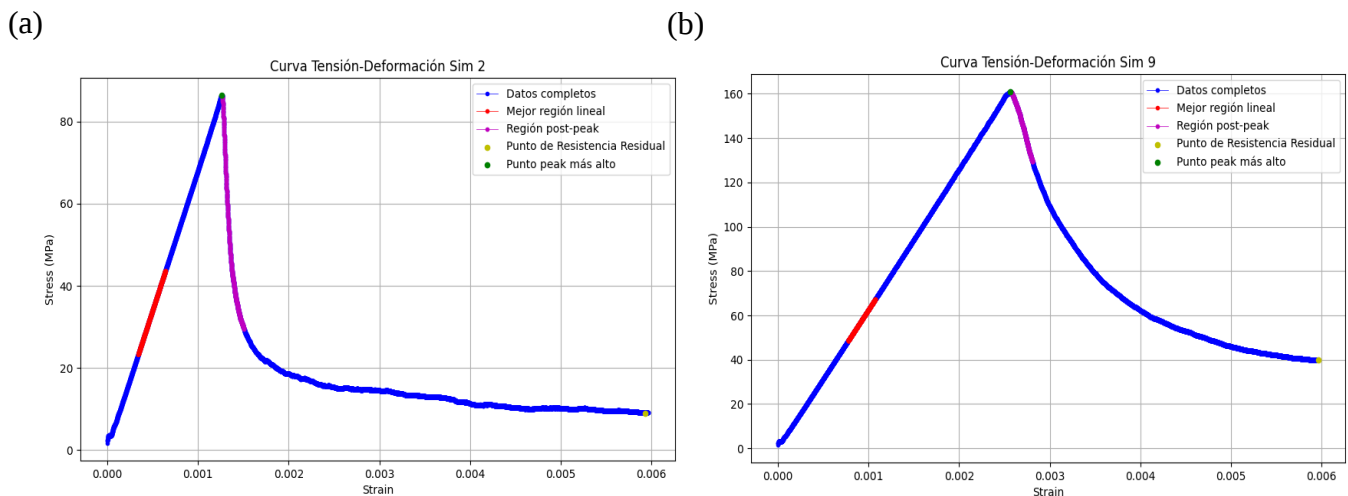


Figura 4.3: Curva esfuerzo-deformación para configuración tetraédrica, comportamiento *strain softening* con diferencia en deformación necesaria para alcanzar la resistencia *peak* (a) menor deformación y (b) mayor deformación.

Cabe destacar que en esta configuración no fue posible realizar las 128 simulaciones, en específico la simulación 10 no se pudo ejecutar por limitaciones del programa al señalar que no reconoce propiedades indicadas en los bloques, se optó por anular este ensayo considerando despreciable la ausencia de una simulación, por lo tanto, se tienen para este caso un total de 127 simulaciones válidas.

#### 4.1.3 Resultados de macro parámetros

Las curvas que se obtienen son curvas completas, es decir que cuentan con una zona de estudio *pre-peak*, y otra de *post-peak*. En este ámbito, la primera parte cuenta con dos macro parámetros indicadores tales como el módulo de Young y la resistencia *peak*. Para medir el primer parámetro fue

necesario tomar en cuenta la linealidad que tiene la curva en cierta zona donde se busca la zona más lineal, para esto se evalúa un coeficiente de determinación  $R^2$  usando el que adopte un valor lo más cercano a 1 posible, con este coeficiente y zona determinados se calcula el módulo de Young de acuerdo con las normativas aplicables. Ambas geometrías estudiadas logran presentar zonas lineales de importancia para poder efectuar el cálculo, donde los  $R^2$  son muy cercanos al parámetro establecido. Cabe destacar que los módulos de Young calculados están en GPa como se muestran en las tablas resultantes del Anexo A y se consideran resultados aceptables dentro de lo que se conoce como común en la geomecánica.

La resistencia *peak* se identifica como un punto, donde sus componentes corresponden al esfuerzo axial y la deformación. Este punto se caracteriza como el de mayor relevancia entre los puntos de inflexión en el plano general. Es importante considerar la significancia de esta zona, ya que, al analizar en detalle el registro de los datos y el gráfico, pueden observarse múltiples puntos de inflexión que no representan adecuadamente la resistencia *peak* de la curva general. Este punto es el que marca el límite entre las zonas *pre* y *post-peak* de la curva y donde se presenta la posible falla de la roca viendo mayor deformación y fracturas.

La segunda parte de la curva proporciona dos macro parámetros adicionales: el módulo de caída y el punto de resistencia residual. El cálculo del módulo de caída se ha condicionado para que se realice muy próximo a la aparición de la resistencia *peak*, con el propósito de analizar cuán abrupto es el descenso de la curva en las distintas geometrías. Por último, el punto de resistencia residual se define mediante sus coordenadas y se entiende como el valor más bajo alcanzado en la simulación después del *peak*. Sin embargo, para los casos de *strain hardening*, este punto no se considera válido, ya que la muestra adopta un comportamiento distinto, incrementando su resistencia a medida que aumenta la deformación, lo cual impide considerarlo un punto definitivo en la curva.

## 4.2 Análisis estadístico ANOVA

Con la implementación de un estudio estadístico multivariado como la prueba ANOVA se quiere determinar los parámetros claves que controlan el comportamiento mecánico en el modelo DEM y como los cambios en su configuración de propiedades e interacciones afectan en este.

Para iniciar el análisis ANOVA, es fundamental organizar las variables distinguiendo entre factores y respuestas. Los micro parámetros actúan como factores y se consideran variables independientes,

mientras que los macro parámetros se categorizan como la respuesta, es decir, la variable dependiente. La prueba se realiza de manera independiente para cada uno de los cuatro parámetros de la curva.

#### 4.2.1 Análisis estadístico inicial

Conociendo las variables a emplear en la prueba, se opta por hacer un primer análisis que involucre únicamente a las variables independientes para cada una de las variables dependientes, es decir que se analiza la significancia individual que tiene cada uno de los 7 micro parámetros usados para las combinaciones posibles del modelo en el resultado de los macro parámetros. Se usa el valor P para determinar la significancia de los parámetros, donde a partir de un valor  $P \leq 0.05$  se considera un valor significativo para el resultado del macro parámetro que se esté analizando. La Tabla 4.1 presenta el análisis para la resistencia *peak* en el modelo con configuración de tetraedros.

Tabla 4.1: Análisis de varianza del modelo inicial para el macro parámetro resistencia *peak* en la configuración tetraédrica.

| Fuente           | GL  | SC Ajust. | MC Ajust. | Valor F | Valor p |
|------------------|-----|-----------|-----------|---------|---------|
| Módulo de Young  | 1   | 35        | 34.7      | 0.61    | 0.438   |
| Poisson          | 1   | 7         | 6.7       | 0.12    | 0.733   |
| Densidad         | 1   | 18        | 18.2      | 0.32    | 0.574   |
| Rigidez de corte | 1   | 1400      | 1399.5    | 24.42   | 0.000   |
| Cohesión         | 1   | 91065     | 91064.8   | 1589.22 | 0.000   |
| Tensión          | 1   | 1         | 1.2       | 0.02    | 0.885   |
| Fricción         | 1   | 80521     | 80521.1   | 1405.21 | 0.000   |
| Error            | 119 | 6819      | 57.3      |         |         |
| Total            | 126 | 181269    |           |         |         |

El análisis de varianza revela que la rigidez al corte, la cohesión y la fricción son parámetros significativos para este macro parámetro y geometría. Esto sugiere que, para mejorar la calibración del modelo en estudios centrados en la resistencia *peak*, es crucial prestar especial atención a estos parámetros, dado su peso estadístico. En cuanto a los demás micro parámetros, se podría considerar omitirlos o mantenerlos constantes, ya que, según los resultados obtenidos, tienen poca incidencia en la resistencia *peak*.

Una manera gráfica de observar la significancia de los parámetros se muestra en la Figura 4.4. Cada uno de los parámetros muestra los dos niveles en los que se varía su valor identificado anteriormente en Tabla 3.2 como -1 y +1. Los parámetros que muestran líneas casi horizontales indican su bajo o nulo impacto en la resistencia *peak* del modelo a pesar de la variación en los parámetros involucrados. Por el contrario, los parámetros caracterizados como significativos poseen mayor pendiente en su

gráfica. En este contexto líneas con pendiente, se pueden extraer dos conclusiones, primero, la resistencia al corte, que muestra una pendiente negativa, indica que a medida que aumenta la resistencia al corte, la resistencia *peak* disminuye, aunque este cambio no es drástico. Por otro lado, tanto para la cohesión como para la fricción, la pendiente positiva y pronunciada refleja que un incremento en estos valores se traduce directamente en un aumento de la resistencia *peak*.

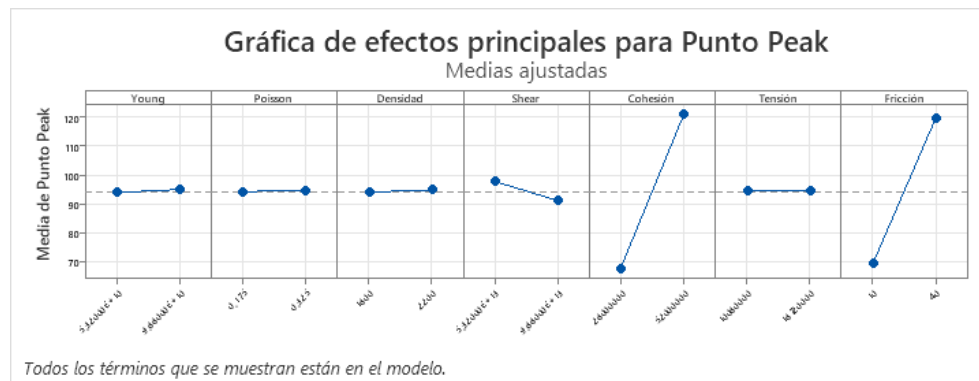


Figura 4.4: Medias ajustadas para el modelo de resistencia *peak*, para la muestra con bloques tetraédricos, considerando efectos principales.

La Tabla 4.2 es el resumen estadístico del modelo inicial, el cual permite evaluar la calidad y el ajuste del modelo predictivo, en términos generales los resultados muestran un modelo ajustado aceptable y que llega a ofrecer una alta capacidad predictiva para los datos de la resistencia *peak* con la geometría establecida. La variabilidad del modelo dada por el 96.24% del  $R^2$  es bastante alta, lo que indica que los parámetros estudiados capturan la variabilidad de la resistencia. El hecho de tener un  $R^2$  alto muestra un buen equilibrio entre los ajustes existentes para calcular la resistencia máxima.

Tabla 4.2: Resumen del análisis para el modelo inicial en la configuración tetraedro.

| S    | $R^2$  | $R^2$ (ajustado) | $R^2$ (predicho) |
|------|--------|------------------|------------------|
| 7.57 | 96.24% | 96.02%           | 95.72%           |

Con los resultados, respecto a los macro parámetros, se puede decir que el modelo inicial planteado con los valores propuestos es aceptable y se ajustan para una correcta representación del comportamiento de la muestra. Este análisis se replica para las dos configuraciones y todas las variables involucradas, las tablas de resultados y resumen se encuentran en el Anexo B.

#### 4.2.2 Análisis estadístico final con interacciones

A pesar de contar con buenos resultados en cuanto al ajuste y la capacidad predictiva del modelo se busca eliminar los parámetros que menos aporten a la varianza para ver si las interacciones

se vuelven relevantes, para esto se itera en el análisis de varianza. La interacción entre los micro parámetros permite analizar el comportamiento en conjunto, permitiendo entender como el efecto de un parámetro cambia en función del nivel de otro parámetro. En este contexto, efectuando las iteraciones correspondientes se llega al análisis de varianza final con los resultados presentes en la Tabla 4.3, mostrando únicamente valores significativos para la calibración de la resistencia *peak*.

Tabla 4.3: Análisis de varianza del modelo final para el macro parámetro resistencia *peak* en la configuración tetraédrica, solo con parámetros significativos incluidas las interacciones.

| Fuente            | GL  | SC Ajust. | MC Ajust. | Valor F  | Valor p |
|-------------------|-----|-----------|-----------|----------|---------|
| Rigidez de corte  | 1   | 1344      | 1343.6    | 1261.39  | 0.000   |
| Cohesión          | 1   | 90615     | 90615.1   | 85070.01 | 0.000   |
| Fricción          | 1   | 80956     | 80956.4   | 76002.36 | 0.000   |
| R. Corte*Cohesión | 1   | 179       | 178.9     | 167.92   | 0.000   |
| R. Corte*Fricción | 1   | 179       | 179.3     | 168.34   | 0.000   |
| Cohesión*Fricción | 1   | 6389      | 6388.8    | 5997.87  | 0.000   |
| Error             | 120 | 128       | 1.1       |          |         |
| Falta de ajuste   | 1   | 19        | 18.5      | 20.14    | 0.000   |
| Error puro        | 119 | 109       | 0.9       |          |         |
| Total             | 126 | 181269    |           |          |         |

La representación gráfica de la iteración final de la resistencia *peak* en configuración tetraédrica se muestra en la Figura 4.5. En el segmento (a) se observan únicamente los efectos principales significativos del modelo, mientras que en el segmento (b) se presentan las interacciones entre los parámetros en sus distintos niveles. Las líneas no paralelas en los gráficos del segmento (b) evidencian interacciones significativas entre los parámetros, lo que sugiere que el efecto de cada parámetro no debe evaluarse de manera aislada. En este caso, la resistencia *peak* depende significativamente de cómo estos parámetros actúan en conjunto.

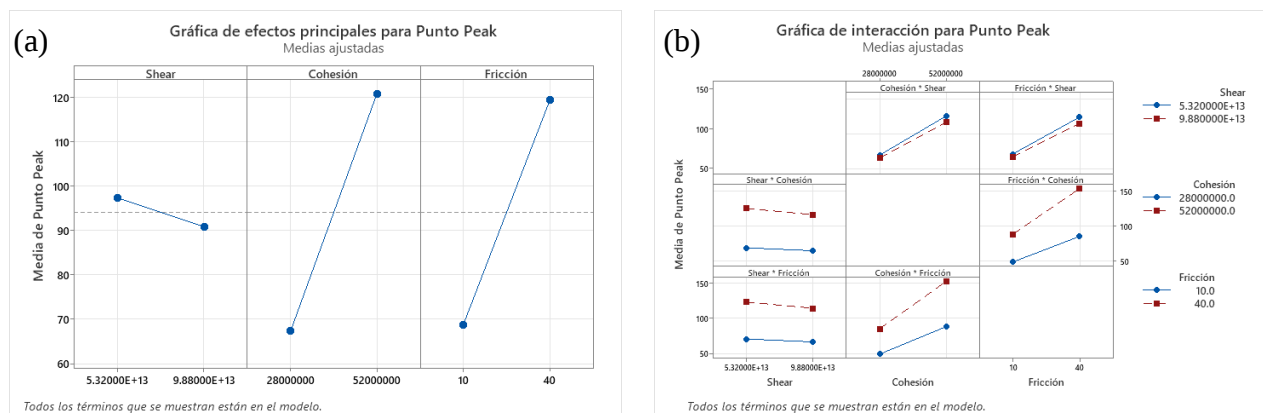


Figura 4.5: Medias ajustadas para el modelo de resistencia *peak* considerando las micro propiedades significativas, para la muestra con bloques tetraédricos, considerando (a) efectos principales y (b) interacciones.

El resumen de la iteración final del modelo se presenta en la Tabla 4.4, donde se ve un mejor ajuste que el obtenido inicialmente. En este caso se habla del modelo óptimo ya que posee un error estándar muy bajo y el  $R^2$  cercano al 100%. Al ser un modelo estadístico que considera únicamente valores e interacciones significativas, ofrece el mejor ajuste posible tanto desde el punto de vista estadístico como interpretativo.

Tabla 4.4: Resumen del modelo final para la resistencia peak con configuración tetraédrica.

| S    | $R^2$  | $R^2$ (ajustado) | $R^2$ (predicho) |
|------|--------|------------------|------------------|
| 1.03 | 99.93% | 99.93%           | 99.92%           |

#### 4.2.3 Análisis estadístico general

El procedimiento de los modelos se replica para los cuatro macro parámetros de las dos configuraciones geométricas, considerando un análisis inicial. Se tienen valores que permiten evaluar el ajuste de los modelos de acuerdo con las variables escogidas y según los macro parámetros obtenidos, lo que permite discriminar entre una buena configuración a partir de los parámetros bases y las combinaciones realizadas. Con la expectativa de obtener modelos mejor ajustados y que pudiesen predecir los comportamientos de la curva, es que se evalúa con iteraciones en los componentes añadiendo interacciones, de esta manera se logra ver un mejor ajuste en todos los modelos, la Tabla 4.5 muestra el resumen del  $R^2$  para los modelos iniciales y finales de las dos geometrías en cada uno de los macro parámetros, viendo una significativa mejoría llegando a modelos óptimos en algunos casos.

Tabla 4.5: Comparación de  $R^2$  entre modelo inicial y final para cada una de las configuraciones.

| Macro parámetro      | Configuración Voronoi |                    | Configuración Tetraédrica |                    |
|----------------------|-----------------------|--------------------|---------------------------|--------------------|
|                      | $R^2$ Modelo Inicial  | $R^2$ Modelo Final | $R^2$ Modelo Inicial      | $R^2$ Modelo Final |
| Módulo de Young      | 99.89%                | 100.00%            | 99.49%                    | 99.99%             |
| Resistencia Peak     | 95.89%                | 99.85%             | 96.24%                    | 99.93%             |
| Módulo de Caída      | 75.73%                | 88.18%             | 85.98%                    | 97.83%             |
| Resistencia Residual | 94.59%                | 99.81 %            | 96.03%                    | 98.85%             |

De esta manera y respaldado por los resultados anteriores, los micro parámetros significativos para el ajuste de cada macro parámetro según la configuración en la que estén incurriendo se observan en la Tabla 4.6. En términos generales, los parámetros significativos en cada configuración son similares, con lo que se presume poder calibrar ambos modelos en simultaneo sin necesidad de hacer tantas diferenciaciones.

Tabla 4.6: Micro parámetros significativos para cada configuración y macro parámetro relacionado.

| Macro parámetro de interés | Voronoi                                                                | Tetraedros                                                                         |
|----------------------------|------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| Módulo de Young            | Módulo de Young<br>Rigidez de corte                                    | Módulo de Young<br>Rigidez de corte                                                |
| Resistencia Peak           | Rigidez de corte<br>Cohesión<br>Fricción                               | Rigidez de corte<br>Cohesión<br>Fricción                                           |
| Módulo de Caída            | Módulo de Young<br>Rigidez de corte<br>Cohesión<br>Tensión<br>Fricción | Módulo de Young<br>Poisson<br>Densidad<br>Rigidez de corte<br>Cohesión<br>Fricción |
| Resistencia Residual       | Rigidez de corte<br>Cohesión<br>Fricción                               | Rigidez de corte<br>Cohesión<br>Tensión<br>Fricción                                |

### 4.3 Comparación de la evolución del daño

Para evaluar el impacto de la geometría de los bloques en la evolución del daño de la muestra, tanto en las zonas pre como *post-peak*, se confeccionan figuras que permiten analizar su comportamiento durante el ensayo. Estas figuras facilitan la observación de las fracturas y del comportamiento conjunto de los bloques en relación con la curva esfuerzo-deformación, proporcionando una base clara para comprender cómo cada configuración influye en la respuesta mecánica global de la roca. Algunos datos y figuras relacionadas a este análisis se encuentran en el Anexo D .

Para realizar un análisis en detalle se estudia el comportamiento *pre-peak* de las muestras con deformaciones y escalas de movimientos exageradas posibilitando el estudio de lo que está ocurriendo en la muestra a nivel micro, del mismo modo y con el fin de unificar criterio de observación el estudio de la curva *post-peak* se realiza en general manteniendo en lo posible igualdad en las escalas, ya que en esta zona no se requiere exagerar las escalas para ver los efectos destructivos de la probeta.

#### 4.3.1 Comportamiento con parámetros base en la zona *pre-peak*

Como se menciona en capítulos anteriores, los parámetros base cumplieron la función de diseño experimental, donde a partir de los datos ingresados y los resultados obtenidos se aceptan como válidos dentro de un comportamiento típico en materiales rocosos.

El estudio para las configuraciones tetraédrica y Voronoi en la zona *pre-peak* con parámetros base, se presentan en la Figura 4.6 y Figura 4.7 respectivamente. Las figuras muestran etapas de fracturamiento variando de cierre de microfisuras, a la interacción entre fracturas nuevas que se fueron creando con el mismo proceso del ensayo. Para identificar estos procesos es necesario observar los vectores de desplazamiento que muestra el software, teniendo en cuenta que para los dos casos sus escalas se variaron exageradamente para poder ser visibles.

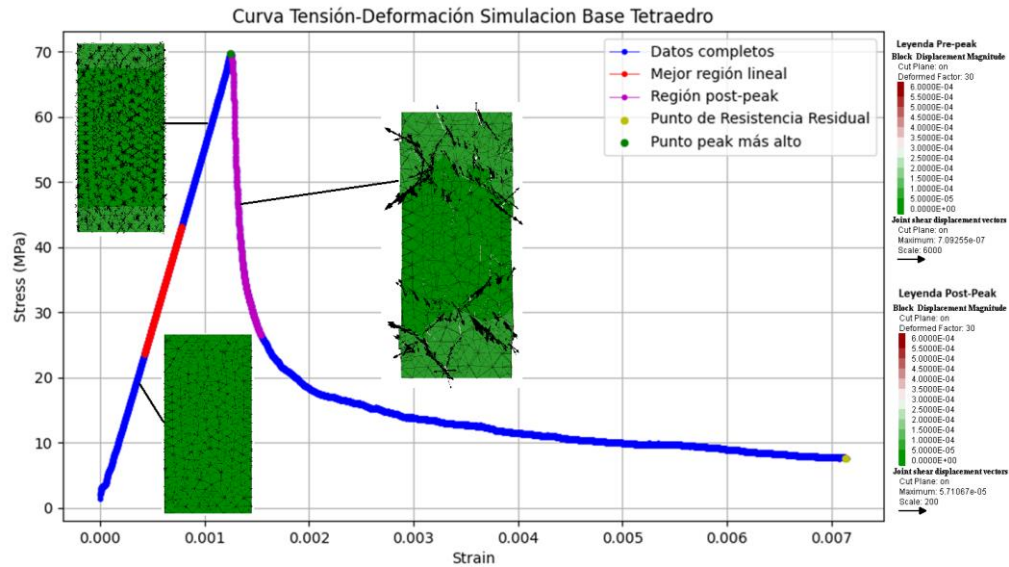


Figura 4.6: Curva esfuerzo-deformación con representaciones gráficas de desplazamiento en plano Y, enfoque en comportamiento *pre-peak*, simulación base para configuración tetraedro.

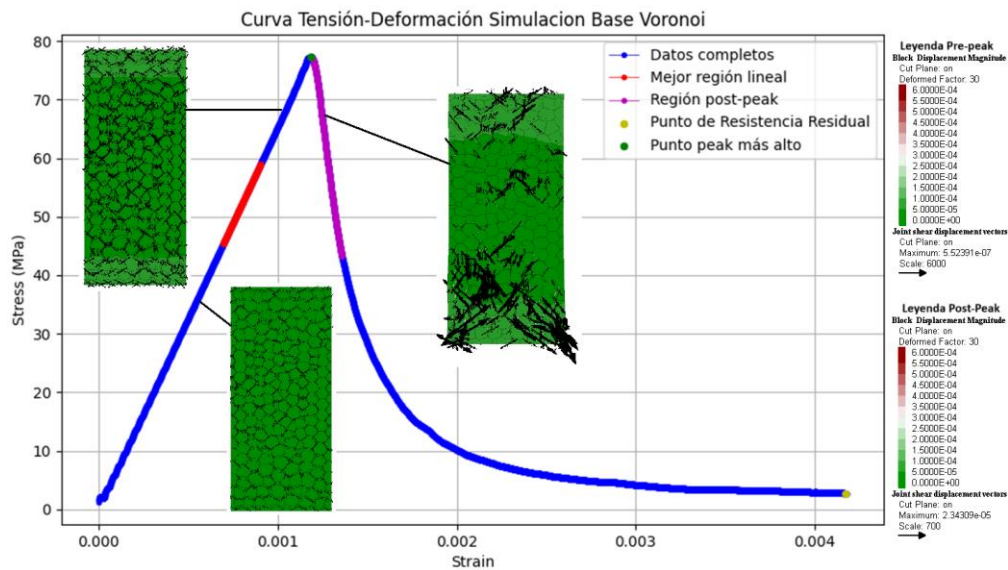


Figura 4.7: Curva esfuerzo-deformación con representaciones gráficas de desplazamiento en plano Y, enfoque en comportamiento *pre-peak*, simulación base para configuración Voronoi.

Haciendo las comparaciones en comportamiento del modelo, la Tabla 4.7 muestra los resultados que se observan de las figuras anteriores teniendo las siguientes características:

- El modelo de Voronoi muestra una resistencia *peak* mayor a la configuración de tetraedros, esto indica que la estructura con configuración Voronoi puede llegar a ser más eficiente para resistir cargas hasta alcanzar el esfuerzo máximo.
- Ambas configuraciones tienen valores de deformación muy similares antes de alcanzar el *peak* estas similitudes ratifican la igualdad en ciertas propiedades de los granos por lo mismo la configuración geometría no afecta en gran medida en este punto.

Tabla 4.7: Comparación de resultados estimados visualmente de las representaciones de comportamiento pre-peak de la muestra.

| Propiedad                          | Tetraedro                        | Voronoi                         |
|------------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|
| Esfuerzo máximo (MPa)              | ~70                              | ~77                             |
| Deformación máxima <i>pre-peak</i> | 0.0012                           | 0.0011                          |
| Comportamiento elástico            | Menor rigidez, mayor deformación | Alta rigidez, menor deformación |

#### 4.3.2 Comportamiento con parámetros base considerando curva completa

La simulación basada en la configuración de bloques tetraedros con un análisis de curva completa se presenta en la Figura 4.8. Se observa que luego de alcanzar la resistencia *peak*, la curva muestra una caída abrupta entregando un módulo de caída estimado de -135 GPa, la deformación residual es mayor a 0.007 lo que indica que posterior a la falla de la muestra se alcanzan mayores deformaciones. En cuanto a las fracturas, se muestran concentradas y localizadas en puntos específicos con lo que se presume que el material no redistribuye de buena manera los esfuerzos, teniendo un comportamiento frágil donde las fracturas tienden a propagarse rápidamente generando colapsos en la muestra.

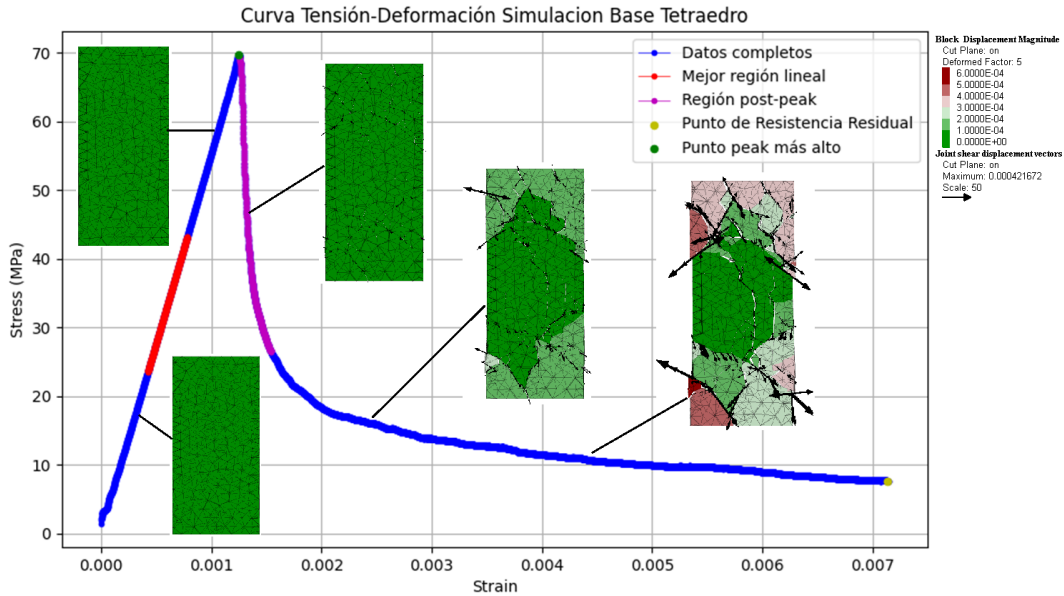


Figura 4.8: Curva esfuerzo-deformación con representaciones gráficas de desplazamiento en plano Y, enfoque en comportamiento post-peak, simulación base para configuración tetraedro.

En la Figura 4.9 se muestra el modelo de la configuración Voronoi que se comporta más frágil con un módulo de caída de -221 GPa y con mayor capacidad de resistencia. En este caso, como se vio anteriormente, la resistencia alcanza los 77 MPa aproximadamente, pero a una deformación inferior de 0.0011. La zona *post-peak* también muestra una caída pronunciada con un módulo de caída estimado superior, los datos de las simulaciones base de pueden visualizar en el Anexo D .

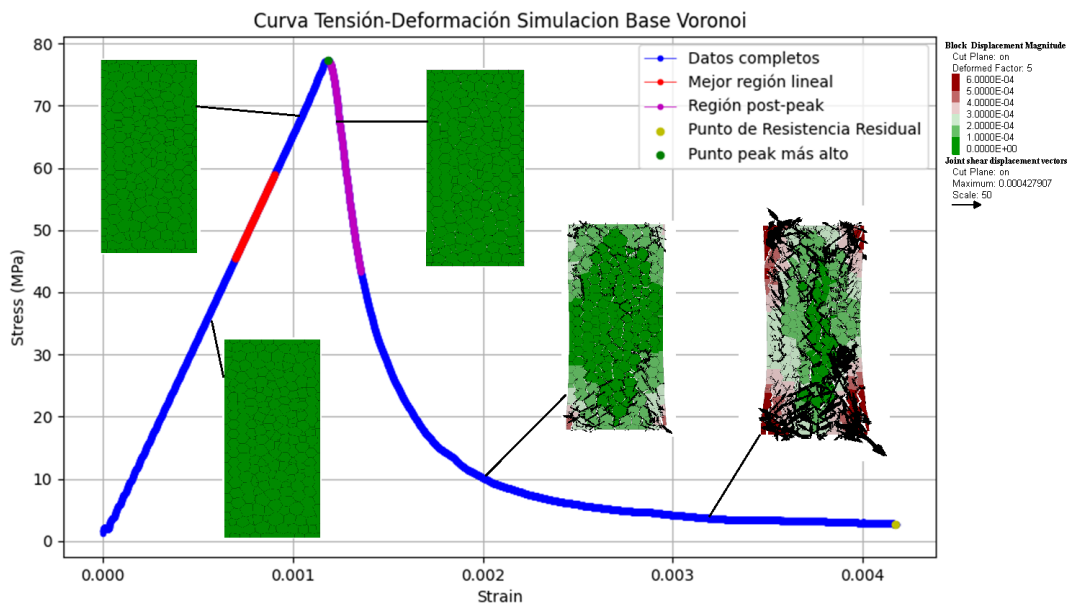


Figura 4.9: Curva esfuerzo-deformación con representaciones gráficas de desplazamiento en plano Y, enfoque en comportamiento post-peak, simulación base para configuración Voronoi.

### 4.3.3 Estudio con comportamiento *strain hardening*

Como se menciona en capítulos anteriores, el modelo confeccionado con bloques de configuración Voronoi presenta dos tipos de comportamientos. En particular el *strain hardening* es interesante de analizar para hacer la comparación de simulaciones con las mismas propiedades, pero distintas configuraciones que en su comportamiento general difieren completamente.

Para esta comparación se usa la simulación 1 de ambas configuraciones correspondiente a una configuración de parámetros extremos, donde los micro parámetros de los modelos son reducidos y caracterizados como nivel -1. Se debe tener en cuenta que ambas simulaciones cuentan con 100 000 ciclos de ejecución. La Figura 4.10, correspondiente al modelo con configuración Voronoi, presenta comportamiento de *strain hardening* (endurecimiento por deformación), lo que hace que la resistencia siga aumentando con el aumento de la deformación. La resistencia *peak* es 164 MPa, posterior a esto se tiene una caída en la resistencia gradual. Las imágenes del modelo muestran fracturas que se distribuyen a lo largo de la muestra teniendo señales de alta deformación sin falla abrupta.

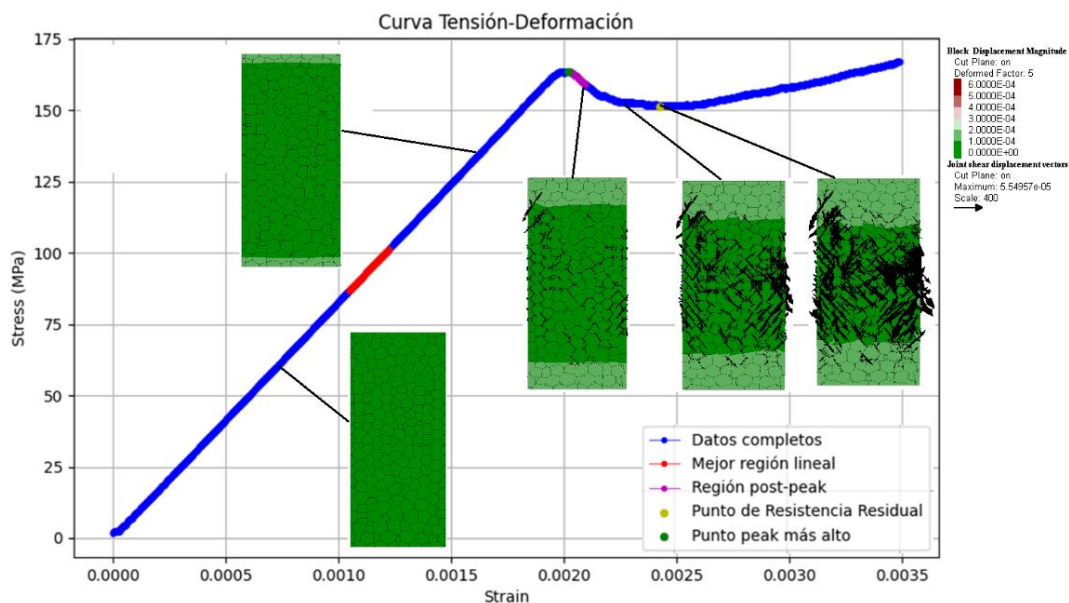


Figura 4.10: Curva esfuerzo-deformación con representaciones gráficas de desplazamiento en plano Y, enfoque en comportamiento general para simulación 1 para configuración Voronoi.

Por otro lado, la simulación con bloques tetraédricos observable en la Figura 4.11 muestra un comportamiento similar a los ya estudiados, más rígido y frágil. La resistencia *peak* es de 150 MPa con un módulo de caída de -117 GPa. En el caso de las fracturas estas son más localizadas y con menor capacidad de redistribuir esfuerzos, además en términos generales en ensayos de laboratorio es común ver este tipo de ruptura en materiales homogéneos como el granito.

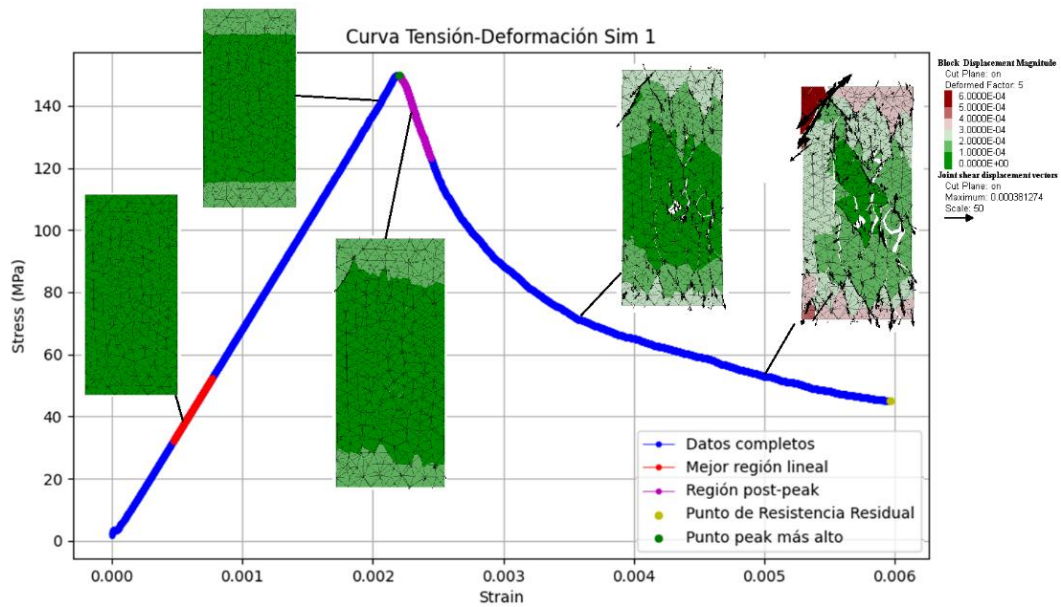


Figura 4.11: Curva esfuerzo-deformación con representaciones gráficas de desplazamiento en plano Y, enfoque en comportamiento general para simulación 1 para configuración tetraédrica.

#### 4.4 Discusión final

A partir de del análisis anterior del comportamiento mecánico de materiales mediante simulaciones numéricas, empleando las configuraciones geométricas específicas de bloques Voronoi y tetraédricos. Se entiende que las curvas esfuerzo-deformación permiten identificar parámetros clave como resistencia *peak*, módulo de Young y comportamiento pre y *post-peak*, destacando cómo las micro propiedades y las interacciones entre ellas influyen en la respuesta del material. La configuración Voronoi muestra una mayor capacidad para adaptarse a deformaciones, mientras que la configuración tetraédrica es más rígida, pero presenta un comportamiento frágil, con fracturas localizadas y menores deformaciones.

Por otra parte, el estudio estadístico revela que parámetros como rigidez al corte, cohesión y fricción son determinantes para calibrar modelos predictivos confiables, logrando ajustes estadísticos sobresalientes con  $R^2$  cercanos al 100%. Estos resultados resaltan la relevancia de integrar geometrías y propiedades mecánicas en la modelación, ofreciendo una herramienta robusta para comprender y predecir el desempeño de materiales bajo diversas condiciones, con potencial aplicación en la ingeniería geotécnica y estructural.

#### **4.4.1 Metodología propuesta**

De lo anterior y con el fin de lograr un correcto trabajo con modelos de elementos discretos que consideren diferentes configuraciones geométricas y propiedades en su confección para caracterizar distintos problemas se propone seguir los siguientes pasos:

1. Características físicas del modelo: establecer las geometrías de bloques con las que se quiere confeccionar el modelo y el tamaño al cual se van a ajustar, resulta relevante puesto que, con distintas configuraciones de este tipo los tiempos de simulaciones se ven directamente afectados, además de una considerable necesidad de almacenamiento para contener toda la información.
2. Propiedades de los bloques: estas tendrán un efecto directo en el comportamiento general del modelo, idealmente podrían usarse valores típicos aceptables dentro de un contexto geomecánico o un rango de estos, implicando en un análisis estadístico de calibración que valide estos datos.
3. Pruebas iniciales: la ejecución del modelo confeccionado con los parámetros ingresados permite entregar información del comportamiento del modelo y de la información que se espera extraer, esto entregara valores base con los que se pueda trabajar.
4. Calibración de datos: emplear un análisis estadístico es una buena manera de saber que tan ajustado y predictivo es el modelo. Una buena recomendación es emplear un análisis de prueba ANOVA diferenciando el comportamiento por niveles de valores, por el contrario, se pueden usar otros métodos que se consideren oportunos. Si bien es una etapa avanzada sería una estación de observación en la cual, de requerir mejores ajustes se debiese volver en pasos anteriores.
5. Análisis de comportamiento: con valores calibrados se puede hacer el análisis correspondiente al comportamiento del modelo según la información que se requiera.

Según los lineamientos seguidos en la presente investigación esta sería una metodología de la cual se pueden obtener resultados positivos en una investigación con este tipo de modelos.

## 5 CONCLUSIONES

A partir de la metodología de trabajo que se sigue en el estudio se logra cumplir de manera satisfactoria con los objetivos planteados al analizar el comportamiento mecánico de los modelos con bloques de distintas geometrías con el método de elementos discretos (DEM). Los modelos permitieron mostrar como las geometrías en conjunto con las micro propiedades afectan en los macro parámetros de interés en los estudios de geomecánica, entregando una comprensión profunda de los mecanismos que involucran el comportamiento de la roca bajo carga.

Con el desarrollo del estudio y los resultados obtenidos se puede concluir lo siguiente:

- 1. Impacto de las micro propiedades:** El análisis de las simulaciones demuestra que dependiendo del macro parámetro que se esté estudiando existen micro parámetros que tendrán mayor y menor relevancia en su resultado. Lo que se corrobora con los resultados expuestos en la prueba ANOVA para la resistencia *peak*, de donde se observa que la cohesión y la fricción presentan una interacción relevante, con efectos complementarios en la resistencia de corte de la muestra, donde las otras micro propiedades no influyen de manera significativa.
- 2. Comportamiento según la configuración geométrica:** a partir de las 256 simulaciones propuestas se pueden identificar diferencias claras entre las geometrías de los granos de los modelos. La configuración Voronoi se destaca una dualidad en su comportamiento donde se reconoce el *strain softening* y *hardening*, caracterizado por su aumento progresivo en la resistencia al aumentar la deformación, lo que indica que esta configuración es capaz de modelar estructuras heterogéneas o sistemas complejos que experimentan distintas etapas de carga relacionándose con la deformación y fracturamiento. Por el contrario, el modelo confeccionado con bloques tetraédricos solo presenta un comportamiento *strain softening*, indicando su representatividad para materiales frágiles, sus macro propiedades resultantes indican que es más compatible con fallas abruptas.
- 3. Validación del modelo numérico:** en el análisis estadístico al contar con coeficientes de determinación  $R^2$  altos, estos validan la precisión de los modelos numéricos confeccionados. Haciendo énfasis en los análisis estadísticos iniciales del módulo de Young y resistencia *peak* estos son precisos y con una alta capacidad predictiva bajo las configuraciones planteadas.
- 4. Preferencias de las configuraciones geométricas:** según los resultados obtenidos, la configuración Voronoi se usaría preferentemente cuando se esperan comportamientos geomecánicos complejos, con posibilidad de endurecimiento en los modelos a pesar de no ser

tan representativa visualmente plantea ser versátil en su comportamiento, por lo mismo se plantea como una buena opción para proyectos de largo plazo donde la distribución de fracturas y esfuerzos deba ser progresiva como taludes o macizos fracturados. Por otra parte, la configuración tetraédrica con su comportamiento frágil pero predecible en las simulaciones es sumamente eficiente, con lo que se indicaría adecuado para estudios de colapsos súbitos como en algunas excavaciones según las propiedades de los materiales.

Por todo lo anterior se establece que la configuración de los bloques y las micro propiedades asociadas afectan significativamente el comportamiento de las muestras modeladas. La metodología desarrollada entrega bases sólidas para la calibración de modelos numéricos con características similares en futuras investigaciones y posibles aplicaciones prácticas, entregando una perspectiva que permite mejorar la decisión en el diseño y optimización de estructuras geotécnicas y mineras.

## **5.1 Recomendaciones y trabajo futuro**

Se recomienda implementar la metodología propuesta a partir de la experiencia adquirida en los ajustes para los modelos, integrando además otras herramientas que faciliten el análisis de los datos idealmente compatibles con el lenguaje que integra el software 3DEC. El uso de Python es una buena opción debido a su alta adaptabilidad además de su capacidad de reconocer datos.

En cuanto a trabajos futuros, resulta primordial trabajar con granos de tamaño inferior para poder asemejar el comportamiento real de una muestra, para ello se debe contar con equipos de alto procesamiento y una amplia capacidad de almacenamiento. Resulta interesante agregar otros macro parámetros al análisis, como por ejemplo el coeficiente de Poisson el cual permite analizar la deformación diametral de la muestra, lo que daría otra perspectiva de análisis.

Otro aspecto para integrar son los planos de fallas, los cuales una vez determinado y ajustado el comportamiento de los materiales, entregaran indicadores diferentes que se adaptan más a los procesos reales haciendo compatible el estudio con un proceso como lo sería una extracción minera en la que se tenga un macizo rocoso.

## REFERENCIAS

- [1] Brady, B. H., & Brown, E. T. (2005). *Mecánica de rocas para minería subterránea* (3.<sup>a</sup> ed.). Springer Science & Business Media.
- [2] Hoek, E. (1966). *Mecánica de rocas: Una introducción para el ingeniero práctico*. Mining Magazine, abril, junio y julio.
- [3] Fairhurst, C. E., & Hudson, J. A. (1999). Draft ISRM suggested method for the complete stress-strain curve for intact rock in uniaxial compression. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 36(2), 279-289.
- [4] Starfield, A. M., & Cundall, P. A. (1988). Hacia una metodología para el modelado de mecánica de rocas. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 25(3), 99–106.
- [5] Cundall, P., & Hart, R. (1992). Modelado numérico de discontinuidades. *Cálculos de ingeniería*, 9(2), 101–113.
- [6] Itasca Consulting Group. (25 de febrero de 2024). Enfoque general. 3DEC 7.00 — Código de elementos discretos en 3D para modelar la mecánica discontinua. [https://docs.itascacg.com/3dec700/common/docproject/source/manual/program\\_guide/methodology/generalapproach.html?node69](https://docs.itascacg.com/3dec700/common/docproject/source/manual/program_guide/methodology/generalapproach.html?node69)
- [7] Lan, H., Martin, C. D., Qi, S., & Li, T. (2013). Un modelo basado en granos en 3D para caracterizar la heterogeneidad geométrica de rocas frágiles. En *Actas del 47.º Simposio de Mecánica de Rocas/Geomecánica de los Estados Unidos*, San Francisco, CA, EE. UU., 23-26 de junio. Asociación Estadounidense de Mecánica de Rocas.
- [8] Hoek, E., & Brown, E. T. (1980). Criterio de resistencia empírica para macizos rocosos. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 106(9), 1013–1035.
- [9] Colback, P. S. B., & Wiid, B. L. (1965). La influencia del contenido de humedad en la resistencia a la compresión de las rocas. En *Actas del Tercer Simposio Canadiense sobre Mecánica de Rocas* (pp. [páginas específicas, si corresponde]). Toronto.
- [10] Griffith, A. A. (1921). Los fenómenos de ruptura y flujo en sólidos. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Serie A*, que contiene artículos de carácter matemático o físico, 221, 163–198.
- [11] Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas (ISRM). (1978). Métodos sugeridos para determinar la resistencia a la compresión uniaxial y la deformabilidad de materiales rocosos.

- International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 15(3), 137–140.
- [12] ASTM International. (2014). Métodos de prueba estándar para la resistencia a la compresión y los módulos elásticos de muestras de núcleos de roca intactos bajo diferentes estados de tensión y temperaturas (ASTM D7012-14e1). West Conshohocken, PA.
- [13] ASTM International. (1972). Standard method of test for elastic moduli of rock core specimens in uniaxial compression (ASTM D 3148-72).
- [14] ASTM International. (2019). D4543-19 Prácticas estándar para preparar núcleos de roca como especímenes de prueba cilíndricos y verificar la conformidad con las tolerancias dimensionales y de forma.
- [15] Hudson, J. A., Crouch, S. L., & Fairhurst, C. (1972). Soft, stiff and servo-controlled testing machines: A review with reference to rock failure. *Engineering Geology*, 5(3), 155-187.
- [16] Brown, E. T. (1981). Suggested methods for determining the uniaxial compressive strength and deformability of rock materials. En E. T. Brown (Ed.), *Rock characterization, testing and monitoring - ISRM suggested methods* (pp. 113-116). Pergamon Press.
- [17] Holling, C. S. (Ed.). (1978). *Evaluación y gestión ambiental adaptativa*. Wiley.
- [18] Jing, L. (2003). Una revisión de técnicas, avances y cuestiones pendientes en modelado numérico para mecánica de rocas e ingeniería de rocas. *Revista Internacional de Mecánica de Rocas y Ciencias Mineras*, 40(3), 283–293, 329–353.
- [19] Fisher, R. A. (1925). *Statistical Methods for Research Workers*. Oliver & Boyd.
- [20] Neter, J., Kutner, M. H., Nachtsheim, C. J., & Wasserman, W. (1996). *Applied Linear Statistical Models*. McGraw-Hill.

## 6 Anexos

### 6.1 Anexo A

Tabla 6.1: Combinaciones de las 128 simulaciones para la configuración Voronoi<sup>1</sup> y tetraedro<sup>2</sup>.

| Simulaciones | Young | Poisson | Densidad | Shear | Cohesion | Tension | Friccion |
|--------------|-------|---------|----------|-------|----------|---------|----------|
| 1            | A+    | B+      | C+       | D+    | E+       | F+      | G+       |
| 2            | A+    | B+      | C+       | D+    | E+       | F+      | G-       |
| 3            | A+    | B+      | C+       | D+    | E+       | F-      | G+       |
| 4            | A+    | B+      | C+       | D+    | E+       | F-      | G-       |
| 5            | A+    | B+      | C+       | D+    | E-       | F+      | G+       |
| 6            | A+    | B+      | C+       | D+    | E-       | F+      | G-       |
| 7            | A+    | B+      | C+       | D+    | E-       | F-      | G+       |
| 8            | A+    | B+      | C+       | D+    | E-       | F-      | G-       |
| 9            | A+    | B+      | C+       | D-    | E+       | F+      | G+       |
| 10           | A+    | B+      | C+       | D-    | E+       | F+      | G-       |
| 11           | A+    | B+      | C+       | D-    | E+       | F-      | G+       |
| 12           | A+    | B+      | C+       | D-    | E+       | F-      | G-       |
| 13           | A+    | B+      | C+       | D-    | E-       | F+      | G+       |
| 14           | A+    | B+      | C+       | D-    | E-       | F+      | G-       |
| 15           | A+    | B+      | C+       | D-    | E-       | F-      | G+       |
| 16           | A+    | B+      | C+       | D-    | E-       | F-      | G-       |
| 17           | A+    | B+      | C-       | D+    | E+       | F+      | G+       |
| 18           | A+    | B+      | C-       | D+    | E+       | F+      | G-       |
| 19           | A+    | B+      | C-       | D+    | E+       | F-      | G+       |
| 20           | A+    | B+      | C-       | D+    | E+       | F-      | G-       |
| 21           | A+    | B+      | C-       | D+    | E-       | F+      | G+       |
| 22           | A+    | B+      | C-       | D+    | E-       | F+      | G-       |
| 23           | A+    | B+      | C-       | D+    | E-       | F-      | G+       |
| 24           | A+    | B+      | C-       | D+    | E-       | F-      | G-       |
| 25           | A+    | B+      | C-       | D-    | E+       | F+      | G+       |
| 26           | A+    | B+      | C-       | D-    | E+       | F+      | G-       |
| 27           | A+    | B+      | C-       | D-    | E+       | F-      | G+       |
| 28           | A+    | B+      | C-       | D-    | E+       | F-      | G-       |
| 29           | A+    | B+      | C-       | D-    | E-       | F+      | G+       |
| 30           | A+    | B+      | C-       | D-    | E-       | F+      | G-       |
| 31           | A+    | B+      | C-       | D-    | E-       | F-      | G+       |
| 32           | A+    | B+      | C-       | D-    | E-       | F-      | G-       |
| 33           | A+    | B-      | C+       | D+    | E+       | F+      | G+       |
| 34           | A+    | B-      | C+       | D+    | E+       | F+      | G-       |
| 35           | A+    | B-      | C+       | D+    | E+       | F-      | G+       |
| 36           | A+    | B-      | C+       | D+    | E+       | F-      | G-       |
| 37           | A+    | B-      | C+       | D+    | E-       | F+      | G+       |
| 38           | A+    | B-      | C+       | D+    | E-       | F+      | G-       |
| 39           | A+    | B-      | C+       | D+    | E-       | F-      | G+       |
| 40           | A+    | B-      | C+       | D+    | E-       | F-      | G-       |
| 41           | A+    | B-      | C+       | D-    | E+       | F+      | G+       |
| 42           | A+    | B-      | C+       | D-    | E+       | F+      | G-       |
| 43           | A+    | B-      | C+       | D-    | E+       | F-      | G+       |
| 44           | A+    | B-      | C+       | D-    | E+       | F-      | G-       |
| 45           | A+    | B-      | C+       | D-    | E-       | F+      | G+       |
| 46           | A+    | B-      | C+       | D-    | E-       | F+      | G-       |
| 47           | A+    | B-      | C+       | D-    | E-       | F-      | G+       |
| 48           | A+    | B-      | C+       | D-    | E-       | F-      | G-       |
| 49           | A+    | B-      | C-       | D+    | E+       | F+      | G+       |
| 50           | A+    | B-      | C-       | D+    | E+       | F+      | G-       |
| 51           | A+    | B-      | C-       | D+    | E+       | F-      | G+       |
| 52           | A+    | B-      | C-       | D+    | E+       | F-      | G-       |
| 53           | A+    | B-      | C-       | D+    | E-       | F+      | G+       |
| 54           | A+    | B-      | C-       | D+    | E-       | F+      | G-       |
| 55           | A+    | B-      | C-       | D+    | E-       | F-      | G+       |
| 56           | A+    | B-      | C-       | D+    | E-       | F-      | G-       |
| 57           | A+    | B-      | C-       | D-    | E+       | F+      | G+       |
| 58           | A+    | B-      | C-       | D-    | E+       | F+      | G-       |
| 59           | A+    | B-      | C-       | D-    | E+       | F-      | G+       |
| 60           | A+    | B-      | C-       | D-    | E+       | F-      | G-       |
| 61           | A+    | B-      | C-       | D-    | E-       | F+      | G+       |
| 62           | A+    | B-      | C-       | D-    | E-       | F+      | G-       |
| 63           | A+    | B-      | C-       | D-    | E-       | F-      | G+       |
| 64           | A+    | B-      | C-       | D-    | E-       | F-      | G-       |

| Simulaciones | Young | Poisson | Densidad | Shear | Cohesion | Tension | Friccion |
|--------------|-------|---------|----------|-------|----------|---------|----------|
| 65           | A-    | B+      | C+       | D+    | E+       | F+      | G+       |
| 66           | A-    | B+      | C+       | D+    | E+       | F+      | G-       |
| 67           | A-    | B+      | C+       | D+    | E+       | F-      | G+       |
| 68           | A-    | B+      | C+       | D+    | E+       | F-      | G-       |
| 69           | A-    | B+      | C+       | D+    | E-       | F+      | G+       |
| 70           | A-    | B+      | C+       | D+    | E-       | F+      | G-       |
| 71           | A-    | B+      | C+       | D+    | E-       | F-      | G+       |
| 72           | A-    | B+      | C+       | D+    | E-       | F-      | G-       |
| 73           | A-    | B+      | C+       | D+    | E+       | F+      | G+       |
| 74           | A-    | B+      | C+       | D+    | E+       | F+      | G-       |
| 75           | A-    | B+      | C+       | D-    | E+       | F-      | G+       |
| 76           | A-    | B+      | C+       | D-    | E+       | F-      | G-       |
| 77           | A-    | B+      | C+       | D-    | E-       | F+      | G+       |
| 78           | A-    | B+      | C+       | D-    | E-       | F+      | G-       |
| 79           | A-    | B+      | C+       | D-    | E-       | F-      | G+       |
| 80           | A-    | B+      | C+       | D-    | E-       | F-      | G-       |
| 81           | A-    | B+      | C-       | D+    | E+       | F+      | G+       |
| 82           | A-    | B+      | C-       | D+    | E+       | F+      | G-       |
| 83           | A-    | B+      | C-       | D+    | E+       | F-      | G+       |
| 84           | A-    | B+      | C-       | D+    | E+       | F-      | G-       |
| 85           | A-    | B+      | C-       | D+    | E-       | F+      | G+       |
| 86           | A-    | B+      | C-       | D+    | E-       | F+      | G-       |
| 87           | A-    | B+      | C-       | D+    | E-       | F-      | G+       |
| 88           | A-    | B+      | C-       | D+    | E-       | F-      | G-       |
| 89           | A-    | B+      | C-       | D-    | E+       | F+      | G+       |
| 90           | A-    | B+      | C-       | D-    | E+       | F+      | G-       |
| 91           | A-    | B+      | C-       | D-    | E+       | F-      | G+       |
| 92           | A-    | B+      | C-       | D-    | E+       | F-      | G-       |
| 93           | A-    | B+      | C-       | D-    | E-       | F+      | G+       |
| 94           | A-    | B+      | C-       | D-    | E-       | F+      | G-       |
| 95           | A-    | B+      | C-       | D-    | E-       | F-      | G+       |
| 96           | A-    | B+      | C-       | D-    | E-       | F-      | G-       |
| 97           | A-    | B-      | C+       | D+    | E+       | F+      | G+       |
| 98           | A-    | B-      | C+       | D+    | E+       | F+      | G-       |
| 99           | A-    | B-      | C+       | D+    | E+       | F-      | G+       |
| 100          | A-    | B-      | C+       | D+    | E+       | F-      | G-       |
| 101          | A-    | B-      | C+       | D+    | E-       | F+      | G+       |
| 102          | A-    | B-      | C+       | D+    | E-       | F+      | G-       |
| 103          | A-    | B-      | C+       | D+    | E-       | F-      | G+       |
| 104          | A-    | B-      | C+       | D+    | E-       | F-      | G-       |
| 105          | A-    | B-      | C+       | D-    | E+       | F+      | G+       |
| 106          | A-    | B-      | C+       | D-    | E+       | F+      | G-       |
| 107          | A-    | B-      | C+       | D-    | E+       | F-      | G+       |
| 108          | A-    | B-      | C+       | D-    | E+       | F-      | G-       |
| 109          | A-    | B-      | C+       | D-    | E-       | F+      | G+       |
| 110          | A-    | B-      | C+       | D-    | E-       | F+      | G-       |
| 111          | A-    | B-      | C+       | D-    | E-       | F-      | G+       |
| 112          | A-    | B-      | C+       | D-    | E-       | F-      | G-       |
| 113          | A-    | B-      | C-       | D+    | E+       | F+      | G+       |
| 114          | A-    | B-      | C-       | D+    | E+       | F+      | G-       |
| 115          | A-    | B-      | C-       | D+    | E+       | F-      | G+       |
| 116          | A-    | B-      | C-       | D+    | E+       | F-      | G-       |
| 117          | A-    | B-      | C-       | D+    | E-       | F+      | G+       |
| 118          | A-    | B-      | C-       | D+    | E-       | F+      | G-       |
| 119          | A-    | B-      | C-       | D+    | E-       | F-      | G+       |
| 120          | A-    | B-      | C-       | D+    | E-       | F-      | G-       |
| 121          | A-    | B-      | C-       | D-    | E+       | F+      | G+       |
| 122          | A-    | B-      | C-       | D-    | E+       | F+      | G-       |
| 123          | A-    | B-      | C-       | D-    | E+       | F-      | G+       |
| 124          | A-    | B-      | C-       | D-    | E+       | F-      | G-       |
| 125          | A-    | B-      | C-       | D-    | E-       | F+      | G+       |
| 126          | A-    | B-      | C-       | D-    | E-       | F+      | G-       |
| 127          | A-    | B-      | C-       | D-    | E-       | F-      | G+       |
| 128          | A-    | B-      | C-       | D-    | E-       | F-      | G-       |

<sup>1</sup> Para todos los casos las simulaciones en amarillo son el comportamiento *straing harding* para la configuración Voronoi.

<sup>2</sup> Para todos los casos la simulación en rojo no se pudo ejecutar para la configuración tetraédrica.

Tabla 6.2: Resultado de macro parámetros de la zona pre-peak para la configuración Voronoi en sus 128 simulaciones.

| Simulaciones | Modulo de Young |                              | Punto Peak |              |
|--------------|-----------------|------------------------------|------------|--------------|
|              | Modulo [Gpa]    | Coef. Det. (R <sup>2</sup> ) | Strain     | Stress [MPa] |
| 1            | 83              | 1.00                         | 0.0020     | 164          |
| 2            | 83              | 1.00                         | 0.0011     | 94           |
| 3            | 83              | 1.00                         | 0.0020     | 161          |
| 4            | 83              | 1.00                         | 0.0011     | 93           |
| 5            | 83              | 1.00                         | 0.0012     | 94           |
| 6            | 83              | 1.00                         | 0.0006     | 54           |
| 7            | 83              | 1.00                         | 0.0011     | 93           |
| 8            | 83              | 1.00                         | 0.0006     | 53           |
| 9            | 80              | 1.00                         | 0.0025     | 197          |
| 10           | 79              | 1.00                         | 0.0014     | 113          |
| 11           | 80              | 1.00                         | 0.0024     | 192          |
| 12           | 80              | 1.00                         | 0.0014     | 111          |
| 13           | 79              | 1.00                         | 0.0014     | 112          |
| 14           | 79              | 1.00                         | 0.0008     | 64           |
| 15           | 80              | 1.00                         | 0.0014     | 110          |
| 16           | 79              | 1.00                         | 0.0008     | 63           |
| 17           | 83              | 1.00                         | 0.0020     | 163          |
| 18           | 83              | 1.00                         | 0.0011     | 93           |
| 19           | 83              | 1.00                         | 0.0020     | 160          |
| 20           | 83              | 1.00                         | 0.0011     | 92           |
| 21           | 83              | 1.00                         | 0.0011     | 93           |
| 22           | 83              | 1.00                         | 0.0006     | 53           |
| 23           | 83              | 1.00                         | 0.0011     | 92           |
| 24           | 83              | 1.00                         | 0.0006     | 52           |
| 25           | 80              | 1.00                         | 0.0025     | 196          |
| 26           | 79              | 1.00                         | 0.0014     | 111          |
| 27           | 80              | 1.00                         | 0.0024     | 191          |
| 28           | 80              | 1.00                         | 0.0014     | 111          |
| 29           | 79              | 1.00                         | 0.0014     | 111          |
| 30           | 79              | 1.00                         | 0.0008     | 63           |
| 31           | 80              | 1.00                         | 0.0014     | 109          |
| 32           | 79              | 1.00                         | 0.0008     | 62           |
| 33           | 83              | 1.00                         | 0.0020     | 165          |
| 34           | 83              | 1.00                         | 0.0011     | 94           |
| 35           | 83              | 1.00                         | 0.0020     | 162          |
| 36           | 83              | 1.00                         | 0.0011     | 92           |
| 37           | 83              | 1.00                         | 0.0012     | 95           |
| 38           | 83              | 1.00                         | 0.0006     | 54           |
| 39           | 83              | 1.00                         | 0.0011     | 93           |
| 40           | 83              | 1.00                         | 0.0006     | 53           |
| 41           | 79              | 1.00                         | 0.0025     | 198          |
| 42           | 79              | 1.00                         | 0.0014     | 110          |
| 43           | 79              | 1.00                         | 0.0024     | 194          |
| 44           | 79              | 1.00                         | 0.0014     | 111          |
| 45           | 79              | 1.00                         | 0.0014     | 113          |
| 46           | 79              | 1.00                         | 0.0008     | 63           |
| 47           | 79              | 1.00                         | 0.0014     | 110          |
| 48           | 79              | 1.00                         | 0.0008     | 62           |
| 49           | 83              | 1.00                         | 0.0020     | 164          |
| 50           | 83              | 1.00                         | 0.0011     | 93           |
| 51           | 83              | 1.00                         | 0.0020     | 161          |
| 52           | 83              | 1.00                         | 0.0011     | 91           |
| 53           | 83              | 1.00                         | 0.0011     | 94           |
| 54           | 83              | 1.00                         | 0.0006     | 53           |
| 55           | 83              | 1.00                         | 0.0011     | 92           |
| 56           | 83              | 1.00                         | 0.0006     | 52           |
| 57           | 79              | 1.00                         | 0.0025     | 197          |
| 58           | 79              | 1.00                         | 0.0014     | 109          |
| 59           | 79              | 1.00                         | 0.0024     | 193          |
| 60           | 79              | 1.00                         | 0.0014     | 110          |
| 61           | 79              | 1.00                         | 0.0014     | 112          |
| 62           | 79              | 1.00                         | 0.0008     | 62           |
| 63           | 79              | 1.00                         | 0.0014     | 109          |
| 64           | 79              | 1.00                         | 0.0008     | 61           |

| Simulaciones | Modulo de Young |                              | Punto Peak |              |
|--------------|-----------------|------------------------------|------------|--------------|
|              | Modulo [Gpa]    | Coef. Det. (R <sup>2</sup> ) | Strain     | Stress [MPa] |
| 65           | 48              | 1.00                         | 0.0035     | 164          |
| 66           | 48              | 1.00                         | 0.0019     | 93           |
| 67           | 48              | 1.00                         | 0.0035     | 162          |
| 68           | 48              | 1.00                         | 0.0019     | 92           |
| 69           | 48              | 1.00                         | 0.0020     | 94           |
| 70           | 48              | 1.00                         | 0.0011     | 53           |
| 71           | 48              | 1.00                         | 0.0020     | 93           |
| 72           | 48              | 1.00                         | 0.0010     | 52           |
| 73           | 47              | 1.00                         | 0.0042     | 195          |
| 74           | 47              | 1.00                         | 0.0023     | 111          |
| 75           | 47              | 1.00                         | 0.0041     | 190          |
| 76           | 47              | 1.00                         | 0.0023     | 108          |
| 77           | 47              | 1.00                         | 0.0023     | 110          |
| 78           | 47              | 1.00                         | 0.0013     | 61           |
| 79           | 47              | 1.00                         | 0.0023     | 108          |
| 80           | 47              | 1.00                         | 0.0012     | 59           |
| 81           | 48              | 1.00                         | 0.0034     | 163          |
| 82           | 48              | 1.00                         | 0.0019     | 93           |
| 83           | 48              | 1.00                         | 0.0034     | 162          |
| 84           | 48              | 1.00                         | 0.0019     | 92           |
| 85           | 48              | 1.00                         | 0.0020     | 94           |
| 86           | 48              | 1.00                         | 0.0011     | 52           |
| 87           | 48              | 1.00                         | 0.0020     | 92           |
| 88           | 48              | 1.00                         | 0.0010     | 52           |
| 89           | 47              | 1.00                         | 0.0042     | 195          |
| 90           | 47              | 1.00                         | 0.0023     | 110          |
| 91           | 47              | 1.00                         | 0.0040     | 189          |
| 92           | 47              | 1.00                         | 0.0023     | 108          |
| 93           | 47              | 1.00                         | 0.0023     | 109          |
| 94           | 47              | 1.00                         | 0.0013     | 60           |
| 95           | 47              | 1.00                         | 0.0023     | 107          |
| 96           | 47              | 1.00                         | 0.0012     | 59           |
| 97           | 48              | 1.00                         | 0.0035     | 167          |
| 98           | 48              | 1.00                         | 0.0019     | 94           |
| 99           | 48              | 1.00                         | 0.0035     | 164          |
| 100          | 48              | 1.00                         | 0.0019     | 92           |
| 101          | 48              | 1.00                         | 0.0020     | 95           |
| 102          | 48              | 1.00                         | 0.0011     | 53           |
| 103          | 48              | 1.00                         | 0.0020     | 93           |
| 104          | 48              | 1.00                         | 0.0011     | 52           |
| 105          | 47              | 1.00                         | 0.0042     | 197          |
| 106          | 47              | 1.00                         | 0.0024     | 111          |
| 107          | 47              | 1.00                         | 0.0041     | 191          |
| 108          | 47              | 1.00                         | 0.0023     | 108          |
| 109          | 47              | 1.00                         | 0.0024     | 111          |
| 110          | 47              | 1.00                         | 0.0013     | 60           |
| 111          | 47              | 1.00                         | 0.0023     | 109          |
| 112          | 47              | 1.00                         | 0.0012     | 58           |
| 113          | 48              | 1.00                         | 0.0035     | 166          |
| 114          | 48              | 1.00                         | 0.0019     | 93           |
| 115          | 48              | 1.00                         | 0.0034     | 163          |
| 116          | 48              | 1.00                         | 0.0019     | 91           |
| 117          | 48              | 1.00                         | 0.0020     | 94           |
| 118          | 48              | 1.00                         | 0.0011     | 53           |
| 119          | 48              | 1.00                         | 0.0020     | 93           |
| 120          | 48              | 1.00                         | 0.0010     | 52           |
| 121          | 47              | 1.00                         | 0.0042     | 197          |
| 122          | 47              | 1.00                         | 0.0023     | 110          |
| 123          | 47              | 1.00                         | 0.0040     | 190          |
| 124          | 47              | 1.00                         | 0.0023     | 108          |
| 125          | 47              | 1.00                         | 0.0024     | 110          |
| 126          | 47              | 1.00                         | 0.0013     | 59           |
| 127          | 47              | 1.00                         | 0.0023     | 108          |
| 128          | 47              | 1.00                         | 0.0012     | 57           |

3

<sup>3</sup> R<sup>2</sup> es el método de regresión lineal usado para medir el ajuste de los puntos de la curva.

Tabla 6.3: Resultado de macro parámetros de la zona post-peak para la configuración Voronoi en sus 128 simulaciones.

| Simulaciones | Modulo de Caída |                  | Punto Resistencia Residual |              |
|--------------|-----------------|------------------|----------------------------|--------------|
|              | Modulo [Gpa]    | Coef. Det. (R^2) | Strain                     | Stress [MPa] |
| 1            | -66             | 0.99             | 0.0024                     | 151          |
| 2            | -287            | 0.99             | 0.0035                     | 4            |
| 3            | -73             | 0.99             | 0.0023                     | 148          |
| 4            | -343            | 1.00             | 0.0035                     | 3            |
| 5            | -27             | 0.90             | 0.0013                     | 92           |
| 6            | -74             | 0.98             | 0.0035                     | 2            |
| 7            | -29             | 0.96             | 0.0013                     | 89           |
| 8            | -166            | 0.99             | 0.0035                     | 2            |
| 9            | -135            | 0.99             | 0.0033                     | 166          |
| 10           | -392            | 0.98             | 0.0035                     | 5            |
| 11           | -104            | 0.95             | 0.0033                     | 160          |
| 12           | -498            | 1.00             | 0.0035                     | 4            |
| 13           | -44             | 0.96             | 0.0016                     | 106          |
| 14           | -164            | 0.98             | 0.0032                     | 2            |
| 15           | -63             | 0.99             | 0.0016                     | 102          |
| 16           | -268            | 0.99             | 0.0034                     | 2            |
| 17           | -35             | 0.88             | 0.0025                     | 149          |
| 18           | -294            | 0.99             | 0.0032                     | 4            |
| 19           | -39             | 0.85             | 0.0026                     | 146          |
| 20           | -351            | 0.99             | 0.0032                     | 3            |
| 21           | -27             | 0.94             | 0.0012                     | 91           |
| 22           | -79             | 0.98             | 0.0032                     | 3            |
| 23           | -35             | 0.96             | 0.0013                     | 88           |
| 24           | -180            | 1.00             | 0.0032                     | 2            |
| 25           | -98             | 0.93             | 0.0032                     | 163          |
| 26           | -237            | 0.93             | 0.0032                     | 6            |
| 27           | -96             | 0.97             | 0.0031                     | 156          |
| 28           | -541            | 0.99             | 0.0032                     | 3            |
| 29           | -60             | 0.97             | 0.0017                     | 104          |
| 30           | -170            | 0.97             | 0.0028                     | 3            |
| 31           | -76             | 0.99             | 0.0016                     | 100          |
| 32           | -283            | 0.99             | 0.0032                     | 2            |
| 33           | -43             | 0.94             | 0.0025                     | 153          |
| 34           | -231            | 0.99             | 0.0040                     | 4            |
| 35           | -50             | 0.98             | 0.0024                     | 150          |
| 36           | -282            | 0.99             | 0.0040                     | 3            |
| 37           | -14             | 0.90             | 0.0013                     | 93           |
| 38           | -86             | 0.97             | 0.0040                     | 2            |
| 39           | -13             | 0.71             | 0.0013                     | 90           |
| 40           | -153            | 0.99             | 0.0037                     | 2            |
| 41           | -115            | 0.97             | 0.0033                     | 170          |
| 42           | -175            | 0.91             | 0.0040                     | 6            |
| 43           | -87             | 0.95             | 0.0032                     | 163          |
| 44           | -450            | 0.99             | 0.0040                     | 3            |
| 45           | -43             | 0.98             | 0.0017                     | 107          |
| 46           | -142            | 0.97             | 0.0040                     | 3            |
| 47           | -62             | 0.99             | 0.0016                     | 103          |
| 48           | -222            | 0.99             | 0.0040                     | 2            |
| 49           | -32             | 0.96             | 0.0024                     | 151          |
| 50           | -253            | 0.99             | 0.0037                     | 4            |
| 51           | -42             | 0.97             | 0.0025                     | 148          |
| 52           | -296            | 0.99             | 0.0037                     | 3            |
| 53           | -11             | 0.74             | 0.0012                     | 92           |
| 54           | -79             | 0.97             | 0.0035                     | 2            |
| 55           | -22             | 0.88             | 0.0013                     | 89           |
| 56           | -154            | 0.98             | 0.0037                     | 1            |
| 57           | -119            | 0.98             | 0.0033                     | 165          |
| 58           | -137            | 0.92             | 0.0037                     | 6            |
| 59           | -99             | 0.95             | 0.0033                     | 159          |
| 60           | -433            | 0.99             | 0.0037                     | 5            |
| 61           | -54             | 0.98             | 0.0017                     | 105          |
| 62           | -151            | 0.97             | 0.0037                     | 3            |
| 63           | -69             | 0.99             | 0.0016                     | 101          |
| 64           | -233            | 0.99             | 0.0034                     | 2            |

| Simulaciones | Modulo de Caída |                  | Punto Resistencia Residual |              |
|--------------|-----------------|------------------|----------------------------|--------------|
|              | Modulo [Gpa]    | Coef. Det. (R^2) | Strain                     | Stress [MPa] |
| 65           | -21             | 0.97             | 0.0043                     | 153          |
| 66           | -206            | 0.97             | 0.0048                     | 4            |
| 67           | -34             | 0.99             | 0.0042                     | 150          |
| 68           | -241            | 0.98             | 0.0048                     | 3            |
| 69           | -11             | 0.94             | 0.0021                     | 93           |
| 70           | -55             | 0.93             | 0.0047                     | 2            |
| 71           | -19             | 0.92             | 0.0021                     | 91           |
| 72           | -132            | 0.98             | 0.0048                     | 2            |
| 73           | -59             | 0.98             | 0.0048                     | 171          |
| 74           | -288            | 0.97             | 0.0048                     | 4            |
| 75           | -52             | 0.98             | 0.0048                     | 162          |
| 76           | -202            | 0.99             | 0.0048                     | 3            |
| 77           | -22             | 0.90             | 0.0027                     | 104          |
| 78           | -106            | 0.95             | 0.0048                     | 3            |
| 79           | -37             | 0.98             | 0.0026                     | 101          |
| 80           | -84             | 0.96             | 0.0047                     | 2            |
| 81           | -11             | 0.61             | 0.0041                     | 151          |
| 82           | -206            | 0.98             | 0.0043                     | 5            |
| 83           | -24             | 0.90             | 0.0042                     | 147          |
| 84           | -252            | 0.98             | 0.0043                     | 3            |
| 85           | -8              | 0.88             | 0.0022                     | 92           |
| 86           | -71             | 0.96             | 0.0043                     | 2            |
| 87           | -21             | 0.97             | 0.0022                     | 89           |
| 88           | -139            | 0.99             | 0.0043                     | 2            |
| 89           | -42             | 0.93             | 0.0043                     | 186          |
| 90           | -311            | 0.99             | 0.0043                     | 4            |
| 91           | -60             | 0.97             | 0.0043                     | 170          |
| 92           | -212            | 0.99             | 0.0043                     | 3            |
| 93           | -29             | 0.94             | 0.0028                     | 103          |
| 94           | -76             | 0.93             | 0.0043                     | 2            |
| 95           | -40             | 0.98             | 0.0027                     | 99           |
| 96           | -96             | 0.94             | 0.0043                     | 2            |
| 97           | -21             | 0.90             | 0.0042                     | 156          |
| 98           | -177            | 0.99             | 0.0055                     | 4            |
| 99           | -23             | 0.97             | 0.0041                     | 152          |
| 100          | -192            | 0.99             | 0.0055                     | 3            |
| 101          | -5              | 0.66             | 0.0022                     | 94           |
| 102          | -63             | 0.96             | 0.0052                     | 1            |
| 103          | -9              | 0.92             | 0.0023                     | 91           |
| 104          | -111            | 1.00             | 0.0055                     | 1            |
| 105          | -64             | 0.96             | 0.0055                     | 169          |
| 106          | -312            | 1.00             | 0.0055                     | 3            |
| 107          | -60             | 0.97             | 0.0052                     | 163          |
| 108          | -188            | 0.99             | 0.0055                     | 4            |
| 109          | -24             | 0.96             | 0.0027                     | 106          |
| 110          | -102            | 0.98             | 0.0055                     | 1            |
| 111          | -37             | 0.99             | 0.0027                     | 102          |
| 112          | -67             | 0.93             | 0.0055                     | 2            |
| 113          | -31             | 0.94             | 0.0044                     | 153          |
| 114          | -192            | 0.99             | 0.0050                     | 5            |
| 115          | -26             | 0.97             | 0.0041                     | 150          |
| 116          | -187            | 0.97             | 0.0050                     | 4            |
| 117          | -6              | 0.71             | 0.0022                     | 93           |
| 118          | -69             | 0.99             | 0.0050                     | 2            |
| 119          | -14             | 0.94             | 0.0023                     | 90           |
| 120          | -121            | 0.99             | 0.0048                     | 2            |
| 121          | -75             | 0.98             | 0.0050                     | 168          |
| 122          | -312            | 0.98             | 0.0050                     | 3            |
| 123          | -28             | 0.82             | 0.0050                     | 160          |
| 124          | -191            | 0.99             | 0.0050                     | 3            |
| 125          | -25             | 0.97             | 0.0027                     | 104          |
| 126          | -51             | 0.87             | 0.0047                     | 2            |
| 127          | -43             | 0.99             | 0.0027                     | 100          |
| 128          | -72             | 0.94             | 0.0049                     | 2            |

Tabla 6.4: Resultado de macro parámetros de la zona pre-peak para la configuración tetraédrica en sus 128 simulaciones.

| Simulaciones | Modulo de Young |                  | Punto Peak |              |
|--------------|-----------------|------------------|------------|--------------|
|              | Modulo [Gpa]    | Coef. Det. (R^2) | Strain     | Stress [MPa] |
| 1            | 68              | 1.00             | 0.0022     | 150          |
| 2            | 68              | 1.00             | 0.0013     | 86           |
| 3            | 68              | 1.00             | 0.0022     | 149          |
| 4            | 68              | 1.00             | 0.0013     | 87           |
| 5            | 68              | 1.00             | 0.0012     | 84           |
| 6            | 68              | 1.00             | 0.0007     | 49           |
| 7            | 68              | 1.00             | 0.0012     | 84           |
| 8            | 68              | 1.00             | 0.0007     | 49           |
| 9            | 63              | 1.00             | 0.0026     | 161          |
| 10           | 0               | 0.00             | 0.0000     | 0            |
| 11           | 62              | 1.00             | 0.0026     | 160          |
| 12           | 62              | 1.00             | 0.0015     | 91           |
| 13           | 63              | 1.00             | 0.0014     | 90           |
| 14           | 62              | 1.00             | 0.0008     | 51           |
| 15           | 62              | 1.00             | 0.0014     | 89           |
| 16           | 62              | 1.00             | 0.0008     | 51           |
| 17           | 68              | 1.00             | 0.0022     | 148          |
| 18           | 68              | 1.00             | 0.0013     | 86           |
| 19           | 68              | 1.00             | 0.0022     | 149          |
| 20           | 68              | 1.00             | 0.0013     | 86           |
| 21           | 68              | 1.00             | 0.0012     | 83           |
| 22           | 68              | 1.00             | 0.0007     | 48           |
| 23           | 68              | 1.00             | 0.0012     | 83           |
| 24           | 68              | 1.00             | 0.0007     | 48           |
| 25           | 62              | 1.00             | 0.0026     | 162          |
| 26           | 62              | 1.00             | 0.0015     | 91           |
| 27           | 63              | 1.00             | 0.0026     | 161          |
| 28           | 62              | 1.00             | 0.0015     | 91           |
| 29           | 62              | 1.00             | 0.0014     | 89           |
| 30           | 62              | 1.00             | 0.0008     | 50           |
| 31           | 63              | 1.00             | 0.0014     | 89           |
| 32           | 62              | 1.00             | 0.0008     | 50           |
| 33           | 68              | 1.00             | 0.0022     | 148          |
| 34           | 68              | 1.00             | 0.0013     | 86           |
| 35           | 68              | 1.00             | 0.0022     | 147          |
| 36           | 68              | 1.00             | 0.0013     | 87           |
| 37           | 68              | 1.00             | 0.0012     | 83           |
| 38           | 68              | 1.00             | 0.0007     | 49           |
| 39           | 68              | 1.00             | 0.0012     | 82           |
| 40           | 68              | 1.00             | 0.0007     | 48           |
| 41           | 62              | 1.00             | 0.0025     | 160          |
| 42           | 62              | 1.00             | 0.0015     | 92           |
| 43           | 62              | 1.00             | 0.0025     | 158          |
| 44           | 62              | 1.00             | 0.0015     | 92           |
| 45           | 63              | 1.00             | 0.0014     | 89           |
| 46           | 62              | 1.00             | 0.0008     | 51           |
| 47           | 62              | 1.00             | 0.0014     | 89           |
| 48           | 62              | 1.00             | 0.0008     | 51           |
| 49           | 68              | 1.00             | 0.0022     | 146          |
| 50           | 68              | 1.00             | 0.0013     | 86           |
| 51           | 68              | 1.00             | 0.0021     | 146          |
| 52           | 68              | 1.00             | 0.0013     | 86           |
| 53           | 68              | 1.00             | 0.0012     | 82           |
| 54           | 68              | 1.00             | 0.0007     | 48           |
| 55           | 68              | 1.00             | 0.0012     | 82           |
| 56           | 68              | 1.00             | 0.0007     | 48           |
| 57           | 62              | 1.00             | 0.0026     | 161          |
| 58           | 62              | 1.00             | 0.0015     | 92           |
| 59           | 62              | 1.00             | 0.0025     | 158          |
| 60           | 62              | 1.00             | 0.0015     | 92           |
| 61           | 62              | 1.00             | 0.0014     | 88           |
| 62           | 62              | 1.00             | 0.0008     | 51           |
| 63           | 62              | 1.00             | 0.0014     | 88           |
| 64           | 62              | 1.00             | 0.0008     | 51           |

| Simulaciones | Modulo de Young |                  | Punto Peak |              |
|--------------|-----------------|------------------|------------|--------------|
|              | Modulo [Gpa]    | Coef. Det. (R^2) | Strain     | Stress [MPa] |
| 65           | 43              | 1.00             | 0.0034     | 147          |
| 66           | 43              | 1.00             | 0.0020     | 85           |
| 67           | 43              | 1.00             | 0.0034     | 148          |
| 68           | 43              | 1.00             | 0.0020     | 85           |
| 69           | 43              | 1.00             | 0.0019     | 84           |
| 70           | 43              | 1.00             | 0.0011     | 48           |
| 71           | 43              | 1.00             | 0.0020     | 83           |
| 72           | 43              | 1.00             | 0.0011     | 48           |
| 73           | 41              | 1.00             | 0.0039     | 159          |
| 74           | 41              | 1.00             | 0.0022     | 91           |
| 75           | 41              | 1.00             | 0.0039     | 159          |
| 76           | 41              | 1.00             | 0.0022     | 91           |
| 77           | 41              | 1.00             | 0.0022     | 88           |
| 78           | 41              | 1.00             | 0.0012     | 50           |
| 79           | 41              | 1.00             | 0.0022     | 89           |
| 80           | 41              | 1.00             | 0.0012     | 50           |
| 81           | 43              | 1.00             | 0.0034     | 146          |
| 82           | 43              | 1.00             | 0.0020     | 84           |
| 83           | 43              | 1.00             | 0.0034     | 147          |
| 84           | 43              | 1.00             | 0.0020     | 85           |
| 85           | 43              | 1.00             | 0.0019     | 83           |
| 86           | 43              | 1.00             | 0.0011     | 47           |
| 87           | 43              | 1.00             | 0.0019     | 82           |
| 88           | 43              | 1.00             | 0.0011     | 47           |
| 89           | 41              | 1.00             | 0.0039     | 159          |
| 90           | 41              | 1.00             | 0.0022     | 91           |
| 91           | 41              | 1.00             | 0.0039     | 159          |
| 92           | 41              | 1.00             | 0.0022     | 91           |
| 93           | 41              | 1.00             | 0.0022     | 88           |
| 94           | 41              | 1.00             | 0.0012     | 50           |
| 95           | 41              | 1.00             | 0.0021     | 88           |
| 96           | 40              | 1.00             | 0.0012     | 50           |
| 97           | 43              | 1.00             | 0.0034     | 147          |
| 98           | 43              | 1.00             | 0.0020     | 85           |
| 99           | 43              | 1.00             | 0.0034     | 146          |
| 100          | 43              | 1.00             | 0.0020     | 85           |
| 101          | 43              | 1.00             | 0.0020     | 83           |
| 102          | 43              | 1.00             | 0.0011     | 48           |
| 103          | 43              | 1.00             | 0.0019     | 82           |
| 104          | 43              | 1.00             | 0.0011     | 48           |
| 105          | 41              | 1.00             | 0.0039     | 160          |
| 106          | 40              | 1.00             | 0.0023     | 92           |
| 107          | 40              | 1.00             | 0.0039     | 158          |
| 108          | 41              | 1.00             | 0.0023     | 92           |
| 109          | 40              | 1.00             | 0.0022     | 88           |
| 110          | 40              | 1.00             | 0.0012     | 51           |
| 111          | 40              | 1.00             | 0.0021     | 88           |
| 112          | 41              | 1.00             | 0.0012     | 51           |
| 113          | 43              | 1.00             | 0.0035     | 146          |
| 114          | 43              | 1.00             | 0.0020     | 85           |
| 115          | 43              | 1.00             | 0.0035     | 144          |
| 116          | 43              | 1.00             | 0.0020     | 85           |
| 117          | 43              | 1.00             | 0.0019     | 82           |
| 118          | 43              | 1.00             | 0.0011     | 47           |
| 119          | 43              | 1.00             | 0.0019     | 82           |
| 120          | 43              | 1.00             | 0.0011     | 48           |
| 121          | 41              | 1.00             | 0.0038     | 155          |
| 122          | 40              | 1.00             | 0.0022     | 91           |
| 123          | 41              | 1.00             | 0.0039     | 158          |
| 124          | 40              | 1.00             | 0.0023     | 92           |
| 125          | 41              | 1.00             | 0.0022     | 88           |
| 126          | 40              | 1.00             | 0.0012     | 50           |
| 127          | 41              | 1.00             | 0.0021     | 88           |
| 128          | 40              | 1.00             | 0.0012     | 51           |

Tabla 6.5: Resultado de macro parámetros de la zona post-peak para la configuración tetraédrica en sus 128 simulaciones.

| Simulaciones | Modulo de Caída |                  | Punto Resistencia Residual |              |
|--------------|-----------------|------------------|----------------------------|--------------|
|              | Modulo [Gpa]    | Coef. Det. (R^2) | Strain                     | Stress [MPa] |
| 1            | -117            | 1.00             | 0.0060                     | 45           |
| 2            | -227            | 0.89             | 0.0059                     | 9            |
| 3            | -135            | 0.99             | 0.0060                     | 36           |
| 4            | -227            | 0.89             | 0.0059                     | 7            |
| 5            | -59             | 1.00             | 0.0060                     | 32           |
| 6            | -88             | 0.76             | 0.0059                     | 7            |
| 7            | -63             | 0.99             | 0.0060                     | 31           |
| 8            | -88             | 0.75             | 0.0060                     | 5            |
| 9            | -138            | 0.99             | 0.0060                     | 40           |
| 10           | 0               | 0.00             | 0.0000                     | 0            |
| 11           | -150            | 1.00             | 0.0060                     | 36           |
| 12           | -292            | 0.94             | 0.0059                     | 6            |
| 13           | -68             | 1.00             | 0.0060                     | 30           |
| 14           | -110            | 0.81             | 0.0060                     | 6            |
| 15           | -76             | 0.99             | 0.0060                     | 29           |
| 16           | -110            | 0.84             | 0.0056                     | 6            |
| 17           | -127            | 0.99             | 0.0054                     | 41           |
| 18           | -251            | 0.89             | 0.0054                     | 10           |
| 19           | -151            | 0.99             | 0.0054                     | 37           |
| 20           | -256            | 0.89             | 0.0053                     | 7            |
| 21           | -65             | 1.00             | 0.0054                     | 31           |
| 22           | -100            | 0.73             | 0.0054                     | 6            |
| 23           | -77             | 0.98             | 0.0054                     | 29           |
| 24           | -99             | 0.76             | 0.0051                     | 5            |
| 25           | -160            | 1.00             | 0.0054                     | 40           |
| 26           | -335            | 0.96             | 0.0053                     | 5            |
| 27           | -179            | 1.00             | 0.0054                     | 37           |
| 28           | -336            | 0.96             | 0.0053                     | 6            |
| 29           | -68             | 0.98             | 0.0054                     | 30           |
| 30           | -121            | 0.82             | 0.0054                     | 6            |
| 31           | -85             | 0.99             | 0.0054                     | 29           |
| 32           | -122            | 0.84             | 0.0054                     | 4            |
| 33           | -95             | 0.97             | 0.0069                     | 45           |
| 34           | -191            | 0.90             | 0.0069                     | 9            |
| 35           | -105            | 0.99             | 0.0069                     | 37           |
| 36           | -197            | 0.90             | 0.0069                     | 6            |
| 37           | -44             | 1.00             | 0.0069                     | 30           |
| 38           | -70             | 0.75             | 0.0069                     | 7            |
| 39           | -50             | 0.99             | 0.0069                     | 30           |
| 40           | -79             | 0.79             | 0.0065                     | 6            |
| 41           | -110            | 0.97             | 0.0069                     | 39           |
| 42           | -234            | 0.93             | 0.0069                     | 7            |
| 43           | -123            | 0.99             | 0.0069                     | 34           |
| 44           | -251            | 0.92             | 0.0069                     | 5            |
| 45           | -55             | 0.99             | 0.0069                     | 31           |
| 46           | -87             | 0.82             | 0.0069                     | 5            |
| 47           | -61             | 0.99             | 0.0069                     | 28           |
| 48           | -87             | 0.86             | 0.0069                     | 6            |
| 49           | -112            | 1.00             | 0.0063                     | 40           |
| 50           | -230            | 0.91             | 0.0062                     | 9            |
| 51           | -106            | 0.99             | 0.0063                     | 38           |
| 52           | -230            | 0.93             | 0.0062                     | 6            |
| 53           | -50             | 0.99             | 0.0063                     | 30           |
| 54           | -88             | 0.77             | 0.0062                     | 6            |
| 55           | -60             | 0.99             | 0.0062                     | 30           |
| 56           | -87             | 0.79             | 0.0062                     | 6            |
| 57           | -134            | 0.98             | 0.0063                     | 40           |
| 58           | -271            | 0.94             | 0.0062                     | 6            |
| 59           | -140            | 0.99             | 0.0062                     | 38           |
| 60           | -275            | 0.95             | 0.0062                     | 5            |
| 61           | -56             | 1.00             | 0.0063                     | 31           |
| 62           | -95             | 0.82             | 0.0063                     | 6            |
| 63           | -73             | 0.99             | 0.0063                     | 27           |
| 64           | -96             | 0.86             | 0.0062                     | 5            |

| Simulaciones | Modulo de Caída |                  | Punto Resistencia Residual |              |
|--------------|-----------------|------------------|----------------------------|--------------|
|              | Modulo [Gpa]    | Coef. Det. (R^2) | Strain                     | Stress [MPa] |
| 65           | -60             | 0.94             | 0.0081                     | 50           |
| 66           | -192            | 0.94             | 0.0081                     | 8            |
| 67           | -77             | 0.97             | 0.0081                     | 40           |
| 68           | -187            | 0.93             | 0.0081                     | 7            |
| 69           | -35             | 1.00             | 0.0081                     | 32           |
| 70           | -68             | 0.77             | 0.0081                     | 6            |
| 71           | -46             | 0.99             | 0.0081                     | 29           |
| 72           | -75             | 0.79             | 0.0081                     | 6            |
| 73           | -98             | 0.97             | 0.0081                     | 47           |
| 74           | -202            | 0.94             | 0.0081                     | 7            |
| 75           | -118            | 0.98             | 0.0081                     | 36           |
| 76           | -213            | 0.95             | 0.0081                     | 6            |
| 77           | -45             | 1.00             | 0.0081                     | 30           |
| 78           | -70             | 0.75             | 0.0081                     | 6            |
| 79           | -53             | 1.00             | 0.0081                     | 28           |
| 80           | -75             | 0.79             | 0.0080                     | 5            |
| 81           | -70             | 0.98             | 0.0074                     | 50           |
| 82           | -205            | 0.91             | 0.0074                     | 8            |
| 83           | -63             | 0.95             | 0.0073                     | 42           |
| 84           | -190            | 0.99             | 0.0073                     | 8            |
| 85           | -40             | 0.99             | 0.0073                     | 31           |
| 86           | -77             | 0.76             | 0.0073                     | 7            |
| 87           | -46             | 0.99             | 0.0073                     | 31           |
| 88           | -75             | 0.80             | 0.0074                     | 5            |
| 89           | -117            | 0.98             | 0.0074                     | 46           |
| 90           | -215            | 0.98             | 0.0073                     | 6            |
| 91           | -131            | 0.99             | 0.0074                     | 37           |
| 92           | -182            | 0.97             | 0.0074                     | 6            |
| 93           | -49             | 1.00             | 0.0074                     | 32           |
| 94           | -81             | 0.78             | 0.0073                     | 7            |
| 95           | -57             | 0.99             | 0.0074                     | 27           |
| 96           | -86             | 0.83             | 0.0073                     | 4            |
| 97           | -58             | 0.98             | 0.0094                     | 46           |
| 98           | -156            | 0.91             | 0.0094                     | 7            |
| 99           | -67             | 1.00             | 0.0094                     | 39           |
| 100          | -150            | 0.91             | 0.0094                     | 8            |
| 101          | -28             | 1.00             | 0.0094                     | 31           |
| 102          | -57             | 0.80             | 0.0094                     | 8            |
| 103          | -30             | 0.99             | 0.0094                     | 29           |
| 104          | -62             | 0.81             | 0.0094                     | 6            |
| 105          | -80             | 0.98             | 0.0094                     | 40           |
| 106          | -165            | 0.89             | 0.0091                     | 8            |
| 107          | -96             | 0.99             | 0.0094                     | 38           |
| 108          | -165            | 0.90             | 0.0094                     | 6            |
| 109          | -33             | 0.99             | 0.0094                     | 30           |
| 110          | -59             | 0.79             | 0.0093                     | 6            |
| 111          | -37             | 1.00             | 0.0094                     | 30           |
| 112          | -63             | 0.82             | 0.0094                     | 5            |
| 113          | -66             | 0.99             | 0.0085                     | 44           |
| 114          | -165            | 0.91             | 0.0085                     | 8            |
| 115          | -50             | 0.99             | 0.0085                     | 40           |
| 116          | -170            | 0.90             | 0.0085                     | 7            |
| 117          | -31             | 0.98             | 0.0085                     | 31           |
| 118          | -57             | 0.78             | 0.0081                     | 7            |
| 119          | -36             | 0.99             | 0.0085                     | 29           |
| 120          | -60             | 0.80             | 0.0085                     | 6            |
| 121          | -69             | 0.94             | 0.0085                     | 46           |
| 122          | -189            | 0.93             | 0.0084                     | 10           |
| 123          | -97             | 0.99             | 0.0085                     | 35           |
| 124          | -196            | 0.91             | 0.0085                     | 6            |
| 125          | -38             | 1.00             | 0.0085                     | 29           |
| 126          | -71             | 0.79             | 0.0083                     | 6            |
| 127          | -46             | 0.99             | 0.0085                     | 27           |
| 128          | -69             | 0.81             | 0.0085                     | 6            |

## 6.2 Anexo B

### Tablas y gráficos de análisis inicial ANOVA: Configuración Voronoi

Tabla 6.6: Análisis de varianza del modelo inicial para el macro parámetro módulo de Young en la configuración Voronoi.

| Fuente           | GL  | SC Ajust.  | MC Ajust. | Valor F   | Valor p |
|------------------|-----|------------|-----------|-----------|---------|
| Módulo de Young  | 1   | 3.6E+10    | 3.6E+10   | 110305.67 | 0.000   |
| Poisson          | 1   | 22472      | 22472     | 0.07      | 0.793   |
| Densidad         | 1   | 8363       | 8363      | 0.03      | 0.873   |
| Rigidez de corte | 1   | 167226615  | 167226615 | 512.39    | 0.000   |
| Cohesión         | 1   | 32575      | 32575     | 0.1       | 0.753   |
| Tensión          | 1   | 6656       | 6656      | 0.02      | 0.887   |
| Fricción         | 1   | 14061      | 14061     | 0.04      | 0.836   |
| Error            | 120 | 39164171   | 326368    |           |         |
| Total            | 127 | 3.6207E+10 |           |           |         |

Tabla 6.7: Análisis de varianza del modelo inicial para el macro parámetro resistencia peak en la configuración Voronoi.

| Fuente           | GL  | SC Ajust. | MC Ajust. | Valor F | Valor p |
|------------------|-----|-----------|-----------|---------|---------|
| Módulo de Young  | 1   | 33        | 33        | 0.37    | 0.542   |
| Poisson          | 1   | 3         | 3         | 0.04    | 0.846   |
| Densidad         | 1   | 17        | 17        | 0.19    | 0.664   |
| Rigidez de corte | 1   | 10534     | 10534     | 118.72  | 0.000   |
| Cohesión         | 1   | 118228    | 118228    | 1332.47 | 0.000   |
| Tensión          | 1   | 139       | 139       | 1.57    | 0.213   |
| Fricción         | 1   | 119480    | 119480    | 1346.58 | 0.000   |
| Error            | 120 | 10647     | 89        |         |         |
| Total            | 127 | 259081    |           |         |         |

Tabla 6.8: Análisis de varianza del modelo inicial para el macro parámetro módulo de caída en la configuración Voronoi.

| Fuente           | GL  | SC Ajust.  | MC Ajust.  | Valor F | Valor p |
|------------------|-----|------------|------------|---------|---------|
| Módulo de Young  | 1   | 1.0265E+11 | 1.0265E+11 | 31.07   | 0.000   |
| Poisson          | 1   | 1.2263E+10 | 1.2263E+10 | 3.71    | 0.056   |
| Densidad         | 1   | 80547207   | 80547207   | 0.02    | 0.876   |
| Rigidez de corte | 1   | 5.3611E+10 | 5.3611E+10 | 16.23   | 0.000   |
| Cohesión         | 1   | 2.5493E+11 | 2.5493E+11 | 77.16   | 0.000   |
| Tensión          | 1   | 2.8062E+10 | 2.8062E+10 | 8.49    | 0.004   |
| Fricción         | 1   | 7.853E+11  | 7.853E+11  | 237.7   | 0.000   |
| Error            | 120 | 3.9646E+11 | 3303787717 |         |         |
| Total            | 127 | 1.6334E+12 |            |         |         |

Tabla 6.9: Análisis de varianza del modelo inicial para el macro parámetro resistencia residual en la configuración Voronoi.

| Fuente           | GL  | SC Ajust. | MC Ajust. | Valor F | Valor p |
|------------------|-----|-----------|-----------|---------|---------|
| Módulo de Young  | 1   | 17        | 17        | 0.07    | 0.795   |
| Poisson          | 1   | 2         | 2         | 0.01    | 0.934   |
| Densidad         | 1   | 10        | 10        | 0.04    | 0.846   |
| Rigidez de corte | 1   | 1528      | 1528      | 6.05    | 0.015   |
| Cohesión         | 1   | 31667     | 31667     | 125.29  | 0.000   |
| Tensión          | 1   | 216       | 216       | 0.86    | 0.357   |
| Fricción         | 1   | 497115    | 497115    | 1966.84 | 0.000   |
| Error            | 120 | 30330     | 253       |         |         |
| Total            | 127 | 560885    |           |         |         |

### Tablas de análisis final ANOVA: Configuración Voronoi

Tabla 6.10: Análisis de varianza del modelo final para el macro parámetro módulo de Young en la configuración Voronoi.

| Fuente           | GL  | SC Ajust.  | MC Ajust. | Valor F    | Valor p |
|------------------|-----|------------|-----------|------------|---------|
| Módulo de Young  | 1   | 3.6E+10    | 3.6E+10   | 4371721.74 | 0.000   |
| Rigidez de corte | 1   | 167226615  | 167226615 | 20307.31   | 0.000   |
| Young*corte      | 1   | 38227183   | 38227183  | 4642.15    | 0.000   |
| Error            | 124 | 1021115    | 8235      |            |         |
| Total            | 127 | 3.6207E+10 |           |            |         |

Tabla 6.11: Análisis de varianza del modelo final para el macro parámetro resistencia peak en la configuración Voronoi.

| Fuente            | GL  | SC Ajust. | MC Ajust. | Valor F | Valor p |
|-------------------|-----|-----------|-----------|---------|---------|
| Rigidez de corte  | 1   | 10534     | 10534     | 3196.89 | 0.000   |
| Cohesión          | 1   | 118228    | 118228    | 35880.8 | 0.000   |
| Fricción          | 1   | 119480    | 119480    | 36260.9 | 0.000   |
| Corte*Cohesión    | 1   | 1074      | 1074      | 325.81  | 0.000   |
| Corte*Fricción    | 1   | 964       | 964       | 292.53  | 0.000   |
| Cohesión*Fricción | 1   | 8404      | 8404      | 2550.39 | 0.000   |
| Error             | 121 | 399       | 3         |         |         |
| Falta de ajuste   | 1   | 38        | 38        | 12.77   | 0.001   |
| Error puro        | 120 | 360       | 3         |         |         |
| Total             | 127 | 259081    |           |         |         |

Tabla 6.12: Análisis de varianza del modelo final para el macro parámetro módulo de caída en la configuración Voronoi.

| Fuente            | GL  | SC Ajust.  | MC Ajust.  | Valor F | Valor p |
|-------------------|-----|------------|------------|---------|---------|
| Módulo de Young   | 1   | 1.0265E+11 | 1.0265E+11 | 62.2    | 0.000   |
| Rigidez de corte  | 1   | 5.3611E+10 | 5.3611E+10 | 32.49   | 0.000   |
| Cohesión          | 1   | 2.5493E+11 | 2.5493E+11 | 154.47  | 0.000   |
| Tensión           | 1   | 2.8062E+10 | 2.8062E+10 | 17      | 0.000   |
| Fricción          | 1   | 7.853E+11  | 7.853E+11  | 475.86  | 0.000   |
| Young*Corte       | 1   | 1.2969E+10 | 1.2969E+10 | 7.86    | 0.006   |
| Young*Tensión     | 1   | 3.0568E+10 | 3.0568E+10 | 18.52   | 0.000   |
| Young*Fricción    | 1   | 2.5999E+10 | 2.5999E+10 | 15.75   | 0.000   |
| Cohesión*Fricción | 1   | 1.2403E+11 | 1.2403E+11 | 75.15   | 0.000   |
| Tensión*Fricción  | 1   | 2.2152E+10 | 2.2152E+10 | 13.42   | 0.000   |
| Error             | 117 | 1.9308E+11 | 1650284798 |         |         |
| Falta de ajuste   | 53  | 1.3978E+11 | 2637332333 | 3.17    | 0.000   |
| Error puro        | 64  | 5.3305E+10 | 832886059  |         |         |
| Total             | 127 | 1.6334E+12 |            |         |         |

Tabla 6.13: Análisis de varianza del modelo final para el macro parámetro resistencia residual en la configuración Voronoi.

| Fuente            | GL  | SC Ajust. | MC Ajust. | Valor F | Valor p |
|-------------------|-----|-----------|-----------|---------|---------|
| Rigidez de corte  | 1   | 1528      | 1528      | 177.62  | 0.000   |
| Cohesión          | 1   | 31667     | 31667     | 3681.05 | 0.000   |
| Fricción          | 1   | 497115    | 497115    | 57785.6 | 0.000   |
| Corte*Fricción    | 1   | 1403      | 1403      | 163.1   | 0.000   |
| Cohesión*Fricción | 1   | 28122     | 28122     | 3268.96 | 0.000   |
| Error             | 122 | 1050      | 9         |         |         |
| Falta de ajuste   | 2   | 38        | 19        | 2.27    | 0.108   |
| Error puro        | 120 | 1011      | 8         |         |         |
| Total             | 127 | 560885    |           |         |         |

## Tablas y gráficos de análisis inicial ANOVA: Configuración Tetraédrica

Tabla 6.14: Análisis de varianza del modelo inicial para el macro parámetro módulo de Young en la configuración Tetraédrica.

| Fuente           | GL  | SC Ajust.  | MC Ajust.  | Valor F  | Valor p |
|------------------|-----|------------|------------|----------|---------|
| Módulo de Young  | 1   | 1.7535E+10 | 1.7535E+10 | 22279.96 | 0.000   |
| Poisson          | 1   | 281659     | 281659     | 0.36     | 0.551   |
| Densidad         | 1   | 42281      | 42281      | 0.05     | 0.817   |
| Rigidez de corte | 1   | 532682938  | 532682938  | 676.82   | 0.000   |
| Cohesión         | 1   | 45359      | 45359      | 0.06     | 0.811   |
| Tensión          | 1   | 10258      | 10258      | 0.01     | 0.909   |
| Fricción         | 1   | 754753     | 754753     | 0.96     | 0.329   |
| Error            | 119 | 93658007   | 787042     |          |         |
| Total            | 126 | 1.8219E+10 |            |          |         |

Tabla 6.15: Análisis de varianza del modelo inicial para el macro parámetro resistencia peak en la configuración Tetraédrica.

| Fuente           | GL  | SC Ajust. | MC Ajust. | Valor F | Valor p |
|------------------|-----|-----------|-----------|---------|---------|
| Módulo de Young  | 1   | 35        | 34.7      | 0.61    | 0.438   |
| Poisson          | 1   | 7         | 6.7       | 0.12    | 0.733   |
| Densidad         | 1   | 18        | 18.2      | 0.32    | 0.574   |
| Rigidez de corte | 1   | 1400      | 1399.5    | 24.42   | 0.000   |
| Cohesión         | 1   | 91065     | 91064.8   | 1589.22 | 0.000   |
| Tensión          | 1   | 1         | 1.2       | 0.02    | 0.885   |
| Fricción         | 1   | 80521     | 80521.1   | 1405.21 | 0.000   |
| Error            | 119 | 6819      | 57.3      |         |         |
| Total            | 126 | 181269    |           |         |         |

Tabla 6.16: Análisis de varianza del modelo inicial para el macro parámetro módulo de caída en la configuración Tetraédrica.

| Fuente           | GL  | SC Ajust.  | MC Ajust.  | Valor F | Valor p |
|------------------|-----|------------|------------|---------|---------|
| Módulo de Young  | 1   | 5.3965E+10 | 5.3965E+10 | 74.9    | 0.000   |
| Poisson          | 1   | 1.4078E+10 | 1.4078E+10 | 19.54   | 0.000   |
| Densidad         | 1   | 4813992152 | 4813992152 | 6.68    | 0.011   |
| Rigidez de corte | 1   | 1.3529E+10 | 1.3529E+10 | 18.78   | 0.000   |
| Cohesión         | 1   | 2.8635E+11 | 2.8635E+11 | 397.43  | 0.000   |
| Tensión          | 1   | 1267928886 | 1267928886 | 1.76    | 0.187   |
| Fricción         | 1   | 1.6063E+11 | 1.6063E+11 | 222.94  | 0.000   |
| Error            | 119 | 8.5739E+10 | 720492364  |         |         |
| Total            | 126 | 6.1144E+11 |            |         |         |

Tabla 6.17: Análisis de varianza del modelo inicial para el macro parámetro resistencia residual en la configuración Tetraédrica.

| Fuente           | GL  | SC Ajust. | MC Ajust. | Valor F | Valor p |
|------------------|-----|-----------|-----------|---------|---------|
| Módulo de Young  | 1   | 24.8      | 24.8      | 2.59    | 0.110   |
| Poisson          | 1   | 7.8       | 7.8       | 0.82    | 0.368   |
| Densidad         | 1   | 0.8       | 0.8       | 0.08    | 0.777   |
| Rigidez de corte | 1   | 60.3      | 60.3      | 6.29    | 0.013   |
| Cohesión         | 1   | 1198.6    | 1198.6    | 124.97  | 0.000   |
| Tensión          | 1   | 237.7     | 237.7     | 24.78   | 0.000   |
| Fricción         | 1   | 25957.4   | 25957.4   | 2706.34 | 0.000   |
| Error            | 119 | 1141.4    | 9.6       |         |         |
| Total            | 126 | 28743.3   |           |         |         |

## Tablas y gráficos de análisis final ANOVA: Configuración Tetraédrica

Tabla 6.18: Análisis de varianza del modelo final para el macro parámetro módulo de Young en la configuración tetraédrica.

| Fuente           | GL  | SC Ajust.  | MC Ajust. | Valor F    | Valor p |
|------------------|-----|------------|-----------|------------|---------|
| Módulo de Young  | 1   | 1.752E+10  | 1.752E+10 | 1043130.65 | 0.000   |
| Rigidez de corte | 1   | 536297053  | 536297053 | 31930.7    | 0.000   |
| Young*Corte      | 1   | 92735424   | 92735424  | 5521.39    | 0.000   |
| Error            | 123 | 2065865    | 16796     |            |         |
| Total            | 126 | 1.8219E+10 |           |            |         |

Tabla 6.19: Análisis de varianza del modelo final para el macro parámetro resistencia peak en la configuración tetraédrica.

| Fuente            | GL  | SC Ajust. | MC Ajust. | Valor F  | Valor p |
|-------------------|-----|-----------|-----------|----------|---------|
| Rigidez de corte  | 1   | 1344      | 1343.6    | 1261.39  | 0.000   |
| Cohesión          | 1   | 90615     | 90615.1   | 85070.01 | 0.000   |
| Fricción          | 1   | 80956     | 80956.4   | 76002.36 | 0.000   |
| Corte*Cohesión    | 1   | 179       | 178.9     | 167.92   | 0.000   |
| Corte*Fricción    | 1   | 179       | 179.3     | 168.34   | 0.000   |
| Cohesión*Fricción | 1   | 6389      | 6388.8    | 5997.87  | 0.000   |
| Error             | 120 | 128       | 1.1       |          |         |
| Falta de ajuste   | 1   | 19        | 18.5      | 20.14    | 0.000   |
| Error puro        | 119 | 109       | 0.9       |          |         |
| Total             | 126 | 181269    |           |          |         |

Tabla 6.20: Análisis de varianza del modelo final para el macro parámetro módulo de caída en la configuración tetraédrica.

| Fuente            | GL  | SC Ajust.  | MC Ajust.  | Valor F | Valor p |
|-------------------|-----|------------|------------|---------|---------|
| Módulo de Young   | 1   | 5.5694E+10 | 5.5694E+10 | 465.52  | 0.000   |
| Poisson           | 1   | 1.4976E+10 | 1.4976E+10 | 125.18  | 0.000   |
| Densidad          | 1   | 4303552069 | 4303552069 | 35.97   | 0.000   |
| Rigidez de corte  | 1   | 1.441E+10  | 1.441E+10  | 120.44  | 0.000   |
| Cohesión          | 1   | 2.9022E+11 | 2.9022E+11 | 2425.75 | 0.000   |
| Fricción          | 1   | 1.6356E+11 | 1.6356E+11 | 1367.1  | 0.000   |
| Young*Densidad    | 1   | 1239444357 | 1239444357 | 10.36   | 0.002   |
| Young*Corte       | 1   | 845100190  | 845100190  | 7.06    | 0.009   |
| Young*Cohesión    | 1   | 9721806544 | 9721806544 | 81.26   | 0.000   |
| Young*Fricción    | 1   | 1428936285 | 1428936285 | 11.94   | 0.001   |
| Poisson*Cohesión  | 1   | 1669178840 | 1669178840 | 13.95   | 0.000   |
| Densidad*Cohesión | 1   | 634884855  | 634884855  | 5.31    | 0.023   |
| Densidad*Fricción | 1   | 588514746  | 588514746  | 4.92    | 0.029   |
| Corte*Cohesión    | 1   | 4236389413 | 4236389413 | 35.41   | 0.000   |
| Cohesión*Fricción | 1   | 5.4164E+10 | 5.4164E+10 | 452.73  | 0.000   |
| Error             | 111 | 1.328E+10  | 119639547  |         |         |
| Falta de ajuste   | 48  | 9474829110 | 197392273  | 3.27    | 0.000   |
| Error puro        | 63  | 3805160639 | 60399375   |         |         |
| Total             | 126 | 6.1144E+11 |            |         |         |

Tabla 6.21: Análisis de varianza del modelo final para el macro parámetro resistencia residual en la configuración tetraédrica.

| Fuente            | GL  | SC Ajust. | MC Ajust. | Valor F | Valor p |
|-------------------|-----|-----------|-----------|---------|---------|
| Rigidez de corte  | 1   | 64.1      | 64.1      | 22.86   | 0.000   |
| Cohesión          | 1   | 1181.9    | 1181.9    | 421.39  | 0.000   |
| Tensión           | 1   | 230.3     | 230.3     | 82.11   | 0.000   |
| Fricción          | 1   | 26033.2   | 26033.2   | 9281.5  | 0.000   |
| Corte*Cohesión    | 1   | 11.2      | 11.2      | 4       | 0.048   |
| Cohesión*Tensión  | 1   | 45.8      | 45.8      | 16.34   | 0.000   |
| Cohesión*Fricción | 1   | 735.5     | 735.5     | 262.21  | 0.000   |
| Tensión*Fricción  | 1   | 52.3      | 52.3      | 18.65   | 0.000   |
| Error             | 118 | 331       | 2.8       |         |         |
| Falta de ajuste   | 7   | 45.8      | 6.5       | 2.55    | 0.018   |
| Error puro        | 111 | 285.2     | 2.6       |         |         |
| Total             | 126 | 28743.3   |           |         |         |

## 6.3 Anexo C

### Modelo constitutivo Mohr-Coulomb en 3DEC

El modelo constitutivo Mohr-Coulomb se emplea en geotecnia para describir el comportamiento mecánico de materiales como suelos y rocas. Este modelo, se implementa en el software 3DEC, basado en un criterio de falla definido por la interacción entre esfuerzos normales y de corte, considerando un comportamiento elástico-plástico.

Mohr-Coulomb emplea un criterio de falla lineal definido por la ecuación:

$$\tau = c + \sigma \tan (\phi)$$

Donde:

- $\tau$ : esfuerzo cortante en el plano de falla [Pa].
- $c$ : cohesión del material [Pa].
- $\sigma$ : esfuerzo normal efectivo [Pa].
- $\phi$ : ángulo de fricción interna [°].

## 6.4 Anexo D

### Macro parámetros de los modelos base

Tabla 6.22: Macro parámetros resultantes para las simulaciones con micro parámetros base.

| Simulación      | Módulo de Young |                  | Punto Peak |              | Módulo de Caída |                  | Punto Resistencia Residual |              |
|-----------------|-----------------|------------------|------------|--------------|-----------------|------------------|----------------------------|--------------|
|                 | Modulo [Gpa]    | Coef. Det. (R^2) | Strain     | Stress [MPa] | Modulo [Gpa]    | Coef. Det. (R^2) | Strain                     | Stress [MPa] |
| Base Tetraedros | 55              | 1.00             | 0.0012     | 70           | -135            | 0.83             | 0.0071                     | 8            |
| Base Voronoi    | 65              | 1.00             | 0.0011     | 77           | -221            | 1.00             | 0.0042                     | 3            |

### Comportamiento en la zona pre y post-peak para simulación 1 configuración Voronoi

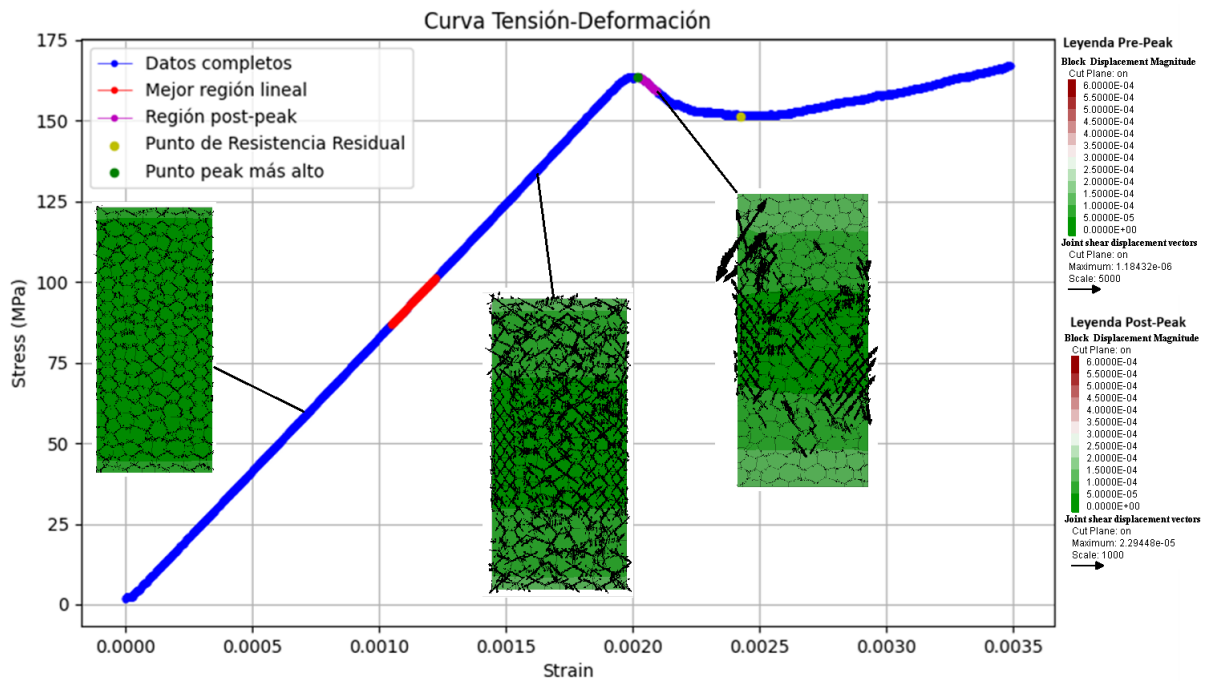


Figura 6.1: Curva esfuerzo-deformación con representaciones gráficas de desplazamiento en plano Y, enfoque en comportamiento pre-peak, simulación 1 para configuración Voronoi.

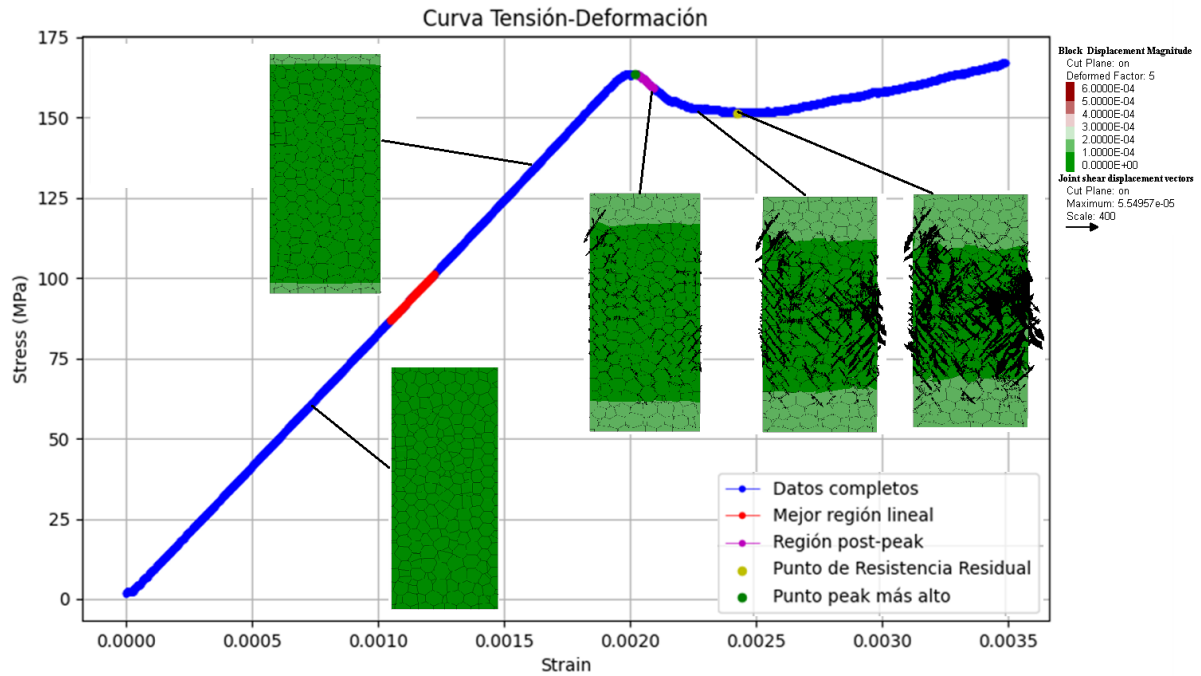


Figura 6.2: Curva esfuerzo-deformación con representaciones gráficas de desplazamiento en plano Y, enfoque en comportamiento post-peak, simulación 1 para configuración Voronoi.

### Comportamiento en la zona pre y post-peak para simulación 128 configuración Voronoi

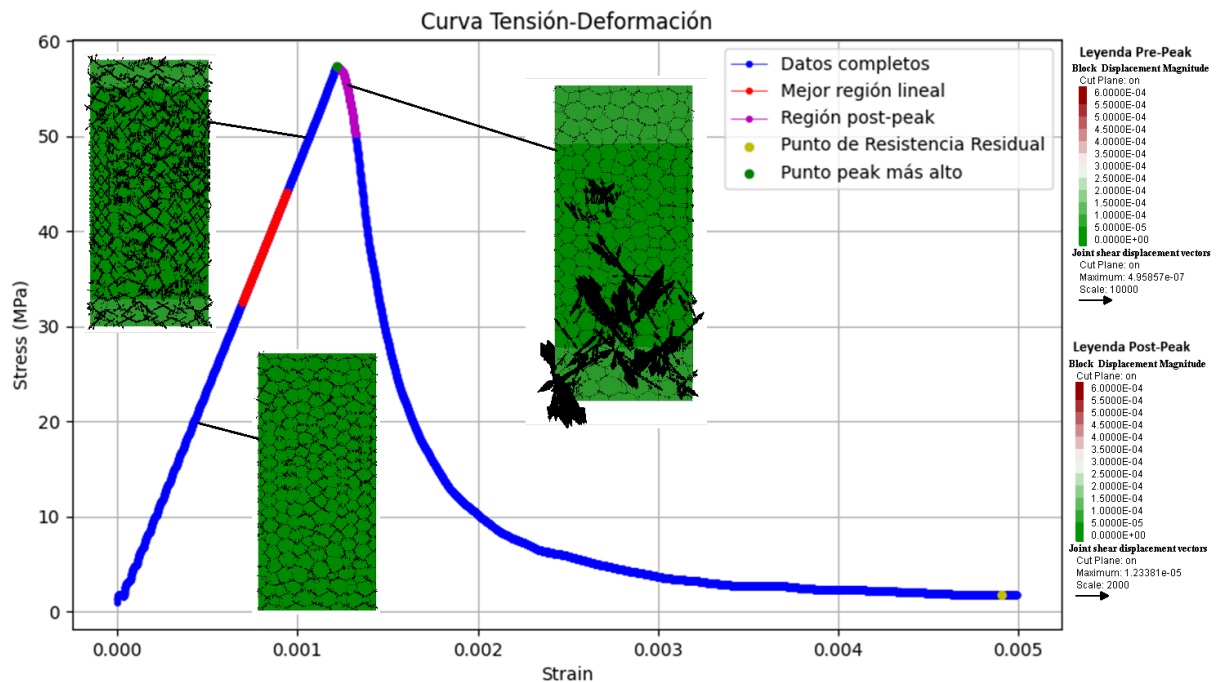


Figura 6.3: Curva esfuerzo-deformación con representaciones gráficas de desplazamiento en plano Y, enfoque en comportamiento pre-peak, simulación 128 para configuración Voronoi.

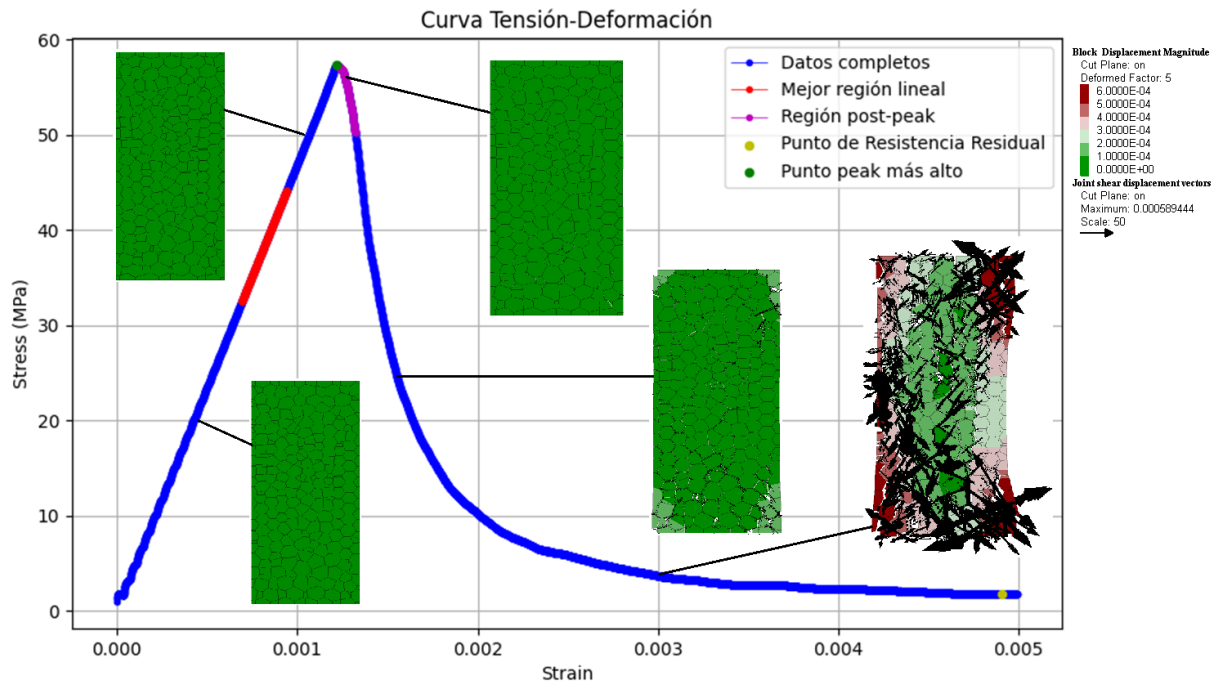


Figura 6.4: Curva esfuerzo-deformación con representaciones gráficas de desplazamiento en plano Y, enfoque en comportamiento post-peak, simulación 128 para configuración Voronoi.

### Comportamiento en la zona pre y post-peak para simulación 1 configuración tetraédrica

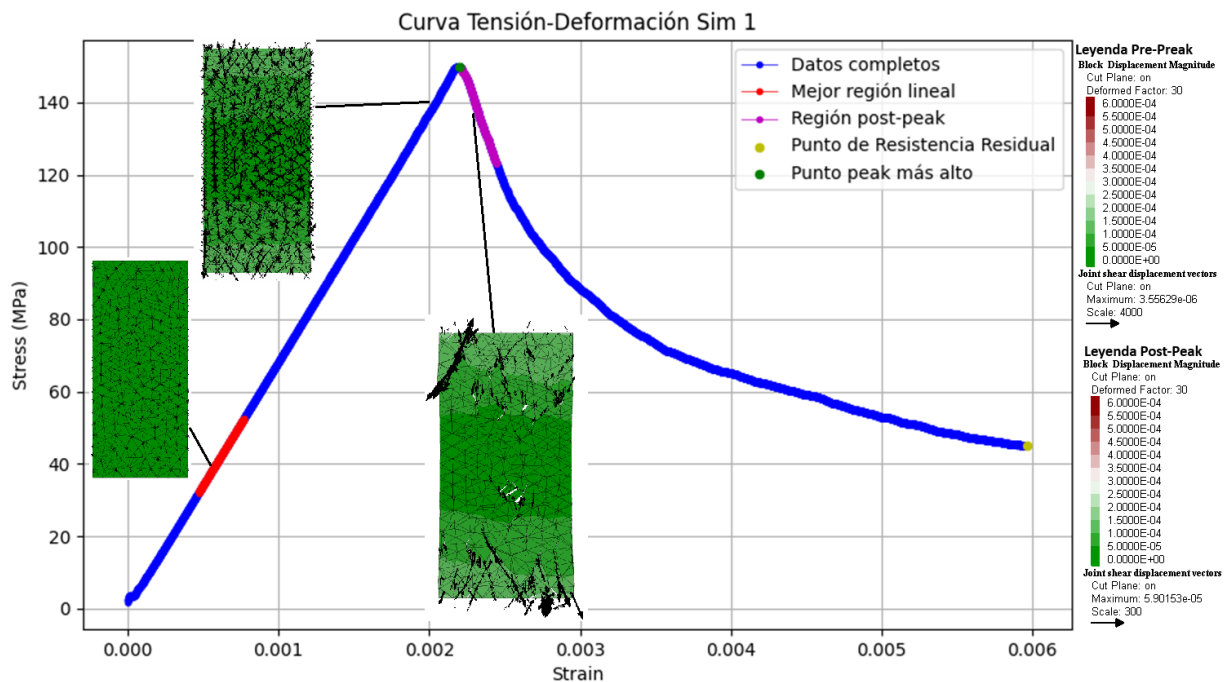


Figura 6.5: Curva esfuerzo-deformación con representaciones gráficas de desplazamiento en plano Y, enfoque en comportamiento pre-peak, simulación 1 para configuración tetraédrica.

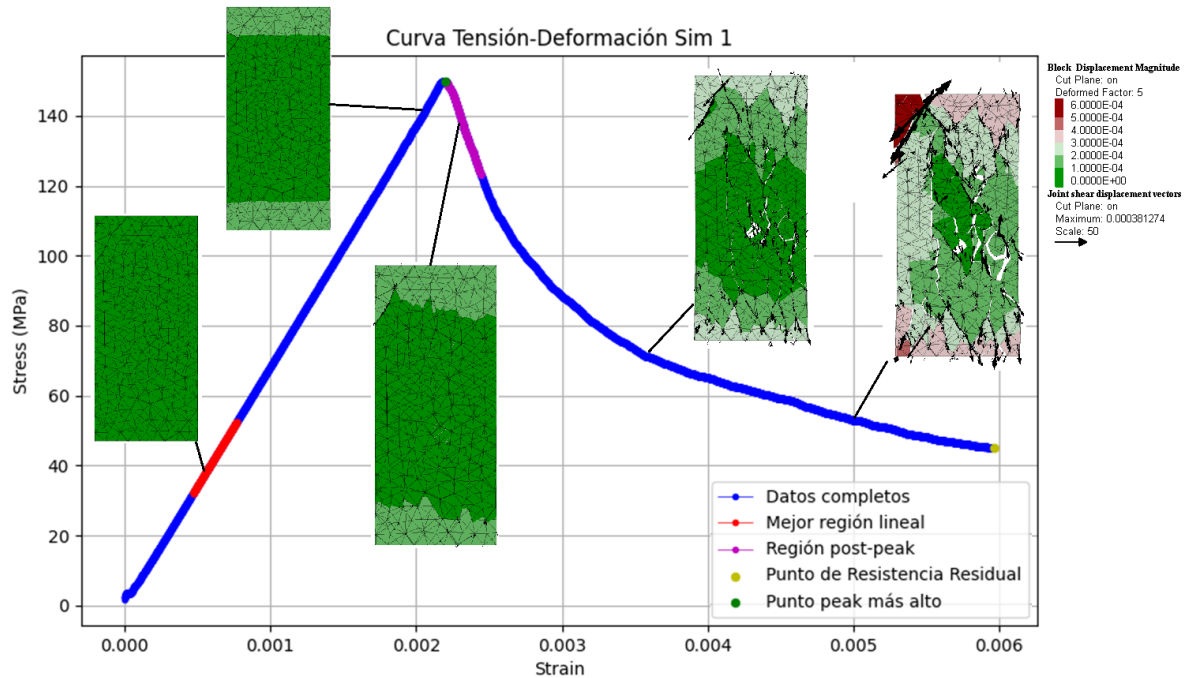


Figura 6.6: Curva esfuerzo-deformación con representaciones gráficas de desplazamiento en plano Y, enfoque en comportamiento post-peak, simulación 1 para configuración tetraédrica.

### Comportamiento en la zona pre y post-peak para simulación 128 configuración tetraédrica

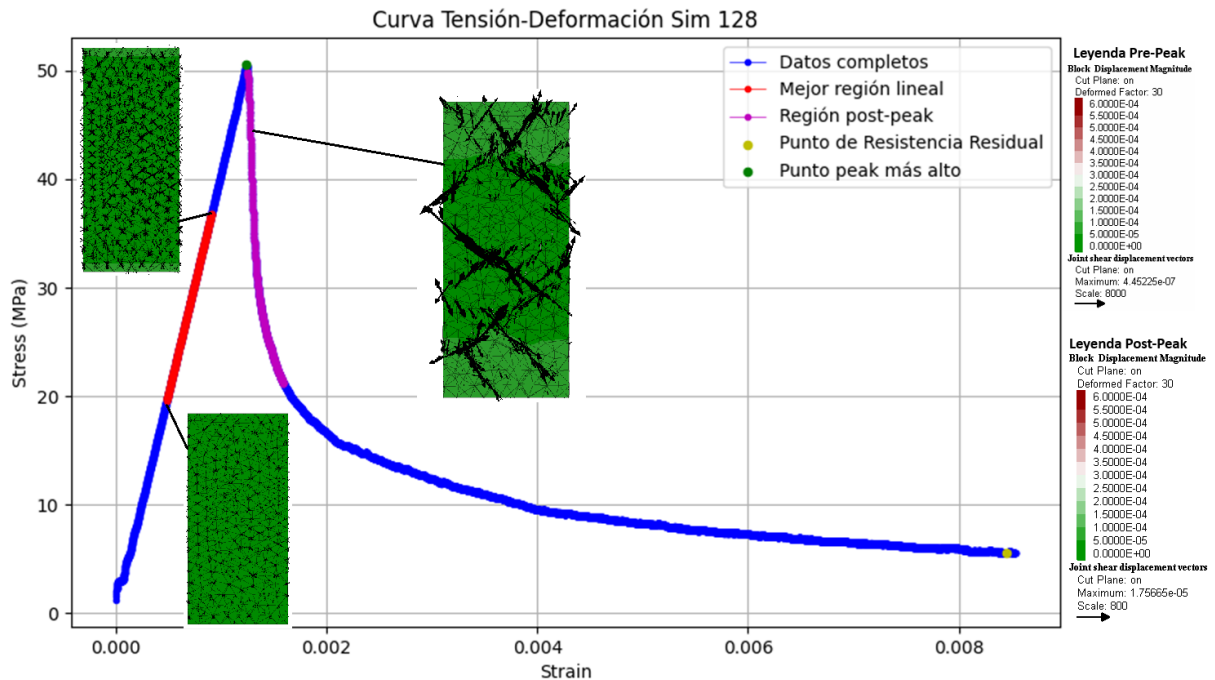


Figura 6.7: Curva esfuerzo-deformación con representaciones gráficas de desplazamiento en plano Y, enfoque en comportamiento pre-peak, simulación 128 para configuración tetraédrica.

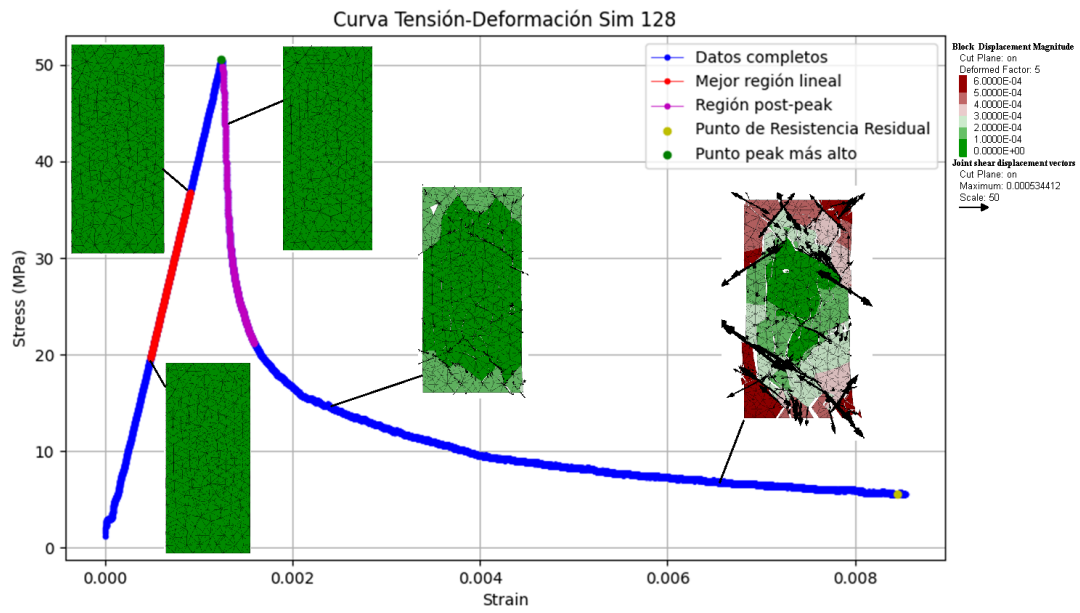


Figura 6.8: Curva esfuerzo-deformación con representaciones gráficas de desplazamiento en plano Y, enfoque en comportamiento post-peak, simulación 128 para configuración tetraédrica.

**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN - FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**Departamento de Ingeniería Metalúrgica**  
Hoja Resumen Memoria de Título

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                      |                                                                                                                     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Título:</b><br><b>ESTUDIO DEL IMPACTO DE LA FORMA DE LOS BLOQUES EN EL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE MUESTRAS DE ROCA USANDO UN MODELO DEM A ESCALA DE LABORATORIO</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                      |                                                                                                                     |
| <b>Nombre Memorista: MATÍAS NICOLÁS SÁNCHEZ SAGREDO</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                      |                                                                                                                     |
| <b>Modalidad</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | <b>Investigación</b> | <b>Profesor (es) Patrocinante (s)</b>                                                                               |
| <b>Concepto</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | EXCELENTE            | <br><b>Prof. René Gómez</b>       |
| <b>Calificación</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 6.9                  |                                                                                                                     |
| <b>Fecha</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 18.12.2024           |                                                                                                                     |
| <br><br><b>Prof. Ramón Díaz N.</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |                      | <b>Ingeniero Supervisor:</b>                                                                                        |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                      | <b>Institución:</b>                                                                                                 |
| <b>Comisión (Nombre y Firma)</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                      |                                                                                                                     |
| <br><b>Ing. Diego Oyarzo</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                      | <br><b>Profª. Kimie Suzuki</b> |
| <b>Resumen</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                      |                                                                                                                     |
| <p>El análisis mecánico de las rocas bajo carga mediante modelos numéricos es crucial en el diseño de estructuras geotécnicas y la planificación minera. Este estudio utiliza el método de elementos discretos (DEM) en el software 3DEC para evaluar cómo las propiedades mecánicas de las rocas, como cohesión, fricción interna y módulo de Young, se ven influenciadas por configuraciones geométricas internas y sus interacciones. Se investigaron dos configuraciones: bloques tipo Voronoi y tetraédricos, aplicando 256 simulaciones numéricas para analizar fases pre y <i>post-peak</i>, combinaciones de micro propiedades y sus efectos en el comportamiento global.</p> <p>El análisis estadístico mediante ANOVA y regresión lineal identificó parámetros significativos e interacciones clave. Los resultados muestran que los bloques Voronoi presentan comportamientos duales de <i>strain softening</i> y <i>strain hardening</i>, mientras que los bloques tetraédricos exhiben <i>strain softening</i> en general. Estas diferencias reflejan el impacto de la geometría en las curvas de esfuerzo-deformación y en la resistencia estructural.</p> <p>Este trabajo aporta una visión detallada sobre la relación entre las micro propiedades y el comportamiento mecánico macro, proporcionando herramientas para calibrar modelos numéricos. Sus conclusiones tienen aplicaciones directas en la mecánica de rocas y el diseño de estructuras geotécnicas más seguras y eficientes.</p> |                      |                                                                                                                     |