

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE MINAS,
METALURGIA Y MATERIALES



INFLUENCIA DE LAS DISCONTINUIDADES EN LOS ESTALLIDOS DE
ROCAS

Constanza Salomé Ureta Zepeda

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

Profesora Guía
Dra. Adeline Delonca

2025
Santiago, Chile



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

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

Título del trabajo: Influencia de las discontinuidades en los estallidos de rocas

Nombre del candidato(a): Constanza Salomé Ureta Zepeda

Carrera / Grado: Ingeniería Civil de Minas

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

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

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

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

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL

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

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

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

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

4.- FIRMAS

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

Fecha: 21/08/2025; Firma:

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 21/08/2025; Firma:

Agradecimientos

En primer lugar, quiero agradecer con todo mi corazón a mis padres, Christian y Paulina, por estar siempre a mi lado, guiándome con su amor, su fortaleza y su ejemplo. Gracias por confiar en mí incluso cuando yo misma dudaba, por sus palabras de aliento, su paciencia infinita y por enseñarme que los sueños se construyen con esfuerzo y perseverancia. Este logro es tanto de ustedes como mío.

A mi hermano Tomás, que, a pesar de ser más chico y muy distinto a mí, ha sido un apoyo constante en cada etapa. Tu forma única de estar presente ha significado mucho para mí.

A mi abuela Eliana, cuyo amor y regaloneo son un refugio de calma y ternura en mi vida. Gracias por tu cariño incondicional, por tus consejos y por estar siempre dispuesta a escuchar.

A mi abuelo Iván, a quien recuerdo con mucho amor y profunda gratitud. Gran parte de lo que soy se lo debo a él, a sus enseñanzas, sus historias y su sabiduría. Donde sea que estés, muchas gracias.

A mi pololo y amigo incondicional, Ariel, gracias por estar conmigo en cada momento, incluso en los más difíciles. Tu amor, tu compañía y tu apoyo han sido fundamentales en este camino.

A mi profesora guía, Adeline Delonca, por su compromiso, dedicación y constante orientación. Gracias por confiar en mi trabajo y por acompañarme con paciencia y claridad. Su guía fue clave para dar forma y sentido a esta memoria.

A mis amigos, por cada palabra de apoyo, por las risas, los desahogos, y por hacer de este proceso algo más humano, más cálido y lleno de vida. Gracias Cata, Nico, Diego y Cabeza, por estar ahí, de verdad.

Y a todos quienes, de una u otra forma, formaron parte de este proceso: gracias por creer en mí, por su presencia, y por caminar conmigo en este importante tramo del camino.

Resumen

El agotamiento de los recursos minerales cercanos a la superficie, junto con el aumento sostenido en la demanda global, ha impulsado significativamente el desarrollo de la minería subterránea. Esta tendencia ha conllevado la exploración y explotación de yacimientos en zonas más profundas y complejas, lo que a su vez ha motivado la adopción de tecnologías y metodologías avanzadas para garantizar operaciones eficientes, seguras y sostenibles.

El avance hacia mayores profundidades impone el desafío de enfrentar condiciones geomecánicas más exigentes, especialmente en lo referente a la concentración de esfuerzos en el macizo rocoso. En este contexto, se incrementa el riesgo de estallidos de roca, fenómeno caracterizado por la expulsión violenta de material desde el frente o contorno de excavación, con consecuencias potencialmente graves para la seguridad operativa y estructural.

Entre los factores que inciden en la ocurrencia de estallidos, destacan las discontinuidades geológicas. Por ello, esta memoria tiene como objetivo analizar la influencia de dichas estructuras mediante modelamiento numérico, utilizando el software RS2 de Rocscience, con el fin de evaluar su impacto en el potencial de estallido y aportar criterios que favorezcan medidas de mitigación adecuadas.

Los resultados del estudio muestran que la orientación y cercanía de la discontinuidad respecto del contorno de excavación son los factores que más contribuyen a la concentración de esfuerzos y al daño en el macizo. En cambio, una mayor longitud de la discontinuidad favorece la disipación de tensiones, y parámetros mecánicos como la cohesión y el ángulo de fricción inciden principalmente en la extensión del daño. En todos los casos simulados, el potencial de estallido se mantuvo en un nivel de riesgo moderado, lo que evidencia la relevancia de considerar detalladamente estas variables en el diseño de excavaciones subterráneas.

Abstract

The depletion of near-surface mineral resources, combined with the sustained increase in global demand, has significantly driven the development of underground mining. This shift has led to the exploration and extraction of deeper and more complex ore bodies, prompting the adoption of advanced technologies and methodologies to ensure efficient, safe, and sustainable operations.

The move toward greater depths brings the challenge of operating under more demanding geomechanical conditions, particularly due to the concentration of stresses in the rock mass. In this context, the risk of rock bursts increases, a phenomenon characterized by the sudden and violent ejection of rock material from the excavation face or boundary, potentially causing severe safety and structural hazards.

Among the key factors influencing rock burst occurrence are geological structures such as discontinuities. Therefore, this thesis aims to analyze the influence of such features through numerical modeling using Rocscience's RS2 software, in order to evaluate their impact on rock burst potential and contribute to the development of effective mitigation strategies.

The study results indicate that the orientation and proximity of discontinuities to the excavation boundary are the main contributors to stress concentration and rock mass damage. In contrast, longer discontinuities help dissipate stresses, while mechanical parameters such as cohesion and friction angle primarily affect the extent of the damage. In all simulated cases, the rock burst potential remained within a moderate risk range, highlighting the importance of incorporating these variables into the design of underground excavations.

Índice de contenidos

1. Introducción	1
2. Objetivos y alcances	3
2.1 Objetivo general.....	3
2.2 Objetivos específicos	3
2.3 Alcances	3
3. Marco teórico	5
3.1 Discontinuidades.....	5
3.1.1 Definición de discontinuidades	5
3.1.2 Propiedades de las discontinuidades	6
3.2 Estallidos de rocas.....	7
3.2.1 Definición de estallidos de rocas.....	7
3.2.2 Clasificación de estallidos de rocas	8
3.3 Métodos de evaluación de estallidos de roca	10
3.3.1 Potencial de ruptura dinámica (DRP)	11
3.3.2 Potencial de peligro de estallidos de rocas (BHP)	12
3.3.3 Enfoque DISL (2007, 2016 y 2018).....	15
3.4 Región de Spalling	17
3.5 Región perturbada	18
4. Metodología.....	19
4.1 Caracterización del ambiente de simulación.....	20
4.1.1 Definición y construcción de la geometría.....	20
4.1.2 Definición de litología y esfuerzos in-situ	21
4.1.3 Sensibilidad del mallado.....	24
4.1.4 Simulación.....	25
5. Resultados y análisis.....	28
5.1 Resultado caso base.....	28
5.2 Resultados de los diferentes escenarios con discontinuidad.....	30
5.3 Resumen de resultados.....	39
6. Conclusiones.....	40
7. Recomendaciones.....	42
8. Referencias	43

9. Anexos.....	45
9.1 Escenarios simulados con $\Phi = 35$ [°] y $C = 0$ [KPa].....	45
9.1.1 Escenarios simulados en zona del techo	45
9.1.2 Escenarios simulados en zona de la pared	54
9.1.3 Escenarios simulados en zona intermedia	63
9.2 Escenarios simulados con $\Phi = 25$ [°] y $C = 30$ [KPa].	72
9.2.1 Escenarios simulados en zona del techo	72
9.2.2 Escenarios simulados en zona de la pared	81
9.2.3 Escenarios simulados en zona intermedia	90

Índice de figuras

Figura 1: Propiedades de las discontinuidades.....	7
Figura 2: Representación esquemática de potenciales de estallido de rocas.....	9
Figura 3: Métodos de evaluación de estallidos de roca.....	10
Figura 4: Potencial de ruptura dinámica.....	12
Figura 5: Zonas de daño correspondientes al enfoque DISL.	16
Figura 6: Geometría de la excavación.....	20
Figura 7: Geometría de estudio.	21
Figura 8: CMET.	22
Figura 9: Mallado del estudio.....	25
Figura 10: Esquemas de casos a simular en el software RS2.....	26
Figura 11: Ejemplo de simulación.....	27
Figura 12: Plastificación del caso base.....	29
Figura 13: Discontinuidad centrada en la zona del techo.....	37
Figura 14: Discontinuidad inclinada hacia un lado de la excavación en la zona del techo.....	37
Figura 15: Discontinuidad presente en la zona de la pared.	38
Figura 16: Discontinuidad presente en la zona de la pared.	38
Figura 17: Medición de profundidad y extensión de falla para $l=2.5$ [m], $\theta=0[^\circ]$ y $d=0$ [m].	45
Figura 18: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=5$ [m], $\theta=0[^\circ]$ y $d=0$ [m]. ...	45
Figura 19: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=10$ [m], $\theta=0[^\circ]$ y $d=0$ [m]...	45
Figura 20: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=2.5$ [m], $\theta=0[^\circ]$ y $d=2.5$ [m].	46
Figura 21: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=5$ [m], $\theta=0[^\circ]$ y $d=2.5$ [m]..	46
Figura 22: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=10$ [m], $\theta=0[^\circ]$ y $d=2.5$ [m].	46
Figura 23: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=2.5$ [m], $\theta=0[^\circ]$ y $d=5$ [m]..	47
Figura 24: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=5$ [m], $\theta=0[^\circ]$ y $d=5$ [m].....	47
Figura 25: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=10$ [m], $\theta=0[^\circ]$ y $d=5$ [m]...	47
Figura 26: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=2.5$ [m], $\theta=45[^\circ]$ y $d=0$ [m].	48
Figura 27: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=5$ [m], $\theta=45[^\circ]$ y $d=0$ [m]...	48
Figura 28: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=10$ [m], $\theta=45[^\circ]$ y $d=0$ [m].	48
Figura 29: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=2.5$ [m], $\theta=45[^\circ]$ y $d=2.5$ [m].	49
Figura 30: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=5$ [m], $\theta=45[^\circ]$ y $d=2.5$ [m].	49
Figura 31: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=10$ [m], $\theta=45[^\circ]$ y $d=2.5$ [m].	49
Figura 32: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=2.5$ [m], $\theta=45[^\circ]$ y $d=5$ [m].	50
Figura 33: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=5$ [m], $\theta=45[^\circ]$ y $d=5$ [m]...	50
Figura 34: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=10$ [m], $\theta=45[^\circ]$ y $d=5$ [m].	50
Figura 35: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=2.5$ [m], $\theta=90[^\circ]$ y $d=0$ [m].	51
Figura 36: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=5$ [m], $\theta=90[^\circ]$ y $d=0$ [m]...	51
Figura 37: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=10$ [m], $\theta=90[^\circ]$ y $d=0$ [m].	51
Figura 38: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=2.5$ [m], $\theta=90[^\circ]$ y $d=2.5$ [m].	52
Figura 39: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=5$ [m], $\theta=90[^\circ]$ y $d=2.5$ [m].	52

Figura 40: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=10$ [m], $\theta=90[^\circ]$ y $d=2.5$ [m]. 52
.....
Figura 41: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=2.5$ [m], $\theta=90[^\circ]$ y $d=5$ [m]. 53
Figura 42: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=5$ [m], $\theta=90[^\circ]$ y $d=5$ [m]... 53
Figura 43: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=10$ [m], $\theta=90[^\circ]$ y $d=5$ [m]. 53
Figura 44: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=2.5$ [m], $\theta=0[^\circ]$ y $d=0$ [m]... 54
Figura 45: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=5$ [m], $\theta=0[^\circ]$ y $d=0$ [m]..... 54
Figura 46: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=10$ [m], $\theta=0[^\circ]$ y $d=0$ [m].... 54
Figura 47: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=2.5$ [m], $\theta=0[^\circ]$ y $d=2.5$ [m]. 55
Figura 48: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=5$ [m], $\theta=0[^\circ]$ y $d=2.5$ [m]... 55
Figura 49: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=10$ [m], $\theta=0[^\circ]$ y $d=2.5$ [m]. 55
Figura 50: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=2.5$ [m], $\theta=0[^\circ]$ y $d=5$ [m]... 56
Figura 51: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=5$ [m], $\theta=0[^\circ]$ y $d=5$ [m]..... 56
Figura 52: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=10$ [m], $\theta=0[^\circ]$ y $d=5$ [m].... 56
Figura 53: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=2.5$ [m], $\theta=45[^\circ]$ y $d=0$ [m]. 57
Figura 54: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=5$ [m], $\theta=45[^\circ]$ y $d=0$ [m].... 57
Figura 55: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=10$ [m], $\theta=45[^\circ]$ y $d=0$ [m].. 57
Figura 56: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=2.5$ [m], $\theta=45[^\circ]$ y $d=2.5$ [m]. 58
.....
Figura 57: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=5$ [m], $\theta=45[^\circ]$ y $d=2.5$ [m]. 58
Figura 58: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=10$ [m], $\theta=45[^\circ]$ y $d=2.5$ [m]. 58
.....
Figura 59: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=2.5$ [m], $\theta=45[^\circ]$ y $d=5$ [m]. 59
Figura 60: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=5$ [m], $\theta=45[^\circ]$ y $d=5$ [m].... 59
Figura 61: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=10$ [m], $\theta=45[^\circ]$ y $d=5$ [m].. 59
Figura 62: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=2.5$ [m], $\theta=90[^\circ]$ y $d=0$ [m]. 60
Figura 63: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=5$ [m], $\theta=90[^\circ]$ y $d=0$ [m].... 60
Figura 64: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=10$ [m], $\theta=90[^\circ]$ y $d=0$ [m].. 60
Figura 65: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=2.5$ [m], $\theta=90[^\circ]$ y $d=2.5$ [m]. 61
.....
Figura 66: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=5$ [m], $\theta=90[^\circ]$ y $d=2.5$ [m]. 61
Figura 67: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=10$ [m], $\theta=90[^\circ]$ y $d=2.5$ [m]. 61
.....
Figura 68: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=2.5$ [m], $\theta=90[^\circ]$ y $d=5$ [m]. 62
Figura 69: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=5$ [m], $\theta=90[^\circ]$ y $d=5$ [m].... 62
Figura 70: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=10$ [m], $\theta=90[^\circ]$ y $d=5$ [m].. 62
Figura 71: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=2.5$ [m], $\theta=0[^\circ]$ y $d=0$ [m]... 63
Figura 72: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=5$ [m], $\theta=0[^\circ]$ y $d=0$ [m]..... 63
Figura 73: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=10$ [m], $\theta=0[^\circ]$ y $d=0$ [m].... 63
Figura 74: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=2.5$ [m], $\theta=0[^\circ]$ y $d=2.5$ [m]. 64
Figura 75: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=5$ [m], $\theta=0[^\circ]$ y $d=2.5$ [m]... 64
Figura 76: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=10$ [m], $\theta=0[^\circ]$ y $d=2.5$ [m]. 64
Figura 77: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=2.5$ [m], $\theta=0[^\circ]$ y $d=5$ [m]... 65
Figura 78: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=5$ [m], $\theta=0[^\circ]$ y $d=5$ [m]..... 65
Figura 79: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=10$ [m], $\theta=0[^\circ]$ y $d=5$ [m].... 65
Figura 80: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=2.5$ [m], $\theta=45[^\circ]$ y $d=0$ [m]. 66

Figura 81: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=5$ [m], $\theta=45^\circ$ y $d=0$ [m]....	66
Figura 82: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=10$ [m], $\theta=45^\circ$ y $d=0$ [m]..	66
Figura 83: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=2.5$ [m], $\theta=45^\circ$ y $d=2.5$ [m].	67
Figura 84: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=5$ [m], $\theta=45^\circ$ y $d=2.5$ [m].	67
Figura 85: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=10$ [m], $\theta=45^\circ$ y $d=2.5$ [m].	67
Figura 86: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=2.5$ [m], $\theta=45^\circ$ y $d=5$ [m].	68
Figura 87: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=5$ [m], $\theta=45^\circ$ y $d=5$ [m]....	68
Figura 88: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=10$ [m], $\theta=45^\circ$ y $d=5$ [m]..	68
Figura 89: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=2.5$ [m], $\theta=90^\circ$ y $d=0$ [m].	69
Figura 90: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=5$ [m], $\theta=90^\circ$ y $d=0$ [m]....	69
Figura 91: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=10$ [m], $\theta=90^\circ$ y $d=0$ [m]..	69
Figura 92: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=2.5$ [m], $\theta=90^\circ$ y $d=2.5$ [m].	70
Figura 93: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=5$ [m], $\theta=90^\circ$ y $d=2.5$ [m].	70
Figura 94: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=10$ [m], $\theta=90^\circ$ y $d=2.5$ [m].	70
Figura 95: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=2.5$ [m], $\theta=90^\circ$ y $d=5$ [m].	71
Figura 96: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=5$ [m], $\theta=90^\circ$ y $d=5$ [m]....	71
Figura 97: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=10$ [m], $\theta=90^\circ$ y $d=5$ [m]..	71
Figura 98: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=2.5$ [m], $\theta=0^\circ$ y $d=0$ [m]...	72
Figura 99: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=5$ [m], $\theta=0^\circ$ y $d=0$ [m].....	72
Figura 100: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=10$ [m], $\theta=0^\circ$ y $d=0$ [m]..	72
Figura 101: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=2.5$ [m], $\theta=0^\circ$ y $d=2.5$ [m].	73
Figura 102: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=5$ [m], $\theta=0^\circ$ y $d=2.5$ [m].	73
Figura 103: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=10$ [m], $\theta=0^\circ$ y $d=2.5$ [m].	73
Figura 104: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=2.5$ [m], $\theta=0^\circ$ y $d=5$ [m].	74
Figura 105: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=5$ [m], $\theta=0^\circ$ y $d=5$ [m]....	74
Figura 106: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=10$ [m], $\theta=0^\circ$ y $d=5$ [m]..	74
Figura 107: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=2.5$ [m], $\theta=45^\circ$ y $d=0$ [m].	75
Figura 108: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=5$ [m], $\theta=45^\circ$ y $d=0$ [m]..	75
Figura 109: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=10$ [m], $\theta=45^\circ$ y $d=0$ [m].	75
Figura 110: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=2.5$ [m], $\theta=45^\circ$ y $d=2.5$ [m].	76
Figura 111: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=5$ [m], $\theta=45^\circ$ y $d=2.5$ [m].	76
Figura 112: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=10$ [m], $\theta=45^\circ$ y $d=2.5$ [m].	76
Figura 113: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=2.5$ [m], $\theta=45^\circ$ y $d=5$ [m].	77
Figura 114: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=5$ [m], $\theta=45^\circ$ y $d=5$ [m]..	77
Figura 115: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=10$ [m], $\theta=45^\circ$ y $d=5$ [m].	77

Figura 116: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=2.5$ [m], $\theta=90[^\circ]$ y $d=0$ [m].	78
Figura 117: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=5$ [m], $\theta=90[^\circ]$ y $d=0$ [m].	78
Figura 118: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=10$ [m], $\theta=90[^\circ]$ y $d=0$ [m].	78
Figura 119: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=2.5$ [m], $\theta=90[^\circ]$ y $d=2.5$ [m].	79
Figura 120: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=5$ [m], $\theta=90[^\circ]$ y $d=2.5$ [m].	79
Figura 121: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=10$ [m], $\theta=90[^\circ]$ y $d=2.5$ [m].	79
Figura 122: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=2.5$ [m], $\theta=90[^\circ]$ y $d=5$ [m].	80
Figura 123: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=5$ [m], $\theta=90[^\circ]$ y $d=5$ [m].	80
Figura 124: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=10$ [m], $\theta=90[^\circ]$ y $d=5$ [m].	80
Figura 125: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=2.5$ [m], $\theta=0[^\circ]$ y $d=0$ [m].	81
Figura 126: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=5$ [m], $\theta=0[^\circ]$ y $d=0$ [m].	81
Figura 127: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=10$ [m], $\theta=0[^\circ]$ y $d=0$ [m].	81
Figura 128: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=2.5$ [m], $\theta=0[^\circ]$ y $d=2.5$ [m].	82
Figura 129: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=5$ [m], $\theta=0[^\circ]$ y $d=2.5$ [m].	82
Figura 130: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=10$ [m], $\theta=0[^\circ]$ y $d=2.5$ [m].	82
Figura 131: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=2.5$ [m], $\theta=0[^\circ]$ y $d=5$ [m].	83
Figura 132: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=5$ [m], $\theta=0[^\circ]$ y $d=5$ [m].	83
Figura 133: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=10$ [m], $\theta=0[^\circ]$ y $d=5$ [m].	83
Figura 134: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=2.5$ [m], $\theta=45[^\circ]$ y $d=0$ [m].	84
Figura 135: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=5$ [m], $\theta=45[^\circ]$ y $d=0$ [m].	84
Figura 136: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=10$ [m], $\theta=45[^\circ]$ y $d=0$ [m].	84
Figura 137: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=2.5$ [m], $\theta=45[^\circ]$ y $d=2.5$ [m].	85
Figura 138: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=5$ [m], $\theta=45[^\circ]$ y $d=2.5$ [m].	85
Figura 139: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=10$ [m], $\theta=45[^\circ]$ y $d=2.5$ [m].	85
Figura 140: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=2.5$ [m], $\theta=45[^\circ]$ y $d=5$ [m].	86
Figura 141: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=5$ [m], $\theta=45[^\circ]$ y $d=5$ [m].	86
Figura 142: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=10$ [m], $\theta=45[^\circ]$ y $d=5$ [m].	86
Figura 143: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=2.5$ [m], $\theta=90[^\circ]$ y $d=0$ [m].	87
Figura 144: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=5$ [m], $\theta=90[^\circ]$ y $d=0$ [m].	87
Figura 145: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=10$ [m], $\theta=90[^\circ]$ y $d=0$ [m].	87
Figura 146: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=2.5$ [m], $\theta=90[^\circ]$ y $d=2.5$ [m].	88

Figura 147: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=5$ [m], $\theta=90^\circ$ y $d=2.5$ [m].	88
Figura 148: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=10$ [m], $\theta=90^\circ$ y $d=2.5$ [m].	88
Figura 149: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=2.5$ [m], $\theta=90^\circ$ y $d=5$ [m].	89
Figura 150: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=5$ [m], $\theta=90^\circ$ y $d=5$ [m].	89
Figura 151: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=10$ [m], $\theta=90^\circ$ y $d=5$ [m].	89
Figura 152: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=2.5$ [m], $\theta=0^\circ$ y $d=0$ [m].	90
Figura 153: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=5$ [m], $\theta=0^\circ$ y $d=0$ [m].	90
Figura 154: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=10$ [m], $\theta=0^\circ$ y $d=0$ [m].	90
Figura 155: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=2.5$ [m], $\theta=0^\circ$ y $d=2.5$ [m].	91
Figura 156: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=5$ [m], $\theta=0^\circ$ y $d=2.5$ [m].	91
Figura 157: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=10$ [m], $\theta=0^\circ$ y $d=2.5$ [m].	91
Figura 158: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=2.5$ [m], $\theta=0^\circ$ y $d=5$ [m].	92
Figura 159: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=5$ [m], $\theta=0^\circ$ y $d=5$ [m].	92
Figura 160: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=10$ [m], $\theta=0^\circ$ y $d=5$ [m].	92
Figura 161: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=2.5$ [m], $\theta=45^\circ$ y $d=0$ [m].	93
Figura 162: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=5$ [m], $\theta=45^\circ$ y $d=0$ [m].	93
Figura 163: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=10$ [m], $\theta=45^\circ$ y $d=0$ [m].	93
Figura 164: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=2.5$ [m], $\theta=45^\circ$ y $d=2.5$ [m].	94
Figura 165: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=5$ [m], $\theta=45^\circ$ y $d=2.5$ [m].	94
Figura 166: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=10$ [m], $\theta=45^\circ$ y $d=2.5$ [m].	94
Figura 167: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=2.5$ [m], $\theta=45^\circ$ y $d=5$ [m].	95
Figura 168: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=5$ [m], $\theta=45^\circ$ y $d=5$ [m].	95
Figura 169: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=10$ [m], $\theta=45^\circ$ y $d=5$ [m].	95
Figura 170: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=2.5$ [m], $\theta=90^\circ$ y $d=0$ [m].	96
Figura 171: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=5$ [m], $\theta=90^\circ$ y $d=0$ [m].	96
Figura 172: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=10$ [m], $\theta=90^\circ$ y $d=0$ [m].	96
Figura 173: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=2.5$ [m], $\theta=90^\circ$ y $d=2.5$ [m].	97
Figura 174: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=5$ [m], $\theta=90^\circ$ y $d=2.5$ [m].	97
Figura 175: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=10$ [m], $\theta=90^\circ$ y $d=2.5$ [m].	97
Figura 176: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=2.5$ [m], $\theta=90^\circ$ y $d=5$ [m].	98
Figura 177: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=5$ [m], $\theta=90^\circ$ y $d=5$ [m].	98

Figura 178: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=10$ [m], $\theta=90[^\circ]$ y $d=5$ [m].98

Índice de tablas:

Tabla 1: Peligro potencial de estallidos de rocas “BHP”.	14
Tabla 2: Parámetros peak y residual según el “Enfoque DISL”.	16
Tabla 3: Características del material rocoso.	22
Tabla 4: Parámetros Enfoque DISL.	23
Tabla 5: Definición de esfuerzos principales.	24
Tabla 6: Configuración del mallado y discretización de la simulación.	25
Tabla 7: Cálculo del nivel de peligro asociado a estallidos de roca mediante el índice BHP.	30
Tabla 8: Resultados del análisis del potencial de estallido de rocas en la zona del techo.	31
Tabla 9: Resultados del análisis del potencial de estallido de rocas en la zona de la pared.	32
Tabla 10: Resultados del análisis del potencial de estallido de rocas en la zona intermedia.	33
Tabla 11: Resultados del análisis del potencial de estallido de rocas en la zona del techo.	34
Tabla 12: Resultados del análisis del potencial de estallido de rocas en la zona de la pared.	35
Tabla 13: Resultados del análisis del potencial de estallido de rocas en la zona intermedia.	36
Tabla 14: Resumen de resultados obtenidos.	39

1. Introducción

En la actualidad, la minería subterránea ha incrementado de forma significativa su participación dentro de la industria. Este crecimiento sostenido se debe, principalmente, al agotamiento progresivo de los yacimientos minerales ubicados en las cercanías de la superficie, lo que ha llevado a las operaciones mineras a profundidades mayores. A su vez, el aumento constante en la demanda global de minerales ha impulsado el desarrollo de nuevas tecnologías y metodologías orientadas a optimizar la explotación subterránea, tanto desde una perspectiva económica como de seguridad.

En este contexto, la seguridad en las operaciones mineras subterráneas constituye un aspecto crucial, debido al alto riesgo asociado a las labores realizadas bajo tierra. Una de las amenazas más relevantes y estudiadas en este ámbito es la ocurrencia de estallidos de roca, los cuales representan eventos de inestabilidad súbita y violenta del macizo rocoso. Estos eventos no solo ponen en peligro la integridad de los trabajadores y los equipos, sino que también pueden comprometer seriamente la continuidad operacional, generando pérdidas económicas y retrasos en los proyectos. Por esta razón, los estallidos de rocas han sido objeto de creciente atención por parte de la comunidad científica y técnica (Zhou et al., 2018).

Los estallidos de rocas se definen como desprendimientos repentinos y violentos de material rocoso, generalmente ocurridos a grandes profundidades, como resultado de una combinación de factores. Entre estos, se destacan la concentración de esfuerzos inducidos por la excavación, la presencia de discontinuidades geológicas, las propiedades mecánicas del macizo rocoso, y en algunos casos, la ocurrencia de eventos sísmicos. La profundidad de la excavación también está directamente relacionada con la probabilidad de ocurrencia de estos eventos, ya que, a mayor profundidad, aumenta la relación entre los esfuerzos in situ y la resistencia a la compresión uniaxial de la roca (Kaiser & Cai, 2012).

En respuesta a esta problemática, numerosos estudios han desarrollado herramientas para analizar, evaluar y predecir la ocurrencia de estallidos de roca. Estas herramientas incluyen modelos empíricos, analíticos y numéricos que permiten estimar tanto la posición como la intensidad de un posible estallido con un grado razonable de certeza (Li et al., 2019). Estas metodologías han

contribuido significativamente a la toma de decisiones en el diseño de excavaciones subterráneas y en la implementación de medidas de control.

Dentro de los factores que influyen en la ocurrencia de estallidos, la presencia de discontinuidades juega un rol fundamental. Las discontinuidades son elementos estructurales comunes en los macizos rocosos, tales como diaclasas, fallas o planos de estratificación, y desde una perspectiva geotécnica, son determinantes en el comportamiento mecánico de la roca (Garín, 2024). Estas estructuras pueden actuar como zonas de debilidad que alteran el campo de esfuerzos, disminuyen la resistencia del macizo y facilitan la concentración de tensiones, aspectos que son clave al momento de evaluar la estabilidad de una excavación.

Estudios como el de Diederichs (2007) han profundizado en la comprensión del comportamiento frágil del macizo rocoso mediante el desarrollo de modelos numéricos avanzados, como el enfoque DISL (“Damage Initiation and Spalling Limit”), basado en el criterio de falla no lineal de Hoek & Brown. Por su parte, Manouchehrian & Cai (2018) estudiaron específicamente la influencia de la orientación y extensión de las discontinuidades en excavaciones subterráneas, utilizando modelación numérica basada en el método de elementos finitos (FEM). Sus resultados muestran que los planos de debilidad pueden modificar significativamente la distribución de esfuerzos y la rigidez local del entorno excavado, aumentando la probabilidad de que se generen estallidos en zonas de alta concentración de tensiones.

Como se mencionó, la relevancia de las discontinuidades en el estudio de los estallidos de roca radica en su capacidad para:

- Generación de esfuerzos concentrados.
- Reducción de la resistencia de la roca.
- Focalización de tensiones y deformaciones.
- Interacción con el esfuerzo in-situ.

Es por ello, que esta memoria buscará, por lo tanto, estudiar y comprender tanto la influencia del espaciamiento de las discontinuidades como la orientación de los esfuerzos sobre los estallidos de rocas, con la finalidad de poder contribuir a la mitigación de la probabilidad de ocurrencia de estos eventos y aplicar los resultados en beneficio y operatividad de la industria minera.

2. Objetivos y alcances

2.1 Objetivo general

- Estimar la influencia de estructuras geológicas en el potencial de ocurrencia de estallidos de roca a través del modelamiento numérico.

2.2 Objetivos específicos

- Evaluar la influencia de la orientación y distancia de una discontinuidad sobre el potencial de los estallidos de roca.
- Evaluar la influencia de la extensión de una discontinuidad sobre el potencial de los estallidos de roca.
- Evaluar como la cohesión y el ángulo de fricción de una discontinuidad influyen sobre el potencial de los estallidos de roca.

2.3 Alcances

El presente estudio se centra en analizar la influencia de las estructuras geológicas, particularmente las discontinuidades, en la ocurrencia de estallidos de roca del tipo asociados a deformación en minería subterránea. Para ello, se trabajará con un macizo rocoso competente, cuyas propiedades mecánicas han sido definidas a partir de información recopilada en literatura técnica y artículos científicos relevantes. En este contexto, la roca se considerará como un medio continuo, isotrópico y homogéneo, lo cual permite simplificar el análisis y enfocar el estudio en el efecto de las discontinuidades.

La investigación contempla la caracterización de las estructuras geológicas presentes, prestando especial atención a las discontinuidades, así como la evaluación del comportamiento del macizo rocoso en presencia de estas. El análisis de la ocurrencia de estallidos de roca por deformación se llevará a cabo en entornos subterráneos simulados, mediante herramientas de modelación numérica utilizando el software RS2 de Rocscience. En estas simulaciones, se variarán parámetros claves de las discontinuidades como su orientación, espaciamiento y longitud, con el objetivo de identificar su influencia en la estabilidad del macizo y en la generación de condiciones propicias para estallidos de roca.

Los resultados esperados incluyen un modelo numérico detallado que represente la influencia de las discontinuidades en la estabilidad del macizo rocoso, así como datos cuantitativos y cualitativos sobre el impacto de las características de las discontinuidades en la probabilidad de ocurrencia de estallidos de roca.

Este estudio adquiere relevancia en el ámbito minero al aportar información útil para mejorar el diseño y planificación de excavaciones subterráneas, permitiendo avanzar hacia una gestión más eficiente del riesgo geotécnico. A su vez, los resultados pueden servir de base para futuras investigaciones orientadas a prevenir accidentes y fortalecer las prácticas de seguridad en faenas subterráneas.

3. Marco teórico

3.1 Discontinuidades

3.1.1 Definición de discontinuidades

En el ámbito de la geología estructural y la mecánica de rocas, el término discontinuidad se refiere a cualquier ruptura, debilidad o plano de separación dentro del macizo rocoso que implica una pérdida de continuidad en sus propiedades físicas o mecánicas. Estas interrupciones pueden ser el resultado de procesos geológicos como la tectónica, el enfriamiento de magmas, la sedimentación o la meteorización, y se manifiestan en forma de fallas, fracturas, diaclasas, planos de estratificación, foliaciones, clivaje de pizarra, entre otras estructuras.

Las discontinuidades tienen una influencia directa y significativa en el comportamiento mecánico del macizo rocoso, ya que alteran su resistencia y capacidad de carga. La presencia de estas estructuras suele ser el principal condicionante en la estabilidad de taludes, túneles y otras excavaciones subterráneas, debido a que las fallas y deformaciones tienden a desarrollarse a lo largo de estas superficies debilitadas. Además, afectan la permeabilidad del macizo, facilitando la circulación de agua subterránea, lo que puede desencadenar procesos de erosión interna o reducción de cohesión, que comprometen aún más su estabilidad. Por otro lado, estas discontinuidades también entregan valiosa información sobre los esfuerzos que ha experimentado el macizo a lo largo de su historia geológica (Jaeger et al., 2013).

Estas estructuras geológicas rara vez se presentan de forma aislada; por el contrario, tienden a agruparse en familias de discontinuidades, las cuales comparten orientaciones similares y conforman patrones sistemáticos dentro del macizo rocoso. Cuando distintas familias se intersectan entre sí, dan origen a sistemas de discontinuidades más complejos. Estas discontinuidades pueden presentarse en formas cerradas, abiertas o rellenas, y suelen desarrollarse en paralelo a los planos de estratificación, foliaciones o clivaje de pizarra (Brady & Brown, 2005).

3.1.2 Propiedades de las discontinuidades

Según Brady & Brown (2005), las propiedades más relevantes de las discontinuidades que influyen directamente en el comportamiento mecánico del macizo rocoso son diversas y abarcan tanto aspectos físicos como mecánicos. Estas propiedades determinan en gran medida la manera en que las discontinuidades afectan la resistencia global del macizo, su estabilidad frente a excavaciones subterráneas, y su respuesta ante esfuerzos inducidos. Entre las propiedades más significativas se incluyen:

- **Orientación:** se refiere a la posición de la discontinuidad en el espacio y se describe comúnmente por su rumbo y buzamiento. El rumbo es la dirección de la línea de intersección entre la superficie de la discontinuidad y un plano horizontal, mientras que el buzamiento es el ángulo de inclinación de la discontinuidad respecto a la horizontal.
- **Espaciamiento:** es la distancia perpendicular entre discontinuidades adyacentes. Este factor determina el tamaño de los bloques que componen el macizo rocoso. Un espaciamiento estrecho genera bloques pequeños y puede afectar la estabilidad del macizo, mientras que un espaciamiento amplio produce bloques más grandes.
- **Persistencia:** se refiere a la extensión en área o al tamaño de una discontinuidad dentro de un plano. Una alta persistencia indica una discontinuidad grande que puede debilitar significativamente el macizo rocoso, mientras que una baja persistencia significa que la discontinuidad es más pequeña y afecta menos la integridad del macizo.
- **Rugosidad:** es la irregularidad de la superficie de la discontinuidad. La rugosidad influye en la resistencia al deslizamiento a lo largo de la discontinuidad. Una discontinuidad con alta rugosidad tiene una mayor resistencia al deslizamiento y hace al macizo rocoso más competente, mientras que una discontinuidad con baja rugosidad facilita el deslizamiento y reduce la competencia del macizo rocoso.
- **Apertura:** es la distancia perpendicular que separa las paredes rocosas adyacentes de una discontinuidad abierta. Este espacio puede estar lleno de aire o agua. La apertura también se conoce como espesor de la discontinuidad. Una mayor apertura puede indicar una mayor debilidad en el macizo rocoso.
- **Relleno:** se refiere al material que se encuentra dentro de la discontinuidad. El tipo de material de relleno puede variar desde arcillas suaves hasta minerales duros como el cuarzo. Un material de relleno suave, como la arcilla, reduce la competencia del macizo rocoso, mientras que un material duro, como el cuarzo, aumenta la competencia del macizo.

A continuación, se pueden ver ilustradas las propiedades de las discontinuidades (**Figura 1**).

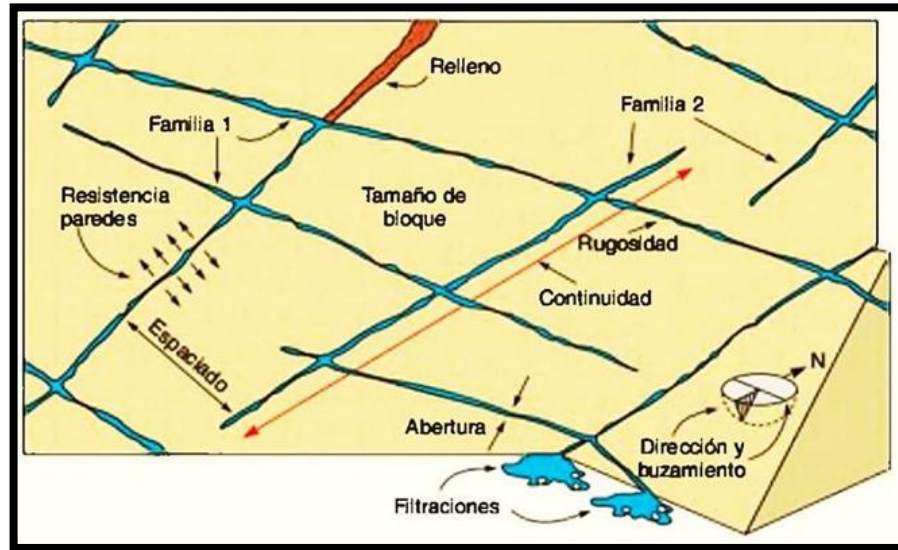


Figura 1: Propiedades de las discontinuidades.

Fuente: González de Vallejo (2002)

3.2 Estallidos de rocas

3.2.1 Definición de estallidos de rocas

El fenómeno de los estallidos de rocas ha sido objeto de estudio durante décadas en la ingeniería de minas y geomecánica, dada su complejidad y los riesgos que representa. Aunque no existe una definición única y universalmente aceptada, diversos autores coinciden en que este fenómeno se refiere a la liberación súbita y violenta de energía elástica acumulada en un macizo rocoso como resultado de una alteración del equilibrio de tensiones preexistente, generalmente causada por perturbaciones en las tensiones in situ durante excavaciones subterráneas.

Según Kaiser & Cai (2012), los estallidos de roca se describen como eventos repentinos y violentos de expulsión de material rocoso, los cuales se producen en profundidad debido a una combinación de factores. Entre estos destacan la presencia de discontinuidades estructurales, tales como fallas y fracturas, el incremento en la concentración de esfuerzos alrededor de las excavaciones y la ocurrencia de eventos sísmicos locales o inducidos. Esta liberación de energía puede manifestarse de forma explosiva, generando fragmentación del macizo y proyección de bloques de roca hacia el interior de la excavación.

En términos generales, los estallidos de roca son más frecuentes en macizos rocosos competentes, es decir, aquellos que presentan alta resistencia, baja deformabilidad y un comportamiento frágil. En estas condiciones, las rocas no disipan fácilmente la energía inducida por los esfuerzos, lo que lleva a la acumulación de tensiones que eventualmente se liberan de manera repentina. Este fenómeno se presenta típicamente en minas profundas, donde las tensiones geológicas naturales principalmente verticales por el peso del terreno y horizontales por procesos tectónicos alcanzan magnitudes significativas.

El fenómeno de estallido de roca suele presentarse en zonas con tensiones in situ de alta magnitud, particularmente en rocas duras y quebradizas, causando daños sustanciales a las estructuras y equipos presentes en la mina. Pueden provocar daños severos en el sostenimiento de túneles, equipos mineros, instalaciones subterráneas e incluso pérdidas humanas. Además, generan interrupciones en la producción, retrasos en los cronogramas y aumentan los costos operacionales debido a las labores de reparación y refuerzo (Askaripour, 2022).

3.2.2 Clasificación de estallidos de rocas

Los estallidos de roca pueden clasificarse de diversas maneras, dependiendo de factores como la intensidad del evento, la magnitud sísmica asociada, el mecanismo de iniciación, la geometría del macizo afectado y la forma en que se produce la expulsión de material. Esta variedad de clasificaciones refleja la complejidad del fenómeno y su fuerte dependencia de las condiciones geomecánicas del entorno subterráneo.

Una de las clasificaciones más ampliamente aceptadas se basa en el mecanismo de iniciación del evento. En este contexto, Kaiser (1996) propone dos categorías principales:

- Estallidos de rocas autoiniciados: se generan cuando ocurre una alta concentración de energía de deformación en las inmediaciones de una excavación, producto de la redistribución de esfuerzos alrededor de la misma. Esta acumulación de energía puede superar de manera repentina la resistencia del macizo rocoso, provocando una fractura violenta y espontánea sin necesidad de estímulos externos. Son típicos en zonas donde el macizo presenta alta rigidez y baja capacidad de deformación plástica.

- Estallidos de rocas activados remotamente: se inducen a partir de perturbaciones sísmicas generadas en puntos alejados de la excavación, las cuales viajan a través del macizo rocoso y liberan energía en zonas localmente debilitadas o en condiciones críticas de esfuerzo, desembocando en un mecanismo de falla frágil.

Posteriormente, Kaiser (2012) amplía esta clasificación, identificando tres tipos específicos de estallidos de roca según su mecanismo principal de ocurrencia:

- Estallidos de roca por deformación: asociados a una acumulación excesiva de esfuerzos compresivos en zonas del macizo cercanas a las excavaciones. Esta energía de deformación supera la resistencia de la roca, que, al ser de comportamiento frágil, falla de manera explosiva. Son frecuentes en túneles profundos o labores mineras en macizos competentes.
- Estallidos de pilares: ocurren cuando los pilares de roca dejados para soportar el techo entre galerías no pueden resistir las tensiones inducidas por la excavación o por cargas adicionales. Al colapsar, liberan grandes cantidades de energía, lo que genera una falla violenta del pilar. Este tipo es característico en explotaciones con diseño inadecuado de pilares o sin refuerzos estructurales suficientes.
- Estallidos por deslizamiento de falla: se producen cuando el esfuerzo cortante a lo largo de una falla preexistente alcanza un nivel crítico, generando un movimiento repentino y liberación de energía sísmica. Esta situación es más probable cuando las fallas se encuentran reactivadas por tensiones inducidas por la excavación, especialmente si hay presencia de agua o si la orientación de la falla es desfavorable.

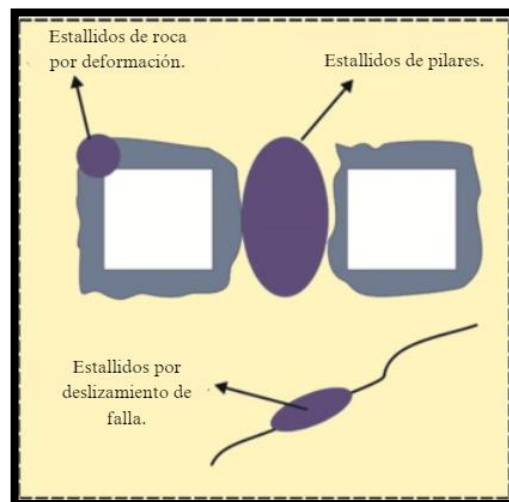


Figura 2: Representación esquemática de potenciales de estallido de rocas.

Fuente: Modificado desde Askaripour et al., 2022

3.3 Métodos de evaluación de estallidos de roca

En la práctica de la ingeniería y la minería subterránea, predecir los estallidos de rocas con precisión es deseable pero actualmente limitado. Aunque la ubicación y la magnitud de un evento sísmico se pueden prever con cierta exactitud, predecir el momento exacto sigue siendo un desafío. El monitoreo sísmico y la modelización numérica son métodos prometedores para identificar y prever estallidos de rocas. Además, la geología del macizo rocoso debe considerarse, ya que puede influir en las distribuciones de tensiones y fracturas (Li et al., 2019).

La evaluación de los estallidos de rocas implica el análisis de factores como la geología del macizo rocoso, las condiciones de esfuerzos y deformaciones, la presencia de discontinuidades, entre otros. Para ello, se emplean herramientas geomecánicas y técnicas de modelación numérica que permiten predecir, prevenir y mitigar la ocurrencia de estos eventos. En este estudio se consideran distintos enfoques de evaluación propuestos por Diederichs, los cuales pueden agruparse en tres categorías principales:

- Métodos empíricos.
- Métodos analíticos.
- Métodos numéricos.

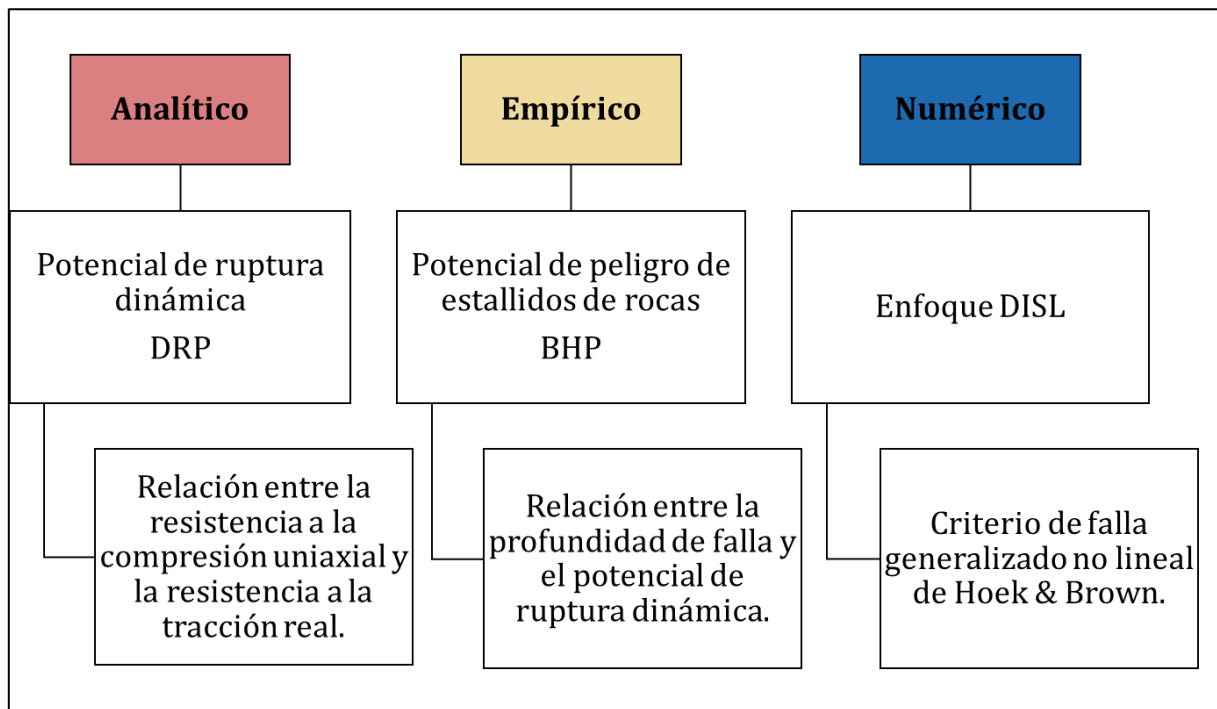


Figura 3: Métodos de evaluación de estallidos de roca.

3.3.1 Potencial de ruptura dinámica (DRP)

El potencial de ruptura dinámica o “DRP” (DRP, por sus siglas en inglés: Dynamic Rupture Potential) es un enfoque analítico propuesto para evaluar el riesgo de estallidos de roca a partir de las propiedades mecánicas del macizo rocoso. Este indicador cuantifica la propensión de una roca a experimentar una falla dinámica en función de su resistencia uniaxial a compresión y su resistencia a la tracción real, considerando también el comportamiento frágil del material en condiciones de alta concentración de esfuerzos.

El modelo se basa en la relación entre la resistencia a la compresión uniaxial (UCS) y un parámetro denominado m_i , que representa el índice de fragilidad del material rocoso. El DRP se calcula mediante la **Ecuación (1)**:

$$DRP = \frac{UCS \cdot m_i}{1200} \quad (1)$$

El parámetro m_i puede obtenerse a través de la **Ecuación (2)**, que incorpora también el ensayo de tracción indirecta o resistencia a la tracción brasileña (BTS):

$$m_i = \frac{UCS}{T} = 1.3 \frac{UCS}{BTS} = 3 \frac{CI}{BTS} \quad (2)$$

Donde:

- T: resistencia a la tracción real, [MPa].
- BTS: resistencia a la tracción obtenida mediante el ensayo brasileño, [MPa].
- CI: resistencia a compresión simple isotrópica, [MPa].

La interpretación del valor de “DRP” se realiza a partir de una clasificación en niveles de riesgo, los cuales se grafican en la **Figura 4**. Esta clasificación divide el potencial de ruptura dinámica en seis categorías, que van desde bajo a extremadamente alto, y se utiliza para estimar de forma preliminar el nivel de amenaza asociado a un posible estallido de roca.

Este método resulta útil como una herramienta de primera aproximación para identificar sectores del macizo rocoso con mayor propensión a rupturas dinámicas, especialmente en etapas tempranas del diseño de excavaciones subterráneas. No obstante, debe complementarse con métodos numéricos y análisis sísmicos para una evaluación más completa y confiable del riesgo de estallidos.

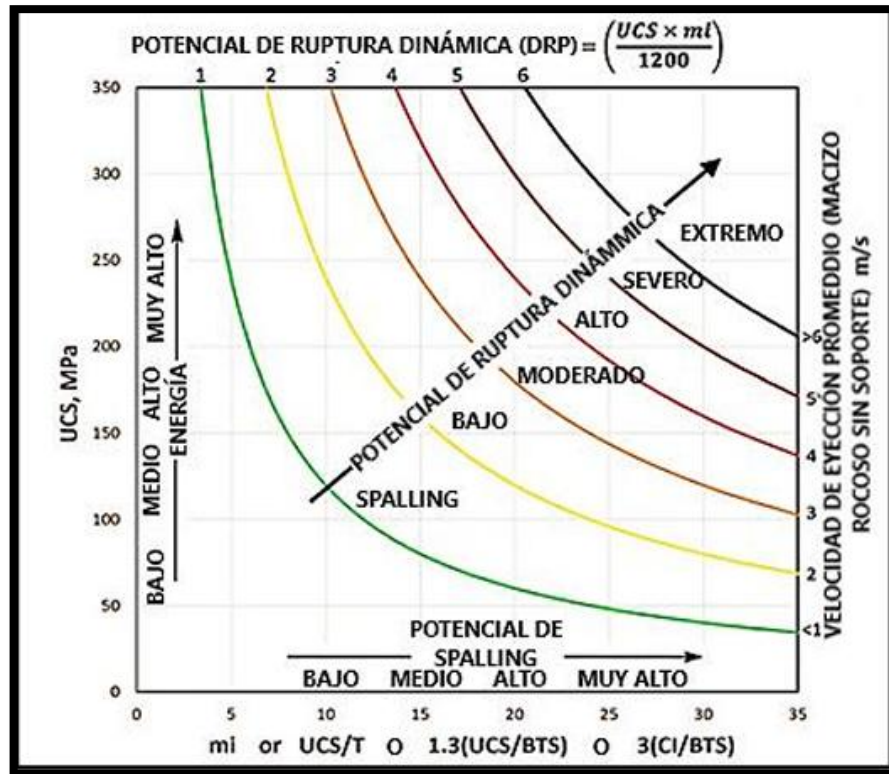


Figura 4: Potencial de ruptura dinámica.

Fuente: Modificado de Diederichs (2018).

3.3.2 Potencial de peligro de estallidos de rocas (BHP)

Complementando el modelo analítico del potencial de ruptura dinámica (DRP), el investigador Diederichs (2018) desarrolló una metodología de carácter empírico denominada potencial de peligro de estallidos de rocas (BHP, por sus siglas en inglés: Burst Hazard Potential), con el objetivo de evaluar de manera más integral la susceptibilidad de una excavación subterránea a experimentar un estallido de roca. Este modelo ha sido validado con datos reales obtenidos en minas de Chile y Perú, lo cual refuerza su aplicabilidad en contextos tectónicamente activos como la Cordillera de los Andes.

El enfoque del BHP integra la profundidad esperada de falla (D_f) con el potencial de ruptura dinámica previamente descrito (DRP), a través de una relación que considera la energía disponible en el macizo rocoso y su capacidad para liberar dicha energía en forma de falla violenta. El cálculo del BHP se realiza utilizando la **Ecuación (3)**:

$$BHP = (DDP \cdot DRP)^{0.5} \quad (3)$$

Donde:

- DDP: Potencial de Profundidad de Daño (Damage Depth Potential).
- DRP: Potencial de Ruptura Dinámica.

Los valores de DDP y DRP se determinan mediante las **Ecuaciones (4) y (5)**, respectivamente:

$$DDP = \alpha \cdot D_f^{0.5} \quad (4)$$

$$DRP = \beta \cdot \frac{UCS \cdot m_i}{1200} \quad (5)$$

Donde se recomienda utilizar los valores de $\alpha = 4.5$ y $\beta = 1$ para ambientes tectónicos como los de Chile y Perú.

El parámetro “BHP” se interpreta a partir de una clasificación de niveles de riesgo que se detallan en la **Tabla 1**. Esta tabla asocia rangos de valores de “BHP” con distintos niveles de peligro, que van desde zonas de baja concentración de esfuerzos hasta eventos extremos, caracterizados por eyecciones repentinas y violentas de fragmentos rocosos, capaces de causar daños significativos en la excavación y poner en riesgo la integridad de los trabajadores.

En este modelo, la demanda de energía se posiciona como el principal indicador del nivel de amenaza, dado que una alta acumulación de energía en un entorno frágil puede traducirse en una liberación súbita de dicha energía en forma de estallido. Por lo tanto, el BHP es una herramienta valiosa para la planificación preventiva y el diseño de excavaciones más seguras en minería subterránea, al permitir identificar zonas críticas con mayor propensión a experimentar eventos dinámicos.

Tabla 1: Peligro potencial de estallidos de rocas “BHP”.

Clasificación del potencial de peligro de estallidos de rocas (BHP)		
Clase	Nivel de peligro	Problemas
0 - 0.1	Esfuerzos bajos	Sin indicaciones
0.1 - 0.5	Bajas concentraciones de esfuerzos	Ruido de esfuerzos menores locales e intermitentes.
0.5 - 1	Esfuerzos constantes	Constantes estallidos de esfuerzos durante varias horas después de la explosión.
1 - 2	Spalling	Formación de losas visibles <5cm de grosor, con emisiones acústicas, pero una mínima energía cinética (o velocidad) desarrollándose después de la voladura y acuñadora. Se detiene después de 1 -3 diámetros de avance.
2 - 3	Ruptura dinámica menor	Desprendimientos con ruido significativo, eyección menor (5-20 cm de grosor) en o cerca de la cara. Menos de 2 kJ/m ² de energía cinética de liberación (por unidad de superficie). Menos de 5 cm de potencial de cierre.
3 - 4	Ruptura dinámica moderada	Ruido constante o fuerte con alta frecuencia de eyección, con espesores de 15 -65 cm y velocidades > 3 -4 m/s. Energía cinética de 2 -14 kJ/m ² y un potencial de cierre de 5-15 cm.
4 - 5	Ruptura dinámica mayor o severa	Grandes volúmenes de eyección o elevación dinámica (piso) con fuertes emisiones acústicas, que ocurren después de la tronadura cerca del frente de avance. Espesor promedio de 30 -85 cm, velocidad superficial de eyección > 4 m/s, energía cinética entre 14 -35 kJ/m ² y un potencial de cierre de 15 -30 cm.
5 +	Estallido extremo	Eventos muy grandes con un espesor de roca eyectada > 85 cm, > 6 m/s de velocidad, energía cinética > 35 kJ/ m ² y un potencial de cierre > 30 cm. Puede ocurrir en cualquier momento.

Fuente: Modificado de Diederichs (2018).

3.3.3 Enfoque DISL (2007, 2016 y 2018)

El enfoque conocido como “DISL”, por sus siglas en inglés Damage Initiation and Spalling Limit, es un método numérico propuesto por Diederichs (2007) y posteriormente perfeccionado en publicaciones de 2016 y 2018. Este modelo fue desarrollado con el propósito de representar de forma más realista el comportamiento frágil de falla en macizos rocosos sometidos a condiciones de esfuerzos elevados, especialmente en ambientes mineros subterráneos profundos donde los fenómenos de spalling y estallido de rocas son comunes.

El modelo DISL se basa en una modificación del criterio de falla no lineal generalizado de Hoek & Brown, incorporando en su formulación tanto parámetros de resistencia máxima como parámetros de resistencia residual. Estos dos conjuntos de parámetros permiten simular el proceso progresivo de degradación del macizo rocoso a medida que se supera su resistencia, lo que resulta fundamental para evaluar de manera adecuada los mecanismos de inicio de daño y propagación de fracturas tipo spalling.

Dentro de este enfoque, se distinguen dos regiones claves en función del grado de plasticidad inducida en el macizo:

- Región de spalling: (spalling limit): Área con plastificación total (100%), delimitada por la resistencia residual. Es crítica por su vinculación con el desprendimiento de roca (spalling) y posibles estallidos.
- Región de perturbación: (damage initiation limit): Zona del macizo rocoso con plastificación parcial (entre 0% y 100%), definida por los parámetros de resistencia máxima, donde comienza el daño estructural.

En la **Figura 5** se visualizan estas zonas de daño definidas por el enfoque DISL, permitiendo identificar gráficamente las regiones críticas del macizo rocoso en torno a una excavación subterránea, según los límites de daño estructural y spalling.

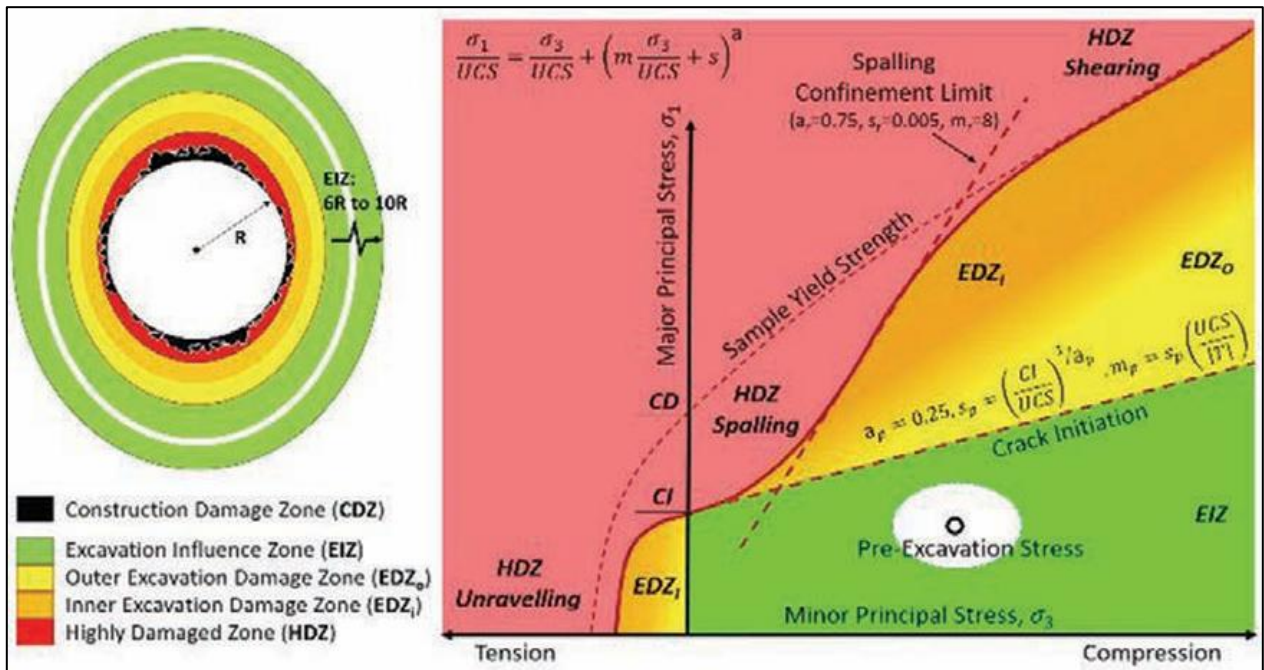


Figura 5: Zonas de daño correspondientes al enfoque DISL.

Fuente: Diederichs (2018).

La implementación numérica del enfoque DISL requiere ajustar adecuadamente los parámetros del criterio de Hoek & Brown para representar tanto la condición máxima como la residual del macizo. Estos valores se detallan a continuación en la **Tabla 2**.

Tabla 2: Parámetros peak y residual según el “Enfoque DISL”.

Método de modelación	Peak		Residual	
	Parámetro de entrada	Valor	Parámetro de entrada	Valor
DISL	a_p	0.25	a_r	0.75
	s_p	$\left(\frac{CI}{UCS}\right)^{\frac{1}{p}}$	s_r	0.001
	m_p	$s_p \cdot \frac{UCS}{T}$	m_r	6 - 12

Fuente: Modificado de Diederichs (2007).

3.4 Región de Spalling

La región de Spalling se refiere a la zona del macizo rocoso que ha alcanzado un estado de plastificación total, es decir, se ha deformado un 100%. En esta región, existe una alta probabilidad de ocurrencia de estallidos de rocas, debido a la presencia de fallas por corte y/o tracción, causadas por el desconfinamiento alrededor de la excavación. Todo el material rocoso presente dentro de esta región es susceptible de ser eyectado violentamente durante un evento de este tipo.

En este contexto, se define la profundidad de falla ante un evento de falla frágil, conocida como el "Límite de Spalling". Este límite se caracteriza por una fricción elevada y una pérdida de cohesión, reflejando el comportamiento frágil del macizo rocoso frente a las tensiones inducidas (Delonca et al., 2023)

El "Límite de Spalling", marca la separación entre la región de Spalling y la región perturbada, la cual rodea a la primera. Esta región perturbada, si bien no ha alcanzado una plastificación completa, ha experimentado algún grado de alteración debido a las tensiones inducidas por la excavación.

El conocimiento y la definición de estas regiones son fundamentales para evaluar la estabilidad del macizo rocoso y para diseñar medidas de mitigación que puedan prevenir o controlar los estallidos de rocas en entornos mineros subterráneos.

3.5 Región perturbada

La región perturbada corresponde a una zona del macizo rocoso que ha experimentado una plastificación parcial, con un grado de deformación comprendido entre el 0% y el 100%. En esta área, la probabilidad de ocurrencia de un estallido de rocas es variable, aunque generalmente menor que en la región de Spalling, ya que los mecanismos de fractura en esta zona tienen menos probabilidades de conducir a una falla completa.

Dentro de esta región se encuentra el "Límite de Perturbación" o "Límite de inicio de daño", el cual marca la transición entre el macizo rocoso que ha comenzado a plastificarse y aquel macizo rocoso que aún conserva un comportamiento elástico.

De acuerdo con Delonca et al. (2023), en la **Figura 5**, cualquier trayectoria de tensión que permanezca por debajo del umbral de iniciación del daño se considera elástica y, por lo tanto, no genera daños en el material. Este umbral se caracteriza por una baja dependencia del confinamiento, es decir, presenta una cohesión elevada y una baja fricción.

Este límite es crucial para la evaluación geotécnica, ya que define la frontera donde las propiedades mecánicas del macizo rocoso cambian significativamente, afectando la estabilidad general de la excavación. Conocer y entender esta transición ayuda a los ingenieros a diseñar estrategias de mitigación más efectivas para controlar los riesgos asociados a las tensiones y deformaciones inducidas por las actividades mineras.

4. Metodología

La metodología empleada en este estudio se estructuro en seis etapas principalmente, con el fin de lograr los objetivos descritos previamente.

1. Revisión bibliográfica: se realizó una recopilación y análisis de antecedentes técnicos y científicos relacionados con los estallidos de roca, los factores que los provocan y el rol de las discontinuidades en el comportamiento del macizo rocoso. Esto permitió comprender los mecanismos involucrados y establecer los parámetros relevantes para el modelamiento.
2. Caracterización del ambiente de simulación: se definieron las condiciones base del entorno de modelamiento. Esta etapa incluyó la construcción de la geometría del modelo en RS2, representando una excavación subterránea en condiciones bidimensionales, y la asignación de propiedades litológicas y esfuerzos in situ. También se realizó un análisis de sensibilidad del mallado con el fin de asegurar la estabilidad y precisión de los resultados.
3. Análisis de la influencia de la orientación y distancia de una discontinuidad: se introdujo una única discontinuidad en el modelo, variando su ángulo de orientación respecto a la excavación (0° , 45° , 90°) y su distancia radial desde el contorno de la excavación hacia el exterior. El objetivo fue identificar cómo estos parámetros modifican el comportamiento del macizo y el potencial de estallido.
4. Análisis de la influencia de la extensión de una discontinuidad: se analizó cómo afecta la longitud de una discontinuidad en el comportamiento del macizo rocoso. Para ello, se modificó la extensión de la discontinuidad. Esto permitió observar cómo cambia la distribución de esfuerzos y la acumulación de energía según el tamaño de la discontinuidad.
5. Evaluación de la influencia de cohesión y ángulo de fricción: se modificaron los valores de cohesión y ángulo de fricción de la discontinuidad para representar un cambio en su resistencia. Esto permitió evaluar si estas propiedades influyen en el comportamiento del macizo rocoso y en el riesgo de ocurrencia de un estallido.
6. Comparación y análisis de resultados obtenidos: se compararon los resultados de los distintos modelos usando indicadores como el potencial de estallido, las deformaciones, la distribución de esfuerzos y la energía liberada. Esto permitió identificar las condiciones más críticas y entender cómo cada parámetro de la discontinuidad afecta el comportamiento de la roca.

4.1 Caracterización del ambiente de simulación

Como punto de partida, es fundamental establecer las condiciones iniciales del modelo, lo que incluye la definición de las propiedades del macizo rocoso, los esfuerzos in situ y la geometría base. Estos elementos permiten simular el fenómeno de estallido de rocas siguiendo los lineamientos propuestos por Diederichs (2007), a través del enfoque DISL (Damage Initiation and Spalling Limit).

Para que ocurra un estallido de roca, deben darse condiciones de alta concentración de esfuerzos, junto con la presencia de un macizo rocoso competente situado a gran profundidad. Estas condiciones favorecen la ruptura frágil del material, lo que puede desencadenar una liberación repentina de energía.

4.1.1 Definición y construcción de la geometría

Para el desarrollo del modelamiento numérico, se definió una geometría bidimensional que representa una excavación subterránea. Esta excavación fue modelada como un círculo con un radio de 2,5 metros, correspondiente a una sección típica de una galería minera, como se muestra en la **Figura 6**. Esta forma geométrica sencilla permite analizar de manera clara la distribución de esfuerzos alrededor de la excavación.

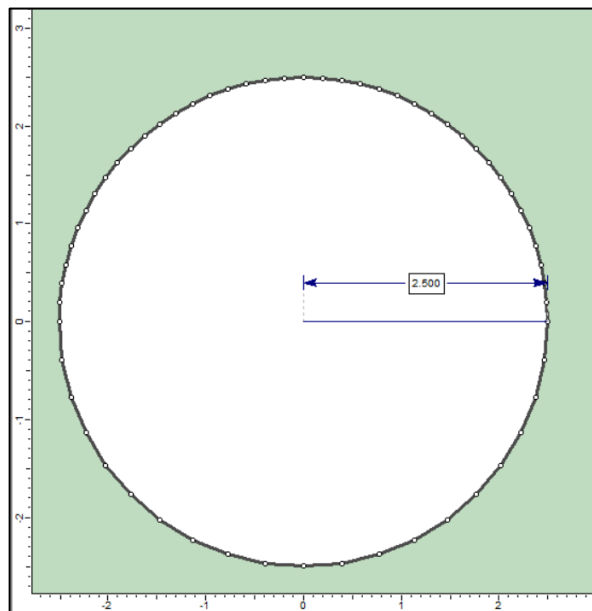


Figura 6: Geometría de la excavación.

La excavación se ubicó en el centro de una caja de 50 metros de ancho por 50 metros de alto, que define el dominio total del modelo. Estas dimensiones fueron seleccionadas con el objetivo de evitar que los bordes del modelo influyan en los resultados obtenidos cerca de la excavación, garantizando así una representación más realista del comportamiento del macizo rocoso.

En la **Figura 7** se puede observar la excavación posicionada en el centro de la caja que delimita el área de simulación. Esta configuración servirá como base para incorporar las discontinuidades geológicas y analizar su influencia en el potencial de estallidos de roca.

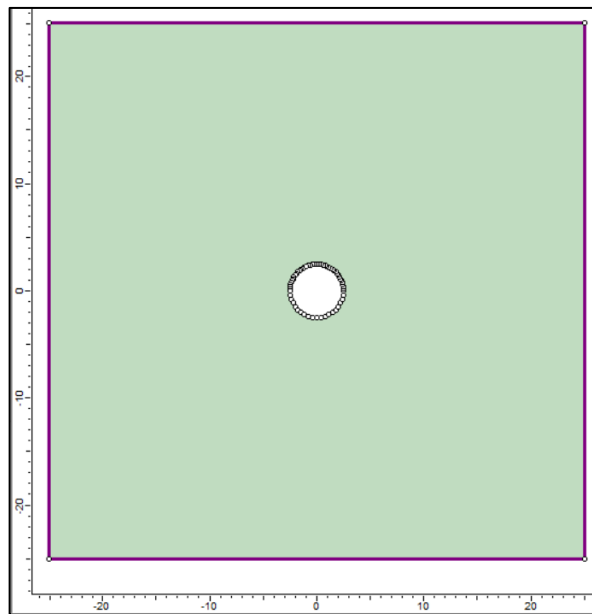


Figura 7: Geometría de estudio.

4.1.2 Definición de litología y esfuerzos in-situ

Para la caracterización del material rocoso en el modelo, se consideró una litología representativa de la minería chilena: el Complejo Máfico de El Teniente (CMET). Este complejo geológico, ampliamente descrito por Vásquez et al. (2008), está compuesto principalmente por gabros, diabasas y pórfidos basálticos, rocas ígneas que forman parte del entorno geológico del yacimiento El Teniente.

Las propiedades físicas y mecánicas asignadas al macizo rocoso fueron seleccionadas en base a valores típicos reportados para este tipo de litología, permitiendo representar de manera realista su comportamiento ante esfuerzos subterráneos. Dichas propiedades se resumen en la **Tabla 3**.



Figura 8: CMET.

Tabla 3: Características del material rocoso.

Parámetro Geotécnico	Valor
γ [MN/m ³]	0.028
ν	0.19
E [Mpa]	57000
UCS [Mpa]	135
GSI	48
m _i	12
D	0
mb	1.87
s	0.003096
a	0.506582

El material fue modelado como elasto-plástico, utilizando el criterio de resistencia de Hoek & Brown para definir su comportamiento. Además, se incorporó el Enfoque DISL, a través de una adaptación del cálculo de propiedades resistentes, con el fin de capturar con mayor precisión el inicio del daño y los mecanismos de falla frágil asociados al fenómeno de estallido. Los valores utilizados para este enfoque, calculados según las ecuaciones y parámetros propuestos en la **Tabla 2** y en base a las recomendaciones de Diederichs (2007), se presentan en la **Tabla 4**.

Tabla 4: Parámetros Enfoque DISL.

Método de modelación	Peak		Residual	
	Parámetro de entrada	Valor	Parámetro de entrada	Valor
DISL	a_p	0.25	a_r	0.75
	s_p	0.0625	s_r	0.001
	m_p	0.75	m_r	6

En cuanto a los esfuerzos in situ, estos desempeñan un papel clave en el desarrollo de mecanismos de falla. En zonas cercanas a excavaciones, donde el confinamiento disminuye, se generan altos esfuerzos tangenciales paralelos al contorno de la excavación. Estas condiciones favorecen la ruptura frágil del macizo, creando zonas de desconfinamiento donde la resistencia a la tracción puede ser superada (Vazaios et al., 2019).

Según Diederichs (2007), para superar el límite de inicio de daño en el macizo rocoso, el esfuerzo máximo ($\sigma_{\text{máx}}$) debe alcanzar entre un 40 % y un 60 % de la resistencia a compresión uniaxial (UCS), lo cual se ve favorecido por la formación e interacción de fracturas. Además, la anisotropía del campo de esfuerzos se puede cuantificar mediante la razón entre los esfuerzos principales, expresada como:

$$k = \frac{\sigma_h}{\sigma_v} \quad (6)$$

Donde k depende de las condiciones geológicas del entorno. En ambientes tectónicamente activos como el chileno, esta razón suele estar entre 1.5 y 2.5 (Vazaios et al., 2019).

Desde un enfoque geotécnico, los esfuerzos verticales y horizontales aplicados al modelo fueron estimados según las siguientes expresiones:

Esfuerzo vertical:

$$\sigma_v = \gamma \cdot H \quad (7)$$

Donde:

- γ = peso unitario del material.
- H = profundidad de la excavación, establecida en 800 [m].

Esfuerzo horizontal:

$$\sigma_h = \sigma_v \cdot K \quad (8)$$

Donde:

- K = coeficiente de presión lateral de la tierra.

Como resultado, se obtuvieron los esfuerzos principales utilizados en la simulación, los cuales se resumen en la **Tabla 5**.

Tabla 5: Definición de esfuerzos principales.

Parámetro	Valor
γ [MN/m ³]	0.028
H [m]	800
K	1.5
σ_v [MPa]	22.4
σ_h [MPa]	33.6

4.1.3 Sensibilidad del mallado

La definición del mallado es un aspecto fundamental en el modelamiento numérico, pues afecta directamente tanto la precisión de los resultados como la eficiencia del tiempo de procesamiento computacional. Por ello, se realizó una evaluación de sensibilidad del mallado con el objetivo de asegurar una adecuada representación del comportamiento del macizo rocoso, especialmente en las zonas cercanas a la excavación, donde se espera una mayor concentración de esfuerzos.

Durante este proceso se probaron distintos tamaños de malla, observando cómo varía la respuesta del modelo en términos de distribución de esfuerzos, deformaciones y acumulación de energía. Se constató que un mallado más fino en torno a la excavación permite capturar con mayor precisión los gradientes de esfuerzo, lo que es esencial para evaluar el desarrollo del daño.

La **Figura 9** muestra el mallado generado para el dominio del modelo, mientras que la **Tabla 6** resume los parámetros principales utilizados en la configuración de la malla. Esta disposición permitió alcanzar un equilibrio adecuado entre la calidad de los resultados y la eficiencia del tiempo de simulación.

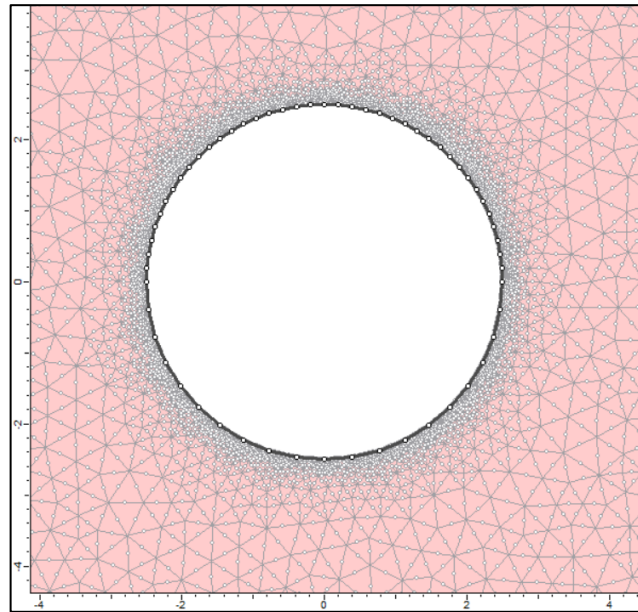


Figura 9: Mallado del estudio.

Tabla 6: Configuración del mallado y discretización de la simulación.

Configuración de malla y discretización:	
Tipo de malla	Graduada
Tipo de elemento	Triangular de 3 nodos
Factor de graduación	0.2
Número de nodos en la excavación 2D	200

4.1.4 Simulación

Con la geometría definida, las propiedades del macizo rocoso establecidas y el mallado optimizado, se procedió a realizar la simulación numérica utilizando el software RS2. El modelo bidimensional considera las condiciones de esfuerzos in situ y las características mecánicas del macizo para evaluar el comportamiento del entorno rocoso ante la excavación.

Durante la simulación, se aplicaron las cargas y restricciones correspondientes para replicar el estado real de esfuerzos alrededor de la excavación. Se definieron diferentes variables, tales como orientación, extensión y propiedades mecánicas de las discontinuidades, con el fin de analizar su influencia en el macizo rocoso.

En la **Figura 10** se presentan los esquemas generales de las variables consideradas y los distintos casos simulados, alcanzando un total de 163 simulaciones, incluyendo el caso base que no considera la presencia de discontinuidades. En dichos esquemas se ilustran, en primer lugar, las propiedades mecánicas de las discontinuidades, como la cohesión (0 – 30 KPa) y el ángulo de fricción (35° – 25°). Luego, se muestra la ubicación de las discontinuidades con respecto a la excavación (techo, pared y zona intermedia), seguida de su inclinación (0° , 45° y 90°), longitud (2.5 m, 5 m y 10 m), y su distancia desde la excavación (0 m, 2.5 m y 5 m).

Además, la **Figura 11** presenta un ejemplo representativo de los casos simulados, con el fin de facilitar la comprensión del enfoque utilizado.

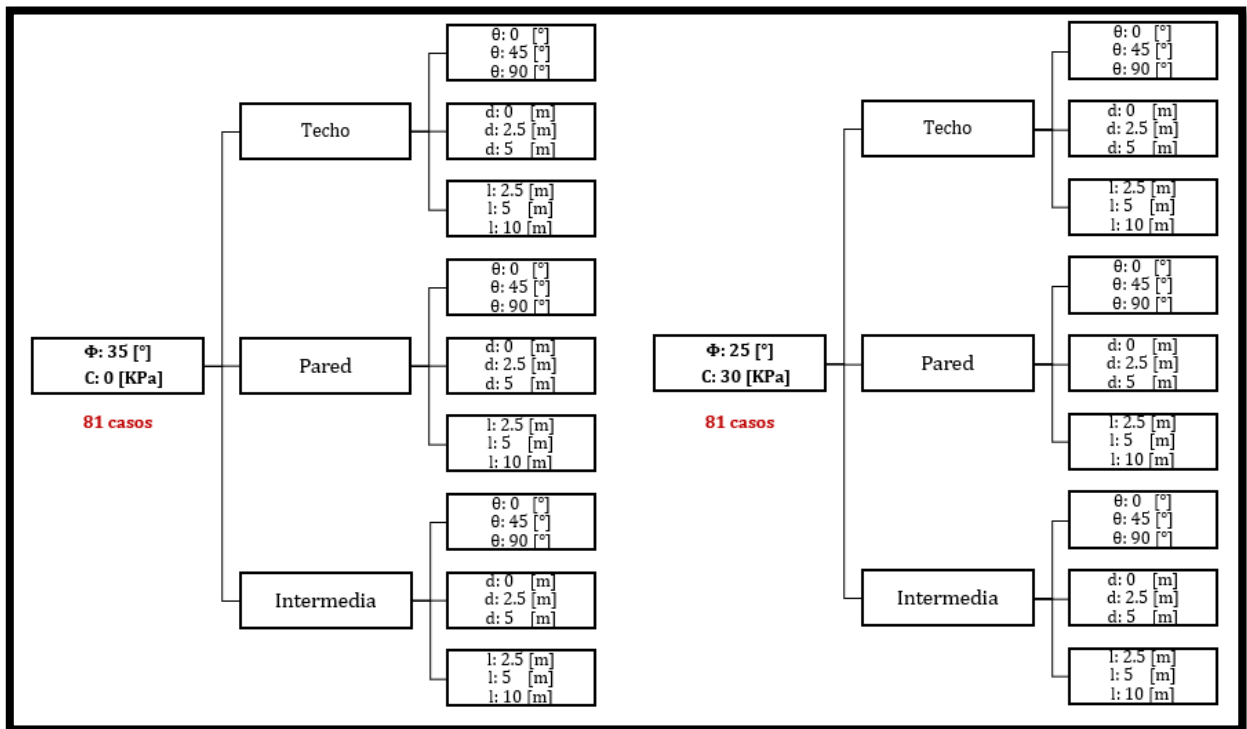


Figura 10: Esquemas de casos a simular en el software RS2.

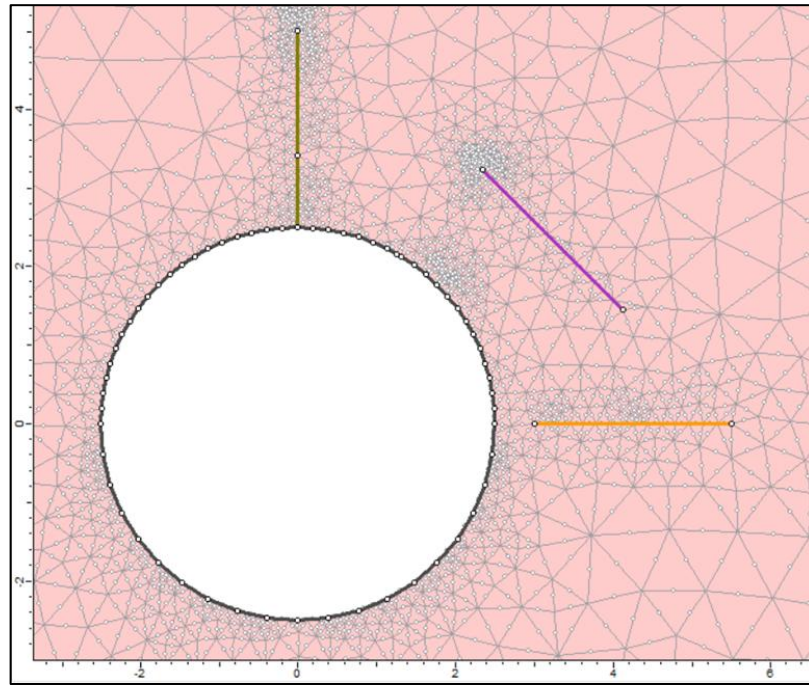


Figura 11: Ejemplo de simulación.

5. Resultados y análisis

A continuación, se presentan los resultados obtenidos a partir de los modelos numéricos desarrollados en el software RS2, construidos según la metodología descrita previamente. El análisis se centró en evaluar cómo distintas características de una discontinuidad influyen en el comportamiento del macizo rocoso alrededor de una excavación circular. Para ello, se compararon diversos escenarios con un caso base que no contempla la presencia de discontinuidades.

En cada simulación se midieron dos parámetros principales: la profundidad de falla (R_f) y la extensión angular de la zona de falla (ϕ_b). Estas variables permitieron cuantificar el impacto de las discontinuidades en la estabilidad del contorno de la excavación y en la distribución de esfuerzos en el macizo.

Adicionalmente, se estimó el nivel de riesgo asociado a la ocurrencia de estallidos de roca mediante el modelo empírico de Potencial de Peligro de Estallido de Roca (BHP), propuesto por Diederichs (2018). Este modelo considera aspectos como la extensión de la zona plastificada, la energía liberada y las diferencias entre los escenarios simulados, permitiendo identificar configuraciones que representan un mayor nivel de riesgo.

5.1 Resultado caso base

Como se mencionó anteriormente, con el fin de cumplir los objetivos de este estudio se define un caso base, correspondiente a un modelo numérico en el que no se incorpora ninguna discontinuidad en el macizo rocoso. Este escenario de referencia permite analizar posteriormente los efectos que tiene la introducción de una discontinuidad sobre el comportamiento mecánico del macizo y, en particular, sobre la estabilidad del entorno excavado.

En la **Figura 12** se presenta el resultado obtenido para este caso base. En dicha imagen se aprecia la distribución de la zona plastificada en torno a la excavación circular. Dentro de esta zona se distingue claramente una región de spalling, que corresponde al sector donde el nivel de plastificación alcanza el 100%, lo cual indica que el material ha sufrido una ruptura total. Esta región reviste especial importancia, ya que señala las áreas más críticas en términos de estabilidad estructural del macizo.

Adicionalmente, se identifica una zona de influencia parcial, que se extiende desde el límite de la región completamente plastificada hacia el exterior. En esta zona, los niveles de plastificación fluctúan entre 0% y 100%, reflejando un estado intermedio en el que el material ha comenzado a deteriorarse, aunque sin llegar aún a un colapso total.

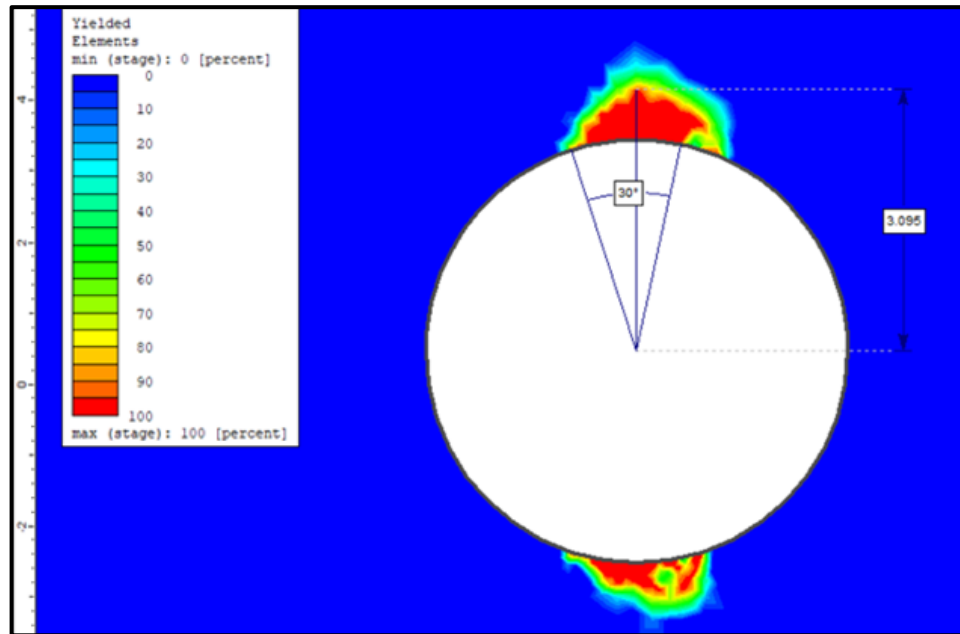


Figura 12: Plastificación del caso base.

Para cuantificar esta respuesta del macizo rocoso frente a la excavación, se midieron dos parámetros clave utilizando las herramientas integradas del software RS2:

- Profundidad de falla (R_f): corresponde a la distancia máxima entre el centro de la excavación y el punto más lejano de la zona con plastificación total. Para el caso base, se obtuvo una profundidad de falla de 3.095 metros.
- Extensión de la falla (ϕ_b): representa el ángulo total del contorno de la excavación afectado por la plastificación, ya sea total o parcial. Este parámetro permite dimensionar el alcance del daño alrededor del túnel y resulta especialmente útil para evaluar el riesgo potencial de estallidos de roca. En el modelo base, se determinó una extensión angular de $30[^\circ]$.

A partir de estos parámetros se calculó el índice de Potencial de Peligro de Estallido de Roca (BHP), obteniendo un valor de 3.269. Este valor corresponde a un nivel de riesgo moderado de ruptura dinámica asociado a la excavación. Los detalles del cálculo se presentan en la **Tabla 7**.

Tabla 7: Cálculo del nivel de peligro asociado a estallidos de roca mediante el índice BHP.

Parámetro	Valor
α	4.5
β	1
D_f	3.095
DDP	7.917
DRP	1.350
BHP	3.269

5.2 Resultados de los diferentes escenarios con discontinuidad

A continuación, se presentan los resultados obtenidos a partir de las distintas simulaciones en las que se incorporó la presencia de una discontinuidad bajo diversos escenarios. Se evaluaron variaciones en su orientación, longitud y distancia respecto a la excavación, con el objetivo de analizar su influencia en el comportamiento del macizo rocoso ante una excavación subterránea.

Cada uno de estos escenarios fue comparado con el caso base (sin presencia de discontinuidades), lo que permitió identificar cambios en la distribución de esfuerzos, la profundidad de falla (R_f), la extensión de la falla (ϕ_b) y el índice de potencial de peligro de estallido de roca (BHP). Además, se calculó el porcentaje de variación respecto al caso base, el cual se presenta en las tablas siguientes.

En las Tablas 8, 9 y 10 se detallan los resultados obtenidos para cada zona evaluada, que corresponden a la zona del techo, la zona de la pared y la zona intermedia, bajo la condición de una discontinuidad con cohesión de 0 [kPa] y un ángulo de fricción de 35[°].

Tabla 8: Resultados del análisis del potencial de estallido de rocas en la zona del techo.

θ [°]	Distancia [m]	Largo [m]	R_f [m]	R_f/a	ϕ_b [°]	$\Delta R_f/a$ [%]	$\Delta \phi_b$ [%]	DRP	DDP	BHP
0°	0	2.5	2.500	1.000	5	-19.22	-83.33	1.35	7.12	3.10
		5	2.500	1.000	9	-19.22	-70.00	1.35	7.12	3.10
		10	2.500	1.000	9	-19.22	-70.00	1.35	7.12	3.10
	2.5	2.5	2.976	1.190	30	-3.84	0.00	1.35	7.76	3.24
		5	2.930	1.172	36	-5.33	20.00	1.35	7.70	3.22
		10	2.855	1.142	5	-7.75	-83.33	1.35	7.60	3.20
	5	2.5	2.754	1.102	12	-11.02	-60.00	1.35	7.47	3.18
		5	2.888	1.155	27	-6.69	-10.00	1.35	7.65	3.21
		10	2.948	1.179	36	-4.75	20.00	1.35	7.73	3.23
45°	0	2.5	2.564	1.026	7	-17.16	-76.67	1.35	7.21	3.12
		5	2.564	1.026	7	-17.16	-76.67	1.35	7.21	3.12
		10	2.564	1.026	7	-17.16	-76.67	1.35	7.21	3.12
	2.5	2.5	2.856	1.142	28	-7.72	-6.67	1.35	7.60	3.20
		5	2.954	1.182	14	-4.56	-53.33	1.35	7.73	3.23
		10	2.832	1.133	18	-8.50	-40.00	1.35	7.57	3.20
	5	2.5	2.921	1.168	30	-5.62	0.00	1.35	7.69	3.22
		5	2.868	1.147	30	-7.33	0.00	1.35	7.62	3.21
		10	2.853	1.141	12	-7.82	-60.00	1.35	7.60	3.20
90°	0	2.5	2.506	1.002	0	-19.03	-100.00	1.35	7.12	3.10
		5	2.994	1.198	7	-3.26	-76.67	1.35	7.79	3.24
		10	2.506	1.002	0	-19.03	-100.00	1.35	7.12	3.10
	2.5	2.5	2.892	1.157	36	-6.56	20.00	1.35	7.65	3.21
		5	2.836	1.134	27	-8.37	-10.00	1.35	7.58	3.20
		10	2.905	1.162	21	-6.14	-30.00	1.35	7.67	3.22
	5	2.5	2.870	1.148	28	-7.27	-6.67	1.35	7.62	3.21
		5	2.953	1.181	18	-4.59	-40.00	1.35	7.73	3.23
		10	2.847	1.139	27	-8.01	-10.00	1.35	7.59	3.20

A partir de los resultados mostrados en la tabla anterior, se observa que, a una distancia de 0 metros entre la discontinuidad y la excavación, la profundidad de falla es menor, así como también la extensión de la zona afectada. En cambio, cuando la discontinuidad se encuentra a una distancia de 2.5 metros, se alcanza tanto una mayor profundidad de falla como una mayor extensión de esta.

Tabla 9: Resultados del análisis del potencial de estallido de rocas en la zona de la pared.

θ [°]	Distancia [m]	Largo [m]	R _f [m]	R _f /a	ϕ_b [°]	$\Delta R_{f/a}$ [%]	$\Delta \phi_b$ [%]	DRP	DDP	BHP
0°	0	2.5	2.845	1.138	36	-8.1	20.0	1.35	7.59	3.20
		5	3.113	1.245	27	0.6	-10.0	1.35	7.94	3.27
		10	2.908	1.163	27	-6.0	-10.0	1.35	7.67	3.22
	2.5	2.5	2.853	1.141	28	-7.8	-6.7	1.35	7.60	3.20
		5	2.955	1.182	34	-4.5	13.3	1.35	7.74	3.23
		10	2.774	1.110	5	-10.4	-83.3	1.35	7.49	3.18
	5	2.5	2.901	1.160	27	-6.3	-10.0	1.35	7.66	3.22
		5	2.823	1.129	19	-8.8	-36.7	1.35	7.56	3.19
		10	2.987	1.195	27	-3.5	-10.0	1.35	7.78	3.24
45°	0	2.5	2.893	1.157	36	-6.5	20.0	1.35	7.65	3.21
		5	2.859	1.144	21	-7.6	-30.0	1.35	7.61	3.20
		10	2.878	1.151	23	-7.0	-23.3	1.35	7.63	3.21
	2.5	2.5	2.912	1.165	27	-5.9	-10.0	1.35	7.68	3.22
		5	2.913	1.165	28	-5.9	-6.7	1.35	7.68	3.22
		10	2.722	1.089	10	-12.1	-66.7	1.35	7.42	3.17
	5	2.5	2.920	1.168	11	-5.7	-63.3	1.35	7.69	3.22
		5	2.846	1.138	21	-8.0	-30.0	1.35	7.59	3.20
		10	2.715	1.086	9	-12.3	-70.0	1.35	7.41	3.16
90°	0	2.5	2.785	1.114	21	-10.0	-30.0	1.35	7.51	3.18
		5	2.844	1.138	27	-8.1	-10.0	1.35	7.59	3.20
		10	2.769	1.108	5	-10.5	-83.3	1.35	7.49	3.18
	2.5	2.5	2.850	1.140	21	-7.9	-30.0	1.35	7.60	3.20
		5	2.873	1.149	12	-7.2	-60.0	1.35	7.63	3.21
		10	2.793	1.117	23	-9.8	-23.3	1.35	7.52	3.19
	5	2.5	2.956	1.182	18	-4.5	-40.0	1.35	7.74	3.23
		5	2.778	1.111	18	-10.2	-40.0	1.35	7.50	3.18
		10	2.832	1.133	36	-8.5	20.0	1.35	7.57	3.20

De acuerdo con los resultados presentados en la **Tabla 9**, el caso con una orientación $\theta = 0^\circ$, una extensión de 5 [m] y una distancia de 0 [m] respecto a la excavación muestra la mayor profundidad de falla registrada en todo el estudio.

Tabla 10: Resultados del análisis del potencial de estallido de rocas en la zona intermedia.

θ [°]	Distancia [m]	Largo [m]	R_f [m]	R_f/a	ϕ_b [°]	$\Delta R_f/a$ [%]	$\Delta \phi_b$ [%]	DRP	DDP	BHP
0°	0	2.5	2.860	1.144	27	-7.59	-10.00	1.35	7.61	3.21
		5	2.802	1.121	12	-9.47	-60.00	1.35	7.53	3.19
		10	2.918	1.167	25	-5.72	-16.67	1.35	7.69	3.22
	2.5	2.5	2.940	1.176	19	-5.01	-36.67	1.35	7.72	3.23
		5	2.973	1.189	43	-3.94	43.33	1.35	7.76	3.24
		10	2.728	1.091	23	-11.86	-23.33	1.35	7.43	3.17
	5	2.5	2.917	1.167	27	-5.75	-10.00	1.35	7.69	3.22
		5	2.807	1.123	27	-9.31	-10.00	1.35	7.54	3.19
		10	2.910	1.164	36	-5.98	20.00	1.35	7.68	3.22
45°	0	2.5	2.655	1.062	12	-14.22	-60.00	1.35	7.33	3.15
		5	0.000	0.000	0	-100.00	-100.00	1.35	0.00	0.00
		10	2.516	1.006	5	-18.71	-83.33	1.35	7.14	3.10
	2.5	2.5	2.802	1.121	12	-9.47	-60.00	1.35	7.53	3.19
		5	2.819	1.128	14	-8.92	-53.33	1.35	7.56	3.19
		10	2.795	1.118	14	-9.69	-53.33	1.35	7.52	3.19
	5	2.5	2.919	1.168	27	-5.69	-10.00	1.35	7.69	3.22
		5	2.876	1.150	18	-7.08	-40.00	1.35	7.63	3.21
		10	3.001	1.200	28	-3.04	-6.67	1.35	7.80	3.24
90°	0	2.5	2.810	1.124	19	-9.21	-36.67	1.35	7.54	3.19
		5	2.794	1.118	21	-9.73	-30.00	1.35	7.52	3.19
		10	2.970	1.188	16	-4.04	-46.67	1.35	7.76	3.24
	2.5	2.5	2.849	1.140	23	-7.95	-23.33	1.35	7.60	3.20
		5	2.900	1.160	12	-6.30	-60.00	1.35	7.66	3.22
		10	2.892	1.157	27	-6.56	-10.00	1.35	7.65	3.21
	5	2.5	2.792	1.117	14	-9.79	-53.33	1.35	7.52	3.19
		5	2.848	1.139	36	-7.98	20.00	1.35	7.59	3.20
		10	2.846	1.138	21	-8.05	-30.00	1.35	7.59	3.20

Según los resultados presentados en la **Tabla 10**, el escenario con una orientación $\theta = 0^\circ$, una extensión de 5 [m] y una distancia de 2.5 [m] respecto a la excavación corresponde al caso con la mayor extensión angular de falla observada en todo el estudio.

Por otra parte, en las **Tablas 11, 12 y 13** se detallan los resultados obtenidos para cada zona evaluada, bajo la condición de una discontinuidad con cohesión de 30 [kPa] y un ángulo de fricción de 25[°].

En la **Tabla 11** se observa que, en los tres primeros casos, no se registran valores de profundidad ni extensión de falla, ya que la plastificación ocurre en los extremos de la discontinuidad, pero no alrededor de la excavación. Esta situación puede apreciarse en las **Figuras 98, 99 y 100**, incluidas en los anexos.

Tabla 11: Resultados del análisis del potencial de estallido de rocas en la zona del techo.

θ [°]	Distancia [m]	Largo [m]	R_f [m]	R_f/a	ϕ_b [°]	$\Delta R_f/a$ [%]	$\Delta \phi_b$ [%]	DRP	DDP	BHP
0°	0	2.5	0.000	0.000	0	-100.00	-100.00	1.35	0.00	0.00
		5	0.000	0.000	0	-100.00	-100.00	1.35	0.00	0.00
		10	0.000	0.000	0	-100.00	-100.00	1.35	0.00	0.00
	2.5	2.5	2.976	1.190	36	-3.84	20.00	1.35	7.76	3.24
		5	2.926	1.170	36	-5.46	20.00	1.35	7.70	3.22
		10	2.853	1.141	5	-7.82	-83.33	1.35	7.60	3.20
	5	2.5	2.760	1.104	12	-10.82	-60.00	1.35	7.48	3.18
		5	2.883	1.153	27	-6.85	-10.00	1.35	7.64	3.21
		10	2.948	1.179	36	-4.75	20.00	1.35	7.73	3.23
45°	0	2.5	2.565	1.026	7	-17.12	-76.67	1.35	7.21	3.12
		5	2.565	1.026	7	-17.12	-76.67	1.35	7.21	3.12
		10	2.564	1.026	7	-17.16	-76.67	1.35	7.21	3.12
	2.5	2.5	2.852	1.141	28	-7.85	-6.67	1.35	7.60	3.20
		5	2.909	1.164	14	-6.01	-53.33	1.35	7.68	3.22
		10	3.007	1.203	32	-2.84	6.67	1.35	7.80	3.25
	5	2.5	2.807	1.123	16	-9.31	-46.67	1.35	7.54	3.19
		5	2.865	1.146	30	-7.43	0.00	1.35	7.62	3.21
		10	2.818	1.127	27	-8.95	-10.00	1.35	7.55	3.19
90°	0	2.5	2.506	1.002	0	-19.03	-100.00	1.35	7.12	3.10
		5	2.984	1.194	7	-3.59	-76.67	1.35	7.77	3.24
		10	2.913	1.165	18	-5.88	-40.00	1.35	7.68	3.22
	2.5	2.5	2.883	1.153	36	-6.85	20.00	1.35	7.64	3.21
		5	2.958	1.183	27	-4.43	-10.00	1.35	7.74	3.23
		10	2.748	1.099	18	-11.21	-40.00	1.35	7.46	3.17
	5	2.5	2.856	1.142	28	-7.72	-6.67	1.35	7.60	3.20
		5	2.932	1.173	19	-5.27	-36.67	1.35	7.71	3.23
		10	2.849	1.140	27	-7.95	-10.00	1.35	7.60	3.20

Tabla 12: Resultados del análisis del potencial de estallido de rocas en la zona de la pared.

$\theta [^\circ]$	Distancia [m]	Largo [m]	R_f [m]	R_f/a	$\phi_b [^\circ]$	$\Delta R_f/a$ [%]	$\Delta \phi_b$ [%]	DRP	DDP	BHP
0°	0	2.5	2.780	1.112	21	-10.18	-30.00	1.35	7.50	3.18
		5	2.831	1.132	23	-8.53	-23.33	1.35	7.57	3.20
		10	2.956	1.182	27	-4.49	-10.00	1.35	7.74	3.23
	2.5	2.5	2.903	1.161	23	-6.20	-23.33	1.35	7.67	3.22
		5	2.882	1.153	27	-6.88	-10.00	1.35	7.64	3.21
		10	2.773	1.109	3	-10.40	-90.00	1.35	7.49	3.18
	5	2.5	2.844	1.138	28	-8.11	-6.67	1.35	7.59	3.20
		5	2.829	1.132	21	-8.59	-30.00	1.35	7.57	3.20
		10	2.916	1.166	36	-5.78	20.00	1.35	7.68	3.22
45°	0	2.5	2.807	1.123	18	-9.31	-40.00	1.35	7.54	3.19
		5	2.911	1.164	36	-5.95	20.00	1.35	7.68	3.22
		10	2.962	1.185	36	-4.30	20.00	1.35	7.74	3.23
	2.5	2.5	2.896	1.158	12	-6.43	-60.00	1.35	7.66	3.22
		5	2.824	1.130	14	-8.76	-53.33	1.35	7.56	3.20
		10	2.773	1.109	12	-10.40	-60.00	1.35	7.49	3.18
	5	2.5	2.796	1.118	27	-9.66	-10.00	1.35	7.52	3.19
		5	2.817	1.127	5	-8.98	-83.33	1.35	7.55	3.19
		10	2.973	1.189	7	-3.94	-76.67	1.35	7.76	3.24
90°	0	2.5	2.926	1.170	27	-5.46	-10.00	1.35	7.70	3.22
		5	2.912	1.165	5	-5.91	-83.33	1.35	7.68	3.22
		10	2.687	1.075	12	-13.18	-60.00	1.35	7.38	3.16
	2.5	2.5	2.804	1.122	12	-9.40	-60.00	1.35	7.54	3.19
		5	2.874	1.150	12	-7.14	-60.00	1.35	7.63	3.21
		10	2.802	1.121	21	-9.47	-30.00	1.35	7.53	3.19
	5	2.5	2.796	1.118	19	-9.66	-36.67	1.35	7.52	3.19
		5	2.939	1.176	27	-5.04	-10.00	1.35	7.71	3.23
		10	2.826	1.130	36	-8.69	20.00	1.35	7.56	3.20

Tabla 13: Resultados del análisis del potencial de estallido de rocas en la zona intermedia.

θ [°]	Distancia [m]	Largo [m]	R_f [m]	R_f/a	ϕ_b [°]	$\Delta R_f/a$ [%]	$\Delta \phi_b$ [%]	DRP	DDP	BHP
0°	0	2.5	2.813	1.125	25	-9.11	-16.67	1.35	7.55	3.19
		5	2.888	1.155	5	-6.69	-83.33	1.35	7.65	3.21
		10	2.800	1.120	12	-9.53	-60.00	1.35	7.53	3.19
	2.5	2.5	2.812	1.125	19	-9.14	-36.67	1.35	7.55	3.19
		5	2.816	1.126	18	-9.01	-40.00	1.35	7.55	3.19
		10	2.731	1.092	30	-11.76	0.00	1.35	7.44	3.17
	5	2.5	2.860	1.144	28	-7.59	-6.67	1.35	7.61	3.21
		5	2.813	1.125	30	-9.11	0.00	1.35	7.55	3.19
		10	2.884	1.154	36	-6.82	20.00	1.35	7.64	3.21
45°	0	2.5	0.000	0.000	0	-100.00	-100.00	1.35	0.00	0.00
		5	2.653	1.061	3	-14.28	-90.00	1.35	7.33	3.15
		10	2.892	1.157	5	-6.56	-83.33	1.35	7.65	3.21
	2.5	2.5	2.821	1.128	18	-8.85	-40.00	1.35	7.56	3.19
		5	2.718	1.087	12	-12.18	-60.00	1.35	7.42	3.16
		10	2.965	1.186	39	-4.20	30.00	1.35	7.75	3.23
	5	2.5	2.803	1.121	27	-9.43	-10.00	1.35	7.53	3.19
		5	2.836	1.134	18	-8.37	-40.00	1.35	7.58	3.20
		10	2.880	1.152	27	-6.95	-10.00	1.35	7.64	3.21
90°	0	2.5	2.769	1.108	12	-10.53	-60.00	1.35	7.49	3.18
		5	2.654	1.062	12	-14.25	-60.00	1.35	7.33	3.15
		10	2.695	1.078	12	-12.92	-60.00	1.35	7.39	3.16
	2.5	2.5	2.883	1.153	27	-6.85	-10.00	1.35	7.64	3.21
		5	2.822	1.129	30	-8.82	0.00	1.35	7.56	3.19
		10	3.102	1.241	36	0.23	20.00	1.35	7.93	3.27
	5	2.5	2.889	1.156	18	-6.66	-40.00	1.35	7.65	3.21
		5	2.842	1.137	28	-8.17	-6.67	1.35	7.59	3.20
		10	2.810	1.124	27	-9.21	-10.00	1.35	7.54	3.19

Del análisis de los resultados y las figuras asociadas a los casos simulados, se aprecia que en la zona del techo la región plastificada se orienta hacia la ubicación de la discontinuidad. Esto evidencia que su presencia influye en la dirección de propagación del daño dentro del macizo rocoso. Esta tendencia se observa con claridad en las **Figuras 13 y 14**, donde la concentración de plastificación sigue el eje de la discontinuidad.

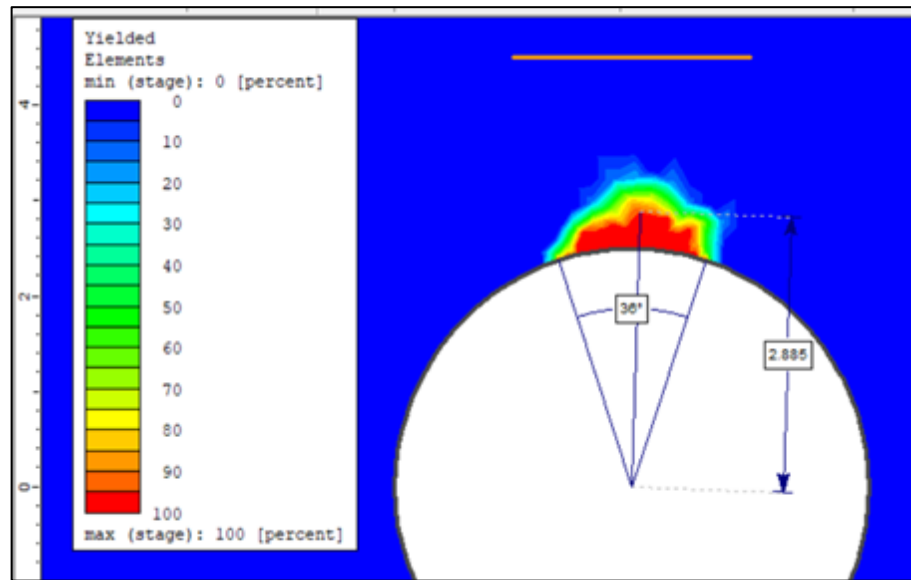


Figura 13: Discontinuidad centrada en la zona del techo.

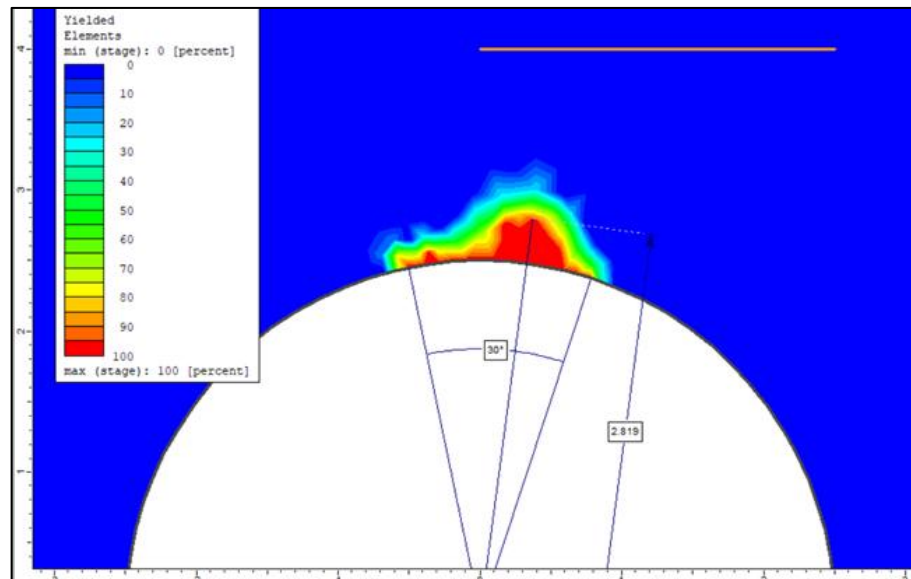


Figura 14: Discontinuidad inclinada hacia un lado de la excavación en la zona del techo.

Asimismo, en el contorno de la excavación, las discontinuidades ubicadas en la zona de la pared o cerca de esta, también tienden a plastificarse, generando una concentración de daño localizada en dichas áreas. Esta situación se puede observar en las **Figuras 15 y 16**.

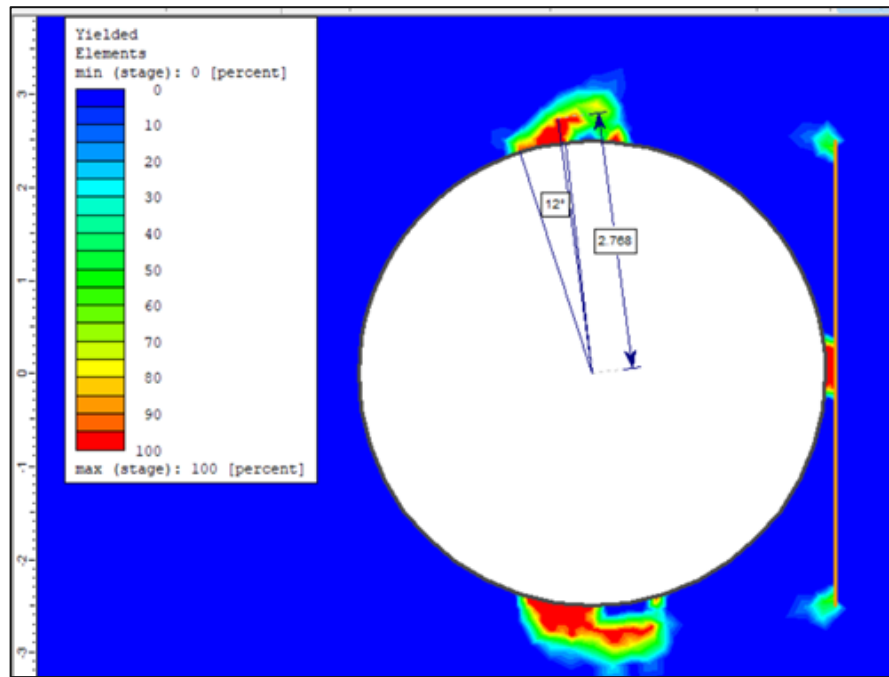


Figura 15: Discontinuidad presente en la zona de la pared.

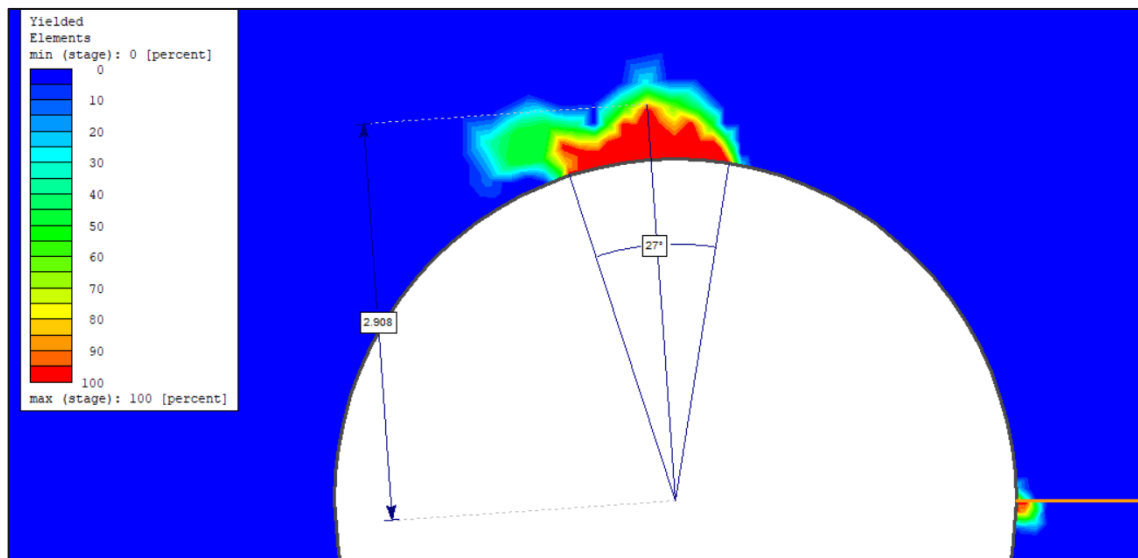


Figura 16: Discontinuidad presente en la zona de la pared.

Cabe destacar, que, en todos los escenarios simulados, el potencial de estallido se clasificó consistentemente como de riesgo moderado, dado que los valores de BHP se mantuvieron en el rango de 3 a 4.

Las mediciones tomadas en cada una de las simulaciones se encuentran presentes en los anexos.

5.3 Resumen de resultados

En la **Tabla 14** se presenta un resumen de los resultados obtenidos, destacando los puntos claves relacionados con la profundidad y la extensión de falla. Este resumen facilita la comprensión de las principales tendencias y variaciones observadas en el estudio. Las condiciones más desfavorables, asociadas a un mayor riesgo, se indican en rojo, mientras que la condición más favorable se destaca en verde

Tabla 14: Resumen de resultados obtenidos.

θ [°]	Zona		
	Techo	Pared	Intermedia
0°	- A 0 [m], Rf registra su valor mínimo para esta orientación. - A 0 [m], Φb es bajo (variación de - 80%). - A mayor distancia, Rf y Φb aumentan.	- Rf alcanza su valor máximo en el estudio, con 3.113 [m]. Φb no presenta mayor variación.	- Rf se mantiene constante, sin variaciones significativas. Φb alcanza su valor máximo en el estudio, con 43°.
45°	- A 0 [m], Rf registra su valor mínimo para esta orientación. - A 0 [m], Φb es baja (variación de - 77%). - A mayor distancia, Rf y Φb aumentan.	- Rf se mantiene constante, sin variaciones significativas. - A menor distancia de la discontinuidad, mayor valor de Φb. Φb alcanza su valor máximo para esta orientación.	- Rf aumenta con la distancia y el largo de la discontinuidad. - Rf alcanza su valor máximo para esta orientación y zona. Φb disminuye al presentar menor distancia a la excavación.
90°	- A 0 [m], Rf registra su valor mínimo para esta orientación. - A 0 [m], Φb es baja (variación de - 80%). - A mayor distancia, Rf y Φb aumentan. - Rf, alcanza su valor máximo para esta orientación y zona.	- A menor distancia de la discontinuidad, mayor valor de Rf. Φb presenta alta variabilidad y no muestra una tendencia clara.	- Rf se mantiene constante, sin variaciones significativas. Φb registra valores menores al caso base. - No existe tendencia con la distancia o el largo, indicando menor sensibilidad en esta orientación.

6. Conclusiones

El presente estudio permitió analizar, mediante modelamiento numérico, la influencia de distintas características de las discontinuidades geológicas sobre el potencial de ocurrencia de estallidos de roca en un macizo competente sometido a esfuerzos elevados. A partir de los resultados obtenidos, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

La orientación de la discontinuidad demostró ser uno de los factores más determinantes en la distribución del daño alrededor de la excavación. En particular, discontinuidades con orientaciones de 0° (paralelas al eje horizontal) generaron zonas de plastificación más profundas y concentradas, favoreciendo la acumulación de esfuerzos tangenciales en la periferia de la excavación. Esta configuración potencia la aparición de daño frágil y localiza el riesgo de estallido en áreas específicas del contorno.

La distancia entre la discontinuidad y el contorno de la excavación mostró una relación inversa con el nivel de concentración de esfuerzos. A menor distancia, se incrementa notablemente la interacción entre la excavación y la discontinuidad, intensificando la redistribución de esfuerzos en el macizo rocoso y, por ende, elevando el riesgo de daño y potencial de estallido. Esta variable es especialmente crítica en la etapa de diseño de obras subterráneas, ya que puede representar un factor de disparo en macizos frágiles.

En cuanto a la longitud (persistencia) de la discontinuidad, se observó que su aumento permite una mayor disipación de esfuerzos a lo largo de su extensión, lo que reduce las concentraciones puntuales de tensiones. Como consecuencia, el daño tiende a distribuirse de manera más uniforme, disminuyendo la intensidad localizada y reduciendo el potencial de estallido. Esta característica puede considerarse como un mecanismo de alivio natural frente a cargas elevadas.

Las propiedades mecánicas de la discontinuidad, en particular la cohesión y el ángulo de fricción, influyeron principalmente en la extensión del daño inducido, más que en su intensidad. Discontinuidades con menor resistencia al deslizamiento (baja cohesión y bajo ángulo de fricción) permitieron una propagación más amplia del daño, aunque con una menor acumulación energética. Si bien su efecto no fue tan significativo como el de la orientación o la proximidad, estas propiedades sí condicionan la forma en que se propaga el daño dentro del macizo.

En conjunto, los resultados evidencian que la interacción entre geometría, ubicación y propiedades mecánicas de las discontinuidades tiene un impacto directo sobre el comportamiento del macizo rocoso frente a esfuerzos elevados. Este tipo de análisis permite entender con mayor profundidad los mecanismos que favorecen la ocurrencia de estallidos de roca, y refuerza la importancia de considerar la caracterización estructural detallada durante la etapa de diseño y planificación de labores subterráneas.

Finalmente, cabe destacar que la orientación y la distancia a la que se encuentra la discontinuidad se identificaron como los factores de mayor relevancia en los resultados obtenidos, debido a su influencia directa sobre la concentración de esfuerzos y la distribución del daño alrededor de la excavación.

7. Recomendaciones

Se recomienda incorporar, en futuras etapas de diseño y planificación minera, un análisis detallado de la orientación y ubicación de las discontinuidades en relación con las excavaciones, ya que estos factores tienen un impacto significativo en la distribución de esfuerzos y en el riesgo de estallidos de roca.

Es aconsejable complementar los modelos numéricos con datos estructurales obtenidos en terreno, tales como mapeos geológicos, escaneos láser o ensayos de campo, con el fin de representar de forma más realista la geometría y propiedades de las discontinuidades presentes en el macizo rocoso.

Se sugiere realizar campañas de caracterización geomecánica más detalladas, que incluyan parámetros como cohesión y ángulo de fricción de las discontinuidades, los cuales influyen en la extensión del daño, y pueden ayudar a anticipar el comportamiento del macizo ante esfuerzos elevados.

Para futuros estudios, se recomienda explorar el efecto de múltiples familias de discontinuidades y su interacción, así como el uso de modelos tridimensionales que permitan capturar fenómenos fuera del plano, ampliando así la comprensión del comportamiento real del macizo.

Considerando los resultados obtenidos, se recomienda aplicar métodos de control preventivo del daño en zonas donde se identifican configuraciones críticas (por ejemplo, orientaciones desfavorables o proximidad a la excavación), como soporte reforzado, alivio de tensiones o ajustes en la secuencia de excavación.

Finalmente, sería beneficioso comparar los resultados obtenidos con registros reales de estallidos de roca en faenas chilenas, para validar el modelo y afinar su aplicabilidad práctica en contextos específicos de minería subterránea.

8. Referencias

- Askaripour M, Saeidi A, Rouleau A, Mercier-Langevin P. Rockburst in underground excavations: A review of mechanism, classification, and prediction methods. *Undergr Sp*. 2022;7(4):577-607. <https://doi.org/10.1016/j.undsp.2021.11.008>
- Brady, B. H. G., & Brown, E. (2005). Rock Mechanics for underground mining: Third edition. En *Rock Mechanics for underground mining: Third edition* (p. 628). <https://doi.org/10.1007/978-14020-2116-9>
- Delonca, A., González, F. J. M., Mendoza, V. A., & Cerón, A. (2023). Influence of Preconditioning and Tunnel Support on Strain Burst Potential. *Applied Sciences*, 13(13), 7419. <https://doi.org/10.3390/app13137419>
- Diederichs MS. The 2003 Canadian geotechnical colloquium: Mechanistic interpretation and practical application of damage and spalling prediction criteria for deep tunnelling. *Can Geotech J*. 2007;44(9):1082-1116. <https://doi.org/10.1139/T07-033>
- Diederichs MS. When does brittle failure become violent? spalling and rockburst characterization for deep tunneling projects. *Proc world Tunn Congr*. Published online 2014.
- Diederichs, M. (2018). Early assessment of dynamic rupture hazard for rockburst risk management in deep tunnel projects. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 118, 193-204.
- Garín S. (2024). Modelación de la ruptura frágil considerando de manera explícita las discontinuidades. (Memoria de pregrado, Universidad Técnica Federico Santa María).
- González de Vallejo, L. I., Ferrer, M., Ortuño, L., & Oteo, C. (2002). Ingeniería Geológica (PEARSON EDUCACIÓN, S. A.). PEARSON EDUCACIÓN, S. A.
- Hoek, E., & Brown, E. T. (2019). The Hoek–Brown failure criterion and GSI – 2018 edition. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 11(3), 445–463. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2018.08.001>
- Jaeger, J. C., Cook, N. G. W., & Zimmerman, R. W. (2013). *Fundamentals of rock mechanics*. CRC Press.
- Kaiser, P. K. (1996). *Canadian Rockburst Support Handbook: 1996*. Geomechanics Research Centre.

- Kaiser PK, Cai M. Design of rock support system under rockburst condition. *J Rock Mech Geotech Eng.* 2012;4(3):215-227. <https://doi.org/10.3724/sp.j.1235.2012.00215>
- Li CC, Mikula P, Simser B, et al. Discussions on rockburst and dynamic ground support in deep mines. *J Rock Mech Geotech Eng.* 2019;11(5):1110-1118. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2019.06.001>
- Manouchehrian A, Cai M. Numerical modeling of rockburst near fault zones in deep tunnels. *Tunn Undergr Sp Technol.* 2018;80(June):164-180. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2018.06.015>
- Perras, M. A., & Diederichs, M. S. (2016). Predicting excavation damage zone depths in brittle rocks. *Journal of rock mechanics and geotechnical engineering*, 8(1), 60–74. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2015.11.004>
- Vásquez, P., Maksaev, V., & Munizaga, F. (2008). Geología del yacimiento El Teniente y su entorno geológico regional. Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN), Publicación Geológica Especial N° 4.
- Vazaios, I., Vlachopoulos, N., & Diederichs, M. (2019). Assessing fracturing mechanisms and evolution of excavation damaged zone of tunnels in interlocked rock masses at high stresses using a finite-discrete element approach. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 11. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2019.02.004>
- Zhou J, Li X, Mitri HS. Evaluation method of rockburst: State-of-the-art literature review. *Tunn Undergr Sp Technol.* 2018;81(August):632-659. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2018.08.029>

9. Anexos

9.1 Escenarios simulados con $\Phi = 35 [^\circ]$ y $C = 0 [\text{KPa}]$.

9.1.1 Escenarios simulados en zona del techo

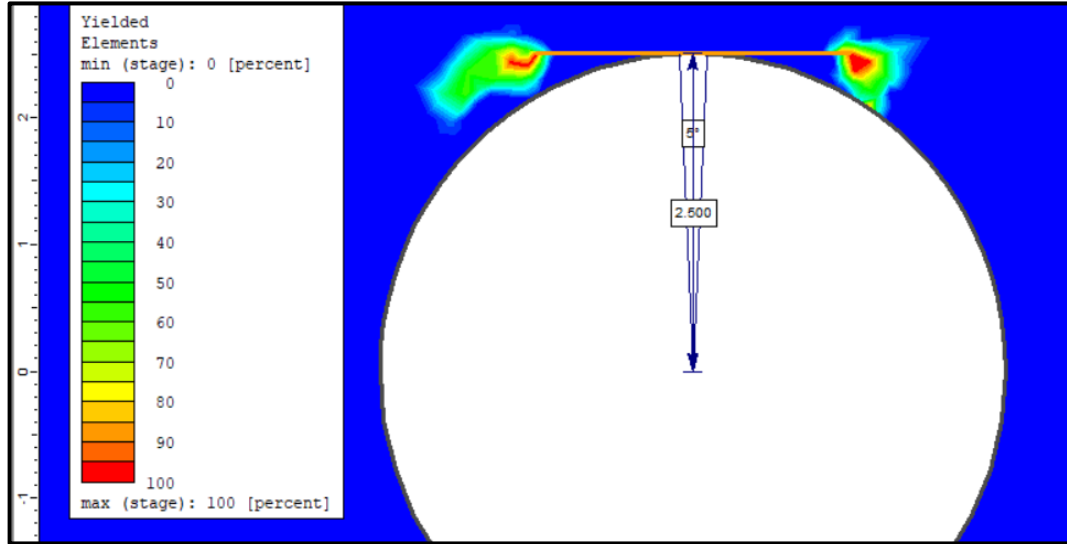


Figura 17: Medición de profundidad y extensión de falla para $l=2.5 [\text{m}]$, $\theta=0[^\circ]$ y $d=0 [\text{m}]$.

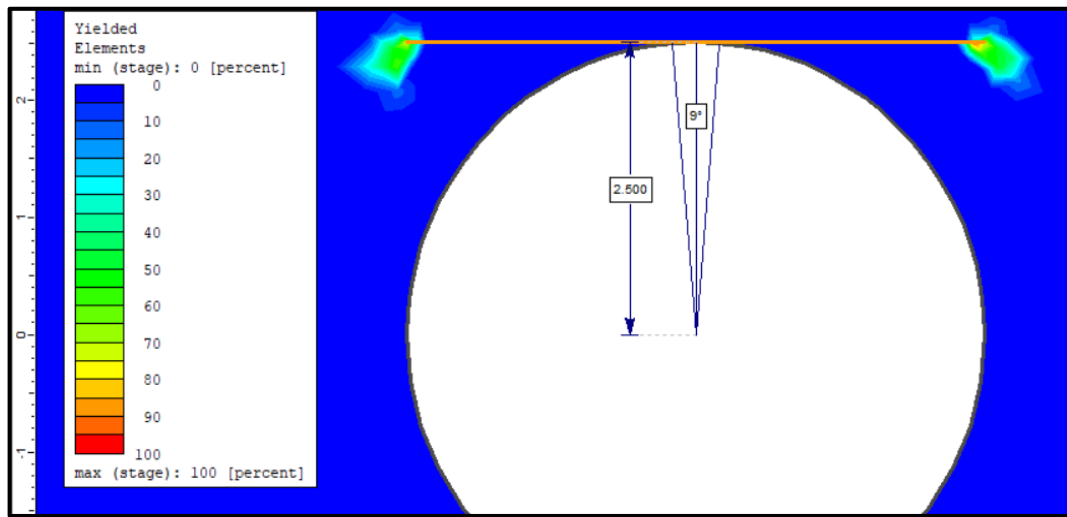


Figura 18: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=5 [\text{m}]$, $\theta=0[^\circ]$ y $d=0 [\text{m}]$.

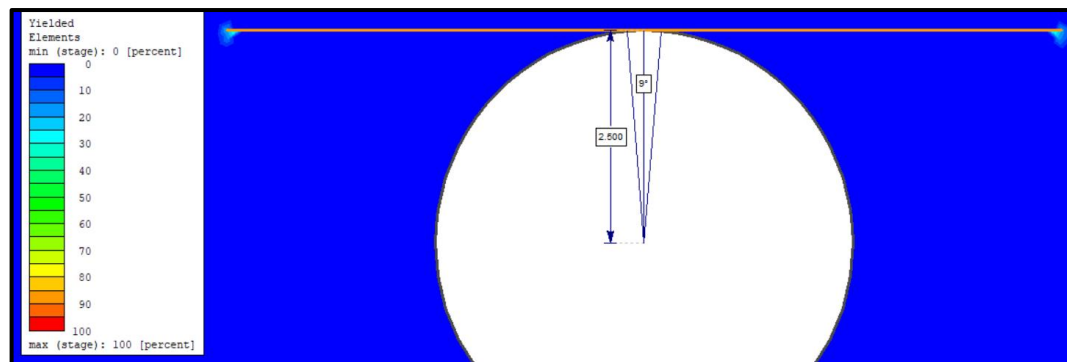


Figura 19: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=10 [\text{m}]$, $\theta=0[^\circ]$ y $d=0 [\text{m}]$.

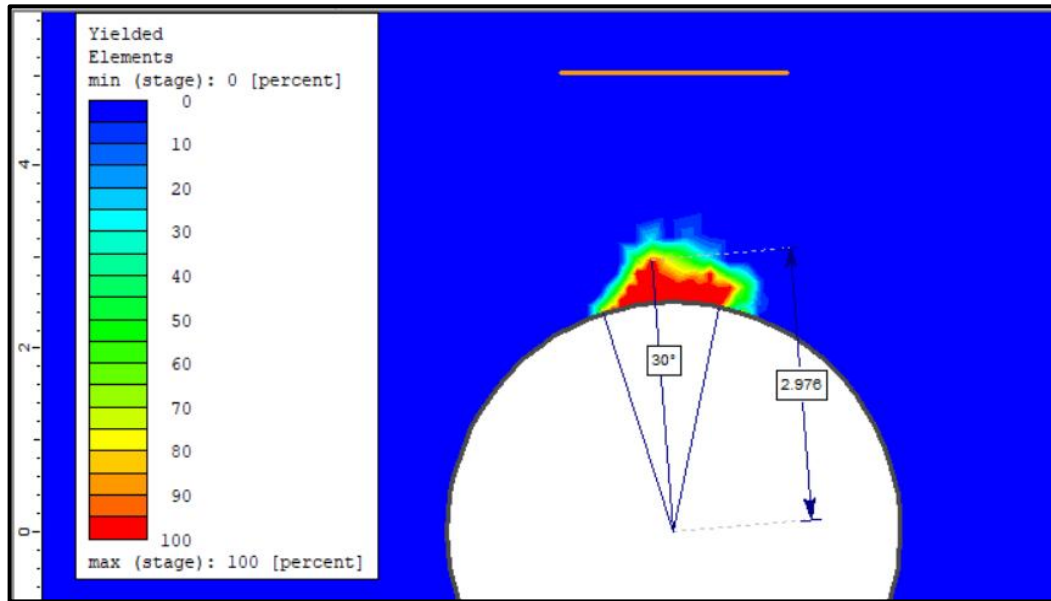


Figura 20: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=2.5$ [m], $\theta=0[^\circ]$ y $d=2.5$ [m].

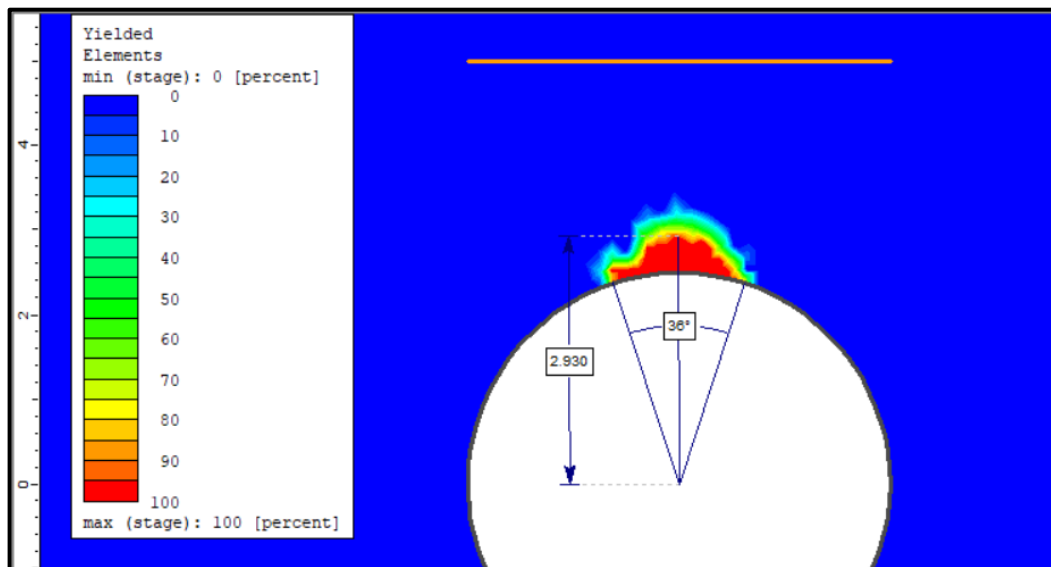


Figura 21: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=5$ [m], $\theta=0[^\circ]$ y $d=2.5$ [m].

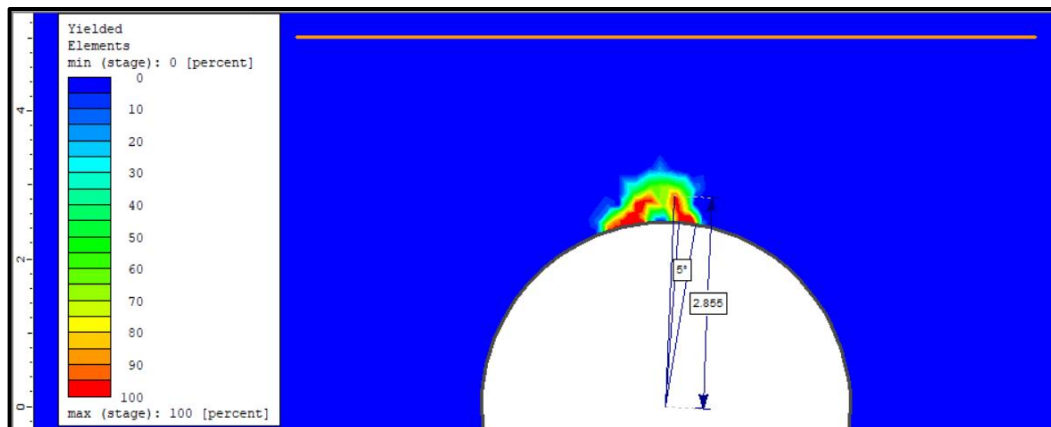


Figura 22: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=10$ [m], $\theta=0[^\circ]$ y $d=2.5$ [m].

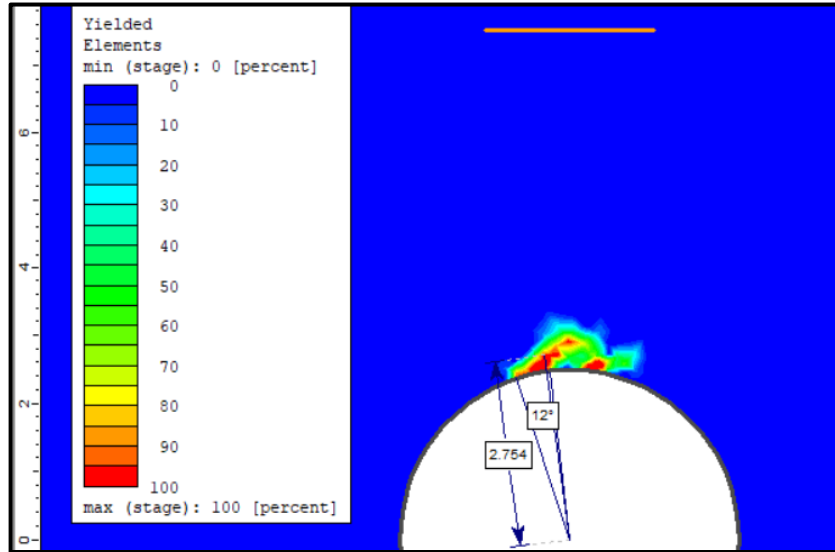


Figura 23: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=2.5$ [m], $\theta=0^\circ$ y $d=5$ [m].

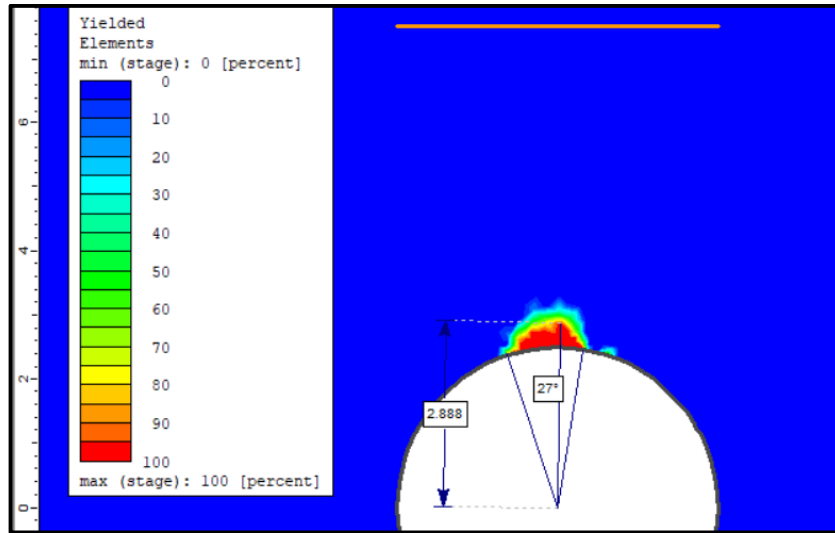


Figura 24: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=5$ [m], $\theta=0^\circ$ y $d=5$ [m].

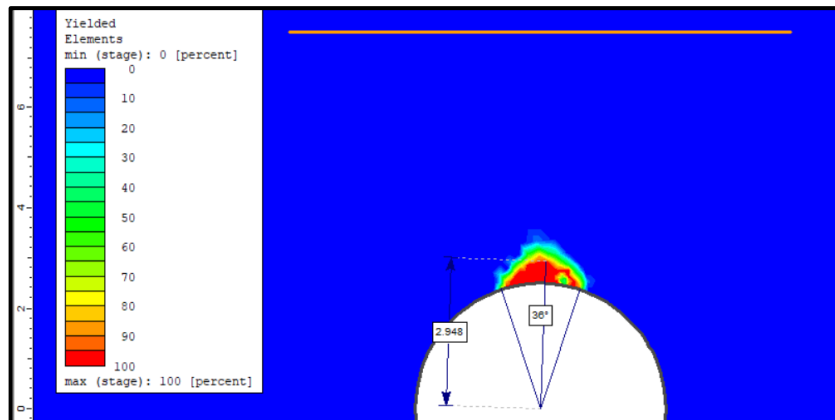


Figura 25: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=10$ [m], $\theta=0^\circ$ y $d=5$ [m].

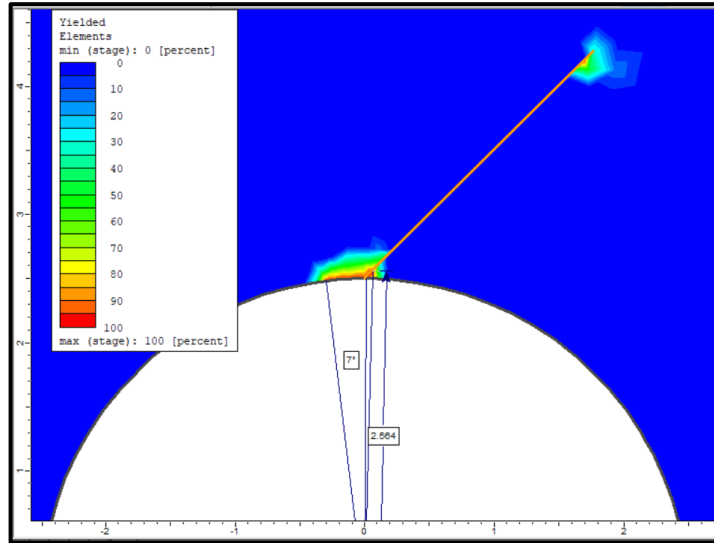


Figura 26: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=2.5$ [m], $\theta=45^\circ$ y $d=0$ [m].

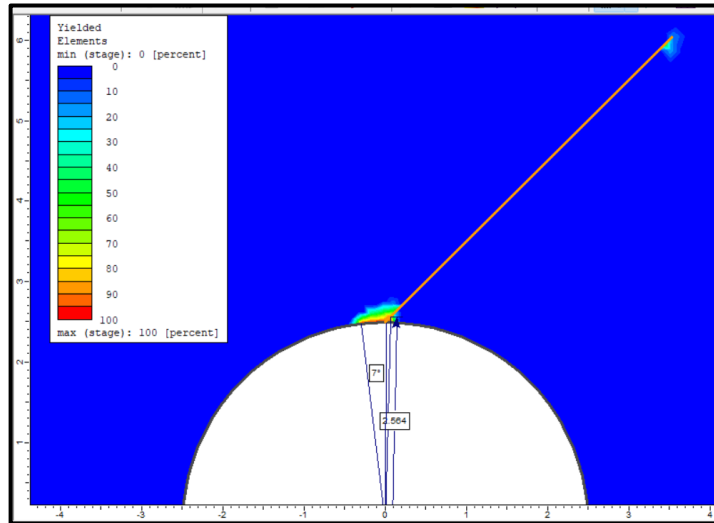


Figura 27: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=5$ [m], $\theta=45^\circ$ y $d=0$ [m].

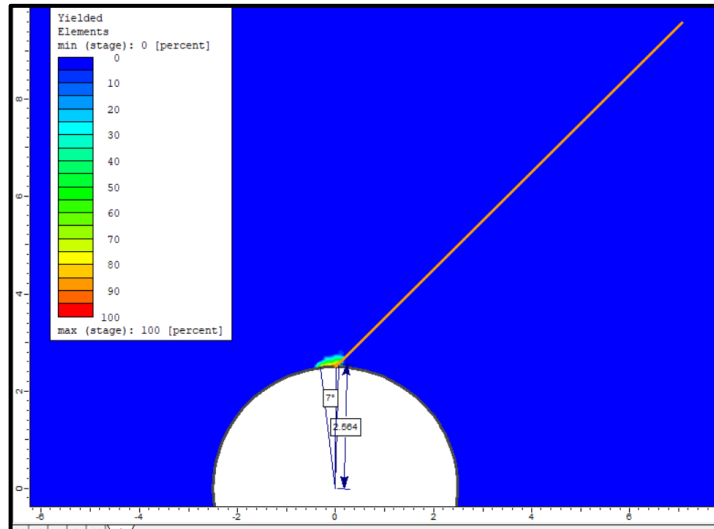


Figura 28: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=10$ [m], $\theta=45^\circ$ y $d=0$ [m].

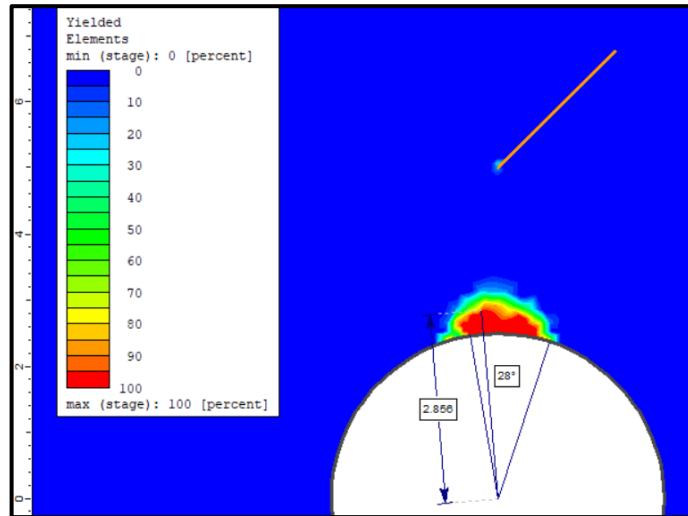


Figura 29: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=2.5$ [m], $\theta=45[^\circ]$ y $d=2.5$ [m].

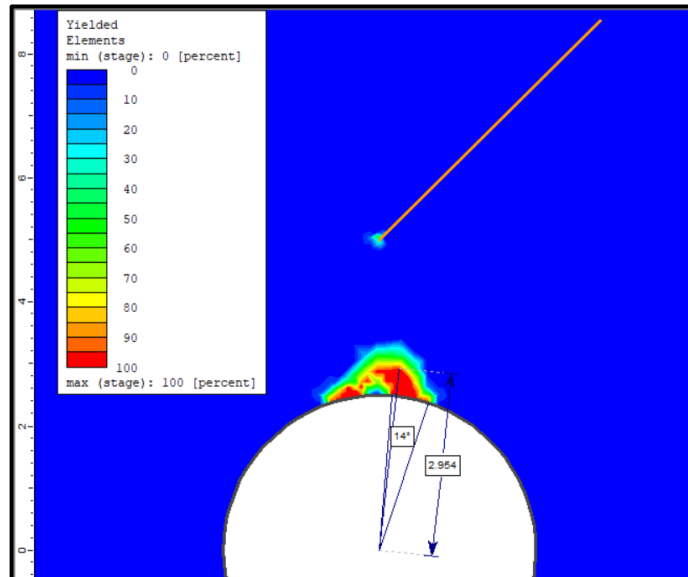


Figura 30: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=5$ [m], $\theta=45[^\circ]$ y $d=2.5$ [m].

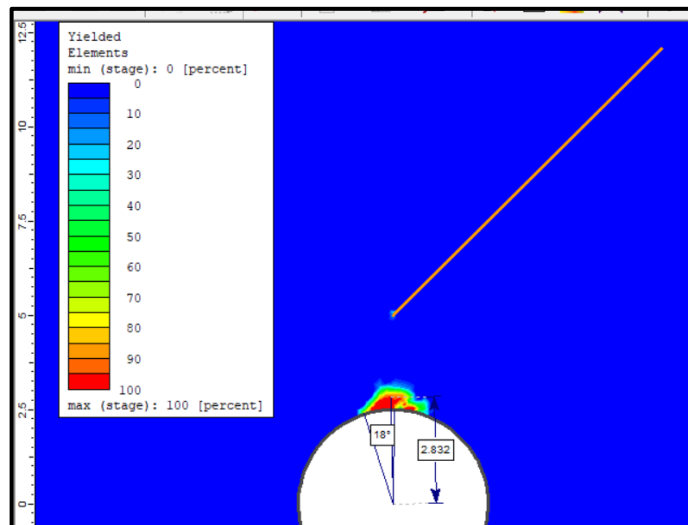


Figura 31: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=10$ [m], $\theta=45[^\circ]$ y $d=2.5$ [m].

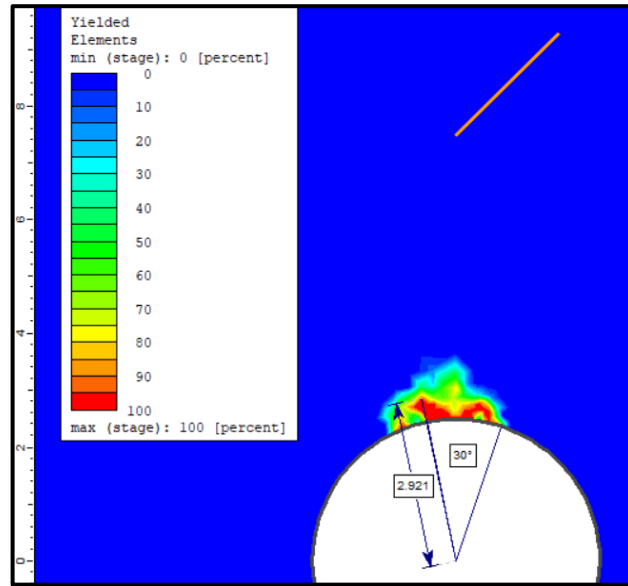


Figura 32: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=2.5$ [m], $\theta=45^\circ$ y $d=5$ [m].

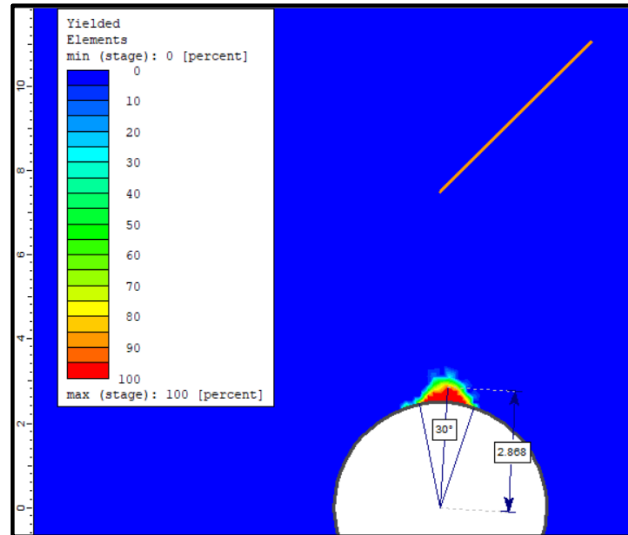


Figura 33: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=5$ [m], $\theta=45^\circ$ y $d=5$ [m].

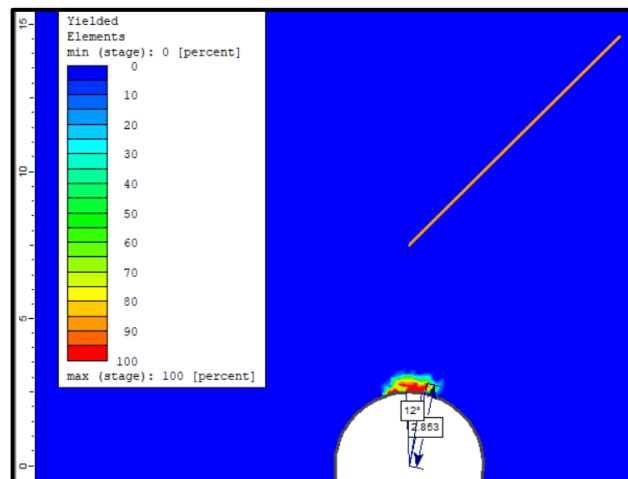


Figura 34: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=10$ [m], $\theta=45^\circ$ y $d=5$ [m].

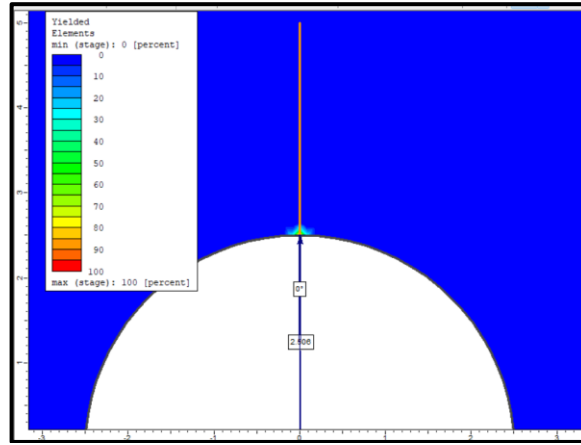


Figura 35: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=2.5$ [m], $\theta=90[^\circ]$ y $d=0$ [m].

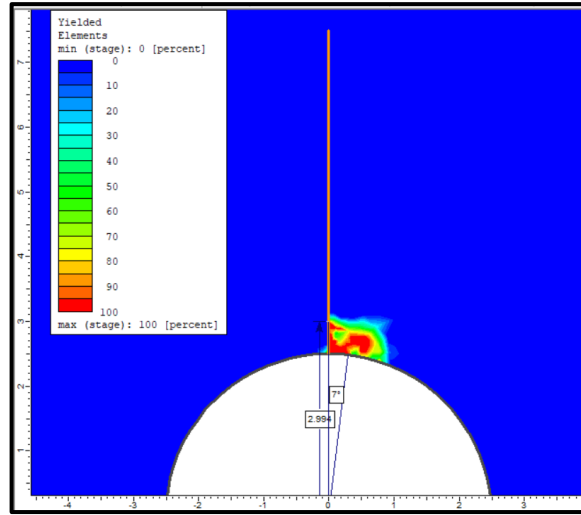


Figura 36: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=5$ [m], $\theta=90[^\circ]$ y $d=0$ [m].

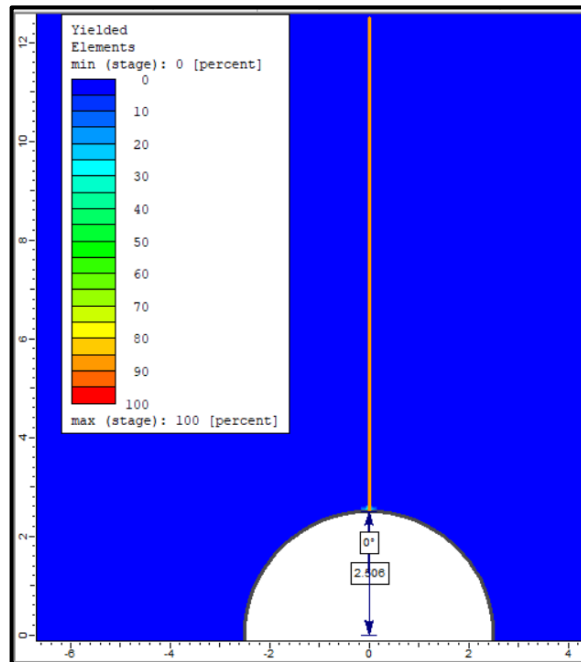


Figura 37: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=10$ [m], $\theta=90[^\circ]$ y $d=0$ [m].

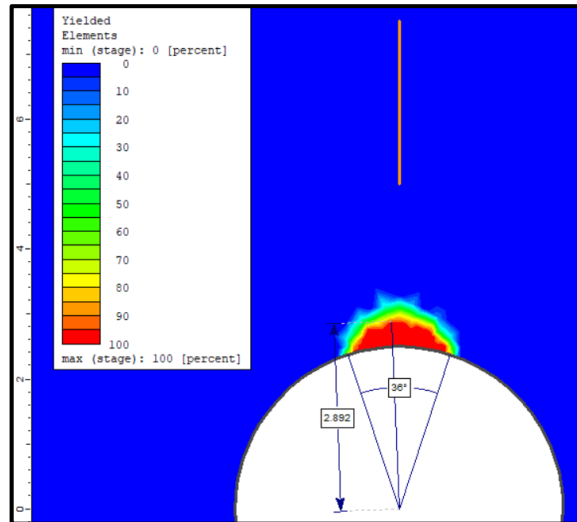


Figura 38: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=2.5$ [m], $\theta=90^\circ$ y $d=2.5$ [m].

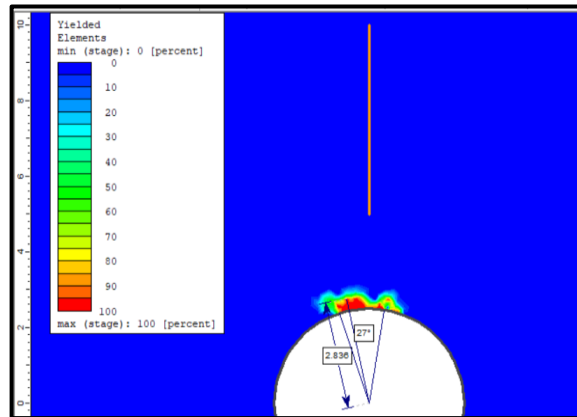


Figura 39: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=5$ [m], $\theta=90^\circ$ y $d=2.5$ [m].

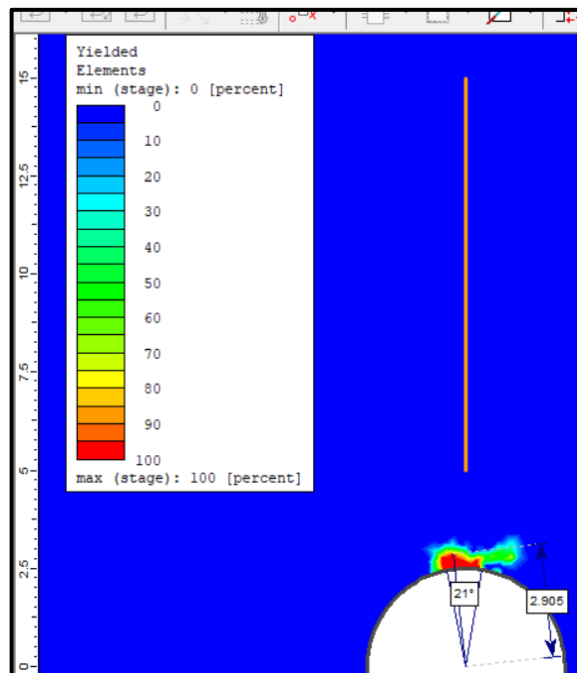


Figura 40: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=10$ [m], $\theta=90^\circ$ y $d=2.5$ [m].

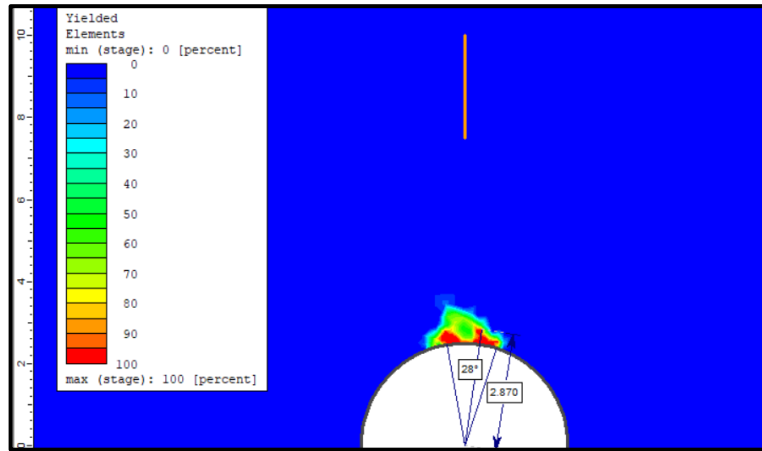


Figura 41: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=2.5$ [m], $\theta=90^\circ$ y $d=5$ [m].

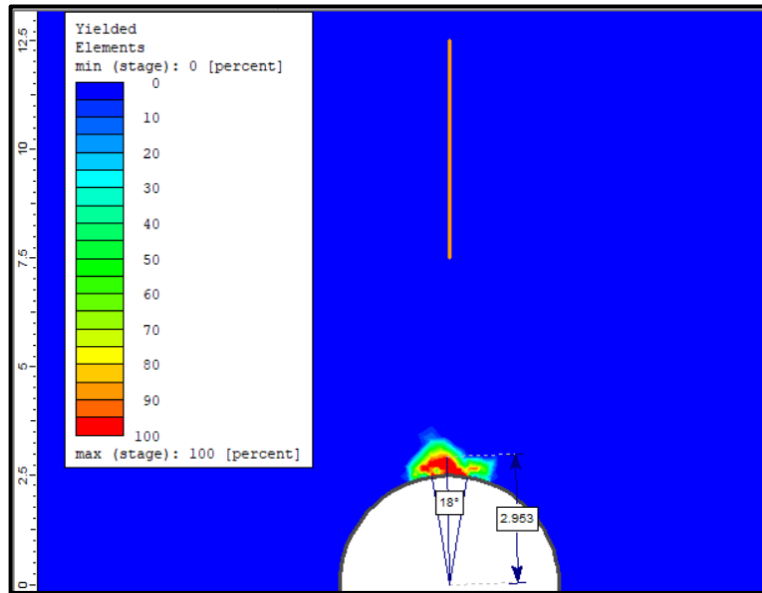


Figura 42: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=5$ [m], $\theta=90^\circ$ y $d=5$ [m].

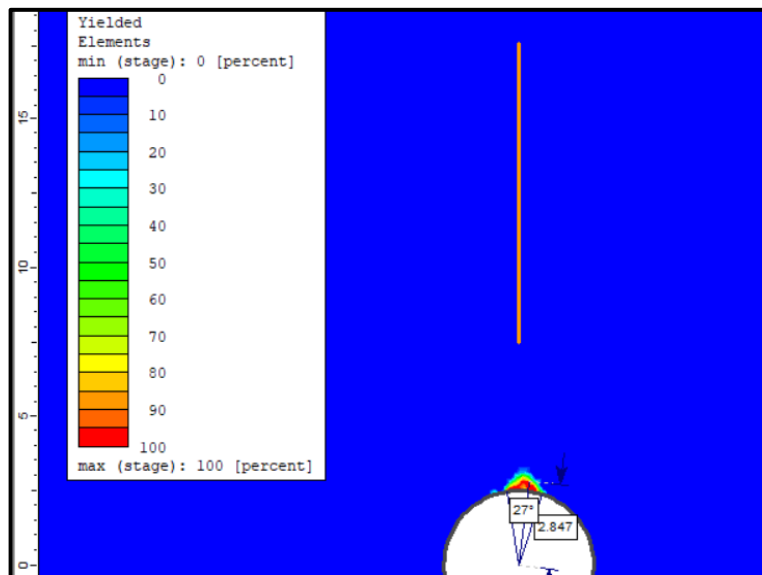


Figura 43: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=10$ [m], $\theta=90^\circ$ y $d=5$ [m].

9.1.2 Escenarios simulados en zona de la pared

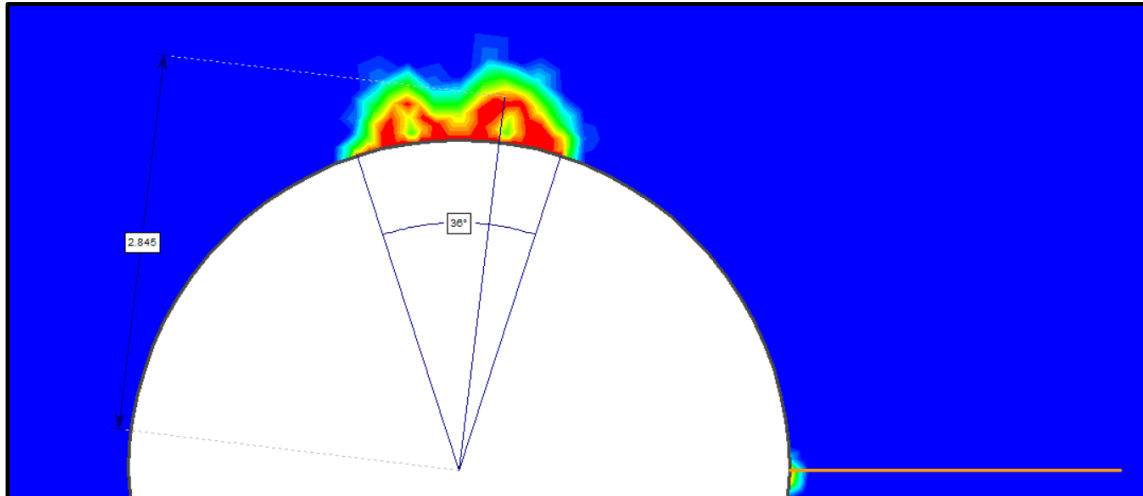


Figura 44: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=2.5$ [m], $\theta=0$ [°] y $d=0$ [m].

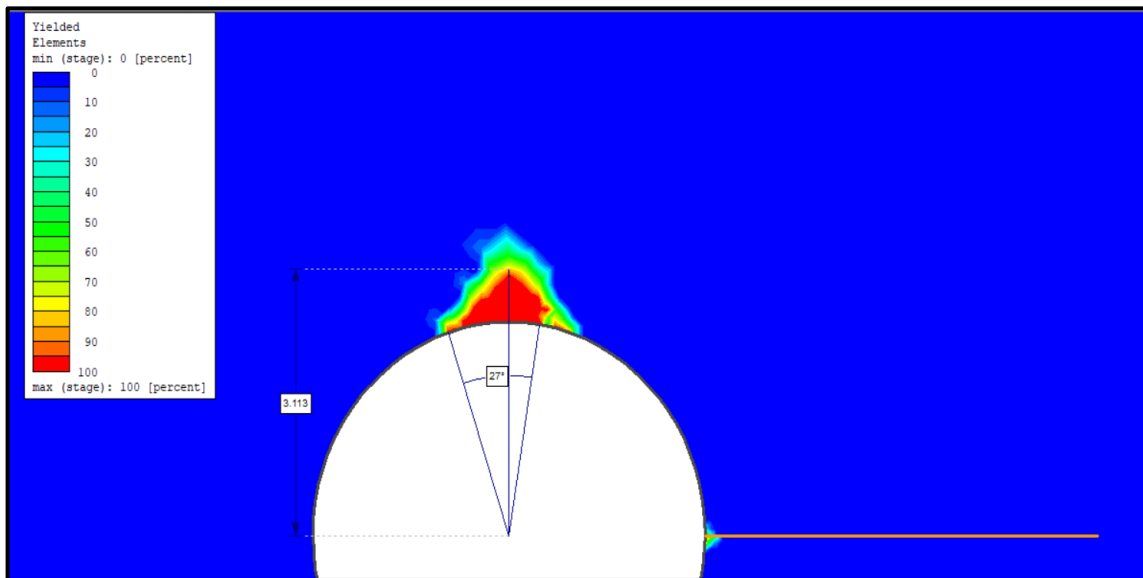


Figura 45: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=5$ [m], $\theta=0$ [°] y $d=0$ [m].

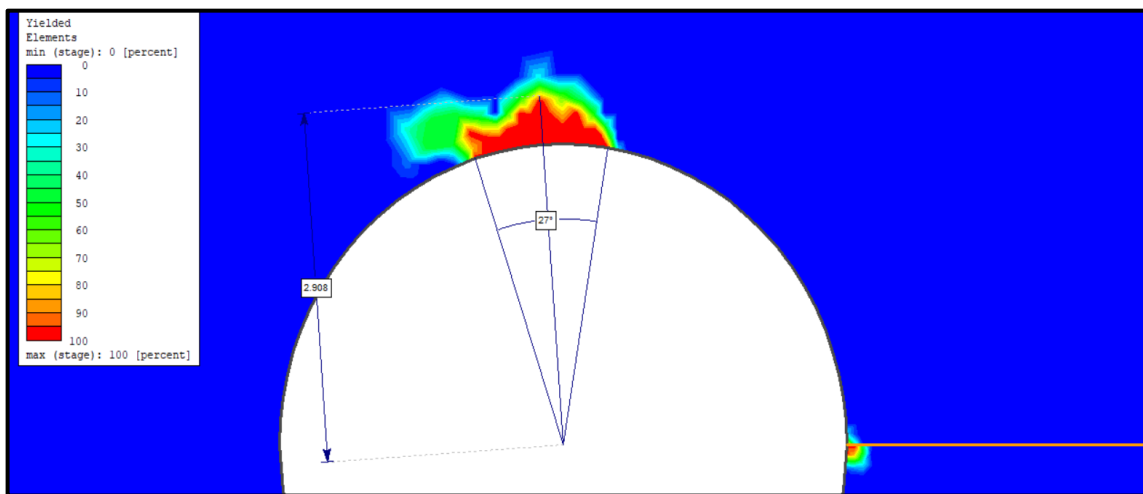


Figura 46: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=10$ [m], $\theta=0$ [°] y $d=0$ [m].

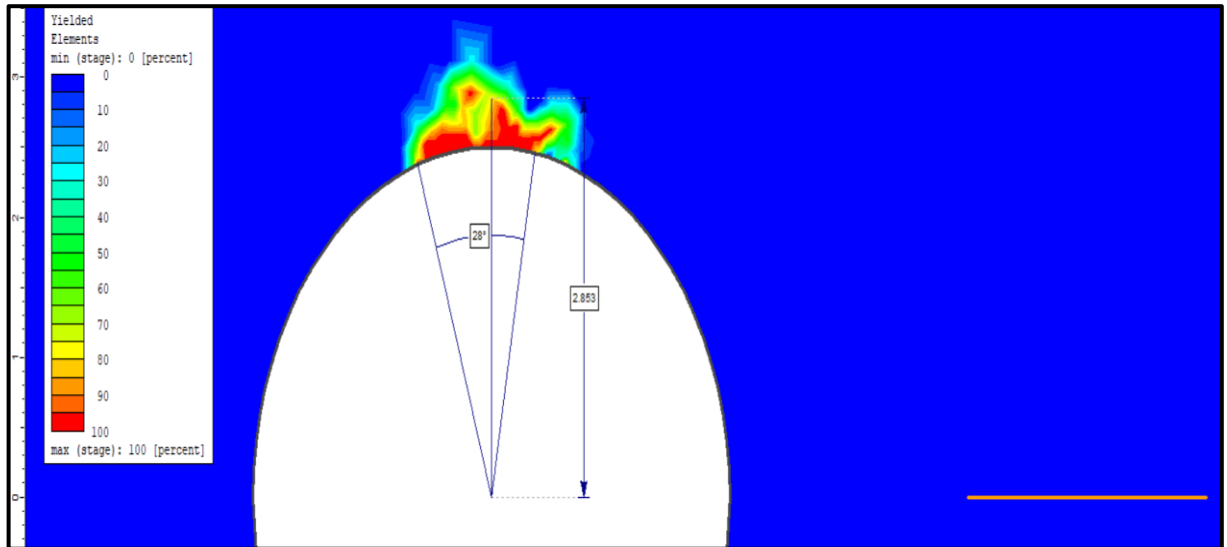


Figura 47: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=2.5$ [m], $\theta=0[^\circ]$ y $d=2.5$ [m].

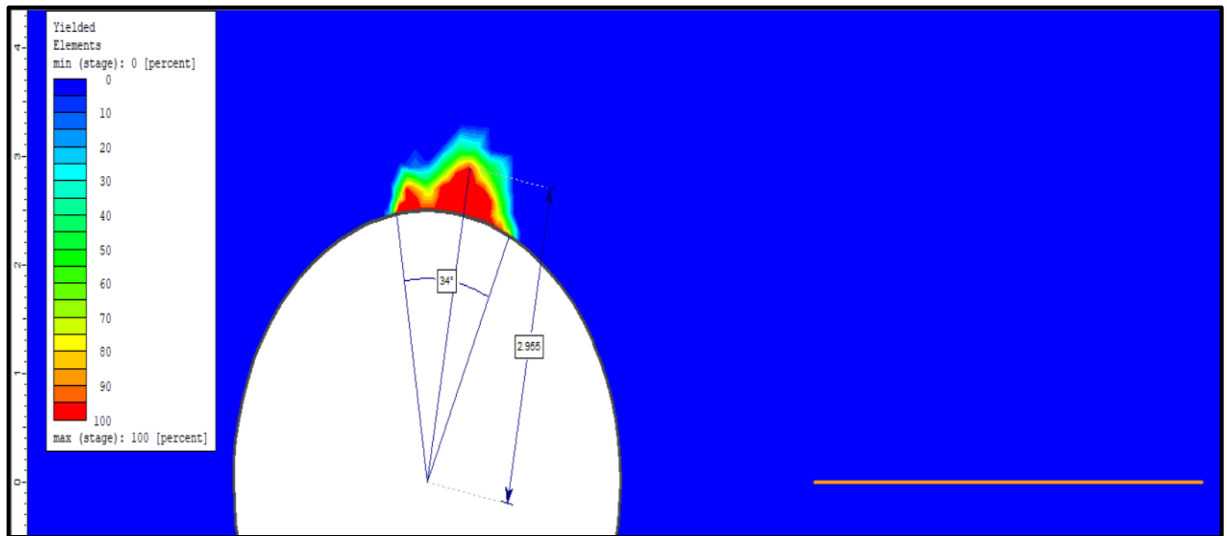


Figura 48: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=5$ [m], $\theta=0[^\circ]$ y $d=2.5$ [m].

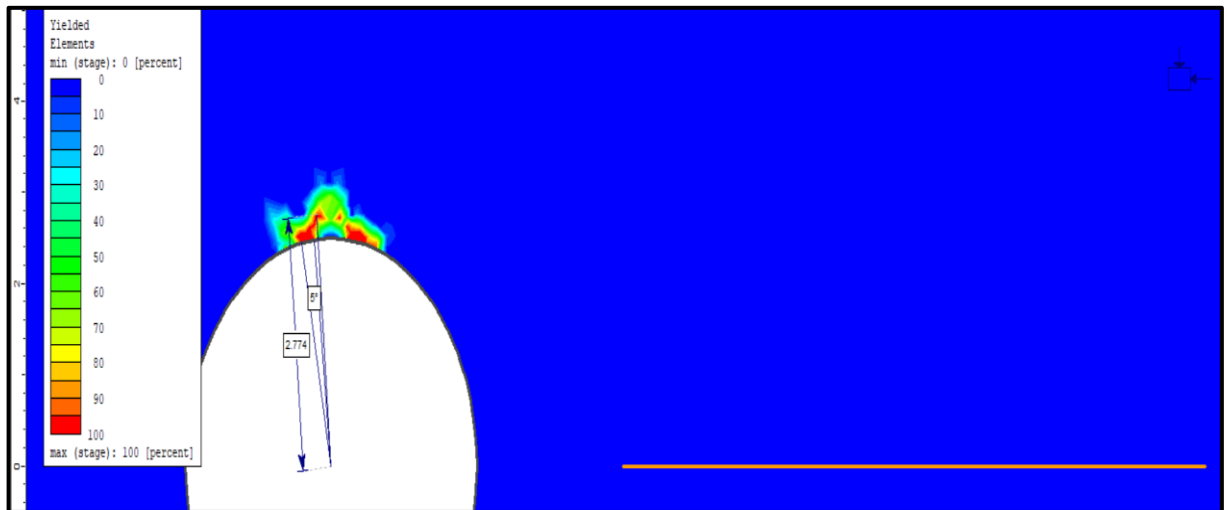


Figura 49: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=10$ [m], $\theta=0[^\circ]$ y $d=2.5$ [m].

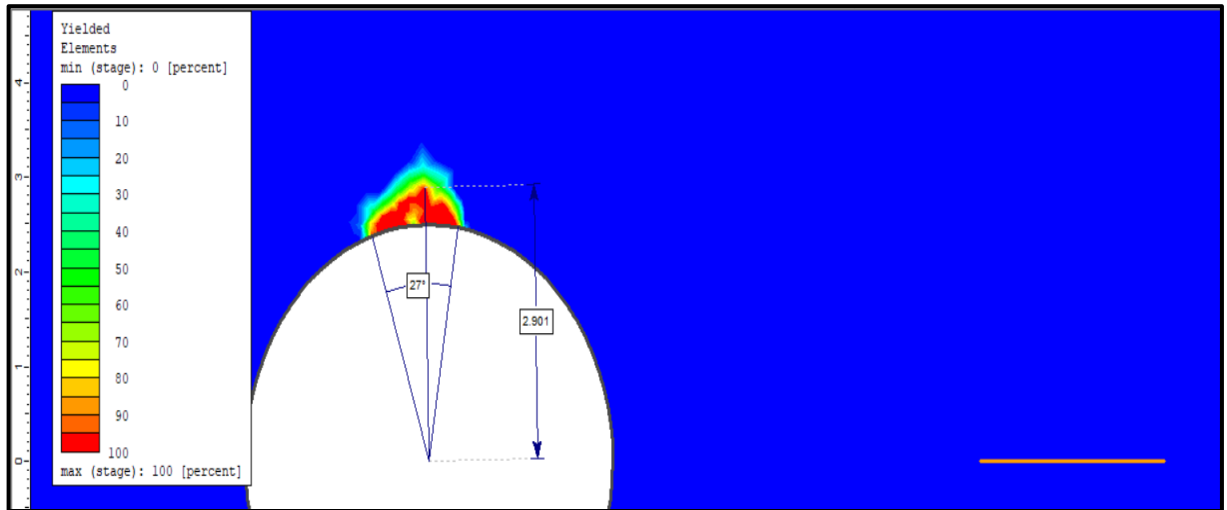


Figura 50: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=2.5$ [m], $\theta=0[^\circ]$ y $d=5$ [m].

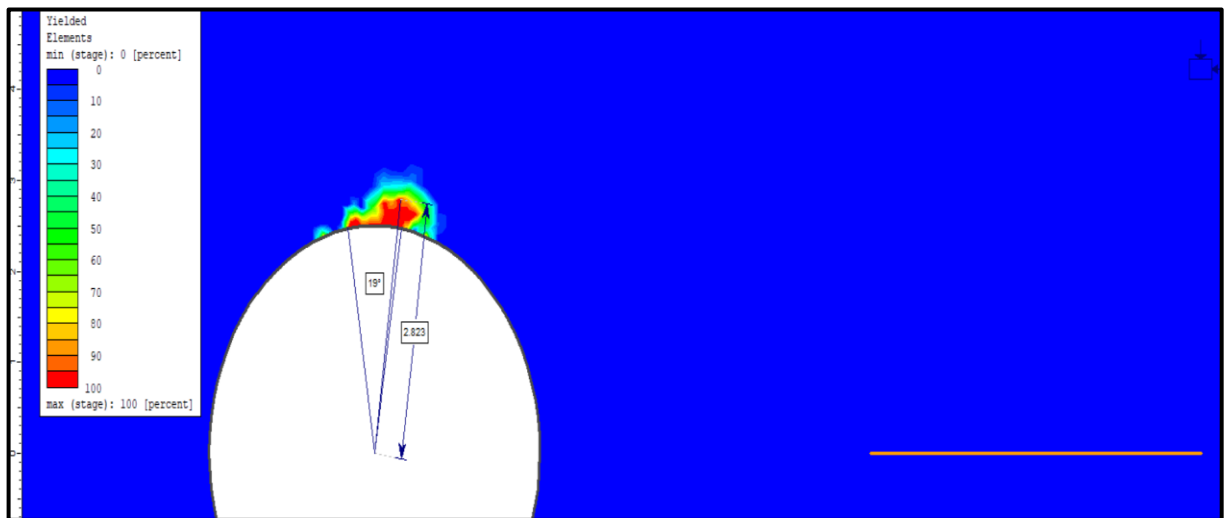


Figura 51: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=5$ [m], $\theta=0[^\circ]$ y $d=5$ [m].

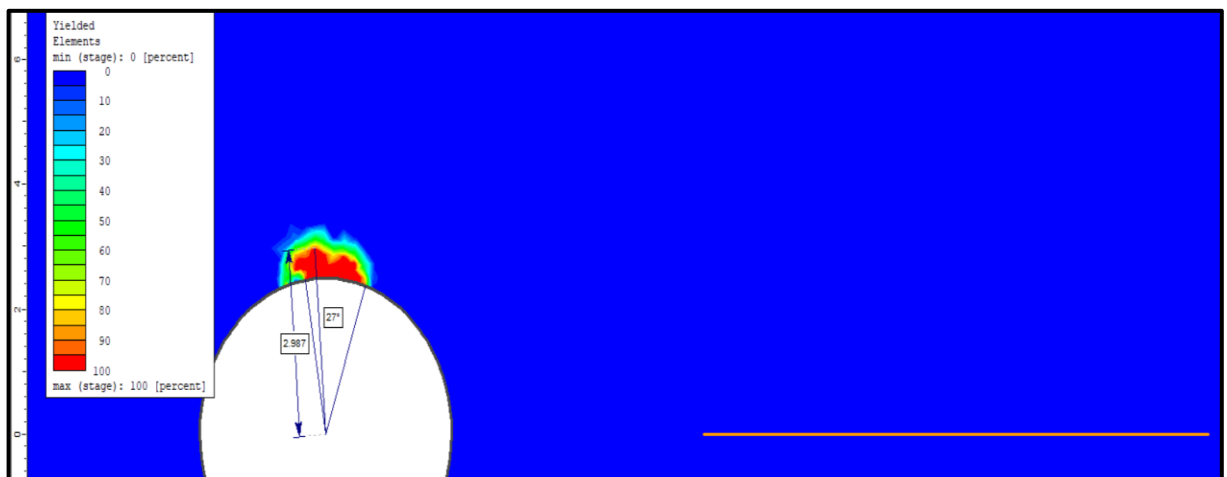


Figura 52: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=10$ [m], $\theta=0[^\circ]$ y $d=5$ [m].

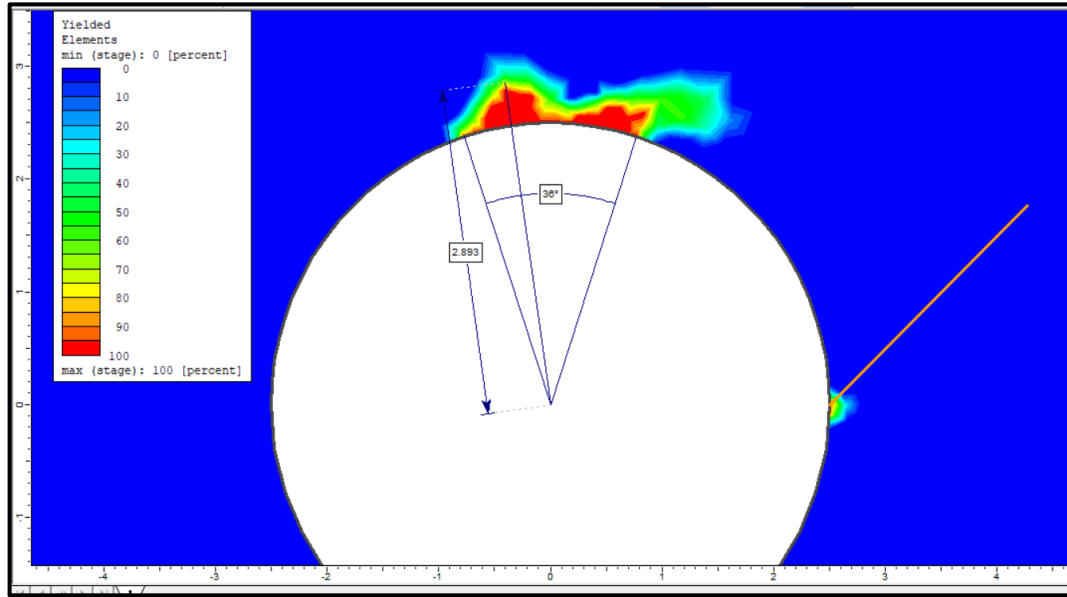


Figura 53: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=2.5$ [m], $\theta=45^\circ$ y $d=0$ [m].

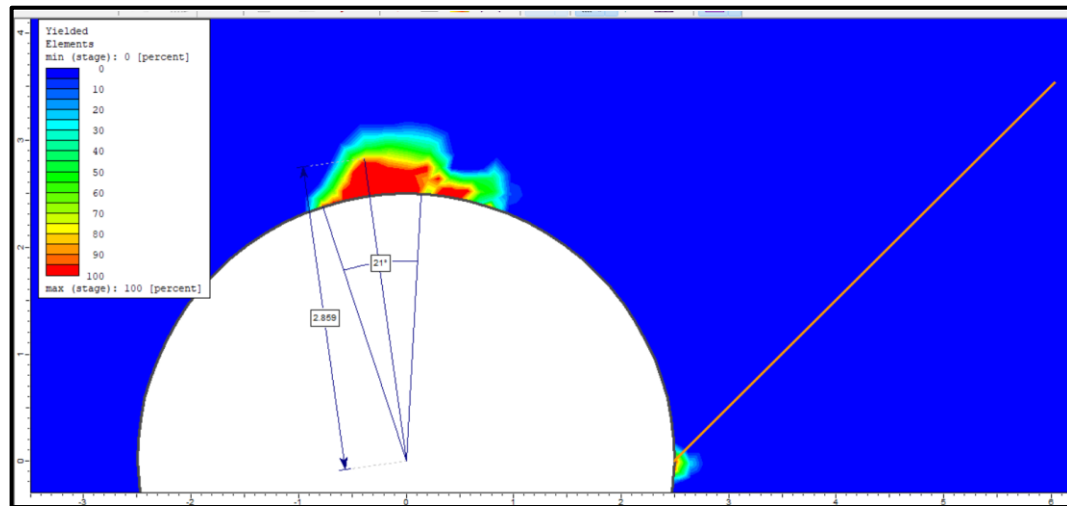


Figura 54: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=5$ [m], $\theta=45^\circ$ y $d=0$ [m].

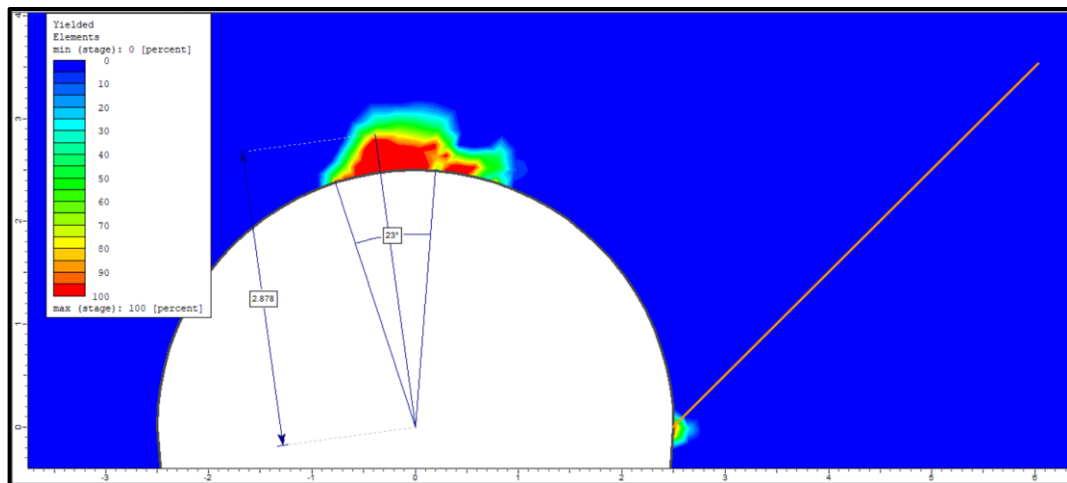


Figura 55: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=10$ [m], $\theta=45^\circ$ y $d=0$ [m].

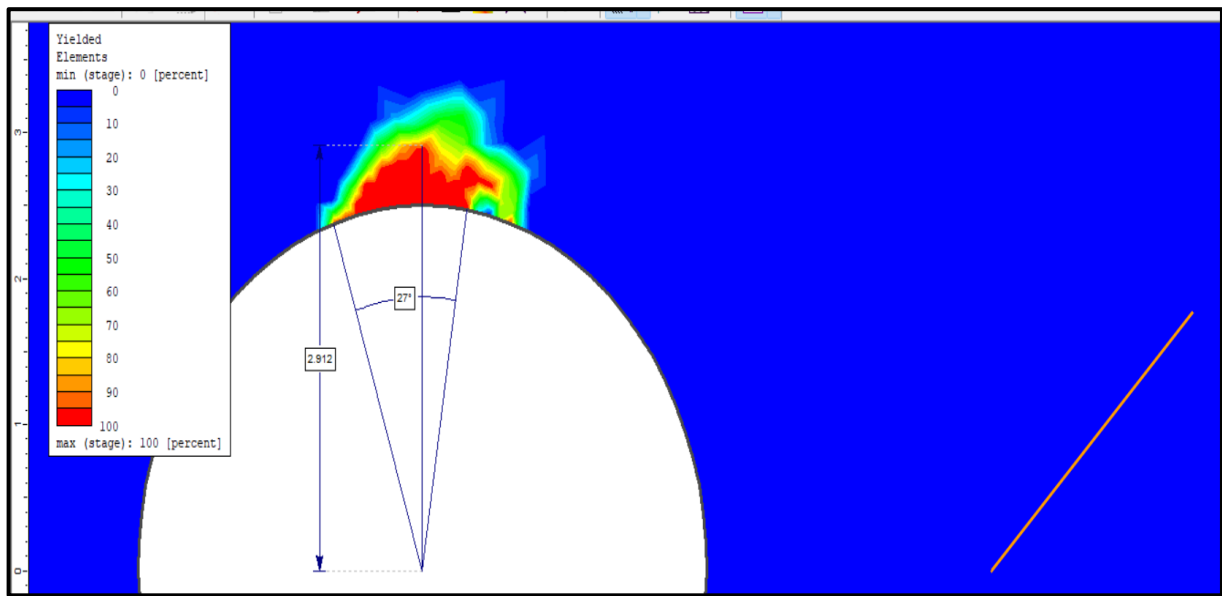


Figura 56: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=2.5$ [m], $\theta=45^\circ$ y $d=2.5$ [m].

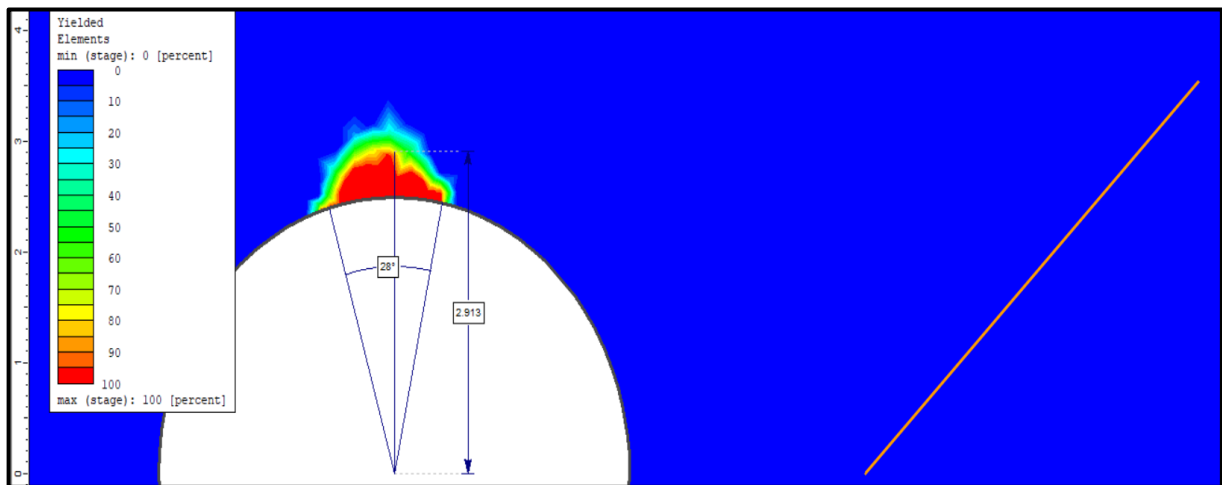


Figura 57: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=5$ [m], $\theta=45^\circ$ y $d=2.5$ [m].

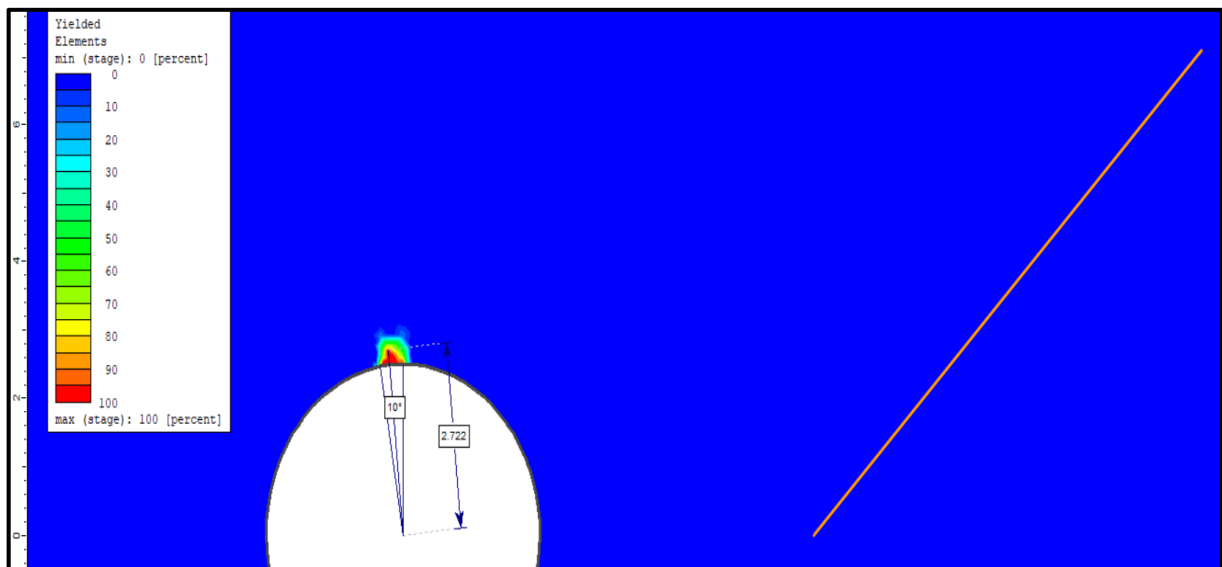


Figura 58: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=10$ [m], $\theta=45^\circ$ y $d=2.5$ [m].

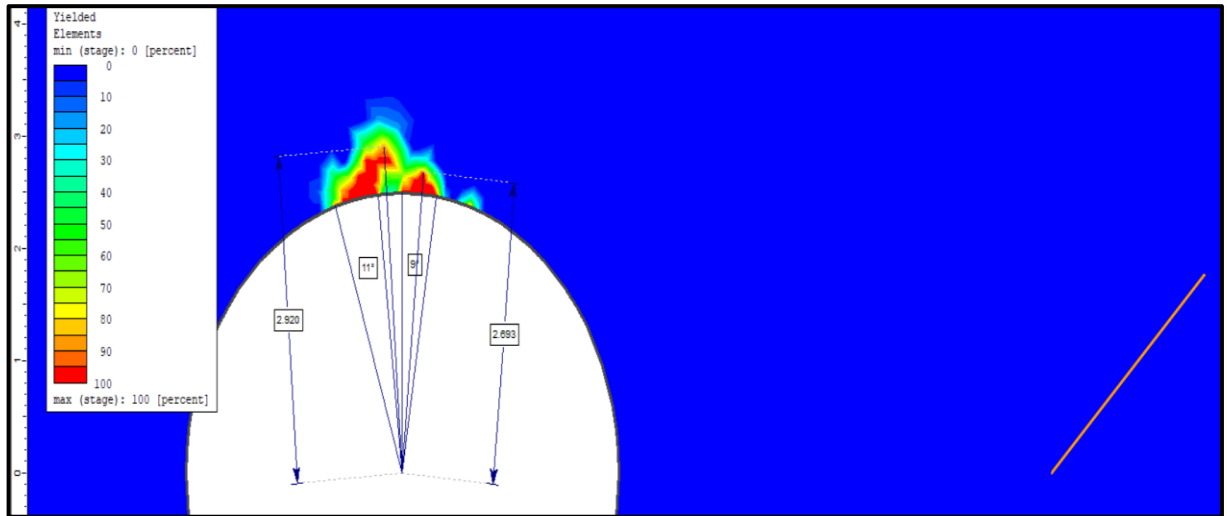


Figura 59: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=2.5$ [m], $\theta=45[^\circ]$ y $d=5$ [m].

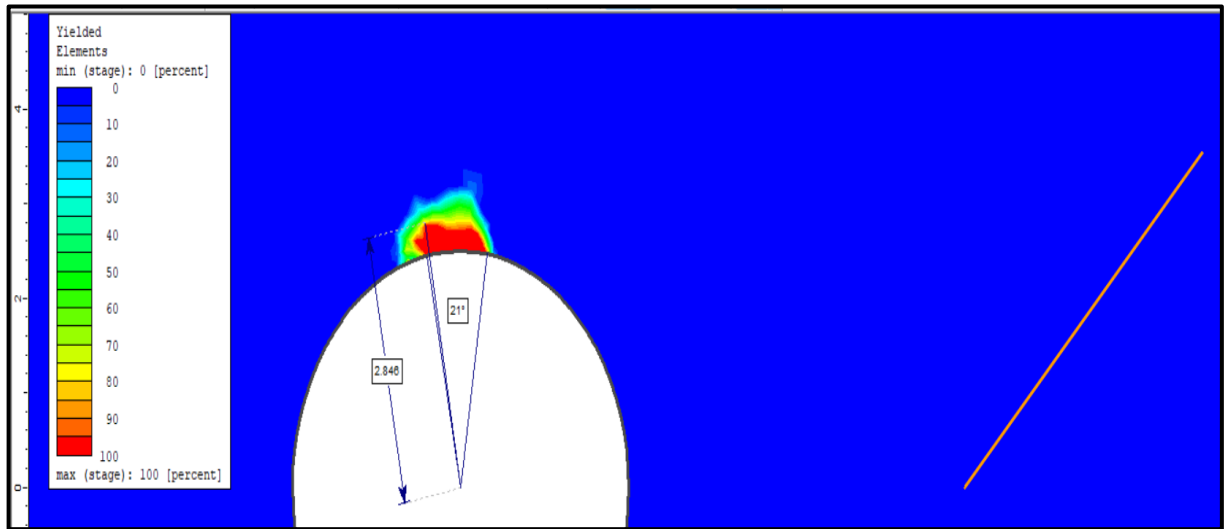


Figura 60: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=5$ [m], $\theta=45[^\circ]$ y $d=5$ [m].

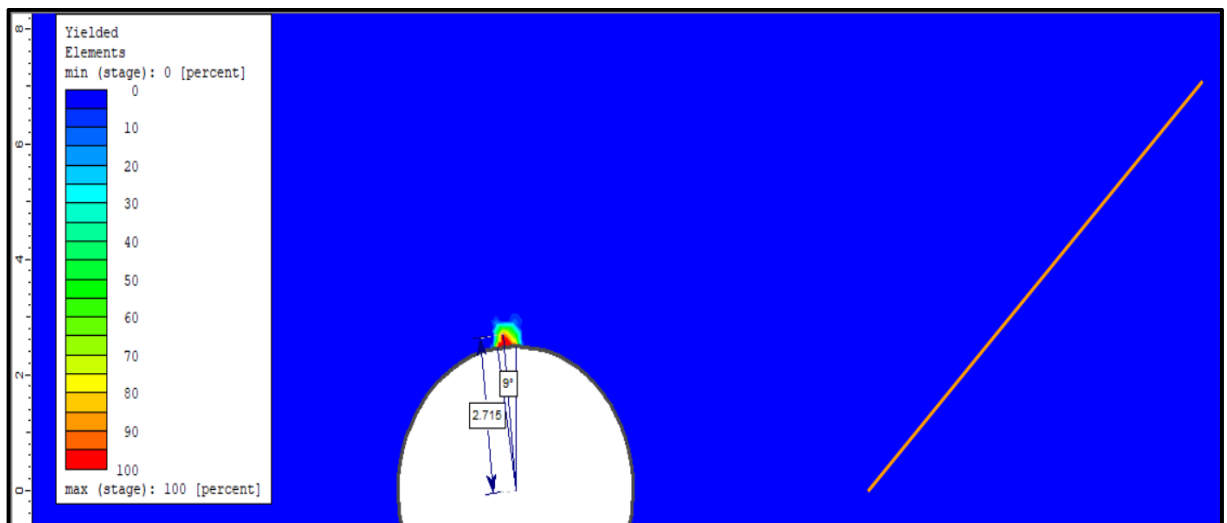


Figura 61: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=10$ [m], $\theta=45[^\circ]$ y $d=5$ [m].

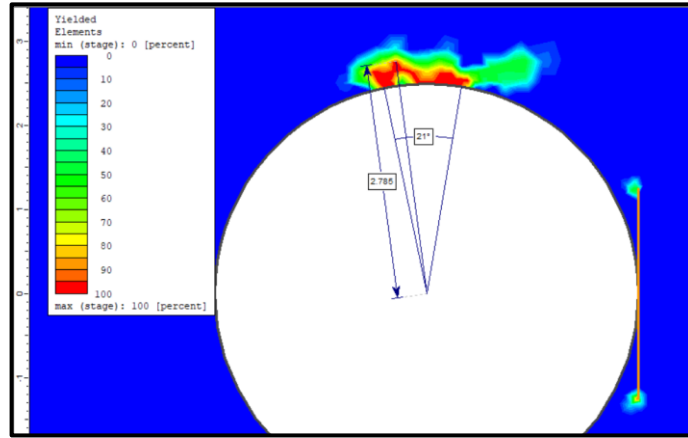


Figura 62: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=2.5$ [m], $\theta=90[^\circ]$ y $d=0$ [m].

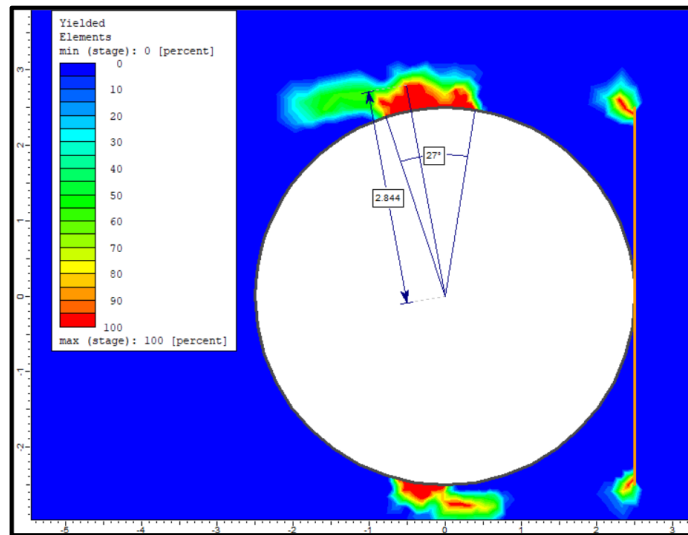


Figura 63: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=5$ [m], $\theta=90[^\circ]$ y $d=0$ [m].

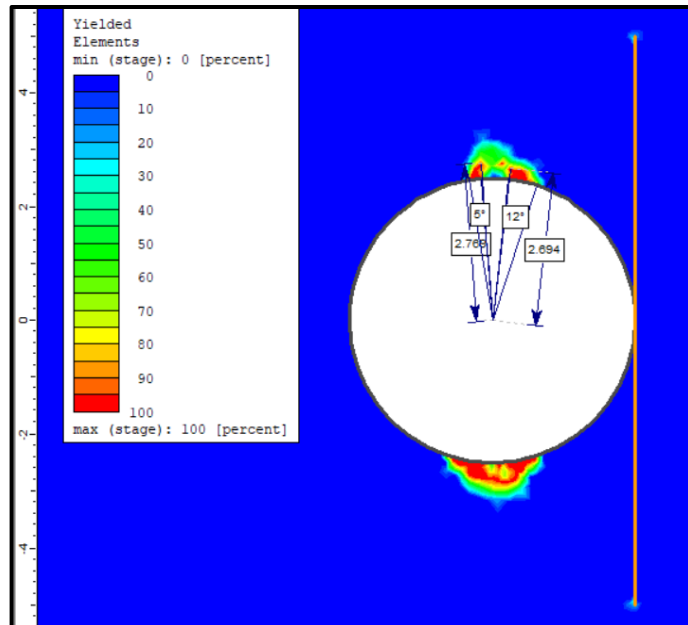


Figura 64: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=10$ [m], $\theta=90[^\circ]$ y $d=0$ [m].

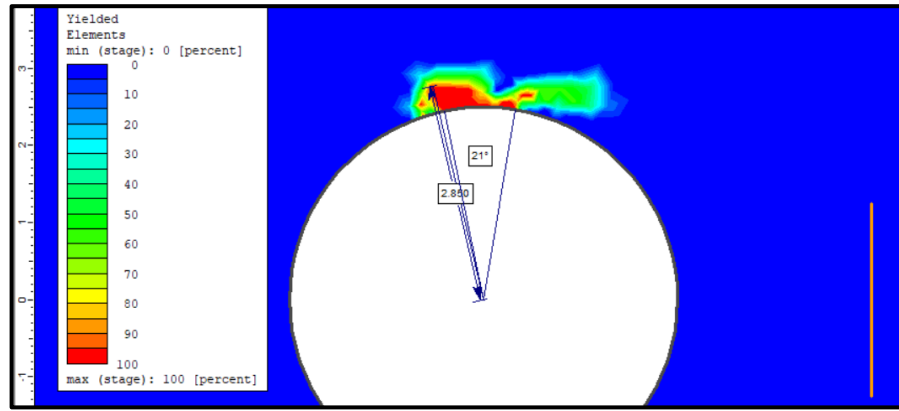


Figura 65: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=2.5$ [m], $\theta=90[^\circ]$ y $d=2.5$ [m].

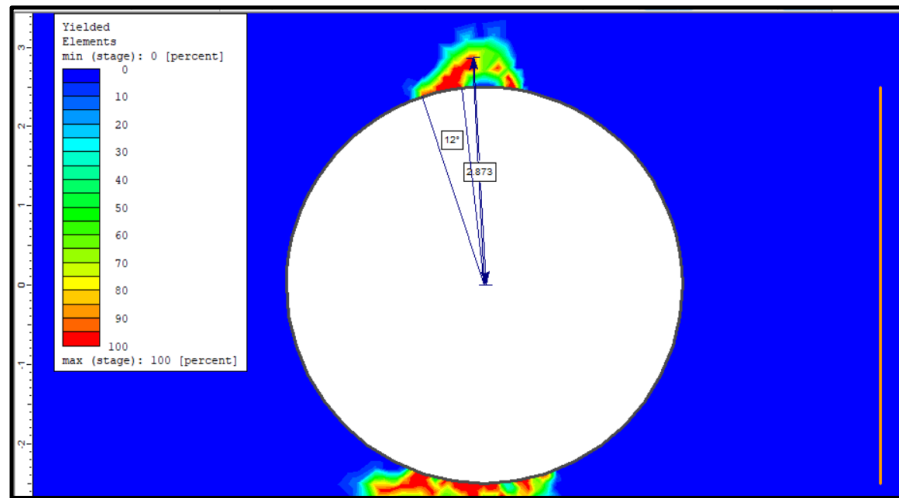


Figura 66: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=5$ [m], $\theta=90[^\circ]$ y $d=2.5$ [m].

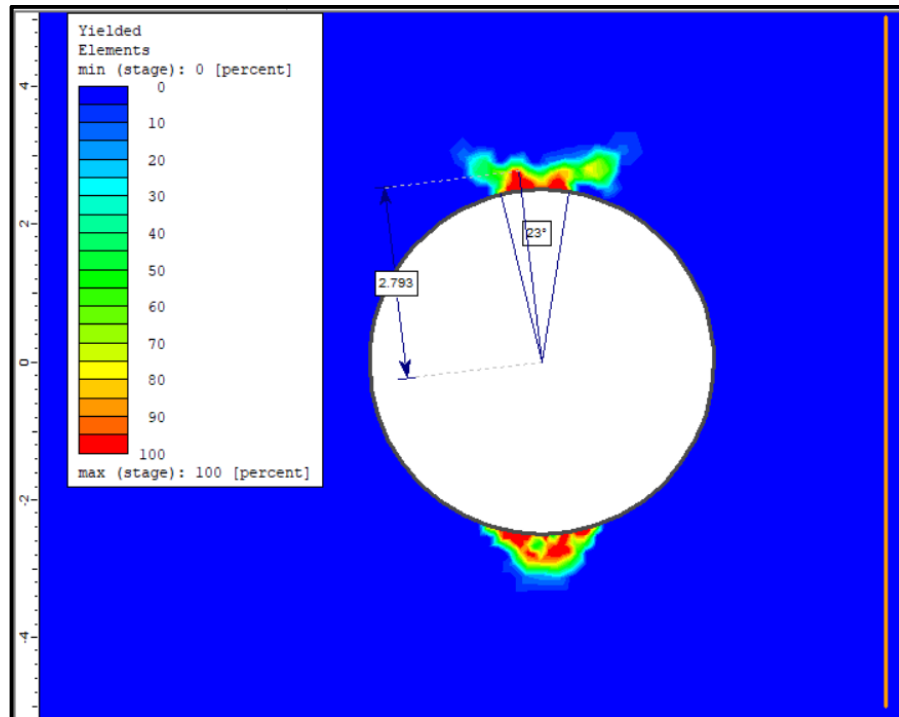


Figura 67: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=10$ [m], $\theta=90[^\circ]$ y $d=2.5$ [m].

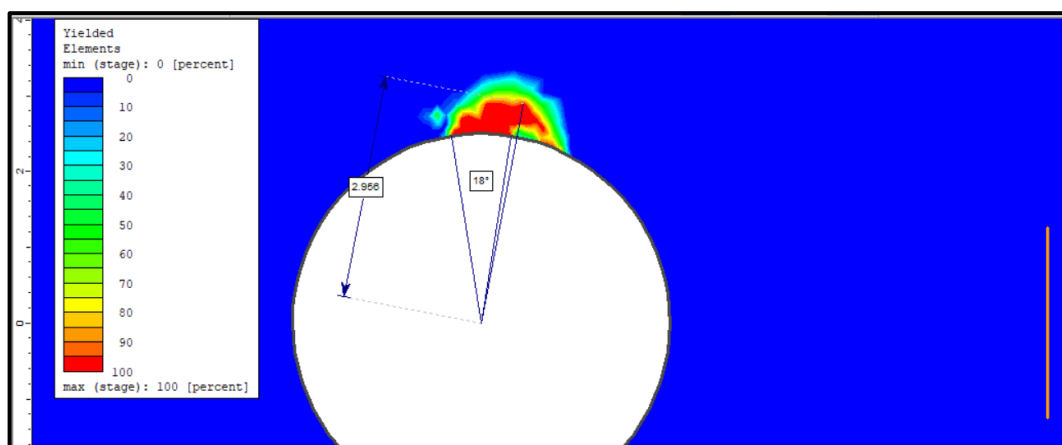


Figura 68: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=2.5$ [m], $\theta=90[^\circ]$ y $d=5$ [m].

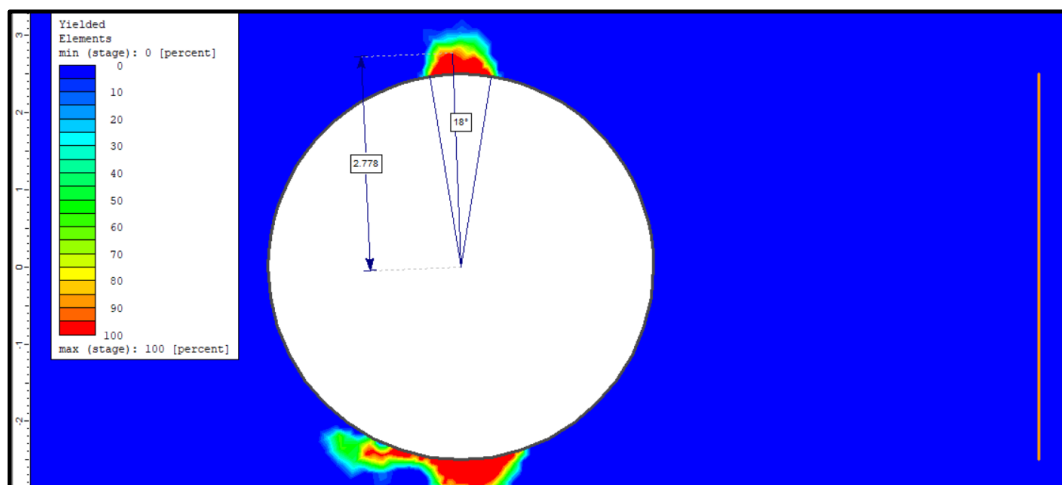


Figura 69: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=5$ [m], $\theta=90[^\circ]$ y $d=5$ [m].

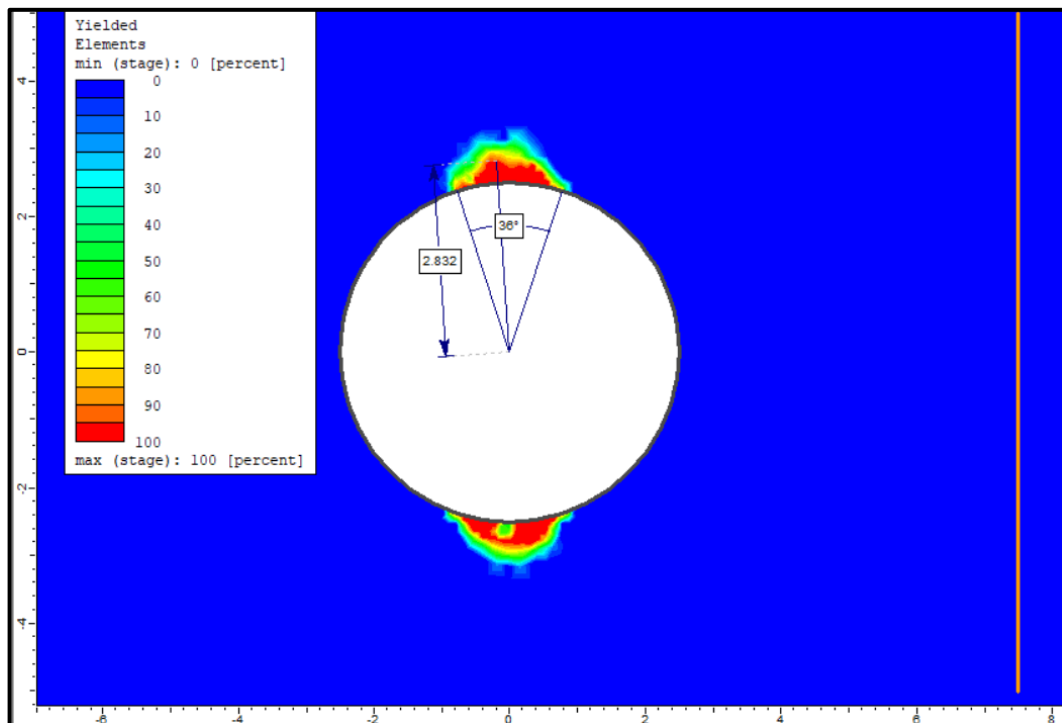


Figura 70: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=10$ [m], $\theta=90[^\circ]$ y $d=5$ [m].

9.1.3 Escenarios simulados en zona intermedia

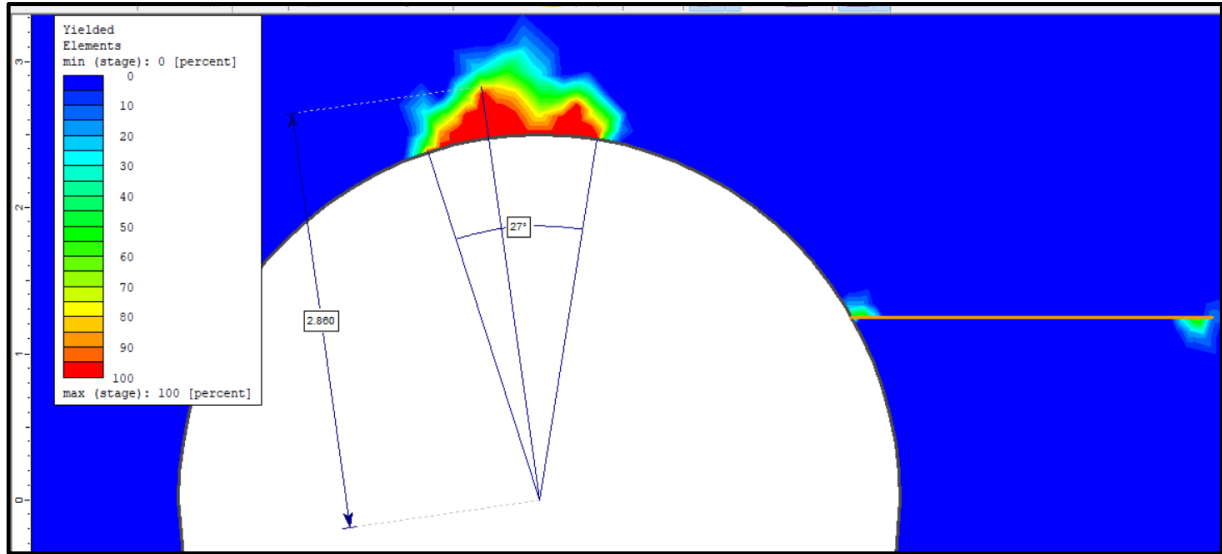


Figura 71: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=2.5$ [m], $\theta=0[^\circ]$ y $d=0$ [m].

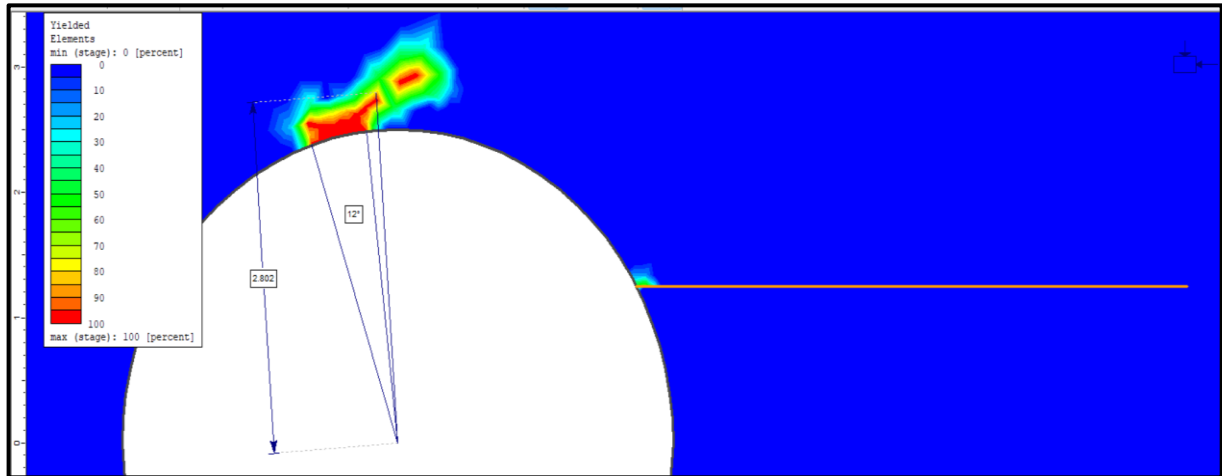


Figura 72: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=5$ [m], $\theta=0[^\circ]$ y $d=0$ [m].

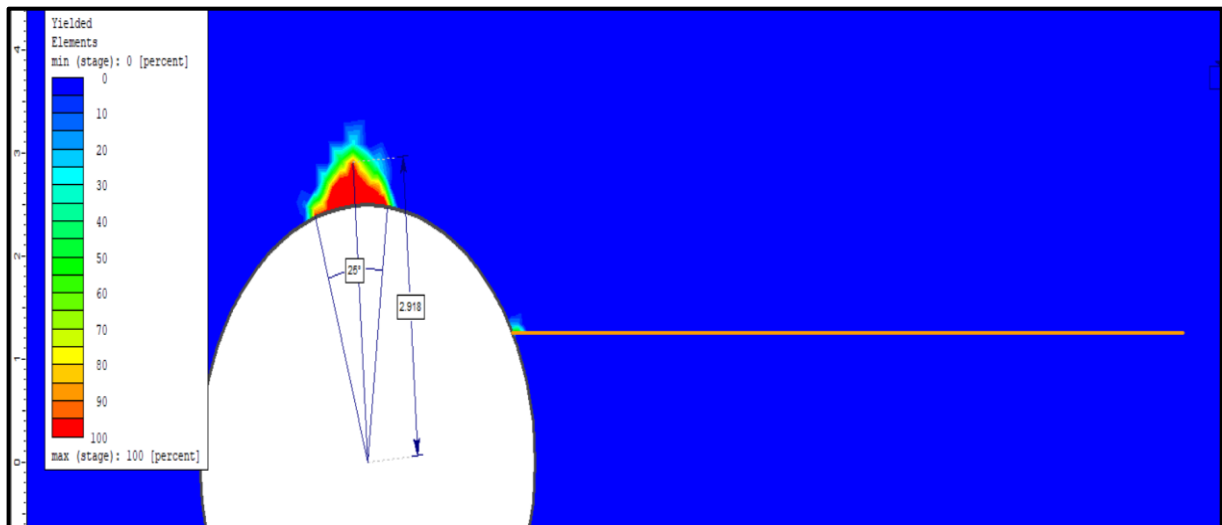


Figura 73: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=10$ [m], $\theta=0[^\circ]$ y $d=0$ [m].

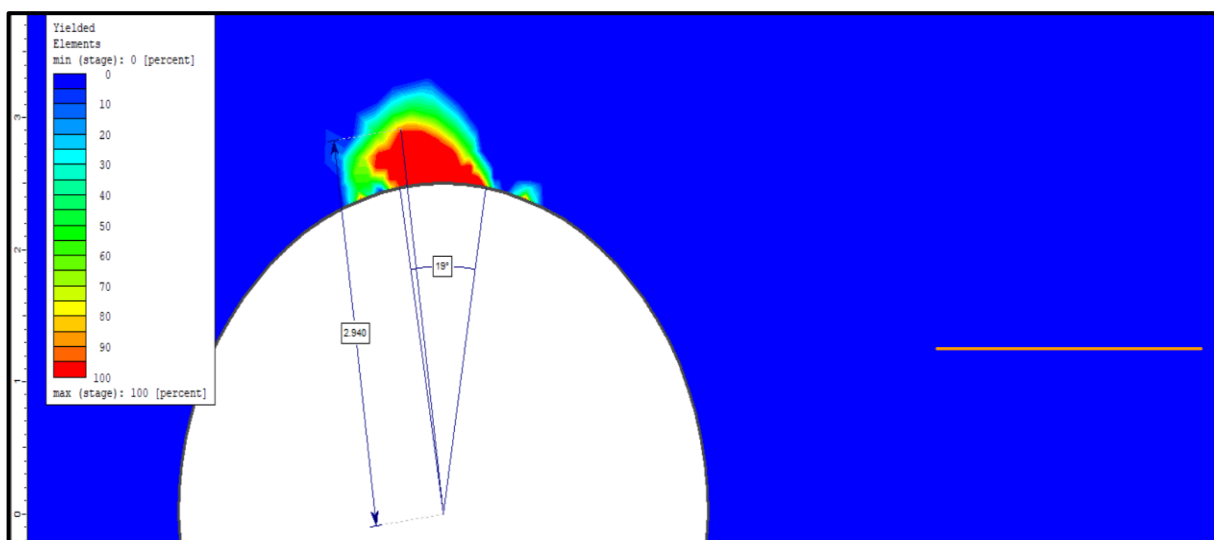


Figura 74: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=2.5$ [m], $\theta=0[^\circ]$ y $d=2.5$ [m].

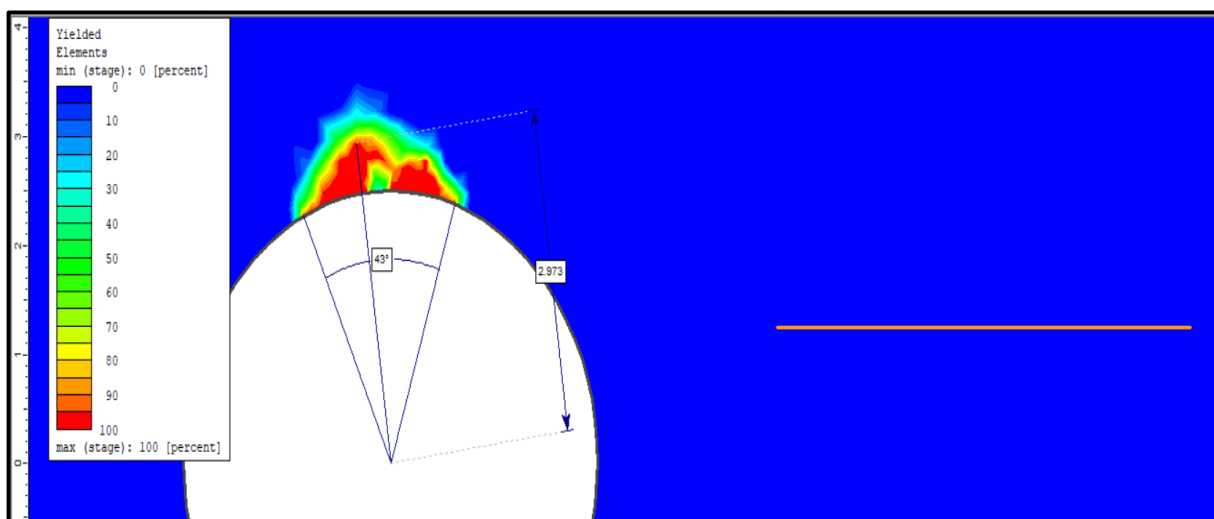


Figura 75: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=5$ [m], $\theta=0[^\circ]$ y $d=2.5$ [m].

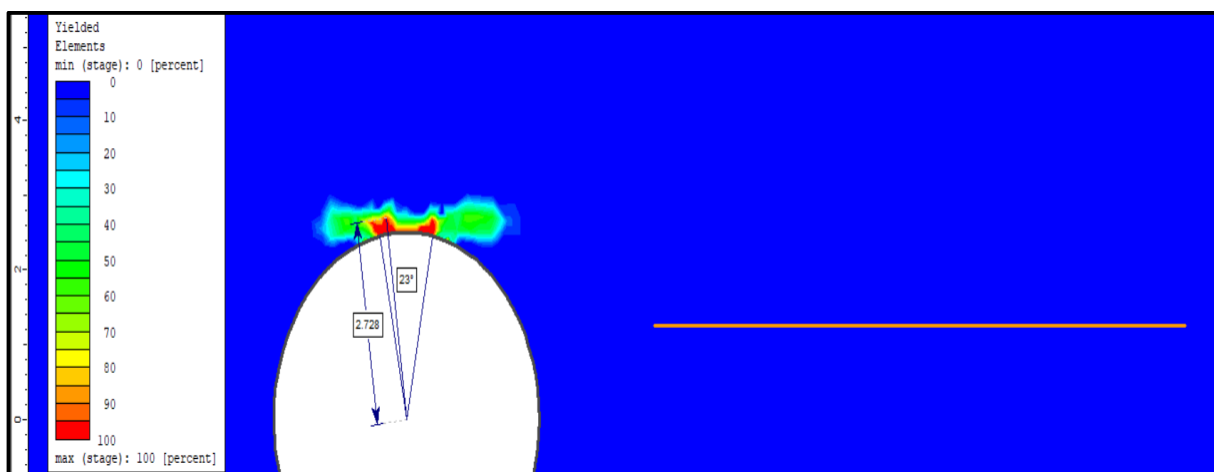


Figura 76: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=10$ [m], $\theta=0[^\circ]$ y $d=2.5$ [m].

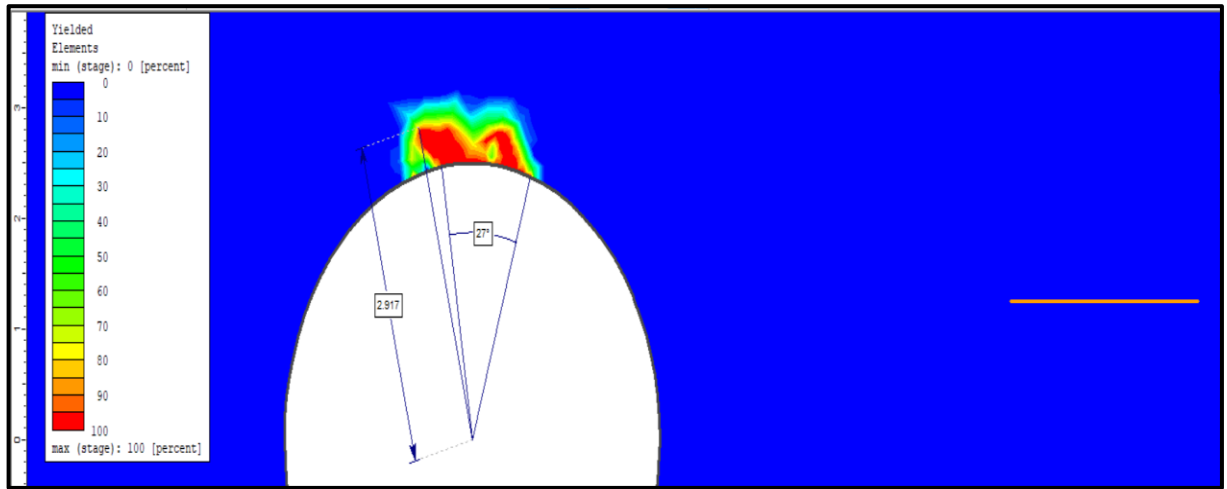


Figura 77: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=2.5$ [m], $\theta=0[^\circ]$ y $d=5$ [m].

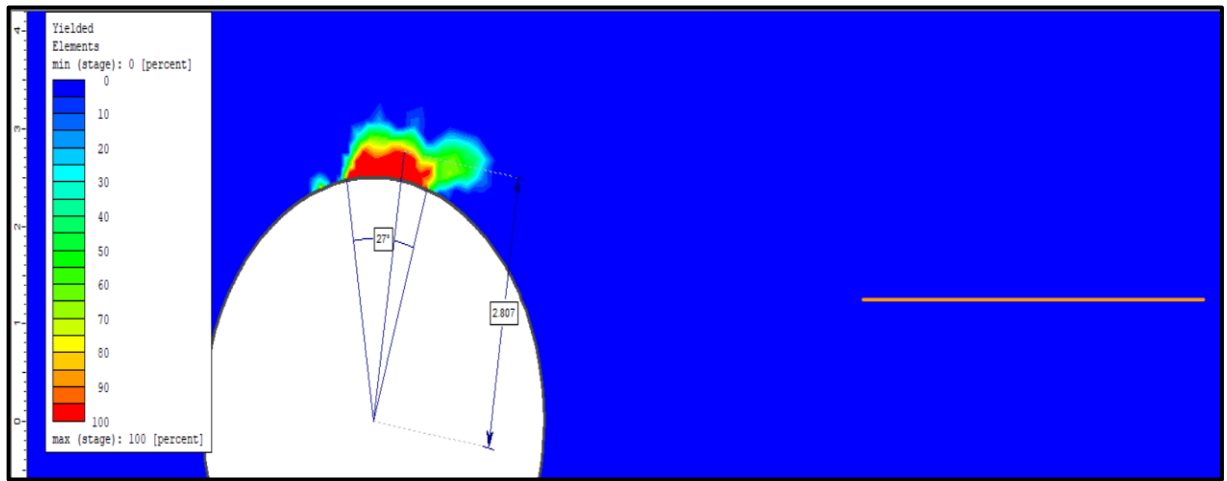


Figura 78: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=5$ [m], $\theta=0[^\circ]$ y $d=5$ [m].

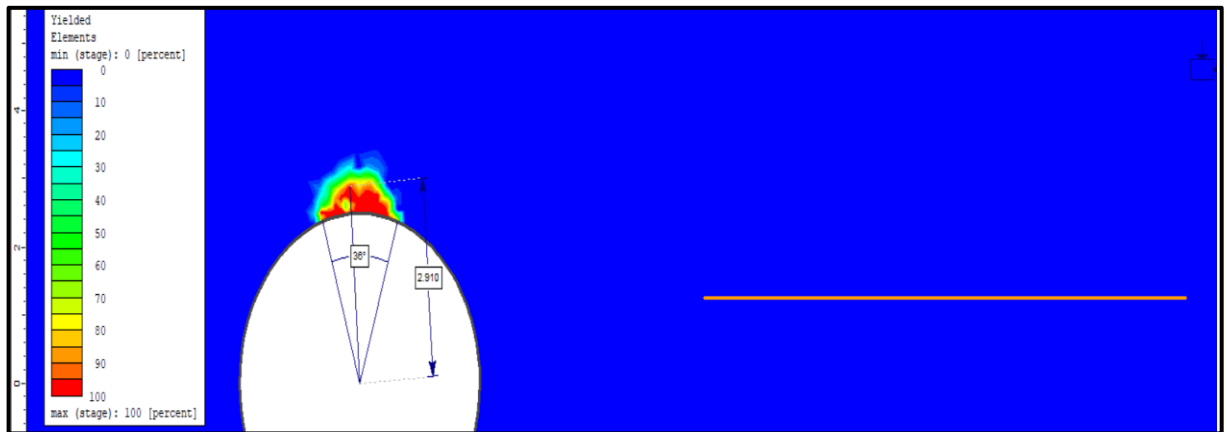


Figura 79: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=10$ [m], $\theta=0[^\circ]$ y $d=5$ [m].

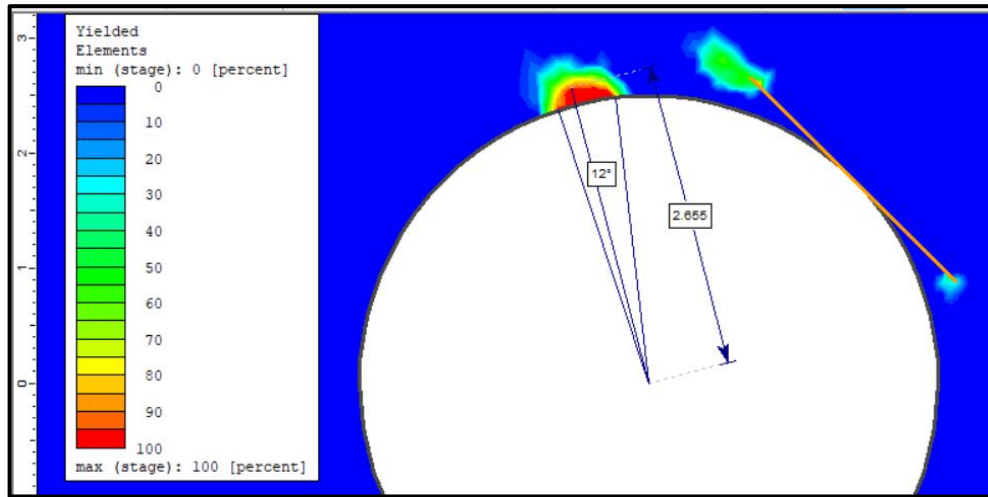


Figura 80: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=2.5$ [m], $\theta=45^\circ$ y $d=0$ [m].

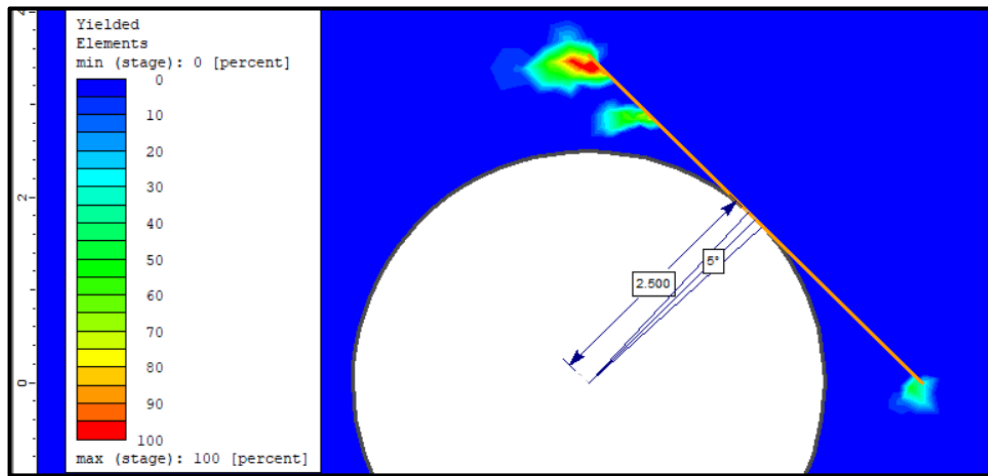


Figura 81: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=5$ [m], $\theta=45^\circ$ y $d=0$ [m].

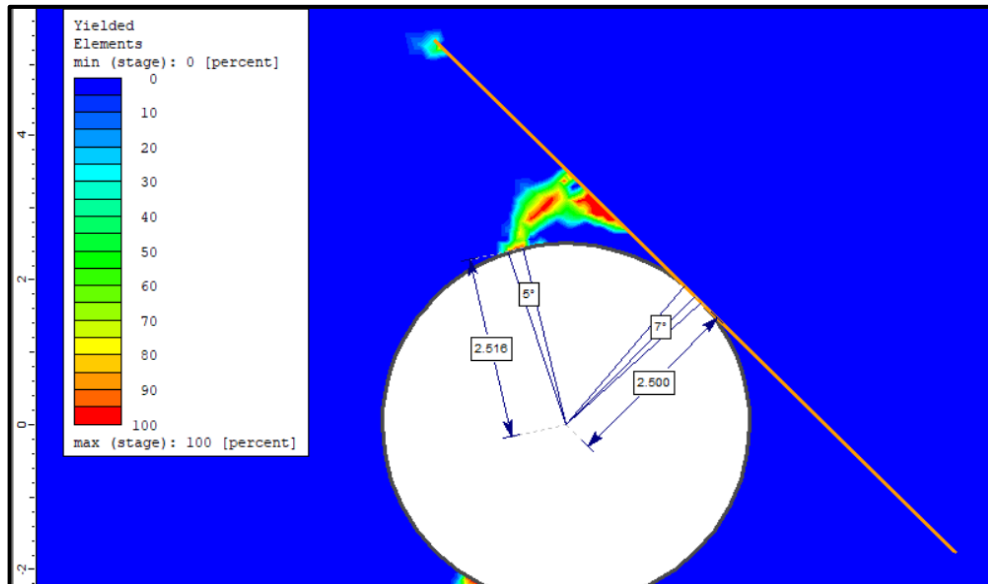


Figura 82: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=10$ [m], $\theta=45^\circ$ y $d=0$ [m].

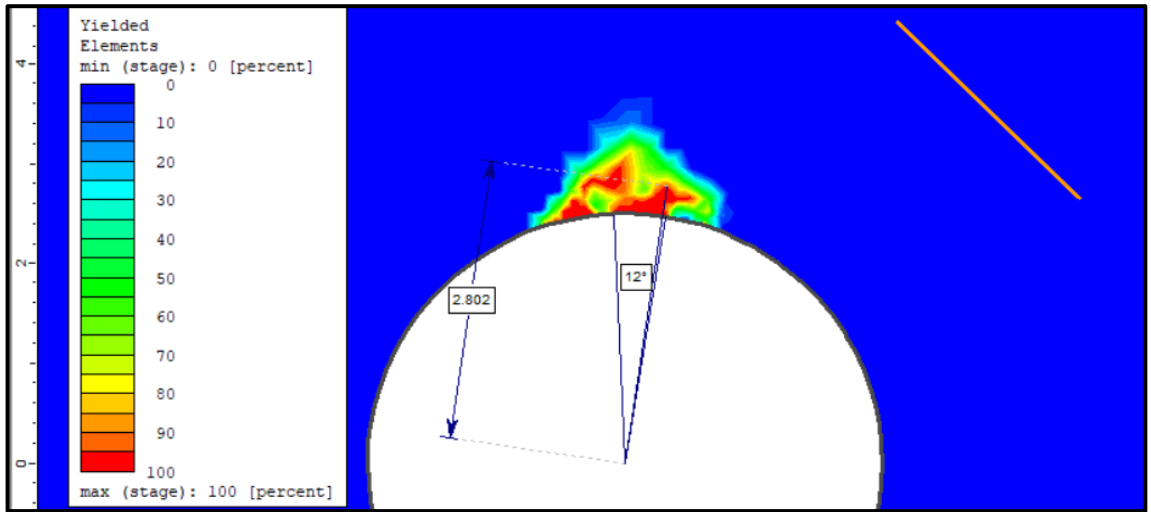


Figura 83: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=2.5$ [m], $\theta=45^\circ$ y $d=2.5$ [m].

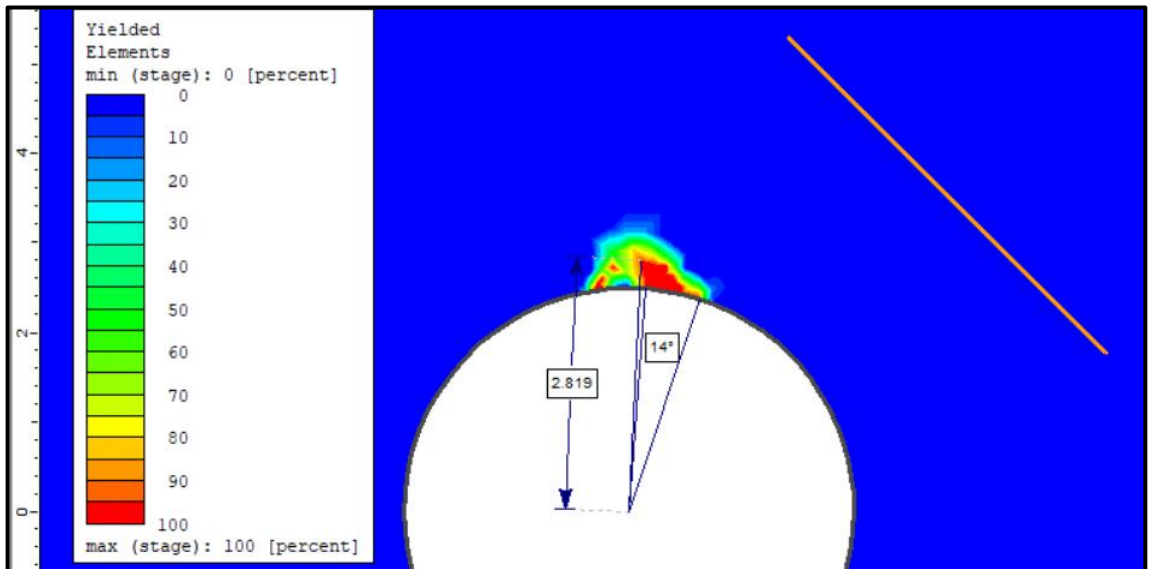


Figura 84: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=5$ [m], $\theta=45^\circ$ y $d=2.5$ [m].

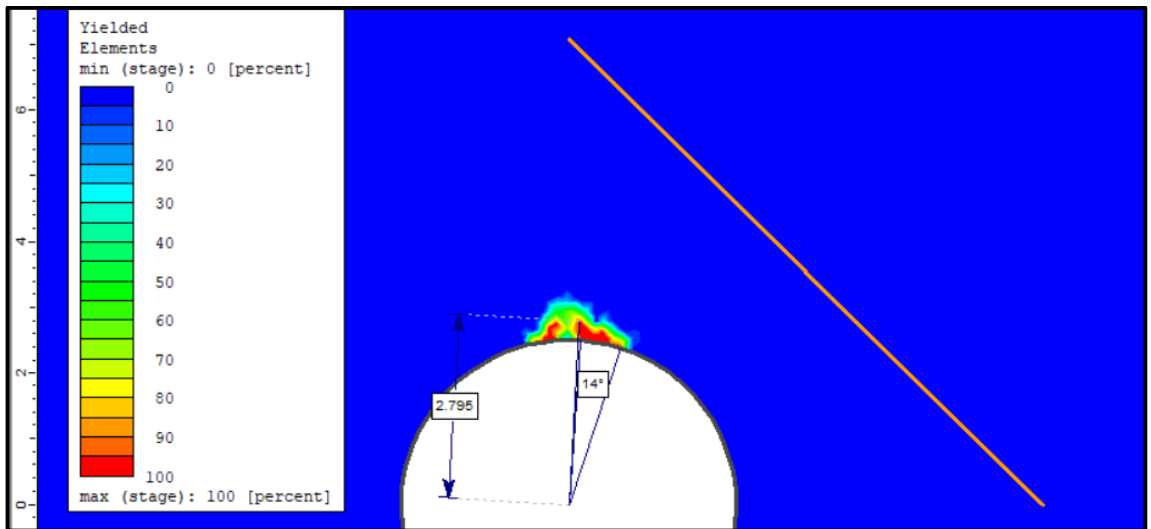


Figura 85: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=10$ [m], $\theta=45^\circ$ y $d=2.5$ [m].

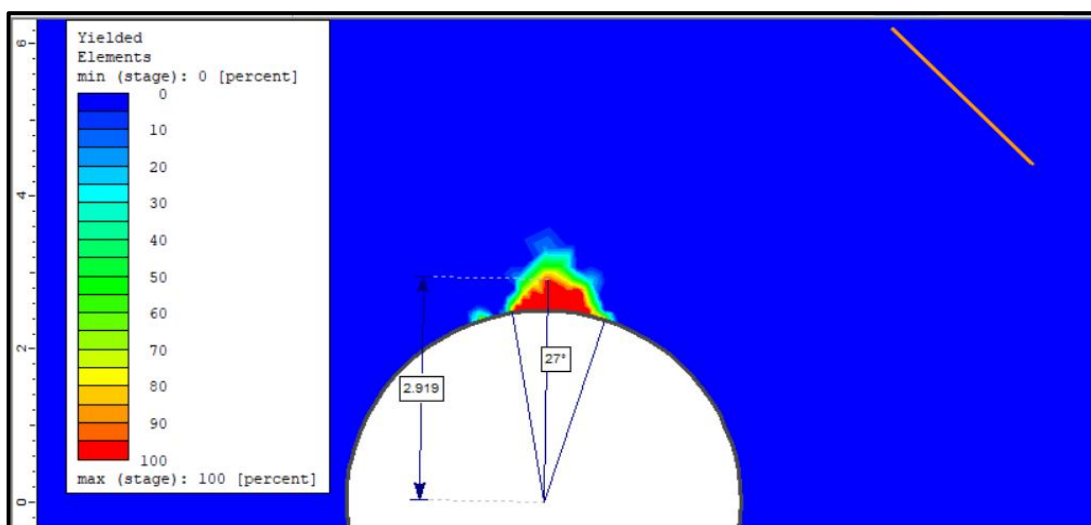


Figura 86: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=2.5$ [m], $\theta=45[^\circ]$ y $d=5$ [m].

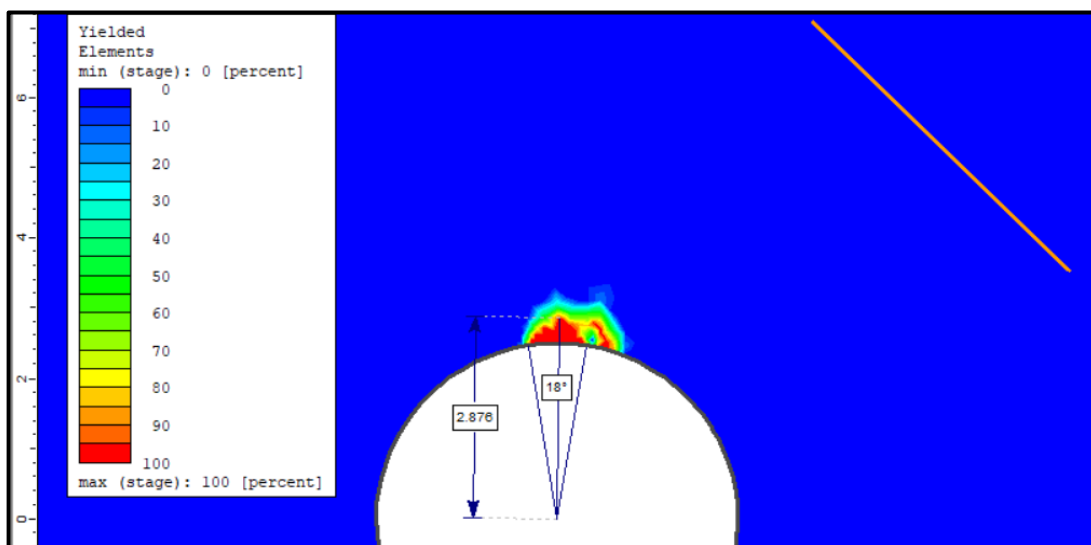


Figura 87: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=5$ [m], $\theta=45[^\circ]$ y $d=5$ [m].

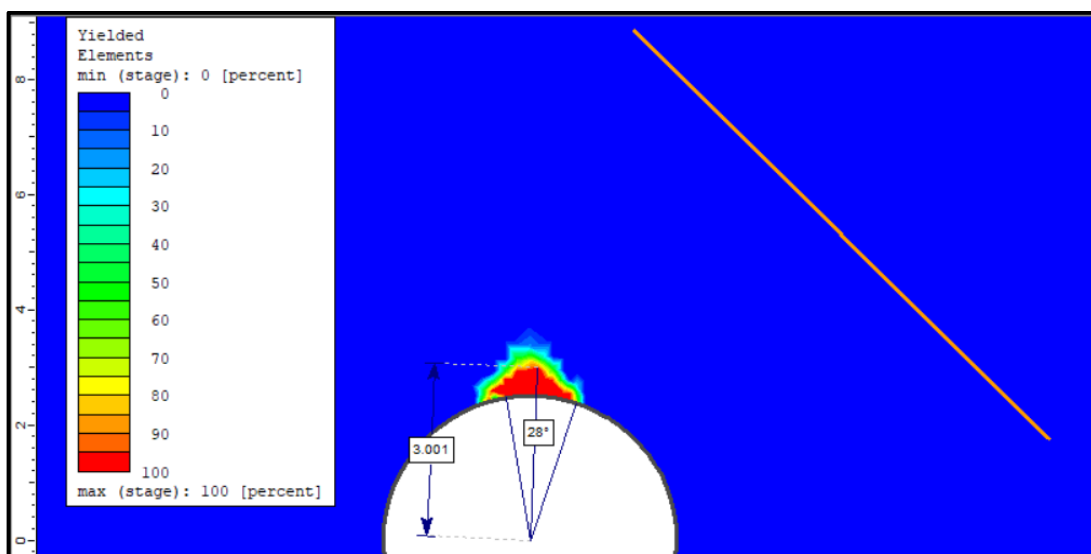


Figura 88: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=10$ [m], $\theta=45[^\circ]$ y $d=5$ [m].

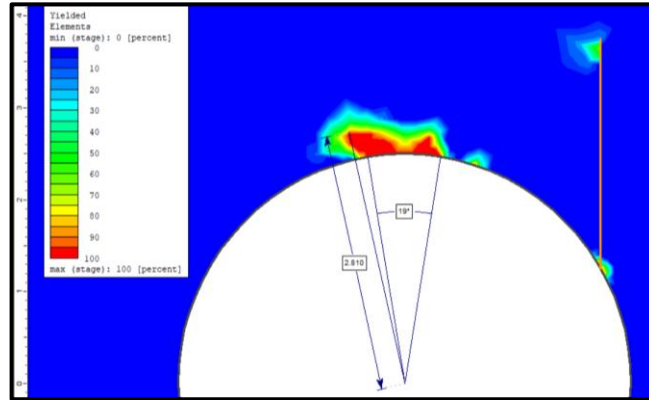


Figura 89: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=2.5$ [m], $\theta=90[^\circ]$ y $d=0$ [m].

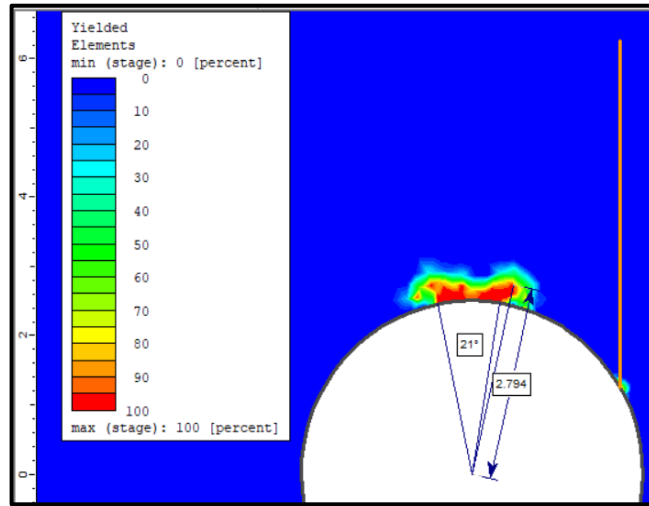


Figura 90: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=5$ [m], $\theta=90[^\circ]$ y $d=0$ [m].

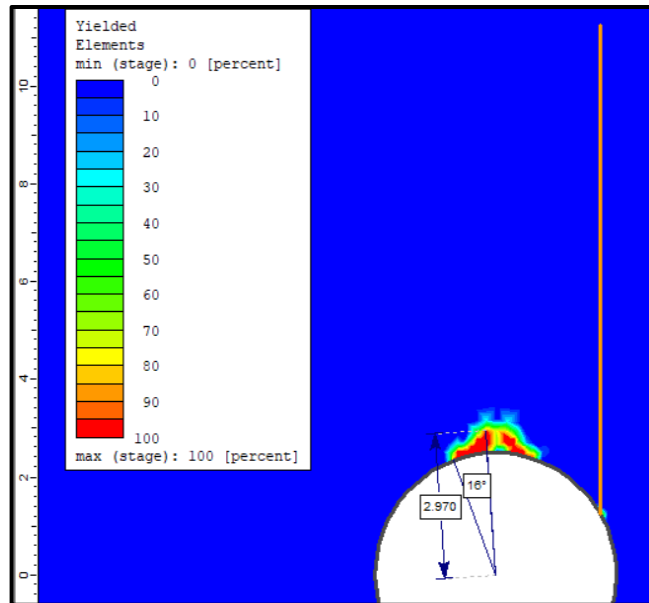


Figura 91: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=10$ [m], $\theta=90[^\circ]$ y $d=0$ [m].

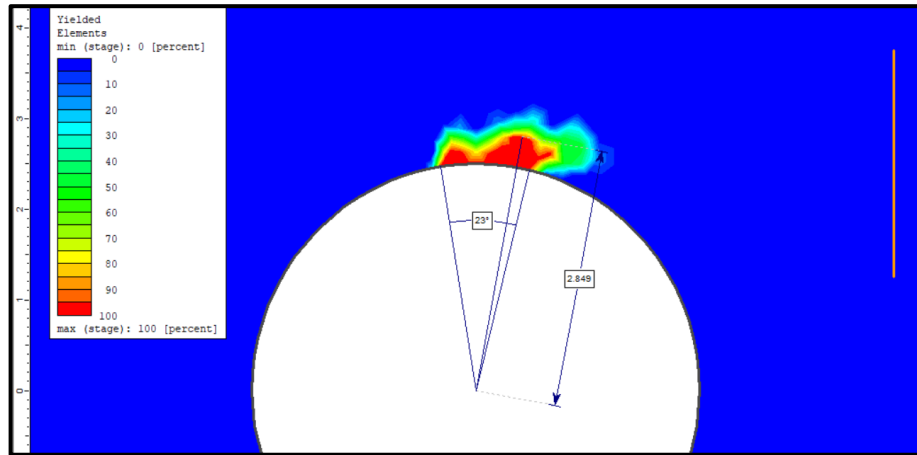


Figura 92: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=2.5$ [m], $\theta=90[^\circ]$ y $d=2.5$ [m].

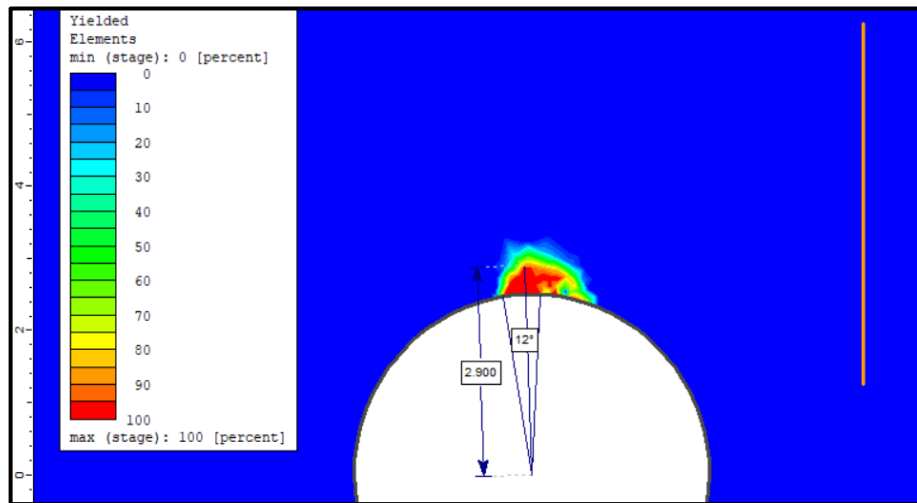


Figura 93: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=5$ [m], $\theta=90[^\circ]$ y $d=2.5$ [m].

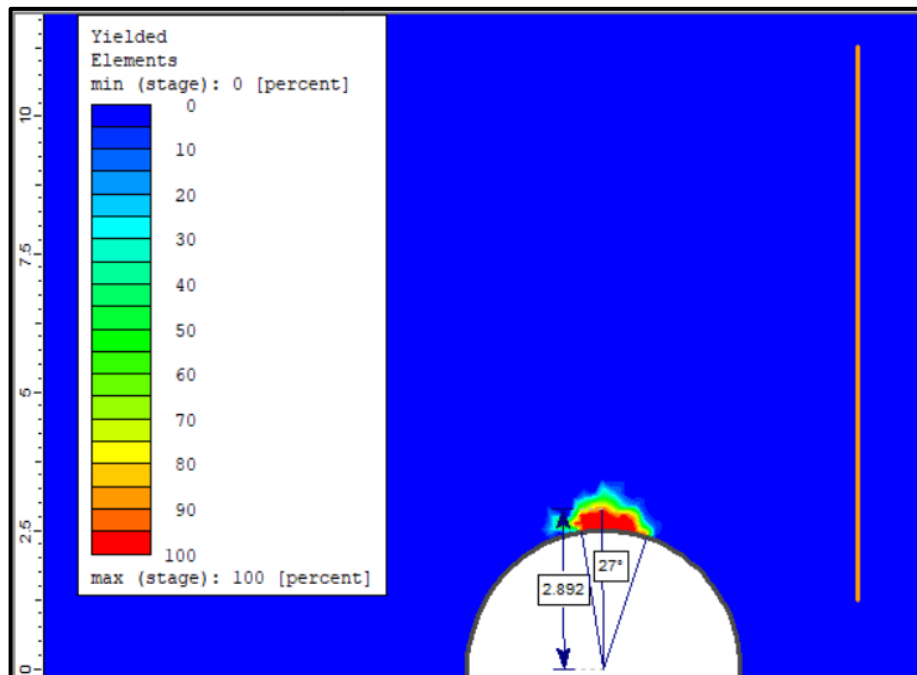


Figura 94: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=10$ [m], $\theta=90[^\circ]$ y $d=2.5$ [m].

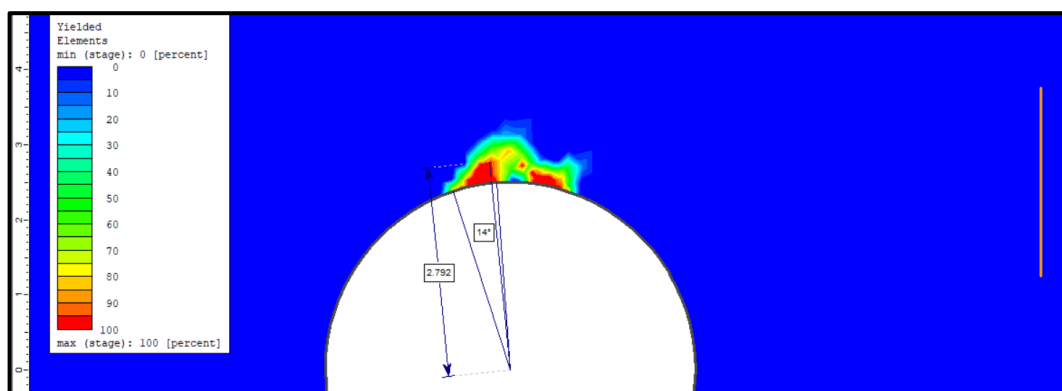


Figura 95: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=2.5$ [m], $\theta=90[^\circ]$ y $d=5$ [m].

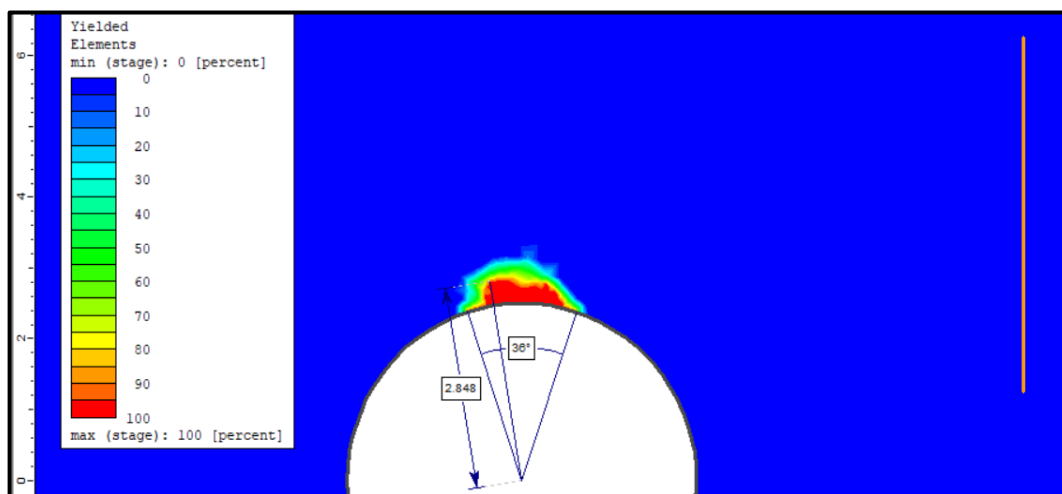


Figura 96: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=5$ [m], $\theta=90[^\circ]$ y $d=5$ [m].



Figura 97: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=10$ [m], $\theta=90[^\circ]$ y $d=5$ [m].

9.2 Escenarios simulados con $\Phi = 25 [^\circ]$ y $C = 30 [\text{KPa}]$.

9.2.1 Escenarios simulados en zona del techo

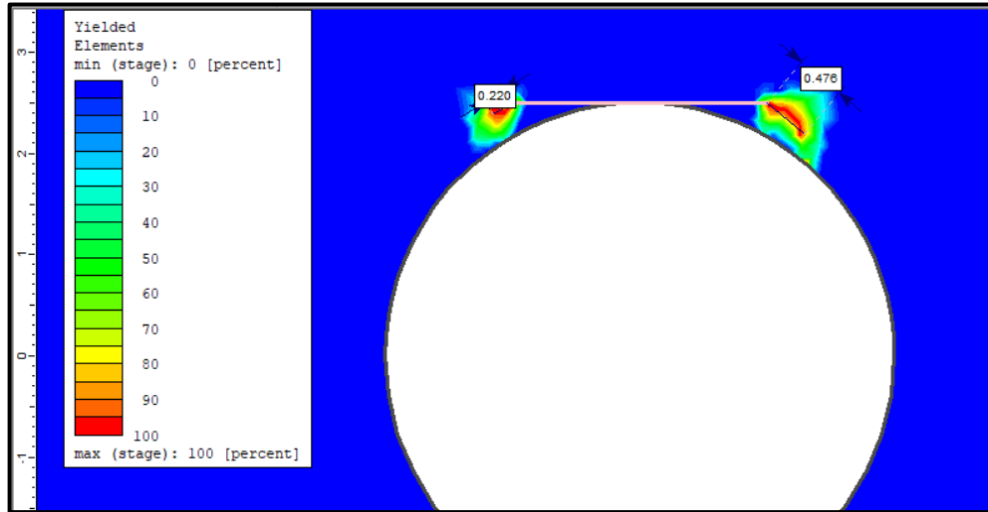


Figura 98: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=2.5 [\text{m}]$, $\theta=0[^\circ]$ y $d=0[\text{m}]$.

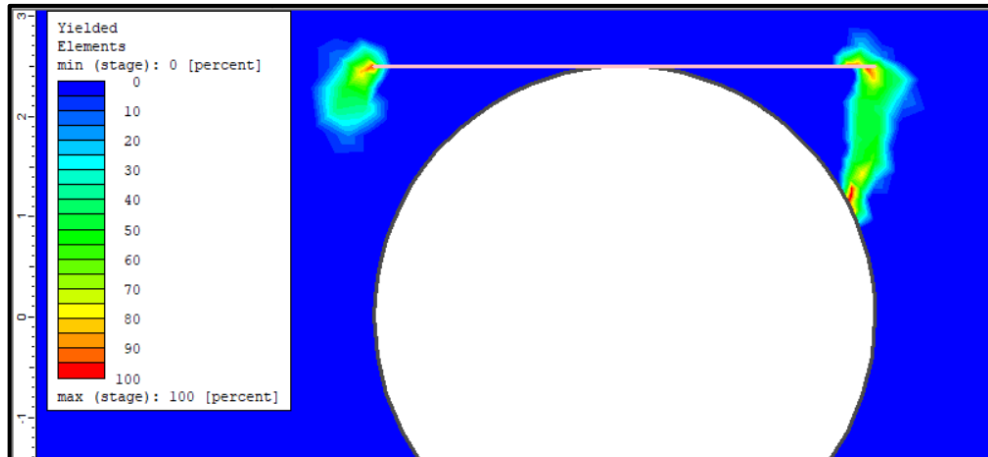


Figura 99: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=5 [\text{m}]$, $\theta=0[^\circ]$ y $d=0[\text{m}]$.

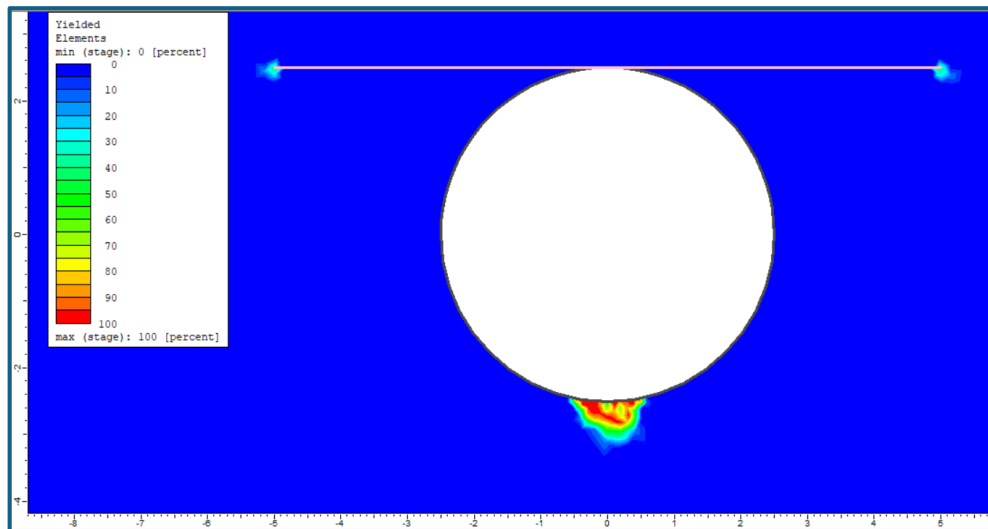


Figura 100: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=10 [\text{m}]$, $\theta=0[^\circ]$ y $d=0[\text{m}]$.

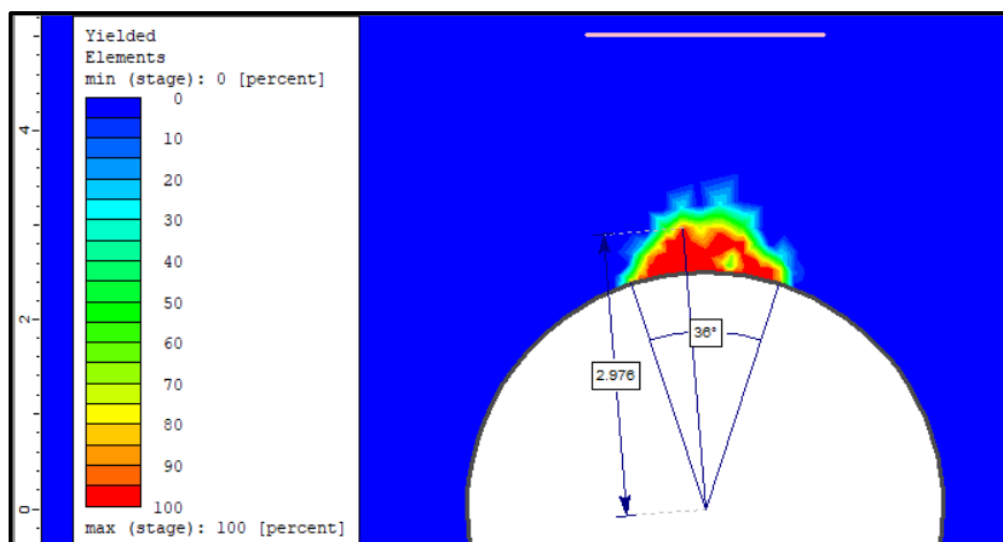


Figura 101: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=2.5$ [m], $\theta=0[^\circ]$ y $d=2.5$ [m].

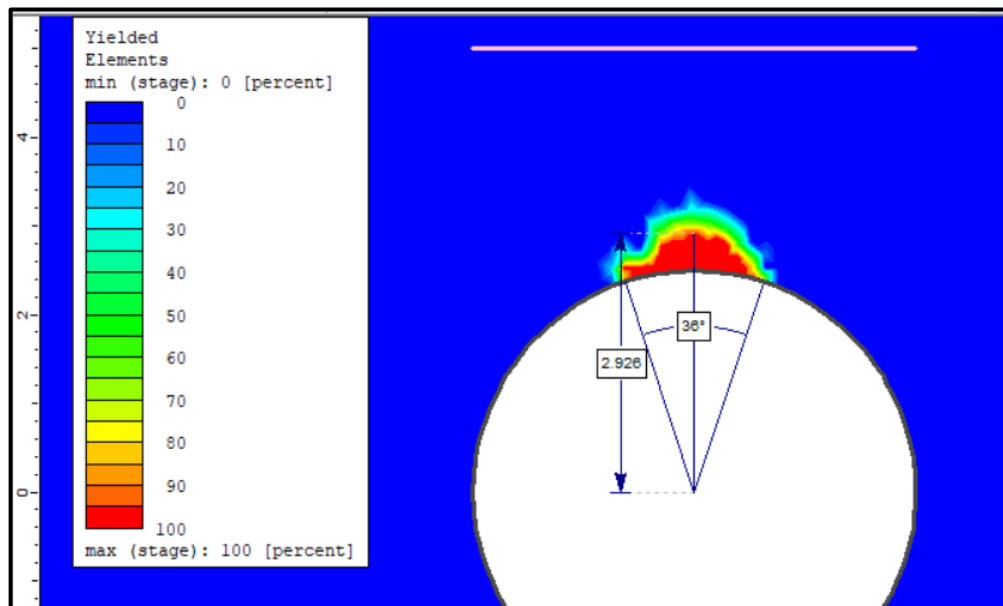


Figura 102: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=5$ [m], $\theta=0[^\circ]$ y $d=2.5$ [m].

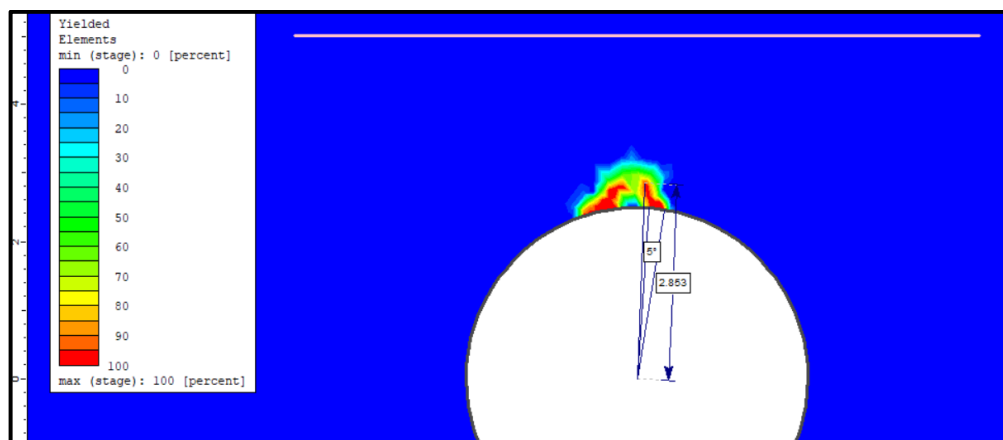


Figura 103: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=10$ [m], $\theta=0[^\circ]$ y $d=2.5$ [m].

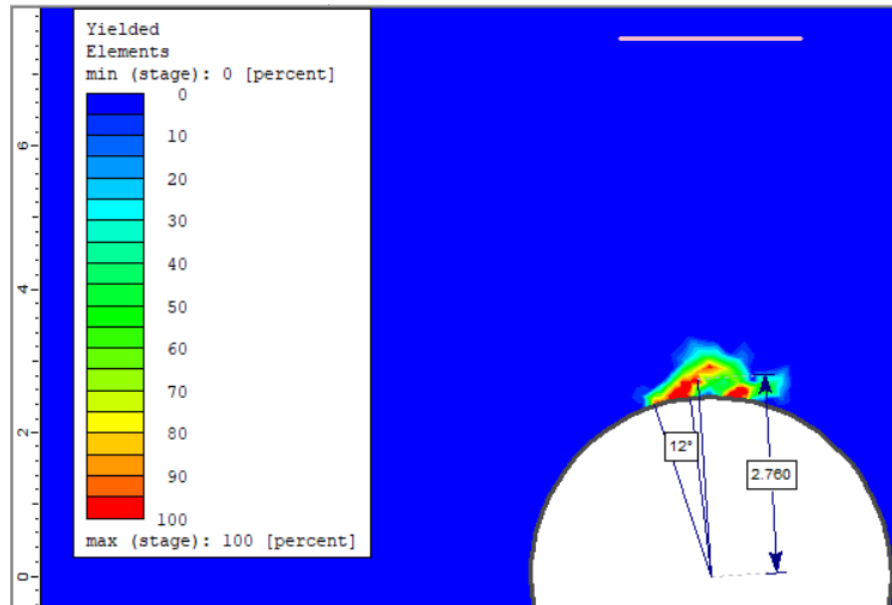


Figura 104: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=2.5$ [m], $\theta=0$ [°] y $d=5$ [m].

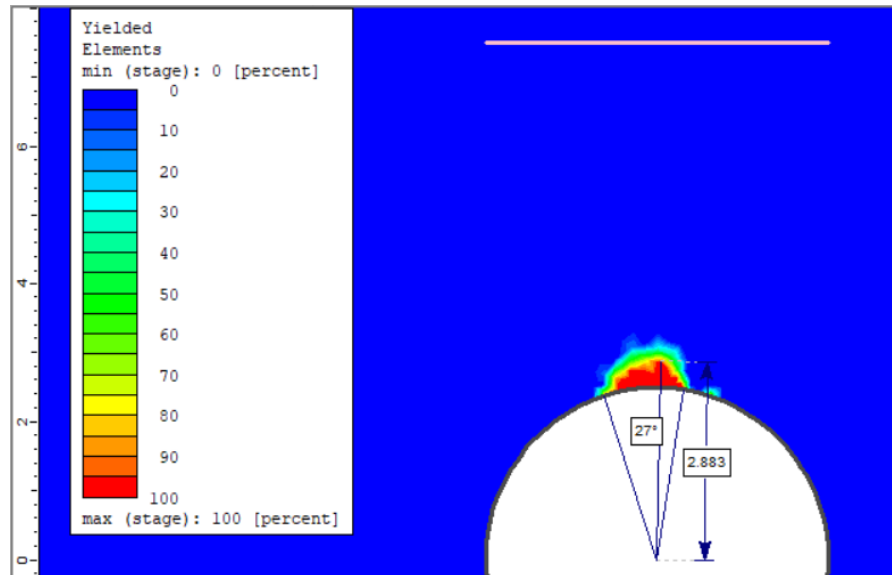


Figura 105: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=5$ [m], $\theta=0$ [°] y $d=5$ [m].

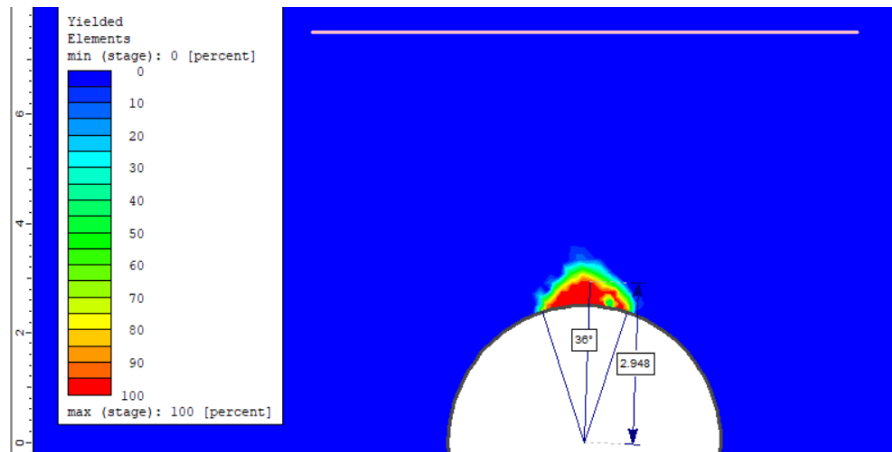


Figura 106: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=10$ [m], $\theta=0$ [°] y $d=5$ [m].

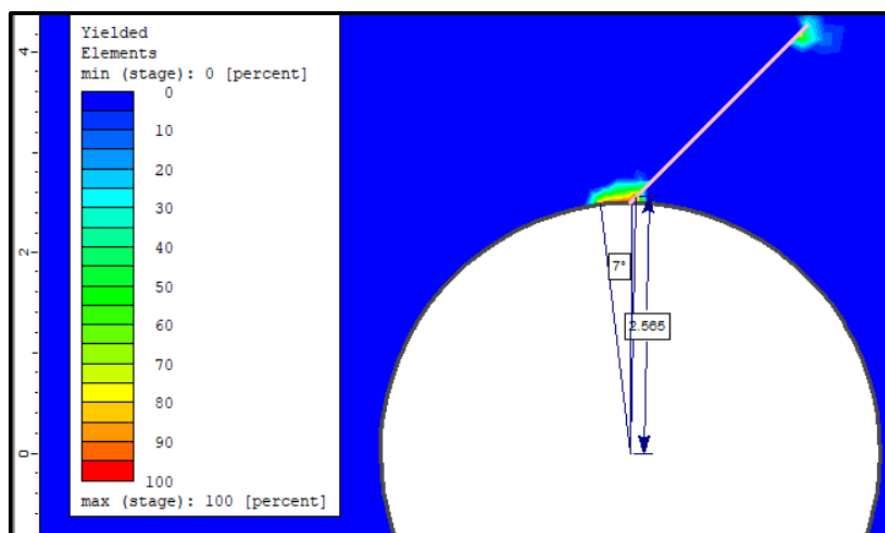


Figura 107: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=2.5$ [m], $\theta=45^\circ$ y $d=0$ [m].

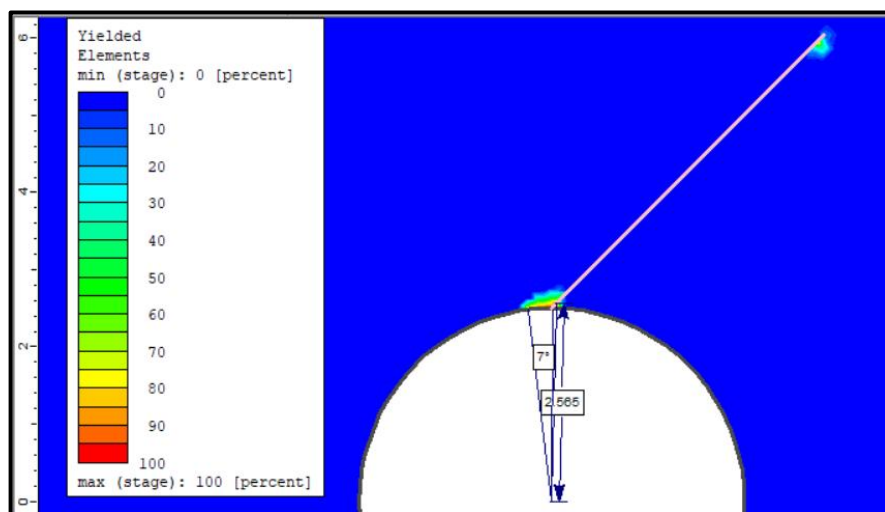


Figura 108: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=5$ [m], $\theta=45^\circ$ y $d=0$ [m].

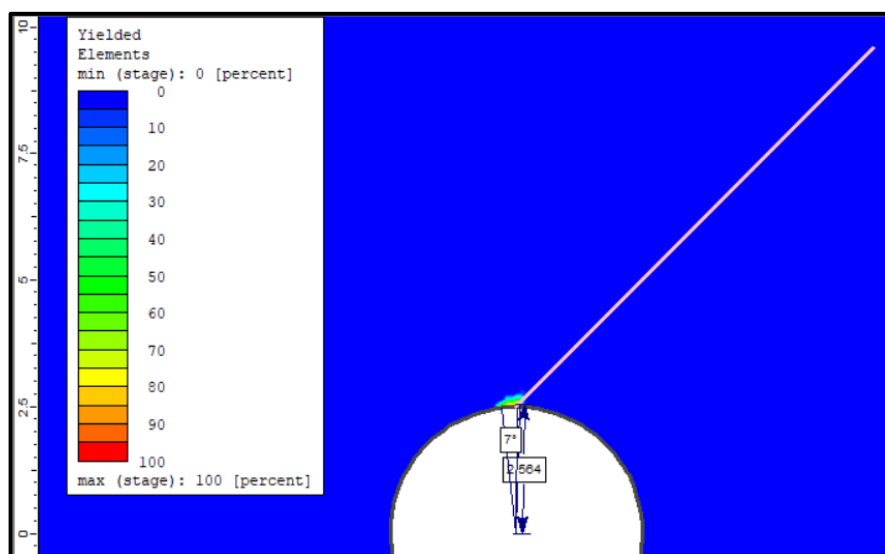


Figura 109: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=10$ [m], $\theta=45^\circ$ y $d=0$ [m].

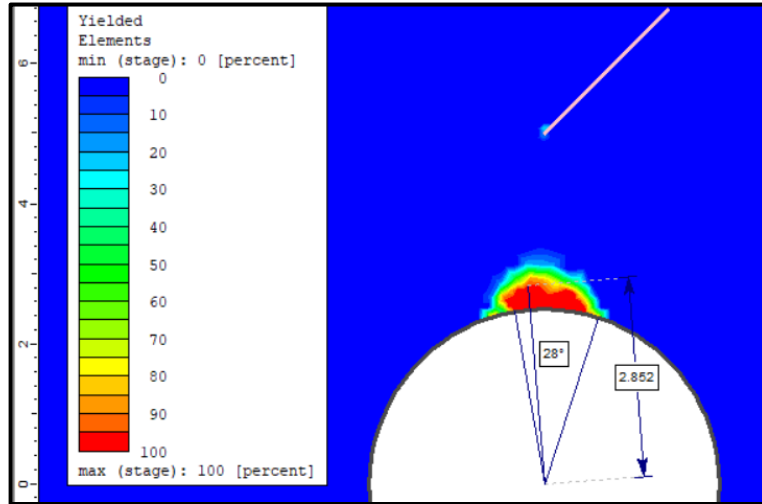


Figura 110: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=2.5$ [m], $\theta=45^\circ$ y $d=2.5$ [m].

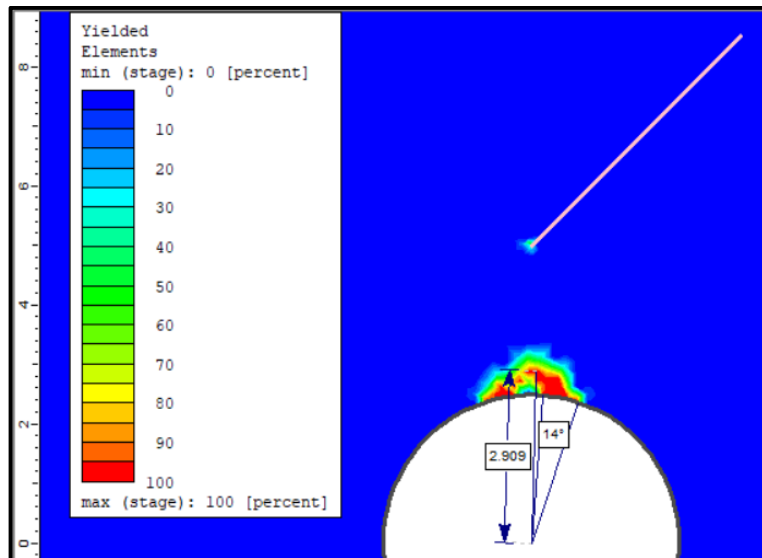


Figura 111: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=5$ [m], $\theta=45^\circ$ y $d=2.5$ [m].

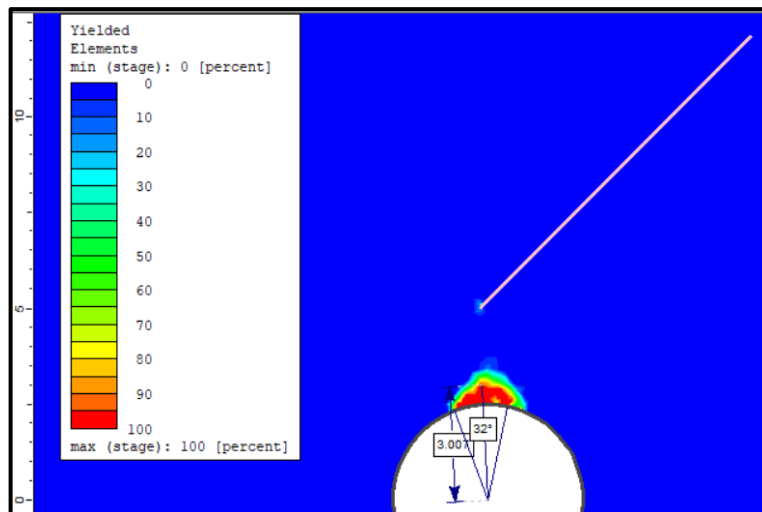


Figura 112: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=10$ [m], $\theta=45^\circ$ y $d=2.5$ [m].

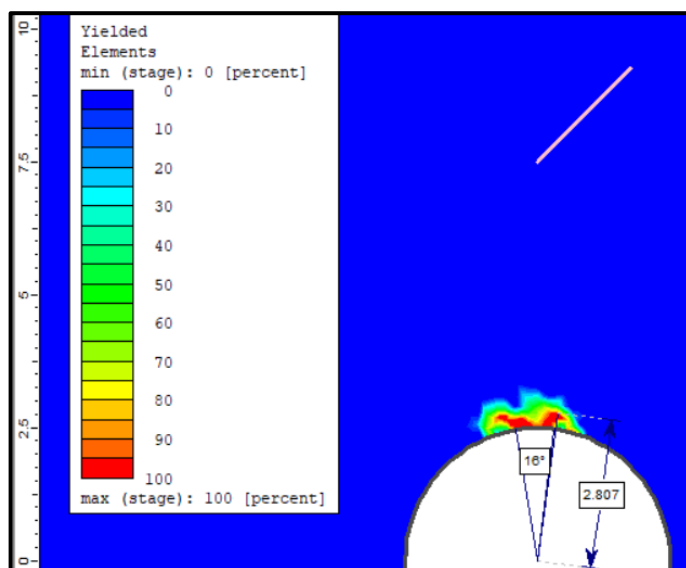


Figura 113: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=2.5$ [m], $\theta=45^\circ$ y $d=5$ [m].

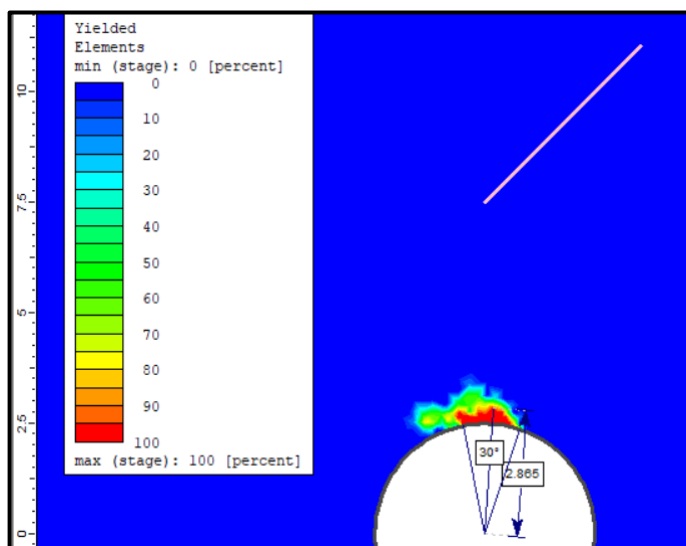


Figura 114: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=5$ [m], $\theta=45^\circ$ y $d=5$ [m].

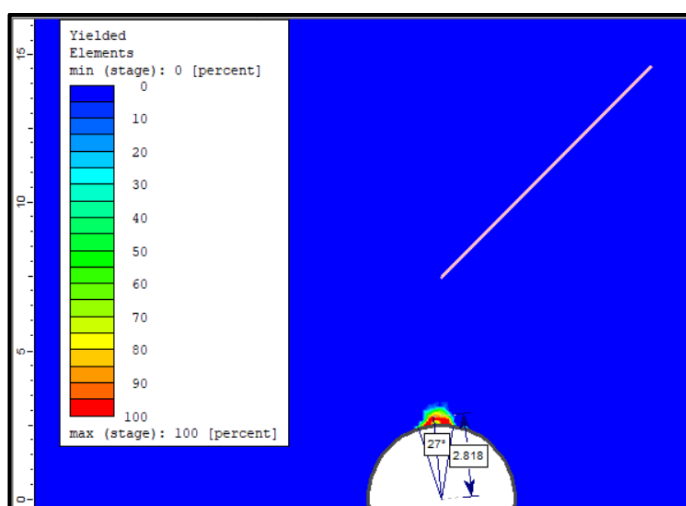


Figura 115: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=10$ [m], $\theta=45^\circ$ y $d=5$ [m].

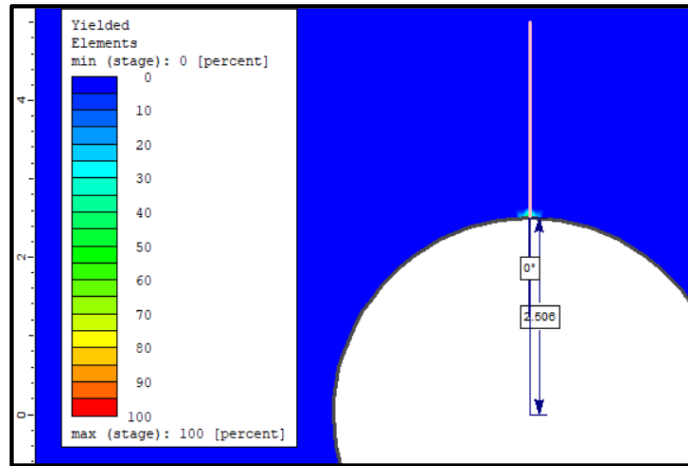


Figura 116: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=2.5$ [m], $\theta=90[^\circ]$ y $d=0$ [m].

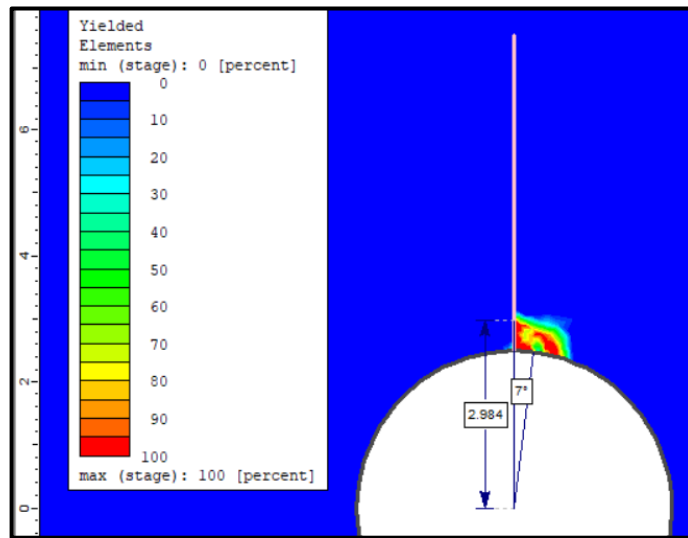


Figura 117: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=5$ [m], $\theta=90[^\circ]$ y $d=0$ [m].

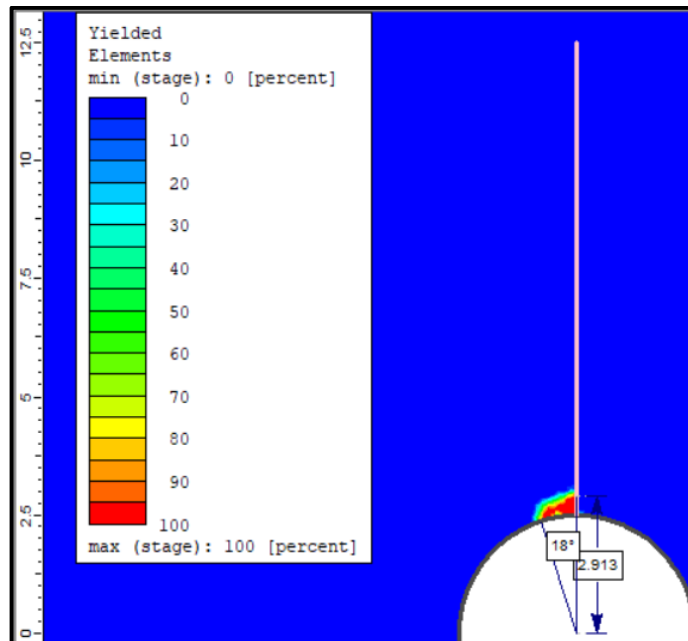


Figura 118: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=10$ [m], $\theta=90[^\circ]$ y $d=0$ [m].

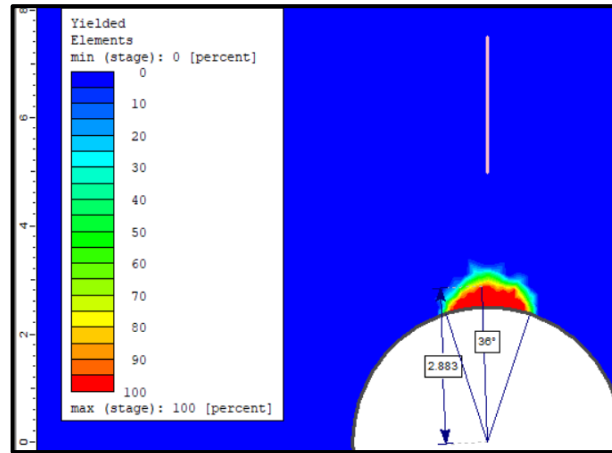


Figura 119: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=2.5$ [m], $\theta=90^\circ$ y $d=2.5$ [m].

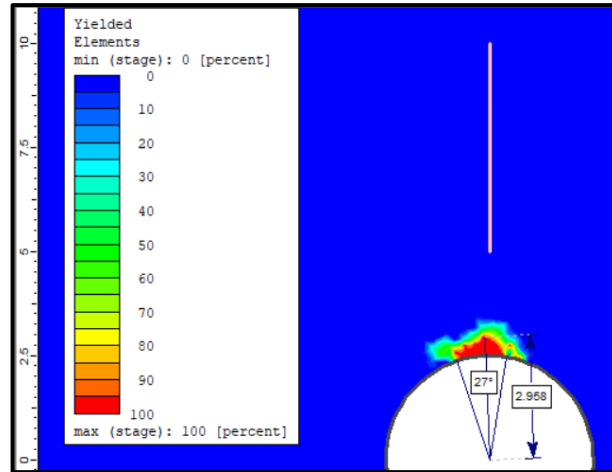


Figura 120: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=5$ [m], $\theta=90^\circ$ y $d=2.5$ [m].

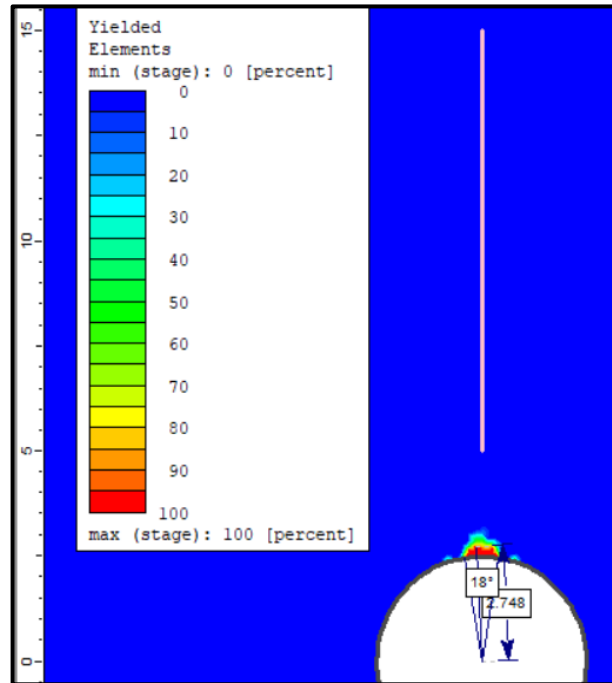


Figura 121: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=10$ [m], $\theta=90^\circ$ y $d=2.5$ [m].

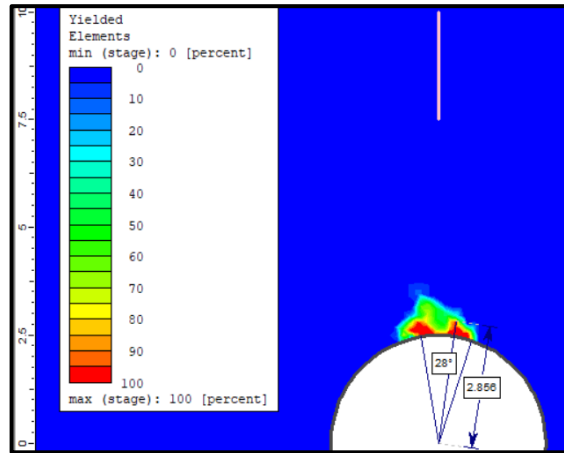


Figura 122: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=2.5$ [m], $\theta=90[^\circ]$ y $d=5$ [m].

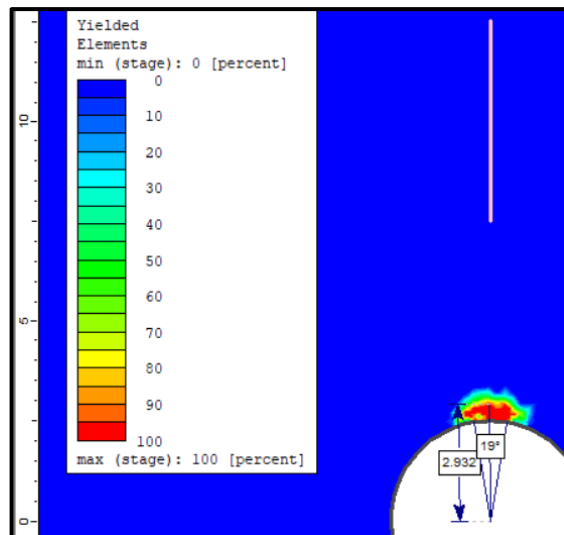


Figura 123: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=5$ [m], $\theta=90[^\circ]$ y $d=5$ [m].

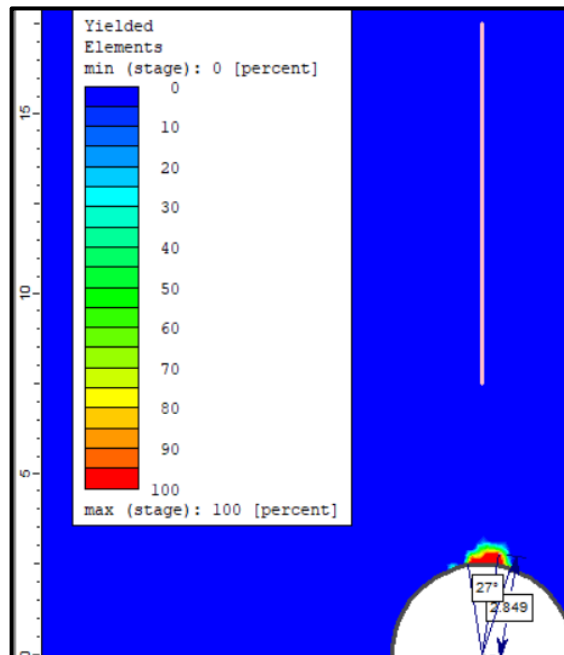


Figura 124: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=10$ [m], $\theta=90[^\circ]$ y $d=5$ [m].

9.2.2 Escenarios simulados en zona de la pared

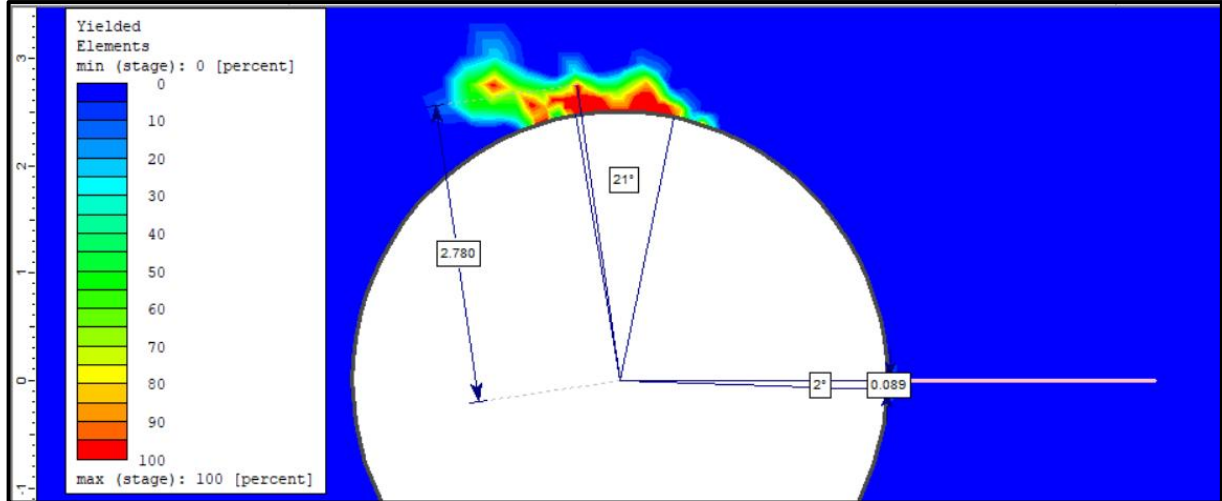


Figura 125: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=2.5$ [m], $\theta=0$ [°] y $d=0$ [m].

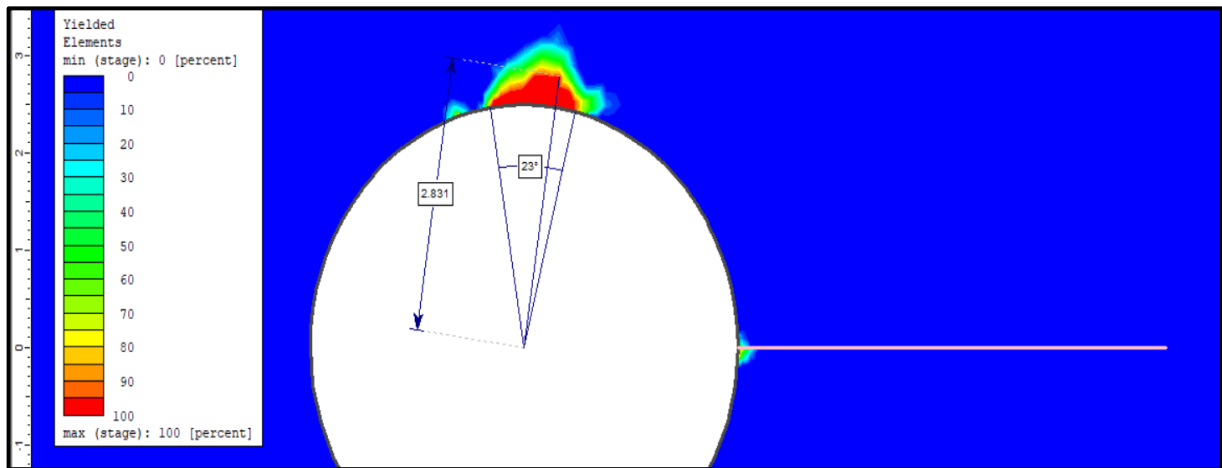


Figura 126: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=5$ [m], $\theta=0$ [°] y $d=0$ [m].

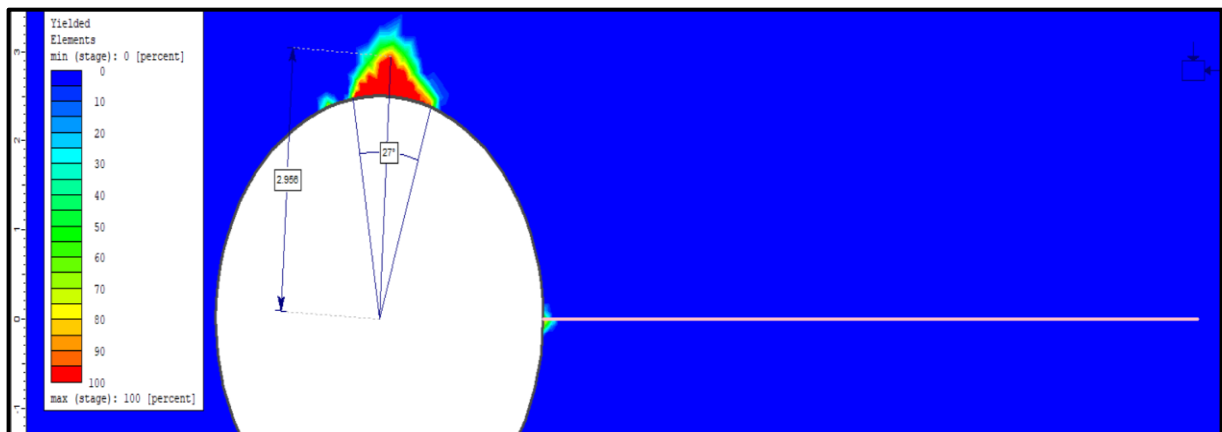


Figura 127: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=10$ [m], $\theta=0$ [°] y $d=0$ [m].

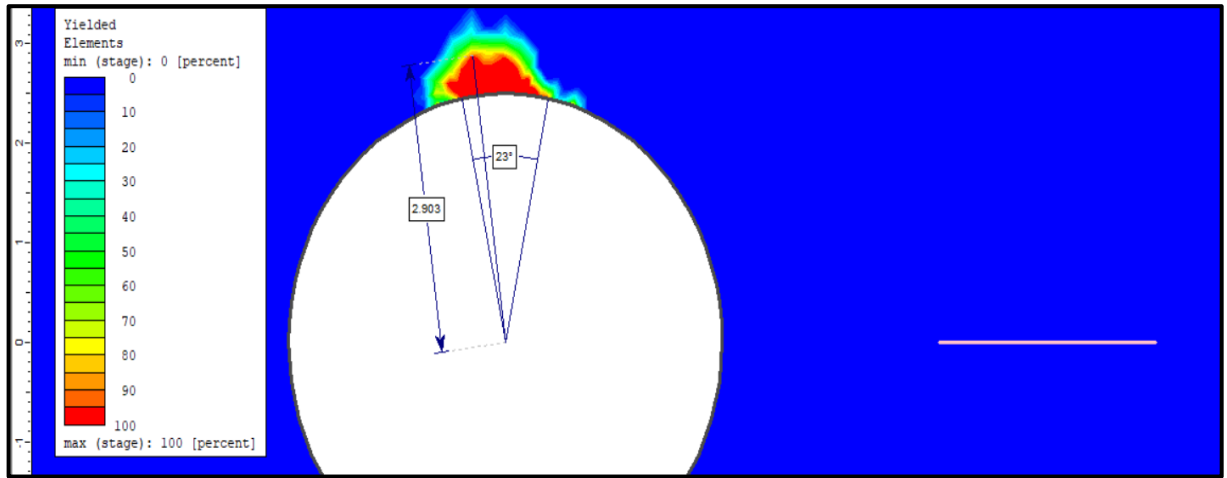


Figura 128: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=2.5$ [m], $\theta=0[^\circ]$ y $d=2.5$ [m].

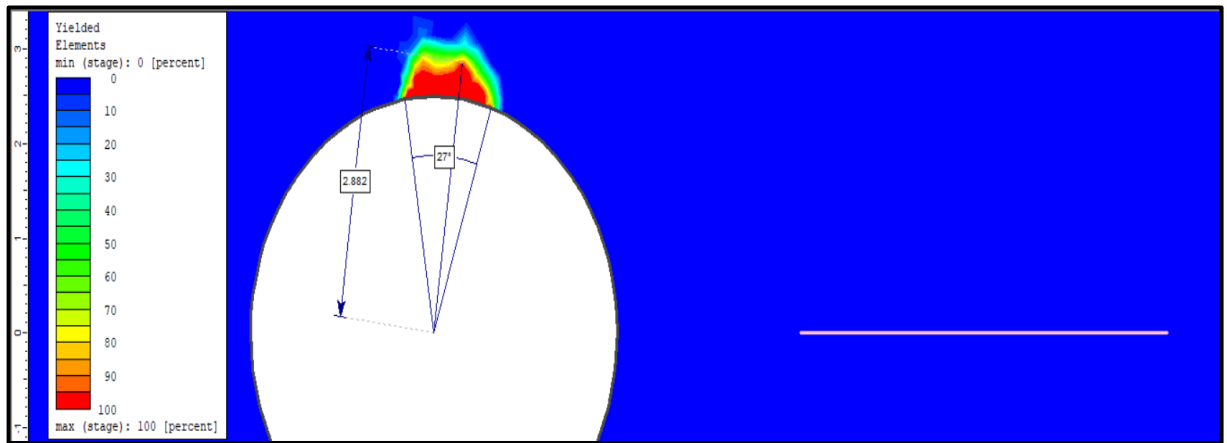


Figura 129: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=5$ [m], $\theta=0[^\circ]$ y $d=2.5$ [m].

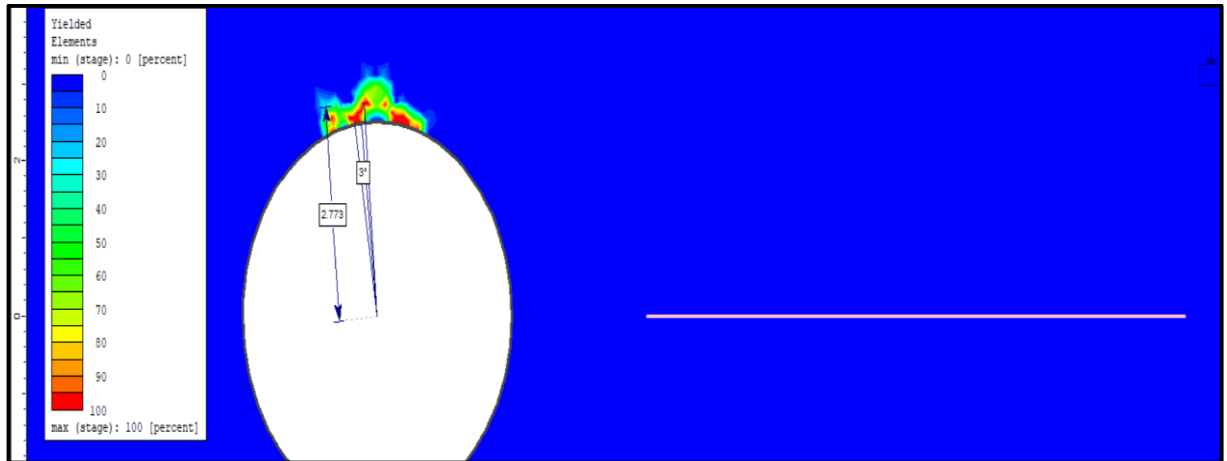


Figura 130: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=10$ [m], $\theta=0[^\circ]$ y $d=2.5$ [m].

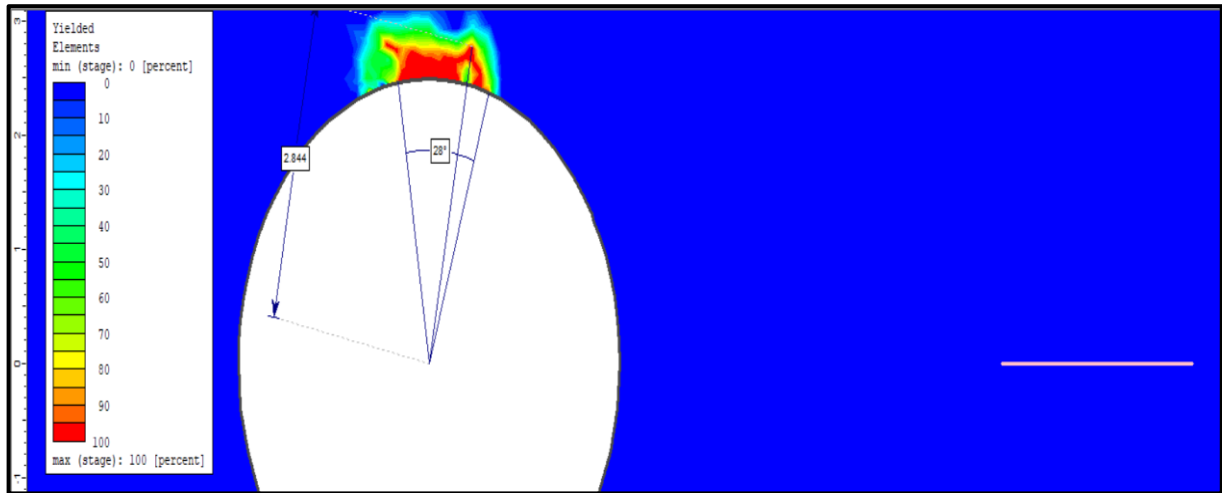


Figura 131: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=2.5$ [m], $\theta=0[^\circ]$ y $d=5$ [m].

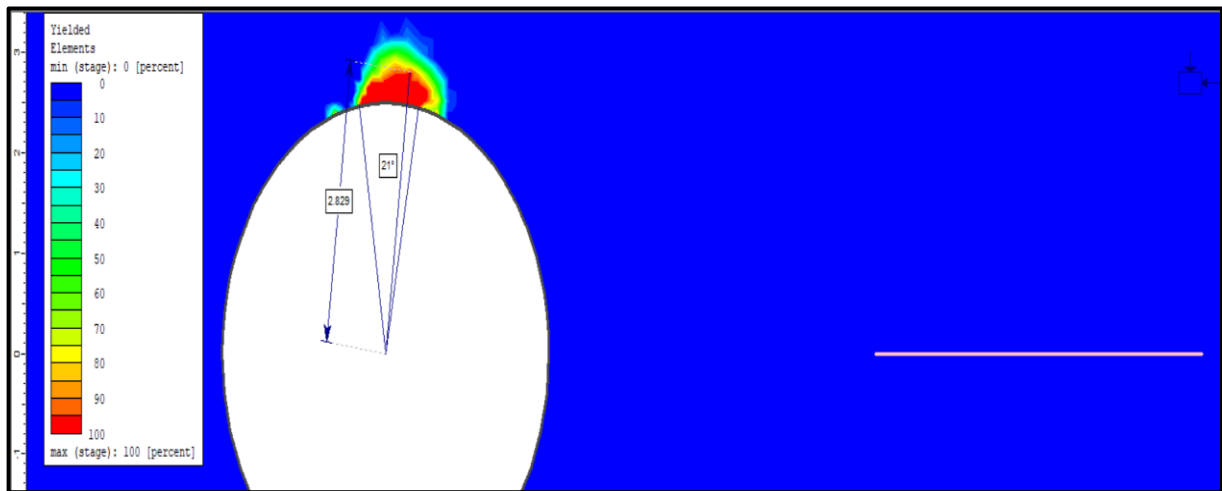


Figura 132: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=5$ [m], $\theta=0[^\circ]$ y $d=5$ [m].

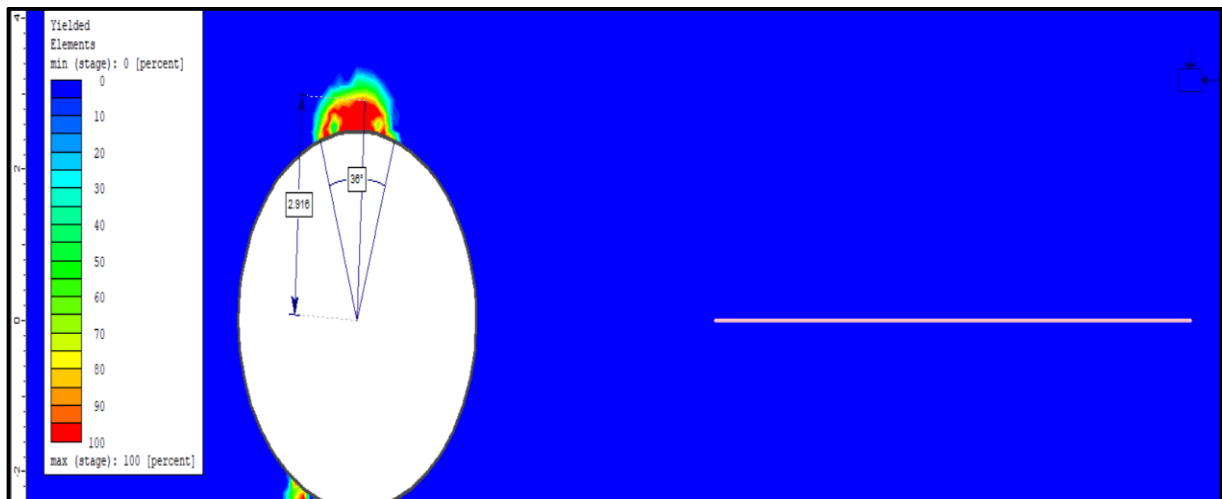


Figura 133: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=10$ [m], $\theta=0[^\circ]$ y $d=5$ [m].

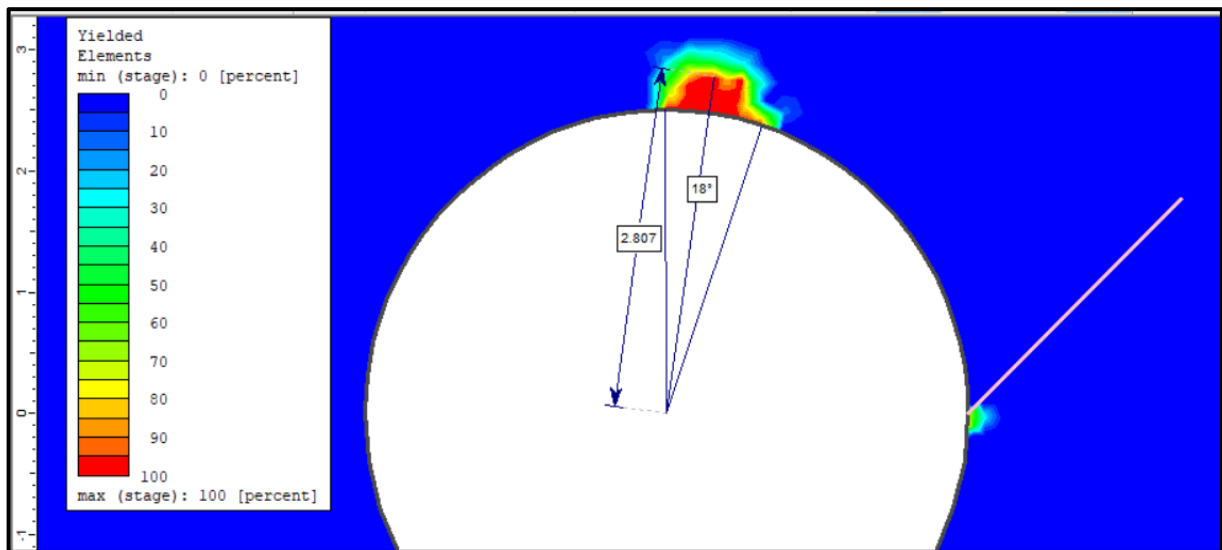


Figura 134: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=2.5$ [m], $\theta=45$ [°] y $d=0$ [m].

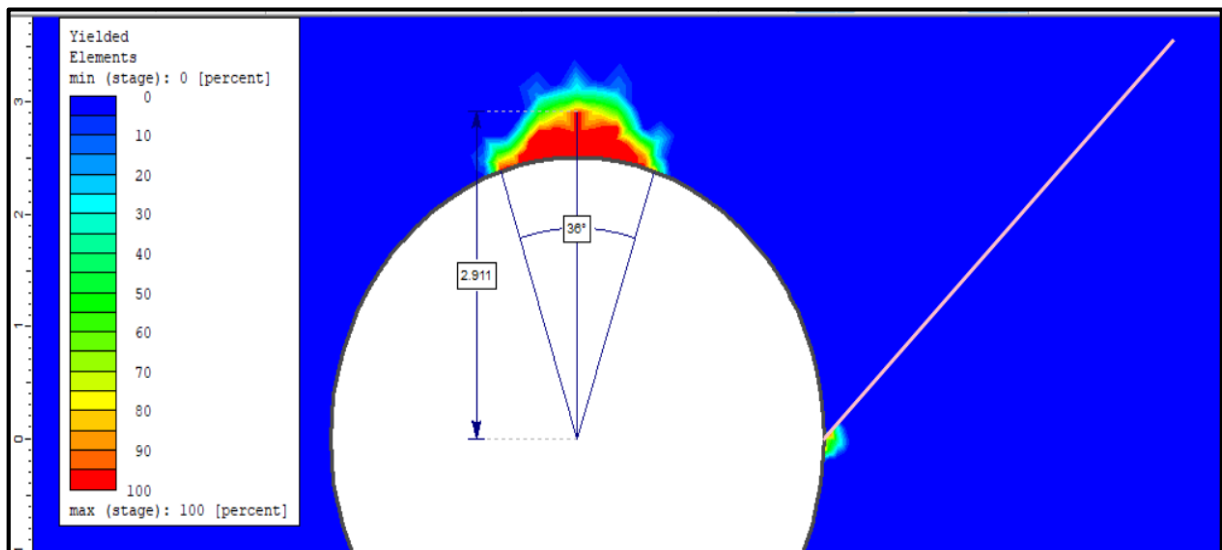


Figura 135: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=5$ [m], $\theta=45$ [°] y $d=0$ [m].

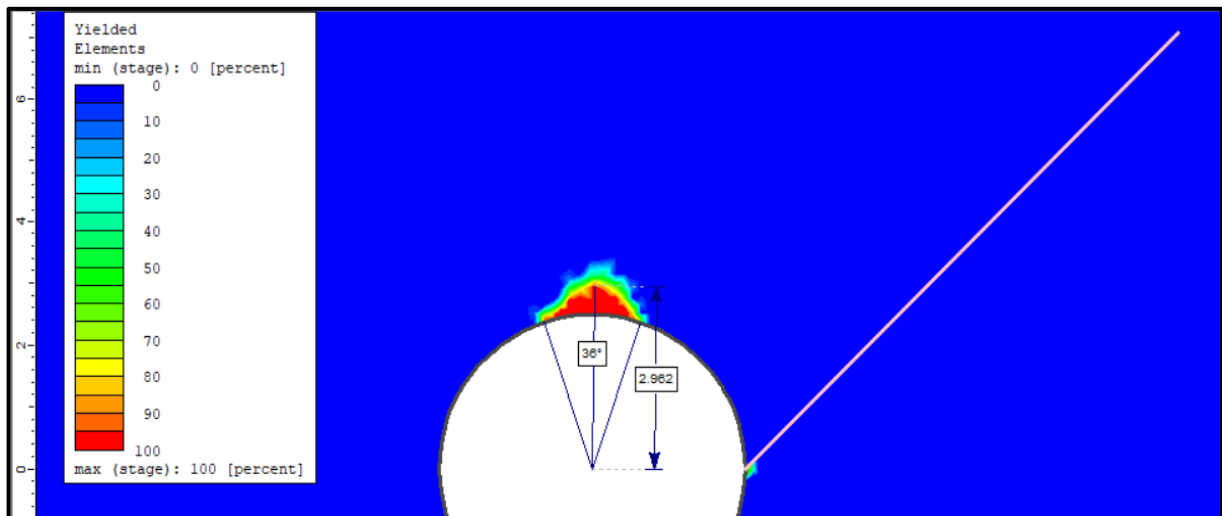


Figura 136: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=10$ [m], $\theta=45$ [°] y $d=0$ [m].

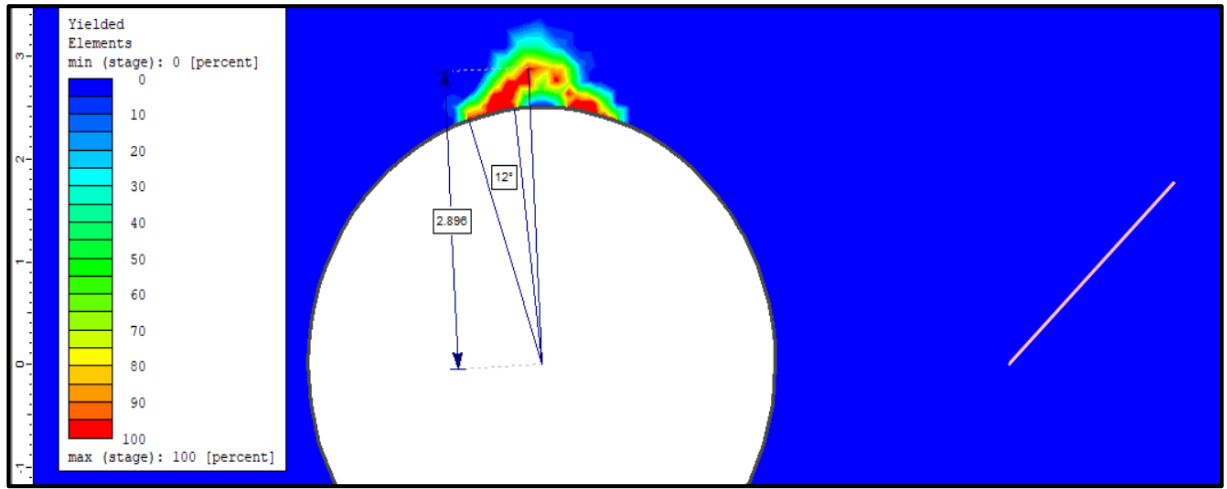


Figura 137: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=2.5$ [m], $\theta=45^\circ$ y $d=2.5$ [m].

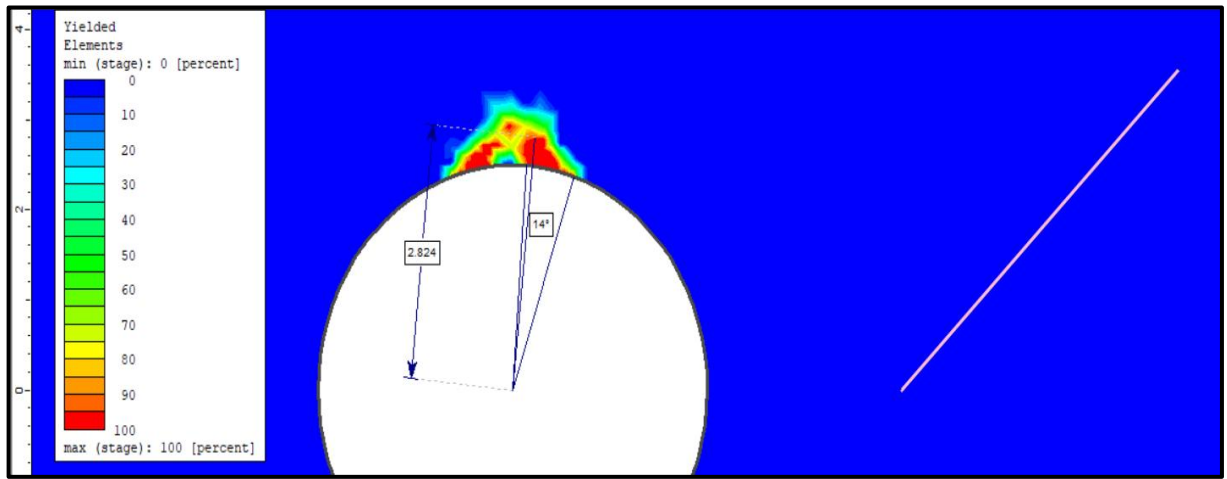


Figura 138: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=5$ [m], $\theta=45^\circ$ y $d=2.5$ [m].

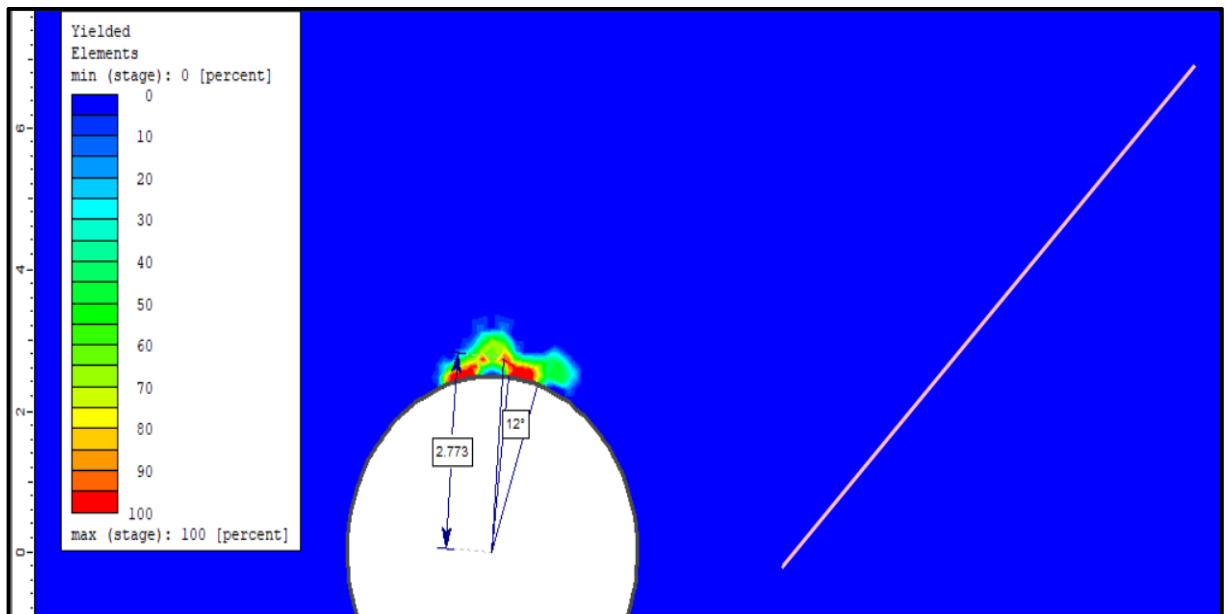


Figura 139: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=10$ [m], $\theta=45^\circ$ y $d=2.5$ [m].

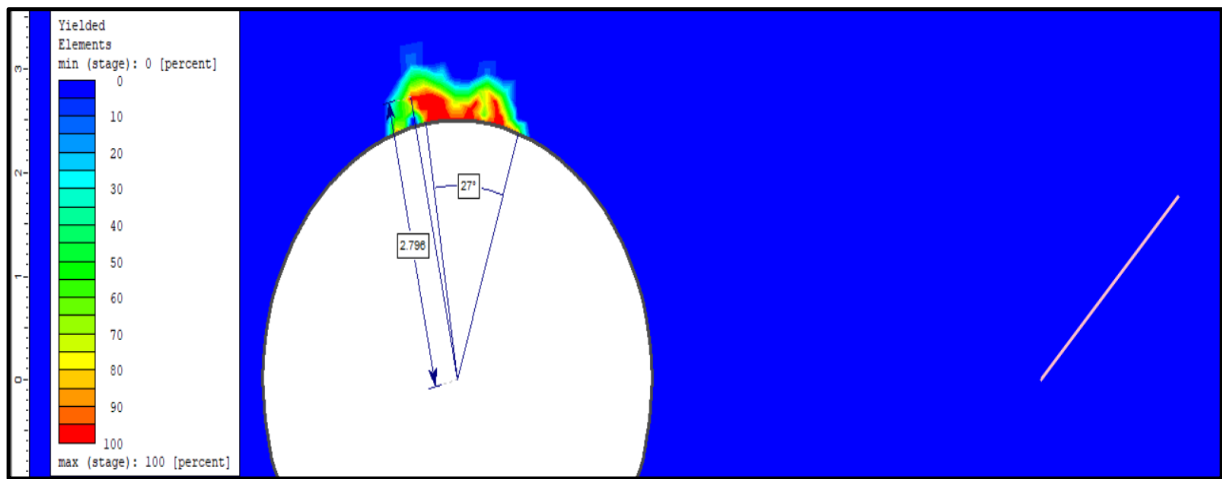


Figura 140: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=2.5$ [m], $\theta=45[^\circ]$ y $d=5$ [m].

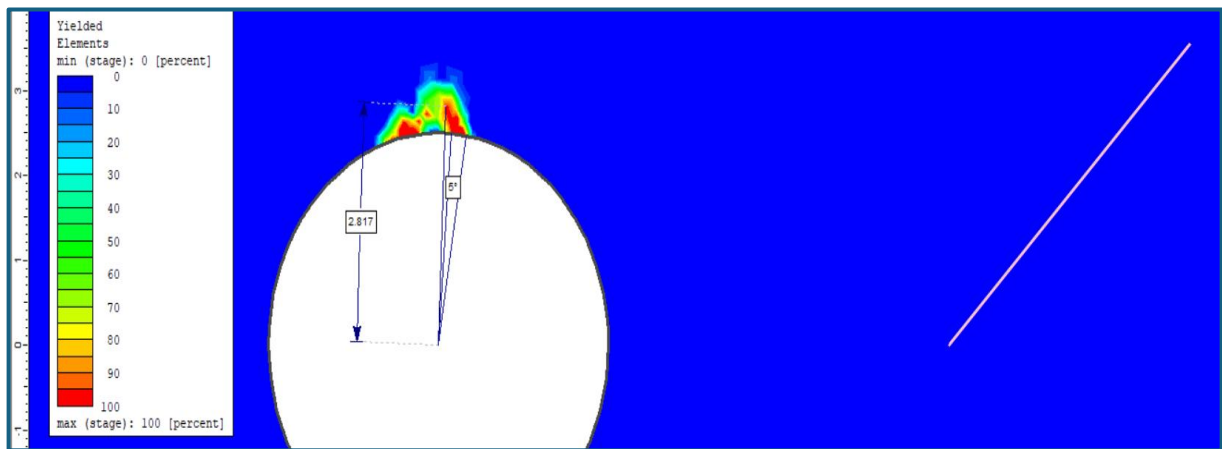


Figura 141: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=5$ [m], $\theta=45[^\circ]$ y $d=5$ [m].

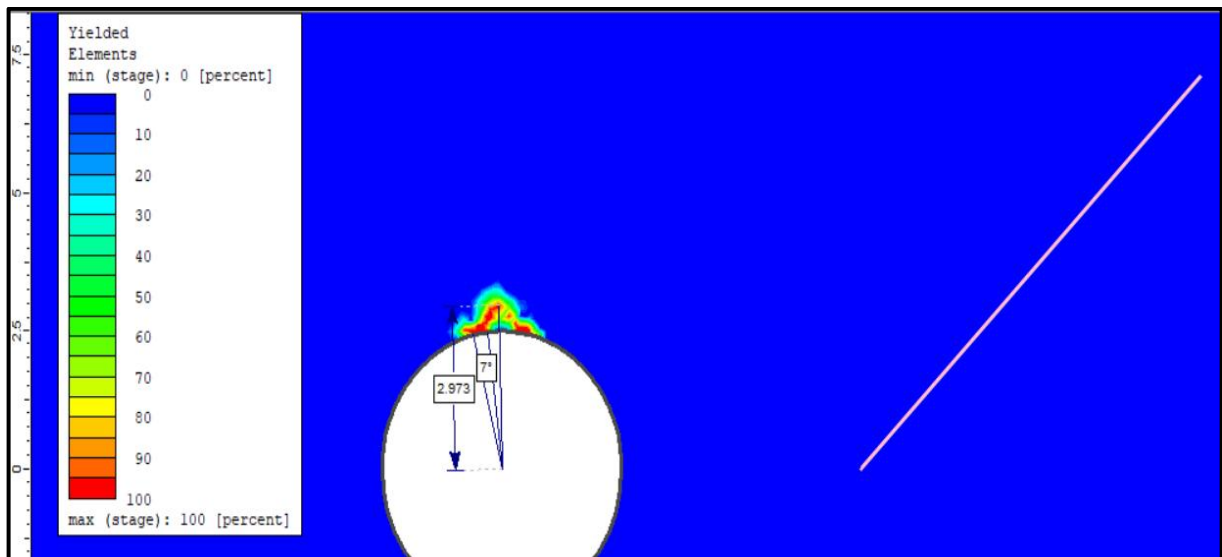


Figura 142: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=10$ [m], $\theta=45[^\circ]$ y $d=5$ [m].

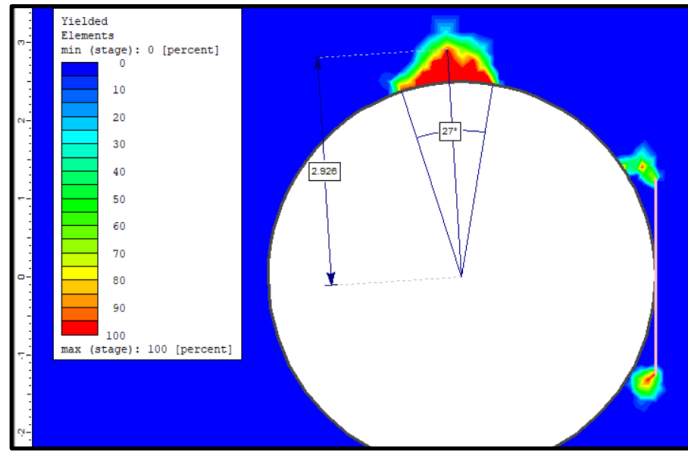


Figura 143: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=2.5$ [m], $\theta=90$ [°] y $d=0$ [m].

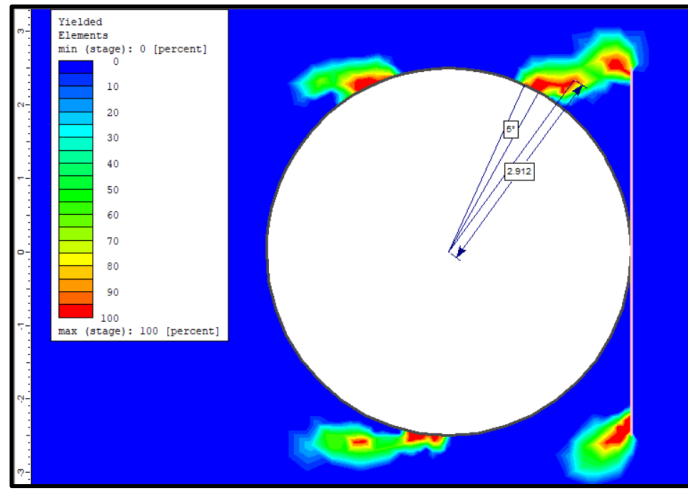


Figura 144: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=5$ [m], $\theta=90$ [°] y $d=0$ [m].

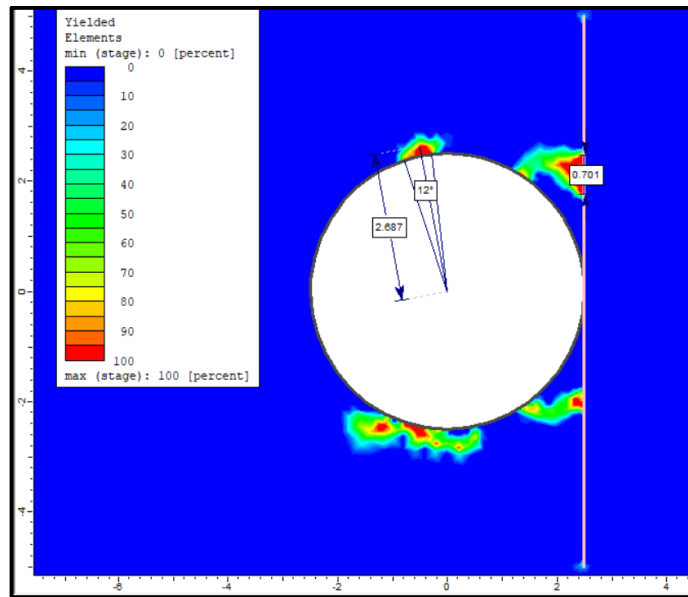


Figura 145: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=10$ [m], $\theta=90$ [°] y $d=0$ [m].

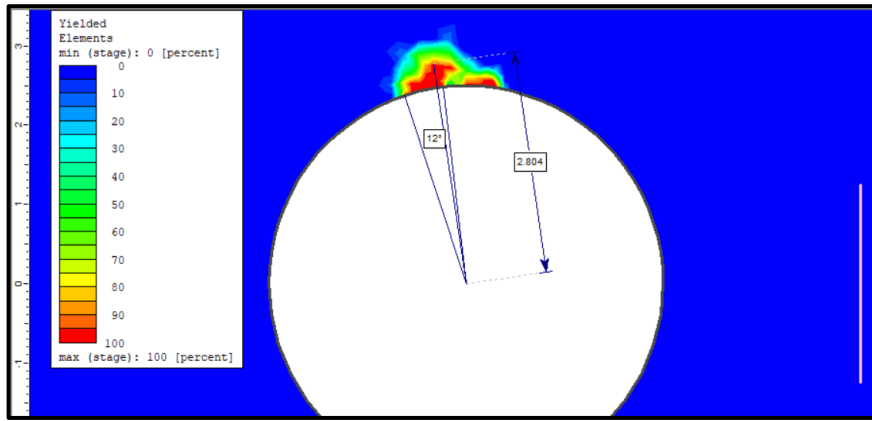


Figura 146: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=2.5$ [m], $\theta=90^\circ$ y $d=2.5$ [m].

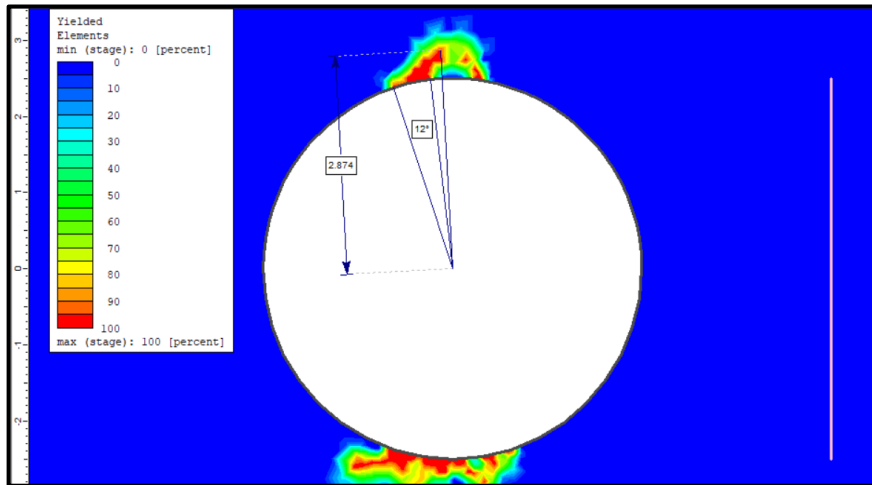


Figura 147: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=5$ [m], $\theta=90^\circ$ y $d=2.5$ [m].

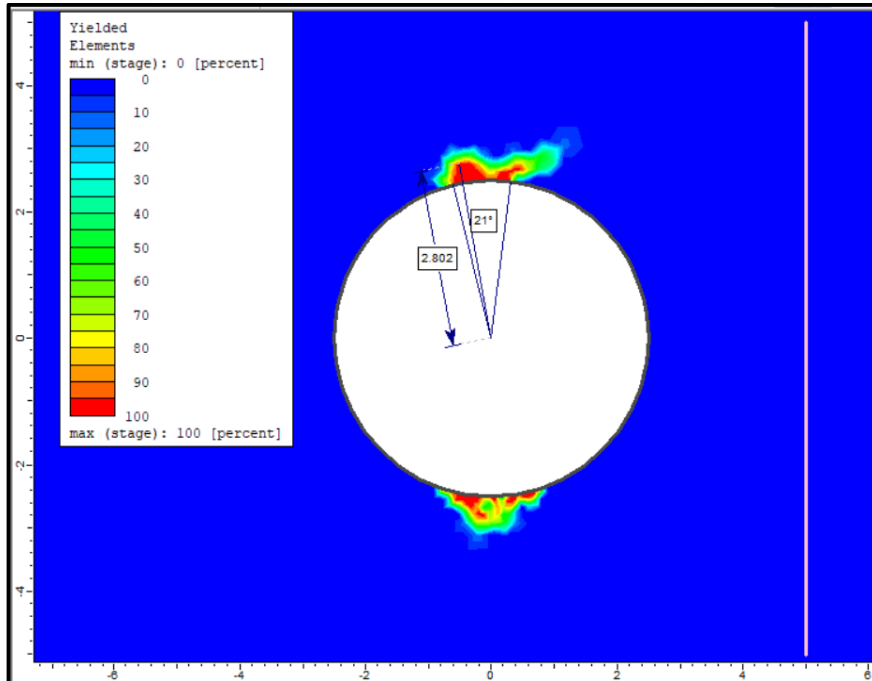


Figura 148: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=10$ [m], $\theta=90^\circ$ y $d=2.5$ [m].

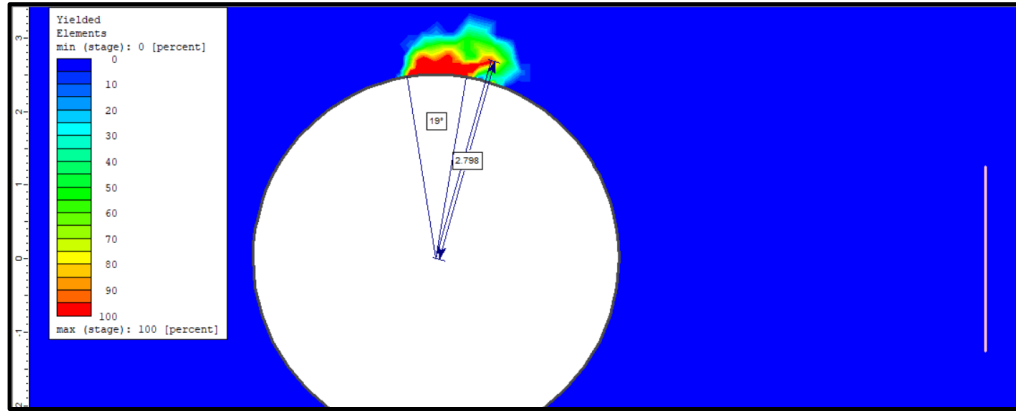


Figura 149: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=2.5$ [m], $\theta=90^\circ$ y $d=5$ [m].

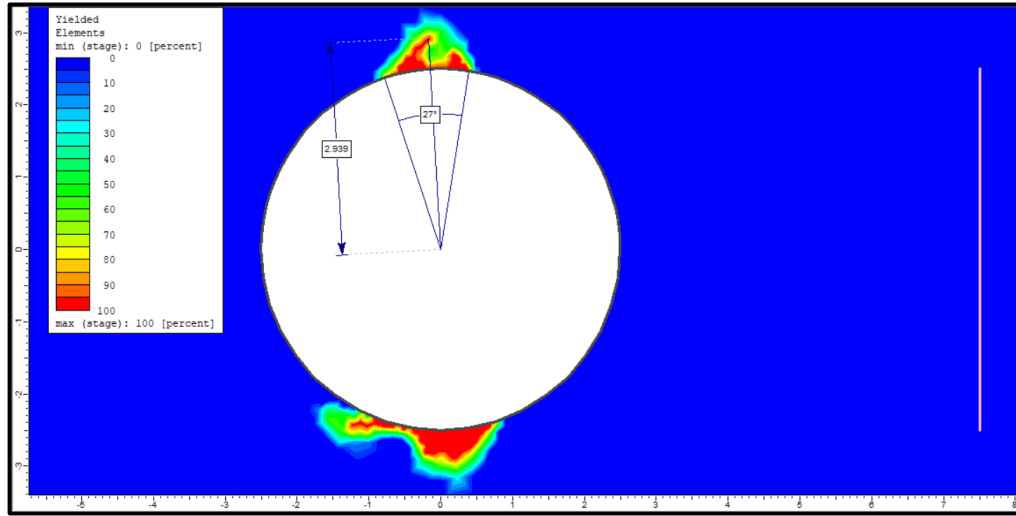


Figura 150: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=5$ [m], $\theta=90^\circ$ y $d=5$ [m].

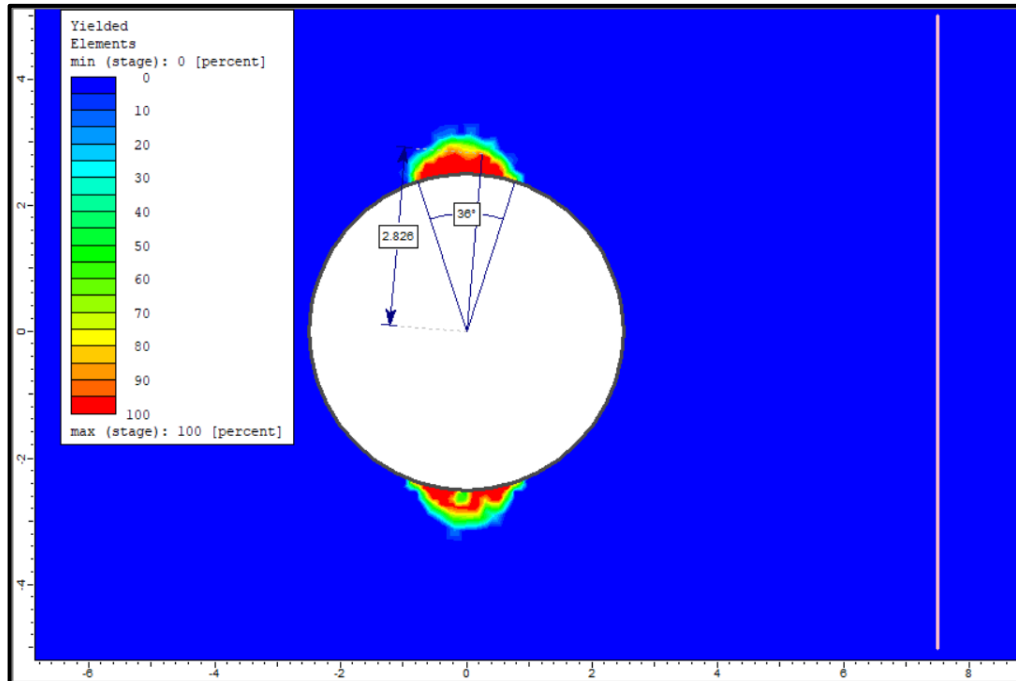


Figura 151: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=10$ [m], $\theta=90^\circ$ y $d=5$ [m].

9.2.3 Escenarios simulados en zona intermedia

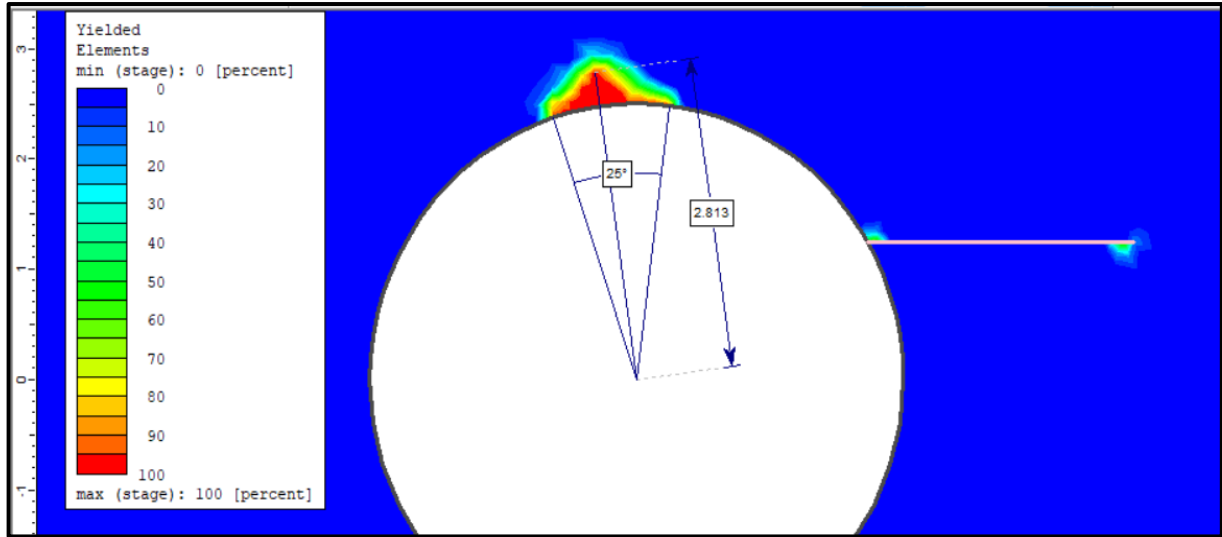


Figura 152: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=2.5$ [m], $\theta=0[^\circ]$ y $d=0$ [m].

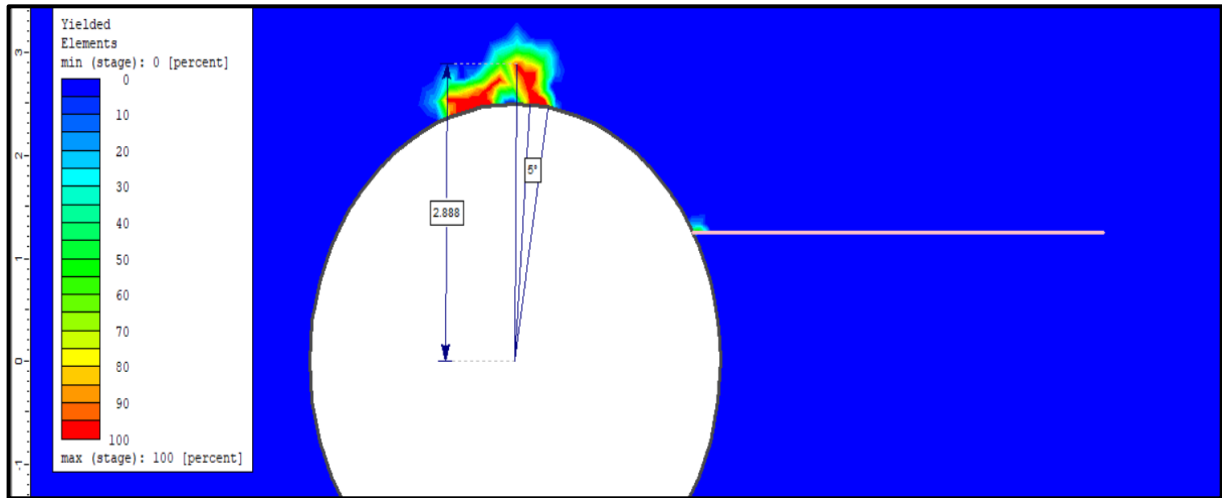


Figura 153: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=5$ [m], $\theta=0[^\circ]$ y $d=0$ [m].

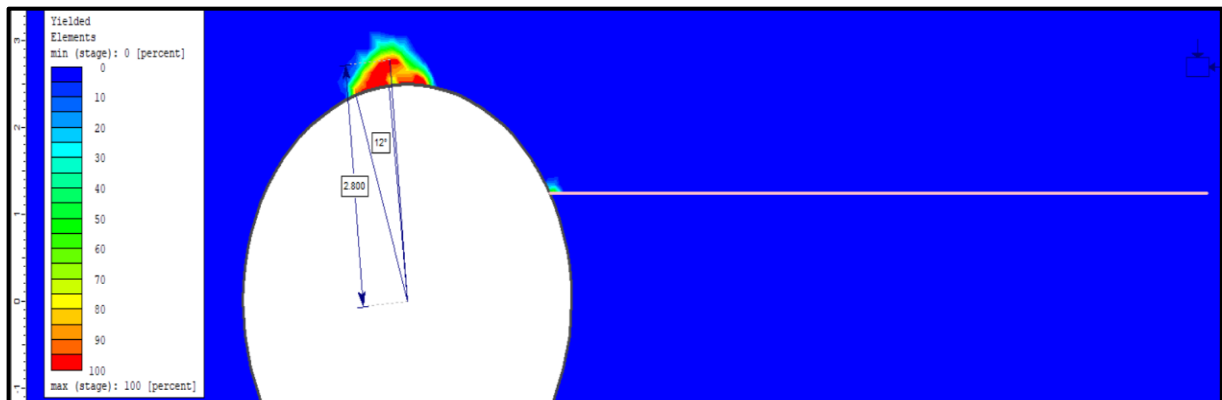


Figura 154: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=10$ [m], $\theta=0[^\circ]$ y $d=0$ [m].

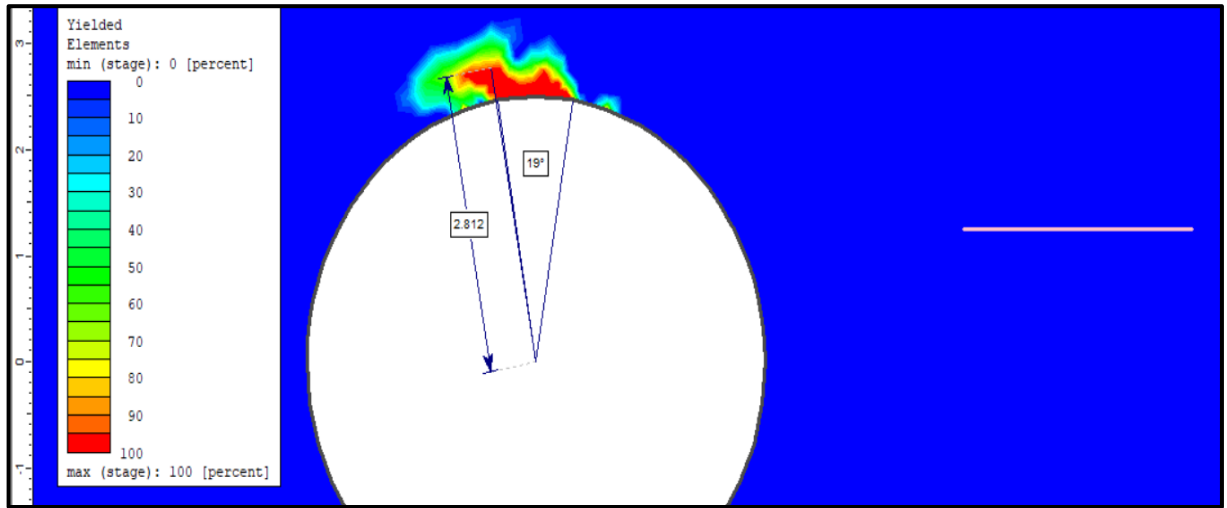


Figura 155: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=2.5$ [m], $\theta=0[^\circ]$ y $d=2.5$ [m].

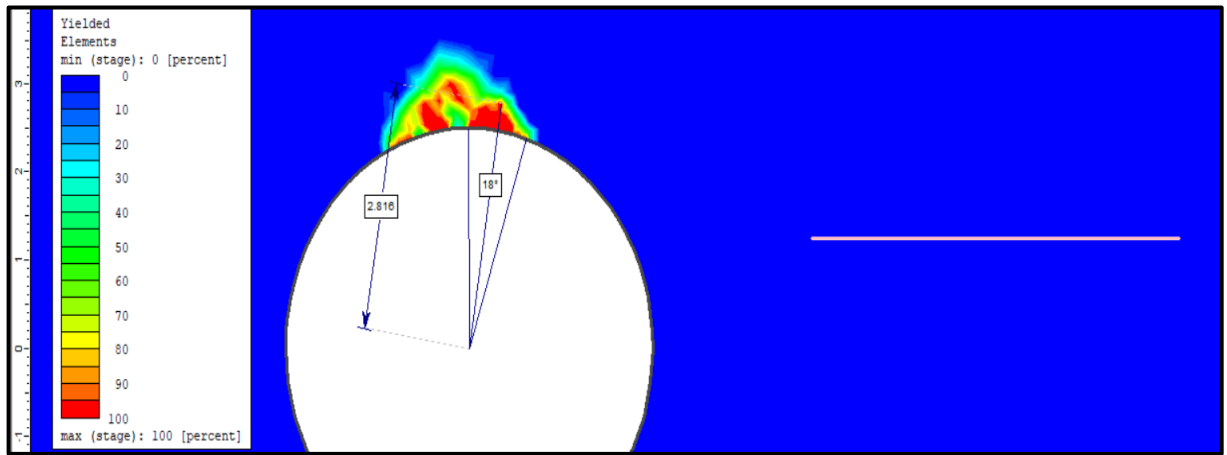


Figura 156: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=5$ [m], $\theta=0[^\circ]$ y $d=2.5$ [m].

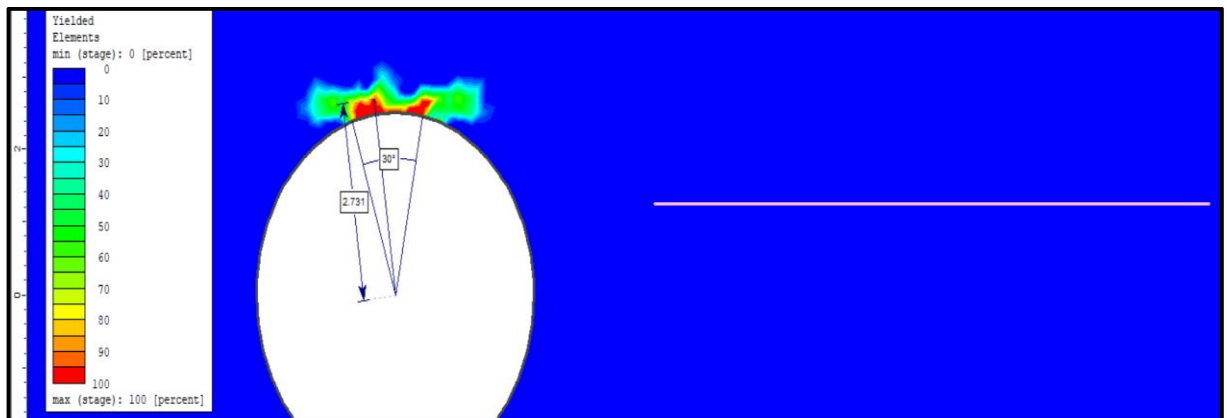


Figura 157: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=10$ [m], $\theta=0[^\circ]$ y $d=2.5$ [m].

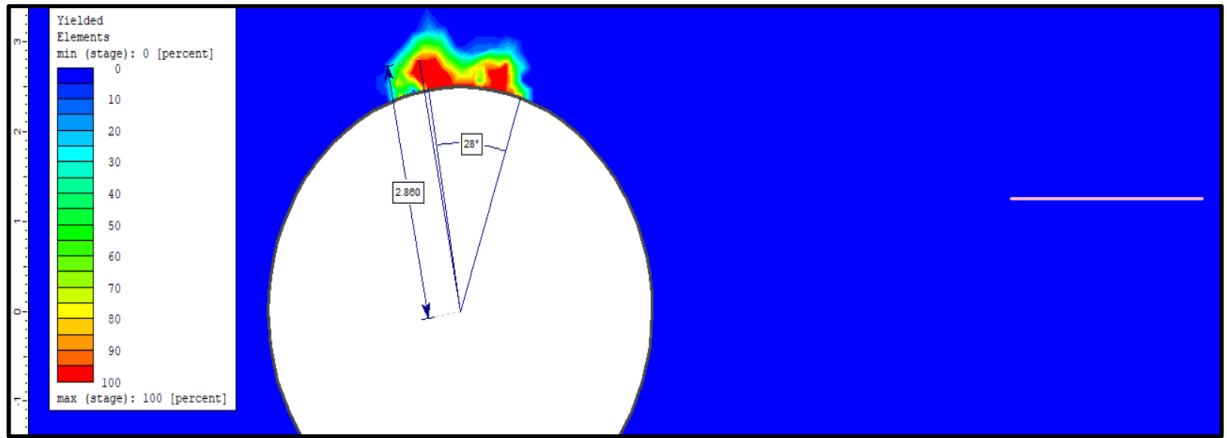


Figura 158: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=2.5$ [m], $\theta=0$ [°] y $d=5$ [m].

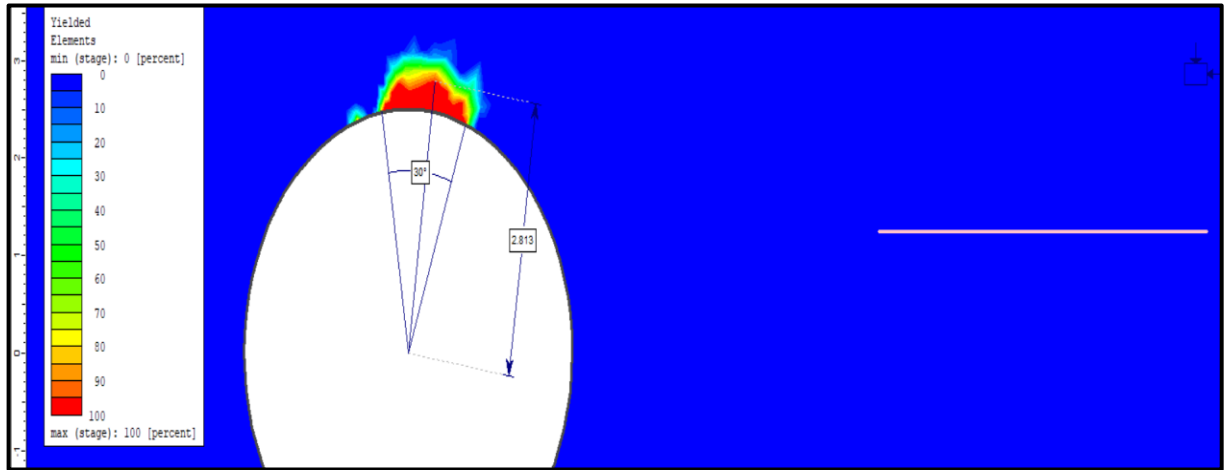


Figura 159: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=5$ [m], $\theta=0$ [°] y $d=5$ [m].

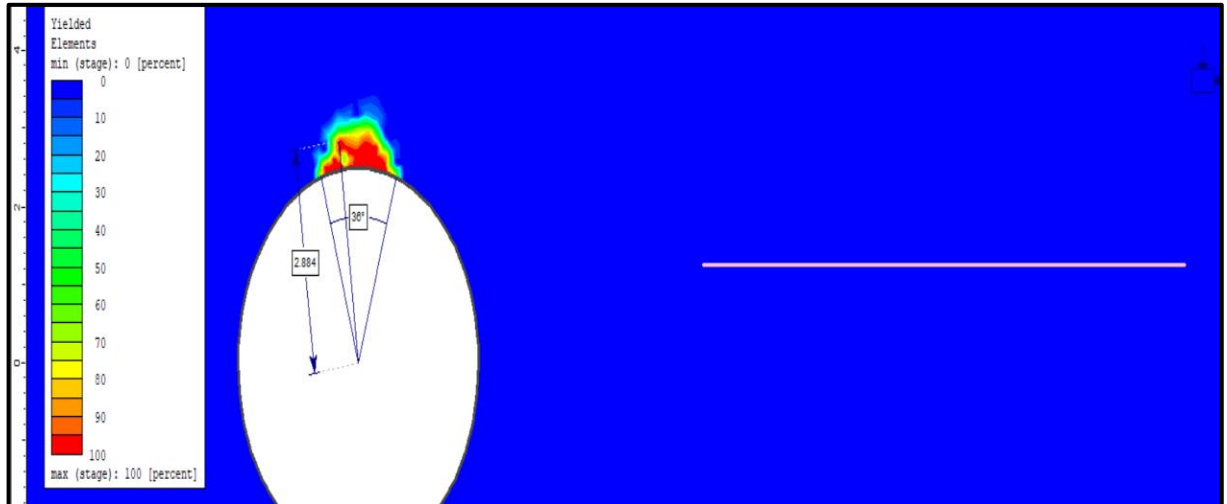


Figura 160: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=10$ [m], $\theta=0$ [°] y $d=5$ [m].

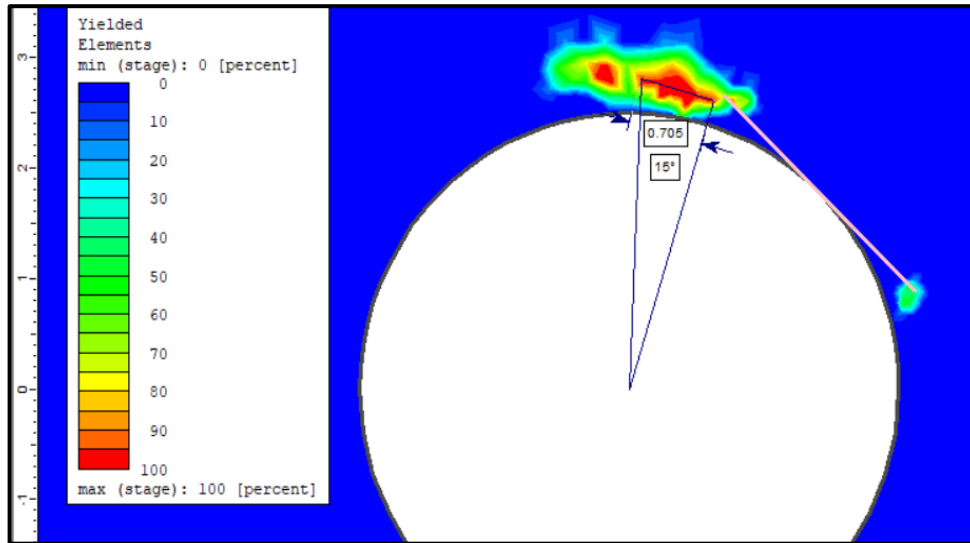


Figura 161: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=2.5$ [m], $\theta=45^\circ$ y $d=0$ [m].

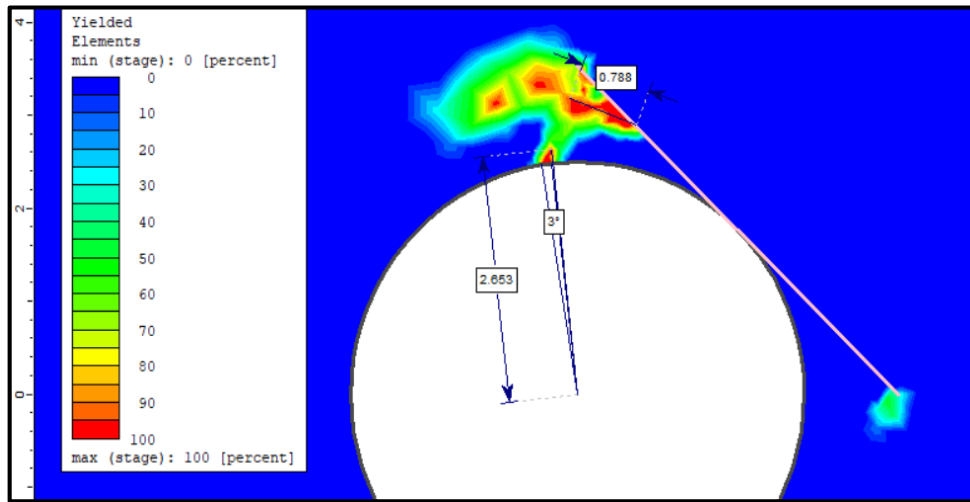


Figura 162: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=5$ [m], $\theta=45^\circ$ y $d=0$ [m].

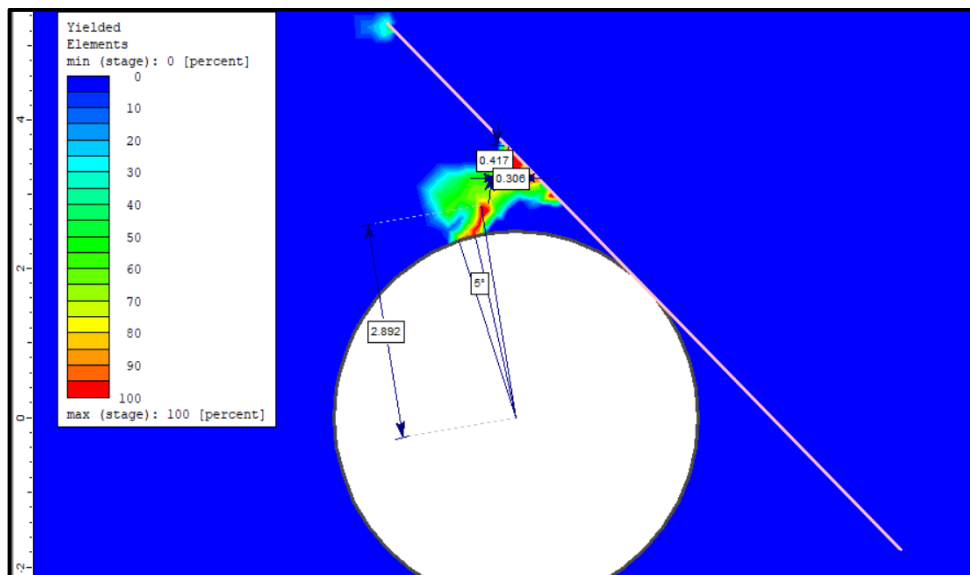


Figura 163: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=10$ [m], $\theta=45^\circ$ y $d=0$ [m].

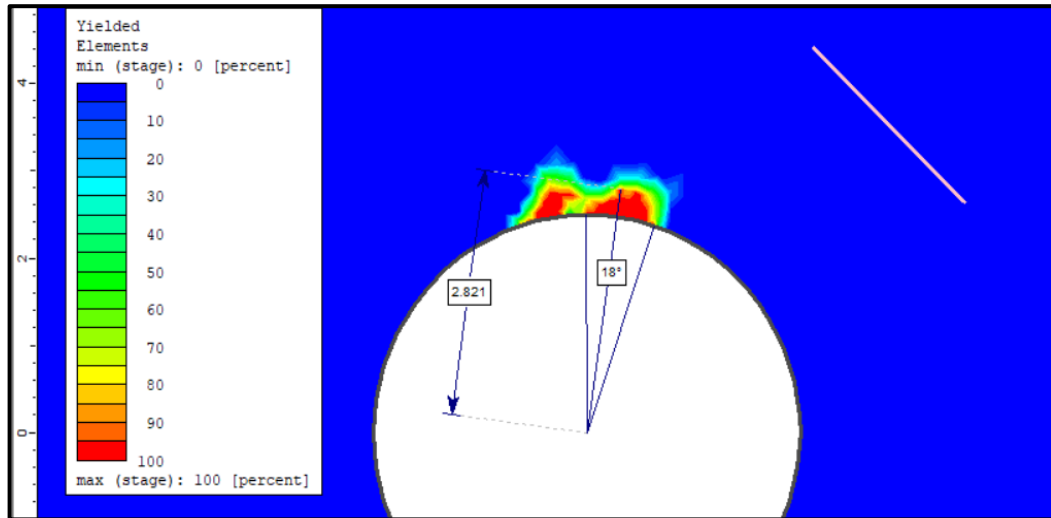


Figura 164: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=2.5$ [m], $\theta=45^\circ$ y $d=2.5$ [m].

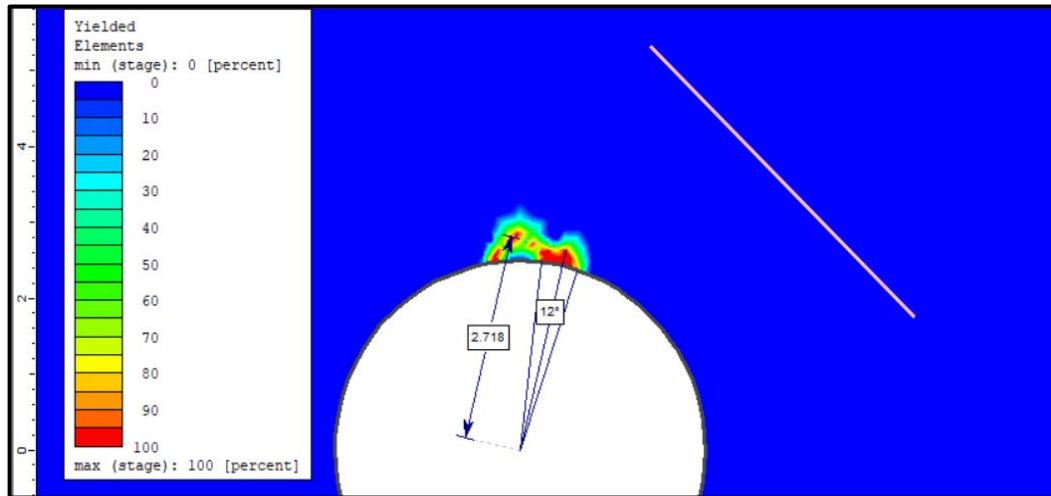


Figura 165: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=5$ [m], $\theta=45^\circ$ y $d=2.5$ [m].

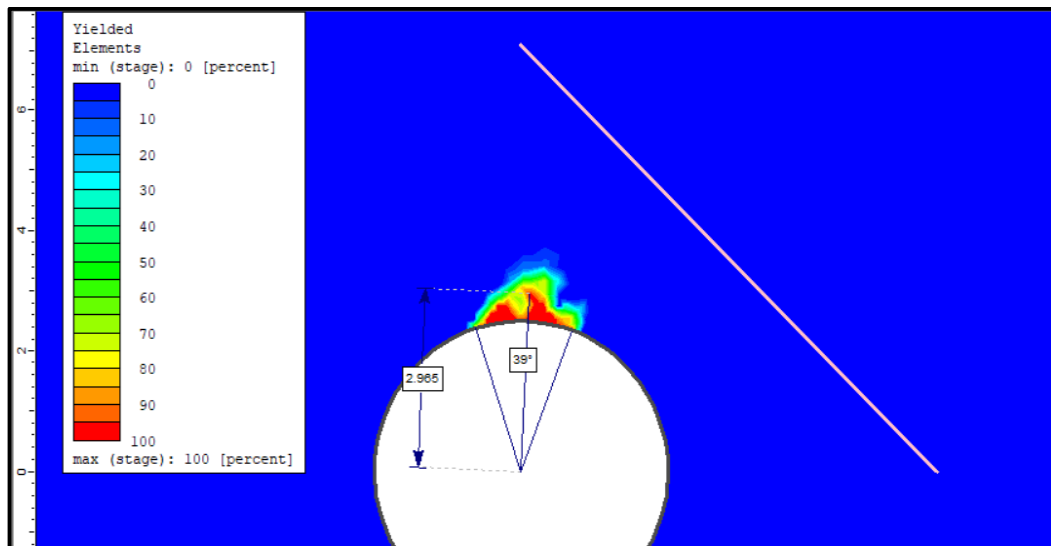


Figura 166: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=10$ [m], $\theta=45^\circ$ y $d=2.5$ [m].

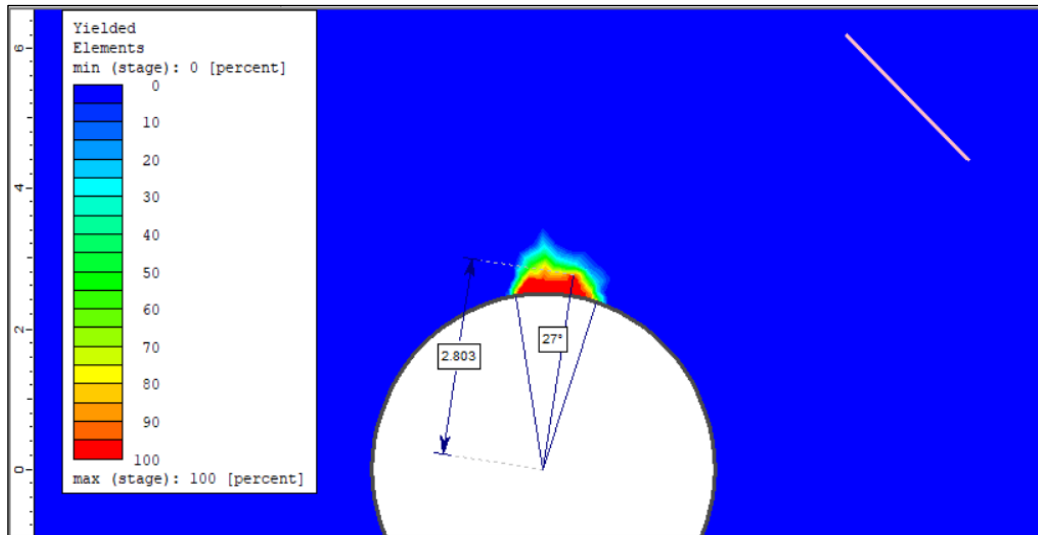


Figura 167: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=2.5$ [m], $\theta=45$ [°] y $d=5$ [m].

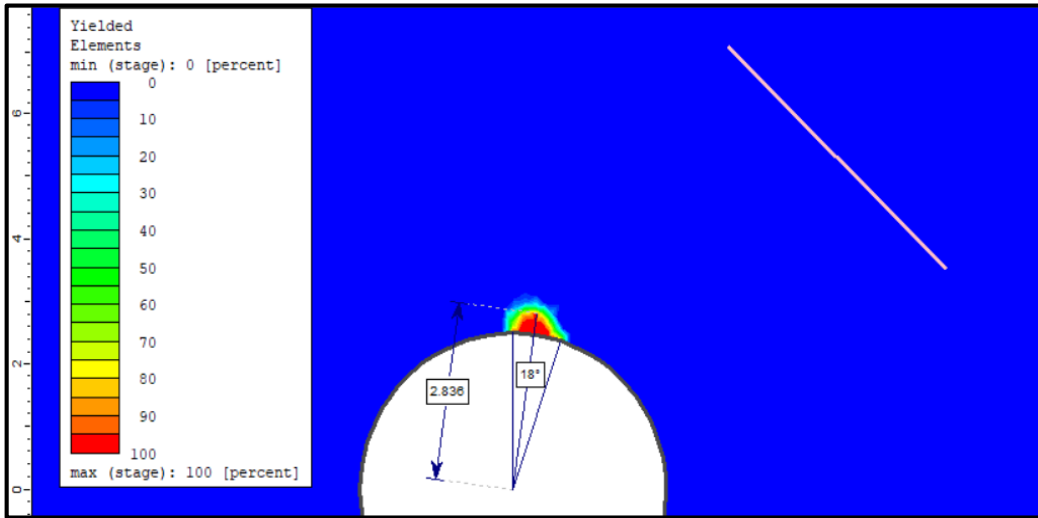


Figura 168: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=5$ [m], $\theta=45$ [°] y $d=5$ [m].

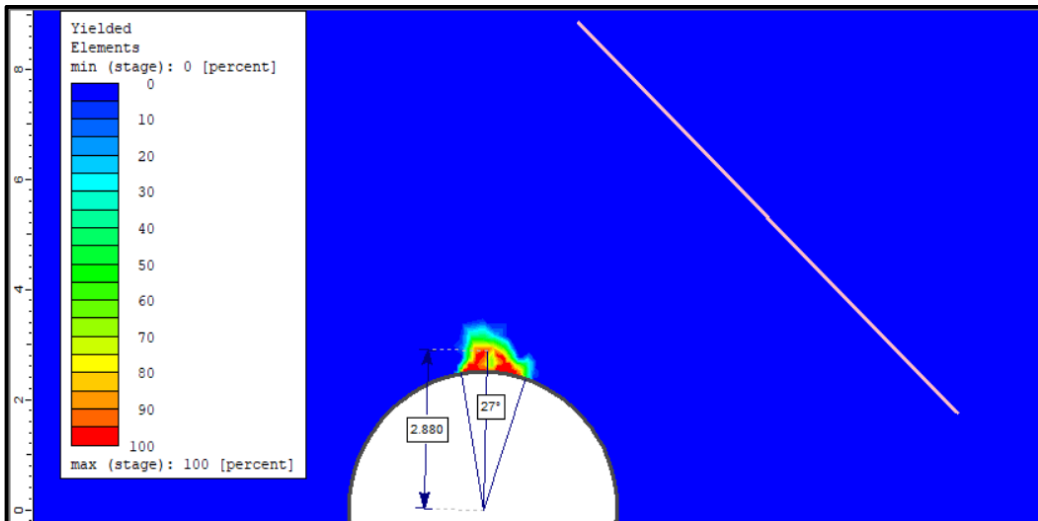


Figura 169: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=10$ [m], $\theta=45$ [°] y $d=5$ [m].

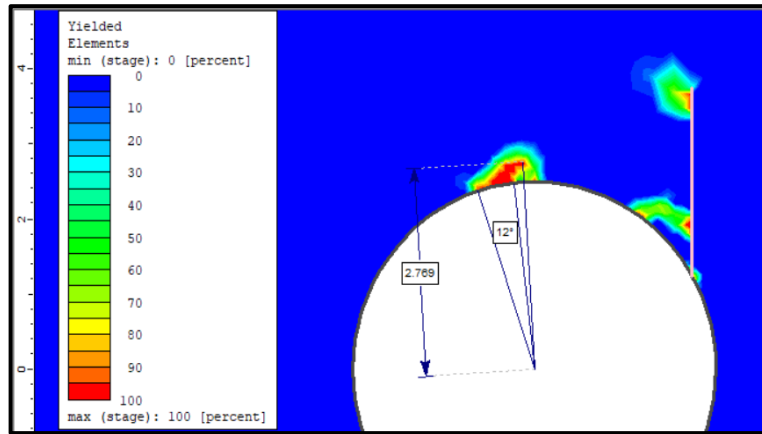


Figura 170: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=2.5$ [m], $\theta=90^\circ$ y $d=0$ [m].

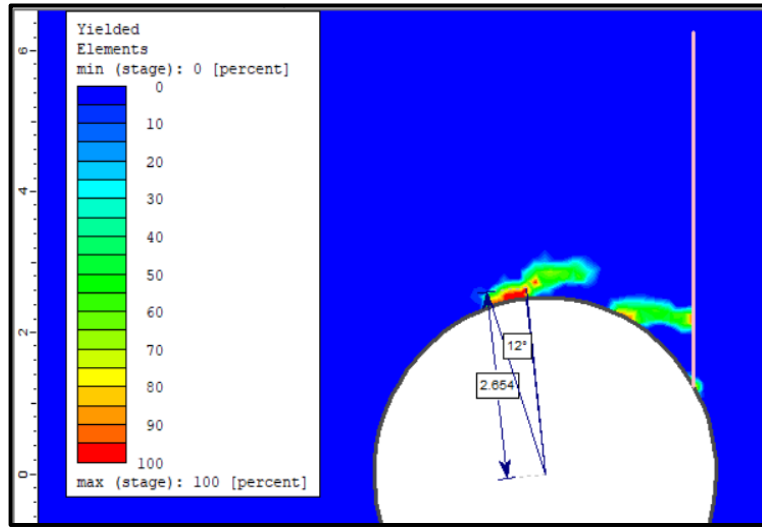


Figura 171: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=5$ [m], $\theta=90^\circ$ y $d=0$ [m].

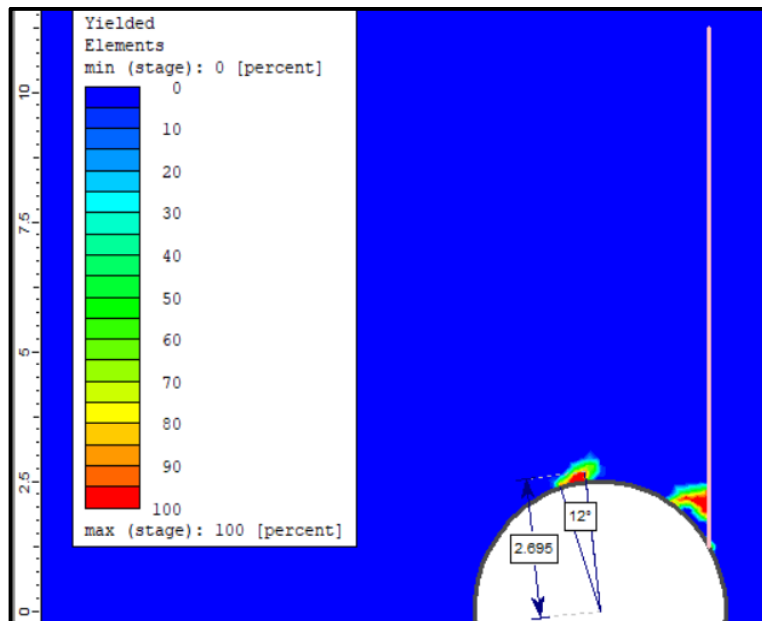


Figura 172: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=10$ [m], $\theta=90^\circ$ y $d=0$ [m].

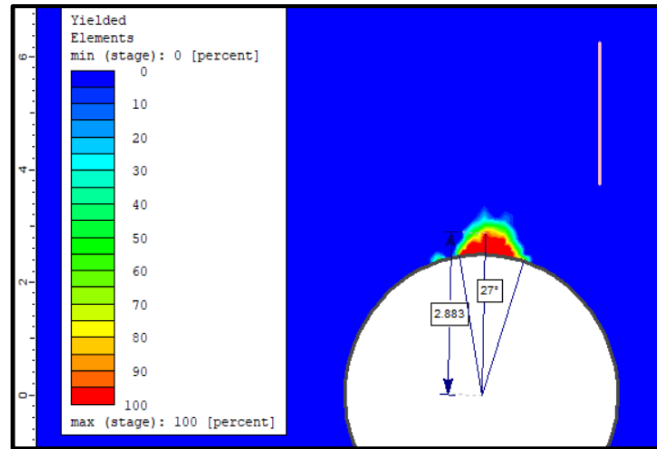


Figura 173: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=2.5$ [m], $\theta=90^\circ$ y $d=2.5$ [m].

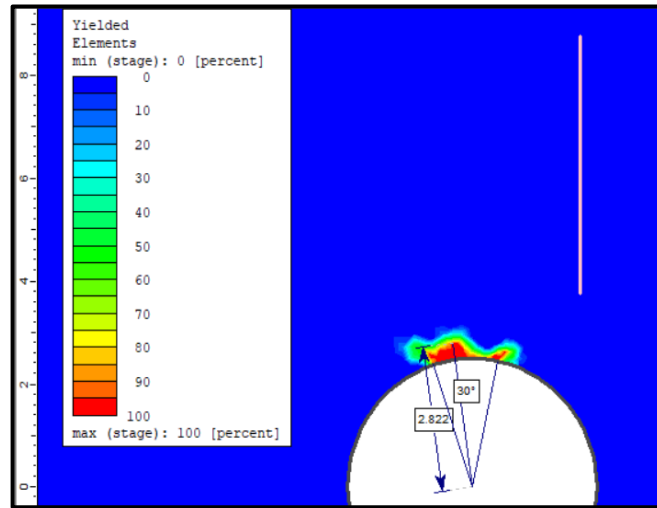


Figura 174: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=5$ [m], $\theta=90^\circ$ y $d=2.5$ [m].

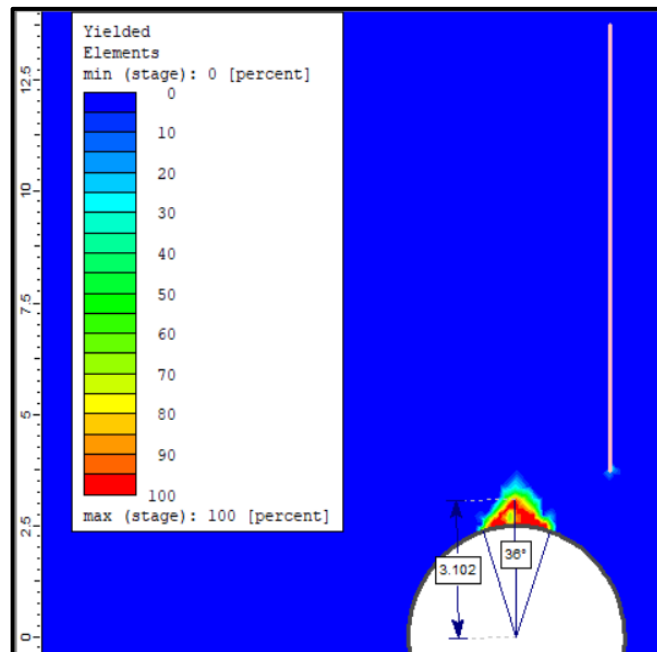


Figura 175: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=10$ [m], $\theta=90^\circ$ y $d=2.5$ [m].

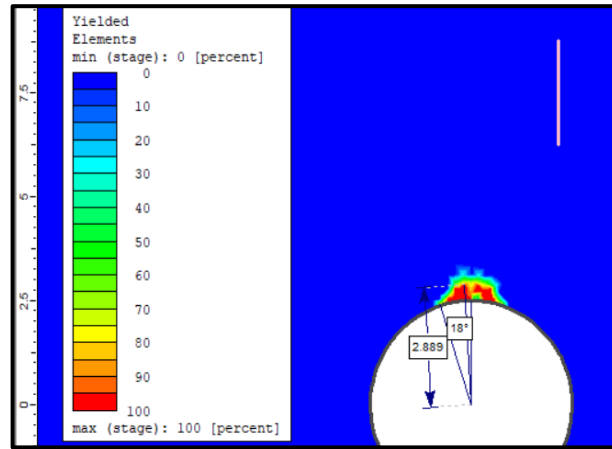


Figura 176: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=2.5$ [m], $\theta=90[^\circ]$ y $d=5$ [m].

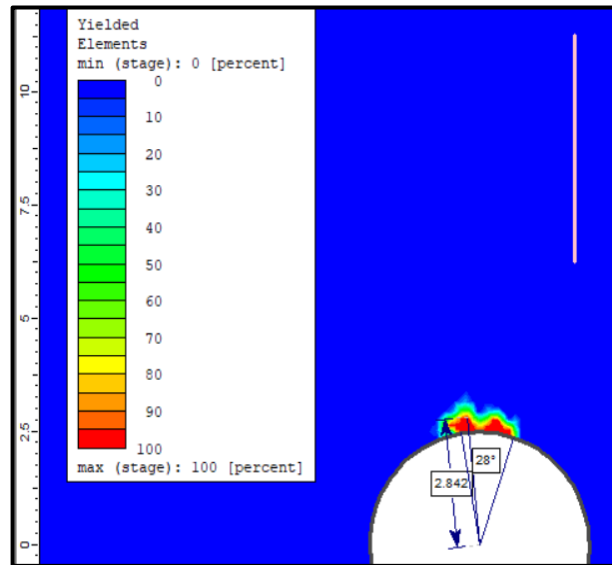


Figura 177: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=5$ [m], $\theta=90[^\circ]$ y $d=5$ [m].

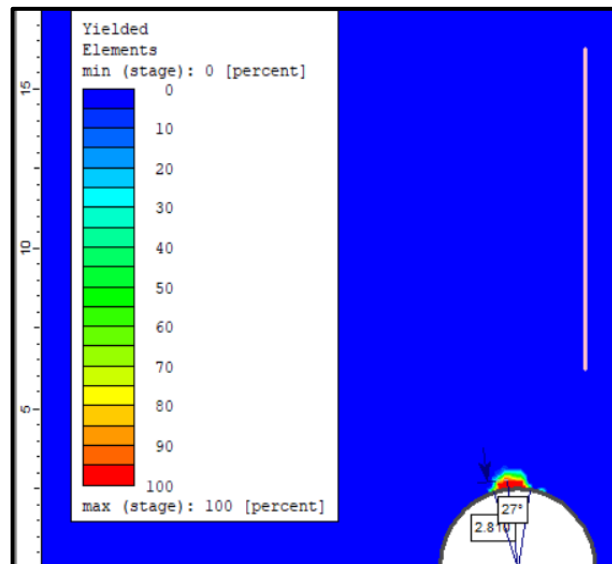


Figura 178: Medición de la profundidad y extensión de falla para $l=10$ [m], $\theta=90[^\circ]$ y $d=5$ [m].