



**UNIVERSIDAD DE TALCA
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA CIVIL DE MINAS**

**SIMULACIÓN NUMÉRICA DEL EFECTO DE LA PRESENCIA DE GRIETAS SOBRE
EL COMPORTAMIENTO DEFORMACIONAL DE CONTORNOS DE TÚNELES TIPO
HERRADURA EXCAVADOS EN ROCA**

"MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO(A) CIVIL DE MINAS"

ARMANDO GUSTAVO ABARZA SAN MARTÍN

PROFESOR GUÍA

M. Sc. Mauricio Andrés Jara Ortiz

MIEMBROS DE LA COMISIÓN

M. Sc. Francisco Javier Rivas Saldaña

M. Sc. Carlos Alejandro Moraga Cruz

CURICÓ, Chile.

2020

CONSTANCIA

La Dirección del Sistema de Bibliotecas a través de su encargado Biblioteca Campus Curicó certifica que el autor del siguiente trabajo de titulación ha firmado su autorización para la reproducción en forma total o parcial e ilimitada del mismo.



Two circular official stamps and handwritten signatures in blue ink. The left stamp is from the 'DIRECCIÓN SISTEMA DE BIBLIOTECAS UNIVERSIDAD DE TALCA' and the right stamp is from the 'SISTEMA DE BIBLIOTECAS CAMPUS CURICO'.

Curicó, 2022

RESUMEN

En este proyecto se presenta un análisis deformacional y tensional en contornos de túneles con presencia de grietas, modelados en el software ANSYS para dos tipos de roca, granito fisurado y sin fisurar, y determina en qué medida la presencia de grietas influye en estos parámetros. La motivación de este estudio es aportar a la comprensión del comportamiento tenso-deformacional de un túnel, para de esta forma si existe presencia de falla o grietas se puedan identificar antes de que se transformen en un problema incontrolable.

El análisis se realizó mediante el uso de elementos finitos por medio de la simulación de un modelo tridimensional con las características de cada suelo utilizando el software ANSYS Workbench. Este análisis se efectuó en tres etapas; en una primera fase, se realizó una caracterización geológica de los suelos mediante información referencial y criterio de rotura Hoek and Brown; en la segunda etapa se definieron las características geométricas del túnel y se ingresaron al modelo numérico; finalmente, en la tercera etapa, los datos obtenidos del criterio de Hoek and Brown se ingresaron al software ANSYS y se realizó la modelación de la cual se obtuvieron los datos tenso-deformacionales a analizar.

Los resultados obtenidos de la modelación evidencian que, para ambos tipos de roca, las franjas de deformación del estado basal del suelo se alteran luego de simular la excavación del túnel, produciéndose un aumento que converge hacia el centro de este, algo similar ocurre con las fallas en donde se produce una especie de convergencia del aumento hacia la falla. No obstante, la grieta semicircular de 0,5 (m) empleada en la modelación, no alteró mayormente el estado de deformación del terreno.

En cuanto a la tensión equivalente, que corresponde un valor representativo del conjunto de tensiones presentes, en general tiende a tener un valor mayor en la parte más profunda del modelo, excavar el túnel, las tensiones se concentran en su contorno. Con la presencia de una falla, estas se concentran en el punto medio entre la falla y el contorno

del túnel, con la presencia de una grieta, las tensiones suelen concentrarse en su contorno.

Finalmente, la tensión de corte se comporta de manera similar a la tensión equivalente. No obstante, cabe destacar que esta mantiene una especie de simetría en las posiciones de sus valores mínimos y máximos alrededor del túnel.

Por lo dicho, la excavación de un túnel altera significativamente el estado tenso-deformacional del sistema basal del terreno, así como también lo altera la presencia de fallas. Así mismo, la presencia de grietas semicirculares de 0,5 (m) de diámetro alteran el estado tensional del terreno tanto de manera general, alterando las tensiones mínimas y máximas de su contraparte sin grietas, como alterando el espacio circundante a la ubicación de estas; no obstante, la mayoría de los resultados de deformaciones totales para los modelos de grietas, no presentan alteraciones al compararlos con sus contrapartes sin estas.

ABSTRACT

In this project, a deformation and stress analysis are realized for tunnel contours with the presence of cracks. This analysis was modeled in the ANSYS software for two types of soil, cracked and uncracked granite, and determines to what extent the presence of cracks influences these parameters. The inspiration for this study is to provide an understanding for the stress-deformation behavior in a tunnel so that if there is a fault or cracks, they can be identified before they become an uncontrollable problem.

The analysis was carried out using finite elements through the simulation of a three-dimensional model using the characteristics of each soil through the ANSYS Workbench software. This analysis was carried out in three phases. In a first phase, the necessary data for the geological characterization of the soils were obtained by using tables and formulas established by the Hoek and Brown criteria. In the second phase, the geometric characteristics of the tunnel were determined and entered in the software. In the third phase, the data obtained from the Hoek and Brown criteria were entered into the ANSYS software and the modeling was carried out from which the stress-strain data to be analyzed were obtained.

The results obtained from the modeling show that for both types of soil, the deformation bands of the basal state of the soil were altered after the entrance of the tunnel, producing an increase that converges towards the center of the tunnel, something similar occurs with the faults where they are produce a kind of convergence of the surge towards the fault. However, the 0.5 (m) semicircular crack used in the modeling did not significantly alter the state of deformation of the ground.

As for the equivalent stress, in general it tends to have a higher value in the deepest part of the model, when entering the tunnel, the stresses are concentrated in its contour. With

the presence of a fault, these are concentrated in the midpoint between the fault and the contour of the tunnel, with the presence of a crack, the stresses are usually concentrated in its contour.

Finally, the shear stress behaves similarly to the equivalent stress. However, it should be noted that this maintains a kind of symmetry in the positions of its minimum and maximum values around the tunnel.

Therefore, the excavation of a tunnel alters the stress-deformation state of the basal system of the ground, as well as the presence of faults. Likewise, the presence of semicircular cracks of 0.5 (m) diameter, alter the stress state of the ground in a general way, altering the minimum and maximum stresses of its counterpart without cracks, and altering the space surrounding the location of these. However, most of the results of total deformations for the crack models do not present alterations when are compared with their counterparts without these.

ÍNDICE

1. CAPITULO I. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Problematización:.....	1
1.2 Objetivos:	4
1.2.1 Objetivo General:	4
1.2.2 Objetivos Específicos:.....	4
1.3 Alcances:.....	4
2. CAPITULO II: MARCO TEÓRICO	6
2.1 Fundamentos de ingeniería en túneles:	6
2.1.1 Dinámica de avance de un túnel:.....	6
2.1.2 Efecto arco:.....	6
2.1.3 Deformaciones en un túnel:	7
2.1.4 Movimientos de suelo en un túnel:.....	9
2.1.5 Calculo de la curva o linea característica:	14
2.2. Estimación del sostenimiento según normativa:	15
2.3 Mecánica de fractura:.....	16
2.3.1 Mecánica de fractura lineal elástica:	16
2.4 Método de elementos finitos:	20
3. CAPITULO III. METODOLOGÍA	24
3.1 Diseño de la investigación:	24
3.2 Recolección de datos:	24
3.3 Análisis:.....	30
4. CAPITULO IV: RESULTADOS Y ANÁLISIS	34
1.1 Características geométricas del túnel:	34
Esquema frontal de túnel:	34
Esquema lateral de túnel:	35
4.2 Características geomecánicas del túnel:.....	36
Cálculo de la tensión vertical:	38
4.3 Calculo radio plástico y desplazamiento:	39
4.4 Resultados de software ANSYS:.....	45
5. CAPITULO V: CONCLUSIONES	124
RECOMENDACIONES:	125

6. REFERENCIAS126

Índice de figuras:

Figura 2.1: Navarro Carrasco S. Ortiz Gómez R. Ruiz Marín J. (s.f.) Definición grafica del efecto arco.....	7
Figura 2.2: Sagaseta, C. (1998) Principal components of deformation of the tunnel wall.	9
Figura 2.3: Hoek E. (1999) Assumed support pressure p_i at different positions relative to the advancing tunnel face.	15
Figura 2.4: Broek, D. (1982) The Griffith criterion for fixed grips. (a. Cracked plate with fixed ends, b. Elastic energy).	17
Figura 2.5: Mallado tetraédrico en ANSYS Workbench (elaboración propia).....	21
Figura 3.1: Perri G (2012) Tabla para estimar la resistencia a la compresión uniaxial según Brown (1981).	25
Figura 3.2: Perri G (2012) Tabla para estimar los valores de la constante “mi” de la roca.	26
Figura 3.3: Perri G (2012) Tabla para estimar el índice GSI según Hoek.	27
Figura 3.4: Perri G (2012) Tabla para estimar el índice GSI según el tipo de roca.	28
Figura 3.5: Ingreso de materiales en ANSYS (Elaboración propia ANSYS Workbench 2019 R2).....	30
Figura 3.6: Modelo ejemplificado de túnel dividido en secciones en ANSYS. (Elaboración propia ANSYS Workbench 2019 R2).	31
Figura 3.7: Frente del túnel en submodelo.....	31
Figura 3.8: Sección del túnel en submodelo.....	31
Figura 3.9: Mallado de modelo ejemplificado en ANSYS (Elaboración propia ANSYS Workbench 2019 R2).	32
Figura 3.10: Solución entregada por ANSYS de los valores de deformación total del túnel (Elaboración propia ANSYS Workbench 2019 R2).....	33
Figura 4.1: Representación frontal del túnel (elaboración propia).	34
Figura 4.2: Representación lateral del túnel (elaboración propia).	35
Figura 4.3: Presión interna versus desplazamiento para granito fisurado (elaboración propia).	40
Figura 4.4: Radio plástico versus desplazamiento para profundidades de 50 a 600 (m) para granito fisurado (elaboración propia).....	40
Figura 4.5: Radio plástico y presión interna versus desplazamiento para profundidades de 50 a 400 (m) para granito fisurado (elaboración propia).	41
Figura 4.6: Radio plástico y presión interna versus desplazamiento para profundidades de 450 a 500 (m) para granito fisurado (elaboración propia).....	42
Figura 4.7: Presión interna versus desplazamiento para granito (elaboración propia)...	42
Figura 4.8: Radio plástico versus desplazamiento para profundidades de 50 a 600 (m) para granito (elaboración propia).	43

Figura 4.9: Radio plástico y presión interna versus desplazamiento para profundidades de 50 a 100m para granito (elaboración propia).....	43
Figura 4.10: Radio plástico y presión interna versus desplazamiento para profundidades de 150 a 500m para granito (elaboración propia).....	44
Figura 4.11: Vista frontal de túnel (tipo de roca: Granito) (elaboración propia).	45
Figura 4.12: Vista lateral de túnel (tipo de roca: Granito) (elaboración propia).	46
Figura 4.13: Vista frontal de túnel (tipo de roca: Granito fisurado) (elaboración propia).46	
Figura 4.14: Vista lateral de túnel (tipo de roca: Granito fisurado) (elaboración propia).46	
Figura 4.15: Modelo de túnel (tipo de roca: granito) (elaboración propia).	47
Figura 4.16: Modelo de túnel (tipo de roca: granito fisurado) (elaboración propia).	47
Figura 4.17: Modelado en ANSYS (granito fisurado sin túnel y sin fallas).	48
Figura 4.18: Modelado en ANSYS (granito fisurado con túnel y sin fallas).	49
Figura 4.19: Modelado en ANSYS (granito fisurado falla 45° perpendicular al eje del túnel (en contra buzamiento)).....	49
Figura 4.20: Modelado en ANSYS (granito fisurado falla 45° perpendicular al eje del túnel (a favor del buzamiento)).....	49
Figura 4.21: Modelado en ANSYS (granito fisurado falla inferior de 45° paralela al eje del túnel).....	50
Figura 4.22: Granito fisurado sin túnel y sin fallas modelado en ANSYS.	50
Figura 4.23: Granito fisurado con túnel y sin fallas modelado en ANSYS.	50
Figura 4.24: Granito fisurado falla 45° perpendicular al eje del túnel (en contra buzamiento) modelado en ANSYS.....	51
Figura 4.25: Granito fisurado falla 45° perpendicular al eje del túnel (a favor del buzamiento) modelado en ANSYS.....	51
Figura 4.26: Granito fisurado falla inferior de 45° paralela al eje del túnel modelado en ANSYS.	51
Figura 4.27: Deformación total para granito fisurado de los modelos sin grietas.	52
Figura 4.28: Modelado en ANSYS de tensión equivalente (granito fisurado sin túnel y sin fallas).	54
Figura 4.29: Modelado en ANSYS de tensión equivalente (granito fisurado con túnel y sin fallas).	54
Figura 4.30: Modelado en ANSYS de tensión equivalente (granito fisurado falla 45° perpendicular al eje del túnel (en contra buzamiento)).....	54
Figura 4.31: Modelado en ANSYS de tensión equivalente (granito fisurado falla 45° perpendicular al eje del túnel (a favor del buzamiento)).....	55
Figura 4.32: Modelado en ANSYS de tensión equivalente (granito fisurado falla inferior de 45° paralela al eje del túnel).....	55
Figura 4.33: Modelado en ANSYS de tensión equivalente. Granito fisurado sin túnel y sin fallas.	55
Figura 4.34: Modelado en ANSYS de tensión equivalente. Granito fisurado con túnel y sin fallas.	56
Figura 4.35: Modelado en ANSYS de tensión equivalente. Granito fisurado falla 45° perpendicular al eje del túnel (en contra buzamiento).....	56

Figura 4.36: Modelado en ANSYS de tensión equivalente. Granito fisurado falla 45° perpendicular al eje del túnel (a favor del buzamiento).	56
Figura 4.37: Modelado en ANSYS de tensión equivalente. Granito fisurado falla inferior de 45° paralela al eje del túnel.	57
Figura 4.38: Tensión equivalente para granito fisurado de los modelos sin grietas.	57
Figura 4.39: Tensión de corte para granito fisurado sin túnel y sin fallas modelado en ANSYS.	59
Figura 4.40: Tensión de corte para granito fisurado con túnel y sin fallas modelado en ANSYS.	59
Figura 4.41: Tensión de corte para granito fisurado falla 45° perpendicular al eje del túnel (en contra buzamiento) modelado en ANSYS.	60
Figura 4.42: Tensión de corte para granito fisurado falla 45° perpendicular al eje del túnel (a favor del buzamiento) modelado en ANSYS.	60
Figura 4.43: Tensión de corte para granito fisurado falla inferior de 45° paralela al eje del túnel modelado en ANSYS.	60
Figura 4.44: Tensión de corte en ANSYS para granito fisurado sin túnel y sin fallas.	61
Figura 4.45: Tensión de corte en ANSYS para granito fisurado con túnel y sin fallas.	61
Figura 4.46: Tensión de corte en ANSYS para granito fisurado falla 45° perpendicular al eje del túnel (en contra buzamiento).	61
Figura 4.47: Tensión de corte en ANSYS para granito fisurado falla 45° perpendicular al eje del túnel (a favor del buzamiento).	62
Figura 4.48: Tensión de corte en ANSYS para granito fisurado falla inferior de 45° paralela al eje del túnel.	62
Figura 4.49: Tensión de corte para granito fisurado de modelos sin grietas.	62
Figura 4.50: Modelado en ANSYS (granito sin fisurar; sin túnel y sin fallas).	65
Figura 4.51: Modelado en ANSYS (granito sin fisurar; con túnel y sin fallas).	65
Figura 4.52: Modelado en ANSYS (granito sin fisurar; falla 45° perpendicular al eje del túnel (en contra buzamiento)).	66
Figura 4.53: Modelado en ANSYS (granito sin fisurar; falla 45° perpendicular al eje del túnel (a favor del buzamiento)).	66
Figura 4.54: Modelado en ANSYS (granito sin fisurar; falla inferior de 45° paralela al eje del túnel).	66
Figura 4.55: Granito sin fisurar; sin túnel y sin fallas modelado en ANSYS.	67
Figura 4.56: Granito sin fisurar; con túnel y sin fallas modelado en ANSYS.	67
Figura 4.57: Granito sin fisurar falla 45° perpendicular al eje del túnel (en contra buzamiento) modelado en ANSYS.	67
Figura 4.58: Granito sin fisurar falla 45° perpendicular al eje del túnel (a favor del buzamiento) modelado en ANSYS.	68
Figura 4.59: Granito sin fisurar falla inferior de 45° paralela al eje del túnel modelado en ANSYS.	68
Figura 4.60: Deformación total para granito sin fisurar de modelos sin grietas.	68
Figura 4.61: Tensión Equivalente en ANSYS para granito sin fisurar de modelos sin grietas (granito sin fisurar sin túnel y sin fallas).	70

Figura 4.62: Tensión Equivalente en ANSYS para granito sin fisurar de modelos sin grietas (granito sin fisurar con túnel y sin fallas).....	70
Figura 4.63: Tensión Equivalente en ANSYS para granito sin fisurar de modelos sin grietas (granito sin fisurar falla 45° perpendicular al eje del túnel (en contra buzamiento)).	71
Figura 4.64: Tensión Equivalente en ANSYS para granito sin fisurar de modelos sin grietas (granito sin fisurar falla 45° perpendicular al eje del túnel (a favor del buzamiento)).....	71
Figura 4.65: Tensión Equivalente en ANSYS para granito sin fisurar de modelos sin grietas (granito sin fisurar falla inferior de 45° paralela al eje del túnel).	71
Figura 4.66: Tensión Equivalente en ANSYS para granito sin fisurar sin túnel y sin fallas.	72
Figura 4.67: Tensión Equivalente en ANSYS para granito sin fisurar con túnel y sin fallas.	72
Figura 4.68: Tensión Equivalente en ANSYS para granito sin fisurar falla 45° perpendicular al eje del túnel (en contra buzamiento).	72
Figura 4.69: Tensión Equivalente en ANSYS para granito sin fisurar falla 45° perpendicular al eje del túnel (a favor del buzamiento).	73
Figura 4.70: Tensión Equivalente en ANSYS para granito sin fisurar falla inferior de 45° paralela al eje del túnel.	73
Figura 4.71: Tensión Equivalente para granito sin fisurar de modelos sin grietas.....	73
Figura 4.72: Tensión de corte en ANSYS (granito sin fisurar sin túnel y sin fallas).....	75
Figura 4.73: Tensión de corte en ANSYS (granito sin fisurar con túnel y sin fallas).....	75
Figura 4.74: Tensión de corte en ANSYS (granito sin fisurar falla 45° perpendicular al eje del túnel (en contra buzamiento)).	76
Figura 4.75: Tensión de corte en ANSYS (granito sin fisurar falla 45° perpendicular al eje del túnel (a favor del buzamiento)).	76
Figura 4.76: Tensión de corte en ANSYS (granito sin fisurar falla inferior de 45° paralela al eje del túnel).	76
Figura 4.77: Tensión de corte en ANSYS para granito sin fisurar sin túnel y sin fallas. .	77
Figura 4.78: Tensión de corte en ANSYS para granito sin fisurar con túnel y sin fallas.	77
Figura 4.79: Tensión de corte en ANSYS para granito sin fisurar falla 45° perpendicular al eje del túnel (en contra buzamiento).	77
Figura 4.80: Tensión de corte en ANSYS para granito sin fisurar falla 45° perpendicular al eje del túnel (a favor del buzamiento).....	78
Figura 4.81: Tensión de corte en ANSYS para granito sin fisurar falla inferior de 45° paralela al eje del túnel.	78
Figura 4.82: Tensión de corte para granito sin fisurar de modelo sin grietas.	78
Figura 4.83: Modelo general sin grietas granito fisurado.....	82
Figura 4.84: Modelo grieta inferior derecha granito fisurado.	82
Figura 4.85: Modelo general sin grietas granito fisurado.....	83
Figura 4.86: Modelo grieta superior derecha granito fisurado.	83
Figura 4.87: Modelo general sin grietas granito fisurado.....	84

Figura 4.88: Modelo grieta inferior derecha granito fisurado.	84
Figura 4.89: Modelo general sin grietas granito sin fisurar.	85
Figura 4.90: Modelo grieta inferior derecha granito sin fisurar.	85
Figura 4.91: Modelo general sin grietas granito sin fisurar.	86
Figura 4.92: Modelo grieta inferior derecha granito sin fisurar.	86
Figura 4.93: Modelo general sin grietas granito sin fisurar.	87
Figura 4.94: Modelo grieta inferior derecha granito sin fisurar.	87
Figura 4.95: Modelo general derecho (500m; 300m y 50m respectivamente).	88
Figura 4.96: Modelo grieta inferior derecha (500m; 300m y 50m respectivamente).....	89
Figura 4.97: Modelo grieta superior derecha (500m; 300m y 50m respectivamente)....	89
Figura 4.98: Modelo general inferior (500m; 300m y 50m respectivamente).	89
Figura 4.99: Modelo inferior centro (500m; 300m y 50m respectivamente).	89
Figura 4.100: Modelo general superior (500m; 300m y 50m respectivamente).	90
Figura 4.101: Modelo grieta clave (500m; 300m y 50m respectivamente).	90
Figura 4.102: Modelo general izquierdo (500m; 300m y 50m respectivamente).....	90
Figura 4.103: Modelo grieta inferior izquierda (500m; 300m y 50m respectivamente). ...	90
Figura 4.104: Modelo grieta superior izquierda (500m; 300m y 50m respectivamente). 91	
Figura 4.105: Modelo general derecho (500m; 300m y 50m respectivamente).	92
Figura 4.106: Modelo grieta inferior derecha (500m; 300m y 50m respectivamente)....	92
Figura 4.107: Modelo grieta superior derecha (500m; 300m y 50m respectivamente)...	92
Figura 4.108: Modelo general inferior (500m; 300m y 50m respectivamente).	92
Figura 4.109: Modelo grieta inferior centro (500m; 300m y 50m respectivamente).....	93
Figura 4.110: Modelo general superior (500m; 300m y 50m respectivamente).	93
Figura 4.111: Modelo grieta clave (500m; 300m y 50m respectivamente).	93
Figura 4.112: Modelo general izquierdo (500m; 300m y 50m respectivamente).....	93
Figura 4.113: Modelo grieta inferior izquierda (500m; 300m y 50m respectivamente). ...	94
Figura 4.114: Modelo grieta superior izquierda (500m; 300m y 50m respectivamente). 94	
Figura 4.115: Modelo general derecho (500m; 300m y 50m respectivamente).	95
Figura 4.116: Modelo grieta inferior derecha (500m; 300m y 50m respectivamente)....	95
Figura 4.117: Modelo grieta superior derecha (500m; 300m y 50m respectivamente)...	95
Figura 4.118: Modelo general inferior (500m; 300m y 50m respectivamente).	95
Figura 4.119: Modelo grieta inferior centro (500m; 300m y 50m respectivamente).....	96
Figura 4.120: Modelo general superior (500m; 300m y 50m respectivamente).	96
Figura 4.121: Modelo grieta clave (500m; 300m y 50m respectivamente).	96
Figura 4.122: Modelo general izquierda (500m; 300m y 50m respectivamente).....	96
Figura 4.123: Modelo grieta inferior izquierda (500m; 300m y 50m respectivamente). ...	97
Figura 4.124: Modelo grieta superior izquierda (500m; 300m y 50m respectivamente). 97	
Figura 4.125: Tensión equivalente en modelos con grietas de mayor relevancia para granito fisurado.....	97
Figura 4.126: Modelo general derecho (500m; 300m y 50m respectivamente).	98
Figura 4.127: Modelo grieta inferior derecha (500m; 300m y 50m respectivamente)....	99
Figura 4.128: Modelo grieta superior derecha (500m; 300m y 50m respectivamente)...	99
Figura 4.129: Modelo general inferior (500m; 300m y 50m respectivamente).	99

Figura 4.130: Modelo grieta inferior centro (500m; 300m y 50m respectivamente).....	99
Figura 4.131: Modelo general superior (500m; 300m y 50m respectivamente).	100
Figura 4.132: Modelo grieta clave (500m; 300m y 50m respectivamente).	100
Figura 4.133: Modelo general izquierda (500m; 300m y 50m respectivamente).....	100
Figura 4.134: Modelo grieta inferior izquierda (500m; 300m y 50m respectivamente).	100
Figura 4.135: Modelo grieta superior izquierda (500m; 300m y 50m respectivamente).	101
Figura 4.136: Modelo general derecho (500m; 300m y 50m respectivamente).	101
Figura 4.137: Modelo grieta inferior derecha (500m; 300m y 50m respectivamente)...	101
Figura 4.138: Modelo grieta superior derecha (500m; 300m y 50m respectivamente).	101
Figura 4.139: Modelo general inferior (500m; 300m y 50m respectivamente).	102
Figura 4.140: Modelo grieta inferior centro (500m; 300m y 50m respectivamente).....	102
Figura 4.141: Modelo general superior (500m; 300m y 50m respectivamente).	102
Figura 4.142: Modelo grieta clave (500m; 300m y 50m respectivamente).	102
Figura 4.143: Modelo general izquierdo (500m; 300m y 50m respectivamente).	103
Figura 4.144: Modelo grieta inferior izquierda (500m; 300m y 50m respectivamente).	103
Figura 4.145: Modelo grieta superior izquierda (500m; 300m y 50m respectivamente).	103
Figura 4.146: Modelo general derecho (500m; 300m y 50m respectivamente).	103
Figura 4.147: Modelo grieta inferior derecha (500m; 300m y 50m respectivamente)...	104
Figura 4.148: Modelo grieta superior derecha (500m; 300m y 50m respectivamente).	104
Figura 4.149: Modelo general inferior (500m; 300m y 50m respectivamente).	104
Figura 4.150: Modelo grieta inferior centro (500m; 300m y 50m respectivamente).....	104
Figura 4.151: Modelo general superior (500m; 300m y 50m respectivamente).	105
Figura 4.152: Modelo grieta clave (500m; 300m y 50m respectivamente).	105
Figura 4.153: Modelo general izquierda (500m; 300m y 50m respectivamente).	105
Figura 4.154: Modelo grieta inferior izquierda (500m; 300m y 50m respectivamente).	105
Figura 4.155: Modelo grieta superior izquierda (500m; 300m y 50m respectivamente).	106
Figura 4.156: Tensión equivalente en modelos con grietas de mayor relevancia para granito sin fisurar.	106
Figura 4.157: Modelo general derecho (500m; 300m y 50m respectivamente).	107
Figura 4.158: Modelo grieta inferior derecha (500m; 300m y 50m respectivamente)...	108
Figura 4.159: Modelo grieta superior derecha (500m; 300m y 50m respectivamente).	108
Figura 4.160: Modelo general inferior (500m; 300m y 50m respectivamente).	108
Figura 4.161: Modelo grieta inferior centro (500m; 300m y 50m respectivamente).....	108
Figura 4.162: Modelo general superior (500m; 300m y 50m respectivamente).	109
Figura 4.163: Modelo grieta clave (500m; 300m y 50m respectivamente).	109
Figura 4.164: Modelo general izquierdo (500m; 300m y 50m respectivamente).	109
Figura 4.165: Modelo grieta inferior izquierda (500m; 300m y 50m respectivamente).	109
Figura 4.166: Modelo grieta superior izquierda (500m; 300m y 50m respectivamente).	110
Figura 4.167: Modelo general derecho (500m; 300m y 50m respectivamente).	110

Figura 4.168: Modelo grieta inferior derecha (500m; 300m y 50m respectivamente)...	110
Figura 4.169: Modelo grieta superior derecha (500m; 300m y 50m respectivamente).	110
Figura 4.170: Modelo general inferior (500m; 300m y 50m respectivamente).	111
Figura 4.171: Modelo grieta inferior centro (500m; 300m y 50m respectivamente).....	111
Figura 4.172: Modelo general superior (500m; 300m y 50m respectivamente).	111
Figura 4.173: Modelo grieta clave (500m; 300m y 50m respectivamente).	111
Figura 4.174: Modelo general izquierdo (500m; 300m y 50m respectivamente).	112
Figura 4.175: Modelo grieta inferior izquierda (500m; 300m y 50m respectivamente).	112
Figura 4.176: Modelo grieta superior izquierda (500m; 300m y 50m respectivamente).	
.....	112
Figura 4.177: Modelo general derecho (500m; 300m y 50m respectivamente).	112
Figura 4.178: Modelo grieta inferior derecha (500m; 300m y 50m respectivamente)...	113
Figura 4.179: Modelo grieta superior derecha (500m; 300m y 50m respectivamente).	113
Figura 4.180: Modelo general inferior (500m; 300m y 50m respectivamente).	113
Figura 4.181: Modelo grieta inferior centro (500m; 300m y 50m respectivamente).....	113
Figura 4.182: Modelo general superior (500m; 300m y 50m respectivamente).	114
Figura 4.183: Modelo grieta clave (500m; 300m y 50m respectivamente).	114
Figura 4.184: Modelo general izquierdo (500m; 300m y 50m respectivamente).	114
Figura 4.185: Modelo grieta inferior izquierda (500m; 300m y 50m respectivamente).	114
Figura 4.186: Modelo grieta superior izquierda (500m; 300m y 50m respectivamente).	
.....	115
Figura 4.187: Modelo general derecho (500m; 300m y 50m respectivamente).	115
Figura 4.188: Modelo grieta inferior derecha (500m; 300m y 50m respectivamente)...	115
Figura 4.189: Modelo grieta superior derecha (500m; 300m y 50m respectivamente).	115
Figura 4.190: Modelo general inferior (500m; 300m y 50m respectivamente).	116
Figura 4.191: Modelo grieta inferior centro (500m; 300m y 50m respectivamente).....	116
Figura 4.192: Modelo general superior (500m; 300m y 50m respectivamente).	116
Figura 4.193: Modelo grieta clave (500m; 300m y 50m respectivamente).	116
Figura 4.194: Modelo general izquierdo (500m; 300m y 50m respectivamente).	117
Figura 4.195: Modelo grieta inferior izquierda (500m; 300m y 50m respectivamente).	117
Figura 4.196: Modelo grieta superior izquierda (500m; 300m y 50m respectivamente).	
.....	117
Figura 4.197: Modelo general derecho (500m; 300m y 50m respectivamente).	117
Figura 4.198: Modelo grieta inferior derecha (500m; 300m y 50m respectivamente)...	118
Figura 4.199: Modelo grieta superior derecha (500m; 300m y 50m respectivamente).	118
Figura 4.200: Modelo general inferior (500m; 300m y 50m respectivamente).	118
Figura 4.201: Modelo grieta inferior centro (500m; 300m y 50m respectivamente).....	118
Figura 4.202: Modelo general superior (500m; 300m y 50m respectivamente).	119
Figura 4.203: Modelo grieta clave (500m; 300m y 50m respectivamente).	119
Figura 4.204: Modelo general izquierdo (500m; 300m y 50m respectivamente).	119
Figura 4.205: Modelo grieta inferior izquierda (500m; 300m y 50m respectivamente).	119
Figura 4.206: Modelo grieta superior izquierda (500m; 300m y 50m respectivamente).	
.....	120

Figura 4.207: Modelo general derecho (500m; 300m y 50m respectivamente).	120
Figura 4.208: Modelo grieta inferior derecha (500m; 300m y 50m respectivamente)...	120
Figura 4.209: Modelo grieta superior derecha (500m; 300m y 50m respectivamente).	120
Figura 4.210: Modelo general inferior (500m; 300m y 50m respectivamente).	121
Figura 4.211: Modelo grieta inferior centro (500m; 300m y 50m respectivamente).....	121
Figura 4.212: Modelo general superior (500m; 300m y 50m respectivamente).	121
Figura 4.213: Modelo grieta clave (500m; 300m y 50m respectivamente).	121
Figura 4.214: Modelo general izquierdo (500m; 300m y 50m respectivamente).....	121
Figura 4.215: Modelo grieta inferior izquierda (500m; 300m y 50m respectivamente).	122
Figura 4.216: Modelo grieta superior izquierda (500m; 300m y 50m respectivamente).	122
Figura 4.217: Tensión de corte en modelos con grietas de mayor relevancia para granito fisurado.	122
Figura 4.218: Tensión de corte en modelos con grietas de mayor relevancia para granito sin fisurar.....	123

ÍNDICE DE TABLAS:

Tabla 4.1: Características geotécnicas (Roca: granito fisurado):	36
Tabla 4.2: Características geotécnicas (Roca: granito sin fisurar):	36
Tabla 4.3: Parámetros para caracterización geomecánica del túnel en granito fisurado:	37
Tabla 4.4: Parámetros para caracterización geomecánica del túnel en granito sin fisurar:	37
Tabla 4.5: Tensión vertical para granito fracturado para cada sección del túnel:.....	38
Tabla 4.6: Tensión vertical para granito sin fisurar para cada sección del túnel:	39
Tabla 4.7: Valores máximos de los parámetros evaluados para granito fisurado:	64
Tabla 4.8: Valores máximos de los parámetros evaluados para granito sin fisurar:.....	80

1. CAPITULO I. INTRODUCCIÓN

Hay un punto en el que las deformaciones al interior de un túnel generarán inestabilidad en este, lo que a su vez puede generar tanto problemas de seguridad como pérdidas monetarias por interrupción del proceso productivo. El presente capítulo se centrará en presentar los objetivos generales y específicos del proyecto, así como mostrar la problemática a la que apunta.

1.1 Problematización:

El comportamiento del terreno se diferencia bastante de el de los materiales típicos utilizados de construcción debido a la heterogeneidad del primero. Por esto mismo es complejo predecir con certeza los problemas que se afrontaran en la construcción de un túnel, no obstante, conociendo el terreno, ya sea la presencia de fallas u otras estructuras geológicas, así como las características de este, es posible alcanzar un nivel de certeza aceptable.

El presente proyecto está enmarcado dentro del tema de túneles, abarcando más específicamente el estado de las tensiones y deformaciones frente a la presencia de estructuras geológicas como fallas o grietas. Atkins & Escudier (2013) definen grieta como un leve defecto, ubicado en una estructura u objeto, que posee características de tipo fisura. Este defecto se caracterizará por una pérdida de continuidad del material que conforma la estructura, lo que causa una reducción en cuanto a su resistencia. Teniendo como base esta definición ya se puede vislumbrar que los problemas causados por las grietas en una estructura estarán orientados a la inestabilidad que puede provocar la pérdida cualitativa de su resistencia.

Este proyecto centrará su atención en los efectos tensionales y deformacionales producto de la presencia de grietas en contornos de secciones de túneles utilizando a demás distintos tipos de fallas para comparar su comportamiento. Según la Guía Metodológica para Evaluación de la Estabilidad Física de Instalaciones Mineras Remanentes (2018), la

estabilidad física en una mina está condicionada por una serie de sucesos relacionados con la respuesta del macizo rocoso ante la detonación de uno o más mecanismos causantes de inestabilidad, estos sucesos se denominan consecuencias geomecánicas. Entre las consecuencias más recurrentes se identifican:

1. Caída de bloques y/o cuñas: Producto de la union de varias discontinuidades. Para que se genere deslizamiento, la esquina de la cuña debe ubicarse en dirección hacia la galería o la cara libre (Laboratorio Oficial J.M. Madariaga, 2015 (como se citó en la Guía Metodológica para Evaluación de la Estabilidad Física de Instalaciones Mineras Remanentes, 2018)).
2. Falla de estructura geológica relevante: Falla de estructuras geológicas que sean consideradas importantes, ya sean fallas geológicas, planos de estratificación o alguna discontinuidad importante.
3. Sobreexcavaciones: Producido incluso sin previo aviso, cuando un macizo rocoso contiene un alto grado de fracturación en su estructura (Laboratorio Oficial J.M. Madariaga, 2015 (como se citó en la Guía Metodológica para Evaluación de la Estabilidad Física de Instalaciones Mineras Remanentes, 2018)).
4. Altos rangos de deformación: Entendiéndose deformación como una alteración en la forma de un cuerpo producto de los desplazamientos de la roca al soportar carga. En general, producto de las discontinuidades, los macizos rocosos prácticamente son incapaces de generar y resistir tracción, si se somete a tracción una sección, esta se estirará y distribuirá las tensiones en su entorno. Esto según Ramírez y Alejano, 2004 (como se citó en la Guía Metodológica para Evaluación de la Estabilidad Física de Instalaciones Mineras Remanentes, 2018) podría originar inestabilidad.

5. Roturas complejas: Producto de la conjunción de dos factores, las juntas (discontinuidades) preexistentes y el macizo rocoso.

6. Roturas circulares: Roturas de trayectoria circular en macizos de mala calidad.

7. Daños en macizos de comportamiento frágil: Roturas frágiles, de carácter explosivo producto de la propagación de grietas mediante microfisuras, alineado con la trayectoria de los esfuerzos principales mayores.

8. Asentamiento-subsidencia-colapso: Hundimientos con distintos índices de descenso, pudiendo provocar grietas o roturas violentas.

Como se puede observar la mayoría de los puntos, sino todos, están relacionados con la presencia de grietas o fallas, en otras palabras, estos elementos tienen una amplia influencia en las consecuencias geomecánicas previamente descritas y por lo tanto en la estabilidad física en una mina, más específicamente en nuestro caso en un túnel minero. Por esto, el estudio de este tema es de vital importancia, considerando que, en el reporte de accidentabilidad minera entregado por el Sernageomin, los accidentes de la categoría golpeado por roca (en el que se incluyen accidentes por caída de roca, como derrumbe o colapso) son la mayoría para los años entre 2015 a 2019 y si se toma en cuenta solo el año 2019 el 60% del total de accidentes corresponde a esta categoría.

Este proyecto desea contribuir al estudio del comportamiento tenso-deformacional de un túnel debido a la presencia de grietas, queriendo identificar síntomas que nos permitan responder de manera rápida a un problema que tenga a estas como su causa y así quizás aportar a la reducción de este índice de accidentes.

1.2 Objetivos:

1.2.1 Objetivo General:

Estudiar el efecto debido a la presencia de grietas en el comportamiento deformacional y tensional de contornos de túneles tipo herradura utilizando un modelamiento en el software ANSYS.

1.2.2 Objetivos Específicos:

1. Establecer la alteración del estado basal de tensiones y deformaciones en un terreno debido a la creación de un túnel tipo herradura.
2. Establecer la alteración del estado de tensiones y deformaciones de un túnel tipo herradura debido a la presencia de fallas.
3. Estimar deformaciones y tensiones para sistemas que presentan agrietamiento preexistente.
4. Evaluar la influencia de la presencia de grietas mediante la comparación de resultados de tensión y deformación.

1.3 Alcances:

El alcance de este proyecto es realizar un análisis deformacional y tensional en contornos de túneles con presencia de grietas, modelados en el software ANSYS para dos tipos de suelo, granito fisurado y sin fisurar, y determina en qué medida la presencia de grietas influye en estos parámetros.

Los datos necesarios para el modelamiento se obtuvieron de la caracterización geológica mediante el uso de tablas y formulas establecidas por el criterio de Hoek and Brown, las características geométricas del túnel se modelaron mediante el uso del software con la herramienta Design Modeler.

El análisis se realizó mediante el uso de elementos finitos por medio de la simulación de un modelo tridimensional con las características de cada suelo utilizando el software ANSYS Workbench.

2. CAPITULO II: MARCO TEÓRICO

2.1 Fundamentos de ingeniería en túneles:

2.1.1 Dinámica de avance de un túnel:

Suele ser mucho más difícil la realización de una obra subterránea que una obra superficial debido a que en la primera se perturba “planificadamente” un equilibrio preexistente del cual solo se conoce aproximadamente sus características de diseño mientras que en la otra se tratan de ajustar gradualmente y a la medida que satisfagan las cargas previsibles (Navarro Carrasco, Ortiz Gómez, Ruiz Marín, s.f.).

Es por esto por lo que cualquier información que haga referencia al comportamiento del túnel en el terreno en cuestión es de vital importancia para lograr una construcción segura y viable.

2.1.2 Efecto arco:

Según Terzaghi (1943) (como se citó en Craig, 2004), cuando la presión existente en una masa de suelo se transfiere de una parte dúctil a las partes no dúctiles adyacentes se denomina efecto arco.

Se logra un efecto arco cuando el flujo tensional de un macizo rocoso se desvía por la presencia de una cavidad y se canaliza en su proximidad logrando una zona de aumento de tensiones en el contorno de esta. Si el efecto arco se logra se asegura la estabilidad y perdurabilidad de la cavidad. Así mismo este efecto puede ser logrado de manera natural por el suelo o macizo rocoso o bien interviniéndolo para estabilizarlo con algún

tipo de fortificación. (Navarro Carrasco et al. s.f.). En la siguiente imagen se muestra gráficamente el efecto arco en un túnel:

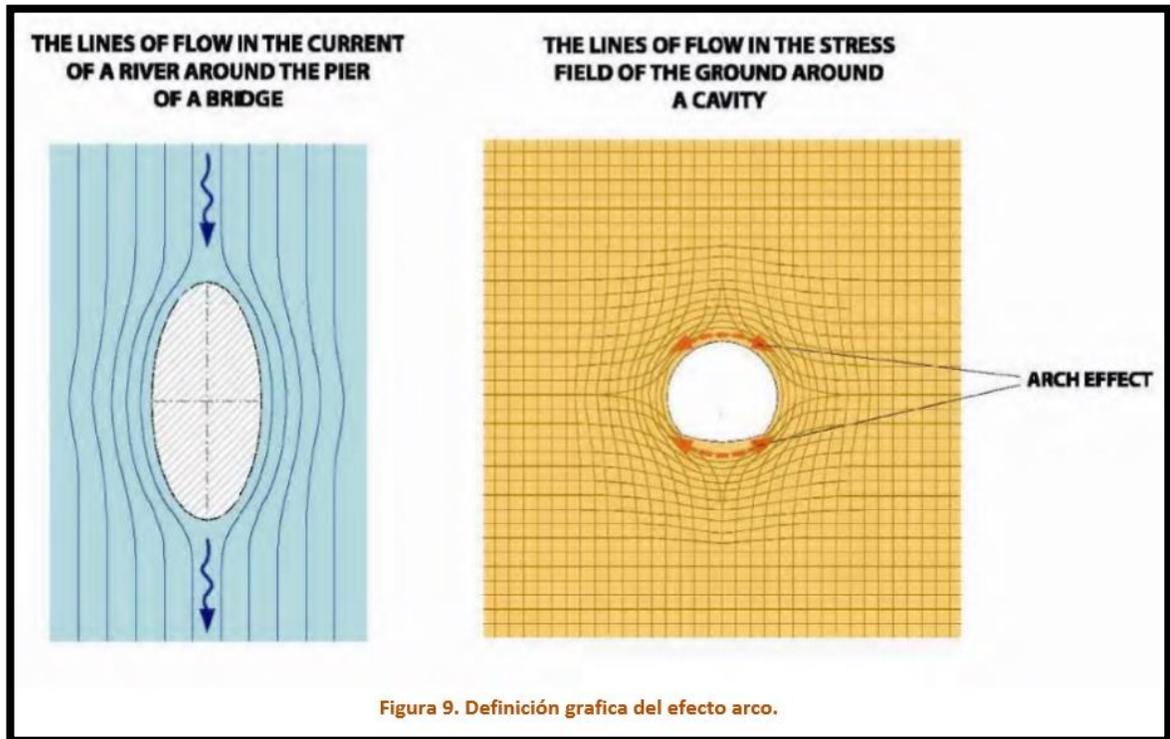


Figura 2.1: Navarro Carrasco S. Ortiz Gómez R. Ruiz Marín J. (s.f.) Definición grafica del efecto arco.

2.1.3 Deformaciones en un túnel:

Sagaseta (1998) supone un caso en el cual se tiene un túnel circular de radio a con una profundidad h , tensiones iniciales desiguales y un gradiente de tensión que posea profundidad, los desplazamientos producidos en estas condiciones en los contornos del túnel no presentarán uniformidad y poseerán componentes radiales y tangenciales denotados como $(u(\theta), v(\theta))$. La deformación total producto de este caso puede considerarse como la suma de varias otras deformaciones.

Para complementar lo anteriormente dicho, Verruijt & Booker (1996) concluyen que, para un suelo elástico, se puede encontrar una aproximación a las soluciones analíticas para

dos tipos de deformaciones, un desplazamiento radial uniforme como causa de la pérdida de suelo y una ovalización del contorno del túnel.

Según Sagaseta (1998) la deformación total puede presentar:

- Contracción radial pura (u_0), lo que puede referirse a una pérdida relativa de suelo o bien a una deformación radial promedio ($\varepsilon = u_0/a$).
- Ovalización: Entendiéndose como una distorsión del túnel sin incurrir en una pérdida de sección. Presenta tanto componentes radiales (u') como tangenciales (v'), predominando el primero. Si es reducción vertical el valor de la ovalización es generalmente positivo y está dada por:

$$\delta = \frac{w'_{max}}{a} \quad (2.1)$$

- El tercer componente de la deformación corresponde a un movimiento descendente (s_z) sin que se presente alteración. Se denotará como su valor dividido por el radio del túnel (s_z/a).
- Agregado a esto, tanto la ovalización como las condiciones de asentamiento, pueden ser definidas por los valores que toman en relación con la deformación radial promedio, lo que estará dado por:

$$\rho = \frac{\delta}{\varepsilon} = \frac{w'_{max}}{u_0} \quad (2.2); \quad \eta = \frac{s_z/a}{\varepsilon} = \frac{s_z}{u_0} \quad (2.3)$$

Se puede vislumbrar lo anteriormente dicho de mejor manera en la siguiente imagen:

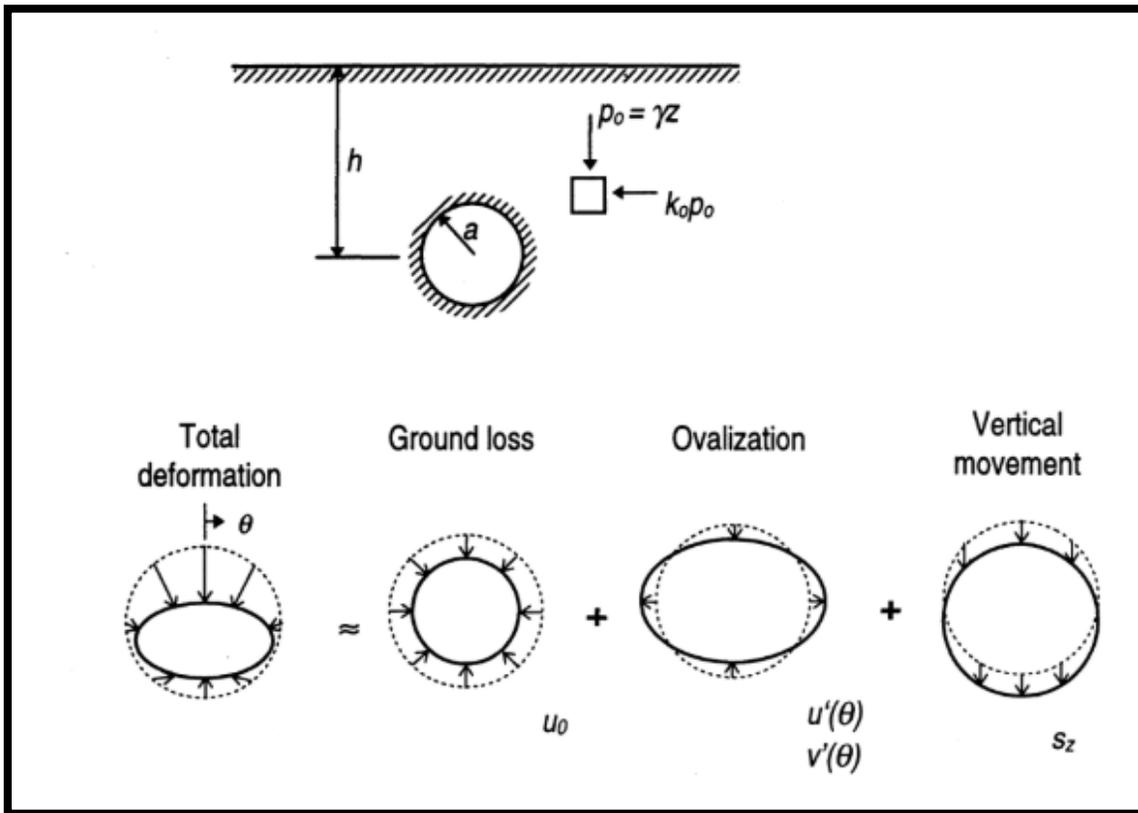


Figura 2.2: Sagaseta, C. (1998) Principal components of deformation of the tunnel wall.

2.1.4 Movimientos de suelo en un túnel:

Según lo publicado por New y Leca (2007), la relación entre profundidad del túnel y asentamientos superficiales es compleja, ya que depende de un gran número de factores entre los cuales se encuentra: propiedades del suelo, geometría del túnel y profundidad, métodos de excavación y el manejo de los trabajos de excavación. No obstante, el tipo de túnel que tendrá un mayor impacto en las estructuras de la superficie será uno poco profundo.

González & Sagaseta (2001) identifican los siguientes casos:

- Caso simetría axial:

Es el caso más simple, en este se presenta un túnel de radio a y largo infinito, el cual está excavado a una profundidad infinita, con un suelo que en un estado inicial está sometido a compresiones uniformes isotrópicas (p_0), ($\sigma_0 = \sigma_{h0} = p_0$), se ejerce una presión uniforme p_i , la cual es menor o igual a p_0 , actuando en los bordes del túnel. En este problema unidimensional, solo se presenta la deformación correspondiente a la pérdida de suelo, la zona plástica la conforma un anillo concéntrico de radio R alrededor del túnel con un cambio tensional máximo en sus paredes.

- Caso puramente cohesivo ($G; \mu = 1/2; c_u; \phi = 0$):

Caso que suele representar la situación de un túnel excavado en arcilla, la solución a este problema es de carácter sencillo y usualmente se utiliza el factor de estabilidad o factor de sobrecarga, introducido por Peck originalmente para analizar la estabilidad en la cara del túnel, este factor está dado por la siguiente ecuación:

$$N = \frac{p_0 - p_i}{c_u} \quad (2.4)$$

Además de esto se identifican factores de seguridad dependiendo del escenario:

- Factor de seguridad bruto: manifestado cuando el túnel fue dejado sin revestimiento después de excavar, puede alcanzar valores de 8 o 10 si el suelo es demasiado blando. Su ecuación es la siguiente: $N_0 = \frac{p_0}{c_u} \quad (2.5)$

- Factor de seguridad de la cara: cuya presión p_f solo no es cero cuando se excava el túnel a cara cerrada. Su ecuación es la siguiente: $N_f = \frac{(p_0 - p_f)}{c_u}$ (2.6)

Donde p_f es la presión en la cara del túnel.

- Factor de seguridad de las paredes: $N_i = \frac{(p_0 - p_i)}{c_u}$ (2.7)

Donde p_i es la presión en las paredes del túnel.

La contracción radial es:

$$\varepsilon = \frac{1}{2} \varepsilon_s = \begin{cases} \frac{p_0 - p_i}{2G} = \frac{1}{2I_r} N_i = \frac{1}{2I_r} \left(1 - \frac{p_i}{p_0}\right) N_0 & \text{si } N_i \leq 1 \text{ (elástico)} \\ \frac{1}{2I_r} e^{N_i - 1} = \frac{1}{2I_r} e^{\left(1 - \frac{p_i}{p_0}\right) N_0 - 1} & \text{si } N_i \geq 1 \text{ (elástico - plástico)} \end{cases} \quad (2.8)$$

En donde $I_r = G/c_u$ siendo este el índice de rigidez.

En observaciones presentadas por Peck (1969) (como se citó en Leca et al. (2007)), se expuso que, para valores de N entre 5 y 7 se experimentaban usualmente dificultades en la realización del túnel y podrían causar inestabilidad en la cara del túnel. Con esto y otras consideraciones se establece que:

Para un factor de seguridad $N \leq 3$ la estabilidad general del túnel usualmente se puede asegurar.

Para un factor de seguridad $3 < N \leq 6$ se deben tomar consideraciones especiales para determinar si hay riesgo de asentamiento.

Cuando el factor de seguridad $6 < N$ la cara es inestable en general.

Caso general:

Denotado por Sagaseta (1998) como caso cohesivo-friccional ($G; \mu; c; \phi; \nu$):

En este caso tenemos nuevas variables a tomar en cuenta, el coeficiente de poisson μ , la cohesión c , el ángulo de fricción ϕ y el ángulo de dilatación ν , por este motivo se nos presenta un problema más complejo. Por otro lado, el que el suelo presente presiones volumétricas da a entender que ya no existe coincidencia en las magnitudes de pérdida de suelo en el túnel y el asentamiento.

No hay un acuerdo universal en el uso de los parámetros adimensionales, por ende, además de que las notaciones y los parámetros podrán variar dependiendo de la literatura, el resultado de estos también diferirá en algunos casos. No obstante, hay dos consideraciones que los parámetros adimensionales deben cumplir: No deben ser arbitrarias, aunque se deben basar en consideraciones físicas; es preferible que tiendan a las expresiones definidas anteriormente cuando el ángulo de fricción tienda a cero.

La ecuación de equilibrio límite puede escribirse en el caso más general como:

$$p + c \cot \phi = (q + c \cot \phi)N_q \quad (2.9)$$

Y se obtienen los parámetros:

$$N_c = (N_q - 1) \cot \phi \quad ; \quad N_q = 1 + N_c \tan \phi \quad (2.10)$$

$$N_q = \frac{s_0}{s_i} = \frac{p_0 + c \cot \phi}{p_i + c \cot \phi} \quad (2.11)$$

$$N_c = \left(\frac{s_0}{s_i} - 1 \right) \cot \phi = \frac{p_0 - p_i}{c + p_i \tan \phi} \quad (2.12)$$

Cualquiera de estos factores puede usarse como un parámetro de carga, con N_q dando expresiones más simples y N_c siendo una generalización directa del factor de sobrecarga (N). El factor de rigidez puede expresarse como:

$$I_r = \frac{G}{c + p_i \tan \phi} \quad (2.13)$$

El comienzo de la plasticidad es dado por Mohr-Coulomb en las paredes del túnel como:

$$\sigma_\theta - \sigma_r = (\sigma_\theta + \sigma_r) \sin \phi + 2c \cos \phi \quad (2.14)$$

Desde donde los factores críticos de carga son:

$$N_{qe} = \frac{1}{1 - \sin \phi} \quad ; \quad N_{ce} = \frac{\cos \phi}{1 - \sin \phi} \quad (2.15)$$

El radio (R) de la zona plástica es:

$$\frac{R}{a} = \left(\frac{N_q}{N_{qe}} \right)^{\frac{1 - \sin \phi}{2 \sin \phi}} \quad (2.16)$$

Finalmente, la expresión general para la pérdida elastoplástica de suelo queda:

$$\varepsilon_s = \frac{s_0}{G} (1 - 2\mu) \left[\left(1 + \frac{\sin \phi}{1 - 2\mu} \right) \left(\frac{R}{a} \right)^{1+m} - 1 \right] - \frac{s_i}{G} \frac{1 - 2\mu + \sin \phi \sin v}{1 - \sin \phi \sin v} \left[\left(\frac{R}{a} \right)^{k+m} - 1 \right] \quad (2.17)$$

Siendo:

$$k = \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \quad ; \quad m = \frac{1 + \sin v}{1 - \sin v} \quad (2.18)$$

Es comúnmente usado el simplificar la ecuación no tomando en cuenta el componente elástico de la presión en la región plástica, dando como resultado:

$$\varepsilon_s = \begin{cases} \frac{1}{I_r} N_c & \text{si } N_c \leq N_{ce}; (N_q \leq N_{qe}) \\ \frac{1}{I_r} N_{ce} \left(\frac{N_q}{N_{qe}} \right)^{\frac{1-\sin \phi \sin v}{\sin \phi (1-\sin v)}} & \text{si } N_q \geq N_{qe}; (N_c \geq N_{ce}) \end{cases} \quad (2.19)$$

2.1.5 Calculo de la curva o linea caracteristica:

Hoek(1999), expone que Ferner (1938), asoció la convergencia de un túnel con la formación de una zona plástica alrededor de su avance. Un elemento básico de esto es que el tamaño de la zona plástica este ligado a una presión de soporte p_i equivalente. Para el caso de un túnel sin revestimiento el valor de p_i se reduce desde el valor de p_0 a 0 de acorde a las diferentes posiciones relativas a su cara de avance. La roca comienza a reaccionar al túnel que avanza, desde una distancia correspondiente a la mitad del diámetro del túnel desde la cara del túnel hacia el interior de la roca. Si nos ubicamos en la cara del túnel, alrededor de un tercio de la deformacion total ha ocurrido y finalmente la completa formación de la zona plastica, correspondiente con la ocurrencia del total de la deformación sucede alrededor de 1,5 veces el diámetro del túnel en direccion hacia la zona ya excavada.

La relación entre p_i y la deformación interior de las paredes del tunnel se conoce como la línea o curva característica. La siguiente imagen graficara de mejor manera las diferentes posiciones relativas a la zona de avance:

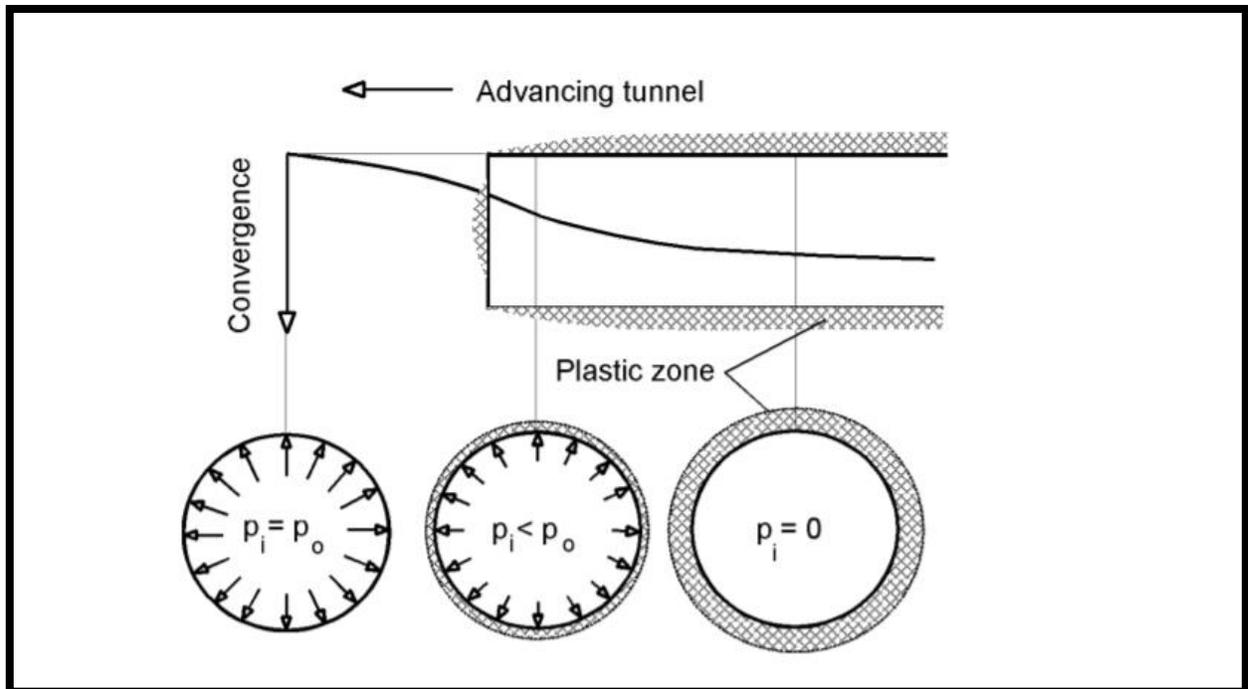


Figura 2.3: Hoek E. (1999) Assumed support pressure p_i at different positions relative to the advancing tunnel face.

2.2. Estimación del sostenimiento según normativa:

Según el Volumen N°3 Instrucciones y criterios de diseño del manual de carreteras (2019), Para una excavación subterránea, se pueden emplear las clasificaciones geomecánicas para estimar el sostenimiento de una excavación de forma empírica, no obstante, se debe tener en cuenta que utilizando esto no se cuantifica el factor de seguridad, diferentes parámetros pueden generar el mismo RMR o Q, es necesario estudiar el sostenimiento en función de la capacidad de la clasificación. Cabe destacar que los métodos nombrados anteriormente pueden utilizarse además para calcular la presión transmitida desde el macizo rocoso al sostenimiento.

2.3 Mecánica de fractura:

La mecánica de fractura tiene como meta principal en el estudio de grietas en estructuras, proveer soluciones cuantitativas a problemas puntuales. (Janssen, Zuidema, Wanhill, 2009).

La interfaz de ANSYS usa parámetros de mecánica de fractura para evaluar las grietas que se ingresan, entre estos se destacan la tasa de liberación de energía (G) y el factor de intensidad de tensiones (K), que es el que se utilizó en este proyecto, los cuales son tres parámetros (K_1 ; K_2 ; K_3) que representan los modos de propagación que se exponen más adelante.

2.3.1 Mecánica de fractura lineal elástica:

La mecánica de fractura lineal elástica (LEFM) es una teoría originada por Griffith (1921,1924), según Bazant & Planas (1998), LEFM es una sofisticada teoría, pese a ser bastante simplificada, su principal función radica en estudiar grietas agudas en cuerpos elásticos. Su aplicabilidad es bastante amplia pudiendo abarcar cualquier material que cumpla con ciertos requerimientos, relacionados con evaluar una situación en el que el material es elástico en su totalidad excepto en una región pequeña en la punta de la grieta. LEFM se usa como referencia para expresar el comportamiento de cualquier material agrietado, independientemente de que, en algunos casos, como en el concreto, la geometría y el tamaño de lo construido no lo permitan directamente.

Griffith planteó el problema en términos de balances energéticos, en el cual se tiene una disminución de la energía en un cuerpo tensionado a medida que el agrietamiento se propaga, lo cual es contrarrestado por la energía necesitada para crear agrietamiento. (Janssen et al., 2009).

Sumado a esto como lo postula Broek (1982), Griffith propuso una ecuación que se basó en lo siguiente: se consideró una lámina infinita de grosor unitario, con una grieta transversal de largo igual a: $2a$, sometida a una tensión σ y fijado en sus extremos, cuando la grieta crezca más allá de una longitud: da , la rigidez de la lámina caerá y en consecuencia un porcentaje de la carga será liberada dejando de este modo la energía elástica contenida en una magnitud representada por el área OCB. La propagación de la grieta desde: a hacia: $a + da$ dará como resultado una liberación de energía elástica de magnitud igual al área OAC.

Se puede ejemplificar de manera más clara lo anteriormente expuesto mediante la siguiente imagen:

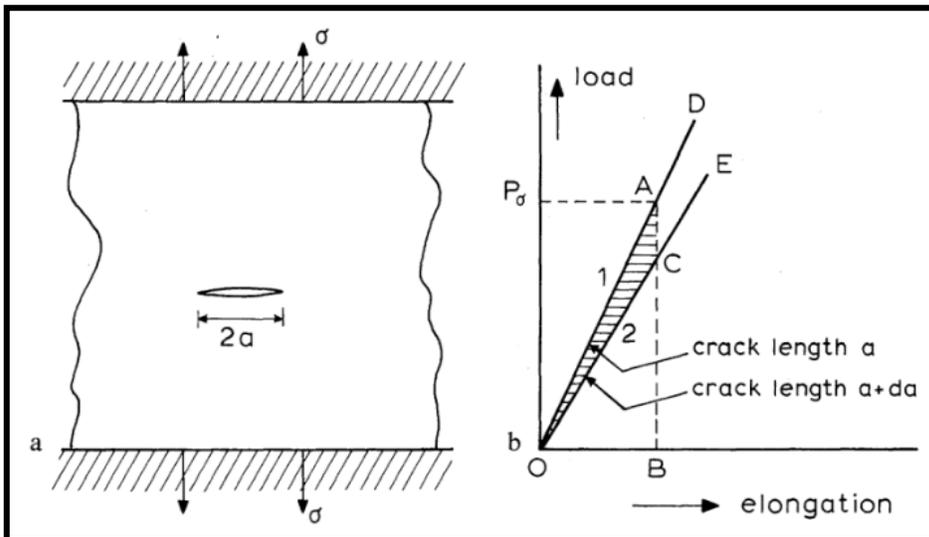


Figura 2.4: Broek, D. (1982) The Griffith criterion for fixed grips. (a. Cracked plate with fixed ends, b. Elastic energy).

La condición para el crecimiento de la grieta está representada como:

$$\frac{dU}{da} = \frac{dW}{da} \quad (2.22)$$

Donde U es la energía elástica y W es la energía requerida para el agrietamiento, así mismo: dU/da puede calcularse:

$$\frac{dU}{da} = G = \frac{2\pi\sigma^2 a}{E} \quad (2.23)$$

Donde E es el módulo de Young. (Broek D.,1982)

Usualmente la energía de la cual se dispone para el agrietamiento se denomina tasa de liberación de energía (G) mientras que la energía necesaria para el agrietamiento es energía de fractura o resistencia al agrietamiento (R).

Como lo ilustran Janssen et al. (2009), Irwin designo G para representar la energía por unidad de área agrietada que esta disponible para una extensión infinitesimal de agrietamiento y R como la resistencia al agrietamiento. Para que ocurra este agrietamiento G debe ser mayor que R, cuando este ultimo es una constante significa que G debe exceder un valor critico denotado como G_c ($G_c=R$). El suceso de fractura ocurre cuando sucede lo siguiente:

$$G = \frac{\pi\sigma^2 a}{E} > G_c = R = 2\gamma_e \quad (2.24)$$

Donde: γ_e corresponde a la energía de superficie por unidad de área.

Posteriormente a esto en 1957 Irwin introdujo el concepto de factor de intensidad de tensiones (K) relacionándolo con el enfoque energético de Griffith (tasa de liberación de energía (G). Al frente de la punta de una grieta K adquiere un valor critico denotado K_{Ic} , cuando se alcanza este valor, se produce agrietamiento.

Como está indicado por Broek (1982), si se toma una lámina de un tamaño de grieta conocido y se incita el fracturamiento, mediante la carga de fractura se puede calcular la tensión de falla σ_c . Teniendo esto, se puede calcular el valor crítico del factor de intensidad de tensión como:

$$K_{Ic} = \sigma_c \sqrt{\pi a} \quad (2.26)$$

Se puede establecer una relación entre el factor de intensidad de tensión K y la tasa de liberación de energía G , mediante la siguiente ecuación:

$$\frac{K^2}{E} = G \quad (2.27)$$

Sumado a esto la relación entre G_c y K_c es:

$$G_c = \frac{K_c^2}{E} \quad (2.28)$$

La grieta se extiende cuando ocurre lo siguiente:

$$K = \sigma\sqrt{\pi a} > K_c \quad (2.29) \text{ (Janssen et al., 2009).}$$

El factor de intensidad de tensión es utilizado para determinar cuan estable es una grieta, es decir, a medida que aumenta el valor de este factor, mayor es la tensión que se encuentra cerca del vértice de la grieta. (Shi-ming Gao, Yang Sun, Wei Wang, Jian-ping Chen, 2016).

Para Broek (1982), un agrietamiento en un cuerpo sólido puede producirse de 3 modos distintos:

- Modo I o de apertura: donde los desplazamientos de la superficie de agrietamiento son perpendiculares al plano de fractura, este modo es generado por la actuación de tensiones normales.

- Modo II o deslizante: donde se producen desplazamientos, en concordancia con el plano de fractura y perpendiculares al borde frontal de agrietamiento, debido a la tensión cortante ejercida en el plano de la grieta.
- Modo III o de rotura transversal donde las superficies de fractura se mueven en direcciones contrarias, ambas en paralelo al borde frontal de agrietamiento, debido a que existe una tensión cortante en planos diferentes al de fractura.

Cuando estos tres modos se sobreponen se encuentra un caso típico de agrietamiento. Sumado a esto, Shi-ming Gao et al. (2016) señalan que, dependiendo de la carga involucrada, las grietas se pueden dividir en tres tipos: grietas de tensión, de corte y de desgarro. Las grietas que puede presentar un revestimiento pueden ser de cualquiera de este tipo o bien un conjunto de varios tipos acopladas. Las grietas del primer tipo son las que causan daños más severos a las estructuras, los campos de singularidades alrededor de este tipo de grietas pueden resolverse usando funciones analíticas.

2.4 Método de elementos finitos:

El método de los elementos finitos (MEF o FEM (finite element method)), a grosso modo, consiste en técnica de carácter numérica que muestra su utilidad en los problemas de ingeniería que no se pueden resolver con métodos matemáticos convencionales, entregando una solución aproximada a dicho problema. (Olmedo, 2015).

El tipo de elemento finito que utiliza el software ANSYS cuando se emplea para modelar grietas en un modelo tridimensional son tetraedros, utilizar otro mallado podría producir errores.

El mallado tetraédrico de ANSYS se ve de la siguiente forma:

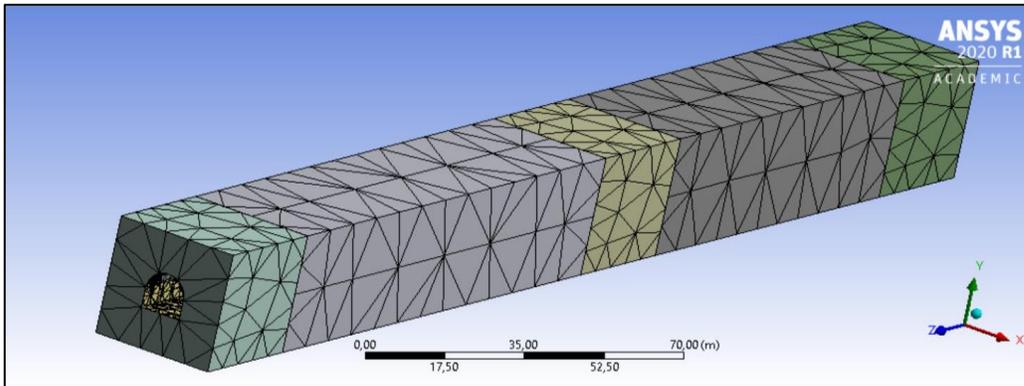


Figura 2.5: Mallado tetraédrico en ANSYS Workbench (elaboración propia).

Similarmente Murakami (2016), señala que el FEM es un método computacional de carácter numérico, el cual trata el contraste de los problemas como diferencias en los datos de entrada para condiciones de límite. El FEM es comúnmente empleado en ingeniería estructural y su ventaja principal es que no es necesario tener un discernimiento avanzado en el tema de análisis tensionales y aun así, obtener soluciones aproximadas a los problemas más prácticos. Para obtener un mejor aproximado en las soluciones es necesario conocer el principio en el que se basa el FEM.

Según Olmedo (2015), el método de elementos finitos tiene su sustento en dividir el dominio en el que se ubica el problema en un número determinado de subdominios a los cuales se les denomina elementos finitos. Para solucionar un problema X con este método, es necesario emplear leyes constitutivas y establecer un sistema de ecuaciones algebraicas para los subdominios.

EL FEM requiere de los siguientes pasos para su implementación:

- División del dominio en un número determinado de elementos finitos, los cuales si son más pequeños entregarán mejores aproximaciones, pero requerirá a su vez

de una mayor capacidad computacional. Los elementos están interconectados entre si mediante puntos denominados nodos. Las incógnitas nodales representan variables denominados grados de libertad, estas incógnitas están presentes en los nodos pudiendo representarse como una matriz de ecuaciones. Los elementos abordados pueden ser desde unidimensionales a tridimensionales.

- Selección de las funciones que compondrán la matriz, ya sea de una magnitud, en función de x e y , dependiendo si es unidimensional o bidimensional respectivamente. Considerando una cantidad suficiente de elementos en el modelo estas funciones pueden ser integrables y derivables.
- Creación de la matriz para el elemento finito utilizando las ecuaciones constitutivas
- Ensamblaje de la matriz para cada elemento finito a fin de crear la matriz global del dominio
- Imposición de las condiciones limite.
- Solución y postproceso.

En el campo de los análisis de fractura, más específicamente en el ámbito de el modelado del agrietamiento el método FEM ha experimentado grandes desafíos. Pourmodheji y Mashayekhi (2012) señalan que la principal causa de estas dificultades es debido a que, de acorde a la geometría de la propagación de grietas, era necesario volver a remallar el dominio repetitivamente. Gracias a esto, se han ido desarrollando algunos métodos para entregar una mejor solución a este problema. Fue así como surgió el XFEM (extended finite element method), el cual no requiere que se vuelva a remallar cada vez que la grieta se extiende, debido a que el domino en el cual se encuentra esta, es modelado sin explícitamente modelar su superficie, permitiendo el desplazamiento arbitrario de la grieta en la malla.

Para el XFEM hay dos tipos de enriquecimiento para modelar el agrietamiento:

- Usando una función discontinua para modelar los saltos a lo largo del recorrido del agrietamiento a fin de enriquecer los nodos cuya función pueda contener la intersección en el interior de la grieta.
- Usar funciones de un campo asintótico cerca de la punta del agrietamiento para enriquecer los nodos cuya función pueda contener la intersección de la punta de la grieta.

Además de este método, hay algunos estudios que han aplicado el FEM en compañía de otras herramientas para un resultado más preciso. Uno de los cuales lo muestran Fatehi Marji, Siahmansouri y Yarahmadi (2012), donde se ocupan en conjunto el FEM y el BEM (boundary element method o método de los elementos de borde) para el análisis de falla de rocas alrededor de aberturas circulares, modelando 45 túneles con diferentes condiciones de macizo rocoso. En este caso, el FEM se utilizó para determinar los puntos de falla alrededor de cada túnel, mientras que el BEM se empleó para estudiar la dirección del agrietamiento y el detenimiento de este. Lo anterior demuestra que, aunque el FEM tiene sus limitaciones, aún se sigue empleando o utilizando como base para nuevos modelos.

3. CAPITULO III. METODOLOGÍA

3.1 Diseño de la investigación:

De modo de esclarecer el modo de obtención de datos, así como la forma en la que se efectuó el análisis, a continuación, se presenta un resumen del diseño de la investigación:

1. Generación de caso de aplicación, estableciendo geometría de túnel y litología.
2. División en secciones de todo el terreno que abarca el túnel.
3. Propuesta parcial de profundidad a lo largo del túnel a fin de evaluar distintas coberturas para cada sección.
4. Utilización de un único tipo de roca a lo largo del túnel para comparar y ver efectos de las demás variables.
5. Caracterización de competencia de la roca mediante tablas para GSI en función del tipo de macizo a evaluar.
6. Utilización de estos valores para calcular mediante el uso de fórmulas los parámetros que se necesitan en ANSYS.
7. Ingreso de datos representativos del macizo en el software ANSYS.
8. Ingreso de geometría en el software ANSYS.
9. Modelado en ANSYS.
10. Recolección de datos y análisis.

3.2 Recolección de datos:

En una primera instancia, se generó un diseño arbitrario de la geometría del túnel basándose en valores típicos vistos en minería. Se consideró un radio de 5 [m] y un largo de 300 [m] para el túnel analizado.

Se subdividió el túnel en un determinado número de secciones (10 secciones en un principio, pero debido a limitaciones de software, se evaluaron finalmente 3 secciones, estableciéndose como inicial. la primera sección en la que existe un radio plástico,

seguida de una sección media y final del túnel respectivamente, el resto de las secciones se agruparon en un promedio), a cada una de estas se le asignó una tensión vertical determinada por la siguiente fórmula:

$$\sigma_v = \gamma z \quad (3.1)$$

Donde z corresponde a la profundidad que se estableció entre un rango de 50 a 500 [m] mientras que γ corresponde al peso específico del material. Como se puede ver, estas tensiones verticales están directamente ligadas a la distancia desde la superficie a la clave del túnel, la cual varía para las distintas secciones.

Se seleccionó la litología, tomando en cuenta un único tipo de roca a lo largo del túnel para comparar y ver efectos de las demás variables manteniendo como constante el tipo de roca para cada caso a evaluar, para los casos evaluados se utilizaron dos tipos de rocas, granito y granito fisurado.

Posteriormente, se obtuvieron los parámetros geotécnicos del macizo rocoso para el tipo de roca seleccionada mediante el uso de las siguientes tablas:

Field estimates of uniaxial compressive strength of intact rock.					
Grade*	Term	Uniaxial Comp. Strength (MPa)	Point Load Index (MPa)	Field estimate of strength	Examples
R6	Extremely Strong	> 250	>10	Specimen can only be chipped with a geological hammer	Fresh basalt, chert, diabase, gneiss, granite, quartzite
R5	Very strong	100 - 250	4 - 10	Specimen requires many blows of a geological hammer to fracture it	Amphibolite, sandstone, basalt, gabbro, gneiss, granodiorite, peridotite, rhyolite, tuff
R4	Strong	50 - 100	2 - 4	Specimen requires more than one blow of a geological hammer to fracture it	Limestone, marble, sandstone, schist
R3	Medium strong	25 - 50	1 - 2	Cannot be scraped or peeled with a pocket knife, specimen can be fractured with a single blow from a geological hammer	Concrete, phyllite, schist, siltstone
R2	Weak	5 - 25	**	Can be peeled with a pocket knife with difficulty, shallow indentation made by firm blow with point of a geological hammer	Chalk, claystone, potash, marl, siltstone, shale, rocksalt,
R1	Very weak	1 - 5	**	Crumbles under firm blows with point of a geological hammer, can be peeled by a pocket knife	Highly weathered or altered rock, shale
R0	Extremely weak	0.25 - 1	**	Indented by thumbnail	Stiff fault gouge

* Grade according to Brown (1981).
 ** Point load tests on rocks with a uniaxial compressive strength below 25 MPa are likely to yield highly ambiguous results.

Figura 3.1: Perri G (2012) Tabla para estimar la resistencia a la compresión uniaxial según Brown (1981).

Values of the constant m_i for intact rock, by rock group¹. Note that values in parenthesis are estimates. The range of values quoted for each material depends upon the granularity and interlocking of the crystal structure – the higher values being associated with tightly interlocked and more frictional characteristics.

Rock type	Class	Group	Texture			
			Coarse	Medium	Fine	Very fine
SEDIMENTARY	Clastic		Conglomerates (21 ± 3)	Sandstones 17 ± 4	Siltstones 7 ± 2	Claystones 4 ± 2
			Breccias (19 ± 5)		Greywackes (18 ± 3)	Shales (6 ± 2)
	Non-Clastic	Carbonates	Crystalline Limestone (12 ± 3)	Sparitic Limestones (10 ± 2)	Micritic Limestones (9 ± 2)	Dolomites (9 ± 3)
		Evaporites		Gypsum 8 ± 2	Anhydrite 12 ± 2	
Organic					Chalk 7 ± 2	
METAMORPHIC	Non Foliated		Marble 9 ± 3	Hornfels (19 ± 4)	Quartzites 20 ± 3	Metasandstone (19 ± 3)
	Slightly foliated		Migmatite (29 ± 3)	Amphibolites 26 ± 6		
	Foliated*		Gneiss 28 ± 5	Schists 12 ± 3	Phyllites (7 ± 3)	Slates 7 ± 4
IGNEOUS	Plutonic	Light	Granite 32 ± 3	Diorite 25 ± 5		
		Dark	Gabbro 27 ± 3	Norite 20 ± 5	Dolerite (16 ± 5)	
	Hypabyssal			Porphyries (20 ± 5)	Diabase (15 ± 5)	Peridotite (25 ± 5)
	Volcanic	Lava		Rhyolite (25 ± 5)	Dacite (25 ± 3)	Obsidian (19 ± 3)
				Andesite 25 ± 5	Basalt (25 ± 5)	
	Pyroclastic	Agglomerate (19 ± 3)	Breccia (19 ± 5)	Tuff (13 ± 5)		

* These values are for intact rock specimens tested normal to bedding or foliation. The value of m_i will be significantly different if failure occurs along a weakness plane.

¹ Note that this table contains several changes from previously published versions. These changes have been made to reflect data that has been accumulated from laboratory tests and the experience gained from discussions with geologists and engineering geologists.

Figura 3.2: Perri G (2012) Tabla para estimar los valores de la constante “mi” de la roca.

GEOLOGICAL STRENGTH INDEX		CONDICION DE LA SUPERFICIE				
<p>A partir de la descripción de la estructura y las condiciones de la superficie de la masa rocosa, seleccionar el intervalo apropiado de esta gráfica. Estimar el valor promedio del Geological Strength Index (GSI) de dicho intervalo. No intentar ser tan preciso. Escoger un rango de GSI de 36 a 42 es más aceptable que fijar un GSI = 38. También es importante reconocer que el criterio de Hoek-Brown debería ser aplicado solamente en macizos rocosos donde el tamaño de los bloques o fragmentos es pequeño comparado con el tamaño de la excavación a ser evaluada. Cuando el tamaño de los bloques individuales es aproximadamente mayor a un cuarto de la dimensión de la excavación, generalmente la falla estaría controlada por la estructura y el criterio de Hoek-Brown no debería ser utilizado.</p>		<p>ESTRUCTURA</p>				
		<p>DISMINUCION EN CALIDAD DE SUPERFICIE →</p>				
ESTRUCTURA		DISMINUCION EN LA UNION DE LOS BLOQUES DE ROCA				
	INTACTA O MASIVA – rocas intactas o rocas masivas in situ con pocas discontinuidades separadas ampliamente	90			N/A	N/A
	FRACTURADA – macizo rocoso poco perturbado consistente de bloques cúbicos formados por tres sistemas ortogonales de discontinuidades, muy bien unidos entre sí	80	70			
	MUY FRACTURADA – macizo rocoso parcialmente perturbado consistente de bloques angulares unidos entre sí, formados por cuatro o más sistemas de discontinuidades		60	50		
	FRACTURADA/PERTURBADA – macizo rocoso plegado y/o fallado con bloques angulares formados por la intersección de varios sistemas de discontinuidades			40	30	
	DESINTEGRADA – macizo rocoso altamente fracturado con mezcla de fragmentos angulares y redondeados, pobremente unidos entre sí				20	
	FOLIADA/LAMINADA – macizo rocoso foliado, plegado y cizallado tectónicamente. La esquistosidad prevalece sobre cualquier sistema de discontinuidades, completamente carente de bloques	N/A	N/A			10
		<p>← DISMINUCION EN LA UNION DE LOS BLOQUES DE ROCA</p>				
<p>EL GEOLOGICAL STRENGTH INDEX (GSI) DE HOEK PARA ROCAS METAMORFICAS</p>						

Figura 3.3: Perri G (2012) Tabla para estimar el índice GSI según Hoek.

Rock Type: <input type="text" value="Flysch"/> GSI Selection <input type="text" value="31"/> <input type="button" value="OK"/>		SURFACE CONDITIONS OF DISCONTINUITIES				
COMPOSITION AND STRUCTURE		VERY GOOD	GOOD	FAIR	POOR	VERY POOR
 <p>A. Thick bedded, very blocky sandstone The effect of pelitic coatings on the bedding planes is minimized by the confinement of the rock mass. In shallow tunnels or slopes these bedding planes may cause structurally controlled instability.</p>		70	60			
 <p>B. Sandstone with thin inter-layers of siltstone</p>			50			
 <p>C. Sandstone and siltstone in similar amounts</p>				40		
 <p>D. Siltstone or silty shale with sandstone layers</p>					30	
 <p>E. Weak siltstone or clayey shale with sandstone layers</p>						20
<p>C, D, E and G - may be more or less folded than illustrated but this does not change the strength. Tectonic deformation, faulting and loss of continuity moves these categories to F and H.</p>						
 <p>F. Tectonically deformed, intensively folded/faulted, sheared clayey shale or siltstone with broken and deformed sandstone layers forming an almost chaotic structure</p>						10
 <p>G. Undisturbed silty or clayey shale with or without a few very thin sandstone layers</p>						
 <p>H. Tectonically deformed silty or clayey shale forming a chaotic structure with pockets of clay. Thin layers of sandstone are transformed into small rock pieces.</p>						
<p>→ : Means deformation after tectonic disturbance</p>						

Figura 3.4: Perri G (2012) Tabla para estimar el índice GSI según el tipo de roca.

Una vez obtenido estos datos, mediante el empleo del criterio de Hoek and Brown se utilizaron las siguientes fórmulas recopiladas por Hoek E., Carranza-Torres C., Corkum B. (2002) para obtener un valor representativo del macizo rocoso definido según los criterios anteriores:

$$\varphi_m = \text{sen}^{-1} \left[\frac{6am_b(s + m_b\sigma_{3n})^{a-1}}{2(1+a)(2+a) + 6am_b(s + m_b\sigma_{3n})^{a-1}} \right] \quad (3.2)$$

$$c_m = \frac{\sigma_{ci}[(1+2a)s + (1-a)m_b\sigma_{3n}](s + m_b\sigma_{3n})^{a-1}}{(1+a)(2+a)[1 + \frac{6am_b(s + m_b\sigma_{3n})^{a-1}}{(1+a)(2+a)}]^{0.5}} \quad (3.3)$$

$$\sigma_{cm} = \sigma_{ci} \left[\left(m_b + 4s - a(m_b - 8s) \right) * \left(\frac{m_b}{4} + s \right)^{a-1} \right] / [2(1+a)(2+a)] \quad (3.4)$$

$$E_m = \left(1 - \frac{D}{2} \right) \left(\frac{\sigma_{ci}}{100} \right)^{\frac{1}{2}} 10^{\frac{GSI-10}{40}} \quad (\text{en GPa}) \quad \text{cuando } \sigma_{ci} \leq 100 \text{ MPa} \quad (3.5a)$$

$$E_m = \left(1 - \frac{D}{2} \right) 10^{(GSI-10)/40} \quad (\text{en GPa}) \quad \text{cuando } \sigma_{ci} > 100 \text{ MPa} \quad (3.5b)$$

Siendo:

$$\sigma_{3n} = \sigma_{3max} / \sigma_{ci} \quad (3.6) \quad \left(\frac{\sigma_{3max}}{\sigma_{cm}} \right) = 0,47 \left(\frac{\sigma_{cm}}{\gamma H} \right)^{-0,94} \quad (3.7) \quad m_b = m_i \exp \left(\frac{GSI-100}{28-14D} \right) \quad (3.8)$$

$$s = \exp \left(\frac{GSI-100}{9-3D} \right) \quad (3.9) \quad a = 0.5 + (e^{-GSI/15} - e^{-20/3})/6 \quad (3.10)$$

Donde:

H= Profundidad del túnel.

D= Factor de perturbación constructiva (igual a 0 para condiciones no disturbadas e igual a 1 para voladuras no controladas).

φ_m = Ángulo de fricción del macizo rocoso.

c_m = Cohesión del macizo rocoso.

σ_{cm} = Resistencia a la compresión uniaxial del macizo rocoso.

E_m = Módulo de deformación del macizo rocoso.

Se estableció una geometría arbitraria para las grietas a evaluar en el software Ansys.

Se determinó la utilización de tres tipos de fallas para evaluar como el ingresar una grieta afectará su comportamiento, estos tipos de fallas son:

Falla de 45 grados de buzamiento perpendicular al eje del túnel (Excavación contra buzamiento).

Falla de 45 grados de buzamiento perpendicular al eje del túnel (Excavación a favor del buzamiento).

Falla de 45 grados paralela al eje del túnel ubicado en la parte inferior izquierda de este.

3.3 Análisis:

Para analizar los datos recolectados, primero se seleccionó el software ANSYS WORKBENCH como herramienta para modelar y analizar los datos, posteriormente se efectuó el siguiente procedimiento:

1. Se ingresaron los materiales al software ANSYS, utilizando los datos recolectados anteriormente, se utilizaron dos materiales a fin de simular el comportamiento elástico-plástico del macizo haciendo uso del concepto radio plástico que se definirá posteriormente al ingresar la geometría. En la siguiente imagen se muestra el menú para ingresar los materiales y las propiedades que son necesarias ingresar para simular el comportamiento de la roca:

The image shows the ANSYS Workbench Engineering Data interface. The top part is a table listing materials, and the bottom part is a detailed view of the properties for the selected 'Limestone' material.

	A	B	C	D	E
1	Contents of Engineering Data			Source	Description
2	Material				
3	Limestone			GeoMechanical_Materials.xml	"Rock Physics Handbook", Mavko, G., Mukerji, T. and Dvorkin, J., Second Edition, 2009, Cambridge University Press
4	Limestone 2			GeoMechanical_Materials.xml	"Rock Physics Handbook", Mavko, G., Mukerji, T. and Dvorkin, J., Second Edition, 2009, Cambridge University Press
5	Structural Steel			General_Materials.xml	Fatigue Data at zero mean stress comes from 1998 ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table 5-110.1
*	Click here to add a new material				

	A	B	D	E
1	Property	Value		
2	Material Field Variables	Table		
3	Density	2700		
4	Isotropic Elasticity			
5	Derive from	Young's Modulus and Poisson's Ratio		
6	Young's Modulus	3,7845E+10		
7	Poisson's Ratio	0,3077		
8	Bulk Modulus	3,28E+10		
9	Shear Modulus	1,447E+10		
10	Mohr-Coulomb			
11	Yield Surface			
12	Initial Inner Friction Angle	0,010472		
13	Initial Cohesion	8,8E+07		
14	Dilatancy Angle	0,010472		
15	Residual Inner Friction Angle	0,005236		
16	Residual Cohesion	4E+07		

Figura 3.5: Ingreso de materiales en ANSYS (Elaboración propia ANSYS Workbench 2019 R2).

2. Se construyó la geometría tomando en cuenta las dimensiones del túnel, así como las secciones en el que este se subdividirá para su análisis. Para esta ejemplificación se modeló un túnel tipo herradura de 2 metros de radio con un largo de 360 metros, se dividió el túnel en 12 secciones, que se evaluarán en el modelo general y mediante el empleo de un submodelo para cada sección a fin de poder emplear un mallado más fino para el área de interés sin sobrecargar las capacidades del programa. Las siguientes imágenes mostrarán la geometría del modelo ejemplificado, así como la división de secciones que se realizó:

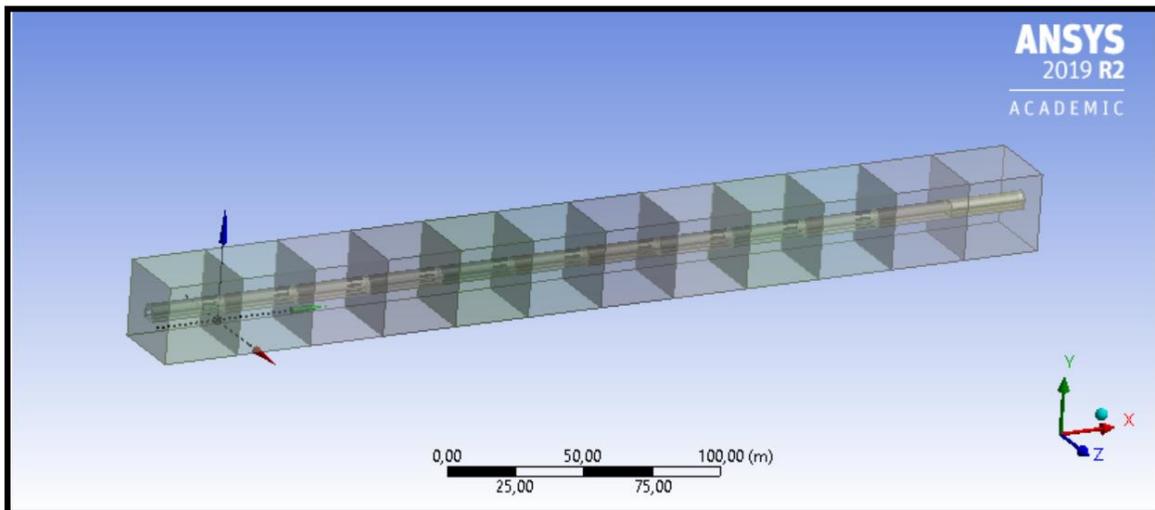


Figura 3.6: Modelo ejemplificado de túnel dividido en secciones en ANSYS. (Elaboración propia ANSYS Workbench 2019 R2).

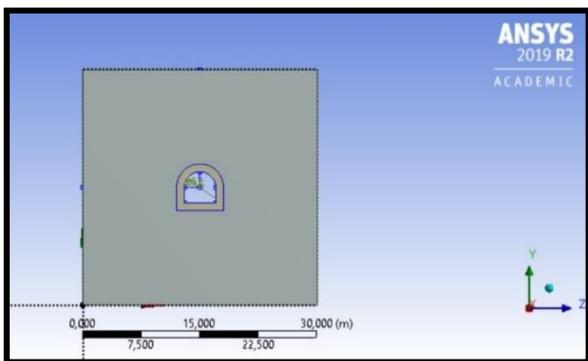


Figura 3.7: Frente del túnel en submodelo.

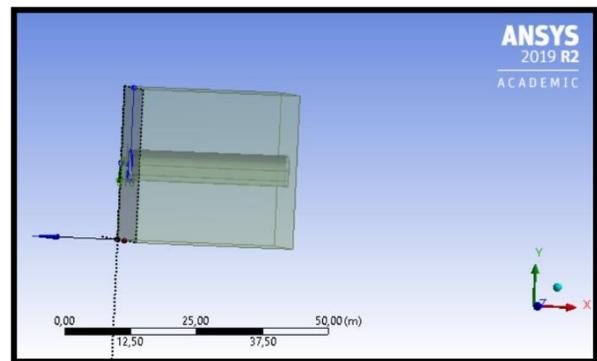


Figura 3.8: Sección del túnel en submodelo.

3. Al realizar el modelo se asignó los materiales ingresados con anterioridad, a cada sólido según corresponda, posteriormente se efectuó un mallado de todo el modelo,

en el cual se ocupó como elemento finito el tetraedro, el resultado se muestra en la siguiente imagen:

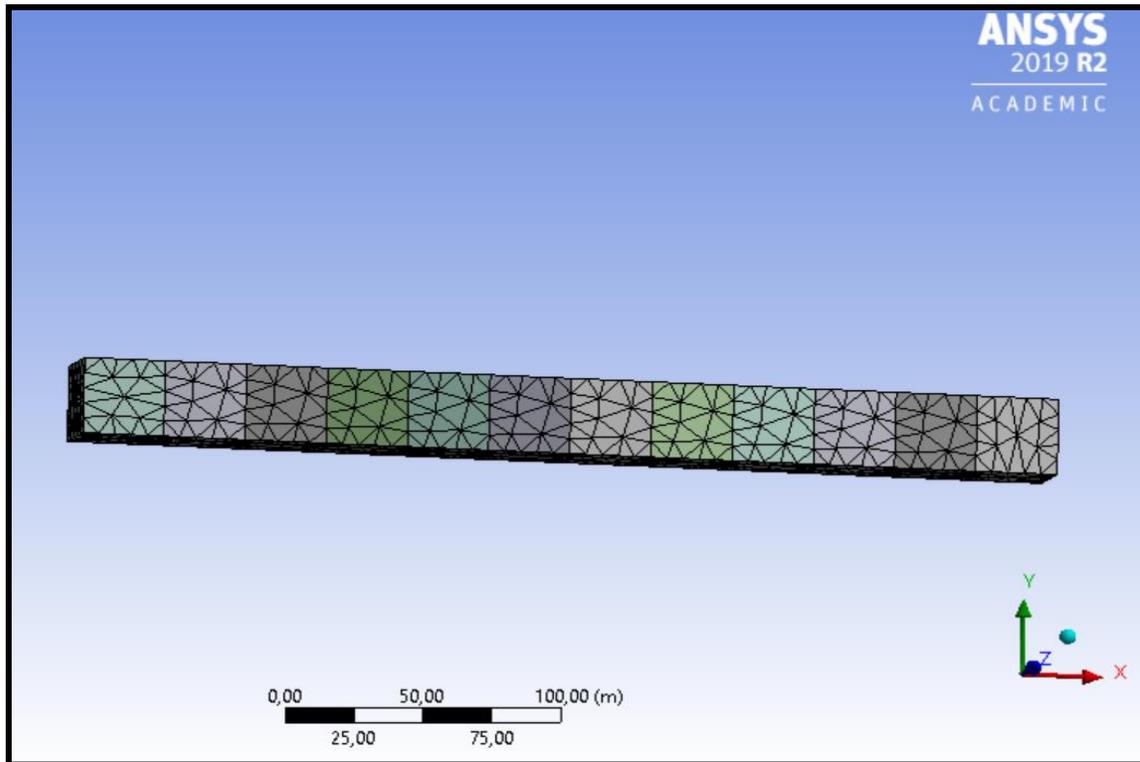


Figura 3.9: Mallado de modelo ejemplificado en ANSYS (Elaboración propia ANSYS Workbench 2019 R2).

4. Se asignó una carga para cada sección del túnel representando las distintas presiones verticales a la que está sometida cada sección, esta presión variará de menos a más a medida que se avance en dirección positiva al eje x, por consiguiente, teniendo en cuenta la fórmula para tensión vertical expuesta en el apartado anterior, nuestra altura variará de menos a más a medida que se avance en el túnel. Se agrega la misma carga para el submodelo según la sección correspondiente.
5. Se obtiene del software la información que se requiere mediante el submenú “solution”, en este caso la deformación total y las tensiones resultantes. A modo de ejemplificar la siguiente imagen muestra el cómo se vería la información entregada en el programa:

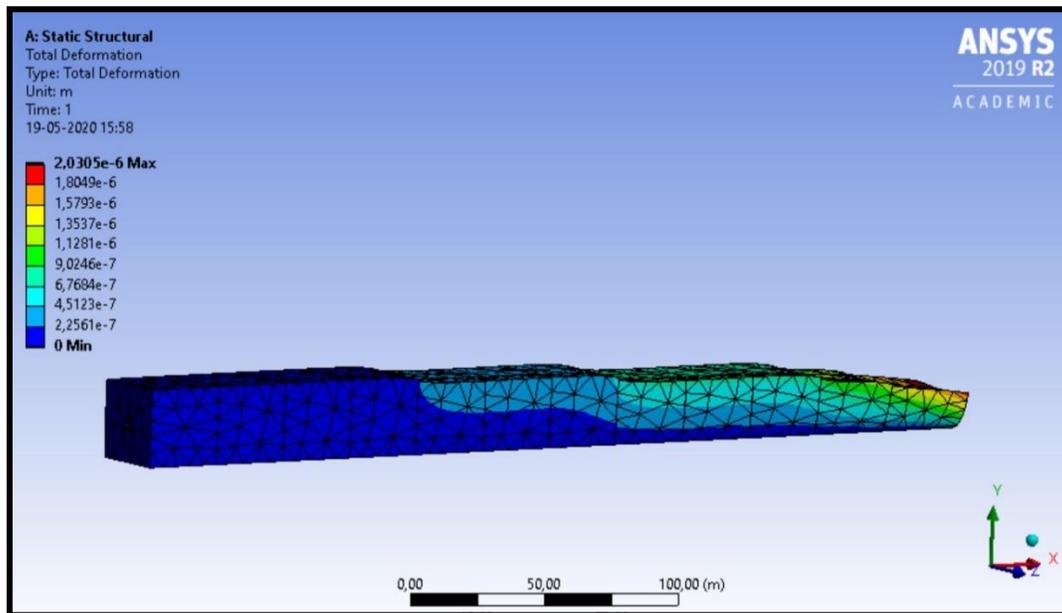


Figura 3.10: Solución entregada por ANSYS de los valores de deformación total del túnel (Elaboración propia ANSYS Workbench 2019 R2).

6. Luego de obtener los resultados se rehace el modelo agregando grietas, para esto se realizan los pasos anteriores, agregando en la geometría el contorno para una grieta y en la parte del modelado, en el subíndice “fracture” se ingresa una grieta arbitraria que utilizara este contorno, creado en la geometría, para agregar una o más grietas. Para esta investigación se decidió agregar 6 grietas en el contorno del túnel, 3 en la parte superior y 3 en la parte inferior, empleando un modelo para cada grieta.
7. Agregada la grieta se vuelve a correr el modelo y se analizan los resultados de ambos modelos y se comparan para evaluar los efectos de estas grietas en el túnel propuesto.

4. CAPITULO IV: RESULTADOS Y ANÁLISIS

1.1 Características geométricas del túnel:

Para el presente estudio se consideró una sección de túnel tipo herradura de 5 metros de radio (r_o), para un túnel de 300 (m) de largo, con una profundidad establecida en un rango de 50 a 500 metros.

Esquema frontal de túnel:

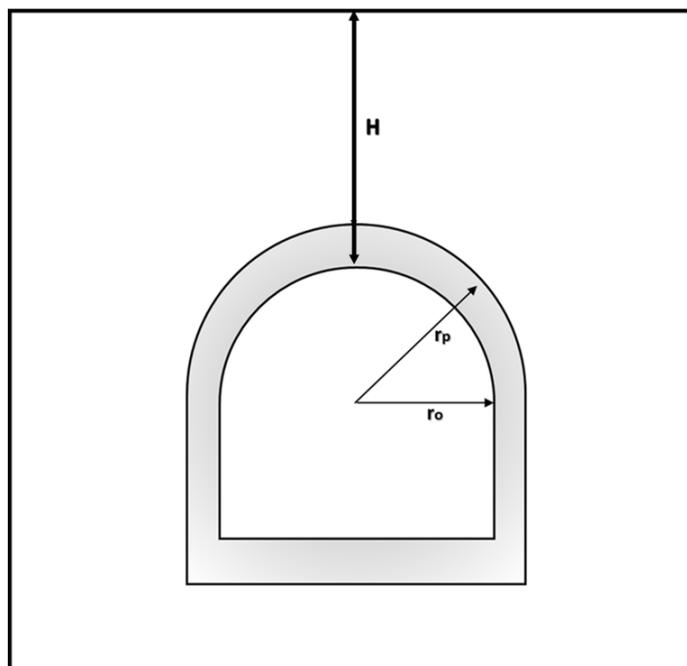


Figura 4.1: Representación frontal del túnel (elaboración propia).

Esquema lateral de túnel:

El túnel se dividió en 10 secciones de 30 metros de largo a profundidades distintas, las cuales comienzan en una profundidad de 50 [m] y terminan en una profundidad de 500 [m].

Por temas de capacidad de la versión Student del software ANSYS, de las 10 divisiones se decidió evaluar 3, ubicándose en: la primera sección en presentar una zona plástica; en la zona media del modelo y finalmente en la zona más profunda del modelo.

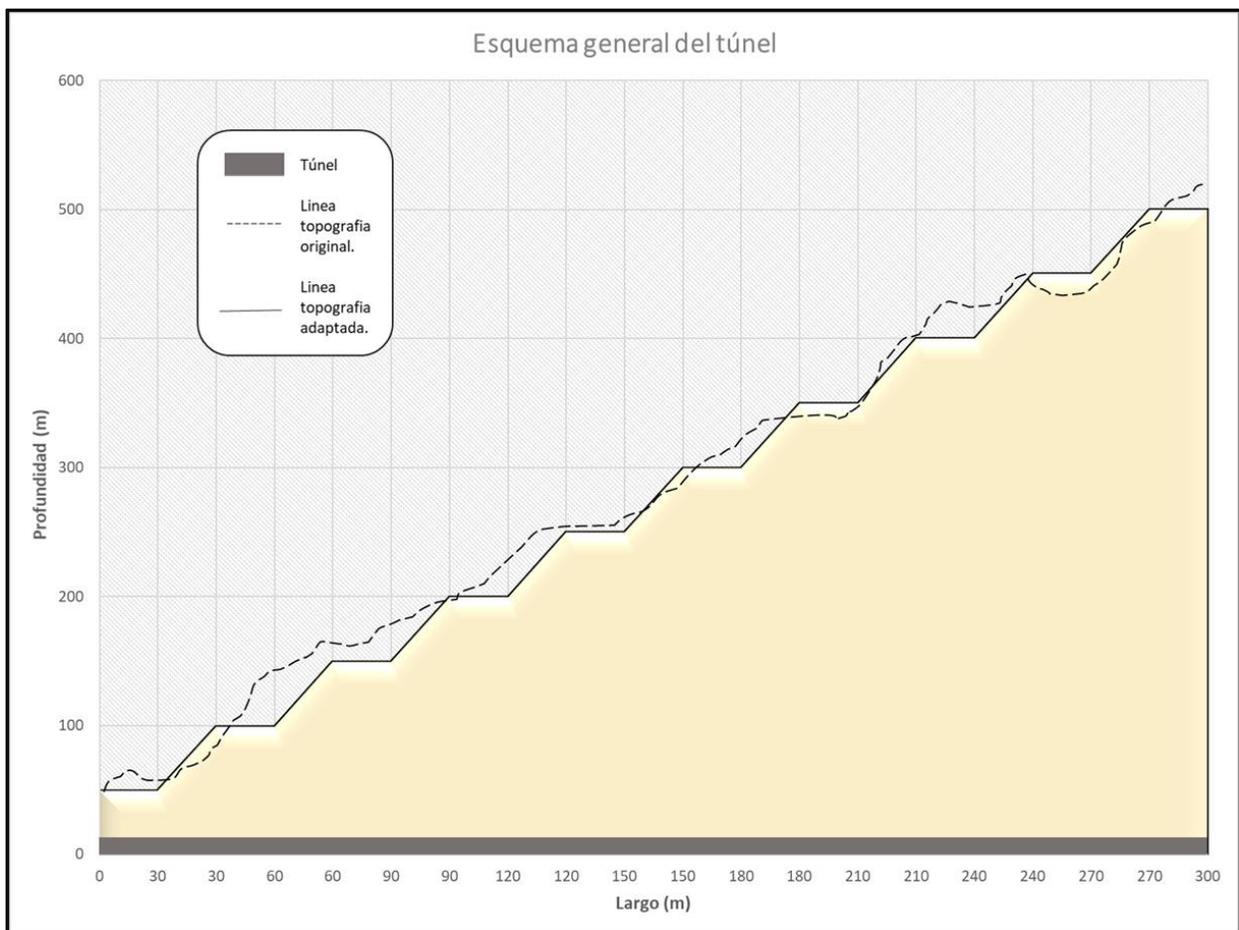


Figura 4.2: Representación lateral del túnel (elaboración propia).

4.2 Características geomecánicas del túnel:

De manera inicial se consideraron 2 tipos de roca a modelar, utilizando el mismo modelo geométrico. Utilizando las tablas presentadas en capítulos anteriores se obtuvieron los valores del peso específico (γ), la resistencia a la compresión uniaxial de la roca intacta (σ_{ci}), el GSI, la constante m_i y el factor D.

Tipo de roca 1: Granito fisurado

Tabla 4.1: Características geotécnicas (Roca: granito fisurado):

γ (kN/m ³)	m_i	GSI	σ_{ci} (MPa)	D
26,46	29	37	35	0

Tipo de roca 2: Granito sin fisurar

Tabla 4.2: Características geotécnicas (Roca: granito sin fisurar):

γ (kN/m ³)	m_i	GSI	σ_{ci} (MPa)	D
28,42	32	75	180	0

Asimismo, se ocuparon las fórmulas expuestas en la metodología para obtener los siguientes parámetros:

Tipo de roca 1: Granito fisurado (con un módulo de Young (E_m) de 2,7992 (GPa) y un coeficiente de Poisson (ν) de 0,15):

Tabla 4.3: Parámetros para caracterización geomecánica del túnel en granito fisurado:

H (m)	a	s	m_b	σ'_{cm} (MPa)	$\sigma'_{3máx}$ (MPa)	σ'_{3n}	ϕ' (rad)	c' (MPa)	E_m (GPa)	ν
50	0,514	0,001	3,057	7,820	0,692	0,020	0,975	0,342	2,799	0,15
100	0,514	0,001	3,057	7,820	1,327	0,038	0,892	0,536	2,799	0,15
150	0,514	0,001	3,057	7,820	1,943	0,056	0,841	0,700	2,799	0,15
200	0,514	0,001	3,057	7,820	2,546	0,073	0,803	0,846	2,799	0,15
250	0,514	0,001	3,057	7,820	3,140	0,090	0,774	0,980	2,799	0,15
300	0,514	0,001	3,057	7,820	3,728	0,107	0,749	1,105	2,799	0,15
350	0,514	0,001	3,057	7,820	4,309	0,123	0,728	1,223	2,799	0,15
400	0,514	0,001	3,057	7,820	4,885	0,140	0,710	1,335	2,799	0,15
450	0,514	0,001	3,057	7,820	5,457	0,156	0,694	1,442	2,799	0,15
500	0,514	0,001	3,057	7,820	6,025	0,172	0,679	1,545	2,799	0,15
550	0,514	0,001	3,057	7,820	6,590	0,188	0,666	1,644	2,799	0,15
600	0,514	0,001	3,057	7,820	7,151	0,204	0,654	1,740	2,799	0,15

Tipo de roca 2: Granito sin fisurar (con un módulo de Young (E_m) de 42,16965 (Gpa) y un coeficiente de Poisson (ν) de 0,2):

Tabla 4.4: Parámetros para caracterización geomecánica del túnel en granito sin fisurar:

H (m)	a	s	m_b	σ'_{cm} (MPa)	$\sigma'_{3máx}$ (MPa)	σ'_{3n}	ϕ' (rad)	c' (MPa)	E_m (GPa)	ν
50	0,501	0,062	13,103	92,459	0,858	0,005	1,213	3,811	42,170	0,2
100	0,501	0,062	13,103	92,459	1,646	0,009	1,180	4,091	42,170	0,2
150	0,501	0,062	13,103	92,459	2,410	0,013	1,155	4,392	42,170	0,2
200	0,501	0,062	13,103	92,459	3,158	0,018	1,135	4,695	42,170	0,2
250	0,501	0,062	13,103	92,459	3,895	0,022	1,118	4,995	42,170	0,2
300	0,501	0,062	13,103	92,459	4,623	0,026	1,103	5,289	42,170	0,2
350	0,501	0,062	13,103	92,459	5,344	0,030	1,090	5,578	42,170	0,2
400	0,501	0,062	13,103	92,459	6,059	0,034	1,078	5,860	42,170	0,2
450	0,501	0,062	13,103	92,459	6,768	0,038	1,067	6,137	42,170	0,2
500	0,501	0,062	13,103	92,459	7,473	0,042	1,057	6,409	42,170	0,2
550	0,501	0,062	13,103	92,459	8,173	0,045	1,047	6,675	42,170	0,2
600	0,501	0,062	13,103	92,459	8,870	0,049	1,039	6,936	42,170	0,2

Cálculo de la tensión vertical:

Se calculo la tensión vertical para cada sección del túnel utilizando la fórmula:

$$\sigma_v = \gamma z \quad (4.1)$$

La cual multiplica el peso específico de la roca por la profundidad (z).

Tabla 4.5: Tensión vertical para granito fracturado para cada sección del túnel:

H (m)	σ_v (MPa)
50	1,323
100	2,646
150	3,969
200	5,292
250	6,615
300	7,938
350	9,261
400	10,584
450	11,907
500	13,23

Tabla 4.6: Tensión vertical para granito sin fisurar para cada sección del túnel:

H (m)	σ_v (MPa)
50	1,421
100	2,842
150	4,263
200	5,684
250	7,105
300	8,526
350	9,947
400	11,368
450	12,789
500	14,21

Para esta instancia se estableció una tensión horizontal del mismo valor que la tensión vertical para ambos casos de roca.

4.3 Calculo radio plástico y desplazamiento:

Se obtuvieron los valores del radio plástico y del desplazamiento o deformación del túnel mediante las fórmulas descritas en la metodología, estos se calcularon para las distintas profundidades desde 50 a 500 metros para cada tipo de roca.

Tipo de roca 1: Granito fisurado:

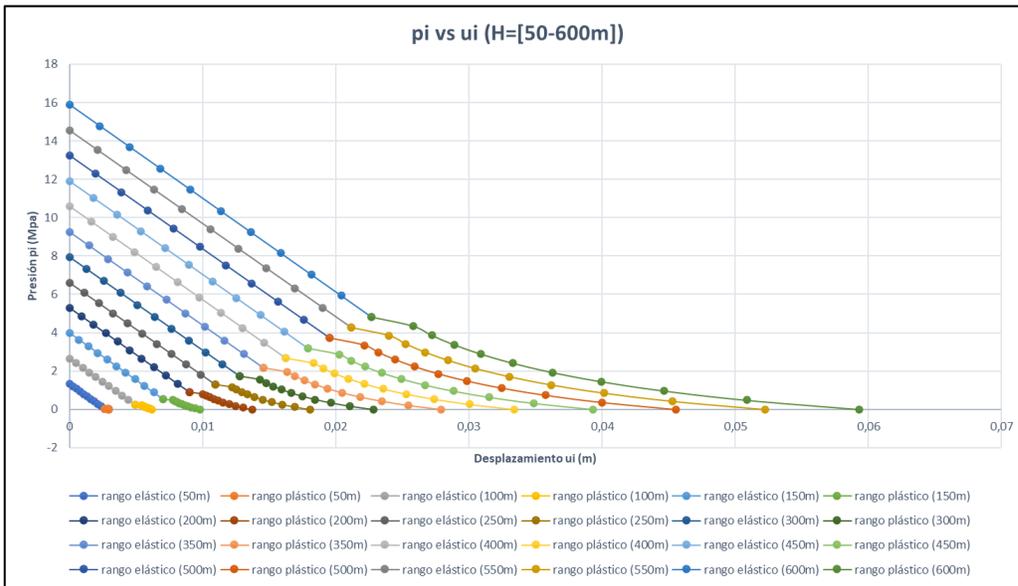


Figura 4.3: Presión interna versus desplazamiento para granito fisurado (elaboración propia).

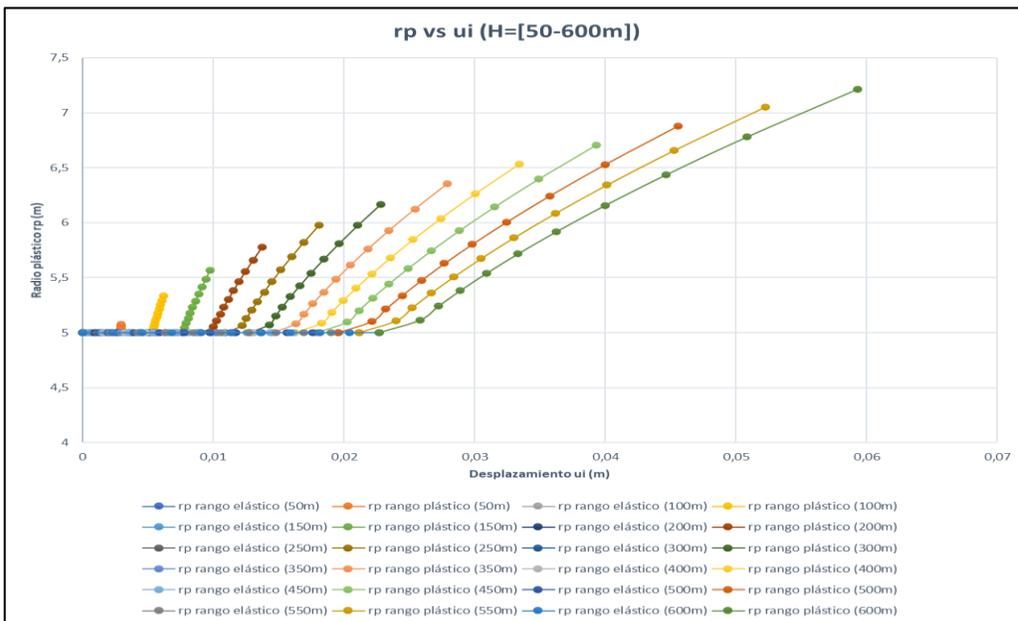


Figura 4.4: Radio plástico versus desplazamiento para profundidades de 50 a 600 (m) para granito fisurado (elaboración propia).

En los gráficos se puede observar que los desplazamientos que, en teoría, ocurrieron en el túnel alcanzaron valores más altos a mayores profundidades, obteniendo el valor máximo en el rango plástico de la mayor profundidad correspondientes a 0,06 (m) de desplazamiento aproximadamente.

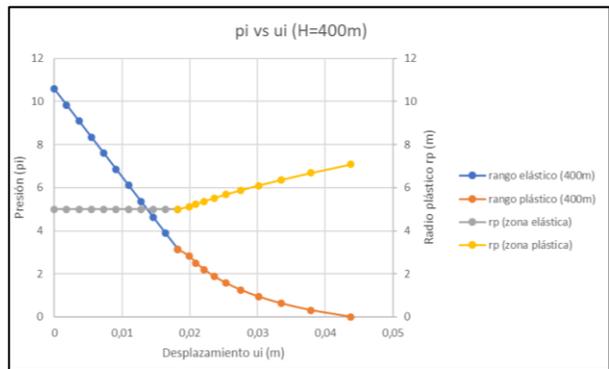
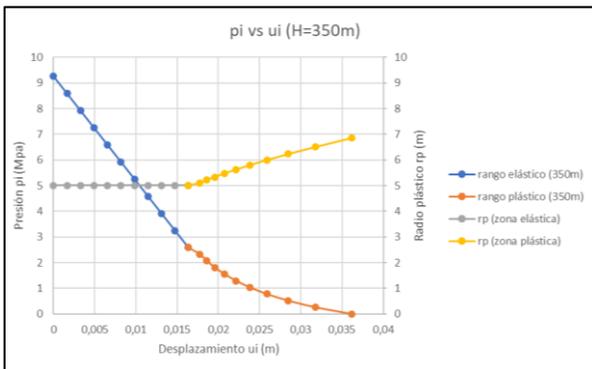
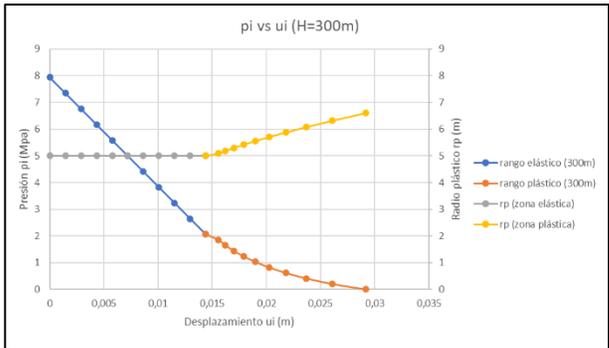
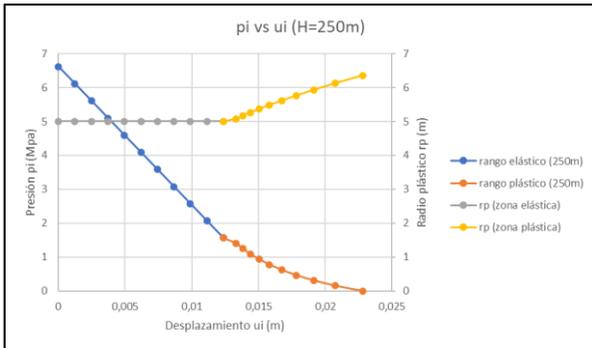
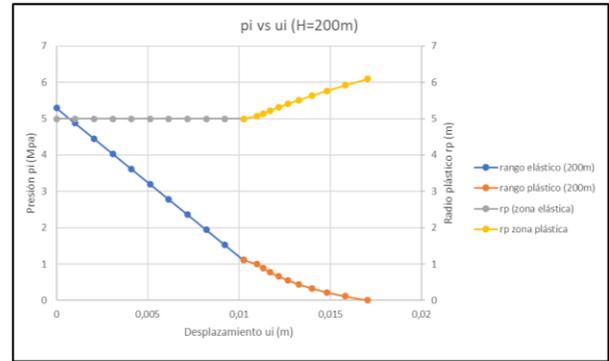
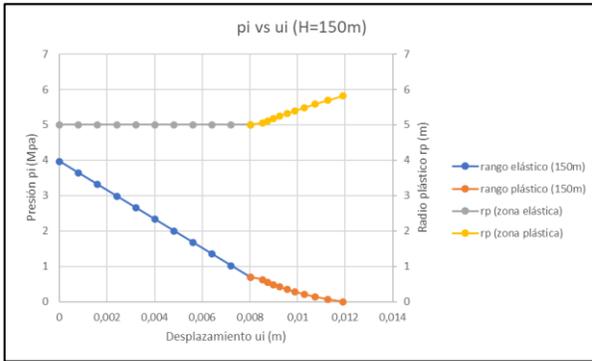
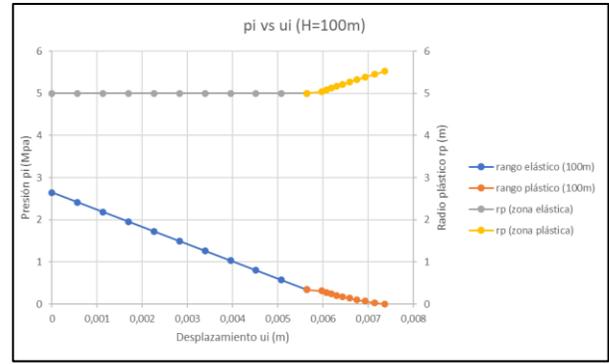
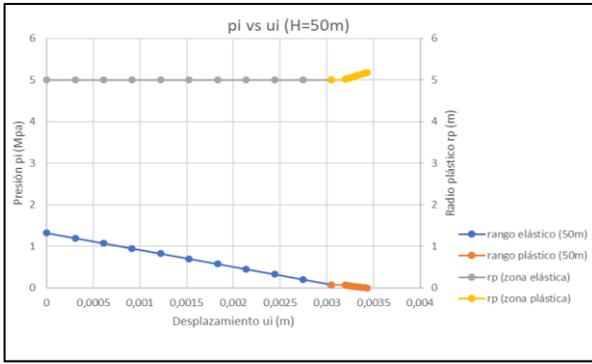


Figura 4.5: Radio plástico y presión interna versus desplazamiento para profundidades de 50 a 400 (m) para granito fisurado (elaboración propia).

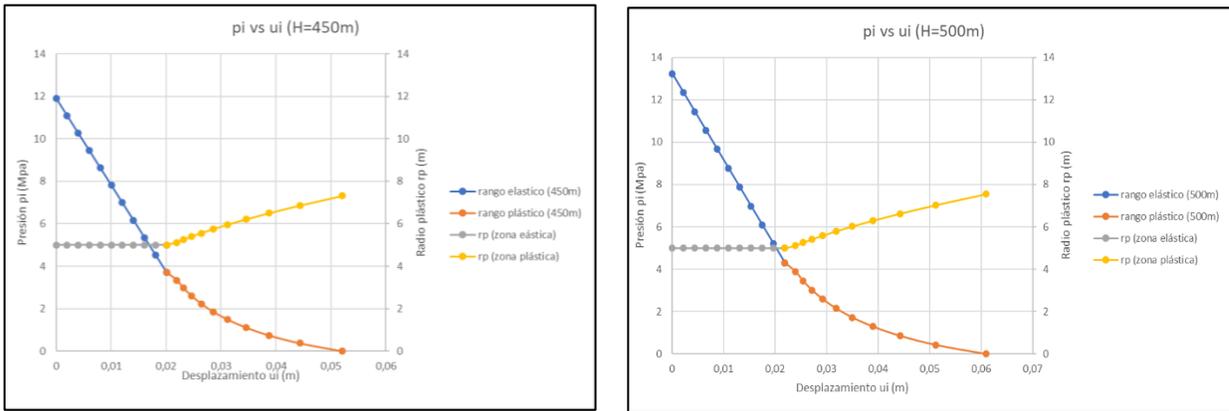


Figura 4.6: Radio plástico y presión interna versus desplazamiento para profundidades de 450 a 500 (m) para granito fisurado (elaboración propia).

Los resultados teóricos expuestos en las gráficas anteriores expusieron que, en la zona elástica del túnel, las curvas de presión vs desplazamiento y las de radio plástico vs desplazamiento presentaron un comportamiento lineal, mientras que, en la zona plástica, estas se comportaron de manera no lineal (con curvas más arqueadas). Además, se pudo observar que, a una mayor profundidad, los valores del radio plásticos tendían a ser más altos y se ejercía una mayor presión sobre el túnel.

Tipo de roca 2: Granito sin fisurar:

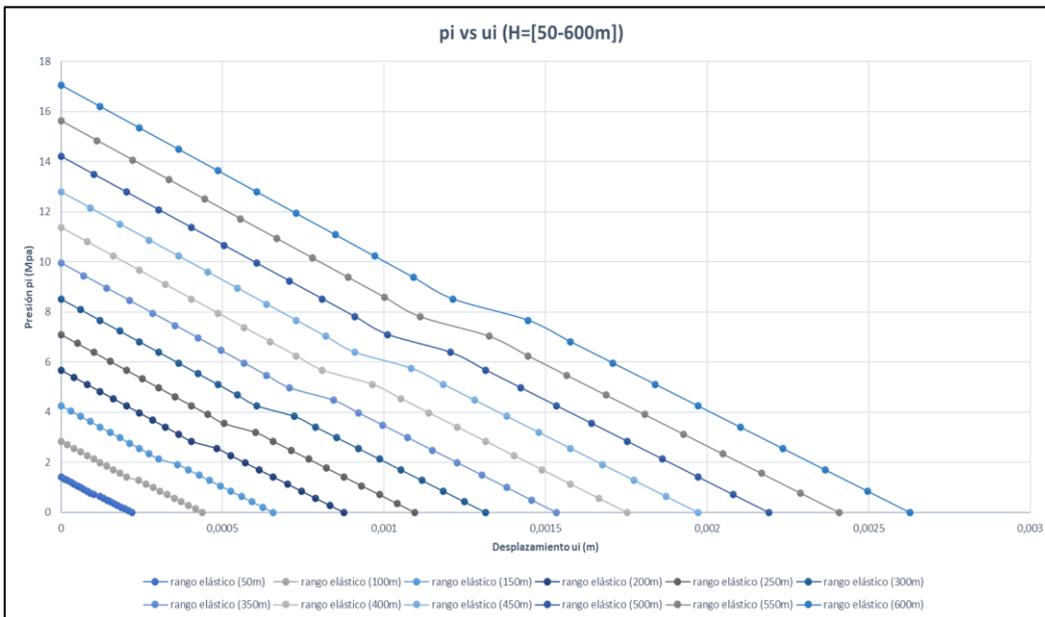


Figura 4.7: Presión interna versus desplazamiento para granito (elaboración propia).

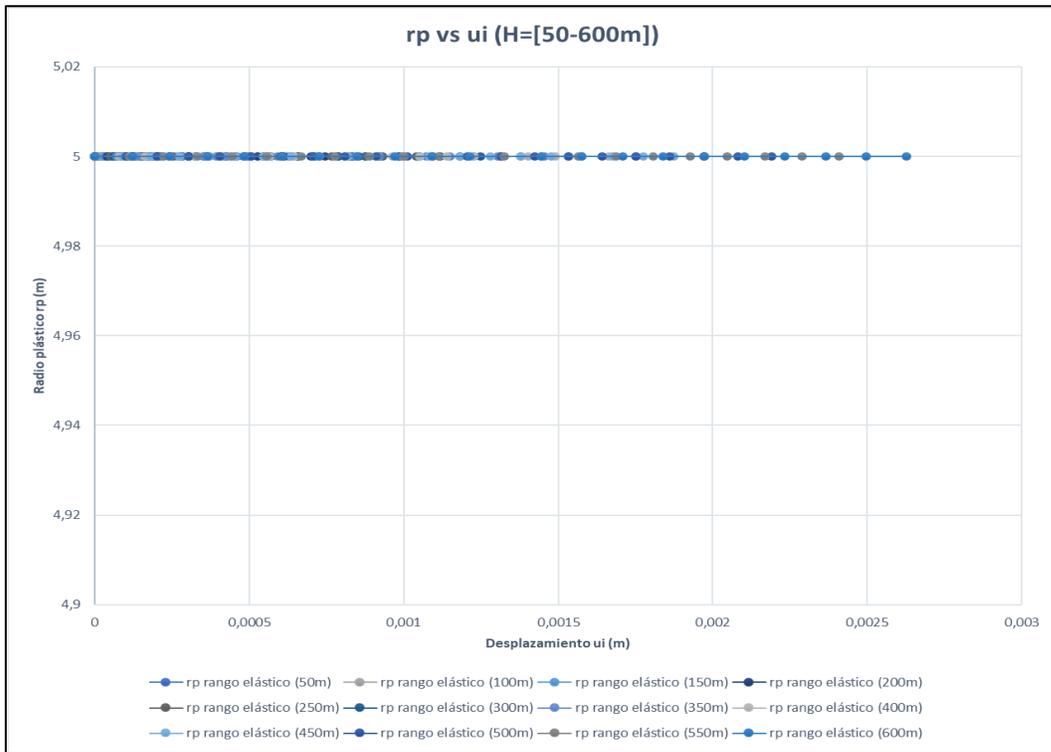


Figura 4.8: Radio plástico versus desplazamiento para profundidades de 50 a 600 (m) para granito (elaboración propia).

En el caso del granito sin fisurar, no se presentó una zona plástica a las profundidades evaluadas, probablemente por su valor de GSI elevado. Por otro lado, al igual que el granito fisurado, mantiene la tendencia de que a mayor profundidad aumente el desplazamiento.

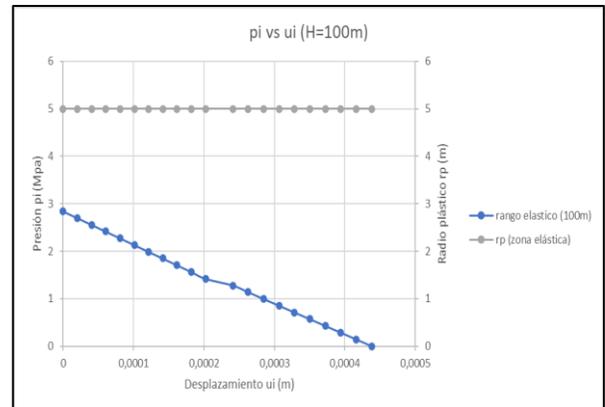
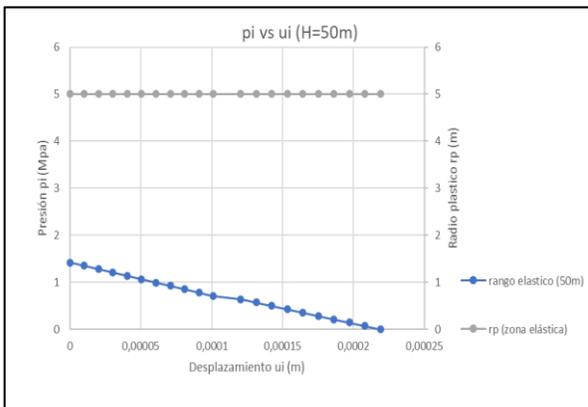


Figura 4.9: Radio plástico y presión interna versus desplazamiento para profundidades de 50 a 100m para granito (elaboración propia).

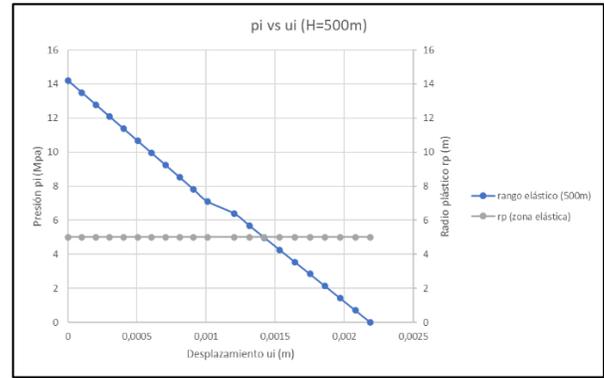
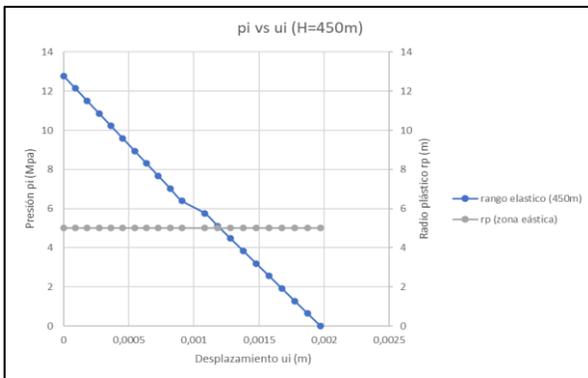
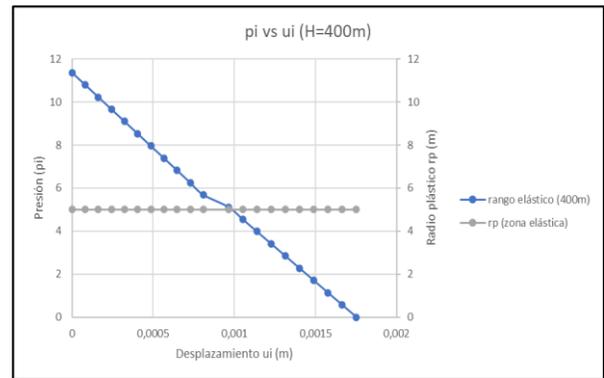
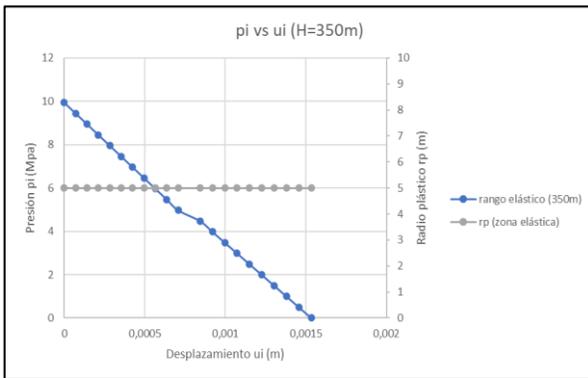
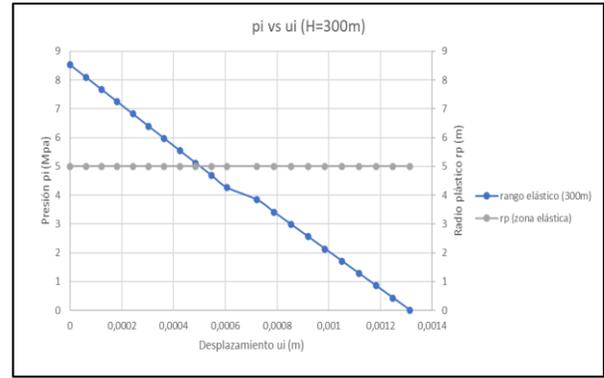
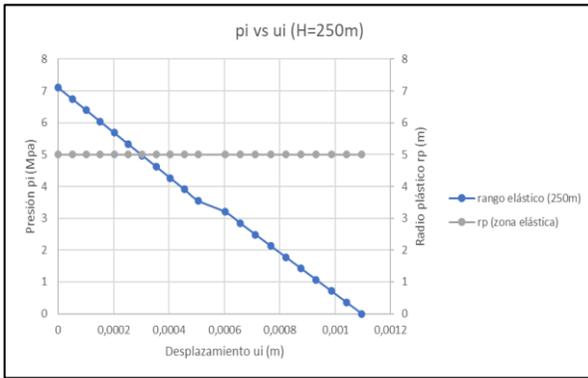
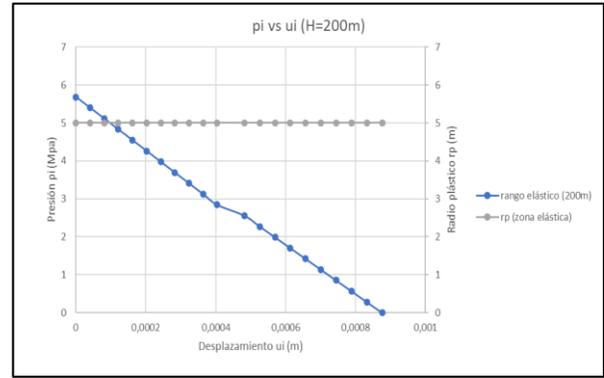
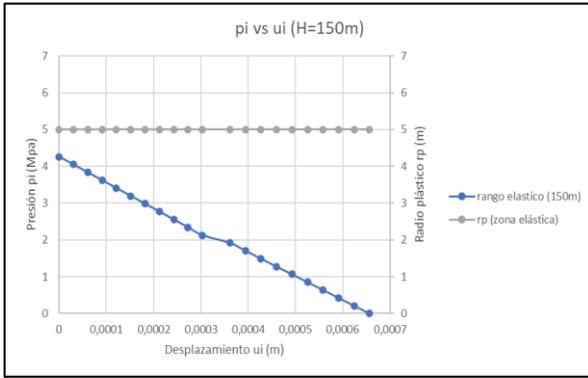


Figura 4.10: Radio plástico y presión interna versus desplazamiento para profundidades de 150 a 500m para granito (elaboración propia).

Al igual que en el granito fisurado, mientras a mayor profundidad esté el túnel, mayor será la presión a la que esté sometido. En este caso no se genera zona plástica alrededor del radio del túnel.

4.4 Resultados de software ANSYS:

Los datos correspondientes al módulo de Young y al coeficiente de Poisson fueron ingresados al software ANSYS Workbench 2020 R1 Student, posteriormente se creó la geometría en el software, basada en la geometría propuesta al principio del capítulo. Se hizo uso de los valores del radio plástico para diferenciar la zona elástica de la plástica e ingresar los valores característicos de cada sección.

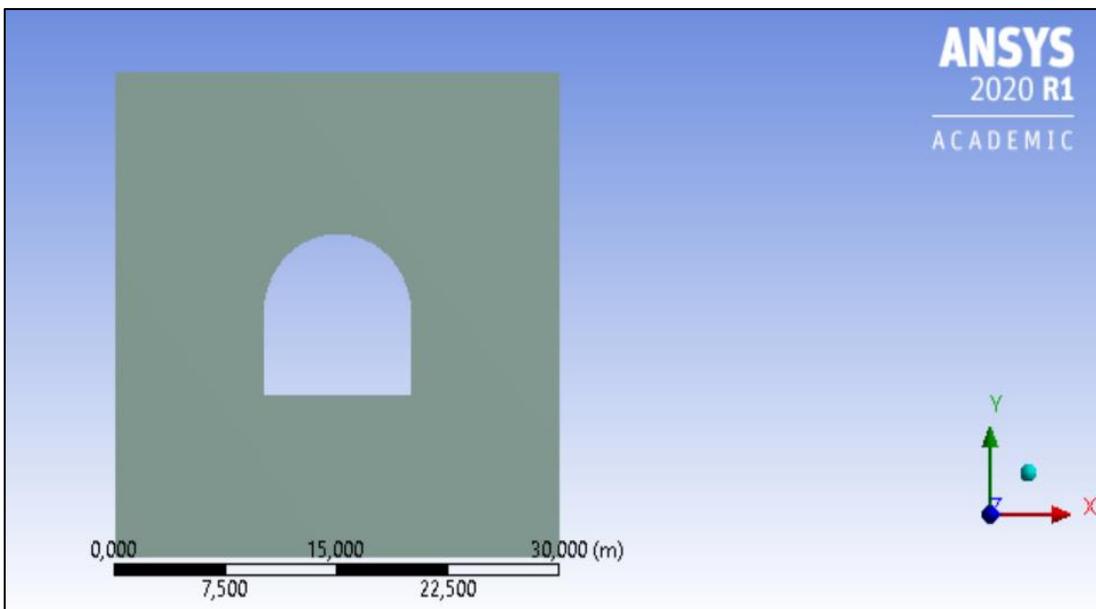


Figura 4.11: Vista frontal de túnel (tipo de roca: Granito) (elaboración propia).

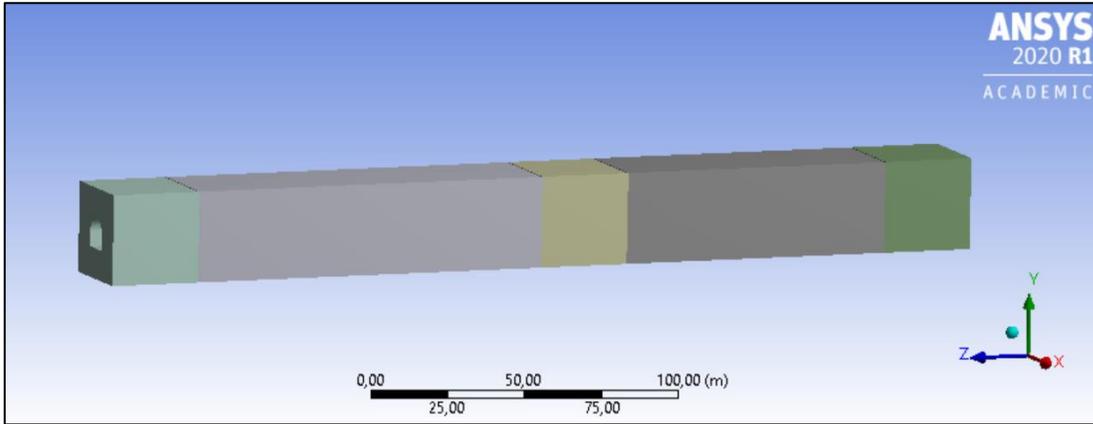


Figura 4.12: Vista lateral de túnel (tipo de roca: Granito) (elaboración propia).

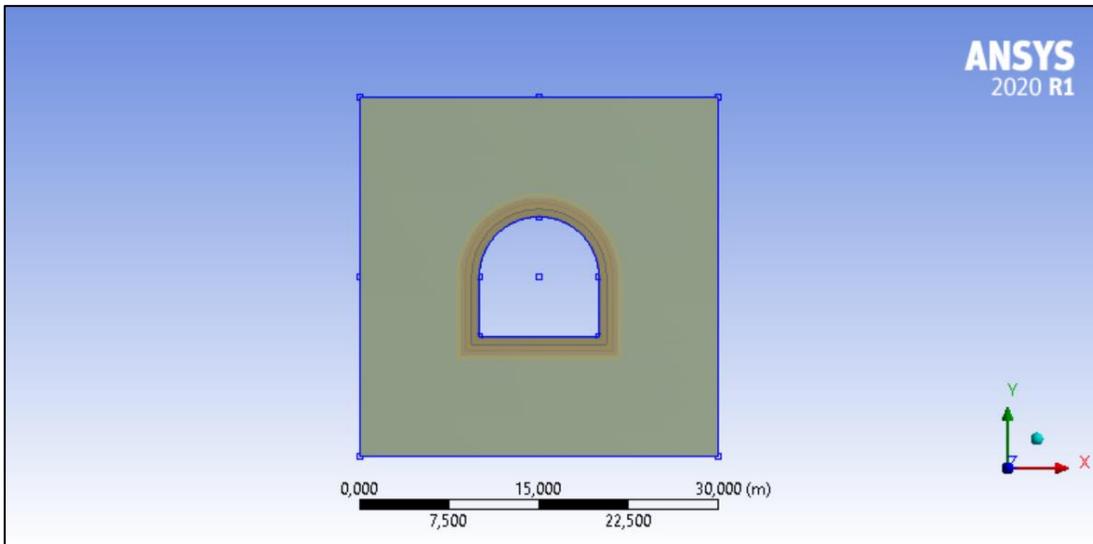


Figura 4.13: Vista frontal de túnel (tipo de roca: Granito fisurado) (elaboración propia).

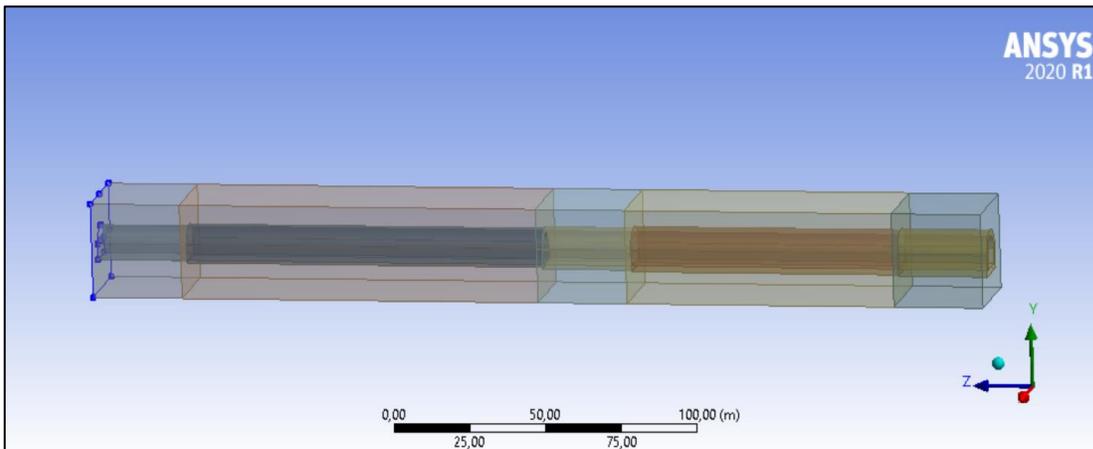


Figura 4.14: Vista lateral de túnel (tipo de roca: Granito fisurado) (elaboración propia).

Posteriormente al ingreso de la geometría se creó el modelo. Se ingresaron los valores de las presiones verticales y horizontales a las que está sujeto el modelo.

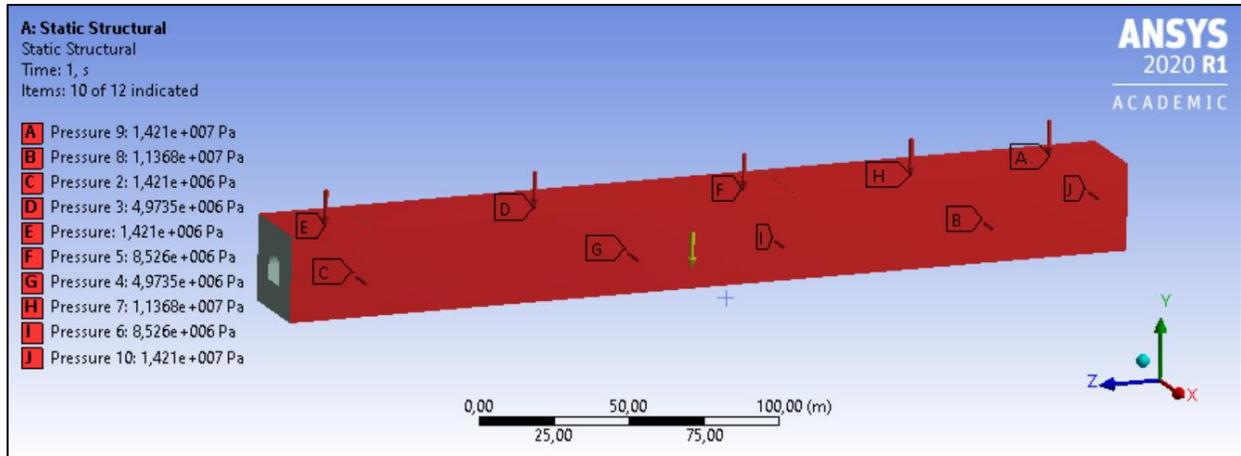


Figura 4.15: Modelo de túnel (tipo de roca: granito) (elaboración propia).

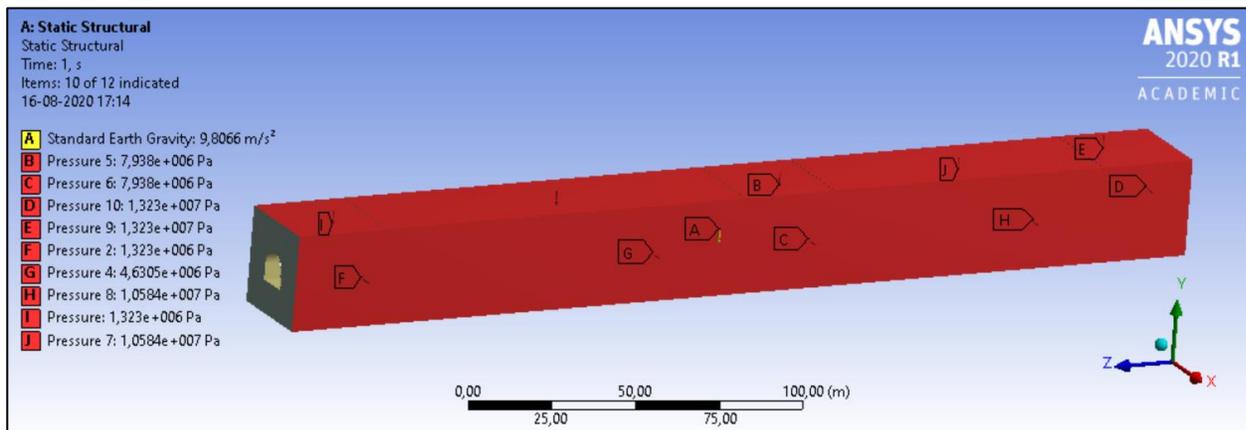


Figura 4.16: Modelo de túnel (tipo de roca: granito fisurado) (elaboración propia).

Luego del ingreso de datos, se procedió a la obtención de los resultados para cada tipo de roca. En una primera instancia se creó un modelo sin grietas y sin túnel para ambos tipos de rocas, para evaluar el comportamiento basal del terreno. Luego se creó un modelo con túnel, pero sin grieta, para observar como el túnel afecta al terreno.

Posteriormente se crearon 3 modelos basales para cada tipo de roca, correspondientes a 3 tipos de fallas, para cada uno de estos tipos de fallas se evaluaron seis grietas, en la clave del túnel, en la parte inferior en el eje del túnel, en la parte superior e inferior de

cada hastial. Cabe señalar que el túnel se creó avanzando en dirección contraria al eje z con centro en las coordenadas (0,0,0) en la zona inicial y (0,0,-300) en la zona final. La grieta empleada fue de un tipo semicircular, de un radio de 0,5 (m) cuyo centro se ubicó 5 (m) hacia el interior del túnel (avanzando en dirección contraria al eje z).

Deformación total:

En esta sección se muestran los resultados de la deformación total en los modelos sin grietas para el granito fisurado correspondientes a 5 condiciones distintas, mostrando en un principio una visión lateral de cada modelo, seguido de una perspectiva frontal y posterior de los mismos, para finalizar con un análisis que expone las similitudes entre modelos.

Los modelos creados son los siguientes:

Granito fisurado sin túnel y sin fallas:

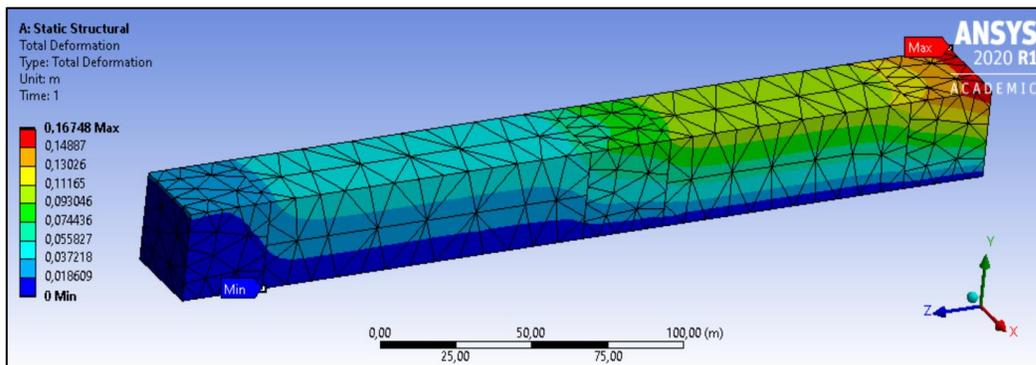


Figura 4.17: Modelado en ANSYS (granito fisurado sin túnel y sin fallas).

Granito fisurado con túnel y sin fallas:

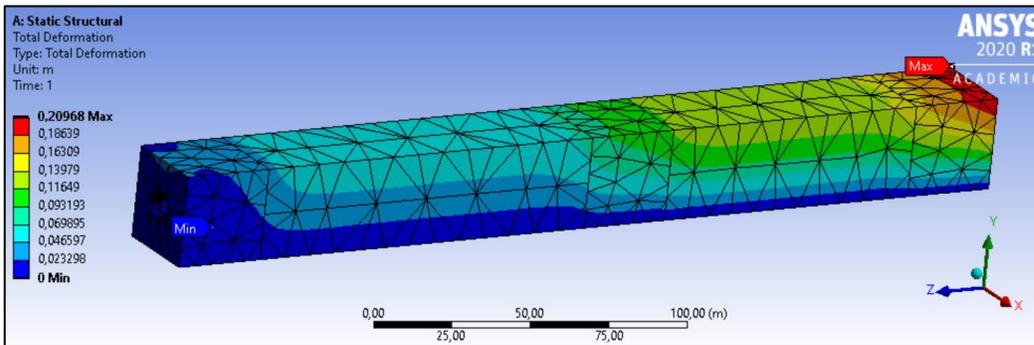


Figura 4.18: Modelado en ANSYS (granito fisurado con túnel y sin fallas).

Granito fisurado falla 45° perpendicular al eje del túnel (en contra buzamiento):

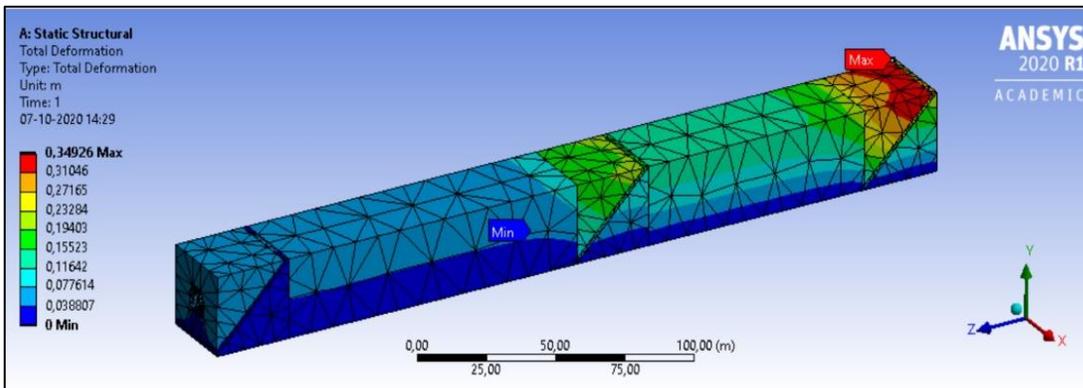


Figura 4.19: Modelado en ANSYS (granito fisurado falla 45° perpendicular al eje del túnel (en contra buzamiento)).

Granito fisurado falla 45° perpendicular al eje del túnel (a favor del buzamiento):

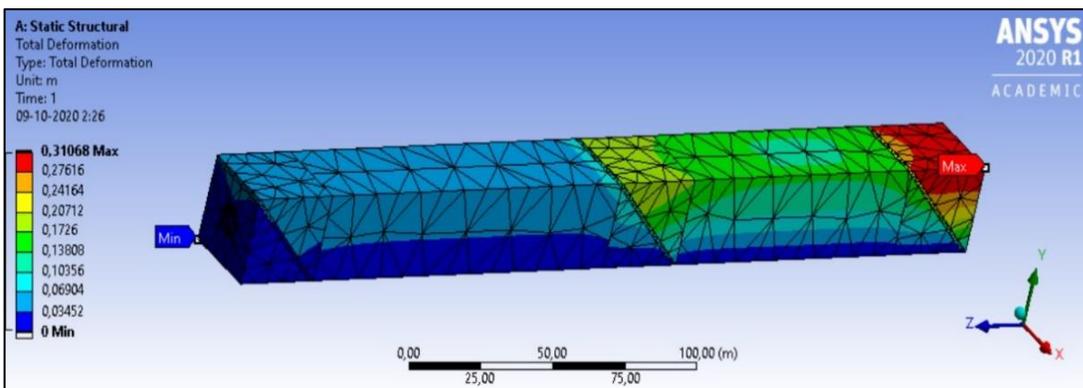


Figura 4.20: Modelado en ANSYS (granito fisurado falla 45° perpendicular al eje del túnel (a favor del buzamiento)).

Granito fisurado falla inferior de 45° paralela al eje del túnel:

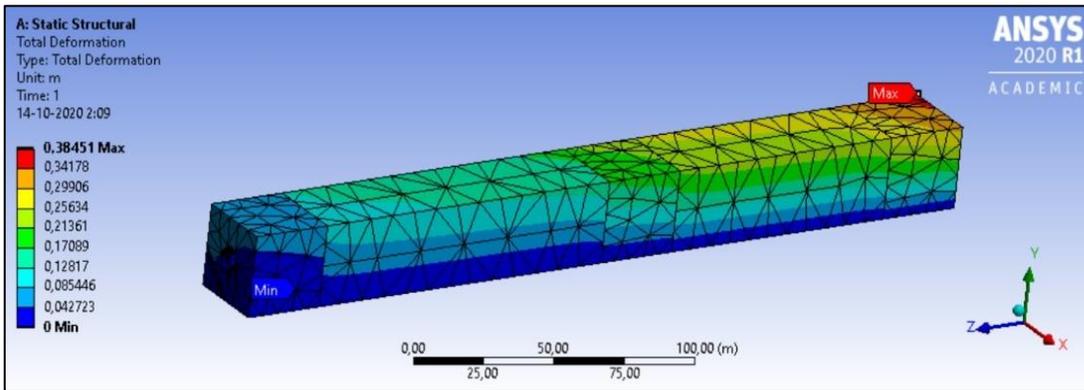


Figura 4.21: Modelado en ANSYS (granito fisurado falla inferior de 45° paralela al eje del túnel).

Granito fisurado sin túnel y sin fallas:

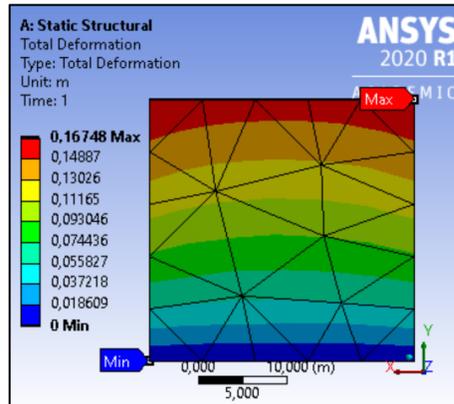
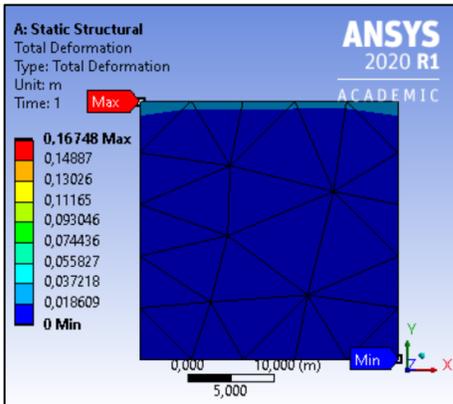


Figura 4.22: Granito fisurado sin túnel y sin fallas modelado en ANSYS.

Granito fisurado con túnel y sin fallas:

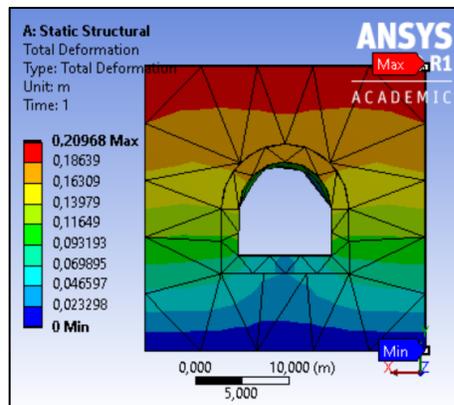
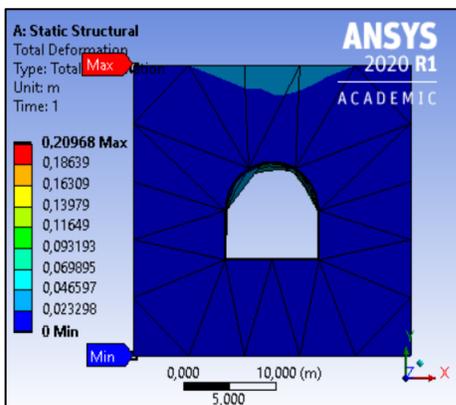


Figura 4.23: Granito fisurado con túnel y sin fallas modelado en ANSYS.

Granito fisurado falla 45° perpendicular al eje del túnel (en contra buzamiento):

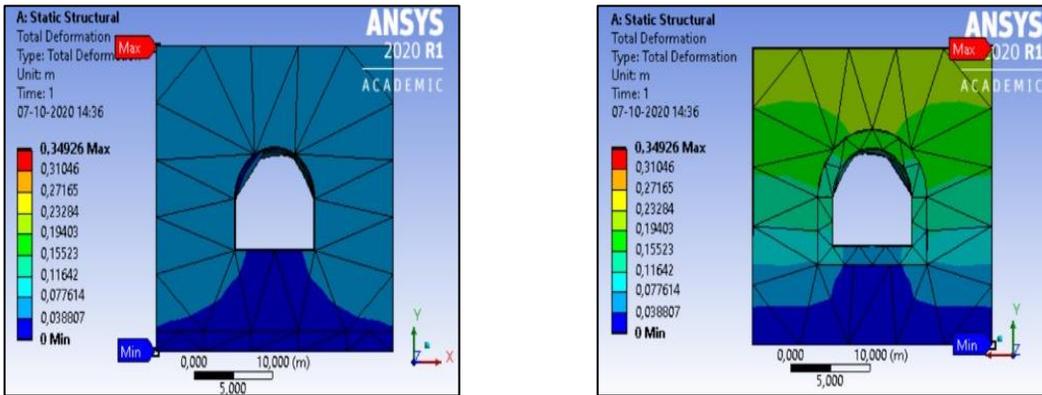


Figura 4.24: Granito fisurado falla 45° perpendicular al eje del túnel (en contra buzamiento) modelado en ANSYS.

Granito fisurado falla 45° perpendicular al eje del túnel (a favor del buzamiento):

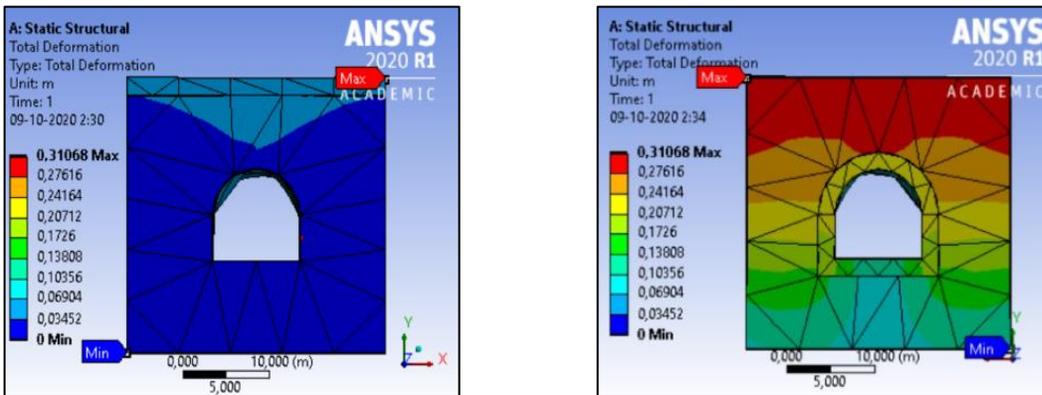


Figura 4.25: Granito fisurado falla 45° perpendicular al eje del túnel (a favor del buzamiento) modelado en ANSYS.

Granito fisurado falla inferior de 45° paralela al eje del túnel:

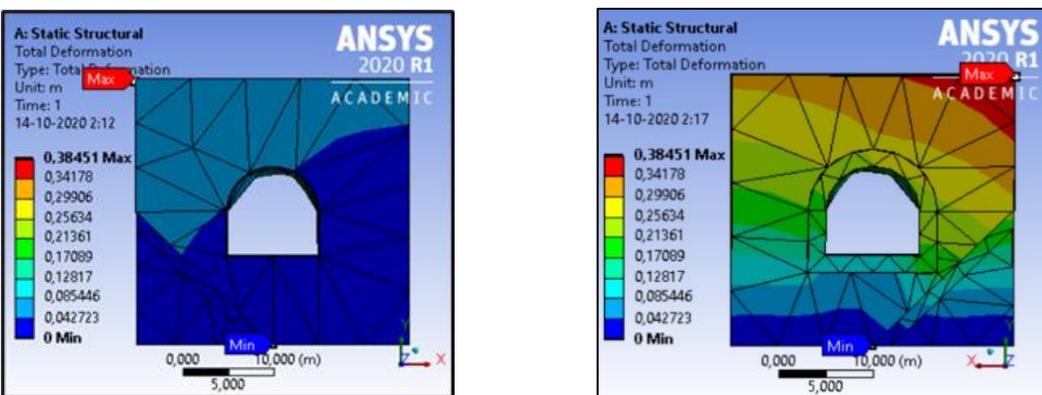


Figura 4.26: Granito fisurado falla inferior de 45° paralela al eje del túnel modelado en ANSYS.

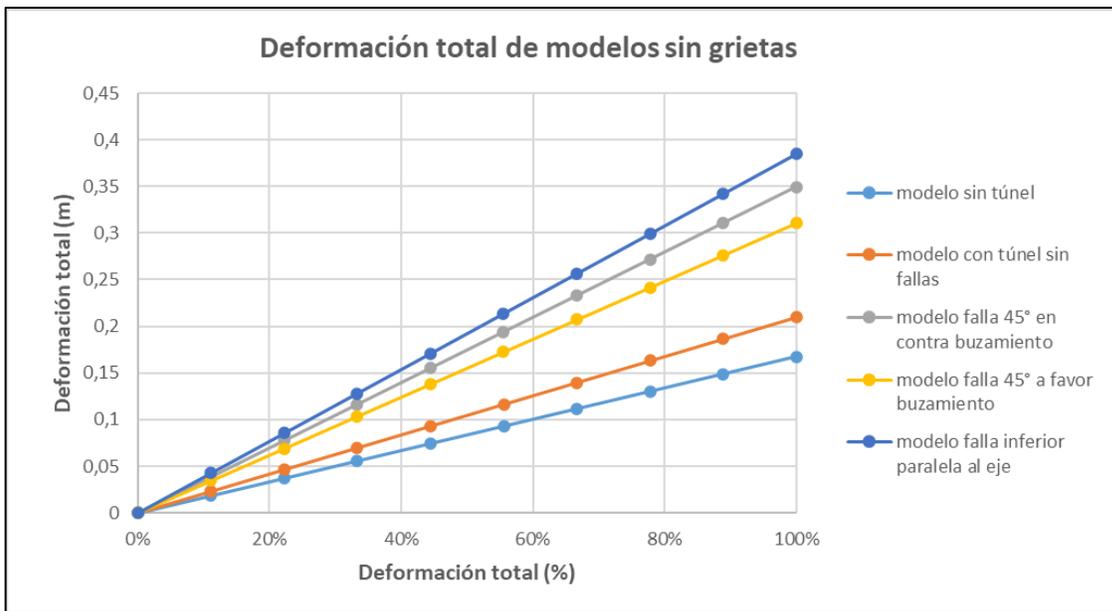


Figura 4.27: Deformación total para granito fisurado de los modelos sin grietas.

Para el modelo del estado basal del terreno antes de la construcción del túnel sin considerar la existencia de fallas preexistentes, se tiene una deformación total máxima de 0,16748 metros, siendo el menor valor de este parámetro encontrado entre los otros modelos sin grietas.

El modelo con túnel y sin fallas, como su nombre lo indica, consiste en un túnel ingresado en el terreno previamente modelado, este túnel presenta una deformación total máxima de 0,20968 metros por lo que se observa una alteración a la deformación del terreno en su estado basal de alrededor de 4 cm, las líneas de deformación se “comprimen” de manera uniforme para converger en el túnel.

El modelo de la falla de 45° perpendicular al eje del túnel (en contra buzamiento), consiste en un túnel con las mismas características que el modelo anterior, pero, el terreno en el que está ubicado presenta 3 fallas de 45° perpendiculares contra buzamiento ubicadas en la parte inicial, central y final del túnel respectivamente. La deformación total máxima

en este caso es de 0,34926 y es el segundo valor más alto de este parámetro para modelos sin grietas.

El modelo de la falla de 45° perpendicular al eje del túnel (a favor del buzamiento) es similar al modelo anterior, cambiando solamente la dirección de las fallas que en este caso se encuentran a favor del buzamiento. La deformación total máxima en esta instancia es de 0,31068 m siendo la falla modelada con menor deformación total. En los dos últimos modelos, las fallas actúan concentrando las deformaciones en la parte del túnel que queda superior a esta, lo que genera cambios más abruptos en las líneas de deformación comparándolos con otros modelos.

El modelo de la falla inferior de 45° paralela al eje del túnel, el terreno posee una falla paralela al eje del túnel en la parte inferior izquierda del modelo. Este modelo alcanza la mayor deformación total máxima de todos los modelos sin grietas. La deformación en este modelo se concentra en la parte izquierda, en donde se encuentra la falla, por lo que las líneas de deformación se encuentran “inclinadas” en esta dirección.

Tensión equivalente:

De manera similar a la sección de deformación, en este apartado se muestran los resultados de la tensión equivalente en los modelos sin grietas para el granito fisurado correspondientes a 5 condiciones distintas, mostrando en un principio una visión lateral de cada modelo, seguido de una perspectiva frontal y posterior de los mismos, para finalizar con un análisis que expone las similitudes entre modelos.

Granito fisurado sin túnel y sin fallas:

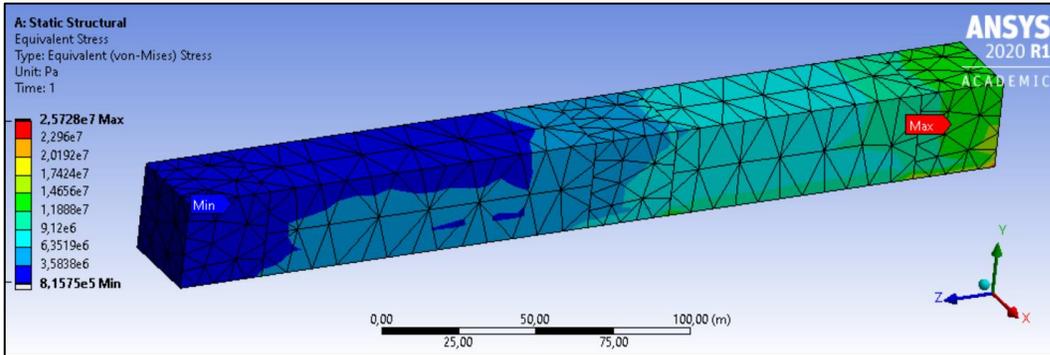


Figura 4.28: Modelado en ANSYS de tensión equivalente (granito fisurado sin túnel y sin fallas).

Granito fisurado con túnel y sin fallas:

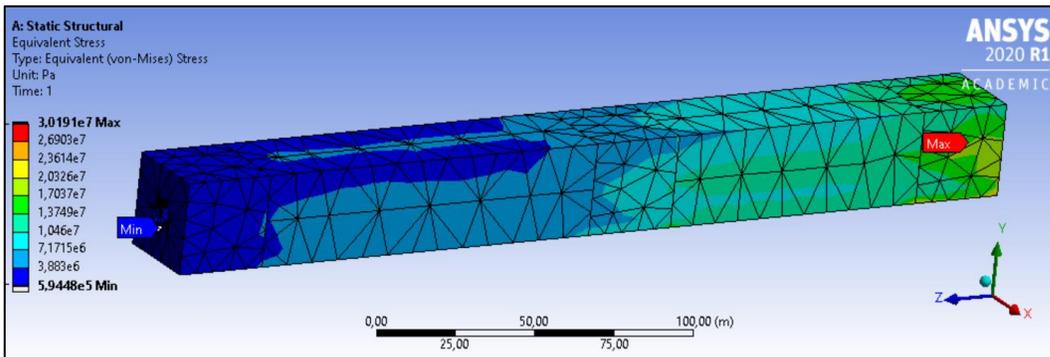


Figura 4.29: Modelado en ANSYS de tensión equivalente (granito fisurado con túnel y sin fallas).

Granito fisurado falla 45° perpendicular al eje del túnel (en contra buzamiento):

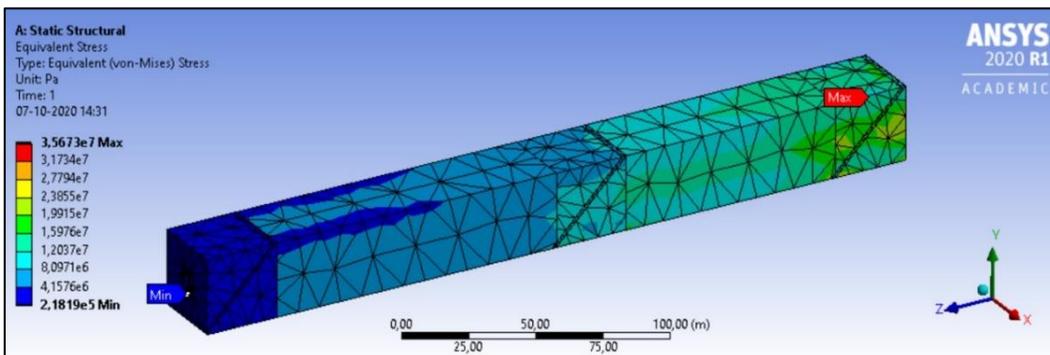


Figura 4.30: Modelado en ANSYS de tensión equivalente (granito fisurado falla 45° perpendicular al eje del túnel (en contra buzamiento)).

Granito fisurado falla 45° perpendicular al eje del túnel (a favor del buzamiento):

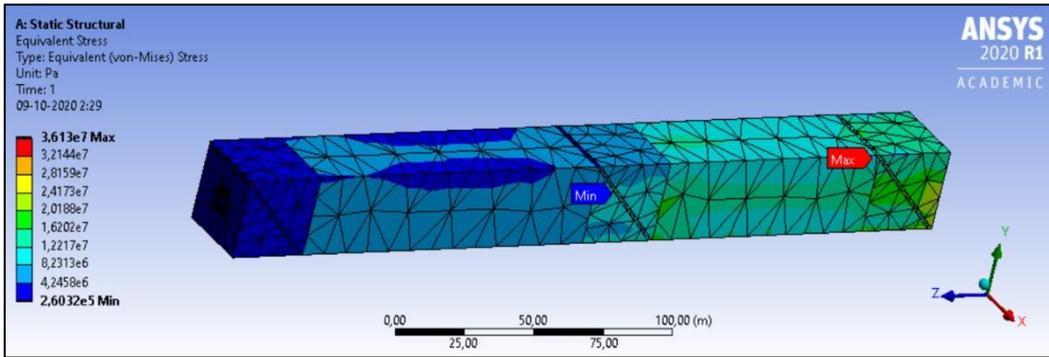


Figura 4.31: Modelado en ANSYS de tensión equivalente (granito fisurado falla 45° perpendicular al eje del túnel (a favor del buzamiento)).

Granito fisurado falla inferior de 45° paralela al eje del túnel:

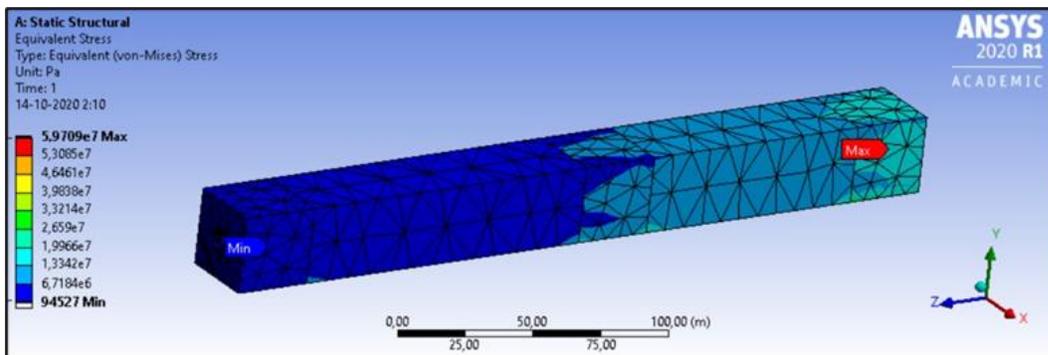


Figura 4.32: Modelado en ANSYS de tensión equivalente (granito fisurado falla inferior de 45° paralela al eje del túnel).

Granito fisurado sin túnel y sin fallas:

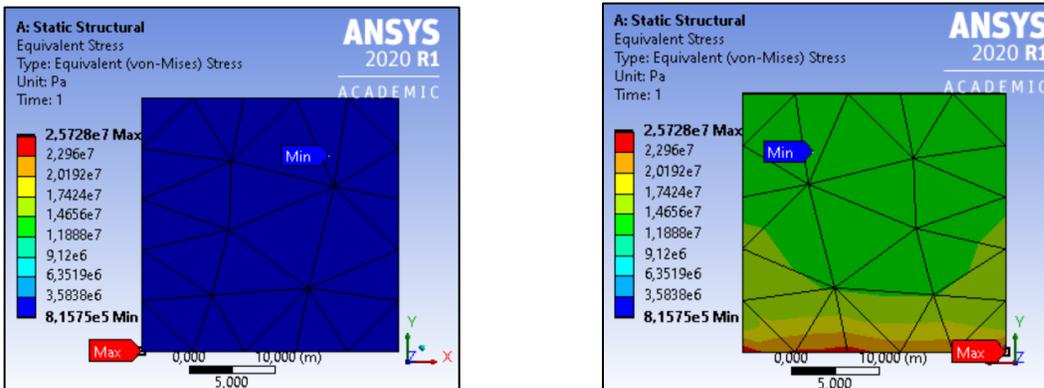


Figura 4.33: Modelado en ANSYS de tensión equivalente. Granito fisurado sin túnel y sin fallas.

Granito fisurado con túnel y sin fallas:

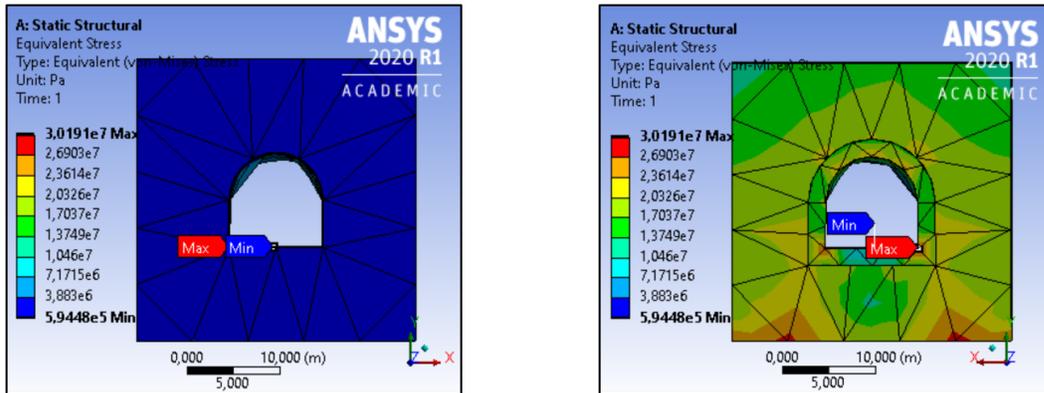


Figura 4.34: Modelado en ANSYS de tensión equivalente. Granito fisurado con túnel y sin fallas.

Granito fisurado falla 45° perpendicular al eje del túnel (en contra buzamiento):

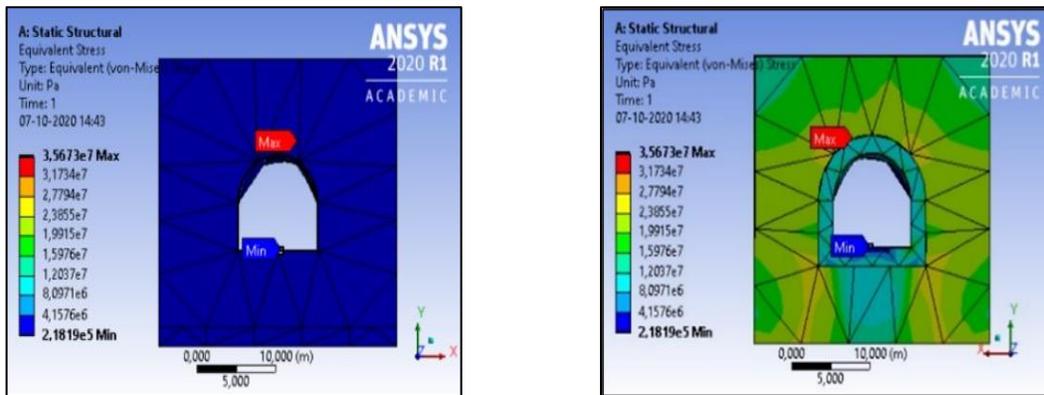


Figura 4.35: Modelado en ANSYS de tensión equivalente. Granito fisurado falla 45° perpendicular al eje del túnel (en contra buzamiento).

Granito fisurado falla 45° perpendicular al eje del túnel (a favor del buzamiento):

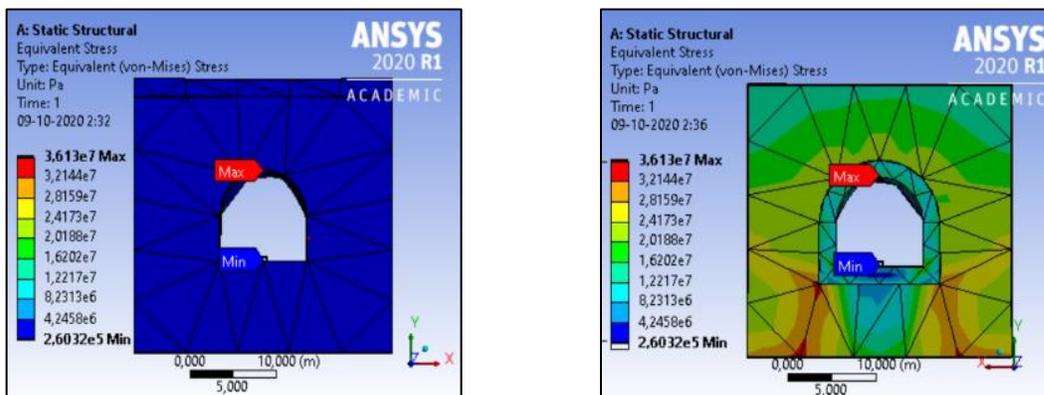


Figura 4.36: Modelado en ANSYS de tensión equivalente. Granito fisurado falla 45° perpendicular al eje del túnel (a favor del buzamiento).

Granito fisurado falla inferior de 45° paralela al eje del túnel:

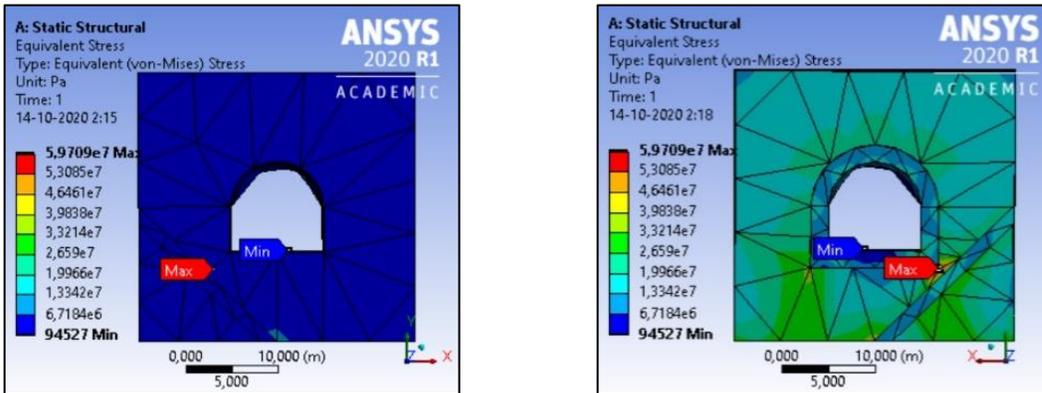


Figura 4.37: Modelado en ANSYS de tensión equivalente. Granito fisurado falla inferior de 45° paralela al eje del túnel.

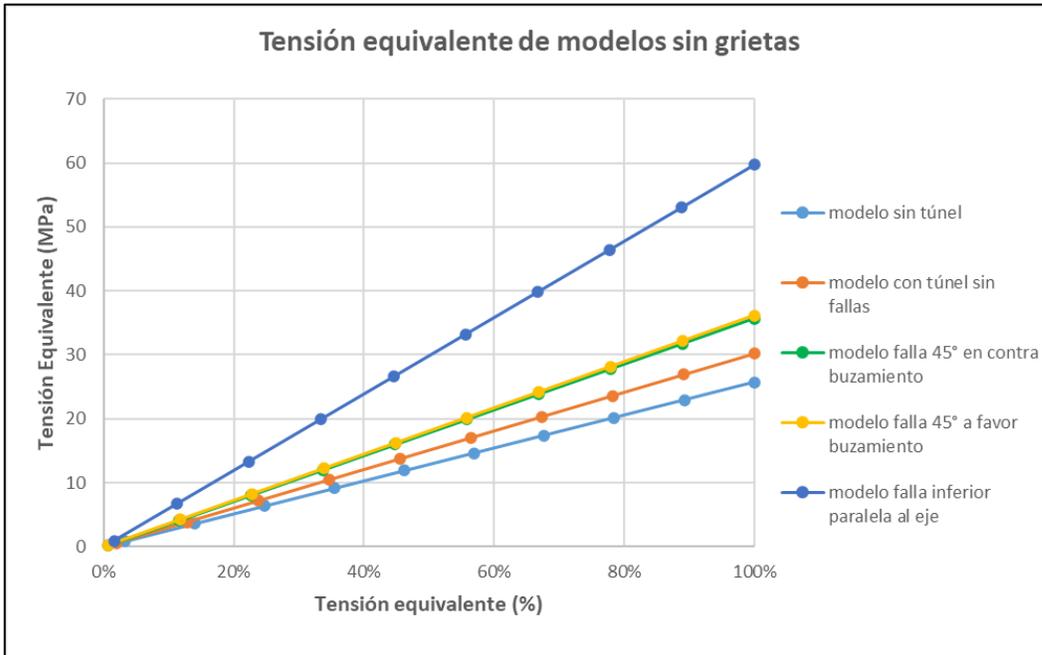


Figura 4.38: Tensión equivalente para granito fisurado de los modelos sin grietas.

Para el modelo del estado basal del terreno, sin túneles y sin fallas, se tiene una tensión equivalente máxima de 25,728 MPa, este valor es el más bajo de este parámetro en todos los modelos sin grietas del granito fisurado.

En el modelo con túnel y sin fallas, el estado de las tensiones cambia al ingresar el túnel, teniendo ahora una concentración de tensiones en las esquinas del túnel, especialmente

en las esquinas inferiores en el cual se encontró el valor máximo de tensión equivalente de 30,191 MPa.

En el modelo de la falla de 45° perpendicular al eje del túnel (en contra buzamiento), se generó una concentración de tensiones en las afueras del radio plástico de manera simétrica en ambos laterales del túnel y el valor máximo de tensión equivalente se alcanzó en un punto cercano a la clave del túnel con un valor de 35,673 MPa.

En el modelo de la falla de 45° perpendicular al eje del túnel (a favor del buzamiento), se generó una tensión equivalente mayor a la del anterior modelo, con un valor de 36,13 MPa. Se generó una concentración de tensiones en las afueras del radio elástico del túnel, mayoritariamente en las esquinas inferiores del túnel, manteniendo la simetría, el valor más alto de tensión equivalente se alcanzó en la clave del túnel.

En el modelo de la falla inferior de 45° paralela al eje del túnel, se mantiene el patrón de que a las afueras del radio plástico se concentran las tensiones, pero a su vez se alcanzan los valores más altos de tensión entre la esquina inferior izquierda del radio plástico del túnel y la falla paralela ubicada en esta misma esquina. Este modelo presenta las tensiones más altas de todas las condiciones sin grietas modeladas con un valor de 59,709 MPa.

En general, en todos los modelos sin grietas, se encuentran valores más altos de deformación en las zonas ubicadas a mayor profundidad, teniendo tendencia a ser mayor en la parte superior del modelo. Para el caso de la tensión ocurre algo similar, los valores más altos de tensión también se suelen encontrar a mayor profundidad, pero, existe una tendencia de esta a ser mayor en la parte inferior del modelo.

Tensión de corte:

De manera similar a las secciones anteriores, en este apartado se muestran los resultados de la tensión de corte en los modelos sin grietas para el granito fisurado correspondientes a 5 condiciones distintas, mostrando en un principio una visión lateral de cada modelo, seguido de una perspectiva frontal y posterior de los mismos, para finalizar con un análisis que expone las similitudes entre modelos.

Granito fisurado sin túnel y sin fallas:

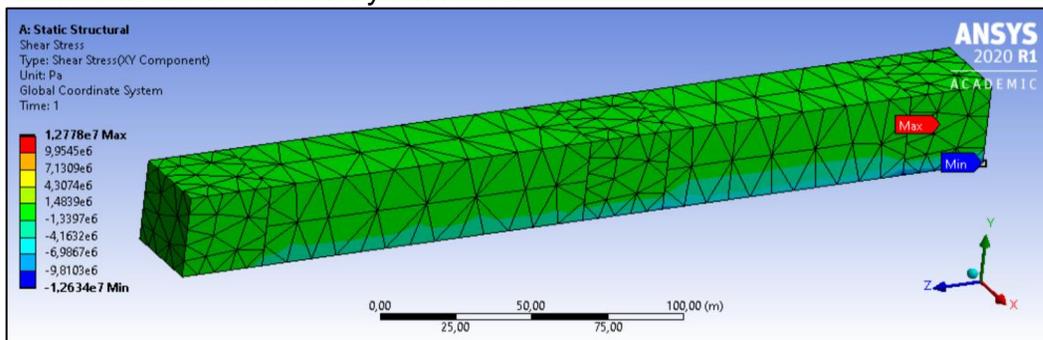


Figura 4.39: Tensión de corte para granito fisurado sin túnel y sin fallas modelado en ANSYS.

Granito fisurado con túnel y sin fallas:

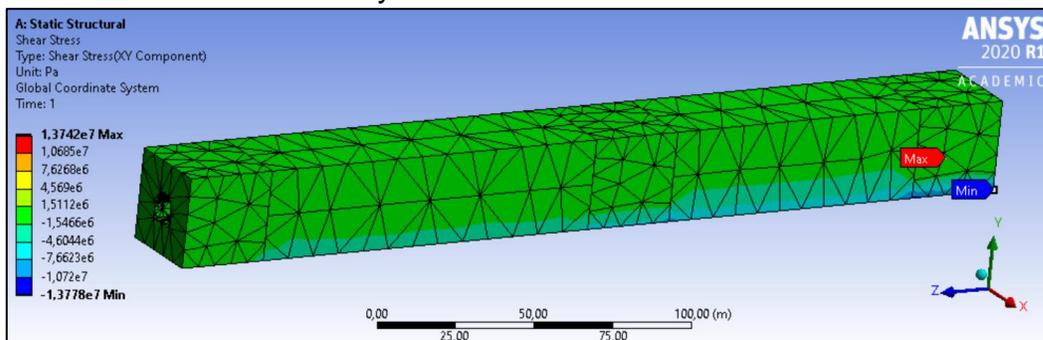


Figura 4.40: Tensión de corte para granito fisurado con túnel y sin fallas modelado en ANSYS.

Granito fisurado falla 45° perpendicular al eje del túnel (en contra buzamiento):

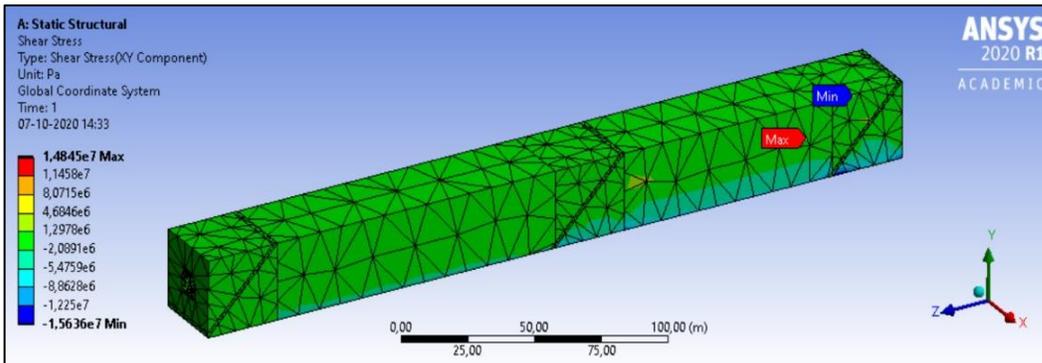


Figura 4.41: Tensión de corte para granito fisurado falla 45° perpendicular al eje del túnel (en contra buzamiento) modelado en ANSYS.

Granito fisurado falla 45° perpendicular al eje del túnel (a favor del buzamiento):

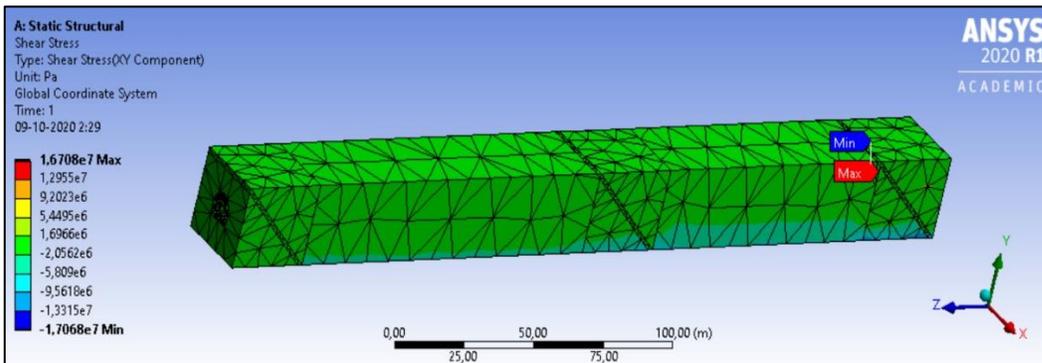


Figura 4.42: Tensión de corte para granito fisurado falla 45° perpendicular al eje del túnel (a favor del buzamiento) modelado en ANSYS.

Granito fisurado falla inferior de 45° paralela al eje del túnel:

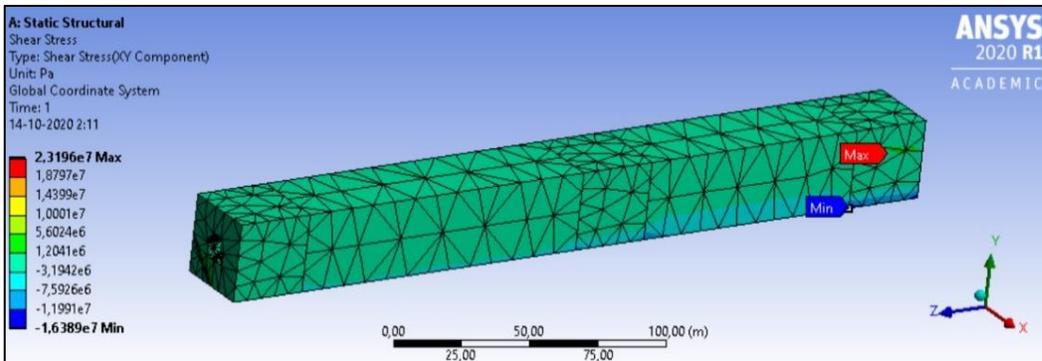


Figura 4.43: Tensión de corte para granito fisurado falla inferior de 45° paralela al eje del túnel modelado en ANSYS.

Granito fisurado sin túnel y sin fallas:

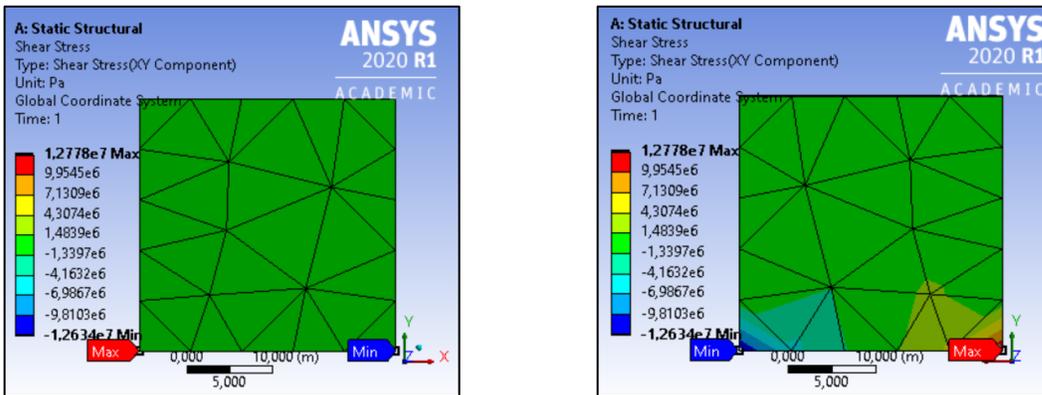


Figura 4.44: Tensión de corte en ANSYS para granito fisurado sin túnel y sin fallas.

Granito fisurado con túnel y sin fallas:

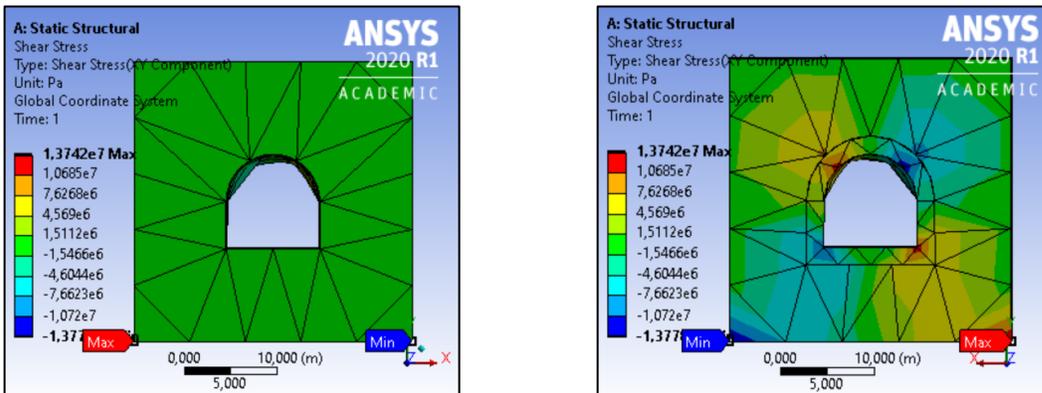


Figura 4.45: Tensión de corte en ANSYS para granito fisurado con túnel y sin fallas.

Granito fisurado falla 45° perpendicular al eje del túnel (en contra buzamiento):

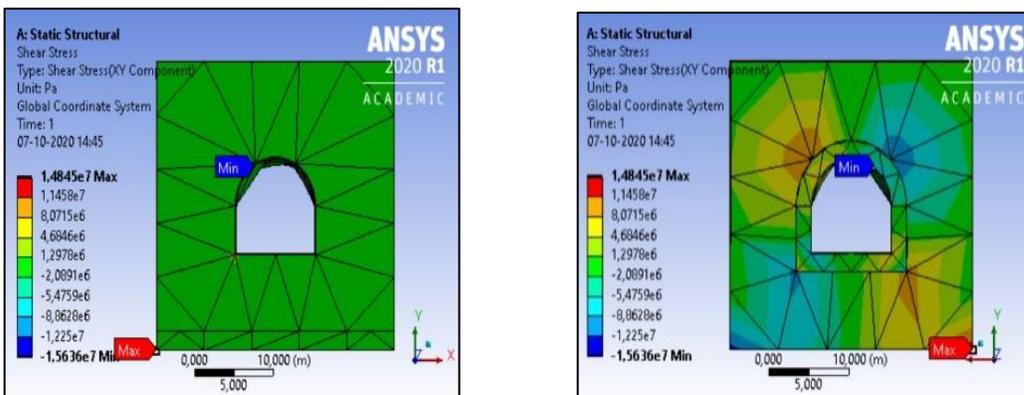


Figura 4.46: Tensión de corte en ANSYS para granito fisurado falla 45° perpendicular al eje del túnel (en contra buzamiento).

Granito fisurado falla 45° perpendicular al eje del túnel (a favor del buzamiento):

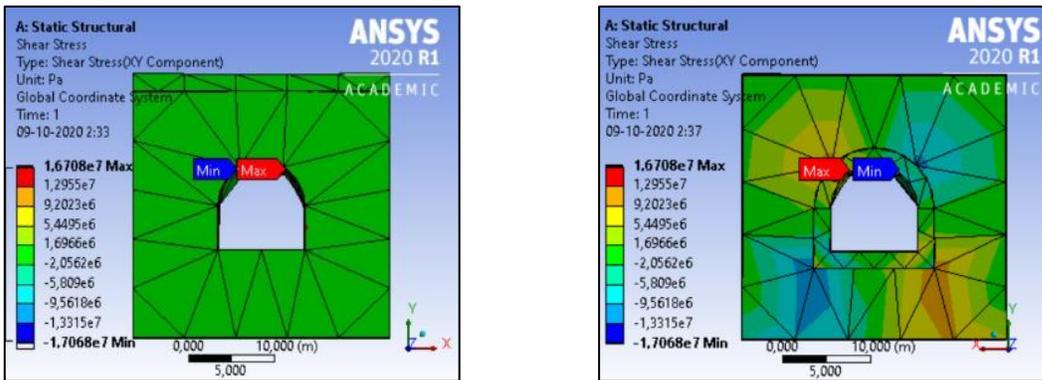


Figura 4.47: Tensión de corte en ANSYS para granito fisurado falla 45° perpendicular al eje del túnel (a favor del buzamiento).

Granito fisurado falla inferior de 45° paralela al eje del túnel:

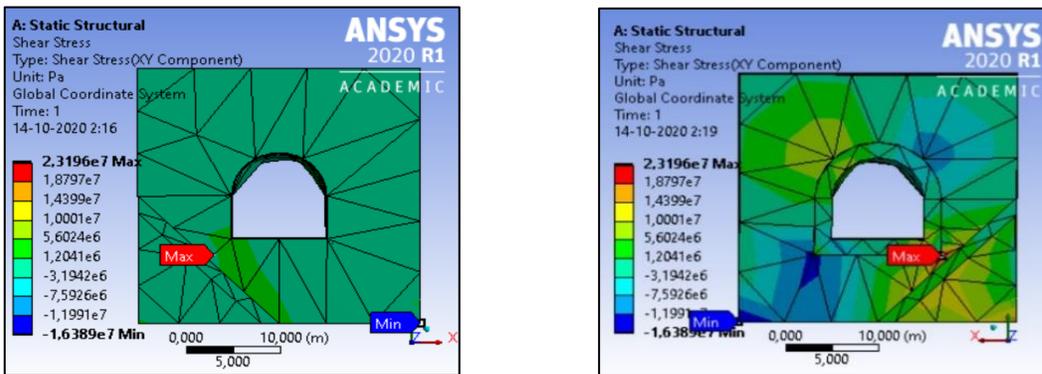


Figura 4.48: Tensión de corte en ANSYS para granito fisurado falla inferior de 45° paralela al eje del túnel.

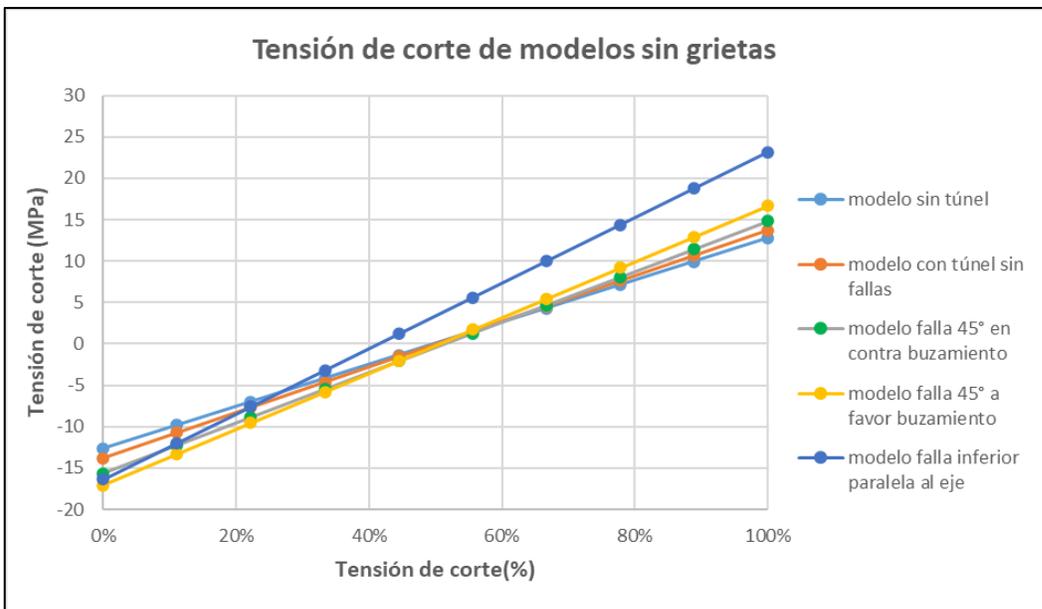


Figura 4.49: Tensión de corte para granito fisurado de modelos sin grietas.

En el modelo del estado basal del terreno, sin túnel y sin fallas, se tiene a la tensión de corte concentrada con valores positivos en la parte inferior izquierda del modelo, mientras que en la parte inferior derecha se encuentra concentrada con valores negativos de magnitud máxima similar a los valores positivos de la parte izquierda. La tensión de corte máxima para este modelo es de 12,778 MPa y la tensión de corte mínima es de -12,634 MPa.

En el modelo con túnel y sin fallas, la tensión de corte máxima y mínima se mantuvieron relativamente en los mismos lugares, pero con el ingreso del túnel al modelo, se generaron concentraciones de tensiones tanto de valores positivos como negativos en las esquinas superiores e inferiores del túnel. La tensión de corte máxima para este modelo aumentó a 13,742 MPa y la mínima se estableció en -13,778 MPa.

El modelo de la falla de 45° perpendicular al eje del túnel (en contra buzamiento), mantiene la tendencia del anterior en cuanto a la forma en la que están concentradas las tensiones y modifica el lugar en el que se encuentran las tensiones de corte máximas y mínimas. La tensión máxima, como en los anteriores modelos, se encuentra en la esquina inferior izquierda, sin embargo, está en una posición más alejada del final del túnel, ubicada en la zona superior de la falla que está en la parte más profunda del túnel. La tensión mínima se encuentra también en la zona superior de la falla que está en la parte más profunda del túnel, cerca de la clave del túnel en la esquina superior izquierda. Los valores de tensión mínima y máxima son respectivamente -15,636 MPa y 14,845 MPa.

El modelo de la falla de 45° perpendicular al eje del túnel (a favor del buzamiento), mantiene la forma en la cual se distribuyen las tensiones en los modelos anteriores. En cuanto a los valores máximos y mínimos de tensión de corte, estos se ubicaron en la zona superior derecha e izquierda respectivamente, cerca de la clave del túnel y cerca de la zona en la que se encuentra la falla de la parte más profunda del túnel. Los valores de tensión de corte máximo y mínimo son respectivamente 16,708 MPa y -17,068 MPa.

En el modelo de la falla inferior de 45° paralela al eje del túnel, se mantiene la forma en la cual se distribuyen las tensiones con concentraciones en las esquinas superiores e inferiores del túnel. El valor de tensión de corte mínimo se encuentra en la esquina inferior derecha del túnel como en los primeros modelos y es de -16,389 MPa. La tensión de corte máximo se encuentra en la parte inferior izquierda del túnel, entre el final de la zona plástica y la zona en la que esta ubicada la falla inferior, con un valor de 23,196 MPa.

Tabla 4.7: Valores máximos de los parámetros evaluados para granito fisurado:

Modelos Granito fisurado	Deformación total Máx. (m)	Tensión Equivalente Máx. (MPa)	Tensión de corte Máx. (MPa)
Sin túnel y sin fallas	0,16748	25,728	12,778
Con túnel y sin fallas	0,20968	30,191	13,742
Falla de 45° perpendicular en contra buzamiento	0,34926	35,673	14,845
Falla de 45° perpendicular a favor de buzamiento	0,31068	36,13	16,708
Falla inferior paralela a eje del túnel	0,38451	59,709	23,196

La tabla anterior muestra un resumen de los valores Máximos encontrados en los modelos de granito fisurado para los distintos parámetros obtenidos. Cabe señalar que la profundidad a la que se encuentra el túnel modelado va desde los 50m a los 500m.

Deformación total:

En esta sección se muestran los resultados de la deformación total en los modelos sin grietas para el granito sin fisurar correspondientes a 5 condiciones distintas, mostrando en un principio una visión lateral de cada modelo, seguido de una perspectiva frontal y posterior de los mismos, para finalizar con un análisis que expone las similitudes entre modelos. Los modelos creados son los siguientes:

Granito sin fisurar sin túnel y sin fallas:

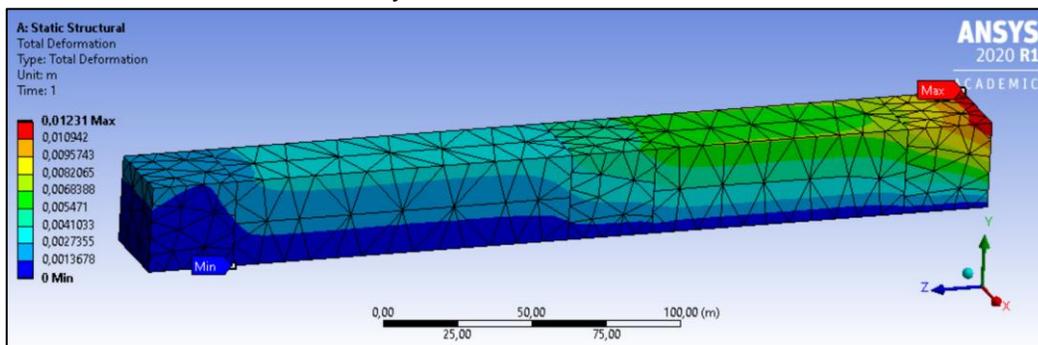


Figura 4.50: Modelado en ANSYS (granito sin fisurar; sin túnel y sin fallas).

Granito sin fisurar con túnel y sin fallas:

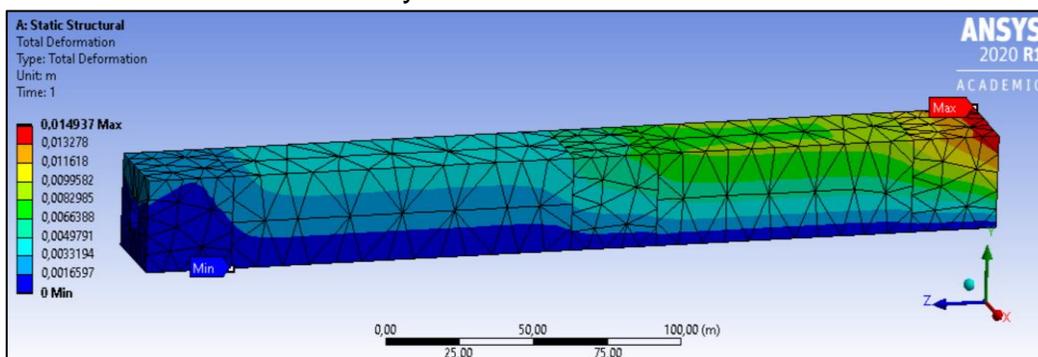


Figura 4.51: Modelado en ANSYS (granito sin fisurar; con túnel y sin fallas).

Granito sin fisurar falla 45° perpendicular al eje del túnel (en contra buzamiento):

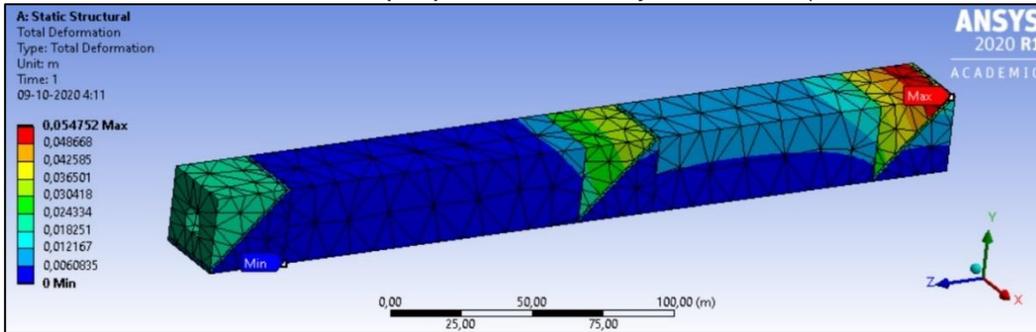


Figura 4.52: Modelado en ANSYS (granito sin fisurar; falla 45° perpendicular al eje del túnel (en contra buzamiento)).

Granito sin fisurar falla 45° perpendicular al eje del túnel (a favor del buzamiento):

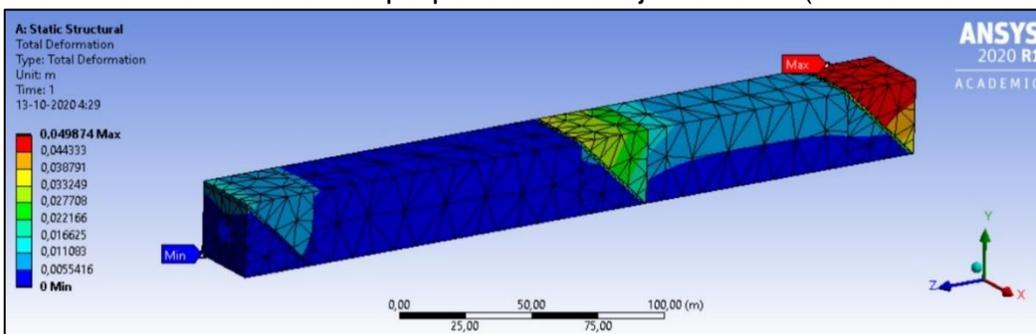


Figura 4.53: Modelado en ANSYS (granito sin fisurar; falla 45° perpendicular al eje del túnel (a favor del buzamiento)).

Granito sin fisurar falla inferior de 45° paralela al eje del túnel:

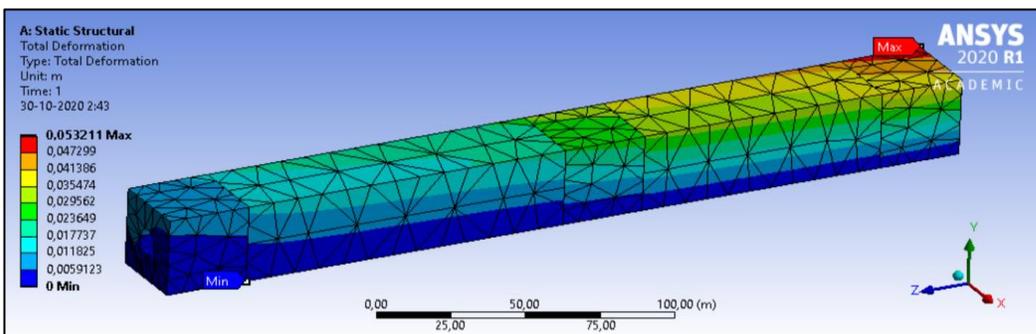


Figura 4.54: Modelado en ANSYS (granito sin fisurar; falla inferior de 45° paralela al eje del túnel).

Granito sin fisurar sin túnel y sin fallas:

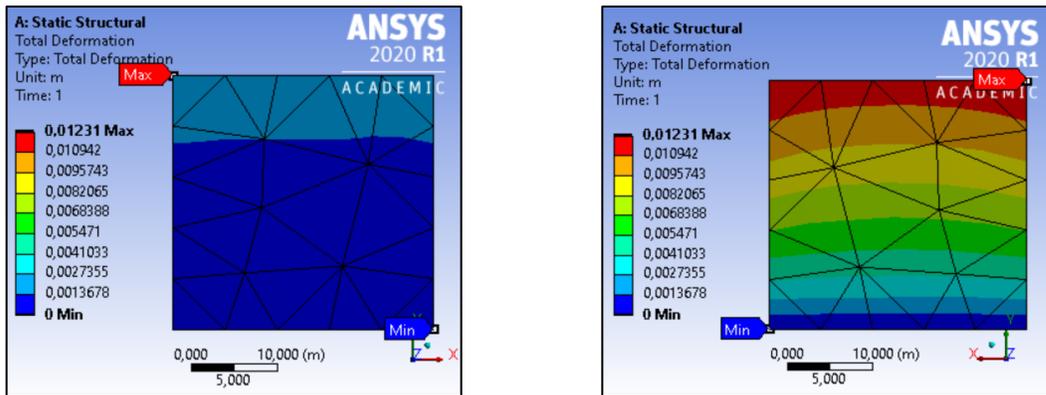


Figura 4.55: Granito sin fisurar; sin túnel y sin fallas modelado en ANSYS.

Granito sin fisurar con túnel y sin fallas:

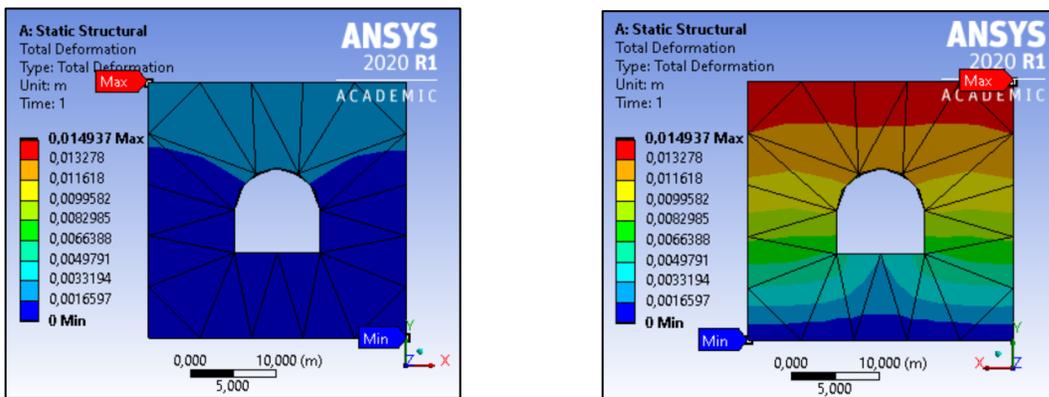


Figura 4.56: Granito sin fisurar; con túnel y sin fallas modelado en ANSYS.

Granito sin fisurar falla 45° perpendicular al eje del túnel (en contra buzamiento):

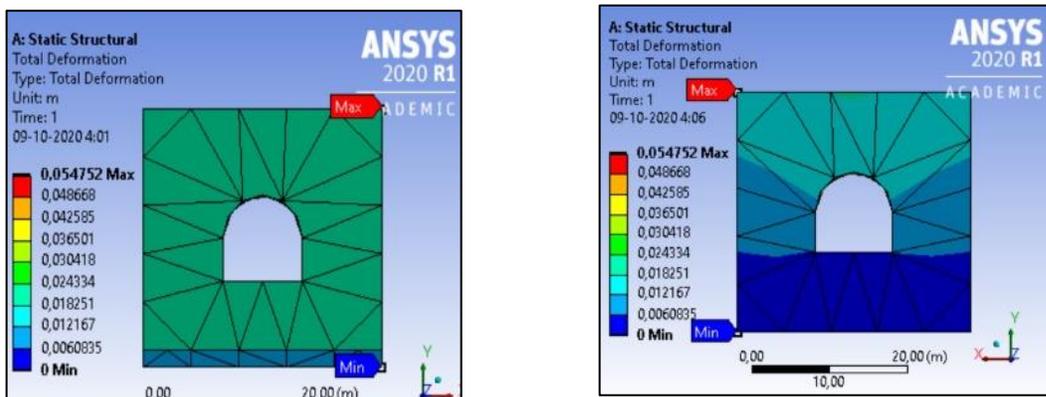


Figura 4.57: Granito sin fisurar falla 45° perpendicular al eje del túnel (en contra buzamiento) modelado en ANSYS.

Granito sin fisurar falla 45° perpendicular al eje del túnel (a favor del buzamiento):

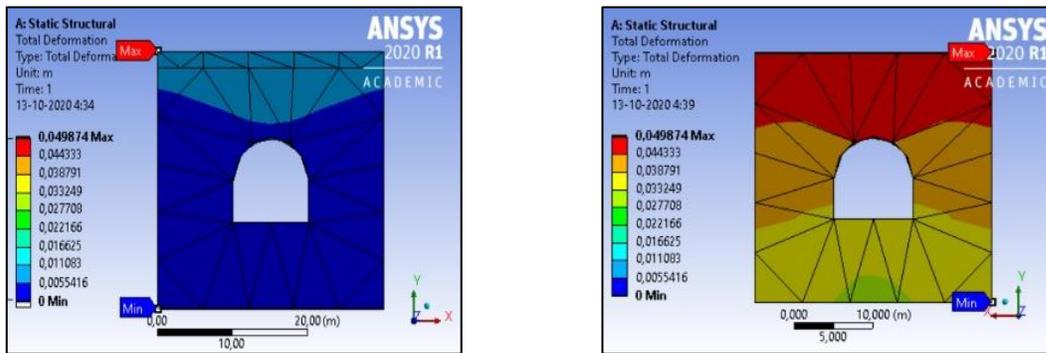


Figura 4.58: Granito sin fisurar falla 45° perpendicular al eje del túnel (a favor del buzamiento) modelado en ANSYS.

Granito sin fisurar falla inferior de 45° paralela al eje del túnel:

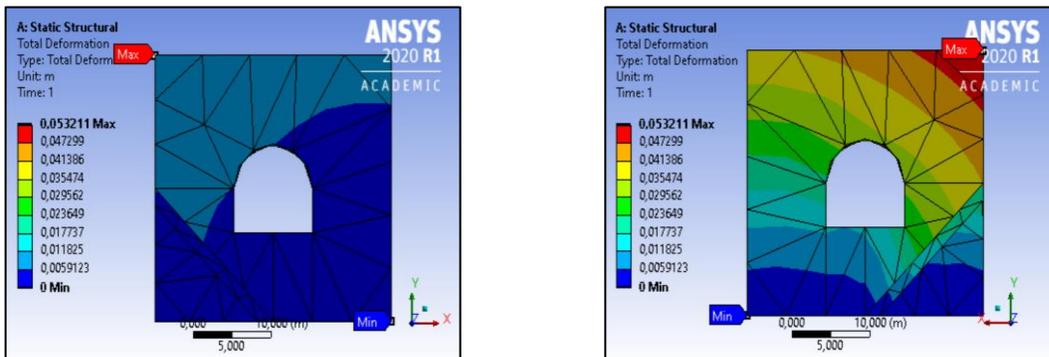


Figura 4.59: Granito sin fisurar falla inferior de 45° paralela al eje del túnel modelado en ANSYS.

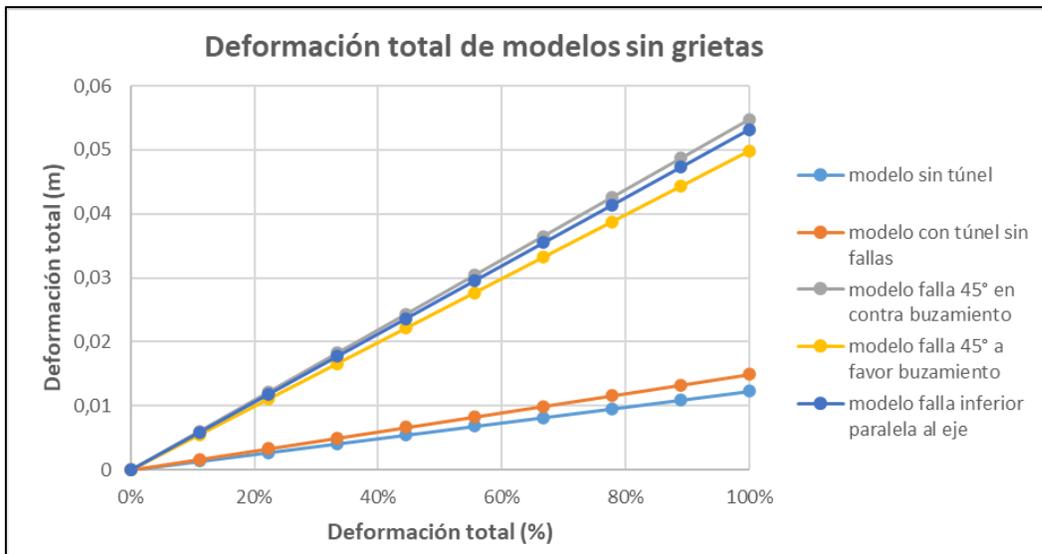


Figura 4.60: Deformación total para granito sin fisurar de modelos sin grietas.

En el modelo correspondiente al estado basal del terreno, sin túnel y sin fallas, la deformación mínima se encuentra en la parte inferior, mientras que la deformación máxima se encuentra en la parte superior izquierda del modelo, existiendo la tendencia de que exista mayor deformación en la parte superior de este. El valor de la deformación total máxima es de 0,01231 m.

En el modelo con túnel y sin fallas, se ingresó el túnel, lo que modificó las líneas de deformación del terreno, provocando que estas se inclinaran en dirección al centro del túnel. Las deformaciones mínima y máxima se encuentran relativamente en el mismo lugar. El valor para la deformación total máxima es de 0,014937 m.

En el modelo de la falla de 45° perpendicular al eje del túnel (en contra buzamiento), las líneas de deformación se ven abruptamente modificadas con la aparición de las fallas, produciéndose una tendencia a una mayor cantidad de deformación en la sección superior, sobre las fallas y una menor cantidad de deformación en la parte inferior. La deformación total máxima esta ubicada en la parte superior derecha del modelo y tiene un valor de 0,054752 m poseyendo el mayor valor de deformación de los modelos sin modelado de grietas para granito sin fisurar.

En el modelo de la falla de 45° perpendicular al eje del túnel (a favor buzamiento), al igual que en el anterior, se generó una tendencia a que en la zona superior a la falla existiese un aumento en la deformación, lo que causó cambios bruscos en las líneas de deformación. La deformación total máxima está ubicada en la parte superior izquierda del modelo y tiene un valor de 0,049874 m.

En la modelación de la falla inferior de 45° paralela al eje del túnel, las líneas de deformación se encontraron inclinadas hacia el lado inferior izquierdo, el cual contenía la falla perpendicular al eje del túnel. El cambio en las líneas de deformación fue menor que

en los modelos anteriores, pero se produjo una deformación máxima de valor cercano a la mayor deformación de este grupo de modelos. El valor de la deformación máxima es de 0,053211 m.

Tensión equivalente:

En esta sección se muestran los resultados de la tensión equivalente en los modelos sin grietas para el granito sin fisurar correspondientes a 5 condiciones distintas, mostrando en un principio una visión lateral de cada modelo, seguido de una perspectiva frontal y posterior de los mismos, para finalizar con un análisis que expone las similitudes entre modelos.

Granito sin fisurar sin túnel y sin fallas:

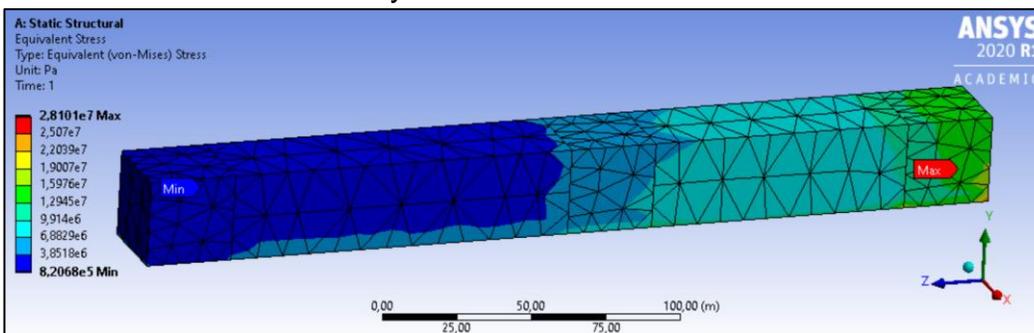


Figura 4.61: Tensión Equivalente en ANSYS para granito sin fisurar de modelos sin grietas (granito sin fisurar sin túnel y sin fallas).

Granito sin fisurar con túnel y sin fallas:

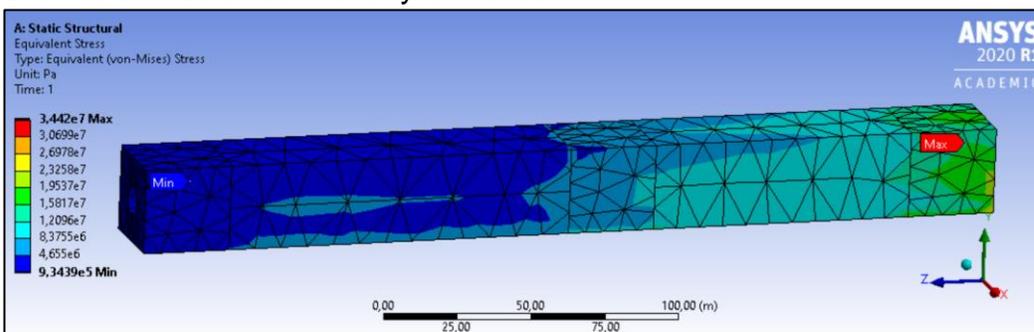


Figura 4.62: Tensión Equivalente en ANSYS para granito sin fisurar de modelos sin grietas (granito sin fisurar con túnel y sin fallas).

Granito sin fisurar falla 45° perpendicular al eje del túnel (en contra buzamiento):

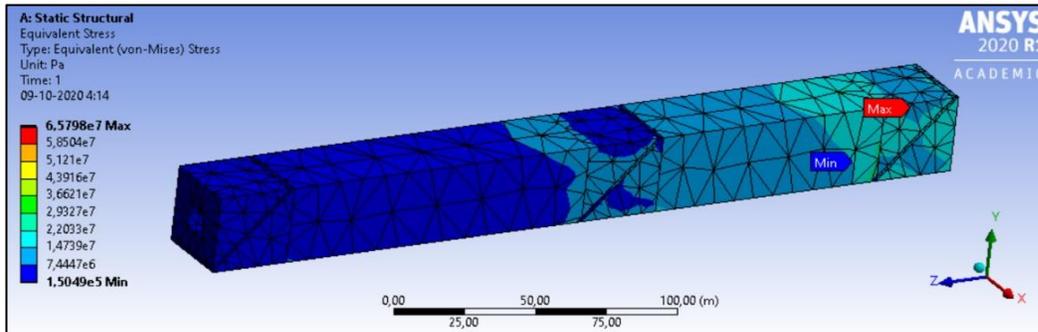


Figura 4.63: Tensión Equivalente en ANSYS para granito sin fisurar de modelos sin grietas (granito sin fisurar falla 45° perpendicular al eje del túnel (en contra buzamiento)).

Granito sin fisurar falla 45° perpendicular al eje del túnel (a favor del buzamiento):

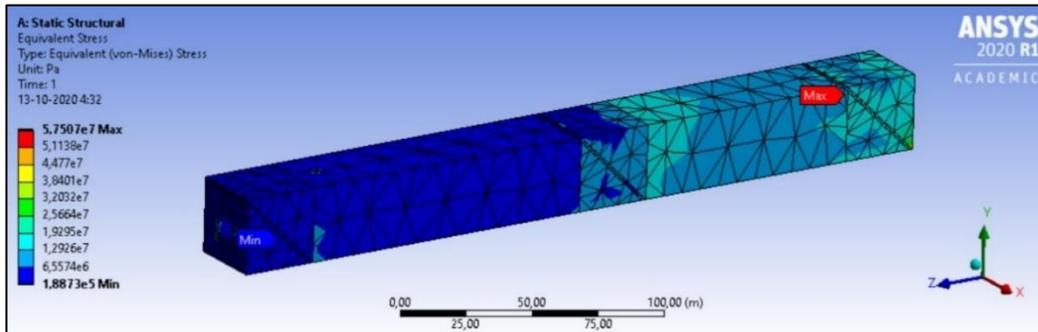


Figura 4.64: Tensión Equivalente en ANSYS para granito sin fisurar de modelos sin grietas (granito sin fisurar falla 45° perpendicular al eje del túnel (a favor del buzamiento)).

Granito sin fisurar falla inferior de 45° paralela al eje del túnel:

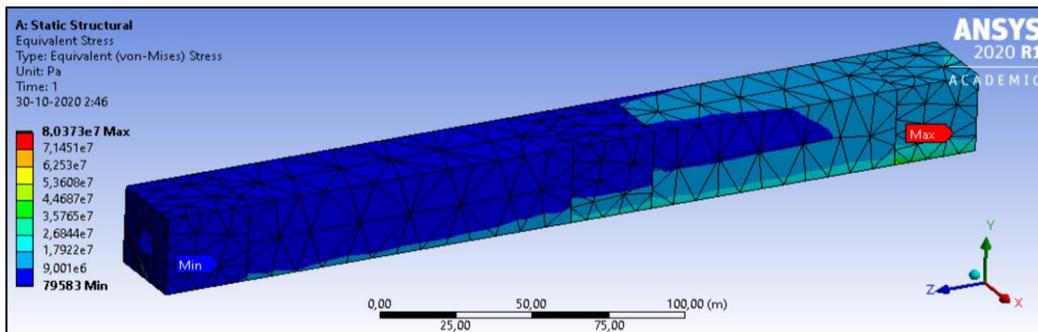


Figura 4.65: Tensión Equivalente en ANSYS para granito sin fisurar de modelos sin grietas (granito sin fisurar falla inferior de 45° paralela al eje del túnel).

Granito sin fisurar sin túnel y sin fallas:

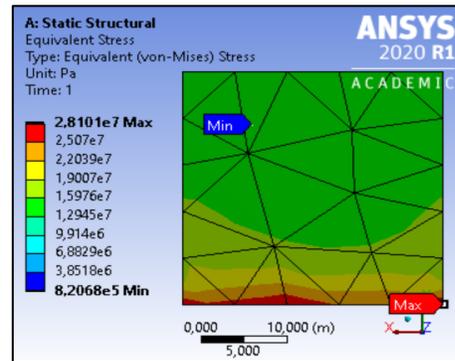
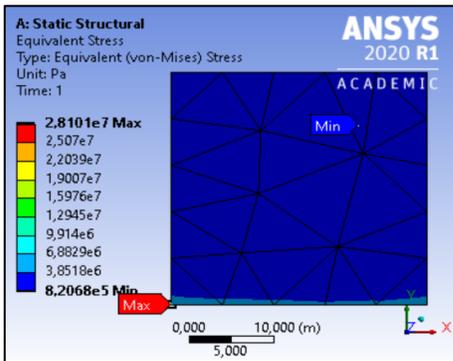


Figura 4.66: Tensión Equivalente en ANSYS para granito sin fisurar sin túnel y sin fallas.

Granito sin fisurar con túnel y sin fallas:

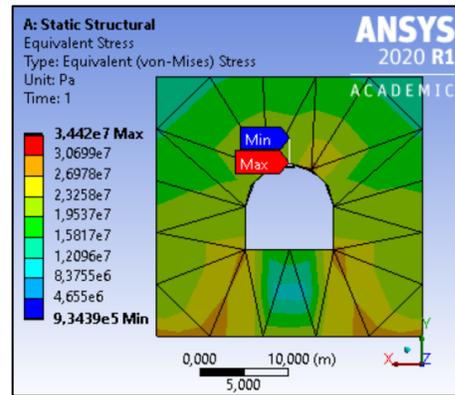
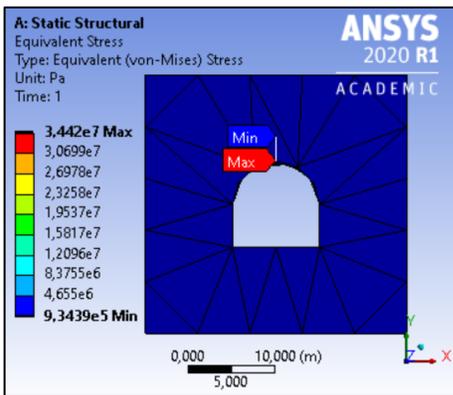


Figura 4.67: Tensión Equivalente en ANSYS para granito sin fisurar con túnel y sin fallas.

Granito sin fisurar falla 45° perpendicular al eje del túnel (en contra buzamiento):

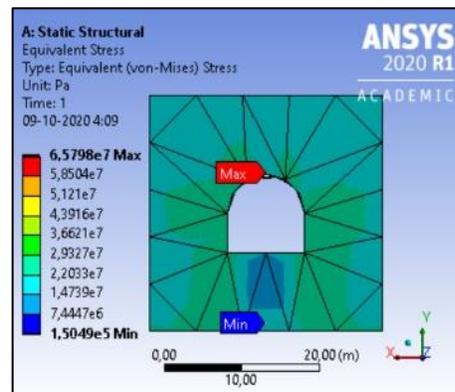
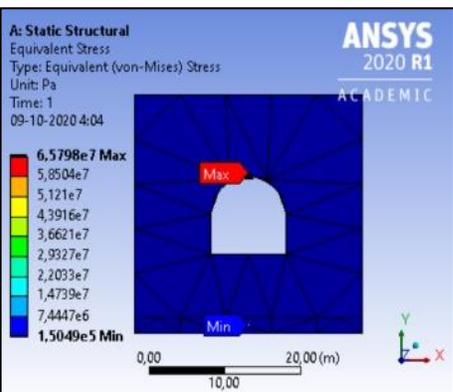


Figura 4.68: Tensión Equivalente en ANSYS para granito sin fisurar falla 45° perpendicular al eje del túnel (en contra buzamiento).

Granito sin fisurar falla 45° perpendicular al eje del túnel (a favor del buzamiento):

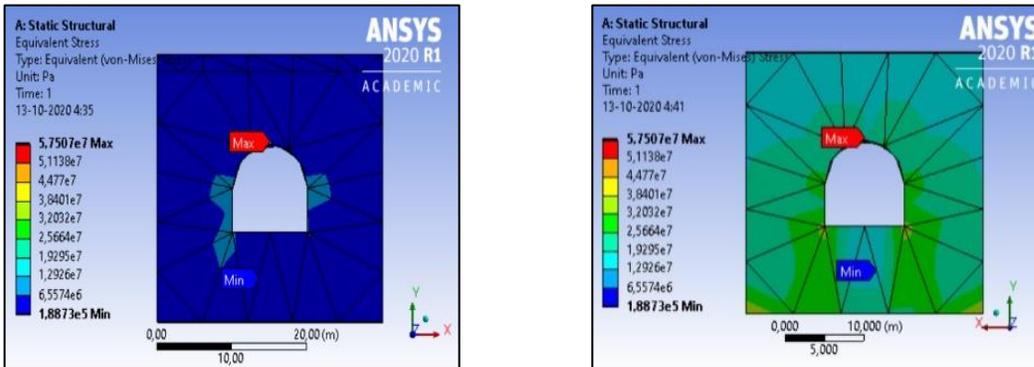


Figura 4.69: Tensión Equivalente en ANSYS para granito sin fisurar falla 45° perpendicular al eje del túnel (a favor del buzamiento).

Granito sin fisurar falla inferior de 45° paralela al eje del túnel:

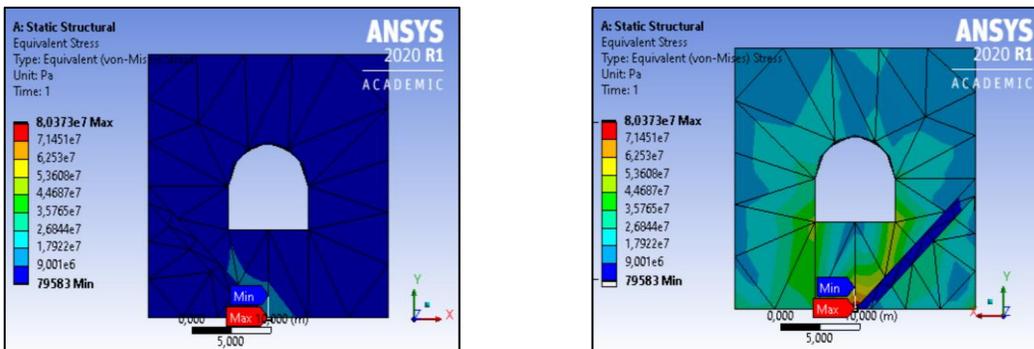


Figura 4.70: Tensión Equivalente en ANSYS para granito sin fisurar falla inferior de 45° paralela al eje del túnel.

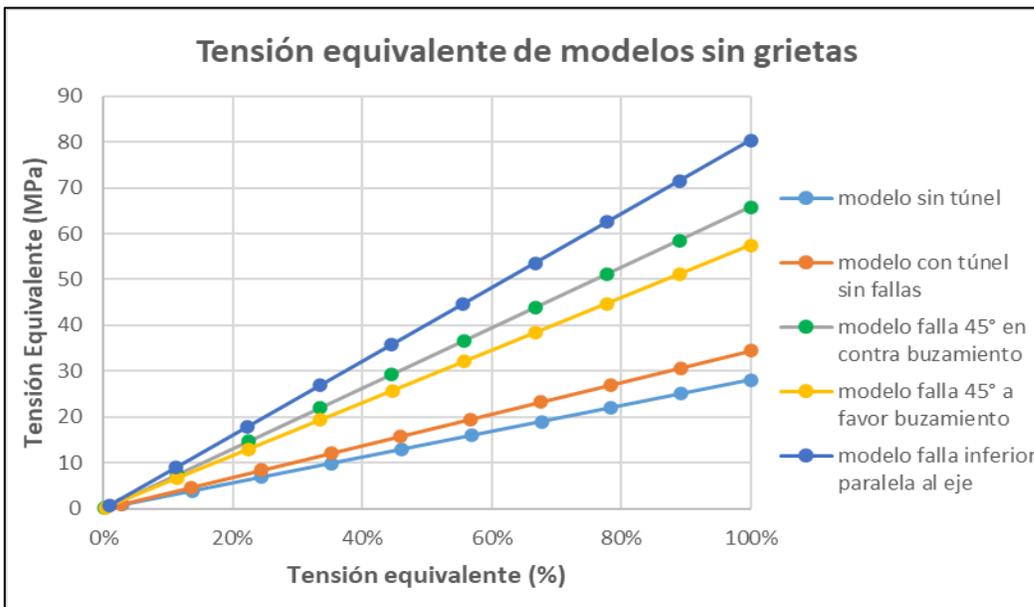


Figura 4.71: Tensión Equivalente para granito sin fisurar de modelos sin grietas.

En el modelo del estado base del terreno sin túnel y sin fallas, se mostró una mayor tensión en las partes más profundas del túnel, obteniendo el mayor valor de tensión equivalente para la zona inferior del modelo, en la parte más profunda del túnel. El valor de la máxima tensión equivalente fue de 28,101 MPa y el valor mínimo es de 0,82068 MPa.

En el modelo con túnel y sin fallas, los valores de tensión equivalente mínimo y máximo se encontraron ubicados en la clave del túnel con valores de 0,93439 MPa y 34,42 MPa respectivamente. Las tensiones se tendieron a concentrar en la parte inferior del modelo y en las “esquinas” superiores e inferiores del túnel.

En el modelo de la falla de 45° perpendicular al eje del túnel (en contra buzamiento), la tendencia de las tensiones se mantuvo igual que en el anterior, la máxima tensión equivalente se ubicó cercana a la clave del túnel con un valor de 65,798 MPa y la mínima tensión equivalente se encontró en la parte inferior del túnel con un valor de 0,15049 MPa, ambos valores se ubicaron cercanos a la falla de la zona más profunda del modelo.

El modelo de la falla de 45° perpendicular al eje del túnel (a favor del buzamiento), presentó la misma tendencia en las tensiones que los modelos anteriores. Se obtuvo la tensión máxima equivalente en la clave, en la zona por debajo de la falla con un valor de 57,507 MPa y la tensión mínima en la parte inferior del túnel, en la zona por debajo de la falla con un valor de 0,18873 MPa.

En el modelo de la falla inferior de 45° paralela al eje del túnel, se observó que los valores más altos de tensiones se presentaban en la zona inferior del modelo, presentándose los mayores valores, junto con el valor de tensión equivalente máximo, en la zona ubicada entre la esquina inferior izquierda del túnel y la falla inferior, teniendo un valor de 80,373 MPa (el valor más alto para granito sin fisurar sin grietas modeladas). La tensión

equivalente mínima se encontró en la parte inferior del túnel con un valor de 0,79583 MPa.

Tensión de corte:

En esta sección se muestran los resultados de la tensión de corte en los modelos sin grietas para el granito sin fisurar correspondientes a 5 condiciones distintas, mostrando en un principio una visión lateral de cada modelo, seguido de una perspectiva frontal y posterior de los mismos, para finalizar con un análisis que expone las similitudes entre modelos.

Granito sin fisurar sin túnel y sin fallas:

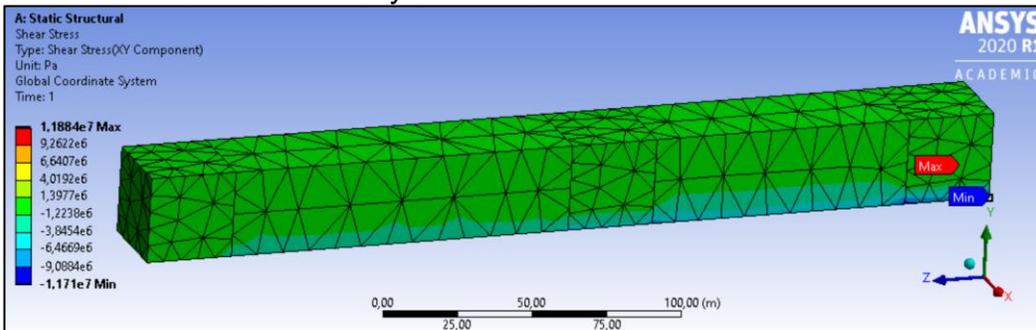


Figura 4.72: Tensión de corte en ANSYS (granito sin fisurar sin túnel y sin fallas).

Granito sin fisurar con túnel y sin fallas:

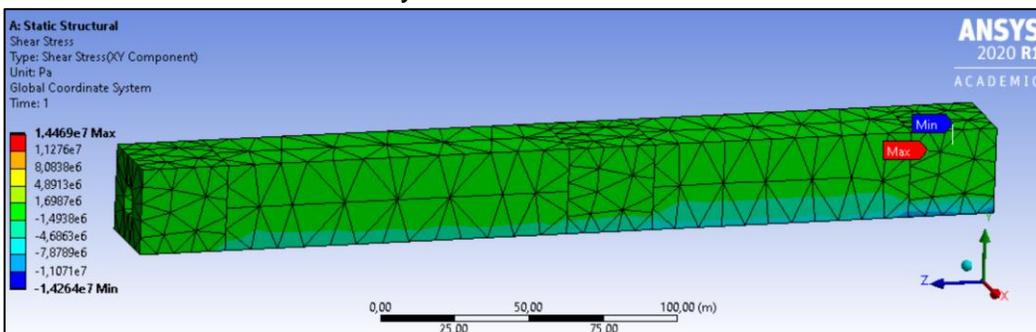


Figura 4.73: Tensión de corte en ANSYS (granito sin fisurar con túnel y sin fallas).

Granito sin fisurar falla 45° perpendicular al eje del túnel (en contra buzamiento):

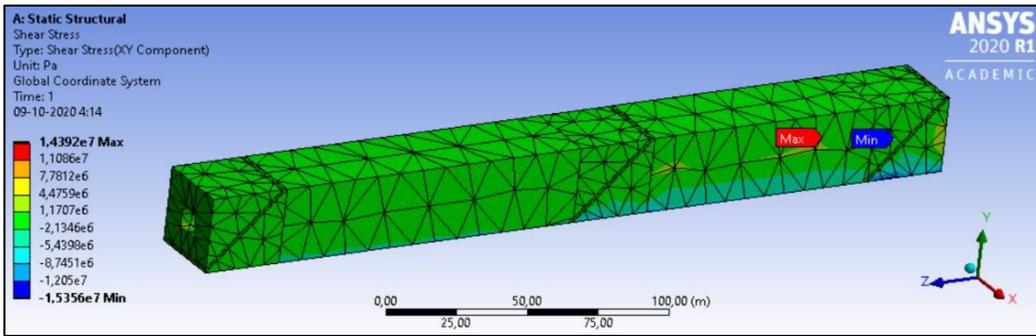


Figura 4.74: Tensión de corte en ANSYS (granito sin fisurar falla 45° perpendicular al eje del túnel (en contra buzamiento)).

Granito sin fisurar falla 45° perpendicular al eje del túnel (a favor del buzamiento):

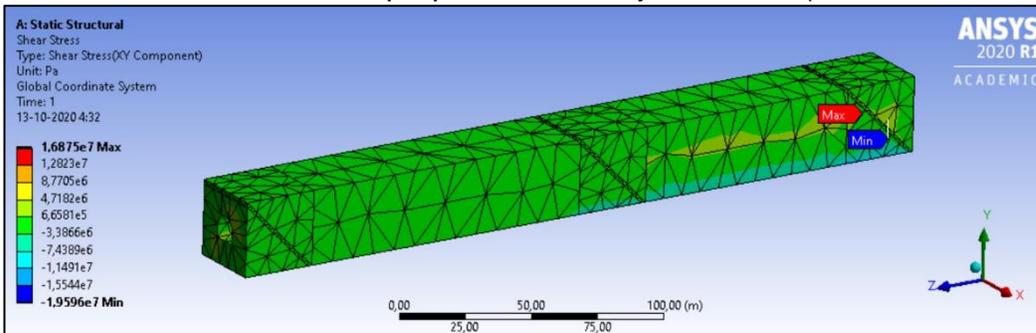


Figura 4.75: Tensión de corte en ANSYS (granito sin fisurar falla 45° perpendicular al eje del túnel (a favor del buzamiento)).

Granito sin fisurar falla inferior de 45° paralela al eje del túnel:

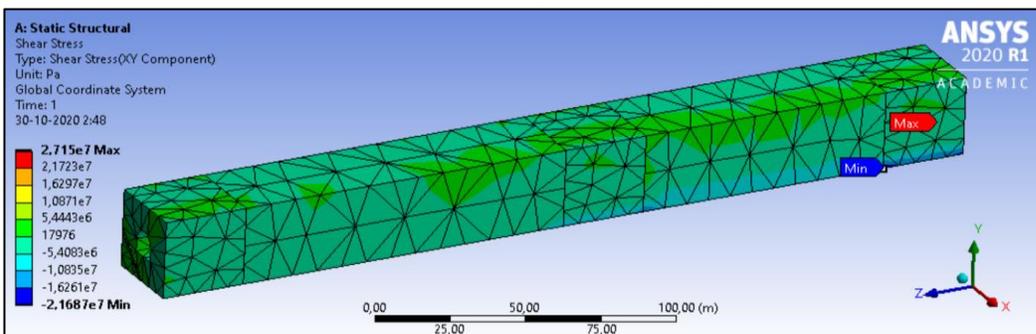


Figura 4.76: Tensión de corte en ANSYS (granito sin fisurar falla inferior de 45° paralela al eje del túnel).

Granito sin fisurar sin túnel y sin fallas:

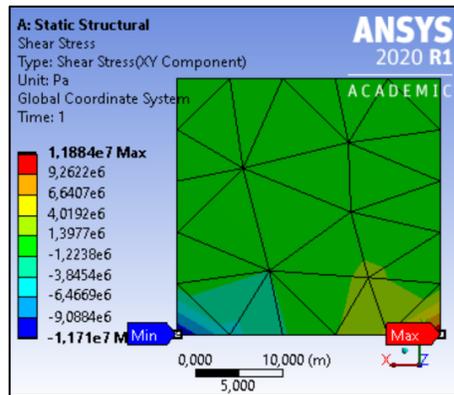
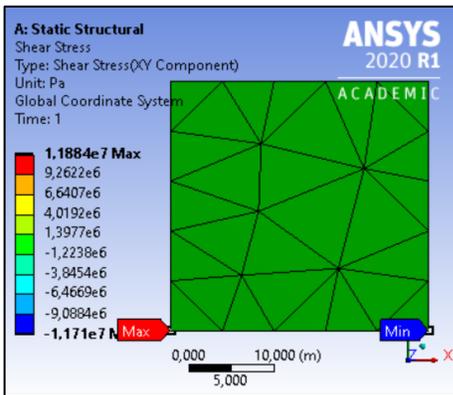


Figura 4.77: Tensión de corte en ANSYS para granito sin fisurar sin túnel y sin fallas.

Granito sin fisurar con túnel y sin fallas:

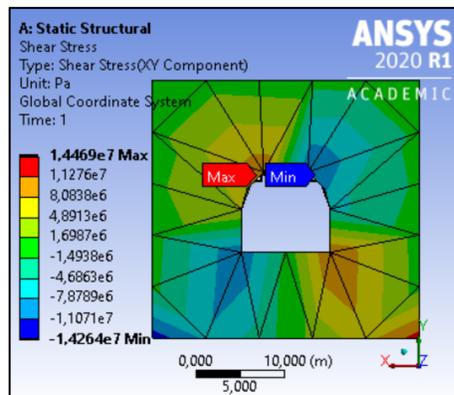
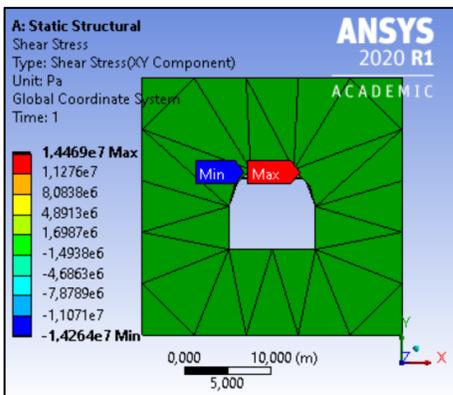


Figura 4.78: Tensión de corte en ANSYS para granito sin fisurar con túnel y sin fallas.

Granito sin fisurar falla 45° perpendicular al eje del túnel (en contra buzamiento):

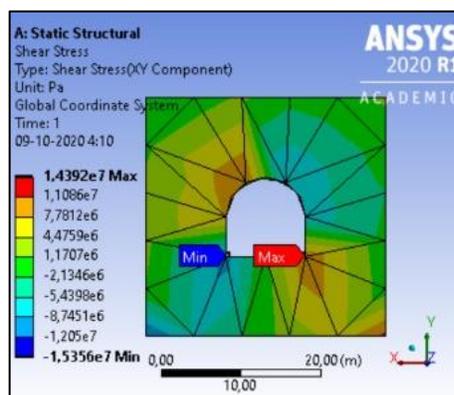
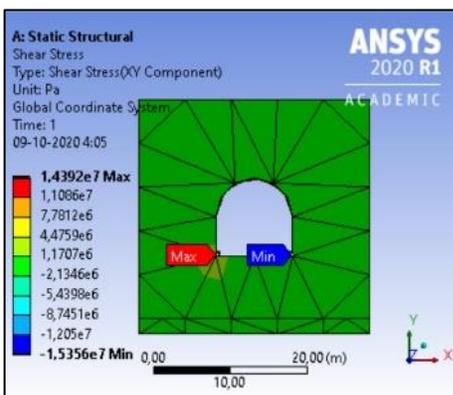


Figura 4.79: Tensión de corte en ANSYS para granito sin fisurar falla 45° perpendicular al eje del túnel (en contra buzamiento).

Granito sin fisurar falla 45° perpendicular al eje del túnel (a favor del buzamiento):

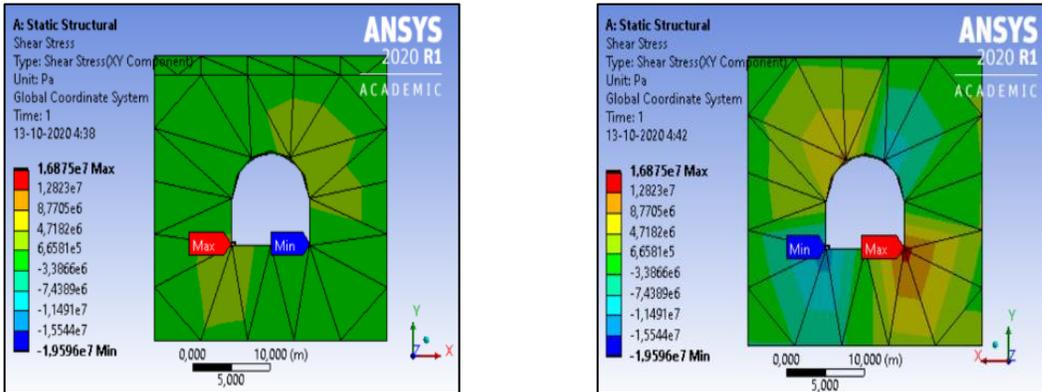


Figura 4.80: Tensión de corte en ANSYS para granito sin fisurar falla 45° perpendicular al eje del túnel (a favor del buzamiento).

Granito sin fisurar falla inferior de 45° paralela al eje del túnel:

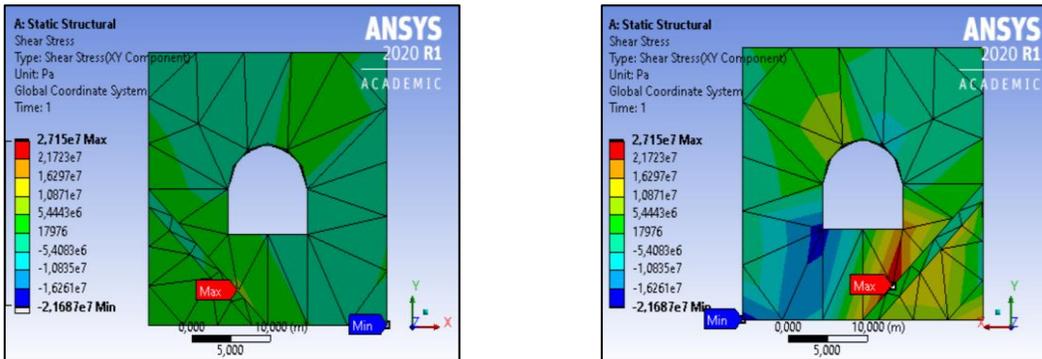


Figura 4.81: Tensión de corte en ANSYS para granito sin fisurar falla inferior de 45° paralela al eje del túnel.

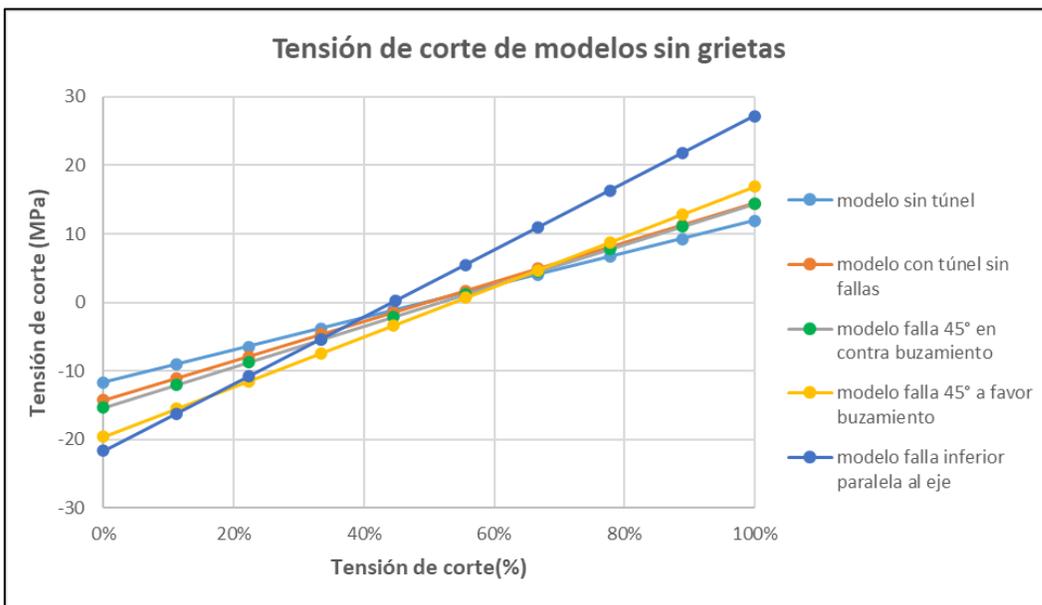


Figura 4.82: Tensión de corte para granito sin fisurar de modelo sin grietas.

En el modelo que consiste en el terreno en su estado base, sin túnel y sin fallas, se observó que los valores de tensión de corte de mayor magnitud en la parte inferior del modelo, en la zona más profunda del túnel. La tensión de corte máxima se localizó en la parte inferior izquierda del modelo con un valor de 11,884 MPa mientras que la tensión de corte mínima se localizó al lado contrario, igualmente en la parte inferior y con una magnitud similar pero negativa de -11,71 MPa.

En el modelo con túnel y sin fallas, las tensiones de corte se concentraron en el contorno del túnel, más específicamente, en las “esquinas” superiores e inferiores de este, ubicando la tensión de corte máxima en la esquina superior derecha y la tensión de corte mínima en la esquina superior izquierda. Nuevamente ambos valores tuvieron unas magnitudes parecidas, para el caso de la tensión de corte máxima de un valor de 14,469 MPa y para el caso de la tensión de corte mínima de -14,264 MPa.

El modelo de la falla de 45° perpendicular al eje del túnel (en contra buzamiento), mantiene la forma en la que estaban concentradas las tensiones en el modelo anterior, pero, en este caso tanto la tensión máxima como la tensión mínima de corte se encuentran en las esquinas inferiores del túnel. La tensión de corte máxima se localizó en la esquina inferior izquierda y mínima en la esquina inferior derecha, con una magnitud de 14,392 MPa y -15,356 MPa respectivamente.

El modelo de la falla de 45° perpendicular al eje del túnel (a favor del buzamiento), mantiene la forma en la que estaban concentradas las tensiones en los modelos anteriores, además, mantiene la tensión máxima de corte en la esquina inferior izquierda y la tensión mínima en la esquina inferior derecha. Con respecto a los modelos anteriores, aumenta la magnitud de las tensiones mínima y máxima quedando con valores de -19,596 y 16,875 respectivamente.

El modelo de la falla inferior de 45° paralela al eje del túnel, mantiene relativamente la misma forma en la que estaban concentradas las tensiones en los modelos anteriores, pero ahora existe una notoria mayor magnitud de tensión de corte en la parte inferior del modelo. La mayor magnitud, correspondiente a la tensión de corte máxima se ubica en la parte inferior izquierda de el modelo, entre la falla y la esquina inferior del túnel, con un valor de 27,15 MPa. La tensión de corte mínima se encuentra ubicada en la esquina inferior derecha del modelo con un valor de -21,687 MPa.

Tabla 4.8: Valores máximos de los parámetros evaluados para granito sin fisurar:

Modelos Granito sin fisurar	Deformación total Máx. (m)	Tensión Equivalente Máx. (MPa)	Tensión de corte Máx. (MPa)
Sin túnel y sin fallas	0,01231	28,101	11,884
Con túnel y sin fallas	0,014937	34,42	14,469
Falla de 45° perpendicular en contra buzamiento	0,054752	65,798	14,392
Falla de 45° perpendicular a favor de buzamiento	0,049874	57,507	16,875
Falla inferior paralela a eje del túnel	0,053211	80,373	27,15

La tabla anterior muestra un resumen de los valores Máximos encontrados en los modelos de granito fisurado para los distintos parámetros obtenidos.

Modelos con grietas:

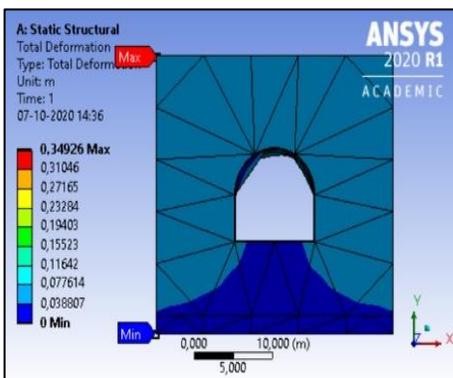
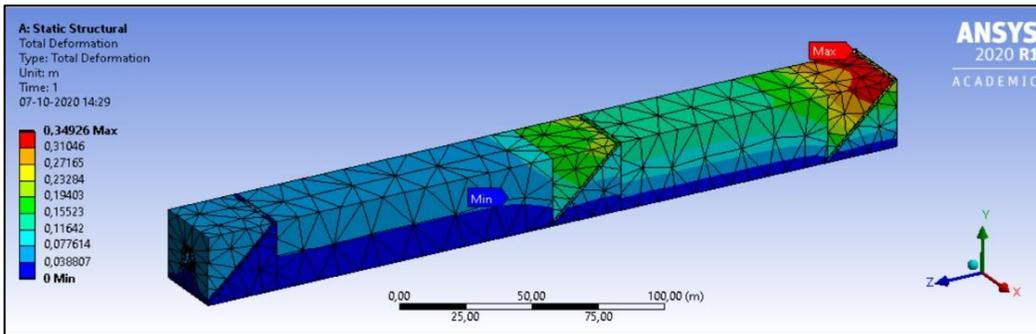
A continuación, se presentarán los resultados de los modelos con grietas, se mostrarán primero los resultados de deformación total, seguido de los resultados de la tensión equivalente, finalizando con los resultados de la tensión de corte.

Cabe señalar que debido a limitaciones de capacidad de software se tuvo que submodelar secciones del túnel para ingresar las grietas, en otras palabras, crear un modelo anexo al modelo principal para las secciones en donde se encontraban las grietas, esto generó cierta cantidad positiva de error en los valores de tensiones del modelo, para solucionar esto se submodeló también el modelo que no tenía grietas para que al momento de comparar, ambos modelos tuvieran la misma cantidad de error y así poder descartarlo en la comparación. Dicho esto, los modelos generales para las secciones de tensión equivalente y tensión de corte corresponden a estos modelos.

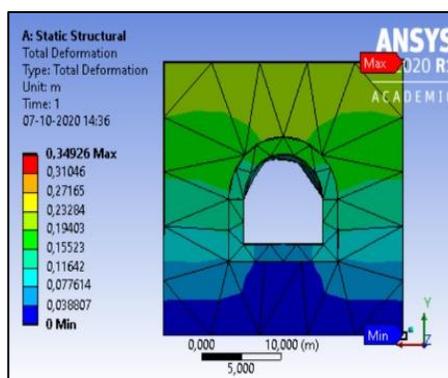
Deformación total:

En esta sección se presenta, en un principio el modelo a evaluar con su tipo de falla correspondiente, sin grietas, para establecer un estado basal a comparar; seguido de los resultados de las grietas a evaluar (esto se repite para los 3 tipos de fallas evaluadas), finalizando con un análisis de los resultados expuestos.

Granito fisurado falla de 45 grados de buzamiento perpendicular al eje del túnel
(Excavación contra buzamiento):



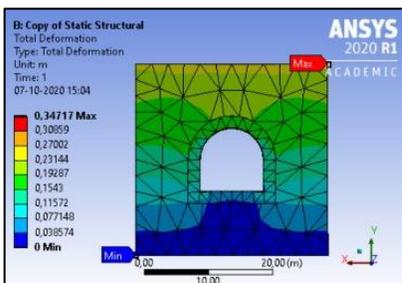
(sin grietas (50m)).



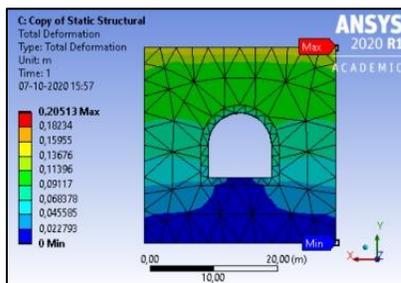
(sin grietas (500m)).

Figura 4.83: Modelo general sin grietas granito fisurado.

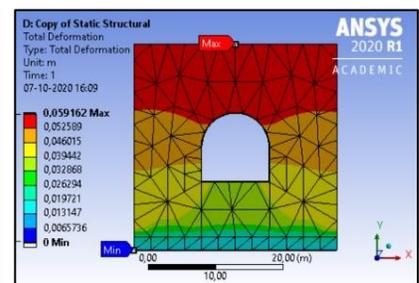
Grieta inferior derecha:



(Grieta Der. (500m)).



(Grieta Der. (300m)).

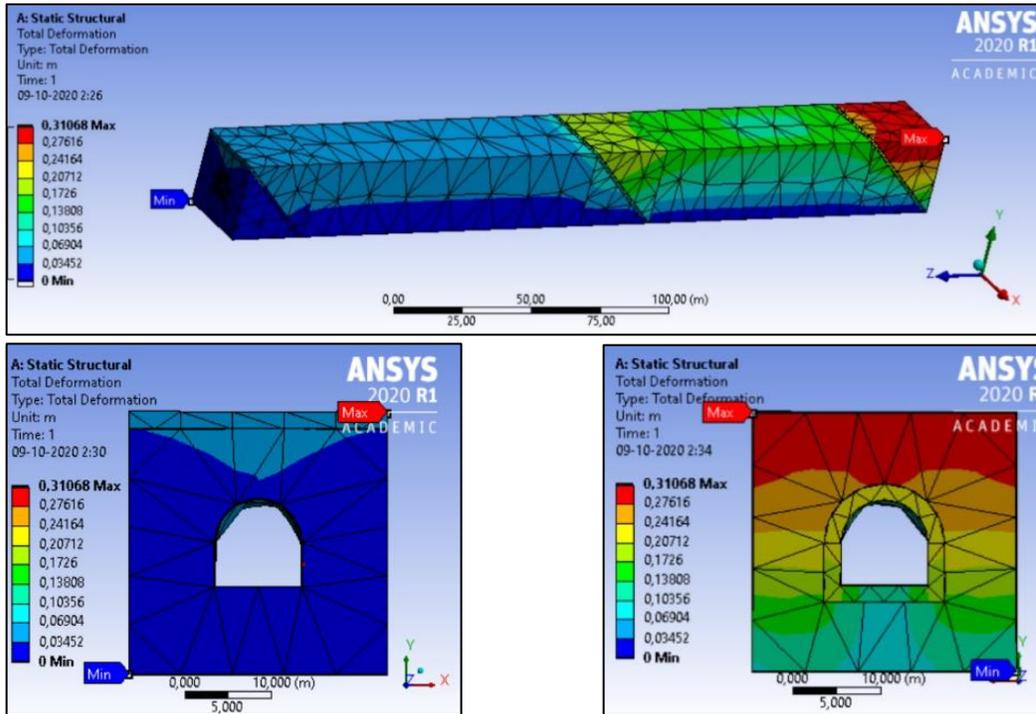


(Grieta Der. (50m)).

Figura 4.84: Modelo grieta inferior derecha granito fisurado.

(Para las 6 grietas evaluadas se mantiene el mismo patrón en la deformación con valores de deformación total máxima iguales).

Granito fisurado falla de 45 grados de buzamiento perpendicular al eje del túnel
(Excavación con buzamiento):

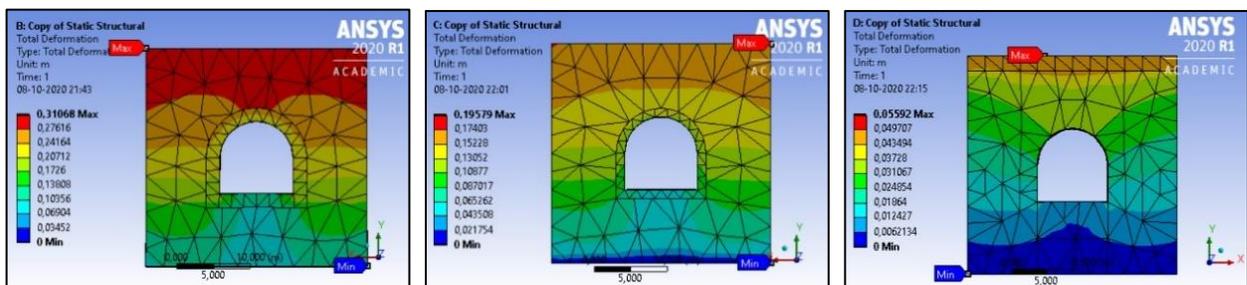


(Sin grietas (50m)).

(Sin grietas (500m)).

Figura 4.85: Modelo general sin grietas granito fisurado.

Grieta superior derecha:



(Grieta Der. (500m)).

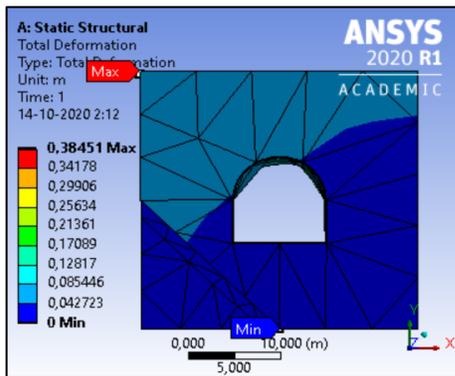
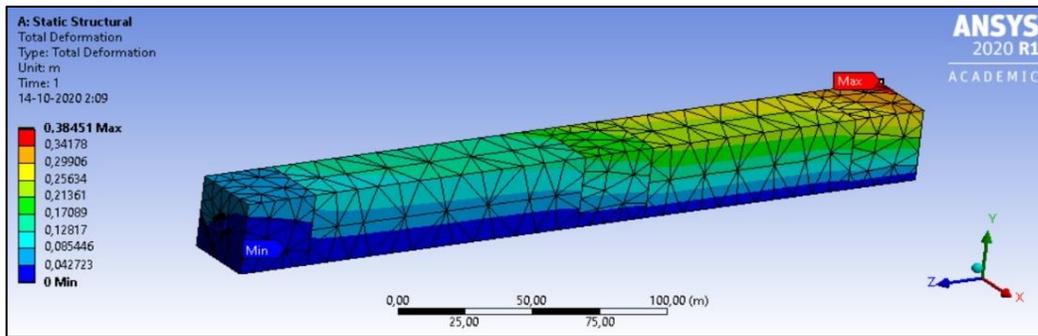
(Grieta Der. (300m)).

(Grieta Der. (50m)).

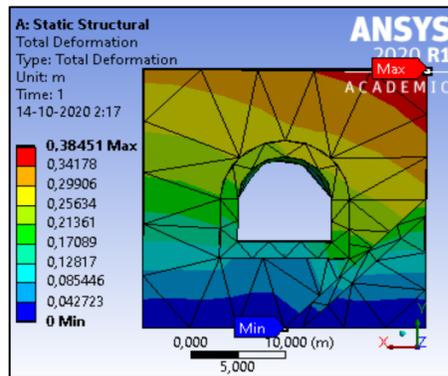
Figura 4.86: Modelo grieta superior derecha granito fisurado.

(Para las 6 grietas evaluadas se mantiene el mismo patrón en la deformación con valores de deformación total máxima iguales).

Granito fisurado falla inferior de 45 grados paralelo al eje del túnel:



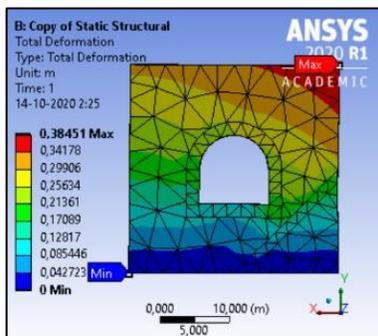
(Sin grietas (50m)).



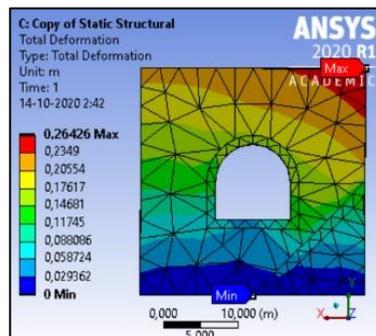
(Sin grietas (500m)).

Figura 4.87: Modelo general sin grietas granito fisurado.

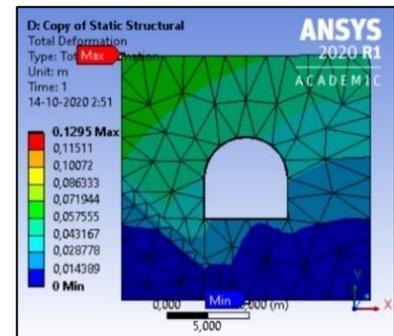
Grieta inferior derecha:



(Grieta Der. (500m)).



(Grieta Der. (300m)).

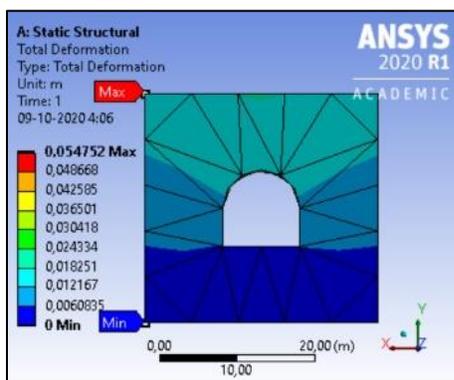
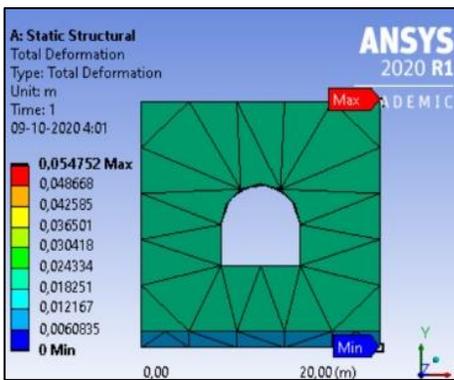
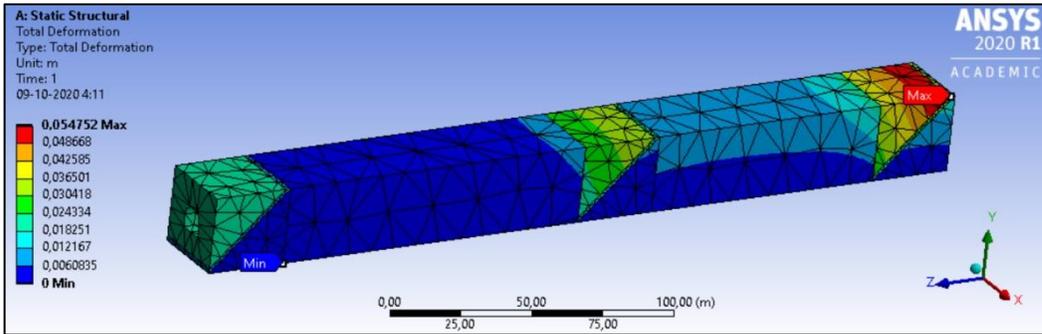


(Grieta Der. (50m)).

Figura 4.88: Modelo grieta inferior derecha granito fisurado.

(Para las 6 grietas evaluadas se mantiene el mismo patrón en la deformación con valores de deformación total máxima iguales).

Granito sin fisurar falla de 45 grados de buzamiento perpendicular al eje del túnel
(Excavación contra buzamiento):

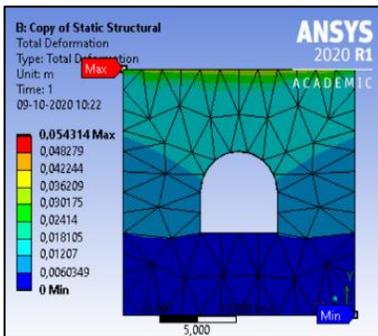


(Sin grietas (50m)).

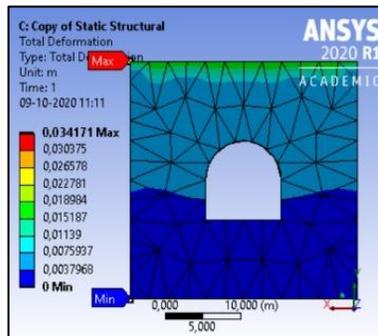
(Sin grietas (500m)).

Figura 4.89: Modelo general sin grietas granito sin fisurar.

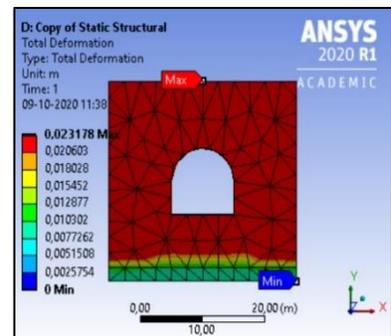
Grieta inferior derecha:



(Grieta Der. (500m)).



(Grieta Der. (300m)).

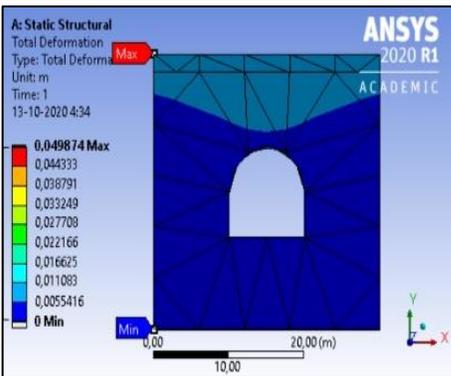
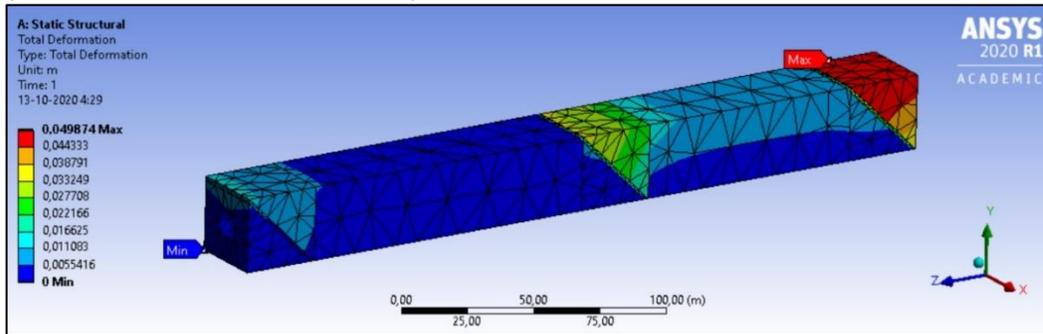


(Grieta Der. (50m)).

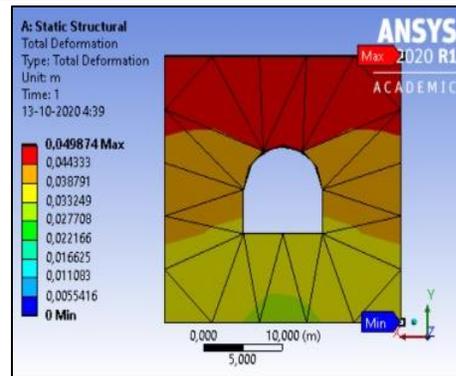
Figura 4.90: Modelo grieta inferior derecha granito sin fisurar.

(Para las 6 grietas evaluadas se mantiene el mismo patrón en la deformación con valores de deformación total máxima iguales).

Granito sin fisurar falla de 45 grados de buzamiento perpendicular al eje del túnel
(Excavación con buzamiento):



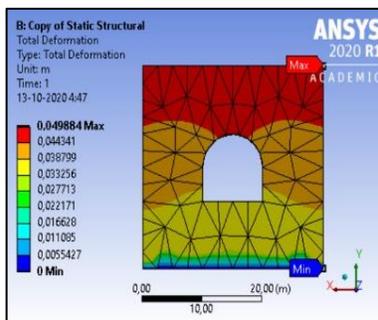
(Sin grietas (50m)).



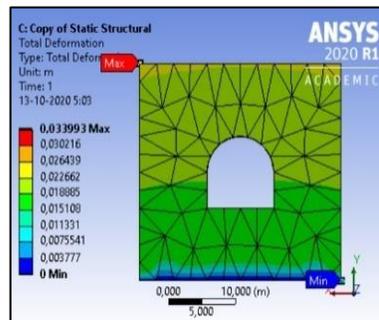
(Sin grietas (500m)).

Figura 4.91: Modelo general sin grietas granito sin fisurar.

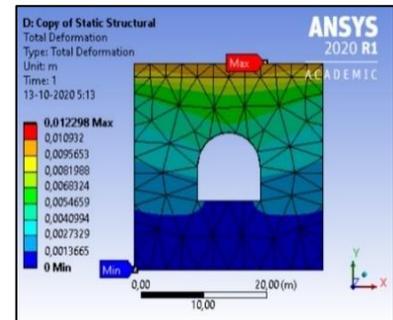
Grieta inferior derecha:



(Grieta Der. (500m)).



(Grieta Der. (300m)).

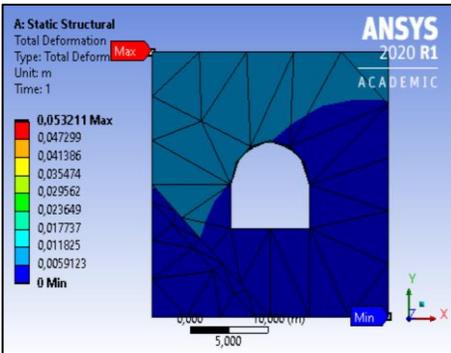
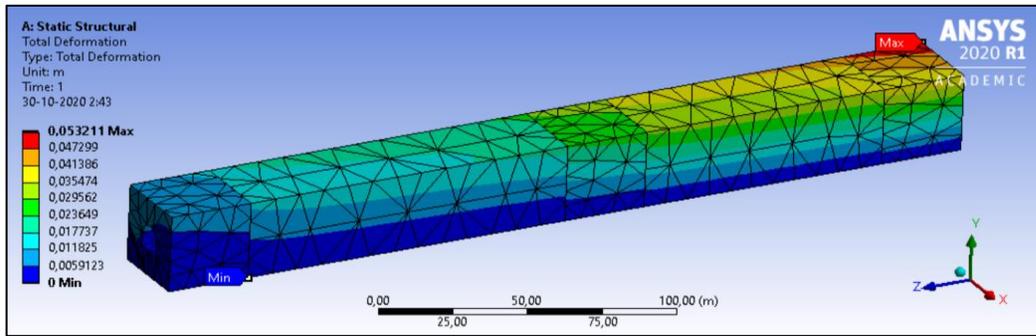


(Grieta Der. (50m)).

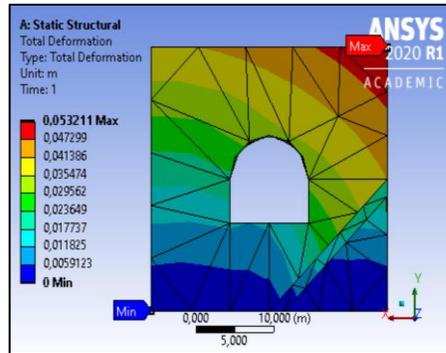
Figura 4.92: Modelo grieta inferior derecha granito sin fisurar.

(Para las 6 grietas evaluadas se mantiene el mismo patrón en la deformación con valores de deformación total máxima iguales).

Granito sin fisurar falla inferior de 45 grados paralelo al eje del túnel:



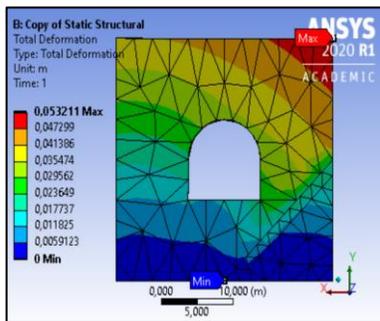
(Sin grietas (50m)).



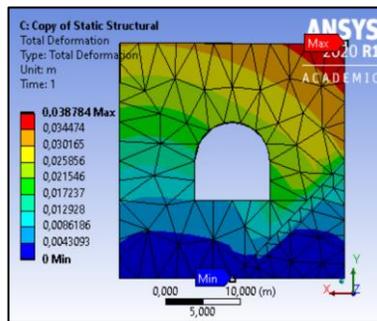
(Sin grietas (500m)).

Figura 4.93: Modelo general sin grietas granito sin fisurar.

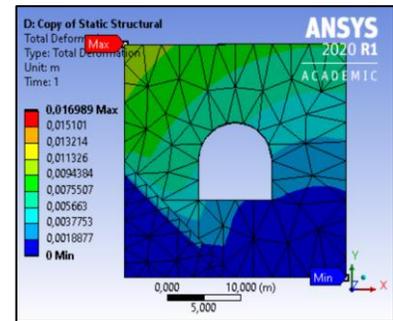
Grieta inferior derecha:



(Grieta Der. (500m)).



(Grieta Der. (300m)).



(Grieta Der. (50m)).

Figura 4.94: Modelo grieta inferior derecha granito sin fisurar.

(Para las 6 grietas evaluadas se mantiene el mismo patrón en la deformación con valores de deformación total máxima iguales).

Para la deformación total de los modelos, se observó que luego de ingresar una grieta de 0,5 m, no se presentó un mayor cambio en el estado de las deformaciones del sistema para ninguno de los 3 tipos de falla, asimismo, los modelos mantuvieron su deformación total máxima o la variaron mínimamente como el caso del granito fisurado con la falla de 45° perpendicular al eje y en contra el buzamiento que tuvo una variación de 2mm. En cuanto a las líneas de la deformación, estas mantienen su forma. Comparando las deformaciones de las distintas grietas en una misma falla, estas mantienen los mismos valores máximos y mínimos y a su vez mantienen las líneas de deformación.

Observando estos resultados se puede determinar que, en base a la evaluación hecha una grieta semicircular de 0,5 m no puede causar grandes alteraciones en un modelo de túnel con las características dadas.

Tensión equivalente:

En esta sección se presentan en un principio los resultados del granito fisurado y posteriormente los resultados del granito sin fisurar. Primero se exhibe el modelo a evaluar con su tipo de falla correspondiente, sin grietas, para establecer un estado basal a comparar; seguido de los resultados de las grietas a evaluar (esto se repite para los 3 tipos de fallas evaluadas), finalizando con un análisis de los resultados expuestos.

Granito fisurado falla de 45 grados de buzamiento perpendicular al eje del túnel (Excavación contra buzamiento):

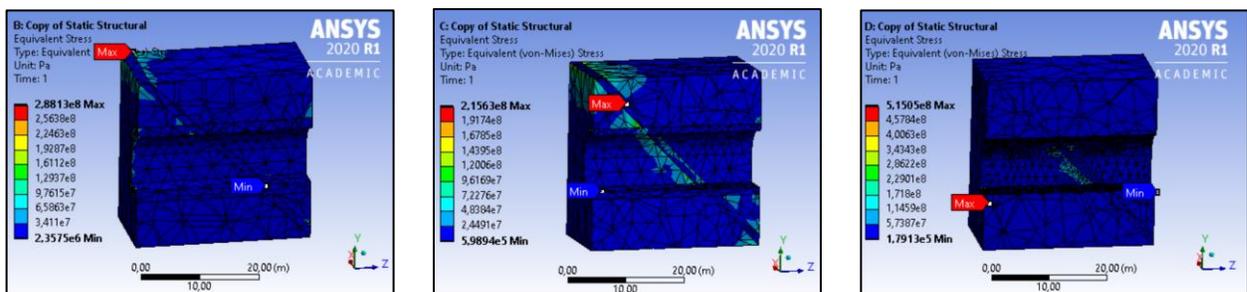


Figura 4.95: Modelo general derecho (500m; 300m y 50m respectivamente).

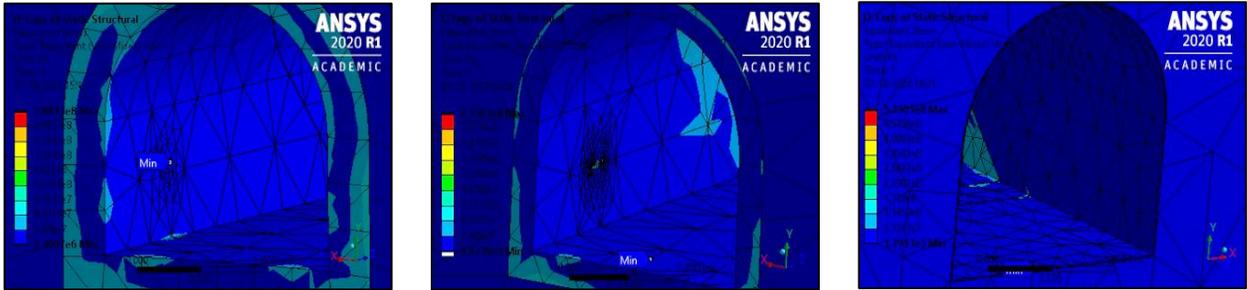


Figura 4.96: Modelo grieta inferior derecha (500m; 300m y 50m respectivamente).

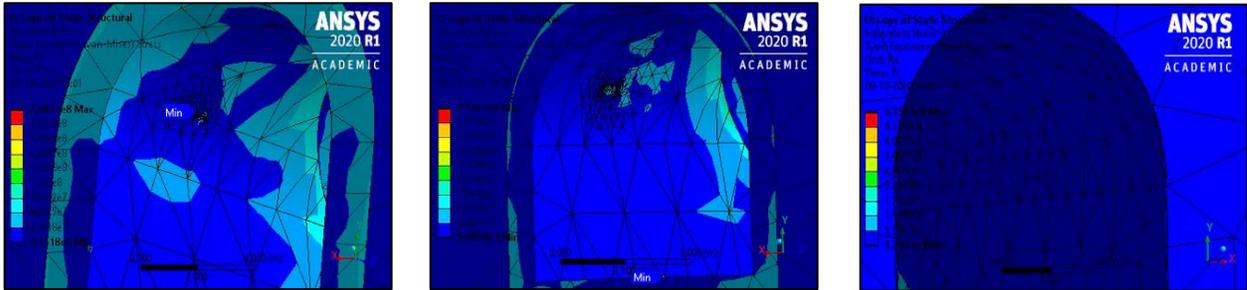


Figura 4.97: Modelo grieta superior derecha (500m; 300m y 50m respectivamente).

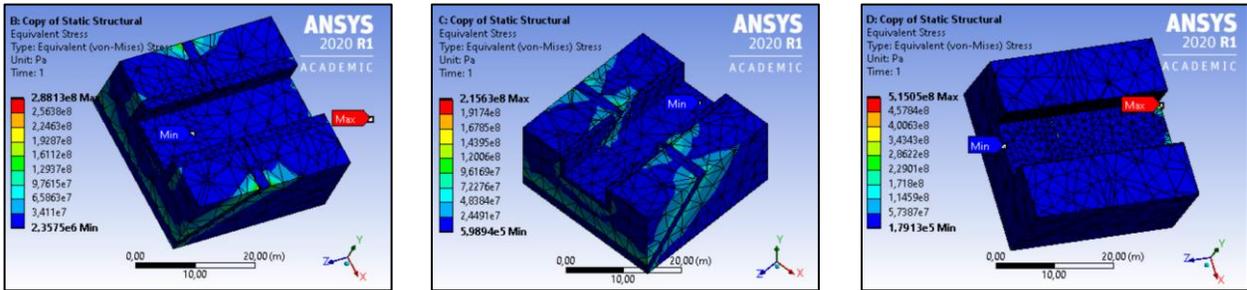


Figura 4.98: Modelo general inferior (500m; 300m y 50m respectivamente).

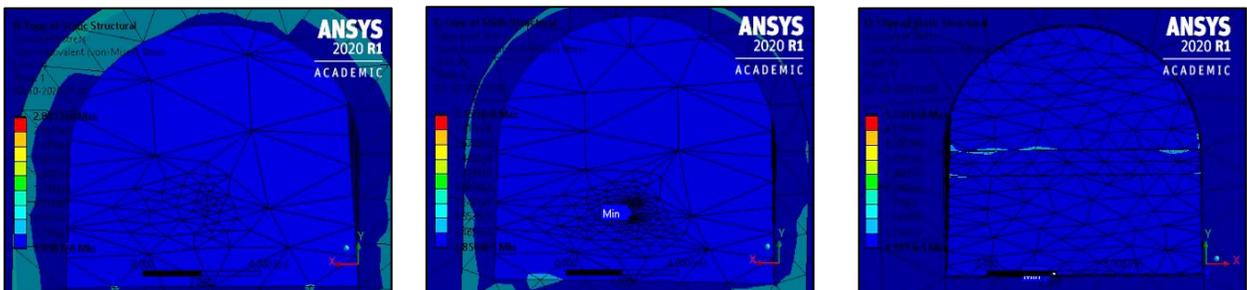


Figura 4.99: Modelo inferior centro (500m; 300m y 50m respectivamente).

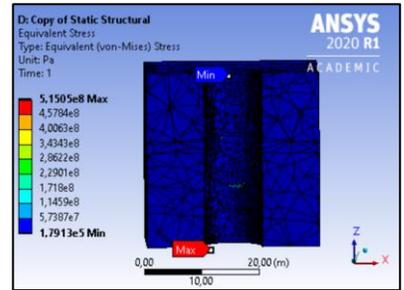
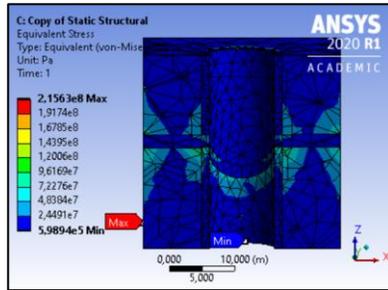
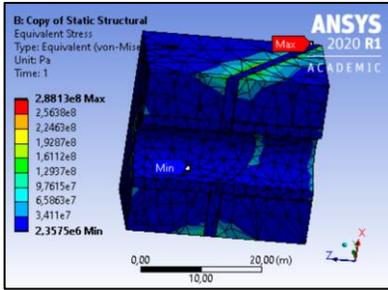


Figura 4.100: Modelo general superior (500m; 300m y 50m respectivamente).

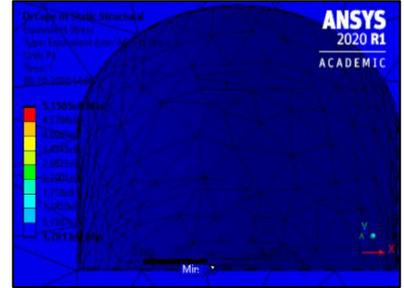
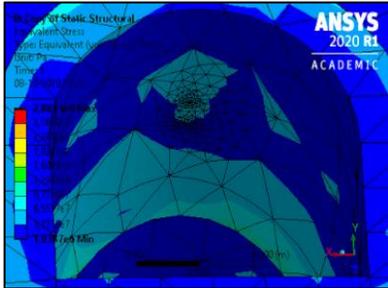


Figura 4.101: Modelo grieta clave (500m; 300m y 50m respectivamente).

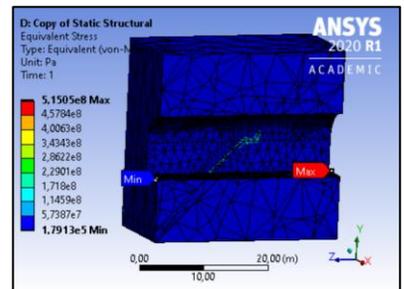
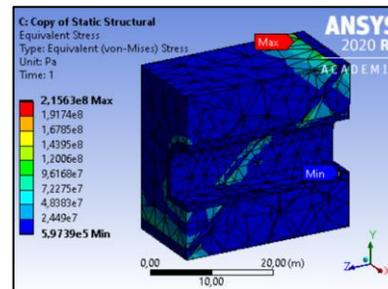
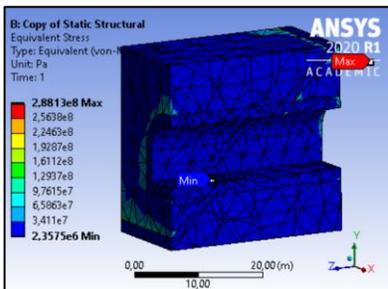


Figura 4.102: Modelo general izquierdo (500m; 300m y 50m respectivamente).

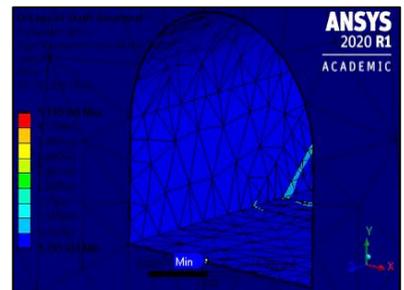
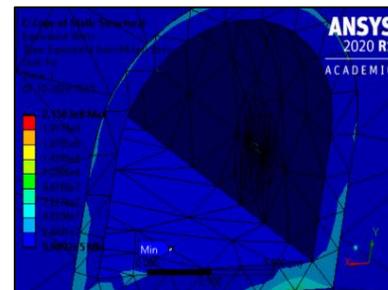


Figura 4.103: Modelo grieta inferior izquierda (500m; 300m y 50m respectivamente).

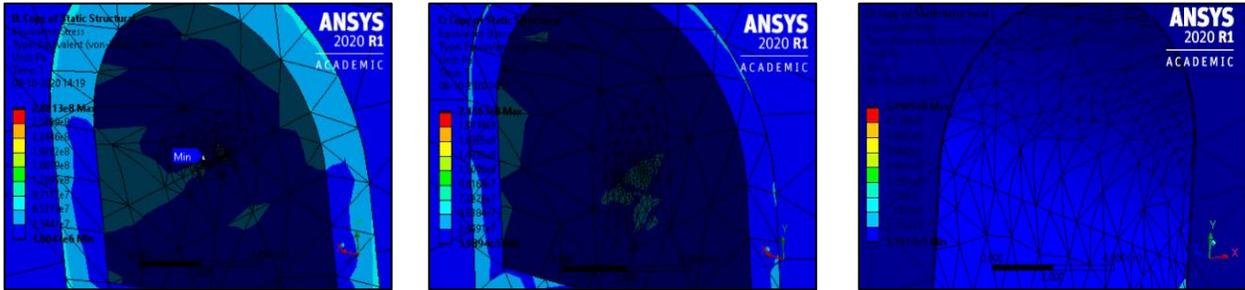


Figura 4.104: Modelo grieta superior izquierda (500m; 300m y 50m respectivamente).

Para el caso del granito fisurado, con una falla de 45° perpendicular al eje del túnel contra el buzamiento, se observó que en la mayoría de los modelos que estaban a una profundidad de 50m no se presentaron mayores alteraciones, tanto en los valores de tensión equivalente mínima y máxima como en la forma en la que estaban distribuidas estas tensiones. Se encontraron algunas alteraciones producidas en los modelos al ingresar las grietas entre las que destacan:

Se generó una zona de mayor tensión en las grietas de los modelos de grieta inferior derecha (300m); grieta superior derecha (300m y 500m); grieta en la clave del túnel (300m y 500m); grieta superior izquierda (300m y 500m).

La mayoría de estos modelos mantuvieron la forma de las zonas de tensión sin provocar grandes alteraciones en general, pese a esto, hubo algunos que sí modificaron o alteraron la tensión equivalente los cuales consisten en el modelo de la grieta superior derecha (300m) y el modelo de la grieta superior izquierda (500m), que generó una zona de mayor tensión entre la grieta y la falla; el modelo de la grieta superior derecha de 500m que aumento las tensiones en la falla y el contorno del túnel, aumentando a su vez el tamaño de la zona de mayores tensiones de estos elementos. En la grieta clave (500m) ocurre algo similar aumentando el tamaño que abarca la zona de mayores tensiones en la falla, en la grieta clave (300m) la zona de mayor tensión generada en la grieta se expande hacia el hastial derecho, asimismo, en el modelo de la grieta clave (500m) la zona de tensiones de la grieta se expande en dirección al contorno al final del túnel.

Granito fisurado falla de 45 grados de buzamiento perpendicular al eje del túnel (Excavación con buzamiento):

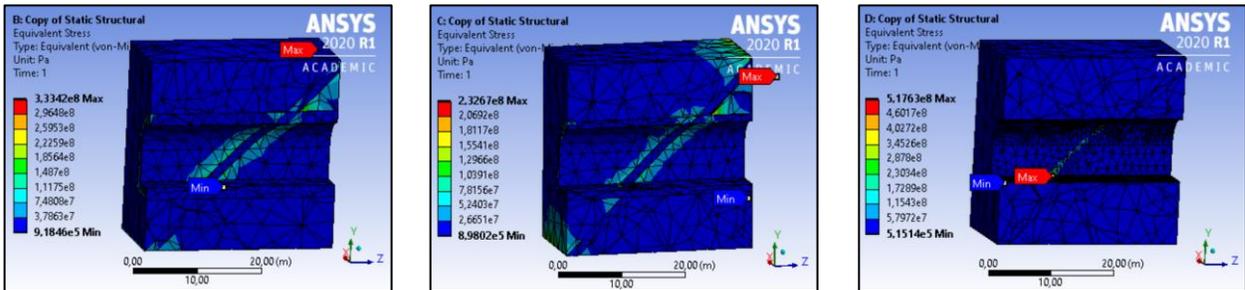


Figura 4.105: Modelo general derecho (500m; 300m y 50m respectivamente).



Figura 4.106: Modelo grieta inferior derecha (500m; 300m y 50m respectivamente).



Figura 4.107: Modelo grieta superior derecha (500m; 300m y 50m respectivamente).

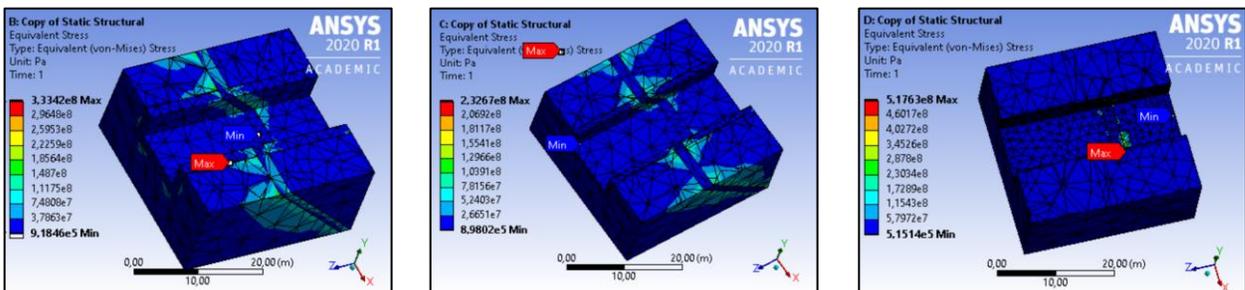


Figura 4.108: Modelo general inferior (500m; 300m y 50m respectivamente).

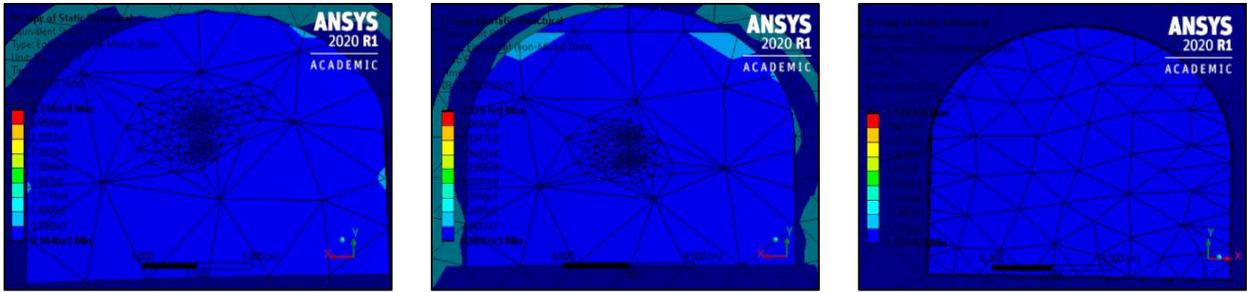


Figura 4.109: Modelo grieta inferior centro (500m; 300m y 50m respectivamente).

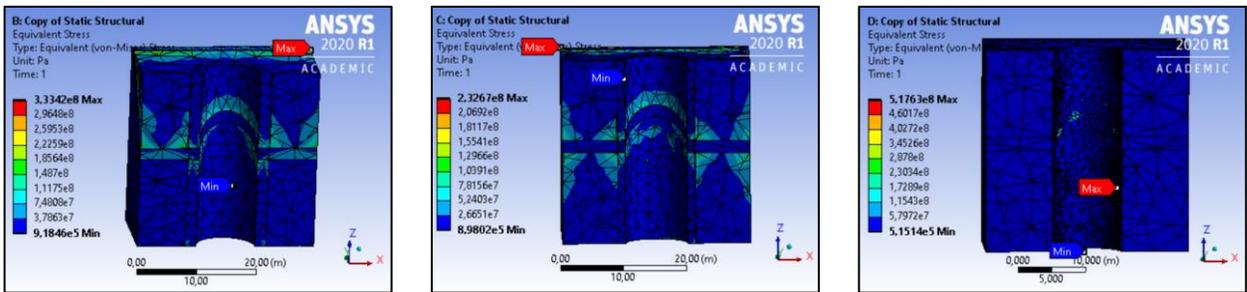


Figura 4.110: Modelo general superior (500m; 300m y 50m respectivamente).

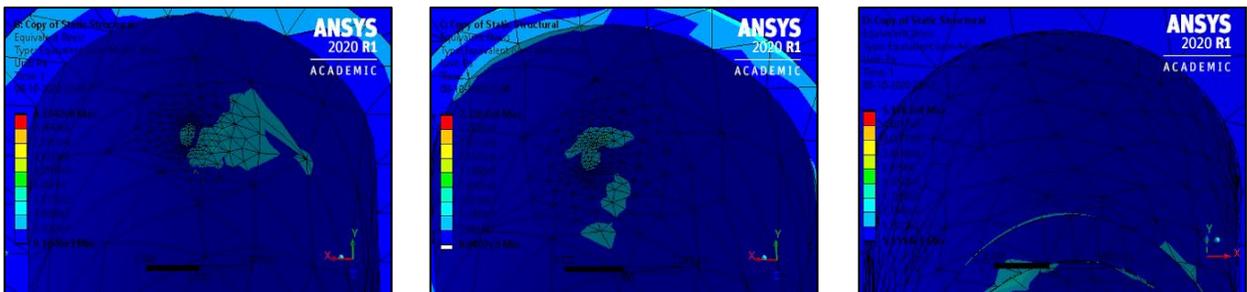


Figura 4.111: Modelo grieta clave (500m; 300m y 50m respectivamente).

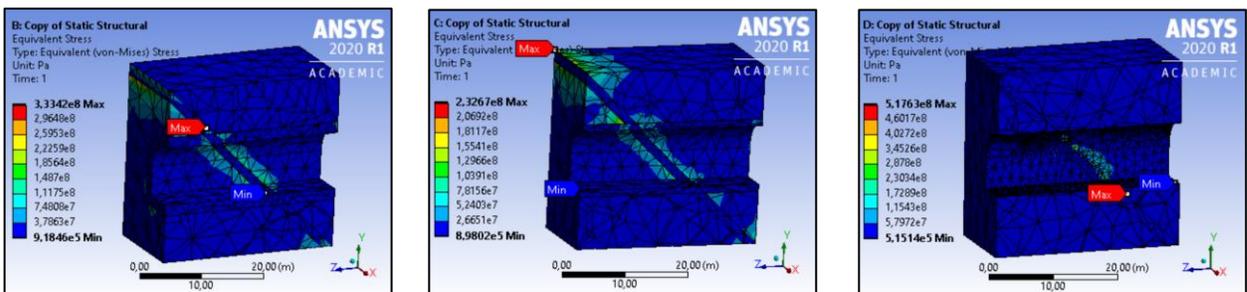


Figura 4.112: Modelo general izquierdo (500m; 300m y 50m respectivamente).

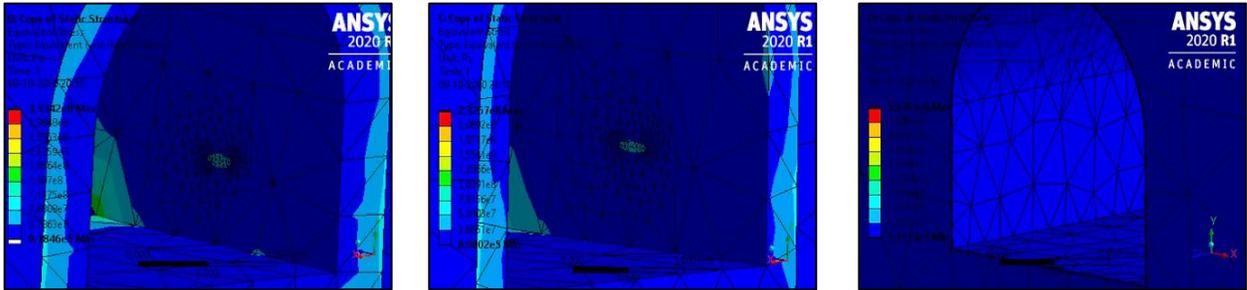


Figura 4.113: Modelo grieta inferior izquierda (500m; 300m y 50m respectivamente).

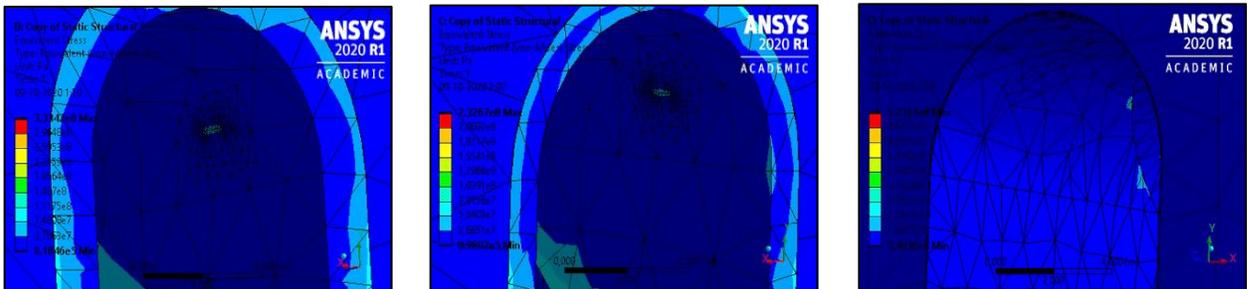


Figura 4.114: Modelo grieta superior izquierda (500m; 300m y 50m respectivamente).

En el caso del granito fisurado, con una falla de 45° perpendicular al eje del túnel a favor el buzamiento, se observó que no se presentaron mayores alteraciones en los modelos a una profundidad de 50m, tanto en los valores de tensión equivalente mínima y máxima como en la forma en la que estaban distribuidas estas tensiones.

Se observaron alteraciones en los modelos a una profundidad de 500m y 300m, destacando que, a grosso modo, se mantuvo la forma en la que estaban distribuidas las tensiones en el modelo general.

Una alteración provocada por el ingreso de las grietas que se observó fue que a lo largo de la grieta se generó una zona de mayor tensión para los modelos de grieta superior derecha (300m y 500m); grieta inferior derecha (300m y 500m); grieta clave (300m y 500m); grieta inferior izquierda (300m y 500m); grieta superior izquierda (300m y 500m). En los modelos de la grieta superior derecha y la grieta clave, la zona de tensión generada tiene una extensión mayor, llegando a expandirse hacia el hastial izquierdo, en el caso de la grieta clave (500m) y en dirección a la falla, en caso de la grieta clave (300m).

Granito fisurado falla inferior de 45 grados paralelo al eje del túnel:

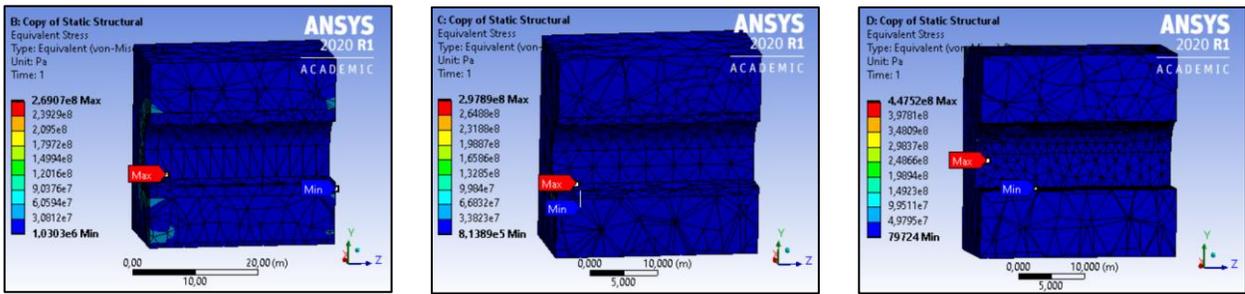


Figura 4.115: Modelo general derecho (500m; 300m y 50m respectivamente).

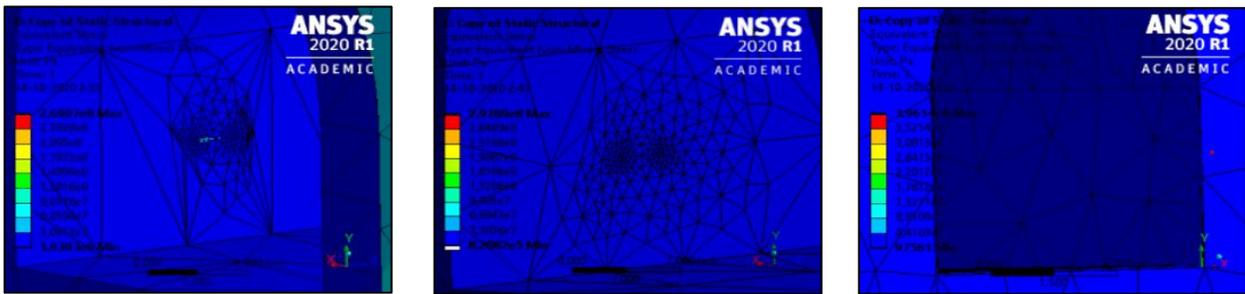


Figura 4.116: Modelo grieta inferior derecha (500m; 300m y 50m respectivamente).

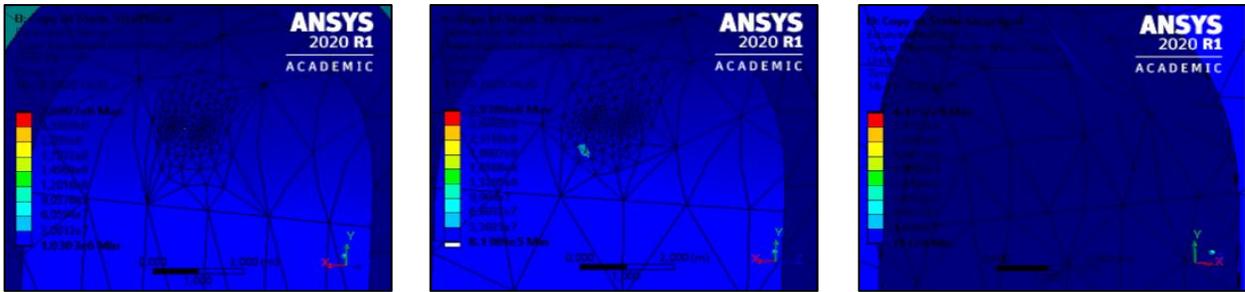


Figura 4.117: Modelo grieta superior derecha (500m; 300m y 50m respectivamente).

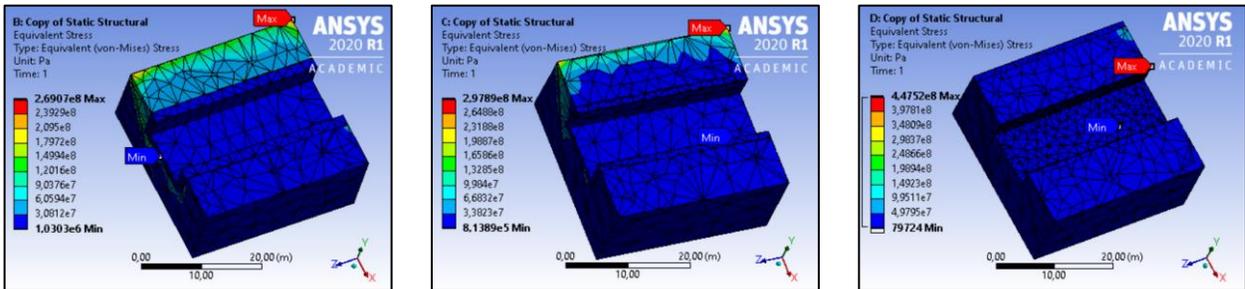


Figura 4.118: Modelo general inferior (500m; 300m y 50m respectivamente).

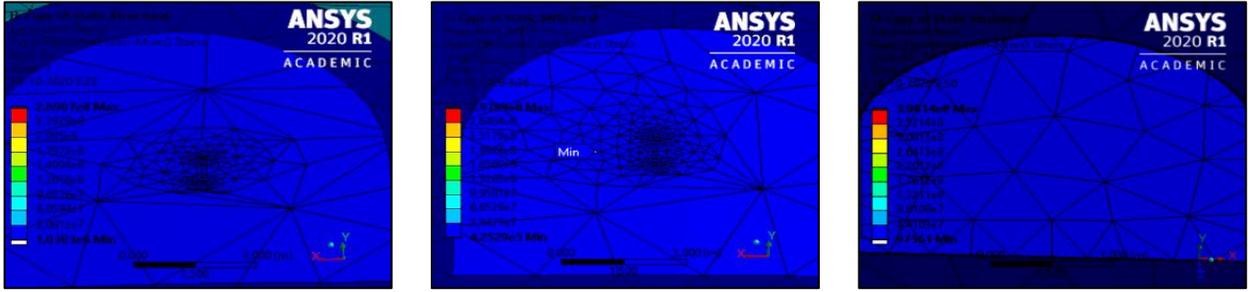


Figura 4.119: Modelo grieta inferior centro (500m; 300m y 50m respectivamente).

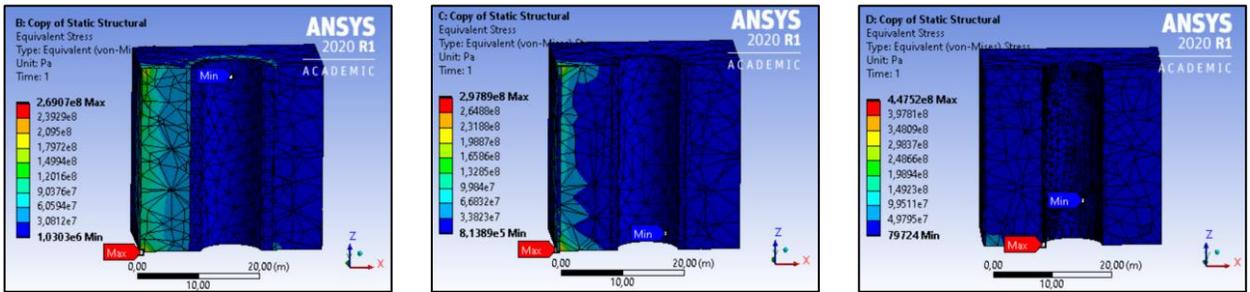


Figura 4.120: Modelo general superior (500m; 300m y 50m respectivamente).



Figura 4.121: Modelo grieta clave (500m; 300m y 50m respectivamente).

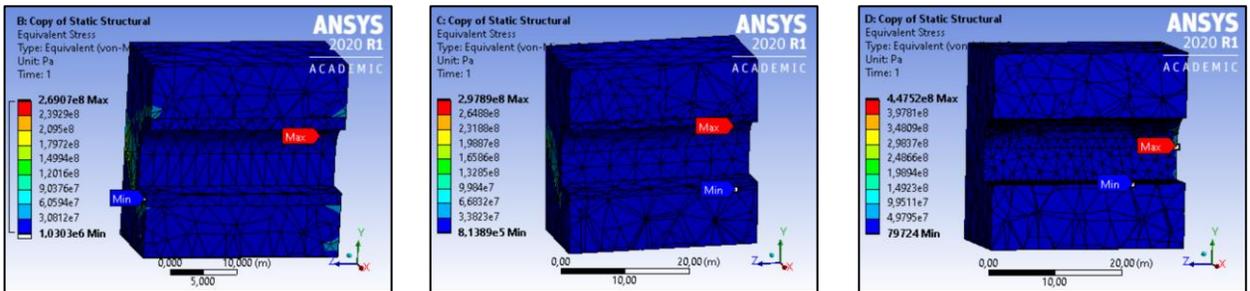


Figura 4.122: Modelo general izquierda (500m; 300m y 50m respectivamente).

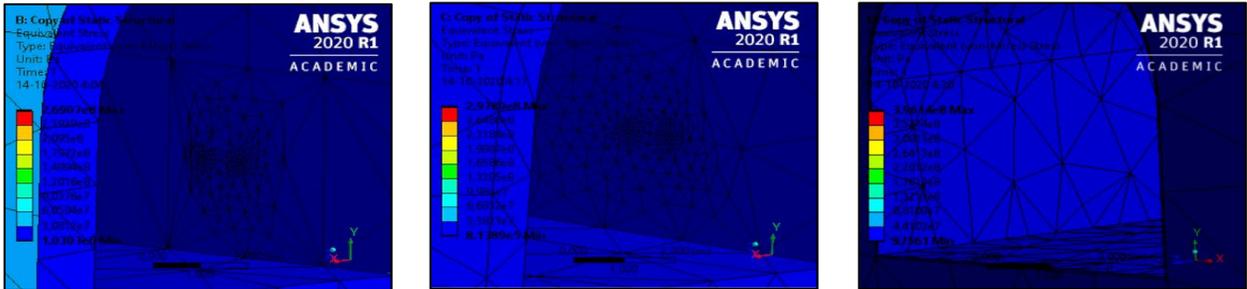


Figura 4.123: Modelo grieta inferior izquierda (500m; 300m y 50m respectivamente).



Figura 4.124: Modelo grieta superior izquierda (500m; 300m y 50m respectivamente).

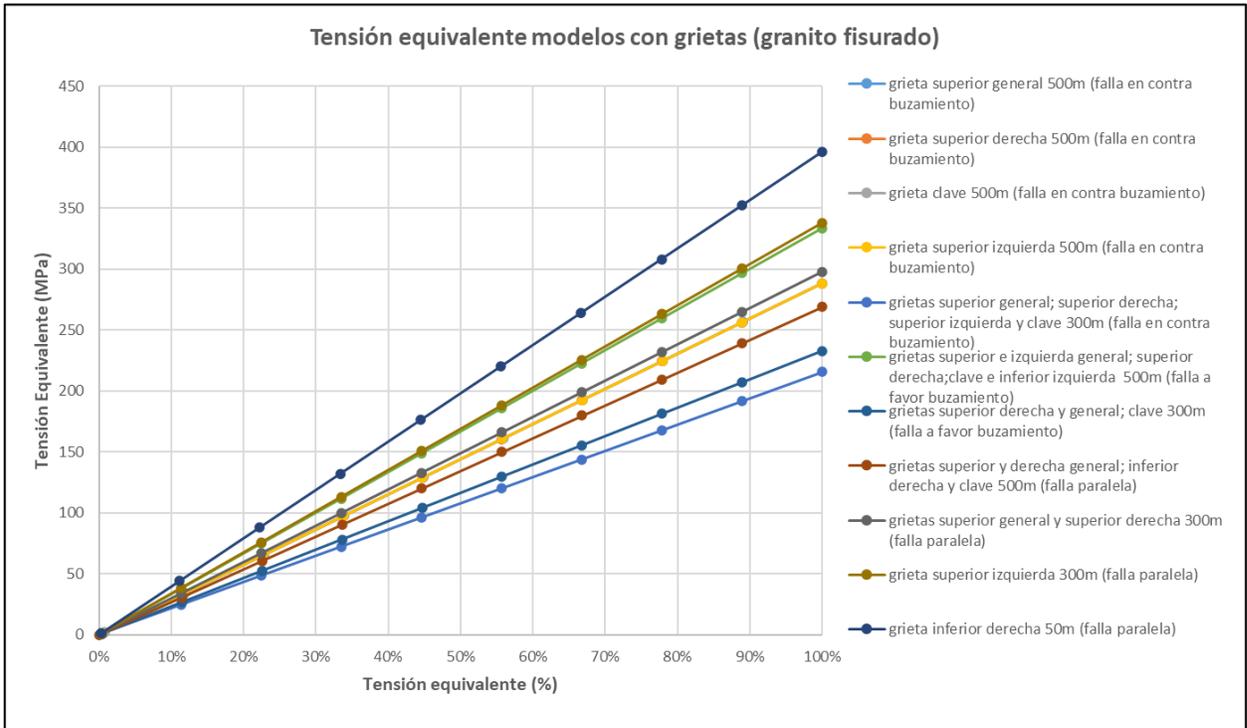


Figura 4.125: Tensión equivalente en modelos con grietas de mayor relevancia para granito fisurado.

En los modelos de granito fisurado, con una falla inferior de 45° paralelo al eje del túnel, se observó que a una profundidad de 50m no se presentaron mayores alteraciones en la forma en la que estaban concentradas las tensiones, no obstante, en los modelos de la grieta inferior derecha, inferior centro e inferior izquierda, los valores de tensión equivalente máxima y mínima cambian, desde un valor de 0,079724 MPa a 0,097561 MPa para la mínima y desde 447,52 MPa a 396,14 MPa para la máxima. De manera general, se mantuvo la forma en las que estaban distribuidas las concentraciones de tensiones, pese a esto, existieron algunas alteraciones provocadas por las grietas en los modelos a una profundidad de 500m y 300m.

Se generó una zona de mayor tensión a lo largo de la grieta para los modelos de grieta inferior derecha (500m); grieta superior derecha (300m); grieta clave (500m); grieta superior izquierda (300m). Para el modelo de grieta clave (500m) y el de la grieta superior izquierda (300m) la zona de tensión de la grieta se encuentra expandida en dirección diagonal hacia la falla en la parte inferior izquierda.

Granito sin fisurar falla de 45 grados de buzamiento perpendicular al eje del túnel (Excavación contra buzamiento):

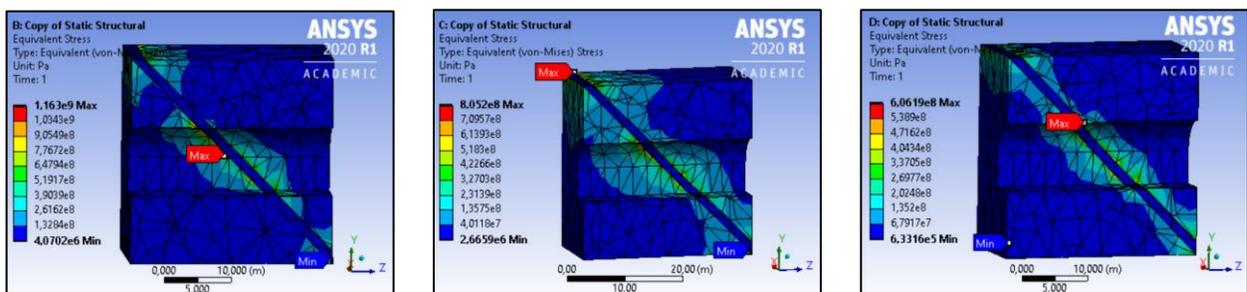


Figura 4.126: Modelo general derecho (500m; 300m y 50m respectivamente).

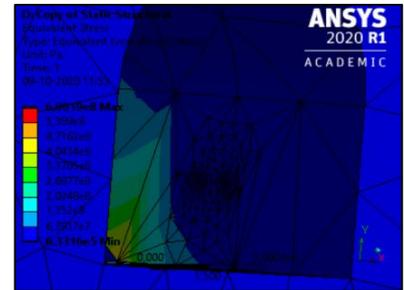
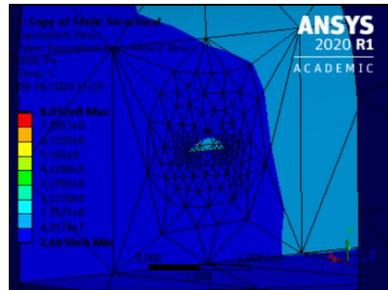


Figura 4.127: Modelo grieta inferior derecha (500m; 300m y 50m respectivamente).

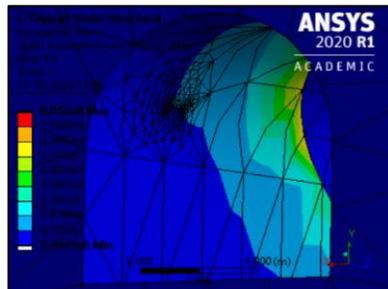


Figura 4.128: Modelo grieta superior derecha (500m; 300m y 50m respectivamente).

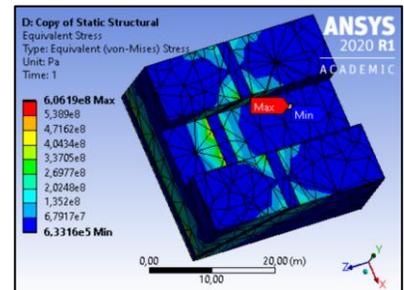
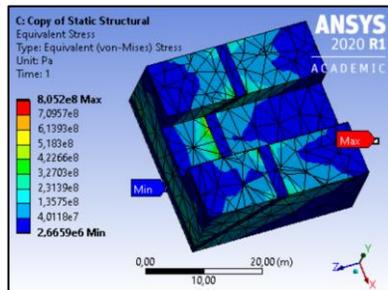
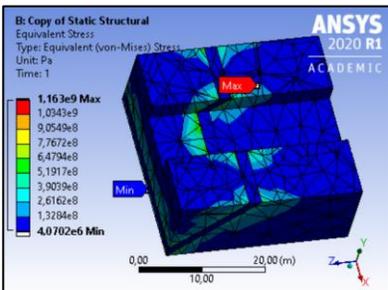


Figura 4.129: Modelo general inferior (500m; 300m y 50m respectivamente).

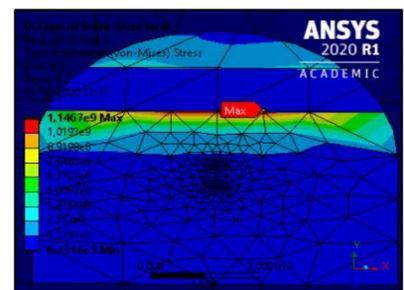
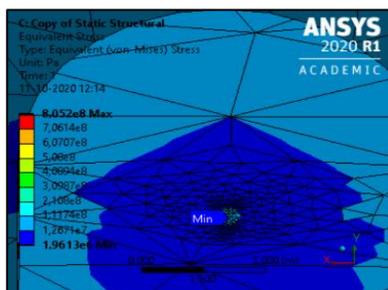
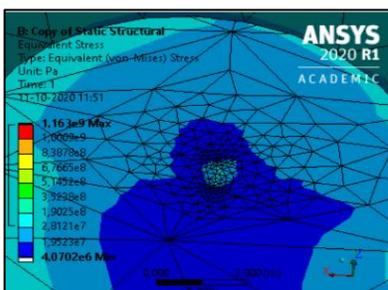


Figura 4.130: Modelo grieta inferior centro (500m; 300m y 50m respectivamente).

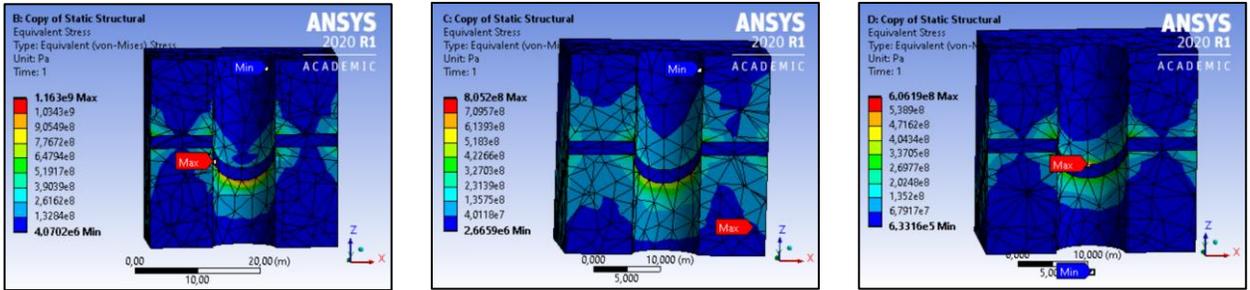


Figura 4.131: Modelo general superior (500m; 300m y 50m respectivamente).

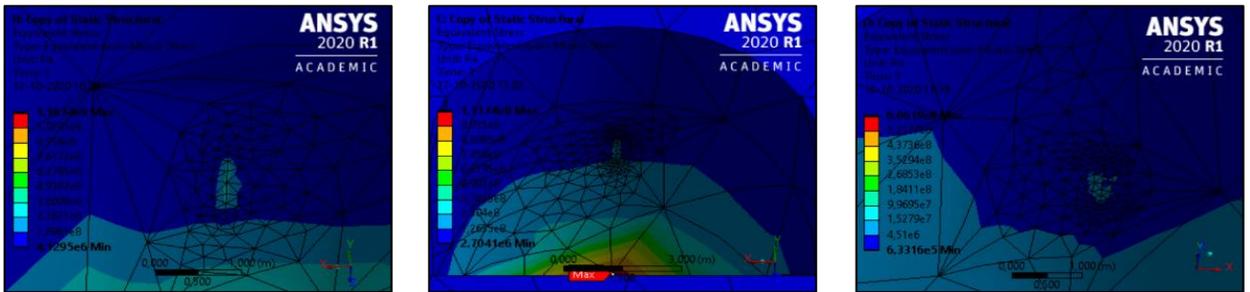


Figura 4.132: Modelo grieta clave (500m; 300m y 50m respectivamente).

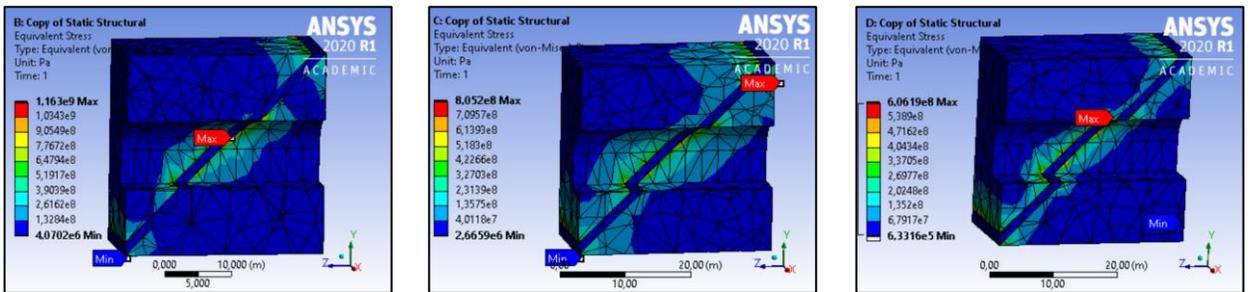


Figura 4.133: Modelo general izquierda (500m; 300m y 50m respectivamente).



Figura 4.134: Modelo grieta inferior izquierda (500m; 300m y 50m respectivamente).

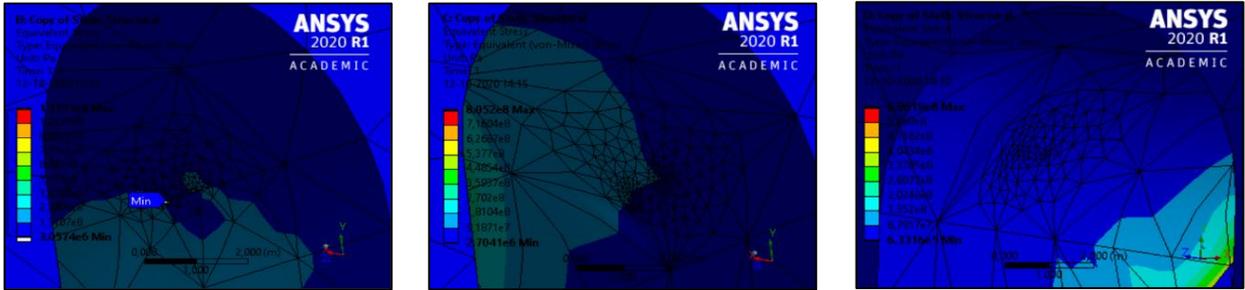


Figura 4.135: Modelo grieta superior izquierda (500m; 300m y 50m respectivamente).

Granito sin fisurar falla de 45 grados de buzamiento perpendicular al eje del túnel (Excavación con buzamiento):

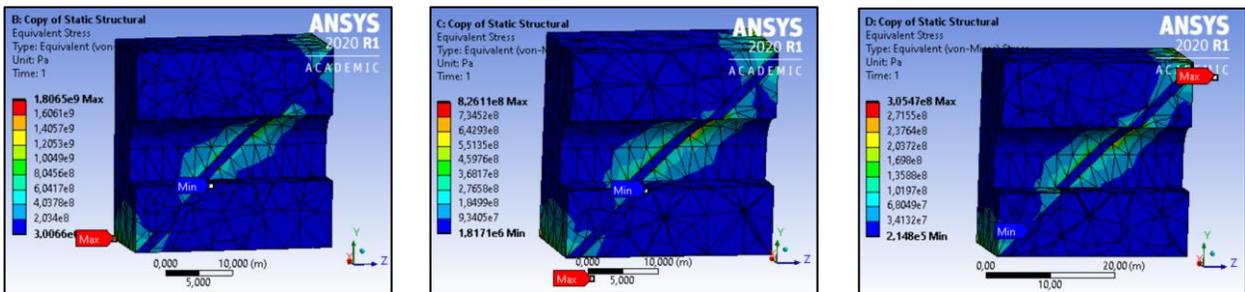


Figura 4.136: Modelo general derecho (500m; 300m y 50m respectivamente).

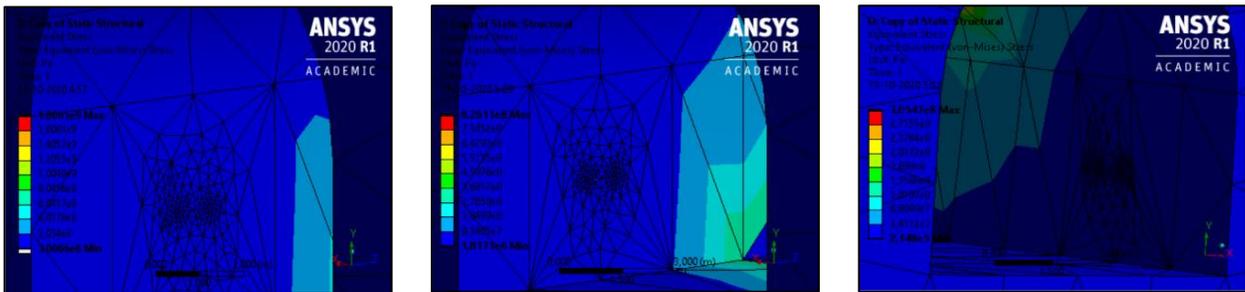


Figura 4.137: Modelo grieta inferior derecha (500m; 300m y 50m respectivamente).

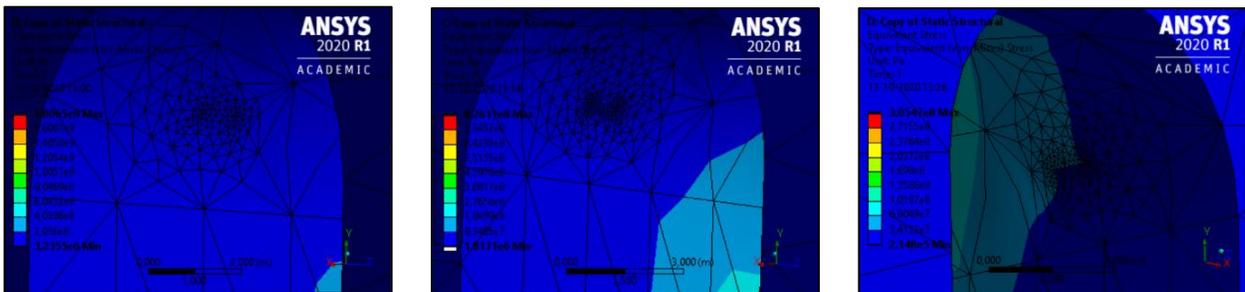


Figura 4.138: Modelo grieta superior derecha (500m; 300m y 50m respectivamente).

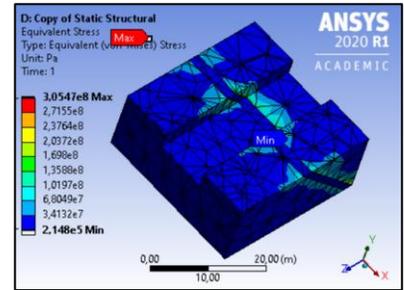
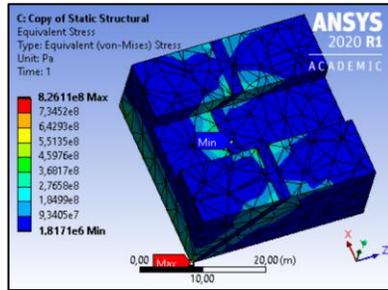
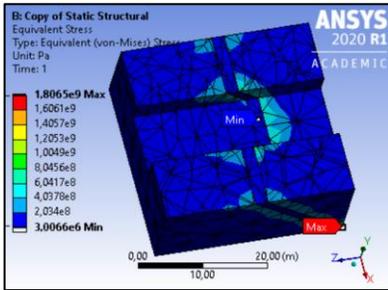


Figura 4.139: Modelo general inferior (500m; 300m y 50m respectivamente).

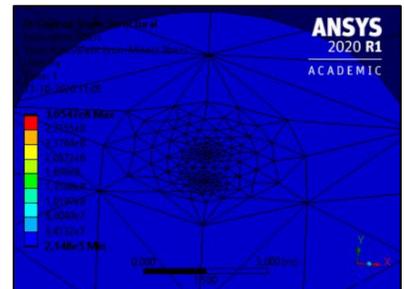
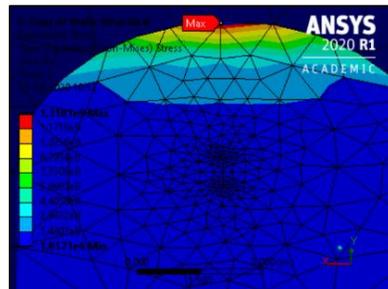
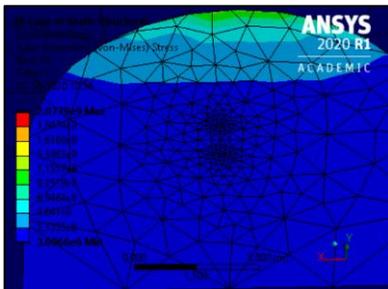


Figura 4.140: Modelo grieta inferior centro (500m; 300m y 50m respectivamente).

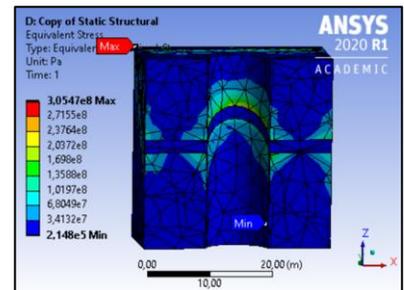
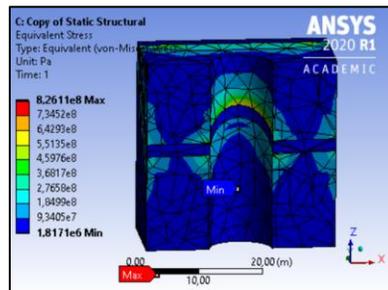
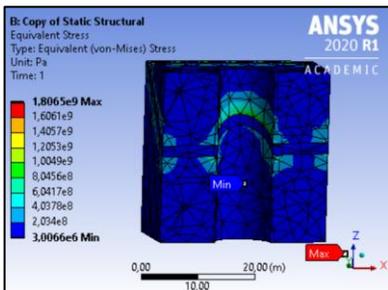


Figura 4.141: Modelo general superior (500m; 300m y 50m respectivamente).

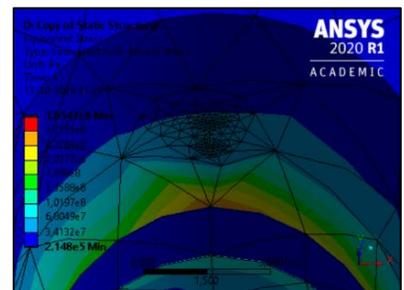
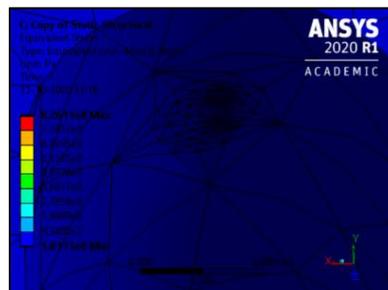
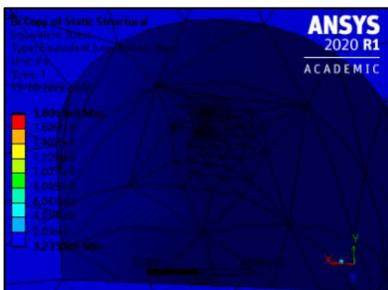


Figura 4.142: Modelo grieta clave (500m; 300m y 50m respectivamente).

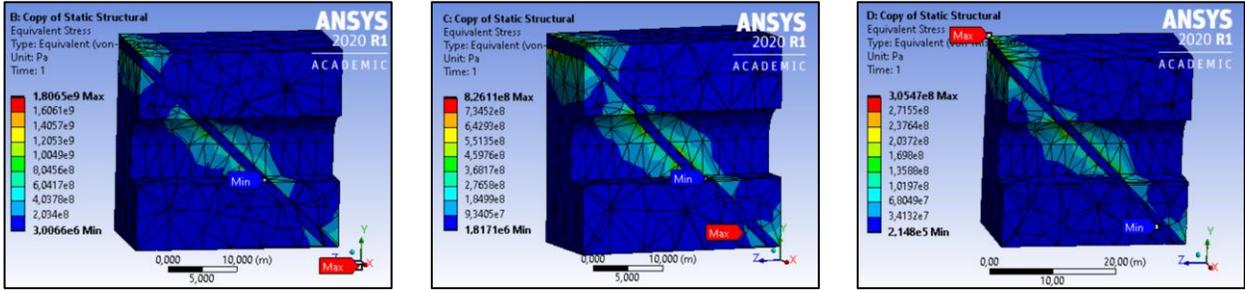


Figura 4.143: Modelo general izquierdo (500m; 300m y 50m respectivamente).

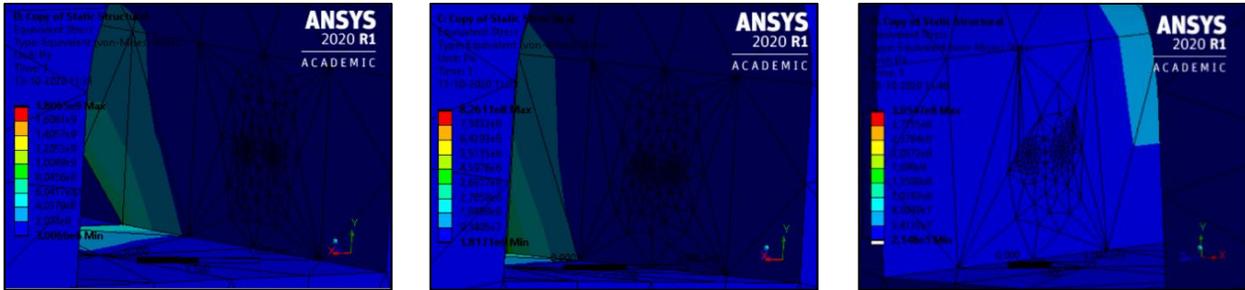


Figura 4.144: Modelo grieta inferior izquierda (500m; 300m y 50m respectivamente).



Figura 4.145: Modelo grieta superior izquierda (500m; 300m y 50m respectivamente).

Granito sin fisurar falla inferior de 45 grados paralelo al eje del túnel:

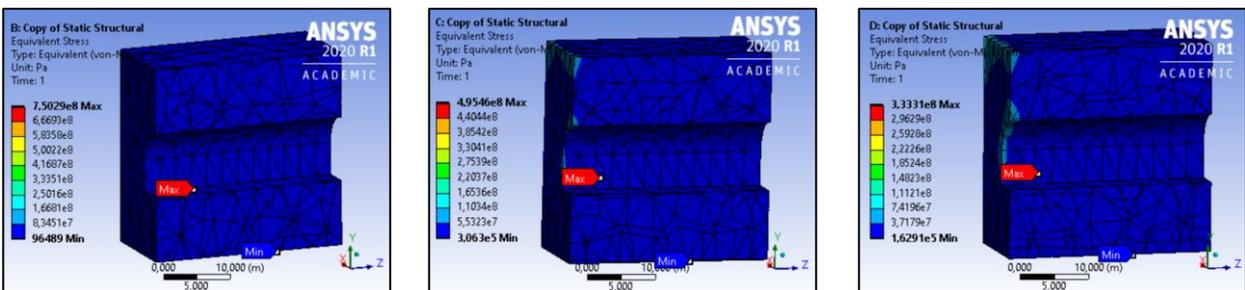


Figura 4.146: Modelo general derecho (500m; 300m y 50m respectivamente).

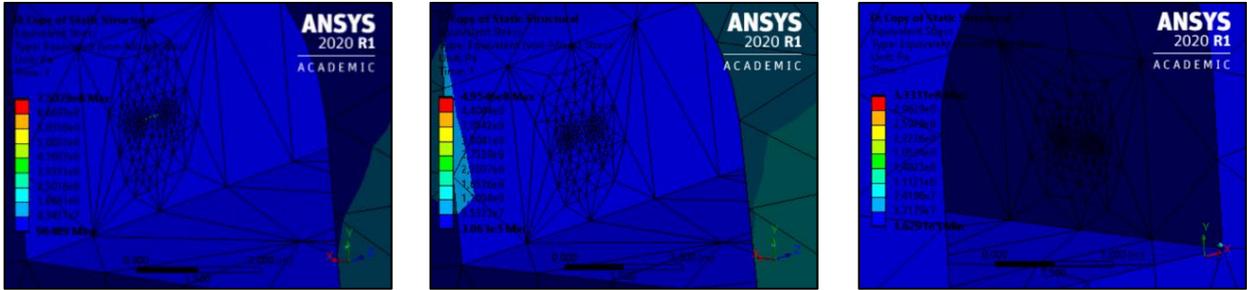


Figura 4.147: Modelo grieta inferior derecha (500m; 300m y 50m respectivamente).



Figura 4.148: Modelo grieta superior derecha (500m; 300m y 50m respectivamente).

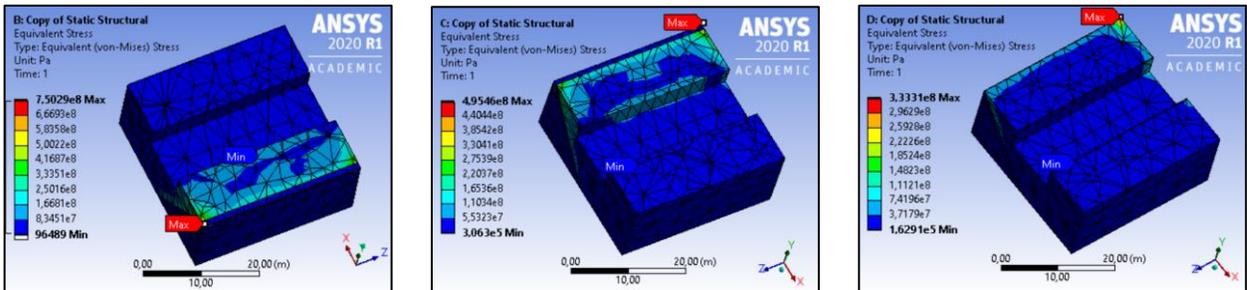


Figura 4.149: Modelo general inferior (500m; 300m y 50m respectivamente).

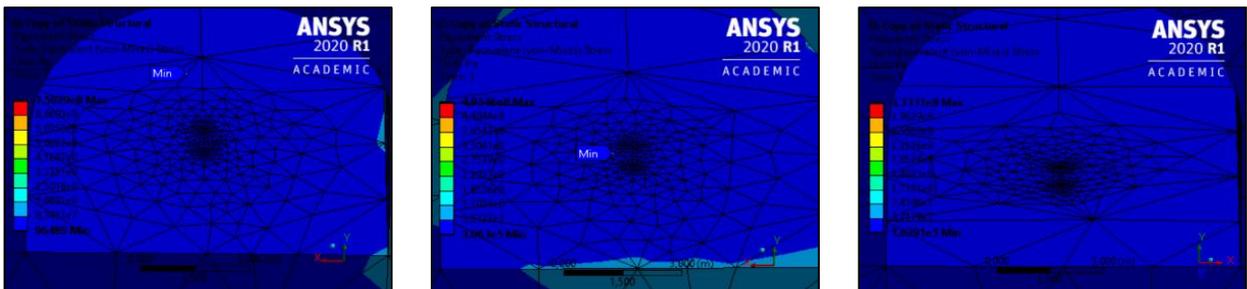


Figura 4.150: Modelo grieta inferior centro (500m; 300m y 50m respectivamente).

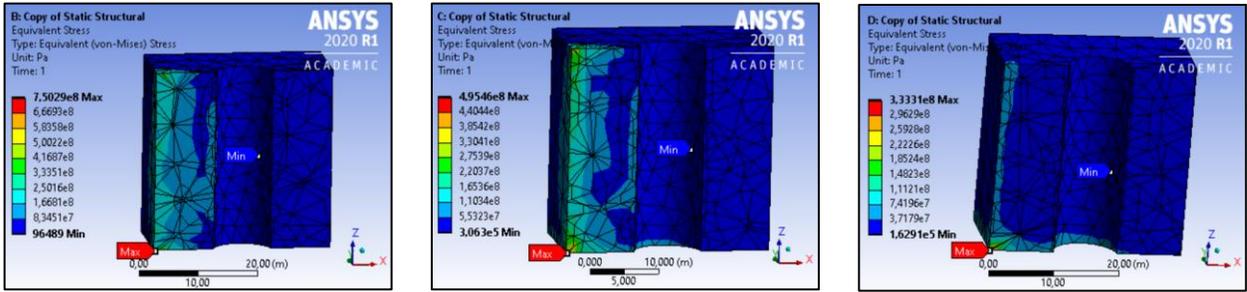


Figura 4.151: Modelo general superior (500m; 300m y 50m respectivamente).



Figura 4.152: Modelo grieta clave (500m; 300m y 50m respectivamente).

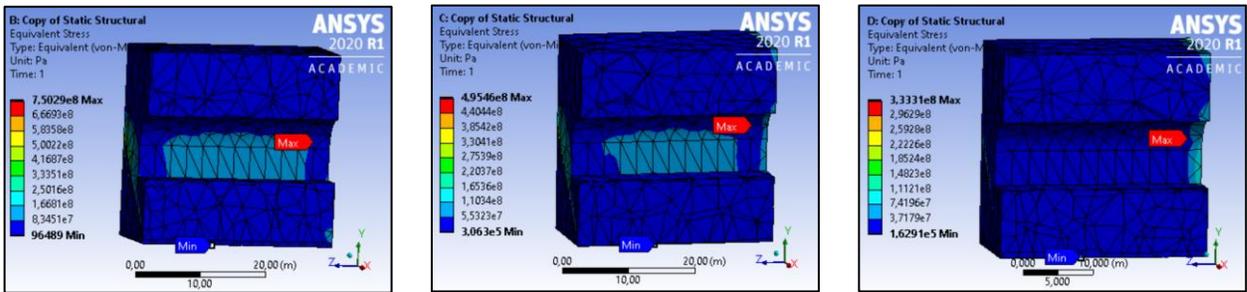


Figura 4.153: Modelo general izquierda (500m; 300m y 50m respectivamente).

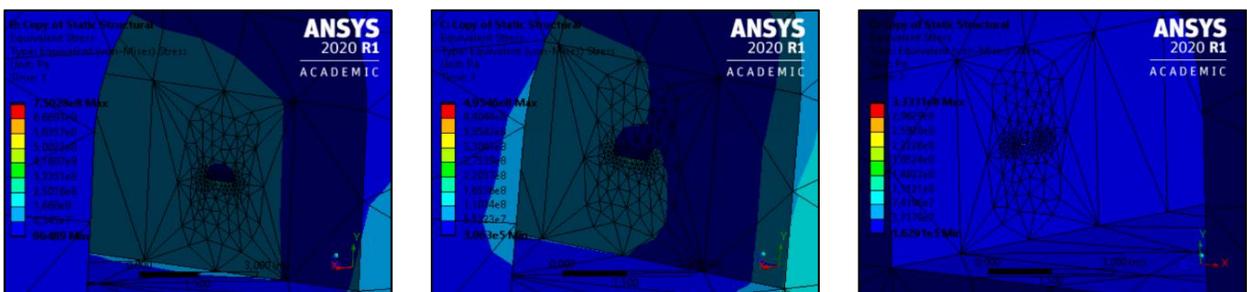


Figura 4.154: Modelo grieta inferior izquierda (500m; 300m y 50m respectivamente).

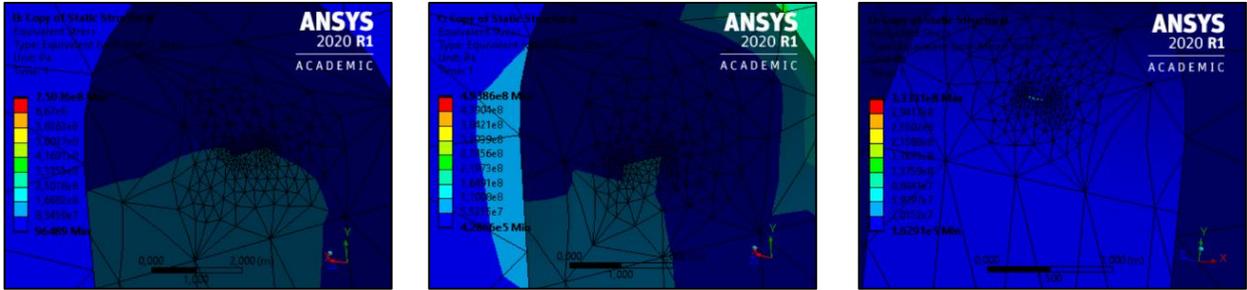


Figura 4.155: Modelo grieta superior izquierda (500m; 300m y 50m respectivamente).

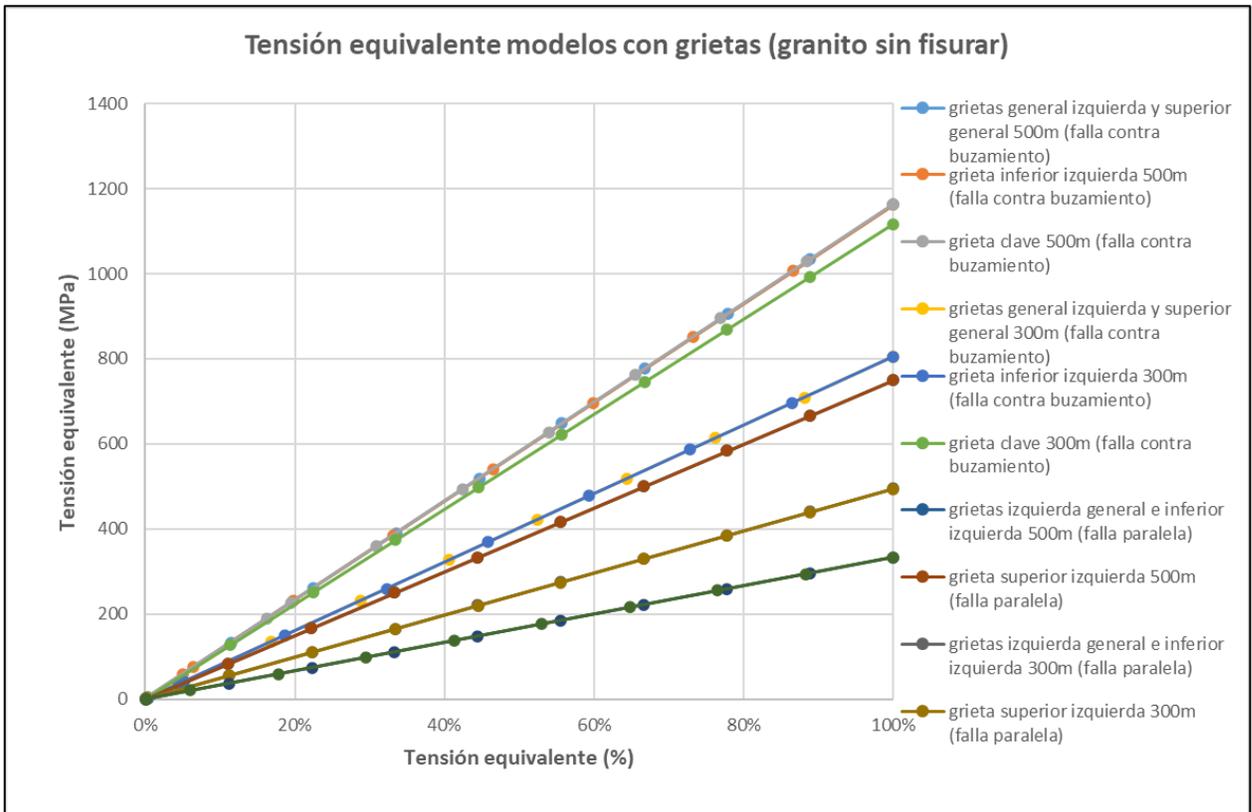


Figura 4.156: Tensión equivalente en modelos con grietas de mayor relevancia para granito sin fisurar.

En los modelos de granito no fisurado, se mantuvieron en su mayoría las mismas alteraciones presentes en los modelos anteriores, no obstante, hay algunas modificaciones que son necesarias de señalar. Para los casos a una profundidad de 50m, en algunos modelos como el de la grieta clave y la grieta inferior izquierda en la falla perpendicular de 45° en contra del buzamiento, se generó una zona de mayor tensión a lo largo de la grieta como había sucedido anteriormente en los casos a profundidades de 500m y 300m. Así mismo, para el caso de la grieta inferior central (50m), se incrementó

considerablemente la tensión equivalente máxima desde 606,19 MPa a 1155,1 MPa. En el mismo tipo de falla, en el modelo de la grieta inferior izquierda (500m), se generó una zona en donde las tensiones eran mayores, ubicada en el contorno del túnel el cual no tenía ninguna zona de concentración de tensiones antes de la grieta.

Otra alteración producida en estos modelos es lo que sucedió en la falla inferior de 45° paralelo al eje del túnel, en los casos de grieta inferior izquierda (500m y 300m), Como en otras ocasiones, se genera una zona con tensiones mayores a lo largo de la grieta pero, en la parte superior de estas, formando un radio semicircular se ubica una zona con tensiones más bajas rodeado por otra zona de tensiones más altas.

Tensión de corte:

En esta sección se presentan los resultados de la tensión de corte, en un principio los del granito fisurado y posteriormente los del granito sin fisurar. Primero se exhibe el modelo a evaluar con su tipo de falla correspondiente, sin grietas, para establecer un estado basal a comparar; seguido de los resultados de las grietas a evaluar (esto se repite para los 3 tipos de fallas evaluadas), finalizando con un análisis de los resultados expuestos.

Granito fisurado falla de 45 grados de buzamiento perpendicular al eje del túnel (Excavación contra buzamiento):

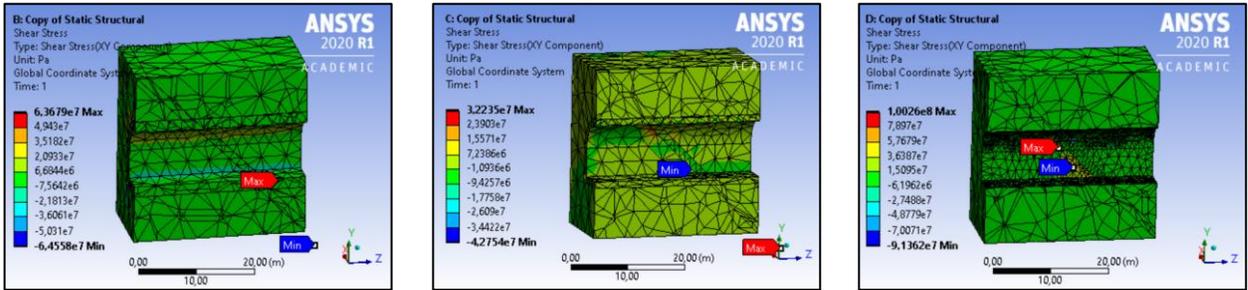


Figura 4.157: Modelo general derecho (500m; 300m y 50m respectivamente).

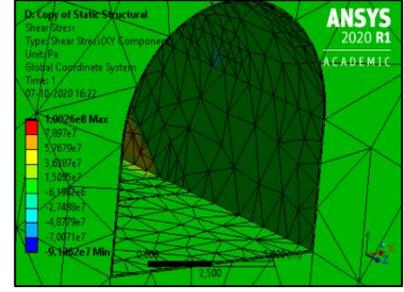
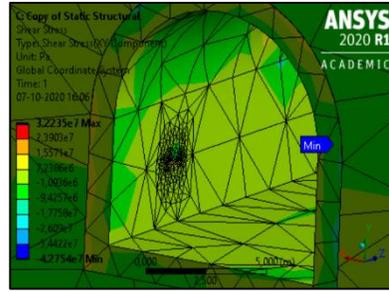
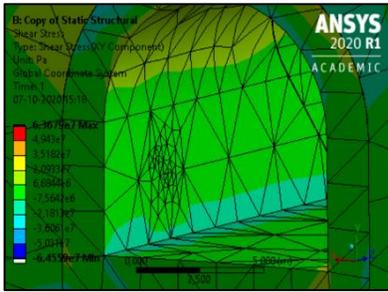


Figura 4.158: Modelo grieta inferior derecha (500m; 300m y 50m respectivamente).

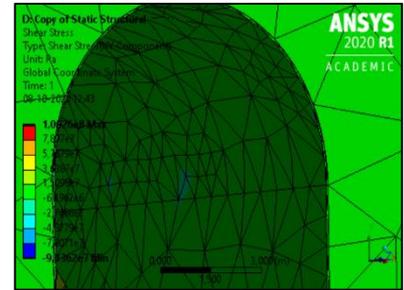
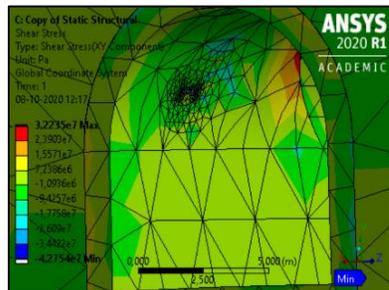
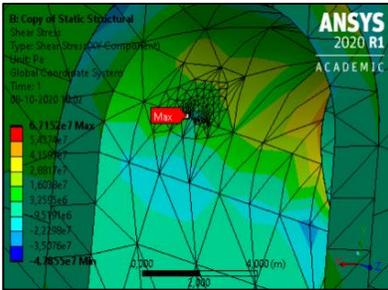


Figura 4.159: Modelo grieta superior derecha (500m; 300m y 50m respectivamente).

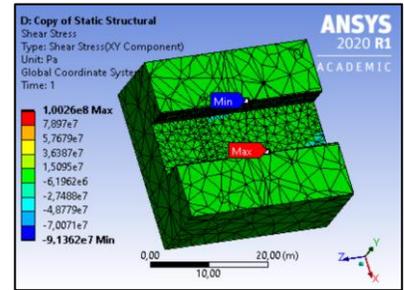
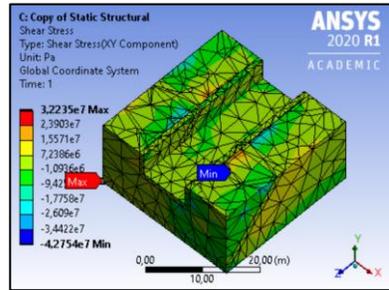
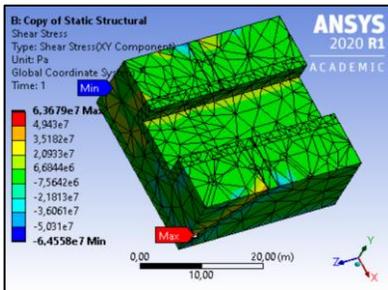


Figura 4.160: Modelo general inferior (500m; 300m y 50m respectivamente).

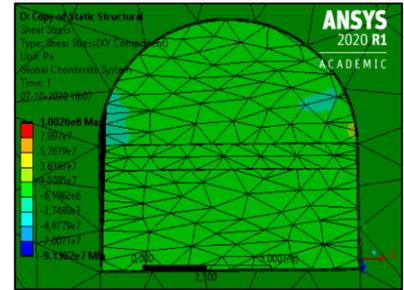
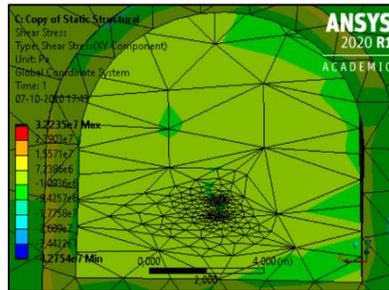
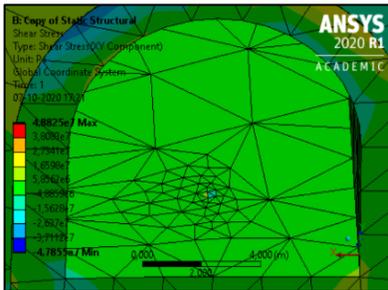


Figura 4.161: Modelo grieta inferior centro (500m; 300m y 50m respectivamente).

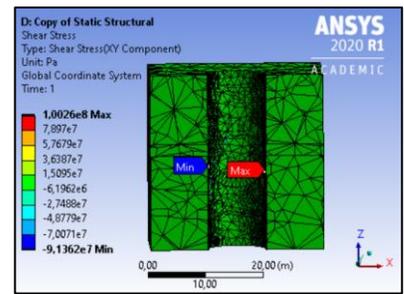
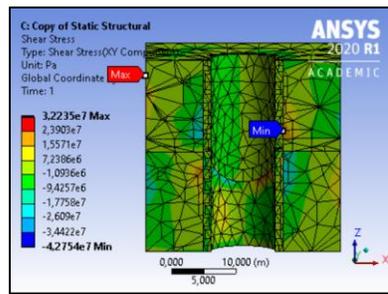
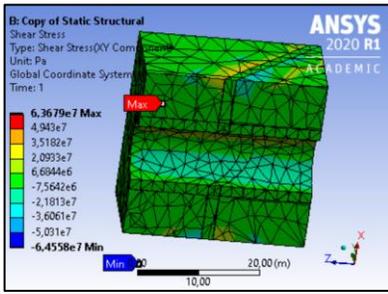


Figura 4.162: Modelo general superior (500m; 300m y 50m respectivamente).

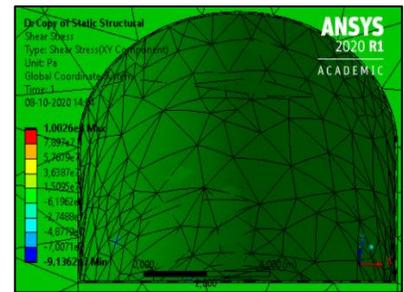
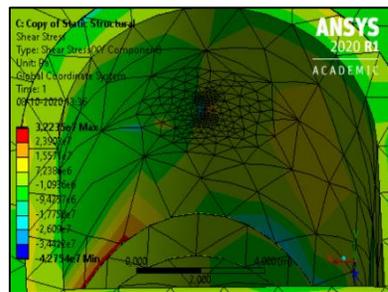
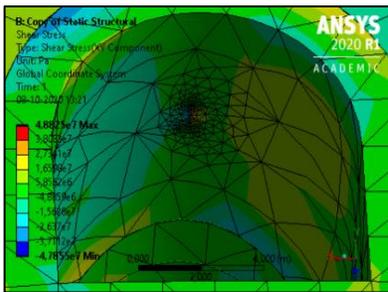


Figura 4.163: Modelo grieta clave (500m; 300m y 50m respectivamente).

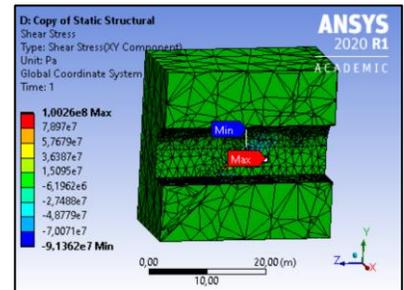
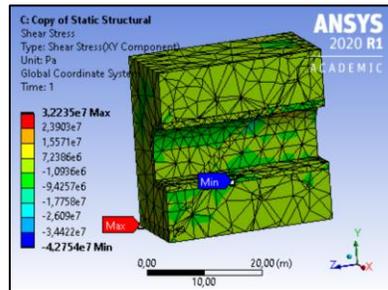
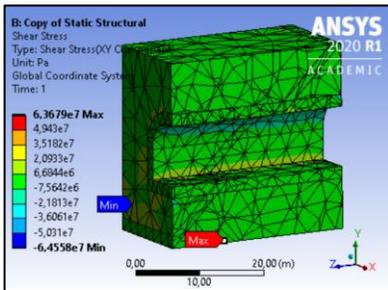


Figura 4.164: Modelo general izquierdo (500m; 300m y 50m respectivamente).

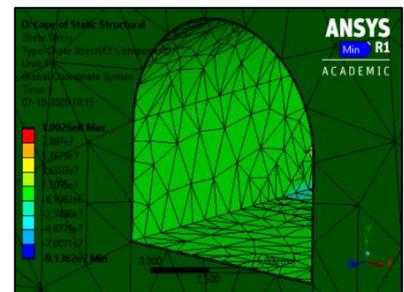
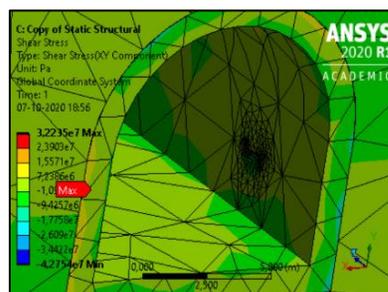
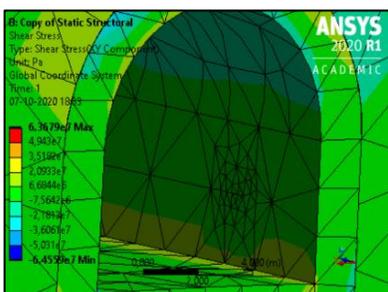


Figura 4.165: Modelo grieta inferior izquierda (500m; 300m y 50m respectivamente).

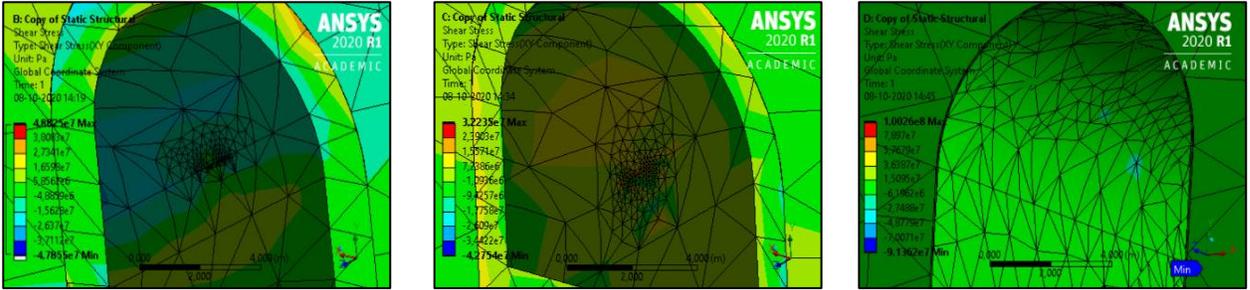


Figura 4.166: Modelo grieta superior izquierda (500m; 300m y 50m respectivamente).

Granito fisurado falla de 45 grados de buzamiento perpendicular al eje del túnel (Excavación con buzamiento):

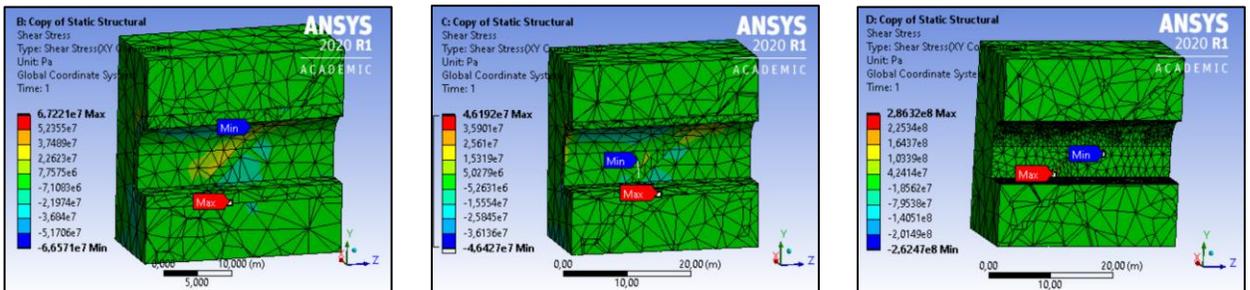


Figura 4.167: Modelo general derecho (500m; 300m y 50m respectivamente).

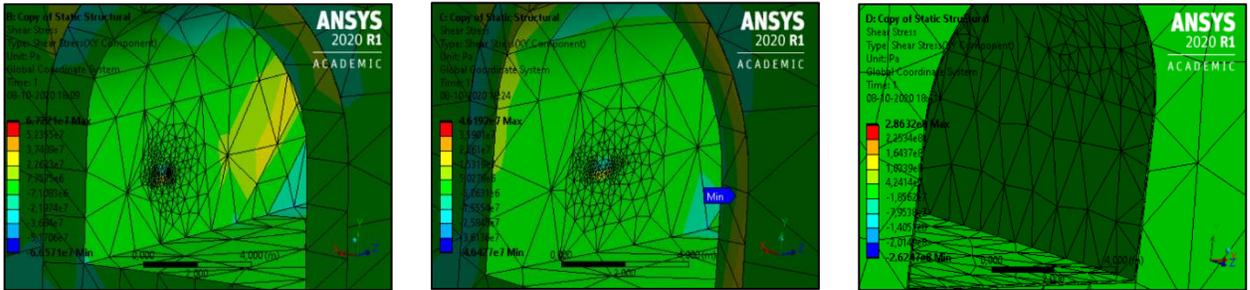


Figura 4.168: Modelo grieta inferior derecha (500m; 300m y 50m respectivamente).

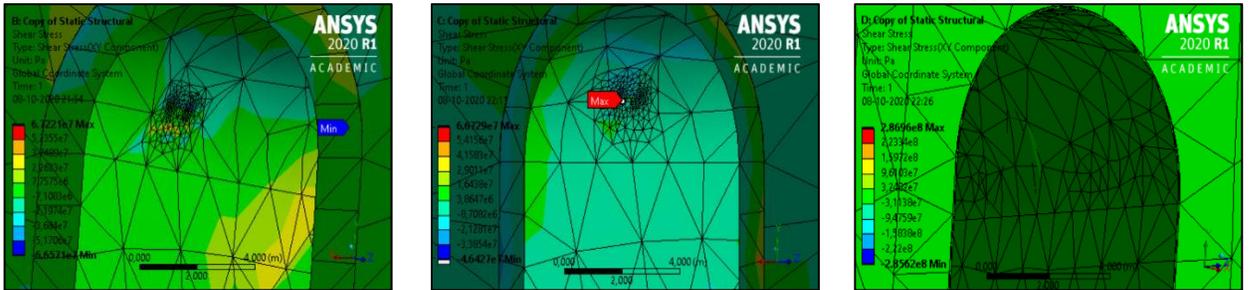


Figura 4.169: Modelo grieta superior derecha (500m; 300m y 50m respectivamente).

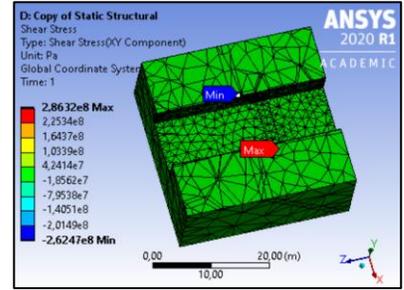
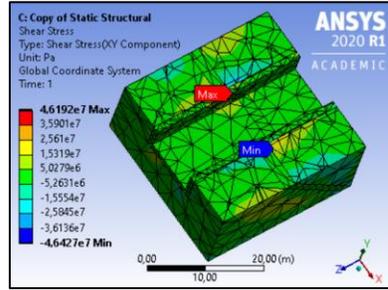
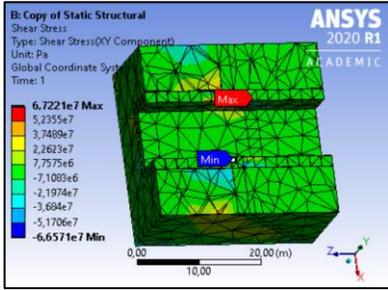


Figura 4.170: Modelo general inferior (500m; 300m y 50m respectivamente).

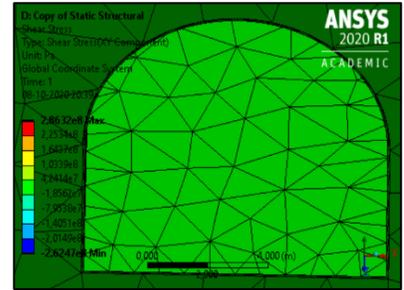
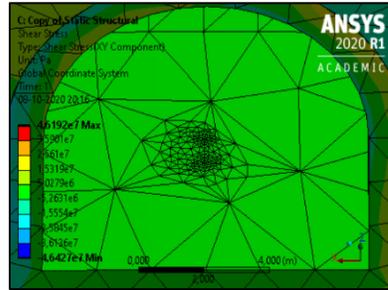
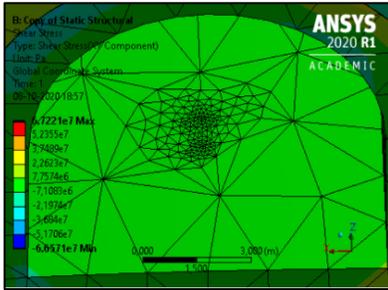


Figura 4.171: Modelo grieta inferior centro (500m; 300m y 50m respectivamente).

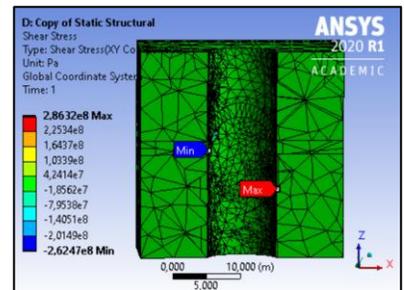
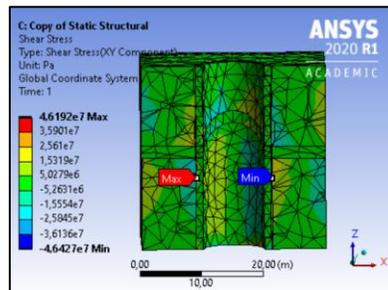
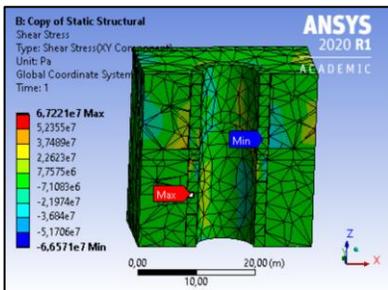


Figura 4.172: Modelo general superior (500m; 300m y 50m respectivamente).

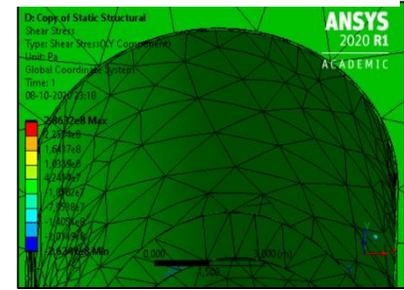
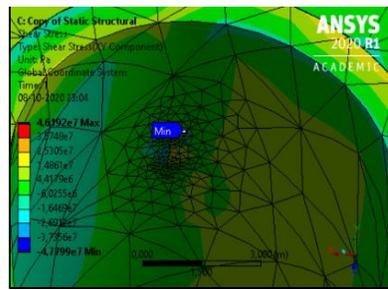
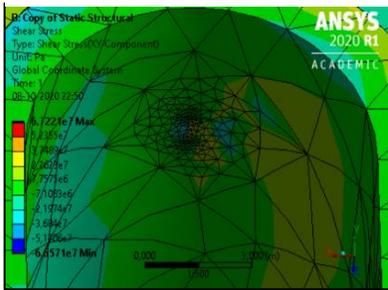


Figura 4.173: Modelo grieta clave (500m; 300m y 50m respectivamente).

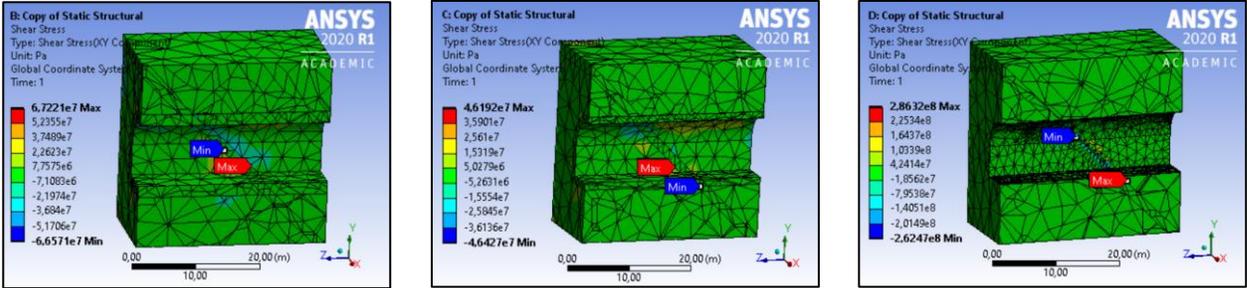


Figura 4.174: Modelo general izquierdo (500m; 300m y 50m respectivamente).

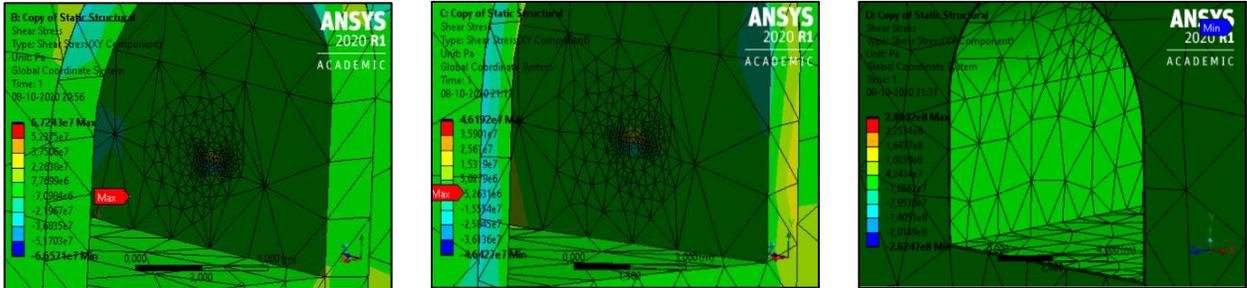


Figura 4.175: Modelo grieta inferior izquierda (500m; 300m y 50m respectivamente).

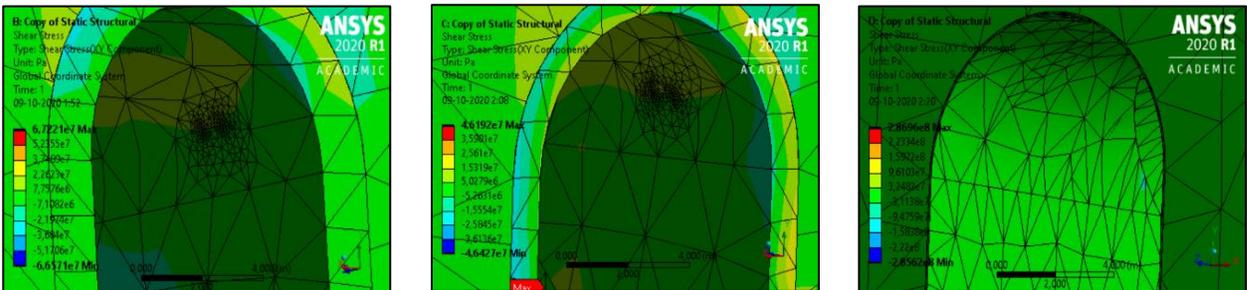


Figura 4.176: Modelo grieta superior izquierda (500m; 300m y 50m respectivamente).

Granito fisurado falla inferior de 45 grados paralelo al eje del túnel:

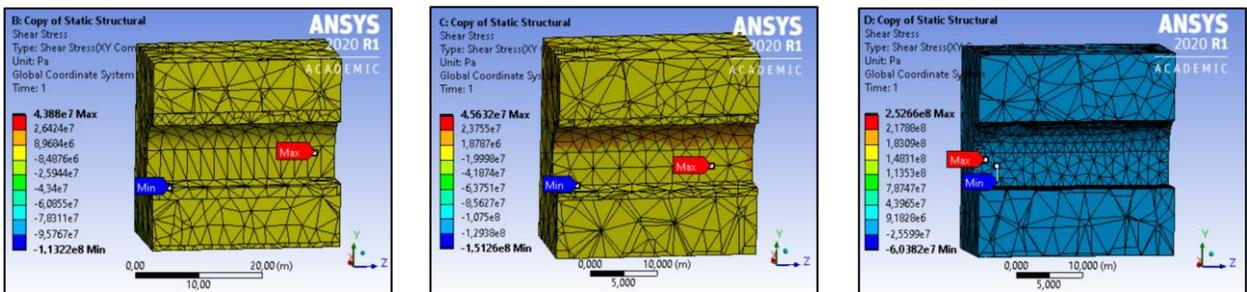


Figura 4.177: Modelo general derecho (500m; 300m y 50m respectivamente).

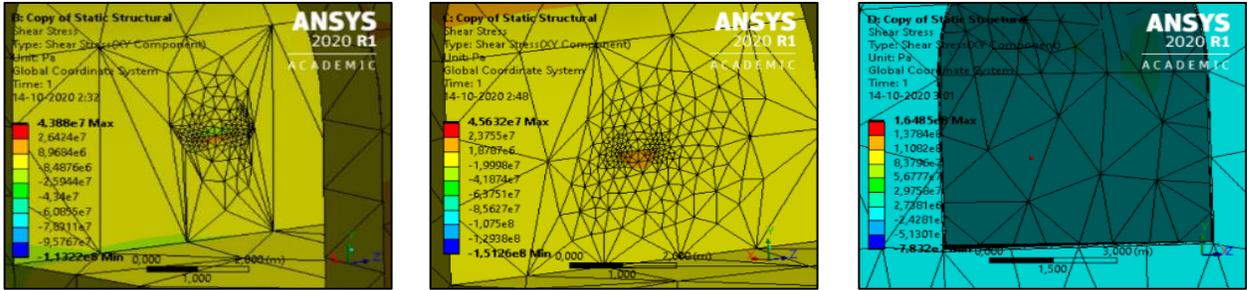


Figura 4.178: Modelo grieta inferior derecha (500m; 300m y 50m respectivamente).

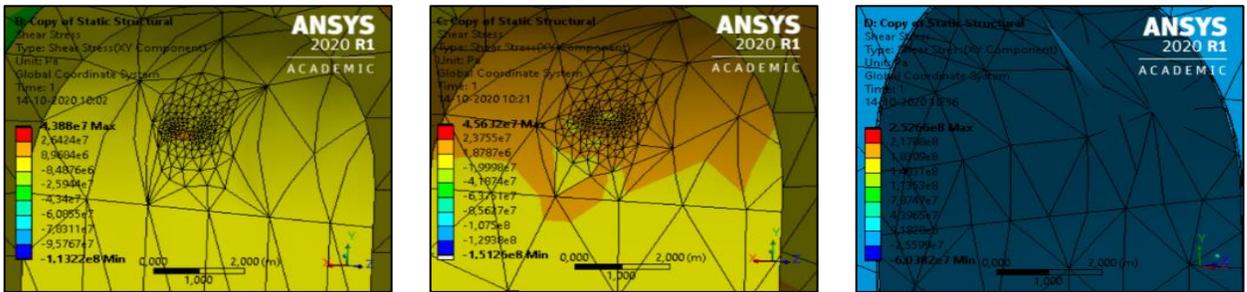


Figura 4.179: Modelo grieta superior derecha (500m; 300m y 50m respectivamente).

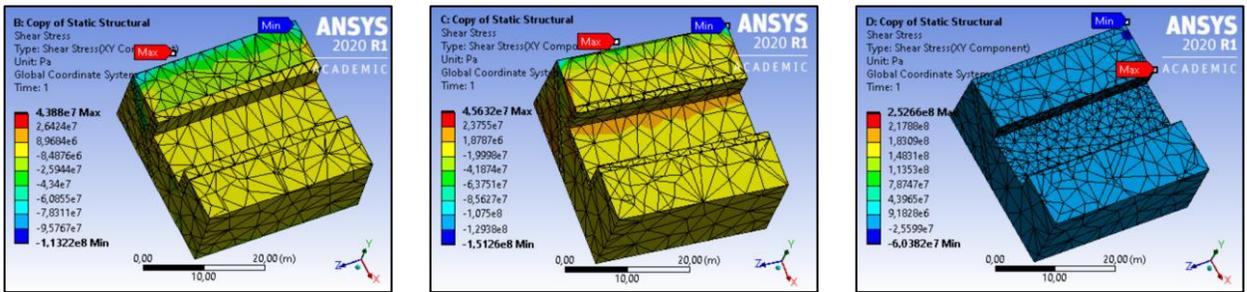


Figura 4.180: Modelo general inferior (500m; 300m y 50m respectivamente).

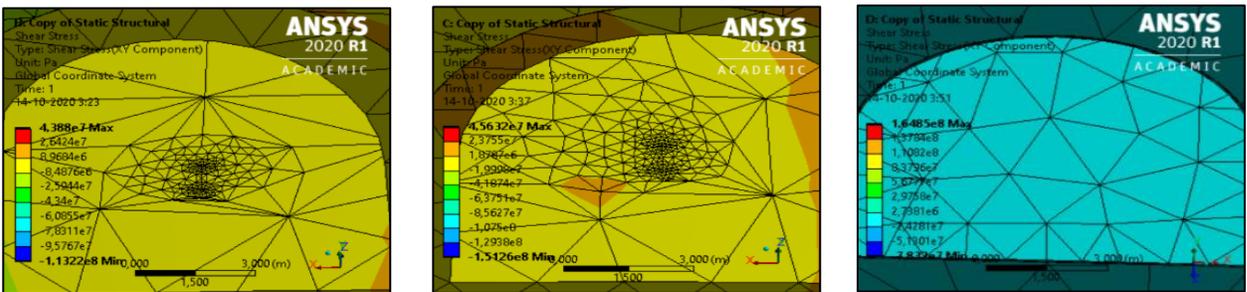


Figura 4.181: Modelo grieta inferior centro (500m; 300m y 50m respectivamente).

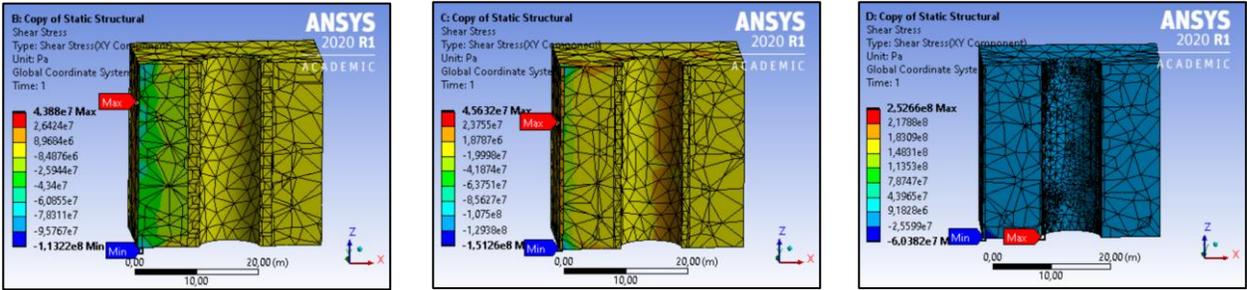


Figura 4.182: Modelo general superior (500m; 300m y 50m respectivamente).

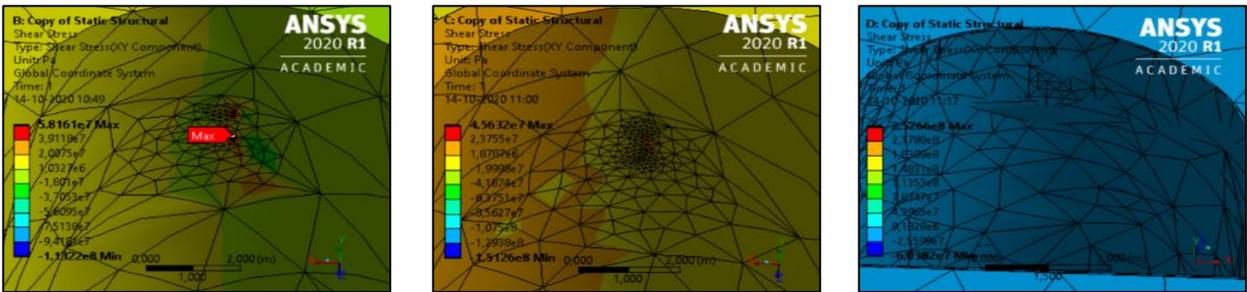


Figura 4.183: Modelo grieta clave (500m; 300m y 50m respectivamente).

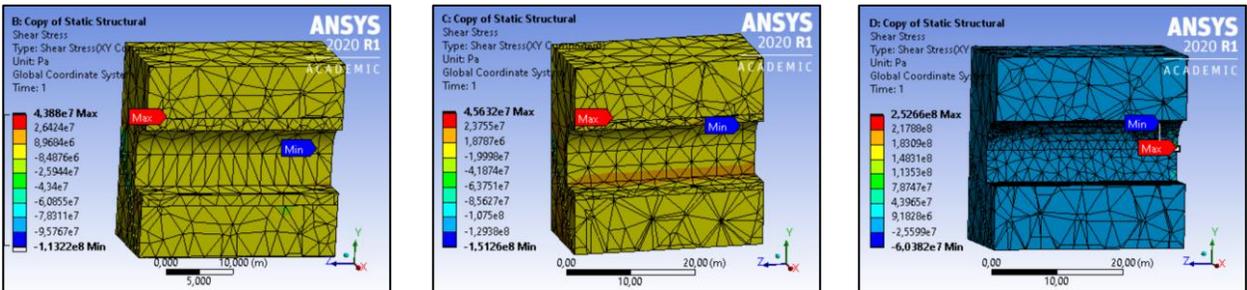


Figura 4.184: Modelo general izquierdo (500m; 300m y 50m respectivamente).

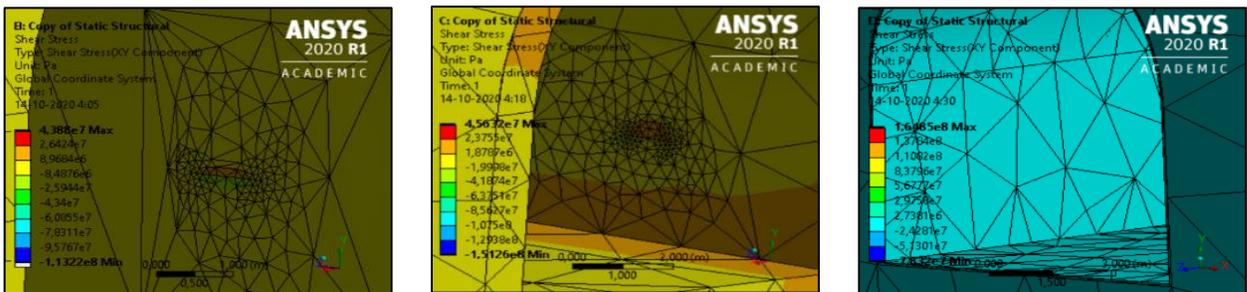


Figura 4.185: Modelo grieta inferior izquierda (500m; 300m y 50m respectivamente).

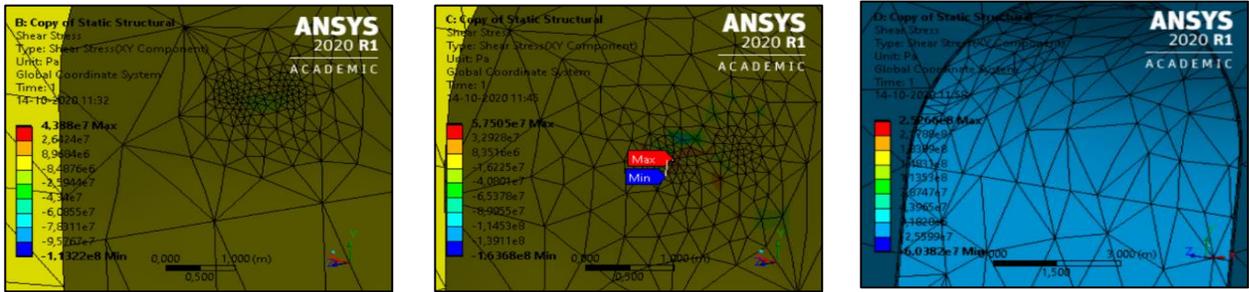


Figura 4.186: Modelo grieta superior izquierda (500m; 300m y 50m respectivamente).

Granito sin fisurar falla de 45 grados de buzamiento perpendicular al eje del túnel (Excavación contra buzamiento):

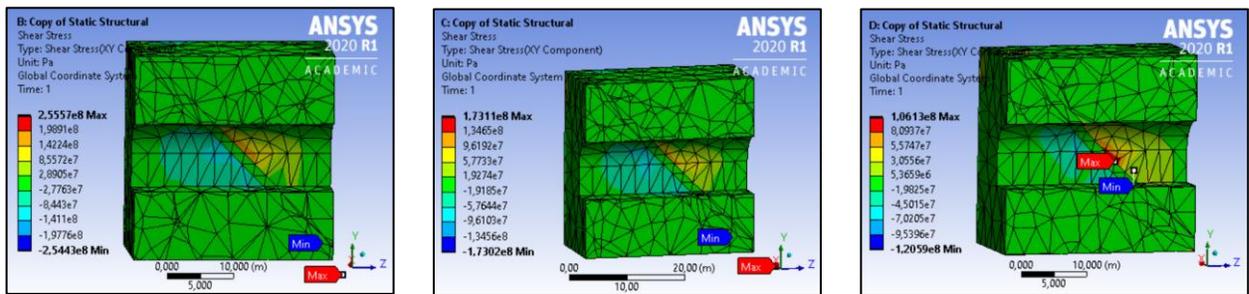


Figura 4.187: Modelo general derecho (500m; 300m y 50m respectivamente).

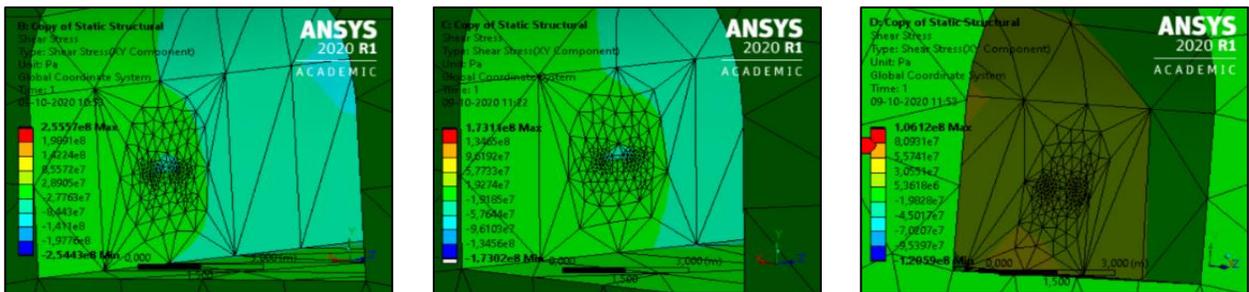


Figura 4.188: Modelo grieta inferior derecha (500m; 300m y 50m respectivamente).

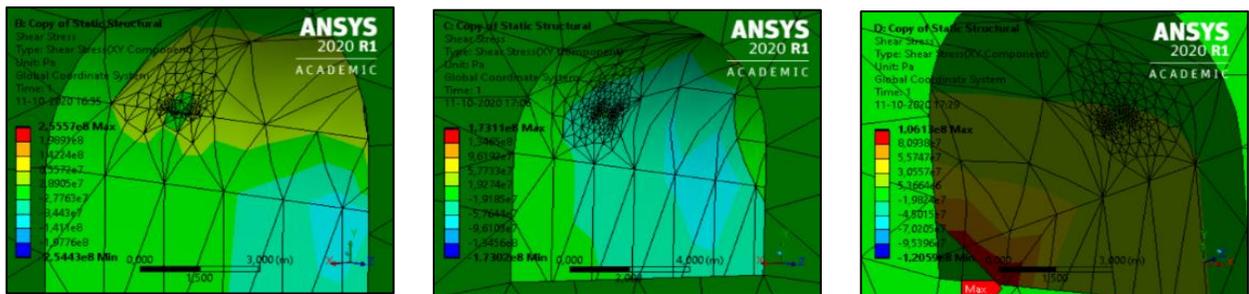


Figura 4.189: Modelo grieta superior derecha (500m; 300m y 50m respectivamente).

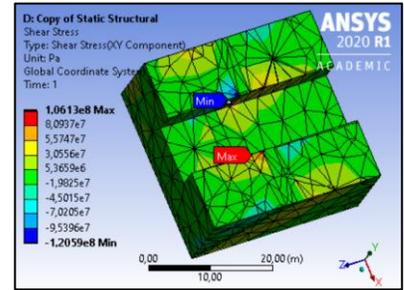
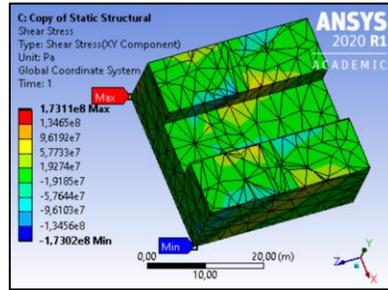
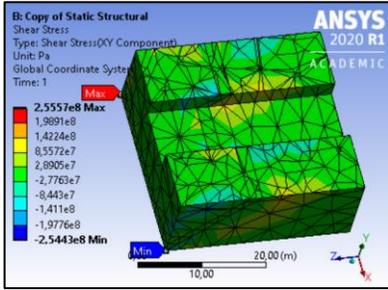


Figura 4.190: Modelo general inferior (500m; 300m y 50m respectivamente).

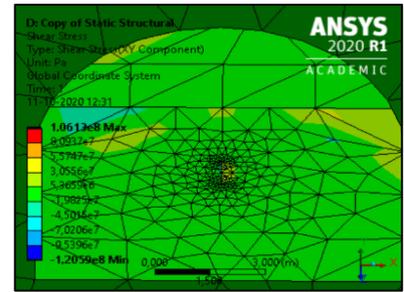
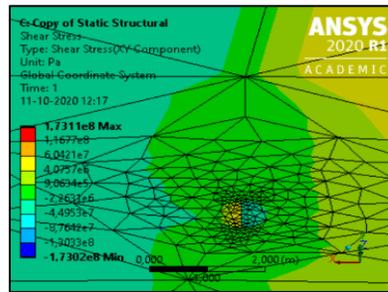
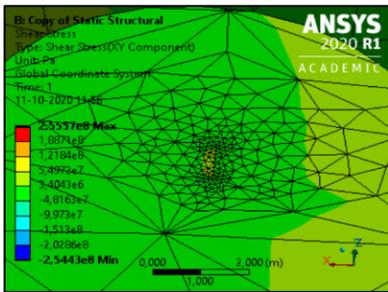


Figura 4.191: Modelo grieta inferior centro (500m; 300m y 50m respectivamente).

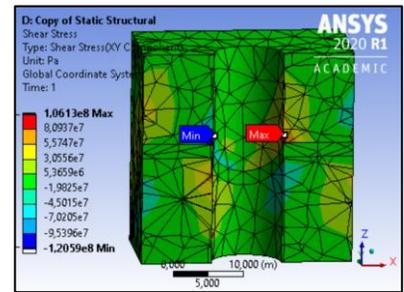
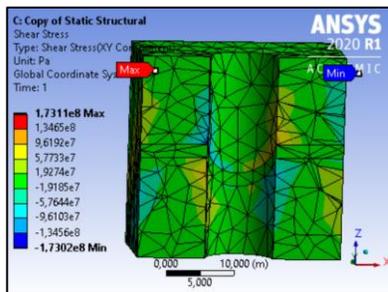
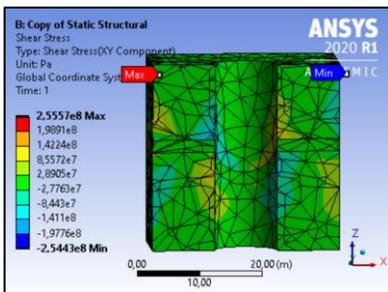


Figura 4.192: Modelo general superior (500m; 300m y 50m respectivamente).

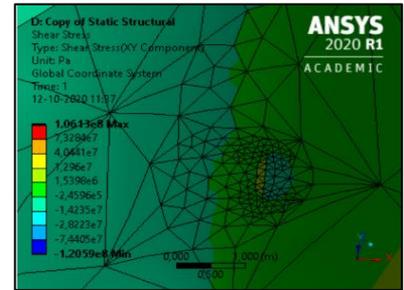
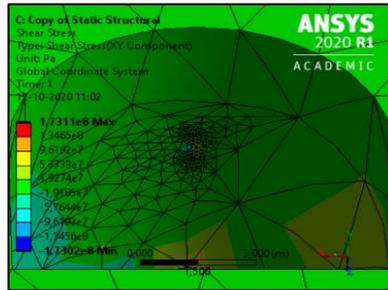
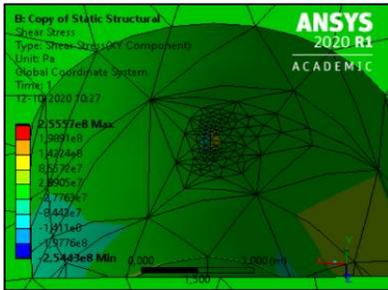


Figura 4.193: Modelo grieta clave (500m; 300m y 50m respectivamente).

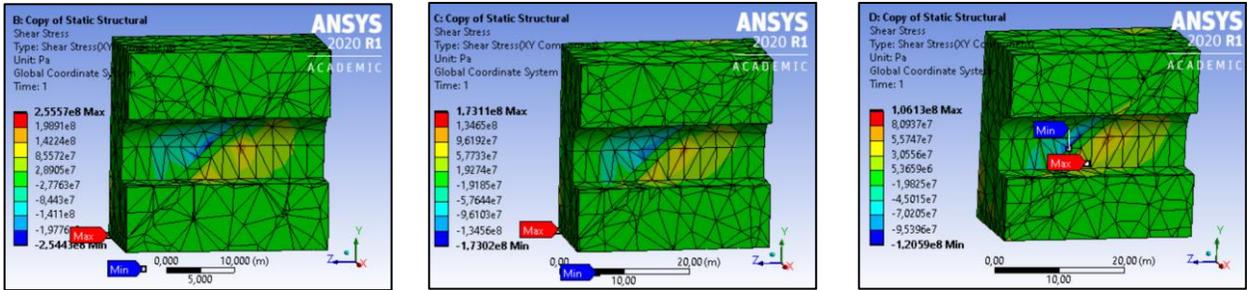


Figura 4.194: Modelo general izquierdo (500m; 300m y 50m respectivamente).

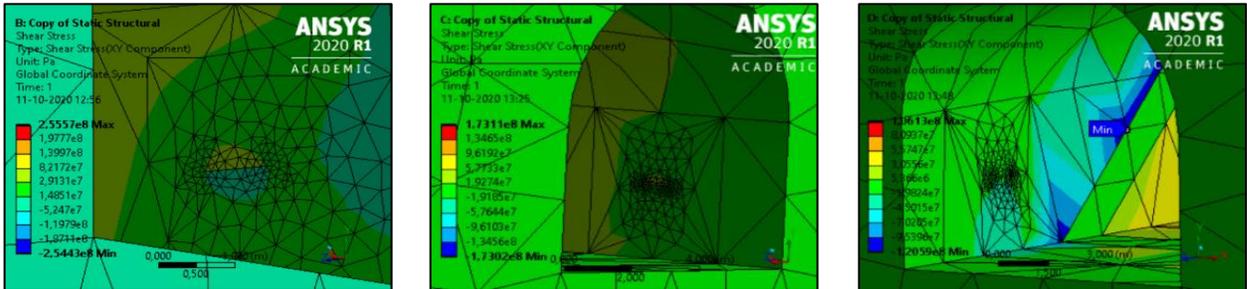


Figura 4.195: Modelo grieta inferior izquierda (500m; 300m y 50m respectivamente).

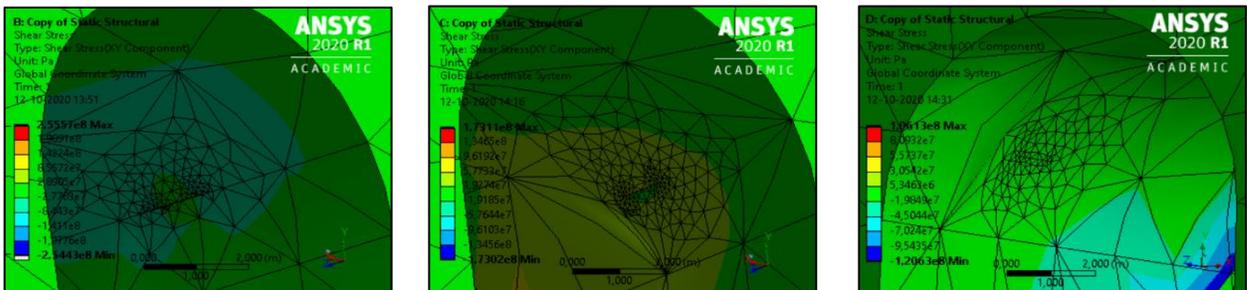


Figura 4.196: Modelo grieta superior izquierda (500m; 300m y 50m respectivamente).

Granito sin fisurar falla de 45 grados de buzamiento perpendicular al eje del túnel (Excavación con buzamiento):

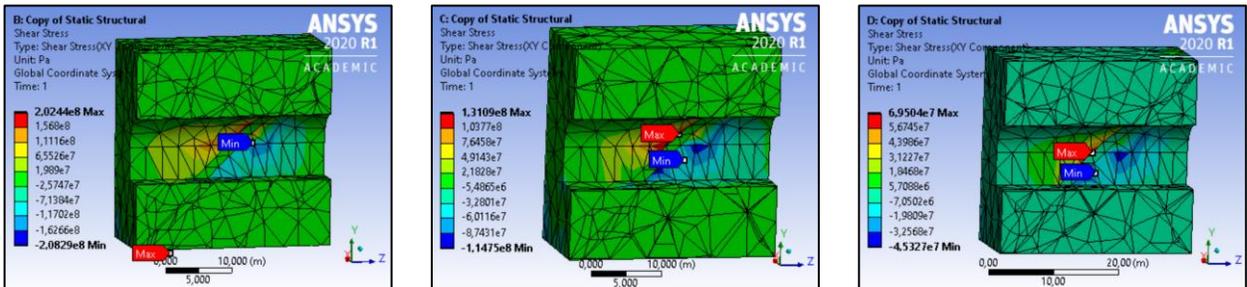


Figura 4.197: Modelo general derecho (500m; 300m y 50m respectivamente).

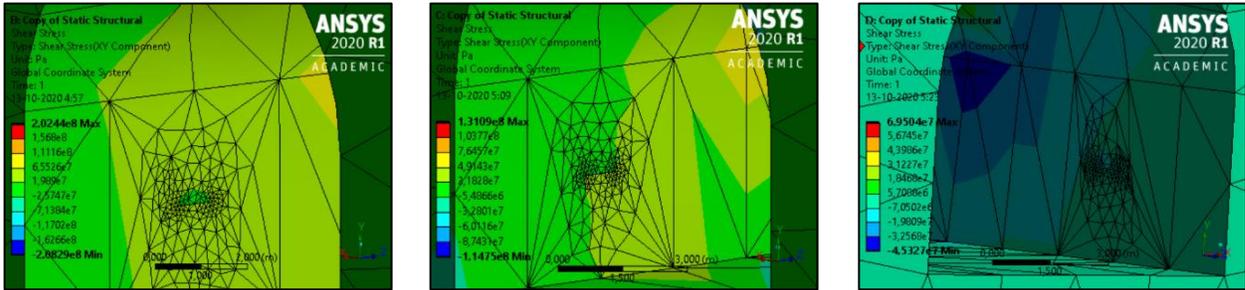


Figura 4.198: Modelo grieta inferior derecha (500m; 300m y 50m respectivamente).

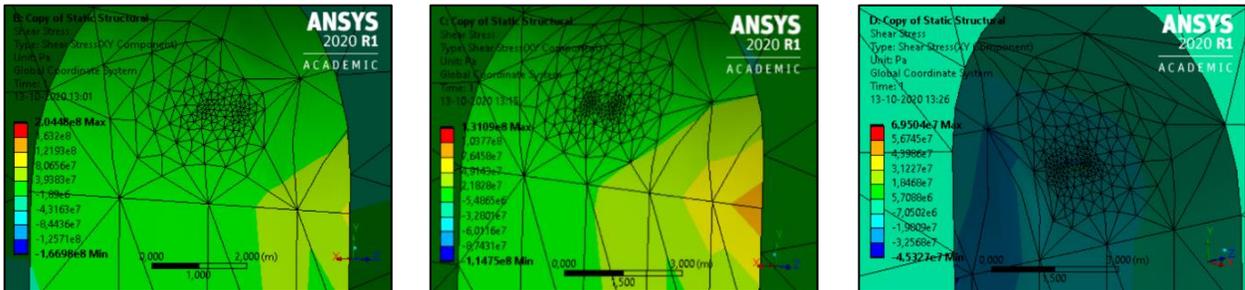


Figura 4.199: Modelo grieta superior derecha (500m; 300m y 50m respectivamente).

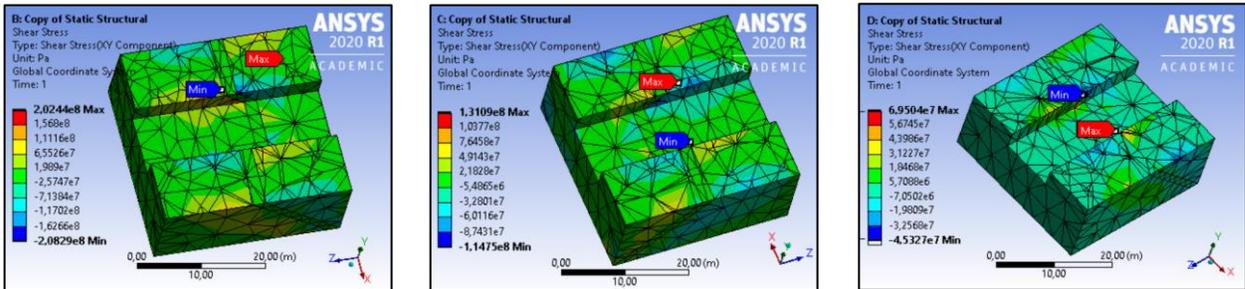


Figura 4.200: Modelo general inferior (500m; 300m y 50m respectivamente).

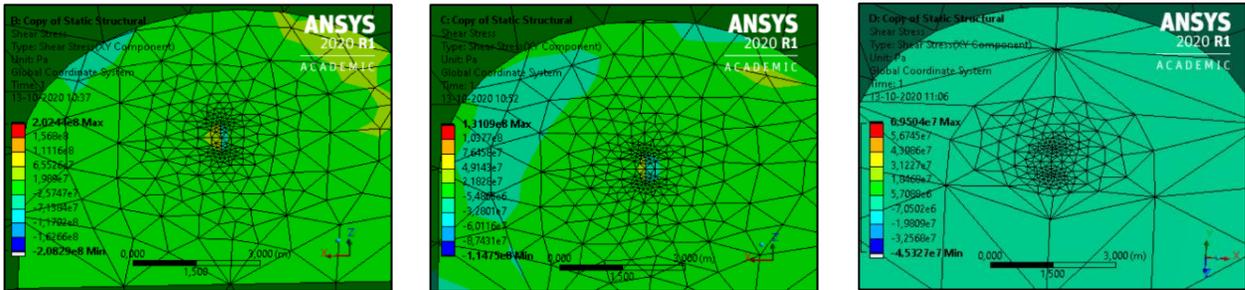


Figura 4.201: Modelo grieta inferior centro (500m; 300m y 50m respectivamente).

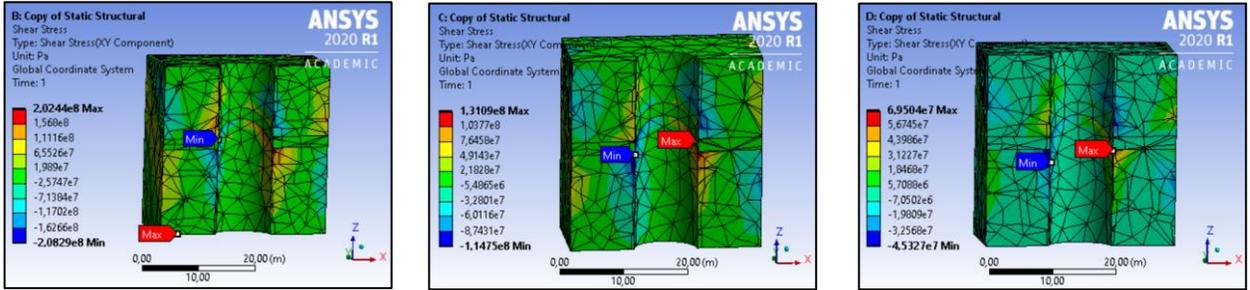


Figura 4.202: Modelo general superior (500m; 300m y 50m respectivamente).

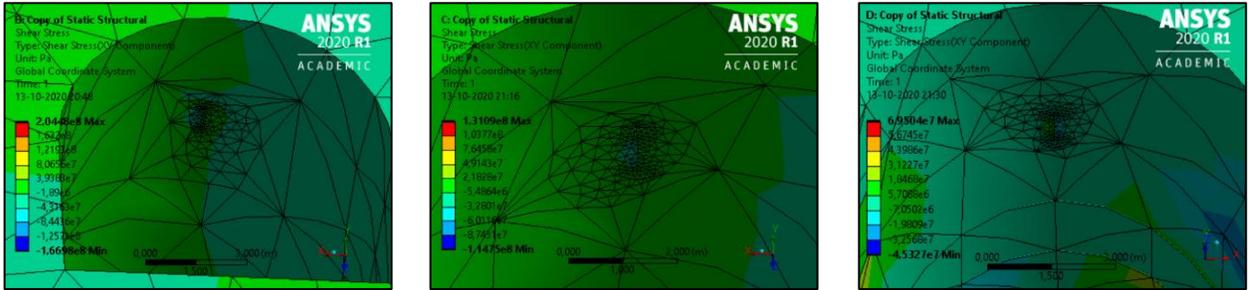


Figura 4.203: Modelo grieta clave (500m; 300m y 50m respectivamente).

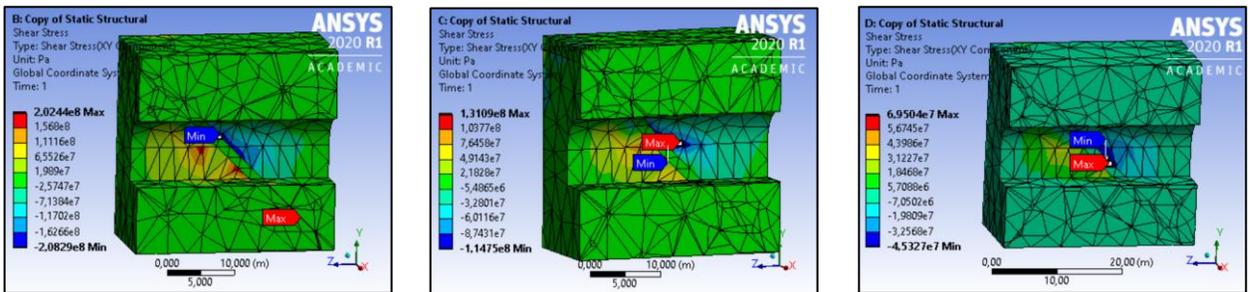


Figura 4.204: Modelo general izquierdo (500m; 300m y 50m respectivamente).

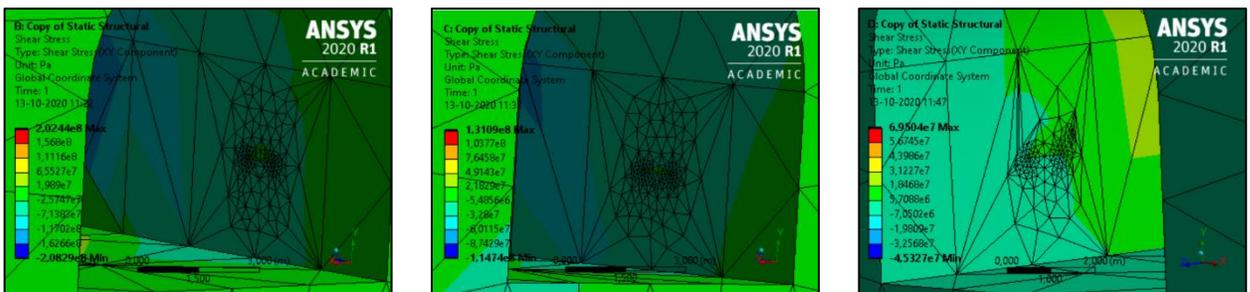


Figura 4.205: Modelo grieta inferior izquierda (500m; 300m y 50m respectivamente).

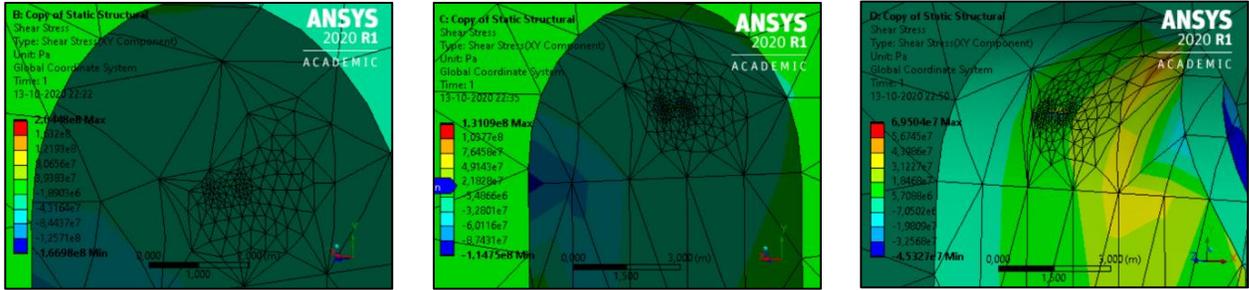


Figura 4.206: Modelo grieta superior izquierda (500m; 300m y 50m respectivamente).

Granito sin fisurar falla inferior de 45 grados paralelo al eje del túnel:

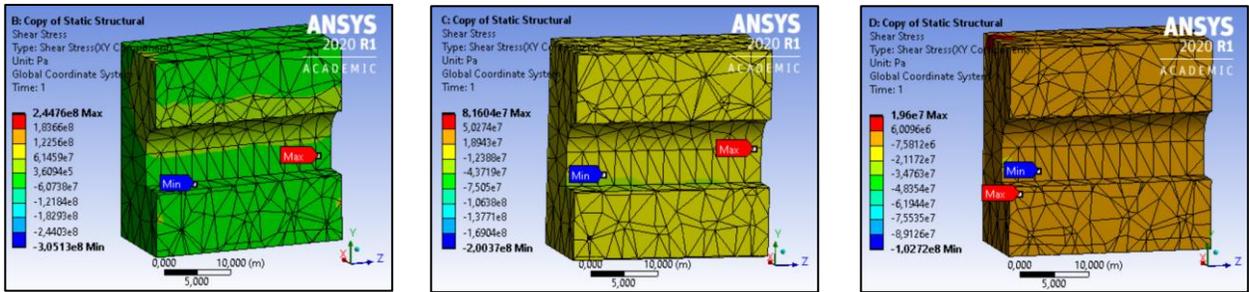


Figura 4.207: Modelo general derecho (500m; 300m y 50m respectivamente).

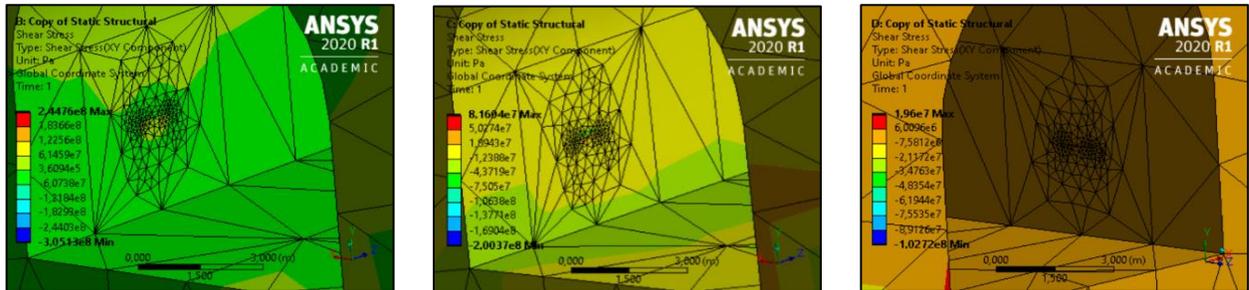


Figura 4.208: Modelo grieta inferior derecha (500m; 300m y 50m respectivamente).

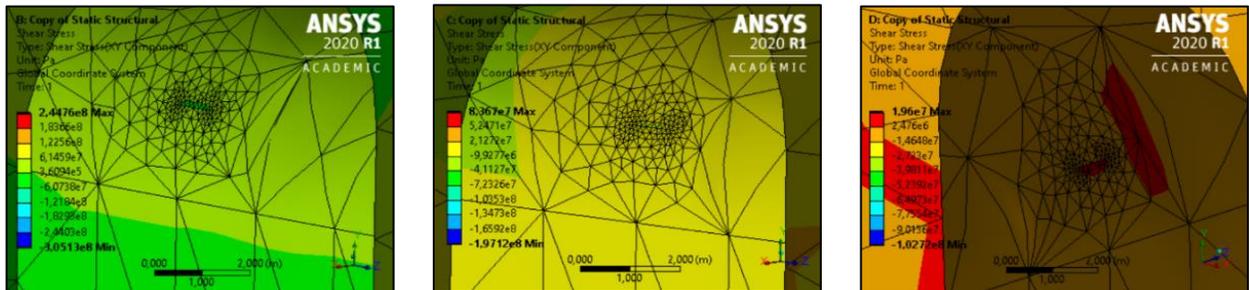


Figura 4.209: Modelo grieta superior derecha (500m; 300m y 50m respectivamente).

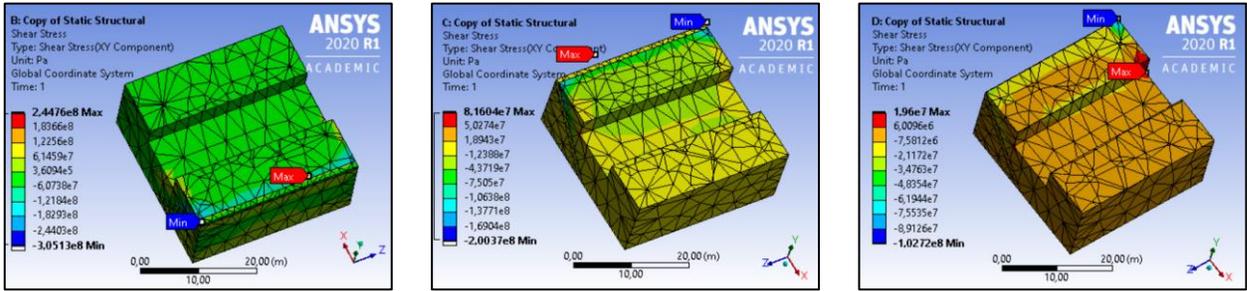


Figura 4.210: Modelo general inferior (500m; 300m y 50m respectivamente).

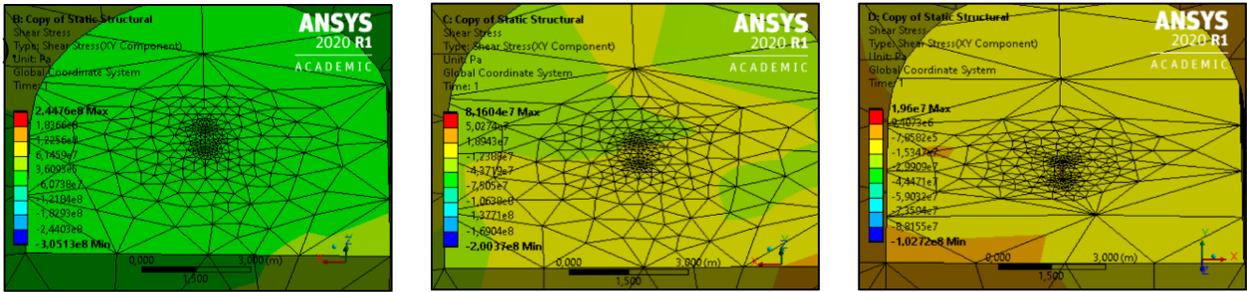


Figura 4.211: Modelo grieta inferior centro (500m; 300m y 50m respectivamente).

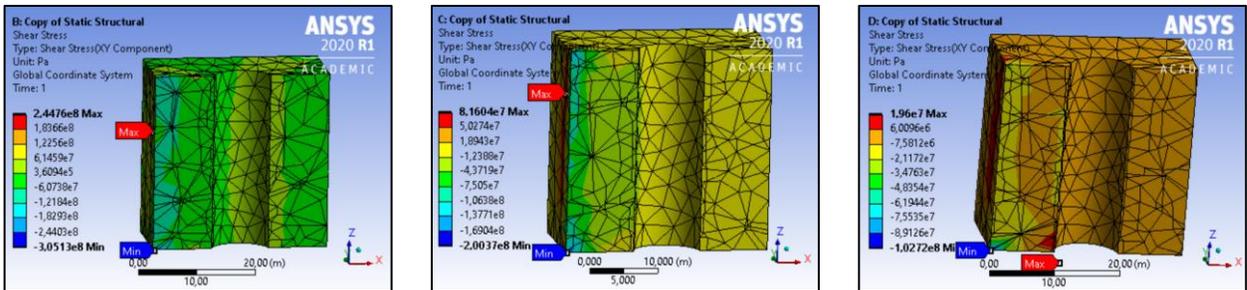


Figura 4.212: Modelo general superior (500m; 300m y 50m respectivamente).

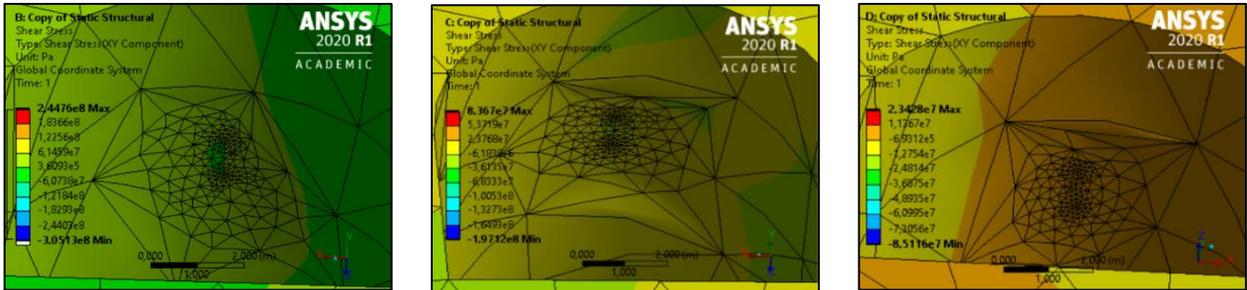


Figura 4.213: Modelo grieta clave (500m; 300m y 50m respectivamente).

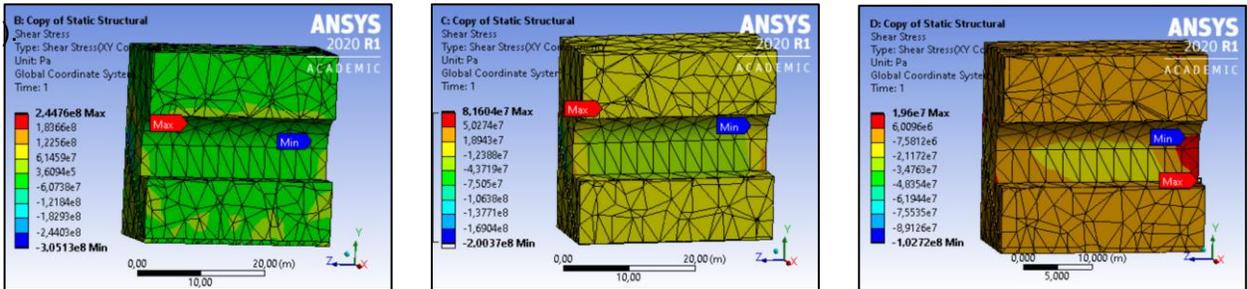


Figura 4.214: Modelo general izquierdo (500m; 300m y 50m respectivamente).

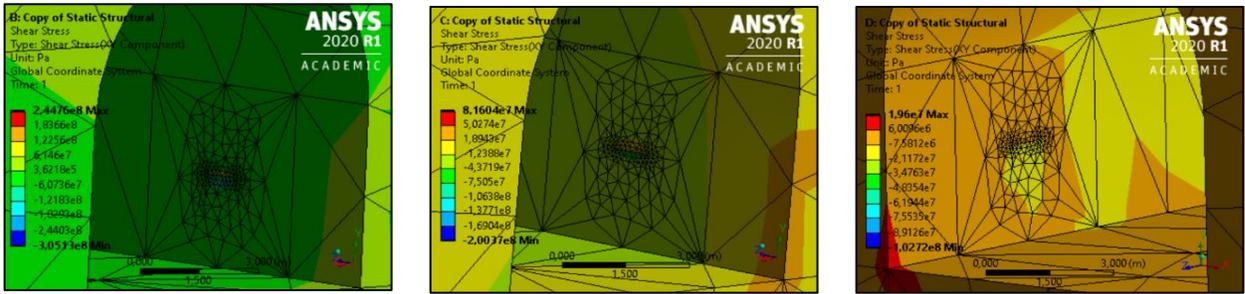


Figura 4.215: Modelo grieta inferior izquierda (500m; 300m y 50m respectivamente).

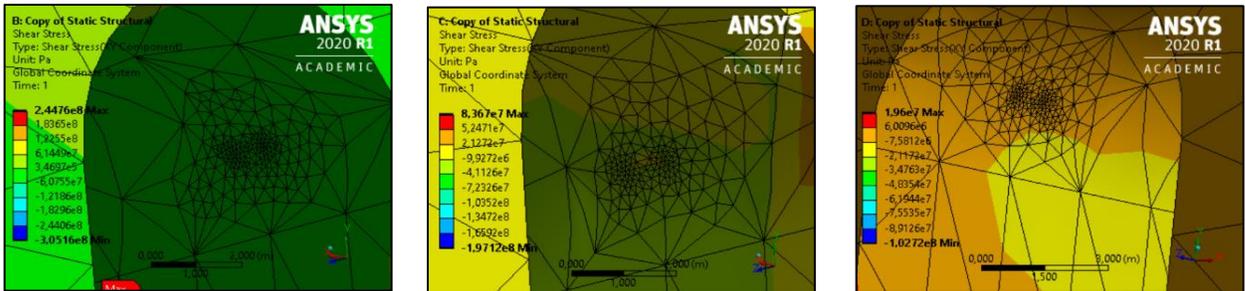


Figura 4.216: Modelo grieta superior izquierda (500m; 300m y 50m respectivamente).

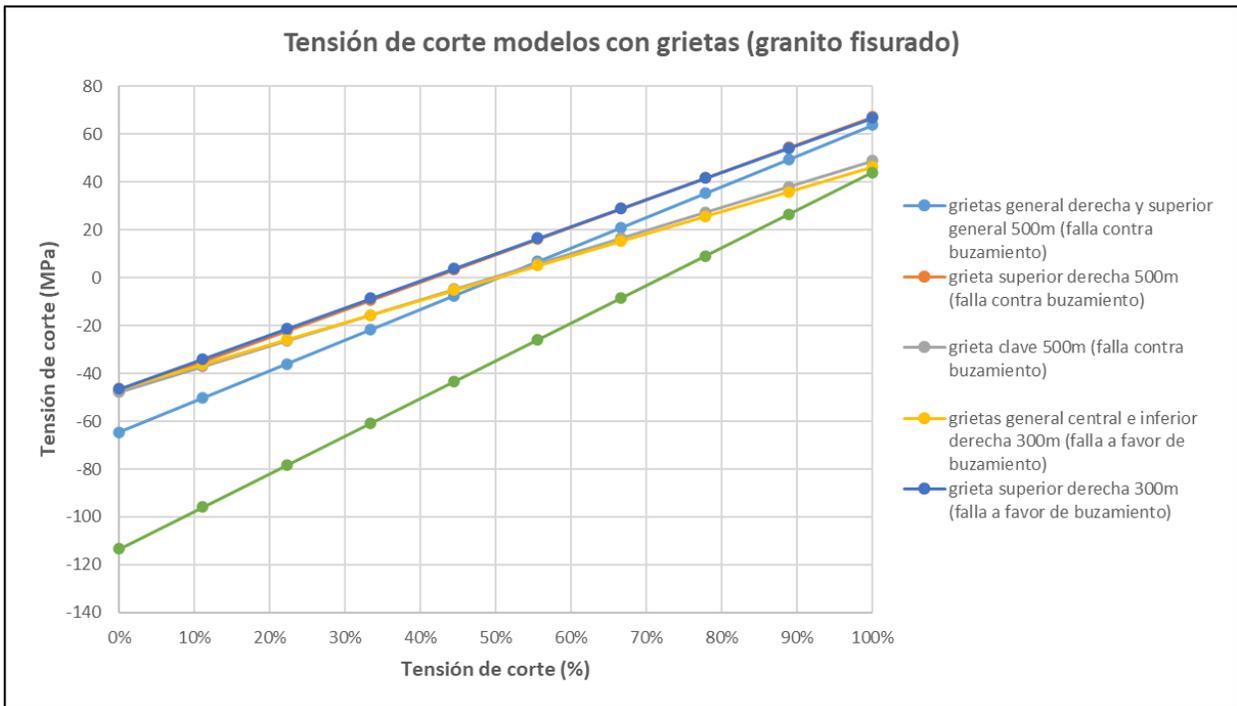


Figura 4.217: Tensión de corte en modelos con grietas de mayor relevancia para granito fisurado.

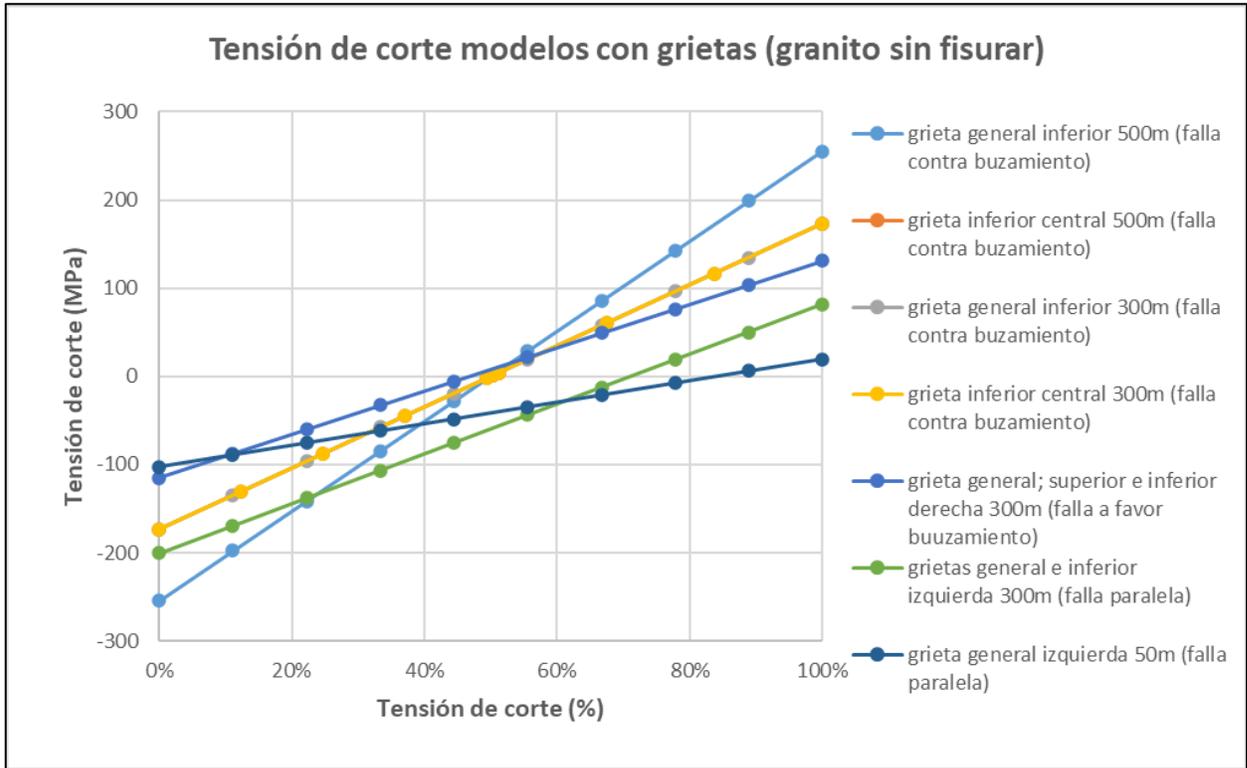


Figura 4.218: Tensión de corte en modelos con grietas de mayor relevancia para granito sin fisurar.

La tensión de corte se comporta de una manera similar a la tensión equivalente, no obstante, hay algunos puntos generales que cabe destacar. Usualmente se mantiene una especie de simetría entre los mínimos y los máximos valores de tensión de corte ubicándose en partes contrarias la mayoría de las veces, inclusive en los alrededores de una misma grieta, como en el caso del modelo de la grieta inferior central para el granito sin fisurar con una falla de 45° perpendicular (contra buzamiento). Además de esto, usualmente las magnitudes de los valores que están en la parte contraria tienden a ser similares.

5. CAPITULO V: CONCLUSIONES

Utilizando como base la caracterización de dos tipos de macizos rocosos, granito y granito fisurado, mediante el posterior uso del software ANSYS, se obtuvieron resultados que hicieron posible establecer las siguientes conclusiones:

Las franjas de deformación en un estado basal de un terreno se alteran luego del ingreso de un túnel, produciéndose una especie de convergencia hacia el centro de este, lo mismo ocurre con el ingreso de una falla inferior paralela, en donde las franjas de deformación convergieron hacia la esquina que estaba la falla. En las fallas perpendiculares se produjo una zona de aumento de las deformaciones en la parte superior fuera de la falla, mientras que en la zona inferior se mantuvieron relativamente estables.

La tensión equivalente tiende a tener un mayor valor en la parte inferior del modelo, al ingresar el túnel las tensiones se tienden a concentrar en su contorno, específicamente en sus esquinas, con mayores magnitudes en las esquinas inferiores debido a la tendencia descrita al principio de este párrafo. Cuando se tiene además una falla paralela al eje, los valores de tensión equivalentes más altos se pueden encontrar en la zona ubicada entre la falla y el contorno del límite plástico del túnel.

La tensión de corte se comporta de una manera similar teniendo los valores de mayor magnitud en las esquinas inferiores del modelo, ya sea positivo o negativo, ubicándose en esquinas opuestas del túnel.

Al ingresar las grietas al sistema se puede observar que el efecto de estas a la deformación es mínimo, esto puede deberse a que se escogió una grieta semicircular de 0,5 m que, no fueron suficientes para que ninguno de los dos tipos de roca se viese afectados en mayor medida.

Para el caso de las tensiones producidas por las grietas, los resultados producidos fueron variados, destacando que en la mayoría de los casos se formó una zona de mayor tensión en el contorno de la grieta. Además de esto, en algunos de estos modelos, esta zona se expandió hacia cierta dirección, destacando el caso de la grieta clave (300m) del granito

fisurado perpendicular (a favor del buzamiento), en cuyo caso la grieta se expande en dirección a la falla.

Finalmente, a tensión de corte para los modelos de grietas es bastante similar en cuanto a comportamiento a la tensión equivalente, no obstante, hay algunos puntos destacables.

Se mantiene generalmente una simetría entre la distribución de los valores máximos y mínimos, incluso llegando a que en una misma grieta se encuentre por un lado tensiones de corte altas y por otro, tensiones de corte mínima.

Por lo dicho, el ingreso de un túnel altera significativamente el estado tenso-deformacional del sistema basal del terreno, así como también lo altera la presencia de fallas. No obstante, la presencia de grietas de las características dadas, en su mayoría alteran solo el estado tensional del terreno no influyendo mucho en las deformaciones generadas.

RECOMENDACIONES:

Por último, como recomendaciones de futuros proyectos para aportar más al tema cabe proponer lo siguiente:

Un análisis más extenso para futuros proyectos en donde se pueda emplear un mayado más fino, ya que, en este proyecto al ocupar una versión gratuita del programa, se tuvo que adecuar para que el programa entregara un resultado en el alcance de sus limitaciones.

Un análisis en el que se incluya la propagación de grietas en túneles a detalle, incluyendo o intentando predecir la dirección de la grieta y el efecto de esto a la sección de túnel, además de una mayor variedad de grietas, procurando de que sean de mayor tamaño de la que se evaluó para verificar si se produce algún efecto en el estado deformacional del terreno.

6. REFERENCIAS

Accidentabilidad minera segundo semestre 2019 SERNAGEOMIN Chile 2019.

Atkins T. & Escudier M. (2013) A Dictionary of Mechanical Engineering (73) Oxford: Oxford university press.

Bazant Z.P. & Planas J. (1998) Essentials of LEFM. Fracture and Size Effect in Concrete and Other Quasibrittle Materials. (23-46).

Broek D. (1982) Summary of basic problems and concepts. Elementary engineering fracture mechanics. (3-22).

Craig R.F. (2004). Lateral earth pressure. (199-201) Taylor & Francis e-Library (2005)

Fatehimarji, Mohammad & Siahmansouri, Asghar & Yarahmadi Bafghi, Alireza. (2012). LEFM approach for the rock failure analysis around circular opening by BEM. 19th European Conference on Fracture: Fracture Mechanics for Durability, Reliability and Safety, ECF 2012.

Gao, S., Sun, Y., Wang, W. et al. Propagation of Cracks in the Secondary Lining of Tunnels Subjected to Asymmetrical Pressure and a Safety Evaluation. Indian Geotech J 47, 84–95 (2017). <https://doi-org.utralca.idm.oclc.org/10.1007/s40098-016-0216-4>

González C., Sagaseta C. (2001) Patterns of soil deformations around tunnels. Application to the extensión of Madrid Metro. Computers and Geotechnics 28 (445-468)

Guía Metodológica para Evaluación de la Estabilidad Física de Instalaciones Mineras Remanentes (2018) Aprobado por SERNAGEOMIN Chile, 2019.

Hoek E. (1999) Support for very weak rock associated with faults and shear zones. Distinguished lectura for the opening of the International Symposium on Rock Support and Reinforcement Practice in Mining, Kalgoorlie, Australia, 14-19 March.

Hoek E., Carranza-Torres C., Corkum B. (2002) Hoek-Brown failure criterion – 2002 Edition.

Janssen M., Zuidema J. & Wanhill R. (2009) Fracture mechanics second edition. Part I Introduction (3-14) NW: Taylor & Francis Group.

Murakami, Y. (2016). Chapter 9 Finite Element Method. Theory of elasticity and stress concentration. (137-160).

Navarro Carrasco S. Ortiz Gómez R. Ruiz Marín J. (s.f.). La dinámica de avance del túnel. Geotecnia aplicada a la construcción de túneles (20-23).

New & Leca (2007) Settlements induced by tunneling in Soft Ground. Tunnelling and Underground Space Technology Vol 22, Issue 2, (119-149)
<https://doi.org/10.1016/j.tust.2006.11.001>.

Olmedo Salazar J. F. (2015) Capítulo I Generalidades. Introducción al método de los elementos finitos aplicando mathcad, campo unidimensional. (5-34).

Perri G. (2012). Tópico de Ingeniería de Túneles.

Pourmodheji R. & Mashayekhi M. (2012). Improvement of the extended finite element method for ductile crack growth. Materials Science and Engineering: A, (255-271) <https://doi.org/10.1016/j.msea.2012.05.014>.

Sagaseta C. (1998) On the Role of Analytical Solutions for the Evaluation of Soil Deformation Around Tunnels. In: Cividini A. (eds) Application of Numerical Methods to Geotechnical Problems. International Centre for Mechanical Sciences (Courses and Lectures), vol 397.

Volumen N°3 Instrucciones y criterios de diseño. Manual de carreteras, MOP-DGOP-Dirección de vialidad Chile, 2019.

Verruijt, Arnold & Booker, J.R. (1996). Surface settlements due to deformation of a tunnel in an elastic half plane. Géotechnique. 46. 753-756. 10.1680/geot.1998.48.5.709.