

Trabajo Fin de Máster

Máster en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos

Efecto de la distribución espacial de las discontinuidades sobre los movimientos de túneles en macizo rocoso.

Autor: Alejandro Marfil Cita

Tutor: Percy Durand Neyra

Estructuras de edificación e ingeniería del terreno
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2023



Trabajo Fin de Máster
Máster en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos

**Efecto de la distribución espacial de las
discontinuidades sobre los movimientos de túneles
en macizo rocoso.**

Autor:

Alejandro Marfil Cita

Tutor:

Percy Durand Neyra

Profesor Titular

Dpto. de Estructuras de edificación e ingeniería del terreno
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla
Sevilla, 2023

Trabajo Fin de Máster: Efecto de la distribución espacial de las discontinuidades sobre los movimientos de túneles en macizo rocoso.

Autor: Alejandro Marfil Cita

Tutor: Percy Durand Neyra

El tribunal nombrado para juzgar el Trabajo arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2023

El Secretario del Tribunal

A mi familia

A mis maestros

Agradecimientos

Siendo esta mi segunda y posible última tesis, quería comenzar agradeciéndome a mí mismo el continuar en la lucha constante. Hay veces que estuve a punto de tirar la toalla, pero el objetivo de ser Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos siempre estuvo presente, haciendo que cada día diera un pequeño paso más hacia mi meta. Han sido muchos años, tanto sufridos como gratificantes, pero echando la vista atrás se comprueba mi evolución tanto como profesional como personal.

A este punto no se llega solo únicamente.

En primer lugar, he recibido una estupenda formación a lo largo de este tiempo, gracias a todos los maestros, maestras, profesores y profesoras que han contribuido a que este pequeño rebelde sea un gran profesional. Especialmente, quería agradecer al profesor Percy Durand por ayudarme y acompañarme en estos últimos pasos en mi vida universitaria.

Por otro lado, debo agradecerles todo lo que tengo y todo lo que soy a mi familia, fundamentalmente a mis padres y hermano, que siempre me han acompañado y apoyado de principio a fin. Sin ellos yo no estaría redactando este documento.

Gracias a Sevilla por ser mi casa durante todos estos años. Gracias por poner en mi camino a grandes personas. Muchas de ellas han sido presentes de todos mis logros y fracasos, de mis lágrimas y de mis mayores carcajadas, siendo la mejor familia elegida posible. Tenéis un hueco enorme en mi corazón.

Para finalizar, debo agradecerle también a Budapest, mi residencia de estos últimos meses, todo lo que me ha hecho experimentar y evolucionar. Aquí de nuevo he conocido a grandes personas de muchas nacionalidades, que también se han ganado un hueco en mi corazón. Especialmente debo agradecer al destino que pusiera en mi camino a dos valencianos que no han hecho otra cosa que enseñarme que siempre “hay que ir”, y siempre con la sonrisa por delante.

Gracias de veras a todos los que han sido parte de todo este camino. ¡Lo hemos conseguido!

Os quiero mucho a todos familia, nos vemos por el mundo.

Alejandro Marfil Cita

Sevilla, 2023

Resumen

En este proyecto se estudia la influencia que tiene algunos de los tipos de discontinuidades presentes en los macizos rocosos sobre los movimientos en el entorno de las excavaciones profundas como son los túneles. Estas discontinuidades son planos de debilidad que generan frente a las cargas aplicadas unos desplazamientos en unas u otras direcciones. La resistencia al deslizamiento de estos planos de debilidad depende, entre otros factores, de las características geomecánicas, geometría del túnel, estado de las superficies de discontinuidad, orientación de las grietas, etc.

El objetivo principal es el análisis de los movimientos en el entorno del túnel como consecuencia de la red de familias de diaclasas presentes en un macizo rocoso, la geometría del túnel y los estados de carga. Este análisis se realizará en condiciones de túnel profundo bajo condiciones isotrópicas, es decir, las cargas que se apliquen se mantienen constantes en todas las direcciones, además de estados de carga anisótropos, donde la relación entre la tensión horizontal y vertical sea mayor de 1. Entre los distintos tipos de familias de diaclasas a estudiar se encuentran el de red de juntas o diaclasas paralelas, juntas conjugadas o perpendiculares entre sí y la red de juntas que dibujan un mosaico o polígonos convexos no superpuestos tipo Voronoi.

Para modelizar el comportamiento del entorno del túnel bajo las distintas tipologías de discontinuidades antes señaladas, se empleará el programa de Elementos Finitos *Rocscience*, en concreto la herramienta “RS2”. Teniendo en cuenta, los parámetros de resistencia de las distintas familias de discontinuidades y criterios de rotura como la de Mohr Coulomb, se podrá medir con el software *Rocscience* los movimientos generados por la excavación del túnel profundo a lo largo de los planos de debilidad.

Con la aplicación de estos modelos de juntas o diaclasas y para distintas geometrías de túnel se determinará la deformada del contorno del túnel, los puntos críticos o de máximo desplazamiento, así como las posibles zonas de rotura en el entorno del túnel. Mediante dispositivos como el escáner de laser 2D o 3D se podrá conocer la deformada del contorno del túnel, así como la orientación de las distintas familias de discontinuidades. En un estudio posterior o a futuro se podrá comparar los resultados obtenidos del escáner de laser con los cálculos realizados por los modelos de juntas y geometría de túnel bajo las condiciones impuestas en este estudio.

Abstract

This project studies the influence of the different types of discontinuities present in rock masses on movements in the environment of deep excavations such as tunnels. These discontinuities are planes of weakness that generate displacements in one direction or the other when faced with applied loads. The slip resistance of these planes of weakness depends, among other factors, on the geomechanical characteristics, geometry of the tunnel, state of the discontinuity surfaces, etc.

The main objective is the analysis of the movements in the tunnel environment as a consequence of the network of joint families present in a rock mass, the geometry of the tunnel and the load states. This analysis will be carried out in deep tunnel conditions under isotropic conditions, that is, the applied loads remain constant in all directions, in addition to anisotropic load states, where the ratio between horizontal and vertical stress is greater than 1. Among the different types of joint families to be studied are the network of joints or parallel joints, joints conjugate or perpendicular to each other, and the network of joints that draw a mosaic or Voronoi-type non-overlapping convex polygons.

To model the behavior of the tunnel environment under the different types of discontinuities mentioned above, the *Rocscience* Finite Element program will be used, specifically the "RS2" tool. Considering the resistance parameters of the different families of discontinuities, it will be possible to measure with the *Rocscience* software the movements generated by the excavation of the deep tunnel along the planes of weakness.

With the application of these models of joints or joints and for different tunnel geometries, the deformed contour of the tunnel, the critical or maximum displacement points, as well as the possible break zones in the tunnel environment will be determined. By means of devices such as the 2D or 3D laser scanner, it will be possible to know the deformed contour of the tunnel, as well as the orientation of the different families of discontinuities. In a subsequent or future study, it will be possible to compare the results obtained from the scanner with the calculations made by the models of joints and tunnel geometry under the conditions imposed in this master's thesis.

Agradecimientos	9
Resumen	11
Abstract	13
Índice	15
Índice de Tablas	17
Índice de Figuras	19
1 Introducción	1
1.1 <i>Material a estudiar: Macizo rocoso</i>	1
1.1.1 Tipos de discontinuidades en las rocas	2
1.1.2 Resistencia al corte del material. Mohr-Coulomb.	6
1.1.3 Ensayos en macizo rocosos (laboratorio e in situ)	7
1.2 <i>Discontinuidades</i>	10
1.2.1 Caracterización de las discontinuidades	10
1.2.2 EFECTO DE LA ANISOTROPIA DE LAS ROCAS	14
1.2.3 Ensayos de laboratorio a las discontinuidades	15
1.2.4 Clasificaciones geomecánicas	16
1.3 <i>Problemática de los macizos rocosos</i>	21
1.3.1 Desplazamientos (asientos)	22
1.3.2 Concentración de tensiones	22
1.3.3 Expansividad	23
1.3.4 Abrasividad	24
1.3.5 Inestabilidad del talud	24
1.3.6 Resistencia al corte	25
1.4 <i>Problemática de las discontinuidades</i>	26
1.4.1 Orientación	26
1.4.2 Apertura y separación	27
1.4.3 Relleno	28
1.4.4 Continuidad	29
1.4.5 Rugosidad	30
1.4.6 Alteración y meteorización	30
1.4.7 Presencia de agua	31
1.5 <i>Contenido del estudio por capítulos</i>	32
2 Objetivos	35
2.1 <i>Objetivo general del estudio</i>	35
2.2 <i>Objetivos específicos del estudio</i>	35
3 Modelización numérica	39
3.1 <i>Método de Elementos Finitos y RS2</i>	39
3.1.1 Software Rocscience	41
3.1.2 Herramienta RS2 [45]	41
3.2 <i>Criterios que condicionan la aplicación de los modelos de juntas</i>	42
3.2.1 Modelos de juntas [45]	42
3.3 <i>Criterios que condicionan la aplicación de la geometría</i>	46

3.3.1	Túneles circulares	46
3.3.2	Túneles de herradura	47
3.3.3	Túneles de alcantarillado	48
3.4	<i>Caracterización del macizo rocoso</i>	50
3.5	<i>Definición de las propiedades de la junta</i>	52
3.6	<i>Definición de las familias de diaclasas</i>	53
3.6.1	Juntas o diaclasas paralelas	53
3.6.2	Juntas Conjugadas	56
3.6.3	Voronoi	58
3.7	<i>Excavación del túnel</i>	60
3.7.1	Túnel circular	60
3.7.2	Túnel de herradura	61
3.7.3	Túnel tipo alcantarillado	63
4	Aplicación a distintas familias de diaclasas (estudio de desplazamientos)	65
4.1	<i>Túnel circular</i>	65
4.1.1	Juntas Paralelas	65
4.1.2	Juntas Conjugadas	68
4.1.3	Voronoi	70
4.2	<i>Túnel de herradura</i>	72
4.2.1	Juntas Paralelas	72
4.2.2	Juntas Conjugadas	75
4.2.3	Voronoi	77
4.3	<i>Túnel tipo alcantarillado</i>	79
4.3.1	Juntas Paralelas	79
4.3.2	Juntas Conjugadas	82
4.3.3	Voronoi	84
5	Análisis de resultados	88
5.1	<i>Desplazamientos máximos en el contorno del túnel</i>	88
5.1.1	Túnel circular	89
5.1.2	Túnel de herradura	94
5.1.3	Túnel tipo alcantarillado	100
5.1.4	Ábacos de desplazamientos verticales y horizontales en función de la geometría del túnel	106
5.2	<i>Deformadas del túnel</i>	109
5.2.1	Túnel circular	109
5.2.2	Túnel de herradura	113
5.2.3	Túnel tipo alcantarillado	116
5.3	<i>Puntos de plastificación y zonas de posibles roturas para las distintas familias de discontinuidades y geometría de túnel</i>	120
5.3.1	Túnel circular	120
5.3.2	Túnel de herradura	123
5.3.3	Túnel tipo alcantarillado	126
6	Conclusiones	131
6.1	<i>Máximos desplazamientos</i>	132
6.2	<i>Deformada</i>	135
6.3	<i>Puntos de plastificación: Contorno del túnel</i>	137
7	Línea futura de estudio	141
7.1	<i>Escáner láser 2D y 3D</i>	141
7.2	<i>Ábacos de desplazamientos</i>	142
	Referencias	143

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1 Valores aproximados ensayo compresión simple. [13] [14] [15]	8
Tabla 1-2 Valores aproximados ensayo tracción simple. [17]	9
Tabla 1-3 Valores aproximados ensayo triaxial. [18] [19] [20]	10
Tabla 1-4 Sistema de puntuaciones RMR (I).	17
Tabla 1-5 Sistema de puntuaciones RMR (II).	17
Tabla 1-6 Corrección puntuaciones RMR.	17
Tabla 1-7 Clasificación RMR.	17
Tabla 1-8 Clasificación Q de Barton.	20
Tabla 1-9 Comparación RMR vs Q de Barton.	21
Tabla 5-1 Desplazamientos máximos túnel circular.	89
Tabla 5-2 Desplazamientos máximos túnel de herradura.	94
Tabla 5-3 Desplazamientos máximos túnel tipo alcantarillado.	100

ÍNDICE DE FIGURAS

Ilustración 1-1 Ejemplo macizo rocoso [1].	1
Ilustración 1-2 Roca ígnea plutónica (granito) [5].	3
Ilustración 1-3 Roca ígnea volcánica (basalto) [5].	3
Ilustración 1-4 Columnas basálticas. [6]	4
Ilustración 1-5 Calzada del gigante (Irlanda). [7]	4
Ilustración 1-6 Estratos de rocas sedimentarias [5].	5
Ilustración 1-7 Mosaicos formados en pared de roca caliza. [8]	5
Ilustración 1-8 Roca metamórfica (esquisto). [9]	6
Ilustración 1-9 Ensayo de compresión simple en roca [12].	8
Ilustración 1-10 Ensayo brasileño [16].	9
Ilustración 1-11 Ensayo triaxial [12].	10
Ilustración 1-12 Junta [21]	11
Ilustración 1-13 Fracturas [22]	12
Ilustración 1-14 Estratos [23]	12
Ilustración 1-15 Cabalgamiento. [25]	13
Ilustración 1-16 Resistencia a compresión de esquistos ante diferentes ángulos de planos y dirección de carga.	14
Ilustración 1-17 Ensayo de corte directo, ensayo triaxial y ensayo de corte directo in situ.	15
Ilustración 1-18 Círculos de Mohr (Mecánica de suelos). [28]	15
Ilustración 1-19 Sistema de puntuación Q de Barton (I).	18
Ilustración 1-20 Sistema de puntuación Q de Barton (II).	19
Ilustración 1-21 Sistema de puntuación Q de Barton (III).	19
Ilustración 1-22 Sistema de puntuación Q de Barton (IV).	20
Ilustración 1-23 Concentración de tensiones debido a discontinuidades (Ejemplo de RS2).	23
Ilustración 1-24 Expansividad en macizos rocosos. [33]	23
Ilustración 1-25 Fallos en el túnel de Dugongling, China. [34]	24
Ilustración 1-26 Inestabilidad de taludes en roca. [37]	25
Ilustración 1-27 Orientación de las discontinuidades [38]	26
Ilustración 1-28 Esquematización ejemplo de construcción de presa. Representación de tensiones y criterios de rotura. [39]	27
Ilustración 1-29 Separación de las discontinuidades [38]	27
Ilustración 1-30 Influencia del tamaño de los bloques en el comportamiento y resistencia del macizo rocoso. [40]	28
Ilustración 1-31 Relleno de las discontinuidades [38]	29
Ilustración 1-32 Continuidad de las discontinuidades [38]	29
Ilustración 1-33 Rugosidad de las discontinuidades [38]	30

Ilustración 1-34 Alteración de las discontinuidades [38]	31
Ilustración 3-1 Mallado en <i>RS2</i> .	39
Ilustración 3-2 Túneles (<i>RS2</i>) [45].	42
Ilustración 3-3 Distribución probabilística Normal. [47]	43
Ilustración 3-4 Ejemplo Paralelo discontinuo en <i>RS2</i> . [45]	43
Ilustración 3-5 Ejemplo Juntas Conjugadas en <i>RS2</i> . [45]	44
Ilustración 3-6 Ejemplo Voronoi (irregular) en <i>RS2</i> . [45]	45
Ilustración 3-7 Ejemplo Voronoi (regular medio) en <i>RS2</i> . [45]	45
Ilustración 3-8 Ejemplo Voronoi (casi regular) en <i>RS2</i> . [45]	45
Ilustración 3-9 Ejemplo Voronoi (hexágono regular) en <i>RS2</i> . [45]	46
Ilustración 3-10 Ejemplo túnel circular. [50]	46
Ilustración 3-11 Ejemplo túnel de herradura. [50]	47
Ilustración 3-12 Distribución de tensiones en túnel de herradura. [52]	48
Ilustración 3-13 Ejemplo túnel tipo alcantarillado. [50]	49
Ilustración 3-14 Distribución de tensiones en túnel tipo alcantarillado. [52]	50
Ilustración 3-15 Dominio de estudio en <i>RS2</i> .	51
Ilustración 3-16 Campos de tensiones a analizar en <i>RS2</i> .	52
Ilustración 3-17 Propiedades de la junta en <i>RS2</i> .	53
Ilustración 3-18 Propiedades familia de diaclasas paralelas 15°.	54
Ilustración 3-19 Familia de diaclasas paralelas 15°.	54
Ilustración 3-20 Propiedades familia de diaclasas paralelas 75°.	55
Ilustración 3-21 Familia de diaclasas paralelas 75°.	55
Ilustración 3-22 Propiedades familia de diaclasas Juntas Conjugadas 15°.	56
Ilustración 3-23 Familia de diaclasas Juntas Conjugadas 15°.	56
Ilustración 3-24 Propiedades familia de diaclasas Juntas Conjugadas 75°.	57
Ilustración 3-25 Familia de diaclasas Juntas Conjugadas 75°.	57
Ilustración 3-26 Propiedades familia de diaclasas Voronoi irregular.	58
Ilustración 3-27 Familia de diaclasas Voronoi irregular.	58
Ilustración 3-28 Propiedades familia de diaclasas Voronoi hexagonal.	59
Ilustración 3-29 Familia de diaclasas Voronoi hexagonal.	59
Ilustración 3-30 Excavación túnel tipo alcantarillado en <i>RS2</i> .	60
Ilustración 3-31 Tuneladora topo.	61
Ilustración 3-32 Dimensiones del túnel de herradura en <i>RS2</i> .	61
Ilustración 3-33 Excavación túnel de herradura en <i>RS2</i> .	62
Ilustración 3-34 Ejecución excavación con perforación y voladura. [56]	62
Ilustración 3-35 Excavación túnel tipo alcantarillado en <i>RS2</i> .	63
Ilustración 4-1 Desplazamientos horizontales Juntas Paralelas ($k=1$) – Túnel circular	65
Ilustración 4-2 Desplazamientos horizontales Juntas Paralelas ($k=2$) – Túnel circular	66
Ilustración 4-3 Desplazamientos horizontales Juntas Paralelas ($k=3$) – Túnel circular	66
Ilustración 4-4 Desplazamientos verticales Juntas Paralelas ($k=1$) – Túnel circular	66

Ilustración 4-5 Desplazamientos verticales Juntas Paralelas ($k=2$) – Túnel circular	67
Ilustración 4-6 Desplazamientos verticales Juntas Paralelas ($k=3$) – Túnel circular	67
Ilustración 4-7 Desplazamientos horizontales Juntas Conjugadas ($k=1$) – Túnel circular	68
Ilustración 4-8 Desplazamientos horizontales Juntas Conjugadas ($k=2$) – Túnel circular	68
Ilustración 4-9 Desplazamientos horizontales Juntas Conjugadas ($k=3$) – Túnel circular	68
Ilustración 4-10 Desplazamientos verticales Juntas Conjugadas ($k=1$) – Túnel circular	69
Ilustración 4-11 Desplazamientos verticales Juntas Conjugadas ($k=2$) – Túnel circular	69
Ilustración 4-12 Desplazamientos verticales Juntas Conjugadas ($k=3$) – Túnel circular.	69
Ilustración 4-13 Desplazamientos horizontales Voronoi ($k=1$) – Túnel circular	70
Ilustración 4-14 Desplazamientos horizontales Voronoi ($k=2$) – Túnel circular	70
Ilustración 4-15 Desplazamientos horizontales Voronoi ($k=3$) – Túnel circular	70
Ilustración 4-16 Desplazamientos verticales Voronoi ($k=1$) – Túnel circular	71
Ilustración 4-17 Desplazamientos verticales Voronoi ($k=2$) – Túnel circular	71
Ilustración 4-18 Desplazamientos verticales Voronoi ($k=3$) – Túnel circular	72
Ilustración 4-19 Desplazamientos horizontales Juntas Paralelas ($k=1$) – Túnel de herradura	72
Ilustración 4-20 Desplazamientos horizontales Juntas Paralelas ($k=2$) – Túnel de herradura	73
Ilustración 4-21 Desplazamientos horizontales Juntas Paralelas ($k=3$) – Túnel de herradura	73
Ilustración 4-22 Desplazamientos verticales Juntas Paralelas ($k=1$) – Túnel de herradura	73
Ilustración 4-23 Desplazamientos verticales Juntas Paralelas ($k=2$) – Túnel de herradura	74
Ilustración 4-24 Desplazamientos verticales Juntas Paralelas ($k=3$) – Túnel de herradura	74
Ilustración 4-25 Desplazamientos horizontales Juntas Conjugadas ($k=1$) – Túnel de herradura	75
Ilustración 4-26 Desplazamientos horizontales Juntas Conjugadas ($k=2$) – Túnel de herradura	75
Ilustración 4-27 Desplazamientos horizontales Juntas Conjugadas ($k=3$) – Túnel de herradura	75
Ilustración 4-28 Desplazamientos verticales Juntas Conjugadas ($k=1$) – Túnel de herradura	76
Ilustración 4-29 Desplazamientos verticales Juntas Conjugadas ($k=2$) – Túnel de herradura	76
Ilustración 4-30 Desplazamientos verticales Juntas Conjugadas ($k=3$) – Túnel de herradura	76
Ilustración 4-31 Desplazamientos horizontales Voronoi ($k=1$) – Túnel de herradura	77
Ilustración 4-32 Desplazamientos horizontales Voronoi ($k=2$) – Túnel de herradura	77
Ilustración 4-33 Desplazamientos horizontales Voronoi ($k=3$) – Túnel de herradura	77
Ilustración 4-34 Desplazamientos verticales Voronoi ($k=1$) – Túnel de herradura	78
Ilustración 4-35 Desplazamientos verticales Voronoi ($k=2$) – Túnel de herradura	78
Ilustración 4-36 Desplazamientos verticales Voronoi ($k=3$) – Túnel de herradura	79
Ilustración 4-37 Desplazamientos horizontales Juntas Paralelas ($k=1$) – Túnel tipo alcantarillado	79
Ilustración 4-38 Desplazamientos horizontales Juntas Paralelas ($k=2$) – Túnel tipo alcantarillado	80
Ilustración 4-39 Desplazamientos horizontales Juntas Paralelas ($k=3$) – Túnel tipo alcantarillado	80
Ilustración 4-40 Desplazamientos verticales Juntas Paralelas ($k=1$) – Túnel tipo alcantarillado	81
Ilustración 4-41 Desplazamientos verticales Juntas Paralelas ($k=2$) – Túnel tipo alcantarillado	81
Ilustración 4-42 Desplazamientos verticales Juntas Paralelas ($k=3$) – Túnel tipo alcantarillado	81
Ilustración 4-43 Desplazamientos horizontales Juntas Conjugadas ($k=1$) – Túnel tipo alcantarillado	82
Ilustración 4-44 Desplazamientos horizontales Juntas Conjugadas ($k=2$) – Túnel tipo alcantarillado	82

Ilustración 4-45 Desplazamientos horizontales Juntas Conjugadas ($k=3$) – Túnel tipo alcantarillado	82
Ilustración 4-46 Desplazamientos verticales Juntas Conjugadas ($k=1$) – Túnel tipo alcantarillado	83
Ilustración 4-47 Desplazamientos verticales Juntas Conjugadas ($k=2$) – Túnel tipo alcantarillado	83
Ilustración 4-48 Desplazamientos verticales Juntas Conjugadas ($k=3$) – Túnel tipo alcantarillado	83
Ilustración 4-49 Desplazamientos horizontales Voronoi ($k=1$) – Túnel tipo alcantarillado	84
Ilustración 4-50 Desplazamientos horizontales Voronoi ($k=2$) – Túnel tipo alcantarillado	84
Ilustración 4-51 Desplazamientos horizontales Voronoi ($k=3$) – Túnel tipo alcantarillado	85
Ilustración 4-52 Desplazamientos verticales Voronoi ($k=1$) – Túnel tipo alcantarillado	85
Ilustración 4-53 Desplazamientos verticales Voronoi ($k=2$) – Túnel tipo alcantarillado	86
Ilustración 4-54 Desplazamientos verticales Voronoi ($k=3$) – Túnel tipo alcantarillado	86
Ilustración 5-1 Situación de los puntos de estudio en las diferentes secciones.	88
Ilustración 5-2 Desplazamiento horizontal máximo (hastiales) – Túnel circular.	91
Ilustración 5-3 Desplazamiento vertical máximo (Bóveda / Contra bóveda) – Túnel circular.	93
Ilustración 5-4 Despl. horizontal máximo (hastiales) – Túnel circular – Todas las familias de disc.	93
Ilustración 5-5 Despl. horizontal vertical (hastiales) – Túnel circular – Todas las familias de disc.	94
Ilustración 5-6 Desplazamiento horizontal máximo (hastiales) – Túnel de herradura.	96
Ilustración 5-7 Desplazamiento vertical (Bóveda / Contra bóveda) – Túnel de herradura.	98
Ilustración 5-8 Despl. horizontal máximo (hastiales) – Túnel de herradura – Todas las familias de disc.	99
Ilustración 5-9 Despl. vertical (Bóveda / Contra bóveda) – Túnel de herradura – Todas las familias de disc.	99
Ilustración 5-10 Desplazamiento horizontal máximo (hastiales) – Túnel tipo alcantarillado.	102
Ilustración 5-11 Desplazamiento vertical (Bóveda / Contra bóveda) – Túnel tipo alcantarillado.	104
Ilustración 5-12 Despl. horizontal máximo (hastiales) – Túnel tipo alcantarillado – Todas las familias de disc.	105
Ilustración 5-13 Despl. vertical (Bóveda / Contra bóveda) – Túnel tipo alcantarillado – Todas las familias de disc.	105
Ilustración 5-14 Despl. Horizontal máximo (hastiales) – Juntas Paralelas.	106
Ilustración 5-15 Despl. horizontal máximo (hastiales) – Juntas Conjugadas.	106
Ilustración 5-16 Despl. horizontal máximo (hastiales) – Juntas Voronoi.	107
Ilustración 5-17 Despl. vertical máximo (Bóveda / Contra bóveda) – Juntas Paralelas.	108
Ilustración 5-18 Despl. vertical máximo (Bóveda / Contra bóveda) – Juntas Conjugadas.	108
Ilustración 5-19 Despl. vertical máximo (Bóveda / Contra bóveda) – Juntas Voronoi.	108
Ilustración 5-20 Deformada Juntas Paralelas ($k=1$) – Túnel circular	109
Ilustración 5-21 Deformada Juntas Paralelas ($k=2$) – Túnel circular	110
Ilustración 5-22 Deformada Juntas Paralelas ($k=3$) – Túnel circular	110
Ilustración 5-23 Deformada Juntas Conjugadas ($k=1$) – Túnel circular	110
Ilustración 5-24 Deformada Juntas Conjugadas ($k=2$) – Túnel circular	111
Ilustración 5-25 Deformada Juntas Conjugadas ($k=3$) – Túnel circular	111
Ilustración 5-26 Deformada Voronoi ($k=1$) – Túnel circular	111
Ilustración 5-27 Deformada Voronoi ($k=2$) – Túnel circular	112
Ilustración 5-28 Deformada Voronoi ($k=3$) – Túnel circular	112

Ilustración 5-29 Deformada Juntas Paralelas ($k=1$) – Túnel de herradura	113
Ilustración 5-30 Deformada Juntas Paralelas ($k=2$) – Túnel de herradura	113
Ilustración 5-31 Deformada Juntas Paralelas ($k=3$) – Túnel de herradura	113
Ilustración 5-32 Deformada Juntas Conjugadas ($k=1$) – Túnel de herradura	114
Ilustración 5-33 Deformada Juntas Conjugadas ($k=2$) – Túnel de herradura	114
Ilustración 5-34 Deformada Juntas Conjugadas ($k=3$) – Túnel de herradura	115
Ilustración 5-35 Deformada Voronoi ($k=1$) – Túnel de herradura	115
Ilustración 5-36 Deformada Voronoi ($k=2$) – Túnel de herradura	115
Ilustración 5-37 Deformada Voronoi ($k=3$) – Túnel de herradura	116
Ilustración 5-38 Deformada Juntas Paralelas ($k=1$) – Túnel tipo alcantarillado	116
Ilustración 5-39 Deformada Juntas Paralelas ($k=2$) – Túnel tipo alcantarillado	117
Ilustración 5-40 Deformada Juntas Paralelas ($k=3$) – Túnel tipo alcantarillado	117
Ilustración 5-41 Deformada Juntas Conjugadas ($k=1$) – Túnel tipo alcantarillado	117
Ilustración 5-42 Deformada Juntas Conjugadas ($k=2$) – Túnel tipo alcantarillado	118
Ilustración 5-43 Deformada Juntas Conjugadas ($k=3$) – Túnel tipo alcantarillado	118
Ilustración 5-44 Deformada Voronoi ($k=1$) – Túnel tipo alcantarillado	119
Ilustración 5-45 Deformada Voronoi ($k=2$) – Túnel tipo alcantarillado	119
Ilustración 5-46 Deformada Voronoi ($k=3$) – Túnel tipo alcantarillado	119
Ilustración 5-47 Plastificación Juntas Paralelas ($k=1$) – Túnel circular	120
Ilustración 5-48 Plastificación Juntas Paralelas ($k=2$) – Túnel circular	120
Ilustración 5-49 Plastificación Juntas Paralelas ($k=3$) – Túnel circular	120
Ilustración 5-50 Plastificación Juntas Conjugadas ($k=1$) – Túnel circular	121
Ilustración 5-51 Plastificación Juntas Conjugadas ($k=2$) – Túnel circular	121
Ilustración 5-52 Plastificación Juntas Conjugadas ($k=3$) – Túnel circular	121
Ilustración 5-53 Plastificación Voronoi ($k=1$) – Túnel circular– Túnel circular	122
Ilustración 5-54 Plastificación Voronoi ($k=2$) – Túnel circular– Túnel circular	122
Ilustración 5-55 Plastificación Voronoi ($v=3$) – Túnel circular– Túnel circular	122
Ilustración 5-56 Plastificación Juntas Paralelas ($k=1$) – Túnel de herradura	123
Ilustración 5-57 Plastificación Juntas Paralelas ($k=2$) – Túnel de herradura	123
Ilustración 5-58 Plastificación Juntas Paralelas ($k=3$) – Túnel de herradura	123
Ilustración 5-59 Plastificación Juntas Conjugadas ($k=1$) – Túnel de herradura	124
Ilustración 5-60 Plastificación Juntas Conjugadas ($k=2$) – Túnel de herradura	124
Ilustración 5-61 Plastificación Juntas Conjugadas ($k=3$) – Túnel de herradura	124
Ilustración 5-62 Plastificación Voronoi ($k=1$) – Túnel de herradura	125
Ilustración 5-63 Plastificación Voronoi ($k=2$) – Túnel de herradura	125
Ilustración 5-64 Plastificación Voronoi ($k=3$) – Túnel de herradura	125
Ilustración 5-65 Plastificación Juntas Paralelas ($k=1$) – Túnel tipo alcantarillado	126
Ilustración 5-66 Plastificación Juntas Paralelas ($k=2$) – Túnel tipo alcantarillado	126
Ilustración 5-67 Plastificación Juntas Paralelas ($k=3$) – Túnel tipo alcantarillado	126
Ilustración 5-68 Plastificación Juntas Conjugadas ($k=1$) – Túnel tipo alcantarillado	127

Ilustración 5-69 Plastificación Juntas Conjugadas ($k=2$) – Túnel tipo alcantarillado	127
Ilustración 5-70 Plastificación Juntas Conjugadas ($k=3$) – Túnel tipo alcantarillado	127
Ilustración 5-71 Plastificación Voronoi ($k=1$) – Túnel tipo alcantarillado	128
Ilustración 5-72 Plastificación Voronoi ($k=2$) – Túnel tipo alcantarillado	128
Ilustración 5-73 Plastificación Voronoi ($k=3$) – Túnel tipo alcantarillado	128
Ilustración 6-1 Pata de elefante en contorno de túnel. [57]	136
Ilustración 6-2 Herramientas con escáneres láser en 3D [59]	137
Ilustración 7-1 Escáner 3D. [60]	141

1 INTRODUCCIÓN

Este estudio comienza por hacer una introducción a lo que es un macizo rocoso y qué lo compone (principalmente una matriz rocosa junto a varias familias de discontinuidades). Se describe las características que presentan las discontinuidades, así como se clasifican los macizos rocosos a partir de sus propiedades geomecánicas y geotécnicas. Se comentan además las distintas tipologías de discontinuidades que presentan las rocas sedimentarias, metamórficas e ígneas.

1.1 Material a estudiar: Macizo rocoso

Se puede definir a la roca como un conjunto de cristales o granos conformados por distintos minerales unidos entre sí sólidamente. El conjunto de roca matriz delimitado por superficies de debilidad o discontinuidades se puede especificar como macizo rocoso (ver Ilustración 1-1).

Los macizos rocosos son medios discontinuos, anisótropos y heterogéneos. El primero es porque poseen discontinuidades, el segundo porque depende de la orientación de los planos de debilidad, y, por último, son heterogéneos, porque las rocas dependiendo de donde proceden sus propiedades o características no son las mismas. Estas formaciones pueden encontrarse tanto en la superficie como en el interior de la corteza terrestre, y su importancia radica en sus propiedades geomecánicas y geotécnicas.

El macizo rocoso es un tipo de masa sólida que se diferencia de los depósitos sueltos o no consolidados, como el suelo o la arena. Está compuesto por varias tipologías de rocas, incluyendo mármoles, granitos, basaltos, esquistos y muchos otros. Las propiedades del macizo rocoso pueden variar significativamente según la composición y la estructura de las rocas que lo forman.

Los macizos rocosos pueden presentarse de manera natural en la superficie de la corteza terrestre, como en las cordilleras montañosas, pero también pueden encontrarse en el subsuelo como reservas naturales de gas y petróleo. Desde un punto de vista geológico, los macizos rocosos son importantes debido a sus propiedades y problemáticas geotécnicas.



Ilustración 1-1 Ejemplo macizo rocoso [1].

Una de las características fundamentales de los macizos rocosos es su resistencia a la compresión. Son materiales sólidos y duros que pueden soportar grandes cargas sin sufrir colapsos o fallas catastróficas.

Al mismo tiempo, son altamente fracturados, lo que los hace difíciles de explotar o excavar. Las rocas que los componen pueden contener diversas discontinuidades, como fallas, diaclasas y fracturas, que dividen el macizo en bloques más pequeños. Estas fracturas pueden aislar zonas de roca sólida y crear áreas más débiles y propensas a la deformación o la rotura.

Se considera que la resistencia del macizo rocoso es menor que la de la roca matriz, debido a la existencia de discontinuidades. La presencia de estas discontinuidades también provoca una mayor deformabilidad del macizo rocoso frente a la roca matriz, al igual que la permeabilidad, la cual es superior en el macizo rocoso.

Durante la excavación por ejemplo de un túnel, el macizo rocoso en el entorno se somete a cargas y tensiones que pueden afectar su estabilidad y provocar deformaciones y desplazamientos. La excavación de túneles en un macizo rocoso es un proceso bastante complejo que implica la excavación eficiente del material, la protección de la integridad del macizo y la garantía de la seguridad de los trabajadores y la infraestructura existente.

Uno de los fallos más comunes que se presentan en la excavación de un túnel a través del macizo rocoso es la subsidencia. La subsidencia es el hundimiento o la deformación del terreno que rodea al túnel debido a la excavación subterránea. La presencia de discontinuidades en el macizo rocoso puede crear zonas localizadas de debilidad que son susceptibles de hundimientos y deformaciones.

Otro problema que se presenta en la excavación de túneles se relaciona con el flujo de agua. El macizo rocoso puede contener poros y fracturas conectados que permiten el flujo de agua subterránea. El agua es uno de los principales agentes que afectan la estabilidad del macizo rocoso en la excavación de túneles. La infiltración de agua en el túnel puede debilitar el material y provocar la erosión y el colapso.

La presencia de fallas y fracturas aumenta la posibilidad de que se desarrollen zonas de inestabilidad en el macizo rocoso. La excavación del túnel puede desestabilizar estas zonas y provocar el colapso de elementos estructurales cercanos o desconectar el macizo rocoso, creando una cavidad. Si la inestabilidad se propaga hacia el exterior del túnel, puede causar daños a la superficie del terreno y a las estructuras cercanas.

Para evitar estos problemas se utilizan diversas técnicas para evaluar la estabilidad del macizo rocoso. La más conocida es considerando en conjunto las propiedades de mecánicas y de resistencia de la matriz y de las discontinuidades. A estas técnicas se incluyen también estudios geológicos, geofísicos y geoquímicos. La monitorización constante del macizo rocoso también es necesaria durante la construcción del túnel. Los datos de monitoreo ayudan a los ingenieros a identificar zonas de inestabilidad y tomar medidas preventivas para evitar la falla del macizo rocoso.

En conclusión, la excavación de un túnel a través del macizo rocoso es un proceso complejo que presenta varios desafíos. La principal es la presencia de las discontinuidades que aumenta la deformabilidad y rotura del terreno en el entorno del túnel. Es importante, por tanto, evaluar, analizar y desarrollar una metodología de cálculo del efecto que producen las familias de discontinuidades en las obras de interés geotécnico como son los túneles o metros urbanos.

[2]-[3]-[4]

1.1.1 Tipos de discontinuidades en las rocas

Según su origen en la corteza terrestre se pueden encontrar los siguientes tipos de roca: ígneas, sedimentarias y metamórficas.

1.1.1.1 Rocas ígneas

Las rocas ígneas se forman a través de la solidificación del magma o lava, procedentes del interior de la Tierra. Este proceso de solidificación puede ser lento, si ocurre a una gran profundidad de la corteza terrestre, generando rocas plutónicas o intrusivas, formadas por cristales gruesos. Si el proceso de solidificación se da cercano a la superficie, este es rápido, generando rocas volcánicas o extrusivas.



Ilustración 1-2 Roca ígnea plutónica (granito) [5].



Ilustración 1-3 Roca ígnea volcánica (basalto) [5].

Cerca del 65% de la corteza terrestre está formado por rocas ígneas. El 66% de estas son basalto (ver Ilustración 1-3) y gabro, el 16% granito (ver Ilustración 1-2) y el 17% granodiorita y diorita. Por otro lado, la corteza oceánica está conformada por un 99% de basalto.

Algunas de las discontinuidades más comunes en las rocas ígneas son las diaclasas, las juntas columnares y los mosaicos en basaltos. En estas tipologías de rocas pueden aparecer 3 o más familias principales de diaclasas y otras secundarias, como ocurre en los granitos.

Las diaclasas son fracturas que se producen en la roca sin que haya habido desplazamiento relativo entre los bloques que lo separan.

Las juntas columnares son una forma de disyunción columnar que se forma por tensiones internas cuando se enfrían masas de lava o magma superficiales o a poca profundidad. Las rocas ígneas en las que se puede desarrollar disyunción columnar son principalmente basaltos, dando lugar a las conocidas como columnatas basálticas (ver Ilustración 1-1;4). Estas columnas se crean por el enfriamiento y la contracción de la lava (compuesta en un 90% por basalto), lo que hace que el suelo se agriete en largas columnas geométricas.



Ilustración 1-4 Columnas basálticas. [6]

Los mosaicos son un tipo de fractura que se produce en la roca y que se caracteriza por la formación de bloques poligonales con formas irregulares (ver Ilustración 1-5).

En los basaltos, los mosaicos se forman por la contracción de la lava durante el enfriamiento. La lava se contrae y se agrieta en bloques poligonales que pueden tener formas irregulares. Estos bloques pueden ser de diferentes tamaños y formas y pueden estar separados por grietas o fisuras. Se pueden fácilmente apreciar estas formas en una de las formaciones basálticas más famosas del planeta, la “Calzada del Gigante” en Irlanda, donde cientos de columnas basálticas forman un enorme mosaico sobre la superficie.



Ilustración 1-5 Calzada del gigante (Irlanda). [7]

[5]

1.1.1.2 Rocas sedimentarias

Las rocas sedimentarias se generan debido a la alteración y destrucción de rocas preexistentes. La meteorización y el transporte de estos materiales hacia depósitos residuales originan este tipo de rocas. El transporte de sedimentos se puede dar a través de los ríos, hielo, nieve, o corrientes oceánicas. Los residuos acumulados en las cuencas sedimentarias son consolidados con el paso del tiempo dando así lugar a este tipo de rocas (ver Ilustración 1-6).



Ilustración 1-6 Estratos de rocas sedimentarias [5].

Las rocas sedimentarias suelen tener una familia de diaclasas discontinuas en direcciones paralelas y no paralelas. Las discontinuidades paralelas se producen cuando la roca se somete a tensiones que actúan en una dirección preferente. Estas tensiones pueden ser debidas a la compresión o a la expansión de la roca. Las discontinuidades paralelas pueden ser muy importantes desde el punto de vista geomecánico, ya que controlan la estabilidad de los taludes y la permeabilidad de la roca.

En las calizas, por ejemplo, se pueden encontrar otros tipos de juntas como mosaicos o polígonos irregulares que se forman por la disolución selectiva de la roca (ver Ilustración 1-7). La disolución selectiva es un proceso químico que se produce cuando el agua disuelve algunos minerales de la roca más rápido que otros. Esto hace que la roca se disuelva de manera desigual y se formen bloques poligonales con formas irregulares.

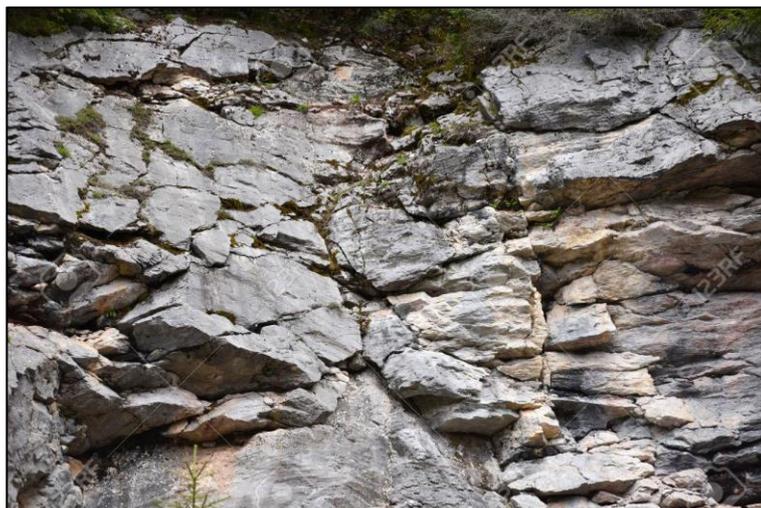


Ilustración 1-7 Mosaicos formados en pared de roca caliza. [8]

[5]

1.1.1.3 Rocas metamórficas

Estas rocas surgen a partir de rocas anteriores, las cuales han sido sometidas a un ambiente de temperatura y/o presión distinta al que fueron formadas, primeramente. Este ambiente puede ser más mucho más frío o más caliente, al igual que la presión, que puede ser totalmente distinta.

Al darse este suceso, las rocas evolucionan hacia nuevos tipos de rocas estables ante estas nuevas condiciones de temperatura y presión.

Las rocas metamórficas presentan una gran variedad de formas y texturas, clasificándose principalmente en pizarrosas, con foliación plana y cristales microscópicos; esquistosa, con foliación ondulada y cristales considerables (ver Ilustración 1-8); gnésica, con cristales de gran calibre y sin foliación, con cristales distribuidos al azar en todas las direcciones.



Ilustración 1-8 Roca metamórfica (esquisto). [9]

Las rocas metamórficas pueden tener una o dos discontinuidades principales y otras secundarias que dependen del grado de meteorización. Las discontinuidades más comunes en las rocas metamórficas son las diaclasas y las fallas.

Las diaclasas como ya se ha comentado son fracturas que se producen en la roca sin que haya habido desplazamiento relativo entre los dos bloques que se separan.

Las fallas son fracturas en las que ha habido desplazamiento relativo entre los dos bloques que se separan. Las fallas pueden ser muy importantes desde el punto de vista geomecánico, ya que controlan la estabilidad de los taludes y la permeabilidad de la roca.

[5]

1.1.2 Resistencia al corte del material. Mohr-Coulomb.

A la hora de definir el comportamiento de un macizo rocoso se pueden emplear diferentes modelos elasto-plásticos, que, a través de ciertos parámetros, modelan el material y simulan las propiedades reales que este pueda tener.

Algunos de los diferentes modelos que se pueden emplear son el de Hoek-Brown, Mohr-Coulomb o Drucker-Prager. En este estudio se usará el modelo de Mohr-Coulomb, que requiere como parámetros para definir el macizo rocoso, la cohesión y el ángulo de rozamiento del material.

El criterio de Mohr-Coulomb es una herramienta fundamental en la mecánica de suelos y la geotecnia, utilizada para analizar la resistencia de los materiales geométricos, como el macizo rocoso, ante esfuerzos y desplazamientos. Este criterio establece una relación entre la resistencia al corte de un material y los esfuerzos tangenciales aplicados sobre él.

En el caso específico del macizo rocoso, el criterio de Mohr-Coulomb permite analizar su comportamiento ante fuerzas de corte y su capacidad para resistir desplazamientos. La formulación básica del modelo establece que el esfuerzo de corte tangencial (τ) que puede soportar el macizo rocoso es una función lineal de la presión normal (σ_n) y una constante llamada ángulo de fricción interna (ϕ), así como la cohesión (c) presente en el material.

La ecuación que representa el teorema de Mohr-Coulomb aplicado al macizo rocoso es:

$$\tau = c + \sigma_n * \tan(\phi)$$

Donde:

- τ es el esfuerzo de corte tangencial en el macizo rocoso

- σ_n es la presión normal o esfuerzo normal sobre el macizo rocoso
- ϕ es el ángulo de fricción interno, que representa la resistencia al deslizamiento del material
- c es la cohesión, que representa la fuerza de adhesión entre las partículas del material

La aplicación del criterio de Mohr-Coulomb al macizo rocoso implica realizar ensayos de laboratorio para determinar los valores de ϕ y c , así como obtener mediciones de los esfuerzos normales y tangenciales que actúan sobre el material. Los resultados de estos ensayos permiten obtener una representación gráfica del comportamiento del macizo rocoso, conocida como el círculo de Mohr, que muestra las relaciones entre los esfuerzos tangenciales y normales, y las direcciones de los planos o estados tensionales.

Es importante mencionar que el modelo de Mohr-Coulomb es una simplificación de la realidad y no puede describir de manera precisa todos los fenómenos que ocurren en el macizo rocoso. Sin embargo, proporciona una base sólida para entender el comportamiento general del material y tomar decisiones de diseño y construcción en proyectos relacionados con el macizo rocoso.

[10]

1.1.2.1 Criterio Mohr Coulomb para discontinuidades.

De igual forma que se ha empleado el modelo de Mohr - Coulomb para describir el comportamiento del macizo rocoso, se empleará el mismo para poder definir las propiedades de las juntas o diaclasas de estudio, es decir, que será necesario conocer en la interfaz: la cohesión, el ángulo de fricción, la tensión, la rigidez normal y la rigidez a cortante.

Las discontinuidades en un macizo rocoso son planos de debilidad, como fracturas, juntas, fallas y estratos, que dividen el material en bloques separados. Estas discontinuidades tienen una gran influencia en el comportamiento mecánico del macizo, ya que pueden permitir la generación de deslizamientos y deformaciones.

La aplicación del criterio de Mohr-Coulomb a las discontinuidades de un macizo rocoso involucra el análisis de la resistencia al corte de dichas discontinuidades. Similar a la formulación básica de este criterio, la resistencia al corte en la interfaz de una discontinuidad se puede expresar en términos de la presión normal, el ángulo de fricción interna y la cohesión de la misma.

La ecuación que representa el criterio de Mohr-Coulomb aplicado a las discontinuidades del macizo rocoso es similar a la ecuación básica, pero se reemplaza la presión normal por la tensión efectiva normal (σ_n'), que tiene en cuenta la influencia del peso propio del macizo y de otras cargas externas:

$$\tau_d = c_d + \sigma_n' * \tan(\phi_d)$$

Donde:

- τ_d es la resistencia al esfuerzo cortante en la discontinuidad
- c_d es la cohesión de la discontinuidad
- σ_n' es la tensión efectiva normal sobre la discontinuidad
- ϕ_d es el ángulo de fricción o rozamientos interno de la discontinuidad

Para determinar los valores de c_d y ϕ_d de las discontinuidades, se deben realizar ensayos específicos, como ensayos de corte directos o ensayos triaxiales en muestras con planos de debilidad, que permiten estudiar sus características mecánicas y de resistencia.

Es importante tener en cuenta que las discontinuidades pueden variar ampliamente en sus propiedades y comportamiento, lo que hace que el análisis sea complejo. Por lo tanto, es necesario realizar muestreos y ensayos representativos de las discontinuidades presentes en el macizo rocoso para obtener resultados confiables y precisos.

[10] [11]

1.1.3 Ensayos en macizo rocosos (laboratorio e in situ)

Es muy interesante y necesario realizar distintos tipos de ensayos a la roca para poder conocer todas sus

propiedades y así realizar los estudios y dimensionamientos pertinentes en el entorno de estos materiales.

Para poder realizar cualquier tipo de ensayo, es necesario la preparación de las probetas, es decir, la extracción del testigo, el corte de las caras y el refrentado mecánico.

En cuanto a los ensayos que se pueden realizar destacan el ensayo de compresión simple, el ensayo de tracción y el triaxial, entre otros.

1.1.3.1 Ensayo a compresión simple

Este ensayo determina la resistencia a compresión uniaxial (ver Ilustración 1-9). A través de él, se pueden conocer las distintas constantes elásticas de la roca, como el módulo de Young, el coeficiente de Poisson, etc.

Este ensayo es de gran importancia, ya que sirve para la clasificación de la roca, así como la aplicación de criterios de rotura, la estimación de la resistencia in situ, o para análisis numérico.

La normativa que rige este ensayo es la UNE 103400:1993.



Ilustración 1-9 Ensayo de compresión simple en roca [12].

Algunos valores representativos de este ensayo aparecen en la Tabla 1-1.

Tipo de roca	Valores aproximados (MPa)
Sedimentaria	100-150
Ígnea	200
Metamórfica	50-60

Tabla 1-1 Valores aproximados ensayo compresión simple. [13] [14] [15]

1.1.3.2 Ensayo de tracción simple

Este ensayo es algo más complejo que el de compresión debido a la dificultad de aplicar el esfuerzo de tracción sobre la probeta, además de los problemas de inestabilidad de la fisuración. Por ello, este ensayo presenta una mayor dispersión de los resultados. Lo más común es obtener solamente los valores del ensayo de compresión, y determinar la resistencia a tracción a través de correlaciones.

Entre los ensayos de tracción se pueden encontrar el de tracción directa, el brasileño o el de flexo-tracción (ver Ilustración 1-10).



Ilustración 1-10 Ensayo brasileño [16].

De igual forma que en el ensayo a compresión simple, se incluye la Tabla 1-2 con valores representativos del ensayo de tracción de diferentes rocas.

Tipo de roca	Valores aproximados (MPa)
Basalto	3 - 18
Gneis	7 - 16
Granito	11 - 21
Caliza	3 - 5
Mármol	7 - 12
Cuarcita	4 - 23
Arenisca	5 - 11
Esquito	5 - 12
Pizarra	2 - 17
Toba	2 - 4

Tabla 1-2 Valores aproximados ensayo tracción simple. [17]

1.1.3.3 Ensayo triaxial

El ensayo triaxial es realizado a una probeta cilíndrica rodeada por una membrana elástica. Esta probeta es colocada en una célula bajo presión inducida mediante un líquido (generalmente aceite) (ver Ilustración 1-11).

En este ensayo se mide la deformación axial y lateral de la probeta.



Ilustración 1-11 Ensayo triaxial [12].

La Tabla 1-3 muestra valores representativos de este ensayo.

Tipo de roca	Valores aproximados (MPa)
Sedimentaria	5 - 7
Ígnea	100-200
Metamórfica	40-50

Tabla 1-3 Valores aproximados ensayo triaxial. [18] [19] [20]

1.2 Discontinuidades

Como ya se ha comentado en el anterior apartado, la mayor problemática que presentan los macizos rocosos son las familias de discontinuidades que puedan presentar. En estos planos de debilidad es más probable que se desarrollen esfuerzos y desplazamientos que no pueden ser soportados por estos planos, por ejemplo, ante un caso de descarga, como es el caso de un túnel.

Las discontinuidades pueden definirse como cualquier corte, fisura o grieta que posea el macizo rocoso, teniendo este una resistencia a la tracción muy baja o nula en estas zonas.

[5] [11]

1.2.1 Caracterización de las discontinuidades

Se pueden incluir dentro de las discontinuidades del macizo rocoso a todo tipo de fracturas, diaclasas, planos de estratificación, fallas, zonas de contacto entre distintas formaciones geológicas o zonas de concentración de esfuerzos de corte. Generalmente son superficies aproximadamente planas y paralelas entre sí, con separaciones de centímetros hasta decenas de metros.

Por lo general, existe una familia de juntas paralela a los planos de sedimentación, además de una o dos familias adicionales en otras direcciones. En rocas ígneas y metamórficas pueden llegar a existir más de tres familias de juntas.

Las discontinuidades se pueden clasificar según diversos criterios, como su orientación, el tipo de deformación presente, la composición del material y la morfología. A continuación, se describen algunos tipos de discontinuidades comunes en los macizos rocosos y sus propiedades asociadas.

- **Juntas:** Son discontinuidades subverticales, es decir, perpendiculares al suelo y paralelas entre sí. Se forman durante la consolidación del material y pueden ser primarias o secundarias. Las juntas primarias se forman durante la deposición del material y están relacionadas con la estratificación geológica. Las juntas secundarias se forman posteriormente debido a procesos tectónicos o meteorológicos (ver Ilustración 1-12).

Cuando aparecen más de una familia de juntas, se habla de juntas conjugadas. Dentro de un macizo rocoso puede aparecer más de una familia de juntas, paralelas entre sí, con una orientación y propiedades específicas.

Las juntas pueden permitir el flujo de agua y aire a través del macizo, lo que puede provocar la erosión y la descomposición del material.

Las juntas se pueden encontrar en varios tipos de rocas, incluidas las rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas.

Por ejemplo, en el granito, una roca ígnea, las juntas pueden formarse durante el enfriamiento y la contracción del magma. En la arenisca, una roca sedimentaria, las juntas pueden formarse durante la compactación y el cementado de los sedimentos. En el mármol, una roca metamórfica, las juntas pueden formarse durante el proceso de metamorfismo cuando la roca es sometida a altas temperaturas y presiones.

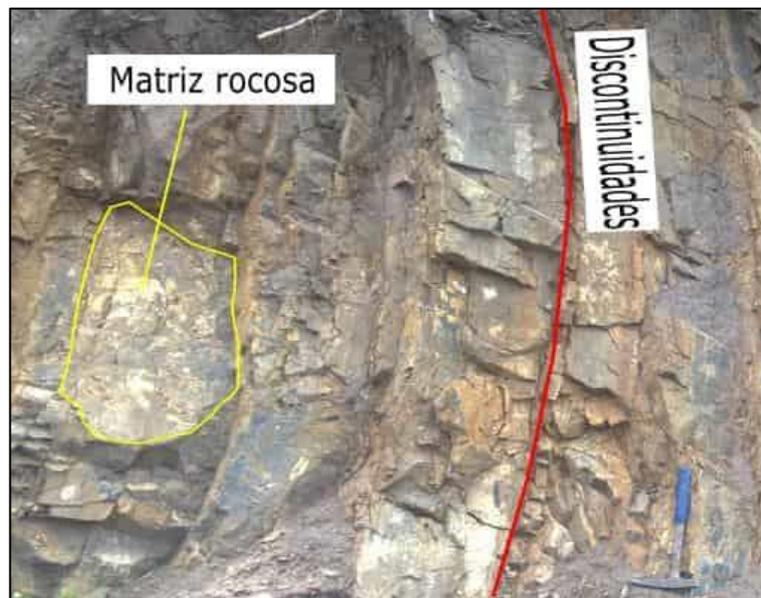


Ilustración 1-12 Junta [21]

Las juntas conjugadas son un tipo de discontinuidad que se presenta en pares, con dos conjuntos de juntas que se intersecan en ángulos agudos. Estas juntas suelen formarse como resultado de tensiones tectónicas y pueden afectar la estabilidad de las excavaciones en roca.

- **Fracturas:** Son discontinuidades que se forman cuando la fuerza aplicada al material supera su resistencia. Las fracturas pueden ser tensionales o de corte (fallas). Las fracturas tensionales se producen cuando el macizo se somete a tensiones uniaxiales, por ejemplo, cuando una ladera rocosa se desgaja hacia abajo (ver Ilustración 1-13).

La exfoliación es un tipo de fractura tensional que ocurre en rocas con capas o láminas paralelas, como el granito o la pizarra. Se produce cuando la roca se expande y se contrae debido a cambios en la temperatura o a la liberación de presión, lo que provoca la separación de las capas en láminas delgadas.

Las fallas se producen cuando el macizo se somete a esfuerzos tangenciales, por ejemplo, cuando una placa tectónica se desplaza sobre otra. Las fallas pueden tener un desplazamiento significativo y pueden ser superficiales o profundas.

Las fallas se asocian comúnmente con rocas frágiles, como rocas ígneas y metamórficas.

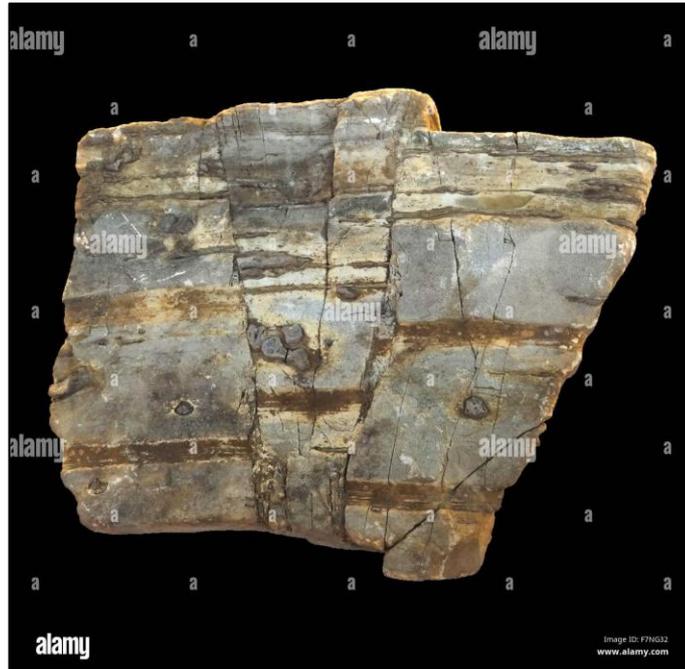


Ilustración 1-13 Fracturas [22]

- **Intersecciones y terminaciones de discontinuidades:** Las discontinuidades pueden intersectarse y formar esquinas o intersecciones. Estas intersecciones pueden influir en la resistencia y la estabilidad del macizo. Las terminaciones de las discontinuidades también pueden tener un impacto significativo en el comportamiento del macizo, ya que los bloques de roca pueden estar menos estables y más propensos a fracturas.

Las intersecciones y terminaciones de discontinuidades están presentes en prácticamente todos los tipos de rocas, pero algunas rocas pueden presentar densidades de fractura más altas que otras. Por ejemplo, las rocas sedimentarias pueden presentar altas densidades de planos de estratificación y diaclasas, mientras que las rocas ígneas pueden presentar fracturas por procesos de enfriamiento y solidificación, entre otros.

- **Estratos:** Son discontinuidades horizontales que separan capas de material. Los estratos pueden tener diferentes propiedades mecánicas y pueden influir significativamente en el comportamiento del macizo. Si los estratos son cohesivos o tienen baja resistencia al corte, pueden ser los puntos débiles en el macizo y crear zonas de inestabilidad (ver Ilustración 1-14).

Los planos de estratificación generalmente se asocian con tipos de rocas sedimentarias como arenisca o lutita.



Ilustración 1-14 Estratos [23]

Por ejemplo, las pizarras, presentan lo que se llama pizarrosidad. Se trata de un plano de debilidad paralelo a la estratificación de la roca formado como resultado del apilamiento de capas durante el proceso de sedimentación. La pizarrosidad puede afectar la resistencia y la deformabilidad del macizo rocoso.

- **Brechas y venas:** Son discontinuidades que se forman cuando el material original se rompe y se rellena con un material diferente. Las brechas pueden ser la fuente de inestabilidad en el macizo, ya que el material de relleno puede tener una resistencia diferente al resto del macizo.

El tipo de roca asociado a las brechas puede ser diverso, dependiendo de las rocas que componen los fragmentos. Las vetas, por otro lado, se forman cuando fluidos ricos en minerales llenan fracturas o cavidades en las rocas. El tipo de roca asociada con las vetas también puede variar según los minerales que se depositaron a partir de los fluidos.

- **Esquistosidad:** es un tipo de discontinuidad que se presenta en rocas metamórficas, como los esquistos. Se trata de un plano de debilidad paralelo a la foliación de la roca, que se forma como resultado del alineamiento de los minerales durante el proceso de metamorfismo. La esquistosidad puede afectar la resistencia y la deformabilidad del macizo rocoso.
- **Foliación:** A medida que aumenta el grado de metamorfismo en una roca, pueden aparecer planos de foliación. La foliación es una estructura planar que se forma en rocas metamórficas como resultado del alineamiento preferencial de los minerales durante el proceso de metamorfismo. El tipo de roca también puede influir en el tipo de discontinuidades presentes en el macizo rocoso. Por ejemplo, las rocas ígneas suelen presentar juntas columnares, mientras que las rocas sedimentarias suelen presentar estratificación y diaclasas.
- **Cabalgamientos:** un cabalgamiento o falla de cabalgamiento es un tipo de falla inversa, o sea una rotura en la corteza de la Tierra a través de la cual se ha producido un desplazamiento relativo, en el que las rocas de posición estratigráfica inferior son empujadas hacia arriba, por encima de los estratos más recientes. Las fallas de cabalgamiento son el resultado de fuerzas de compresión (ver Ilustración 1-15). [5]

Los pliegues relacionados con cabalgamientos tienen escalas horizontales variables, pero por lo general no superan los 10 km. Su forma puede ser muy variada, desde pliegues isoclinales a pliegues suaves, simétricos o asimétricos, paralelos o bien con flancos y/o charnela engrosados, así como pliegues redondeados. [24]



Ilustración 1-15 Cabalgamiento. [25]

Generalmente se tratan de rocas sedimentarias, en la que elementos de carácter horizontal, como los estratos o los planos de esquistosidad (en el caso de rocas metamórficas), quedan curvados, formando ondulaciones alargadas y de direcciones más o menos paralelas entre sí.

Es importante tener en cuenta que las discontinuidades pueden variar ampliamente en sus propiedades y comportamiento, lo que hace que el análisis sea complejo. Por lo tanto, es necesario realizar muestreos y ensayos representativos de las discontinuidades presentes en el macizo rocoso para obtener resultados confiables y precisos.

La presencia de discontinuidades en un macizo rocoso tiene un impacto significativo en la excavación de un túnel. Estas discontinuidades pueden afectar la calidad de la roca, la estabilidad temporal y la capacidad de soporte del macizo. Por lo tanto, es esencial evaluar y comprender las características de las discontinuidades antes y durante la excavación del túnel.

1.2.2 EFECTO DE LA ANISOTROPIA DE LAS ROCAS

En las rocas, la anisotropía puede ser generada por factores como la estratificación, las fracturas, el contenido de arcilla por su estructura laminar y la foliación en una roca metamórfica, donde los minerales se orientan en una dirección preferencial. [5]

Cuando una roca presenta anisotropía, su resistencia compresiva para un mismo estado de carga varía según el ángulo entre la dirección de los planos de anisotropía y la dirección de la carga aplicada (ver Ilustración 1-16) pudiendo presentar valores muy diferentes. [26]

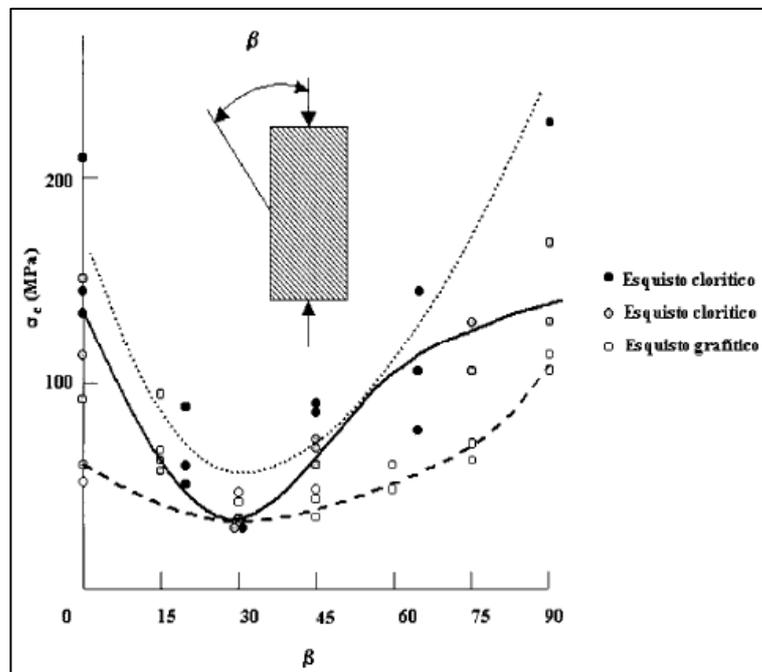


Ilustración 1-16 Resistencia a compresión de esquistos ante diferentes ángulos de planos y dirección de carga.

Un criterio sencillo para estudiar la anisotropía en las rocas es considerar un único plano de debilidad. Este enfoque se basa en el hecho de que muchas rocas tienen una estructura estratificada o foliada, lo que significa que tienen una orientación preferente de sus capas o planos de debilidad.

Un criterio anisótropo más sencillo para la resistencia de un plano único de orientación es el criterio de Coulomb. Este criterio se basa en la teoría clásica de Mohr-Coulomb para describir la falla de la roca utilizando dos conjuntos diferentes de constantes materiales (cohesión y ángulo de fricción) a lo largo del plano de debilidad y la roca intacta. Este criterio modela el comportamiento de resistencia de una roca que contiene una junta o un solo plano de debilidad. [27]

Sin embargo, es importante tener en cuenta que este criterio tiene algunas limitaciones y no siempre puede proporcionar una descripción precisa del comportamiento de resistencia de las rocas anisótropas. Por ejemplo, el criterio de Coulomb no tiene en cuenta la posible interacción entre diferentes planos de debilidad en una roca, lo que puede afectar significativamente su comportamiento de resistencia.

1.2.3 Ensayos de laboratorio a las discontinuidades

Al igual que en el macizo rocoso, a las discontinuidades también se le realizan distintos ensayos para poder determinar las características de estas. Para ello también se extraen probetas en las zonas de discontinuidades del macizo rocoso, se cortan las caras del testigo, y se realiza el refrentado mecánico.

Entre los distintos ensayos que se pueden realizar, destacan el ensayo de corte directo, el ensayo triaxial y los ensayos in situ (ver Ilustración 1-17).

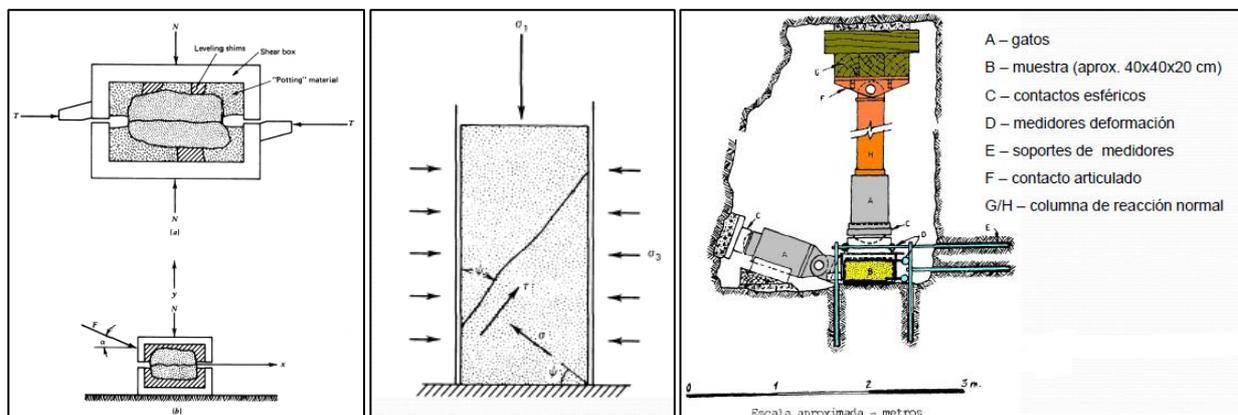


Ilustración 1-17 Ensayo de corte directo, ensayo triaxial y ensayo de corte directo in situ.

El círculo de Mohr es una herramienta gráfica utilizada en mecánica de rocas para representar el estado de esfuerzos en un punto del macizo rocoso (ver Ilustración 1-18). Permite visualizar la relación entre los esfuerzos normales y cortantes en diferentes planos de corte y determinar la orientación y magnitud del esfuerzo principal y el esfuerzo cortante máximo.

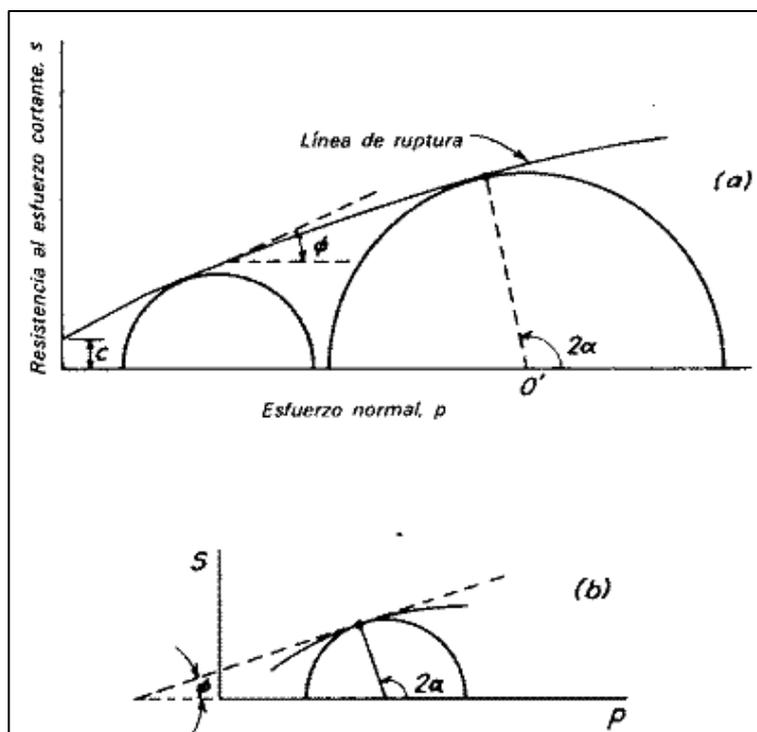


Ilustración 1-18 Círculos de Mohr (Mecánica de suelos). [28]

En el ensayo de corte directo, se aplica una carga normal constante sobre una muestra de roca y se mide la fuerza cortante necesaria para producir el deslizamiento a lo largo de un plano de discontinuidad. La inclinación del esfuerzo cortante en el corte directo debe ser controlada para evitar la aparición de un momento indeseado, debido a la posible rugosidad presente en la fractura. Esto se logra mediante el uso de dispositivos especiales que permiten el movimiento horizontal sin restricciones y evitan la rotación de la muestra durante el ensayo.

[29] [30]

1.2.4 Clasificaciones geomecánicas

Para poder realizar el proyecto y construcción de un túnel se requieren datos geológicos y geomecánicos, necesarios para el diseño de los sostenimientos, la elección del método de excavación y el tratamiento del terreno, si es necesario.

Los principales parámetros geomecánicos que se utilizan para caracterizar el macizo rocoso dentro del campo de la deformabilidad. La estimación de estos parámetros incluye ensayos in situ y métodos geofísicos correlaciones entre el módulo de elasticidad y el parámetro RQD, métodos empíricos como el RMR, Q y GSI.

Por otro lado, para caracterizar el macizo rocoso, es necesario estudiar el campo de la resistencia, es decir, estudiar la matriz rocosa con los ensayos de compresión simple, tracción y triaxial (aplicando el criterio de Hoek y Brown).

Es necesario también el estudio de las discontinuidades a través de los ensayos de corte directo, rozamiento (aplicando los criterios de Mohr-Coulomb o Barton-Choubey).

Terzaghi en 1946 propuso la primera clasificación del terreno orientada a la construcción de túneles. Las que podemos denominar clasificaciones modernas como son el sistema RMR de Bienawski o el sistema Q de Barton, intentan un mayor grado de objetividad. Se trata en los dos casos de combinar atributos del macizo rocoso en un número único relacionado con la calidad global de la roca. Este número permite la definición de un sostenimiento del túnel y la estimación de otros parámetros o datos de interés como son la resistencia al corte del macizo rocoso, el tiempo de estabilidad de una excavación no sostenida por ningún tipo de sostenimiento determinado, etc.

1.2.4.1 Sistema RMR

Fue desarrollado por Bienawski entre los años 1974 y 1979. Este sistema de clasificación tiene en cuenta los siguientes parámetros:

- Resistencia de la roca intacta
- Índice RQD
- Separación o espaciado de las discontinuidades
- Características de las discontinuidades
- Condiciones del agua en el terreno
- Corrección por discontinuidades

Las puntuaciones que pueden tomar cada uno de los parámetros anteriormente mencionados son las siguientes (ver Tablas 1-4 – 1-6):

Parámetros			Puntuaciones						
1	Resistencia de la roca intacta (MPa)	Carga puntual	>10	4-10	4-2	2-1	Para valores bajos preferible q_u		
		q_u	>250	250-100	100-50	50-25	25-5	5-1	<1
Puntuación			15	12	7	4	2	1	0
2	RQD (%)		90-100	75-90	50-75	25-50	<25		
	Puntuación		20	17	13	6	3		
3	Separación diaclasas (cm)		>200	60-200	20-60	6-20	<6		
	Puntuación		20	15	10	8	5		

Tabla 1-4 Sistema de puntuaciones RMR (I).

4	Características De las discontinuidades		Longitud < 1m Sin separación Muy rugosa Sin relleno No meteorizada	Longitud: 1-3m Separación <1 mm Rugosa Relleno duro <5mm Ligeramente meteorizada	Longitud: 3-10m Separación 0,1-1 mm Ligeramente rugosa Relleno duro > 5mm Moderadamente meteorizada	Longitud: 10-20m Separación 1-5 mm Ondulada Relleno blando <5 mm. Muy meteorizada	Longitud: >20m Separación >5mm Suave Relleno blando >5 mm Descompuesta
	Puntuación		30	23	13	6	0
5	Agua del terreno	Flujo 10 m túnel (l/min)	0	<10	10-25	25-125	>125
		u junta/ σ_1	0	<0,1	0,1-0,2	0,2-0,5	>0,5
	Estado general		seco	húmedo	mojado	goteando	Flujo de agua
	Puntuación		15	10	7	4	0

Tabla 1-5 Sistema de puntuaciones RMR (II).

Rumbo y buzamiento diaclasas		Muy favorable	Favorable	Neutro	Desfavorable	Muy desfavorable
Puntuación	Túneles	0	-2	-5	-10	-12
	Cimentaciones	0	-2	-7	-15	-25
	Taludes	0	-5	-25	-50	-60

Tabla 1-6 Corrección puntuaciones RMR.

Para así, en función de la puntuación, clasificar la roca según la siguiente tabla:

Puntuación	100-81	80-61	60-41	40-21	<20
Clase	I	II	III	IV	V
Descripción	Muy buena	Buena	Aceptable	Mala	Muy mala

Tabla 1-7 Clasificación RMR.

1.2.4.2 Sistema Q de Barton

El índice Q de Barton se basa en el estudio de las discontinuidades que puedan presentarse en el macizo

rocoso, analizando características como el número de familias de discontinuidades, la rugosidad de las juntas o el estado tensional. El índice Q de Barton se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \cdot \frac{J_r}{J_a} \cdot \frac{J_w}{SRF}$$

Los parámetros son los siguientes:

- RQD: índice de calidad de la roca. Se obtiene a partir de un sondeo midiendo la relación entre los trozos del testigo cuya longitud sean superiores a 10 cm y la longitud total.

$$RQD = \frac{\sum \text{Trozos de longitud} \geq 10 \text{ cm}}{\text{Longitud total del testigo}} \times 100$$

- J_n: parámetro para describir el número de familias de discontinuidad.
- J_r: parámetro para describir la rugosidad de las diaclasas.
- J_a: parámetro para describir la alteración de las diaclasas.
- J_w: coeficiente reductor por la presencia de agua en las diaclasas.
- SRF: coeficiente reductor por el estado tensional (zonas de corte, fluencia, expansividad, tensiones in situ).

De nuevo se tiene una nueva clasificación para cada unidad litológica, en función de los parámetros arriba expuestos.

Atendiendo a los matices de la clasificación RMR, se puede realizar la clasificación Q de Barton atendiendo a este nuevo sistema de puntuación (ver Ilustraciones 1-18 – 1-21):

- **J_n = Índice de diaclasado**
 - A. Roca masiva sin diaclasas o con pocas diaclasas: 0,5-1
 - B. Una familia de diaclasas: 2
 - C. Una familia y algunas diaclasas aleatorias: 3
 - D. Dos familias de diaclasas: 4
 - E. Dos familias y algunas diaclasas aleatorias: 6
 - F. Tres familias de diaclasas: 9
 - G. Tres familias y algunas diaclasas aleatorias: 12
 - H. Cuatro o más familias, diaclasa aleatorias, roca muy fracturada: 15
 - J. Roca triturada, terrosa: 20
- **J_r = Índice de rugosidad de las diaclasas**
 - Contacto de la roca en las diaclasas
 - A. Diaclasas discontinuas: 4
 - B. Diaclasas onduladas, rugosas e irregulares: 3
 - C. Diaclasas onduladas, lisas. 2
 - D. Diaclasas onduladas, perfectamente lisas. 1.5
 - E. Diaclasas planas, rugosas e irregulares: 1,5
 - F. Diaclasas planas, lisas: 1
 - G. Diaclasas planas, perfectamente lisas: 0,5
 - Sin contacto de la roca en las diaclasas 1
 - H. Zona con arcilla con espesor que impide el contacto de la roca en las diaclasas: 1
 - J. Zona arenosa con espesor que impide el contacto de la roca en las diaclasas: 1

Ilustración 1-19 Sistema de puntuación Q de Barton (I).

- ◆ J_a = Índice que indica la alteración de las diaclasas
- Contacto de la roca en las diaclasas (sin minerales de relleno)
 - A. Discontinuidad cerrada, dura, impermeable: 0,75
 - B. Planos de discontinuidad inalterados, ligeramente manchados: 1
 - C. Planos de discontinuidad ligeramente alterados: 2
 - D. Rellenos no blandos de arcilla limosas o arenosas: 3
 - E. Rellenos blandos de arcillas: 4
 - Contacto entre los planos de discontinuidad ante un cizallamiento inferior a 10 cm
 - F. Partículas arenosas, roca desintegrada libre de arcillosa: 4
 - G. Fuertemente sobreconsolidados, con rellenos arcillosos no blandos: 6
 - H. Sobreconsolidación media a baja, rellenos arcillosos: 8
 - J. Rellenos de arcillas expansivas: 8-12
 - Sin contacto en la diaclasa tras cizallar la junta
 - K, L y M. Bandas de roca desintegrada y arcilla: 6-12
 - N. Bandas de arcillas limosas o arenosas: 5
 - O, P y R. Bandas continuas de arcilla: 10-20

Ilustración 1-20 Sistema de puntuación Q de Barton (II).

- J_w = Coeficiente reductor por la presencia de agua en las diaclasas
 - A. Excavación seca o filtración mínima (<5 l/m localmente): 1
 - B. Filtración a presión media con lavado ocasional del relleno: 0,66
 - C. Filtración importante a presión alta en rocas competentes sin relleno: 0,5
 - D. Filtración importante a presión alta con lavado de rellenos: 0,33
 - E. Filtración excepcionalmente alta en el momento de la voladura: 0,2-0,1
 - F. Filtración excepcionalmente alta o presión de agua: 0,1-0,05
- SRF = Coeficiente reductor por las tensiones
 - Zonas de debilidad intersectando la excavación, que pueden causar aflojamiento de la masa de roca al excavar el túnel
 - A. Ocurrencia múltiple de zonas de debilidad con arcilla o roca químicamente desintegrada. Roca muy floja (cualquier profundidad): 10
 - B. Zonas débiles aisladas, conteniendo arcilla (profundidad $z \leq 50m$): 5
 - C. Zonas débiles aisladas, conteniendo arcilla (profundidad $z > 50m$): 2,5
 - D. Múltiples zonas de fractura en roca competente (libre de arcillas): 7,5
 - E. Zonas de fractura aisladas en roca competente (libre de arcillas, $z \leq 50m$): 5
 - F. Zonas de fractura aisladas en roca competente (libre de arcillas, $z > 50m$): 2,5

Ilustración 1-21 Sistema de puntuación Q de Barton (III).

✦ **SRF = Coeficiente reductor por las tensiones**

- ☐ Zonas de debilidad intersectando la excavación, que pueden causar aflojamiento de la masa de roca al excavar el túnel
 - G. Juntas abiertas flojas o muchas juntas (cualquier profundidad): 5
- ☐ Roca competente. Problemas de tensiones en roca
 - H. Tensión baja. Superficial. $\sigma_c / \sigma_1 > 200$ (excavación estable), $\tau_{m\acute{a}x} / \sigma_c < 0,01$: 2,5
 - J. Tensiones medias. $\sigma_c / \sigma_1 = 200-10$ (excavación estable) $\tau_{m\acute{a}x} / \sigma_c = 0,01-0,3$: 1
 - K. Tensiones elevadas. Estructura compacta. $\sigma_c / \sigma_1 = 10-5$ (rotura frágil), $\tau_{m\acute{a}x} / \sigma_c = 0,3-0,4$: 0,5-2
 - L. Lajamiento moderado de la roca. $\sigma_c / \sigma_1 < 5-2,5$, $\tau_{m\acute{a}x} / \sigma_c = 0,33-0,16$: 5-10
 - M. Lajamiento y estallido de la roca, en roca masiva. $\sigma_c / \sigma_1 < 3-2$, $\tau_{m\acute{a}x} / \sigma_c < 0,16$: 10-20
 - N. Estallidos violentos de la roca. $\sigma_c / \sigma_1 < 2$ (excavación inestable), $\tau_{m\acute{a}x} / \sigma_c < 0,16$: >20
- ☐ Rocas deformables. Flujo plástico de roca incompetente bajo la influencia de alta presión de roca
 - O. Presión de deformación baja. 5-10
 - O. Presión de deformación alta. 10-20
- ☐ Roca expansiva, cuya actividad depende de la presencia de agua
 - P. Presión suave de roca expansiva: 5-10
 - R. Presión elevada de roca expansiva: 10-15

Ilustración 1-22 Sistema de puntuación Q de Barton (IV).

Para así, en función de la puntuación, clasificar la roca según la siguiente tabla:

Q	0,001-0,01	0,01-0,1	0,1-1	1-4	4-10	10-40	40-100	100-400	400-1000
Descripción de la roca	Exc. pobre	Ext. pobre	Muy pobre	Pobre	Aceptable	Buena	Muy buena	Ext. buena	Exc. buena

Tabla 1-8 Clasificación Q de Barton.

1.2.4.3 Relación RMR y Q de Barton

La clasificación geomecánica RMR de Bieniawski y la clasificación Q de Barton son dos sistemas ampliamente utilizados para evaluar la calidad de los macizos rocosos. Ambas clasificaciones tienen en cuenta parámetros como la resistencia de la roca intacta, el grado de fracturación, el espaciamiento y las condiciones de las

discontinuidades, y la presencia de agua subterránea

En la Tabla 1-9 se comparan los factores que se estudian en ambas clasificaciones.

FACTOR	CSIR (Bieniawski)	NGI (Barton)
RESISTENCIA ROCA MATRIZ	SI (compresión) (Point Load o Compr. Simpl)	SI (compr. y tracc.) (a través de cocientes con nivel de tensiones)
RQD	SI	SI
ESPACIAMIENTO JUNTAS	SI	NO
CONDICION JUNTAS Rugosidad Relleno/Alteración	SI (globalmente)	SI (en detalle) SI (en detalle)
AGUA Caudal Presión Condiciones generales	SI SI SI	SI SI NO
ORIENTACION JUNTAS	SI (criterios según: túneles/ciment./taludes)	NO (pero busca propiedades de las más desfavorables)
NUMERO DE FAMILIAS DE DISCONTINUIDADES	NO	SI
ZONAS ESPECIFICAS DE FALLAS O DEBILES	NO	SI
NIVEL DE TENSIONES	NO	SI
EXPANSIBILIDAD ROCA	NO	SI

Tabla 1-9 Comparación RMR vs Q de Barton.

El sistema Q parece algo más completo, aunque no se dan criterios claros sobre la importancia de la orientación y buzamiento de las discontinuidades (como se hace en el sistema RMR). Parece que el sistema RMR es algo más conservador que el Q de Barton.

Aunque ambas clasificaciones son ampliamente utilizadas, tienen diferentes aplicaciones. La clasificación RMR se utiliza principalmente como índice geomecánico para evaluar las propiedades de los macizos rocosos, mientras que la clasificación Q se utiliza principalmente para evaluar el sostenimiento de túneles mediante bulones, cerchas, hormigón proyectado, etc.

Por otro lado, se han encontrado correlaciones empíricas entre ambos sistemas de clasificación, que permiten convertir un valor del índice Q en un valor del índice RMR utilizando estas fórmulas:

- $RMR = 9 \cdot \ln(Q) + 44 = 20.7 \cdot \log(Q) + 44$ (Bieniawski, 1976)
- $RMR = 13.5 \cdot \log(Q) + 43$ (Rutledge, 1978)
- $RMR = 12.5 \cdot \log(Q) + 55.2$ (Moreno (Moreno Tallón, Tallón, 1981)

1.3 Problemática de los macizos rocosos

Los macizos al ser cargados o descargados como en el caso de los túneles presentaran una serie de problemas:

mayores asientos, concentración de tensiones, inestabilidad de los taludes, pérdida de resistencia al corte, etc. Estos problemas son debidos fundamentalmente a la calidad de la roca y a las características de las discontinuidades

La ingeniería geotécnica es una disciplina que se encarga de estudiar estas problemáticas y desarrollar estrategias para prevenir las o mitigarlas. Esto puede incluir el uso de técnicas de anclaje, inyecciones de cemento, redes de cables y otros métodos para fortalecer el macizo rocoso y prevenir la fracturación.

[31] [32]

1.3.1 Desplazamientos (asientos)

Una de las principales problemáticas asociadas con estas discontinuidades es la presencia de asientos llamada también subsidencia, que pueden poner en riesgo la estabilidad y seguridad del terreno. Los asientos son un problema común en rocas sedimentarias blandas, frágiles, tectónicas o cársticas que se encuentran en las capas superficiales de la tierra. Estas discontinuidades son profundamente impactantes para la construcción de infraestructura, minería y otros usos humanos de la tierra.

La presencia de asientos en rocas no cohesivas se debe a la existencia de espacios vacíos, debilidades o fracturas en la roca subyacente. En este tipo de terreno, las tensiones horizontales pueden generar cargas que causan que las rocas se deslicen y se asienten, lo que representa un peligro para cualquier estructura construida sobre ellas. Los efectos de los asientos pueden ser percibidos en múltiples situaciones, como en la formación de hendiduras en las carreteras o incluso en la caída de puentes, y edificios.

La problemática de los asientos provocados por las discontinuidades de un macizo rocoso está comúnmente presente en túneles en roca, donde los asientos pueden provocar importantes daños tanto durante la construcción y la operación del túnel.

Las técnicas de mitigación para abordar los desplazamientos de los macizos rocoso incluyen el uso de estabilizadores de suelo, que apuntan a tener preconfiamiento, mejoramiento de la estabilidad y aumento del tiempo de emergencia en la presencia de asientos, inyección de resinas epoxi para mejorar su resistencia y mejorar y solidificar la superficie del suelo, la inyección de cemento en los huecos de la roca y la construcción de cimentaciones especiales para compensar la tasa de asentamiento.

1.3.2 Concentración de tensiones

La presencia de discontinuidades en un macizo rocoso puede provocar una concentración de tensiones en la roca. Este problema se produce porque la resistencia de la roca no es uniforme, existiendo zonas que son más blandas o débiles que otras debido a sus características de deformabilidad y a la presencia de fracturas, grietas y otros tipos de discontinuidades (ver Ilustración 1-23).

La concentración de tensiones se produce cuando se ejerce una fuerza sobre una de las zonas más blanda o débil de la roca. En estas zonas, la tensión que se produce es mayor que la resistencia al corte de la roca, lo que puede provocar que se produzca una fractura. Esta fractura puede volver a generar nuevas discontinuidades en la roca o extender la misma, lo que aumenta el riesgo de que se produzcan deslizamientos, caídas de bloques o inestabilidad en taludes.

La concentración de tensiones puede afectar tanto a la estabilidad del terreno como a la seguridad de las

construcciones que se realizan.

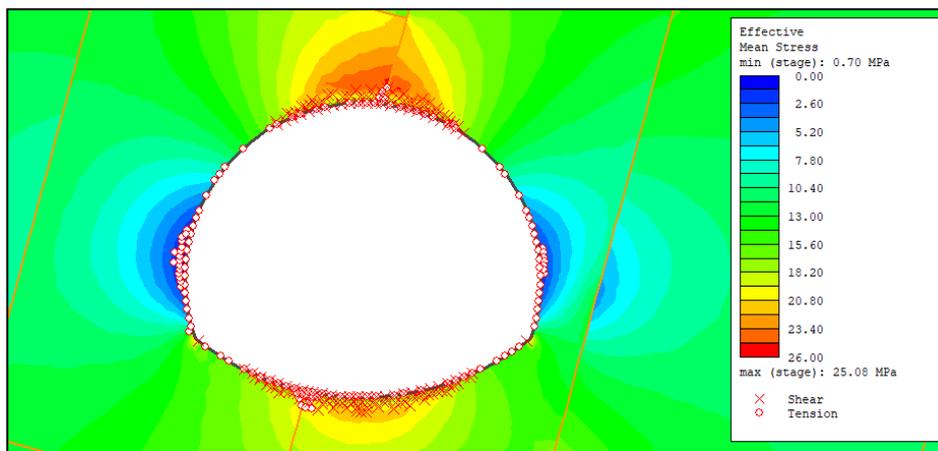


Ilustración 1-23 Concentración de tensiones debido a discontinuidades (Ejemplo de RS2).

1.3.3 Expansividad

La expansividad en los macizos rocosos puede generar problemas en la estabilidad del terreno y en la construcción de infraestructuras (ver Ilustración 1-24). En estos casos, la presencia de discontinuidades en el macizo rocoso es especialmente relevante, ya que pueden provocar tensiones internas que generan la expansión de la roca.

Existen distintas técnicas de mitigación para abordar este problema, tales como el control de la humedad y la temperatura durante la construcción, la inyección de selladores para prevenir la entrada y salida de agua en las discontinuidades y fracturas, y la perforación y el sellado de las discontinuidades.



Ilustración 1-24 Expansividad en macizos rocosos. [33]

Un ejemplo de expansividad en túneles es el caso del túnel en Dugongling, China. Durante el periodo de operación, se produjeron desastres causados por la expansión del macizo rocoso circundante al túnel (ver Ilustración 1-25). Este estudio investigó el desastre que ocurrió en el túnel basándose en una simulación numérica. Según los datos geológicos, la expansión y ablandamiento del macizo rocoso circundante era probablemente la principal causa de las grietas en el revestimiento. Se propusieron cuatro esquemas de refuerzo y se simuló el mejor esquema de refuerzo. [34]

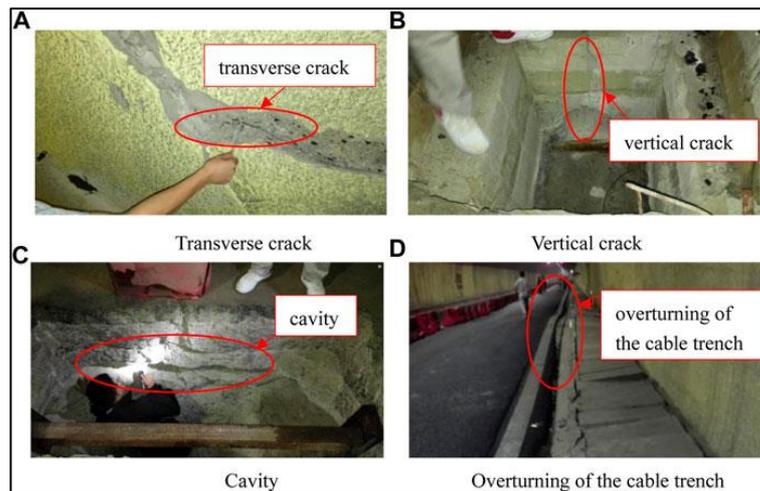


Ilustración 1-25 Fallos en el túnel de Dugongling, China. [34]

1.3.4 Abrasividad

La abrasividad es la capacidad de una superficie para desgastar, rayar o erosionar otras superficies que entran en contacto con ella. En el caso de los macizos rocosos, la presencia de discontinuidades puede aumentar su abrasividad, lo que puede generar problemas de seguridad en las construcciones.

Las discontinuidades en un macizo rocoso son zonas más débiles que el resto de la roca. Estas zonas pueden presentar una superficie rugosa o irregular que favorece la abrasión. Además, el movimiento de las rocas que se produce debido a la acción del agua, el viento, el hielo o el ser humano, puede generar fricción y aumentar la abrasividad.

Existen varios métodos para medir o estimar la abrasividad en las rocas o macizos, como el índice Schimazek o el ensayo Cerchar. Estos métodos permiten evaluar la capacidad de una superficie para desgastar otras superficies que entran en contacto con ella.

Existen varios métodos para medir o estimar la abrasividad en las rocas o macizos. Uno de ellos es el índice Schimazek, que se utiliza para estudiar la excavabilidad y ripabilidad de los materiales rocosos. Este índice se calcula a partir del contenido en cuarzo equivalente en minerales abrasivos, el diámetro medio del grano de cuarzo y la resistencia a tracción de la roca. [35]

Otro método para medir la abrasividad en las rocas es el ensayo Cerchar. Este ensayo mide la capacidad de una superficie para desgastar un útil metálico mediante el rozamiento. La abrasividad se determina a partir del diámetro de la superficie circular producida por el desgaste del útil, expresado en décimas de milímetro. [36]

1.3.5 Inestabilidad del talud

La inestabilidad del talud es uno de los problemas más comunes que se pueden presentar en un macizo rocoso. La presencia de discontinuidades en la roca es una de las causas principales de este problema, ya que estas pueden debilitar la estructura del talud y provocar desprendimientos y deslizamientos de tierra (ver Ilustración 1-26).

Las discontinuidades pueden ser de diferentes tipos, como fracturas, juntas, fisuras, fallas, entre otras. A medida que se produce la erosión del terreno, la actividad geológica y las condiciones climáticas, estas discontinuidades se pueden agrandar y multiplicar, debilitando la estructura del macizo rocoso. Cuando se ejerce una fuerza sobre el talud, ya sea por la acción del agua, del viento o del hombre, la inestabilidad de este puede aumentar significativamente.

La inestabilidad del talud puede provocar graves daños a la infraestructura cercana y poner en riesgo la seguridad de las personas.

Para prevenir y mitigar los efectos de la inestabilidad del talud, es necesario llevar a cabo estudios detallados del terreno. Con los resultados obtenidos, se pueden diseñar técnicas que reduzcan el riesgo de desprendimientos y deslizamientos de tierra, como la colocación de mallas y barreras protectoras, la realización de anclajes y perfiles

de tornillo, y el diseño adecuado de los taludes y las superficies de la construcción.

También es importante llevar a cabo un mantenimiento periódico de los taludes, con el fin de detectar posibles problemas y corregirlos antes de que se produzcan accidentes. Esto puede incluir el sellado de fracturas y la reparación de zonas erosionadas, así como la realización de inspecciones visuales y la monitorización continua de la actividad geológica de la zona.



Ilustración 1-26 Inestabilidad de taludes en roca. [37]

1.3.6 Resistencia al corte

La resistencia al corte de los macizos rocosos es una propiedad fundamental que se utiliza para evaluar la estabilidad de las estructuras geotécnicas. Las discontinuidades en el macizo rocoso pueden disminuir la resistencia al corte, lo que puede provocar problemas de seguridad en las obras de ingeniería, como deslizamientos y derrumbes.

La resistencia al corte es la medida de la fuerza necesaria para cortar un material, como una roca. Cuando se aplica una fuerza cortante a una roca, como la que se produce por la acción de los agentes atmosféricos o por la construcción de una obra, como un túnel, esta puede romperse en dirección perpendicular a su superficie.

Las discontinuidades en la roca, como juntas, fisuras, fracturas y fallas, son zonas en las que la cohesión entre las partículas que conforman la roca es menor, lo que reduce la resistencia al corte. Cuando se aplica una fuerza cortante a una zona del macizo rocoso que presenta discontinuidades, la roca puede fracturarse y desplazarse, lo que reduce su resistencia a medida que la fractura se propaga.

La resistencia al corte del macizo rocoso puede afectar a la estabilidad de las obras de ingeniería que se construyen sobre él. En túneles, una disminución en la resistencia al corte del terreno puede provocar

deslizamientos y daños en las infraestructuras.

1.4 Problemática de las discontinuidades

Para poder definir cada una de las discontinuidades que puedan presentarse en un macizo rocoso, se determinan o cuantifican ciertos aspectos de estas, como orientación, separación, apertura, continuidad o características de las superficies de contacto. Todos estos parámetros afectan activamente al comportamiento de las discontinuidades, y por el ende el efecto que provocan en un macizo rocoso y en los desplazamientos alrededor de un túnel.

1.4.1 Orientación

La orientación es un aspecto muy importante a definir, ya que la orientación de las discontinuidades con respecto a las cargas aplicadas, puede ser un factor crítico para la estabilidad o deformabilidad del macizo rocoso (ver Ilustración 1-27).

La orientación influye también de manera importante en la resistencia y filtración de agua.

En cuanto a la resistencia, de los estudios realizados en anisotropía se concluye que si las discontinuidades tienen buzamientos entre 25 y 40° , el macizo rompe por la discontinuidad y no por la roca madre.

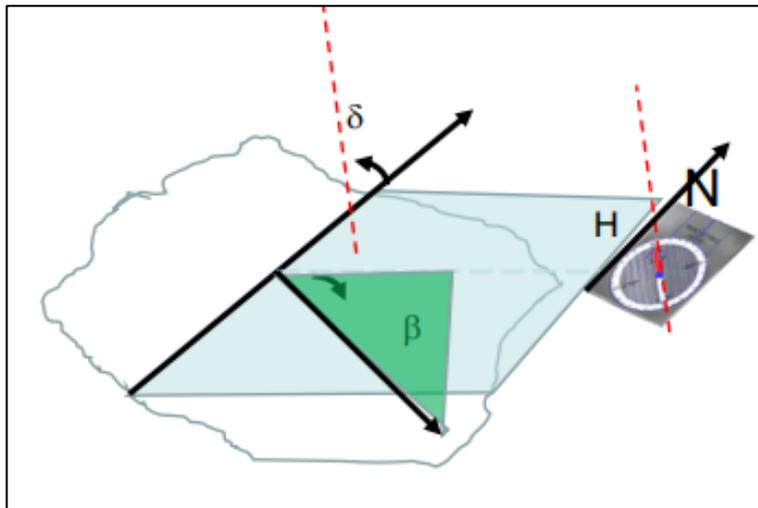


Ilustración 1-27 Orientación de las discontinuidades [38]

Las discontinuidades controlan la estabilidad de los taludes y la permeabilidad de la roca. Las discontinuidades resultan ser desfavorables cuando tienen una orientación que dificulta la estabilidad del macizo rocoso.

Por ejemplo, si se está construyendo una presa y las discontinuidades tienen una orientación que hace que el agua pueda filtrarse a través de ellas, esto puede ser un problema (ver Ilustración 1-28). [39]

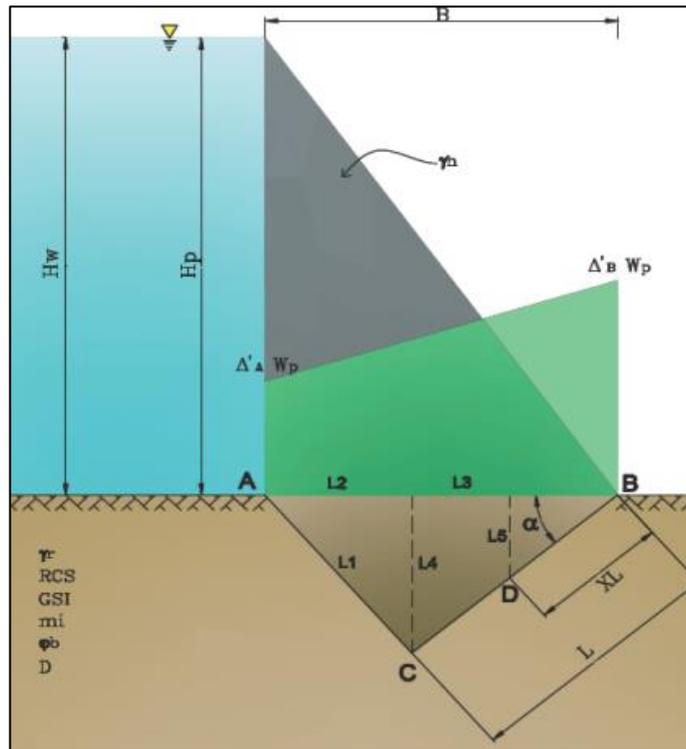


Ilustración 1-28 Esquematación ejemplo de construcción de presa. Representación de tensiones y criterios de rotura. [39]

De manera similar, si se está construyendo un túnel y las discontinuidades tienen una orientación que hace que el macizo rocoso sea inestable, esto también puede ser un inconveniente. En general, las discontinuidades desfavorables pueden ser una gran dificultad en cualquier tipo de construcción que involucre macizos rocosos.

1.4.2 Apertura y separación

La abertura se puede definir como la distancia entre dos caras de una fractura.

Por otro lado, la separación se define como la distancia entre dos planos de discontinuidad de una familia (ver Ilustración 1-29).

Tanto la abertura como la separación controlan todas las propiedades del macizo rocoso con relación al movimiento del agua. Unas grandes aberturas facilitan el movimiento del agua, y el relleno de estas por materiales de aportación.

La presencia de agua en las discontinuidades reduce las características mecánicas del relleno. En general, el agua hace disminuir el ángulo de rozamiento de los minerales. También, la abertura o cierre de juntas provoca cambios en la permeabilidad.

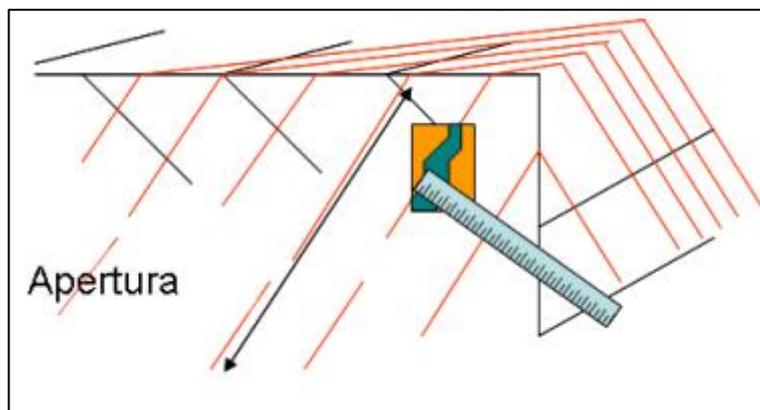


Ilustración 1-29 Separación de las discontinuidades [38]

La apertura y separación de las juntas de un macizo rocoso puede afectar la resistencia al corte del macizo rocoso. La resistencia al corte es la capacidad del macizo rocoso para resistir las fuerzas que intentan cortar el macizo rocoso. Si las juntas están abiertas y separadas, esto puede reducir la resistencia al corte del macizo rocoso a cero. Las juntas pueden abrirse y separarse debido a la deformación del macizo rocoso o debido a la acción de los agentes externos, como el agua o el hielo.

La separación y la continuidad de las juntas puede afectar el tamaño de bloque del macizo rocoso. Si las juntas están muy separadas y continuas, esto puede hacer que los bloques sean más grandes. Por otro lado, si las juntas están poco separadas y son discontinuas, esto puede hacer que los bloques sean más pequeños. Se muestra en la Ilustración 1-30, el efecto escala del tamaño de los bloques en un macizo rocoso. A escala micro, el macizo se considera que es la matriz rocosa, de forma que a medida que la escala crece se identifica que la masa es un macizo con una, dos y más discontinuidades, disminuyendo el tamaño del bloque en función del número de familias o juntas por unidad de área o volumen.

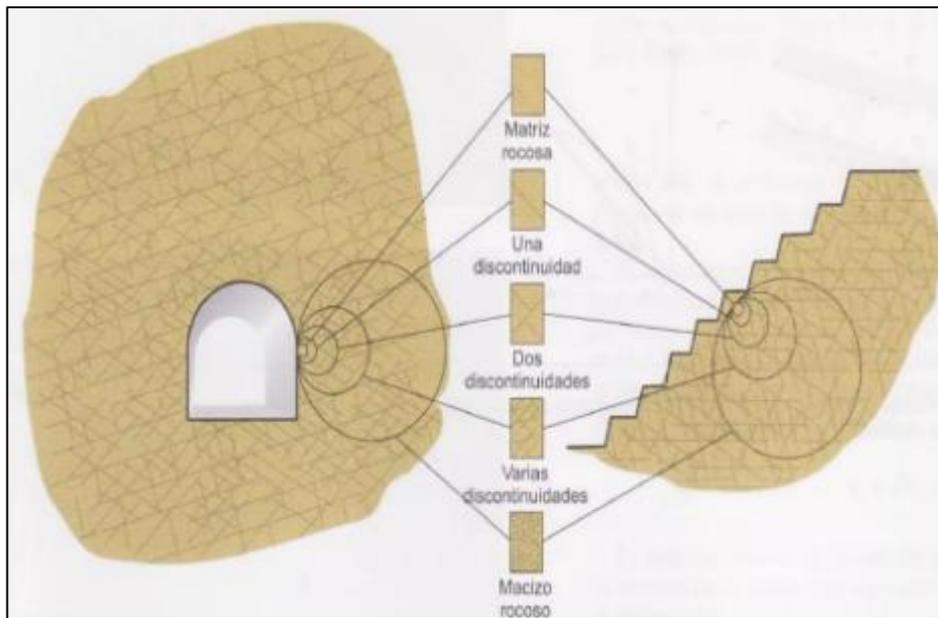


Ilustración 1-30 Influencia del tamaño de los bloques en el comportamiento y resistencia del macizo rocoso. [40]

La apertura y separación de las juntas también puede aumentar la permeabilidad del macizo rocoso, lo que puede hacer que el macizo rocoso sea más inestable. Si las discontinuidades están abiertas y separadas, esto puede permitir que el agua se filtre a través del macizo rocoso con mayor facilidad. Por lo que la resistencia del macizo rocoso puede verse afectada por la infiltración de agua, lo que puede debilitar la estructura del macizo rocoso y aumentar el riesgo de inestabilidad. Además, la presencia de agua en el macizo rocoso también puede aumentar la presión de poros, lo que puede reducir aún más la resistencia del macizo rocoso. [41]

Por otro lado, si las discontinuidades están rellenas, esto puede reducir la permeabilidad del macizo rocoso.

1.4.3 Relleno

En algunos casos, las discontinuidades pueden estar llenas de materiales como arcilla, arena u otros sedimentos, lo que puede afectar su resistencia y capacidad de drenaje (ver Ilustración 1-31). Es importante tener en cuenta el tipo, composición y estado del relleno de las discontinuidades al evaluar la estabilidad del macizo rocoso y tomar decisiones de diseño del túnel.

El relleno de las discontinuidades puede ser natural o artificial. El relleno natural se produce cuando los minerales se depositan en las discontinuidades con el tiempo. El relleno artificial se produce cuando se inyecta un material en las discontinuidades para reducir su permeabilidad.



Ilustración 1-31 Relleno de las discontinuidades [38]

El tipo de relleno presente en las juntas también puede afectar la resistencia al corte del macizo rocoso. Si las juntas están llenas de material seco o están cementadas, esto puede aumentar la resistencia al corte del macizo rocoso. El material seco puede actuar como un puente entre las paredes de las juntas y aumentar la resistencia al corte del macizo rocoso. Sin embargo, si las juntas están llenas de material húmedo y con poco o nada de cementación, esto puede reducir la resistencia al corte del macizo rocoso. El material húmedo puede actuar como un lubricante entre las paredes de las juntas y reducir la resistencia al corte del macizo rocoso.

1.4.4 Continuidad

Este parámetro indica si la fractura es “persistente” o está formada por pequeñas fracturas unidas por roca intacta (ver Ilustración 1-32).

Una fractura persistente es más deformable y débil que las pequeñas unidos por puentes de roca.

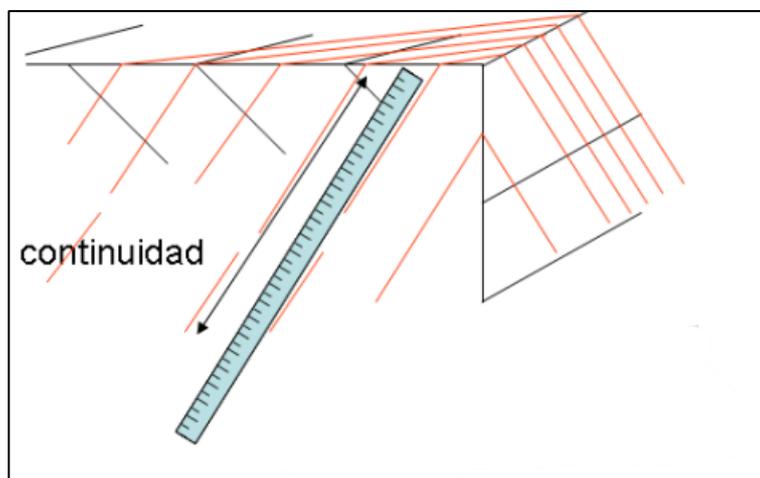


Ilustración 1-32 Continuidad de las discontinuidades [38]

La continuidad de las juntas también puede afectar el tamaño de bloque del macizo rocoso. Si las juntas son

continuas, esto puede hacer que los bloques sean más grandes. Por otro lado, si las juntas son discontinuas, esto puede hacer que los bloques sean más pequeños (ver Ilustración 1-29).

El tamaño de bloque del macizo rocoso es importante porque puede afectar la estabilidad del macizo rocoso. Los bloques más grandes pueden ser más estables que los bloques más pequeños. Sin embargo, los bloques más grandes también pueden ser más peligrosos si se desprenden del macizo rocoso. Los bloques más pequeños pueden ser menos estables que los bloques más grandes, pero también pueden ser menos peligrosos si se desprenden del macizo rocoso.

1.4.5 Rugosidad

La rugosidad de las discontinuidades se refiere a la aspereza de las superficies (ver Ilustración 1-33). Cuando las juntas son poco rugosas o lisas, la resistencia al corte disminuye, por lo que una mayor rugosidad puede aumentar la fricción entre las superficies de la discontinuidad, lo que a su vez puede mejorar la estabilidad del macizo rocoso.

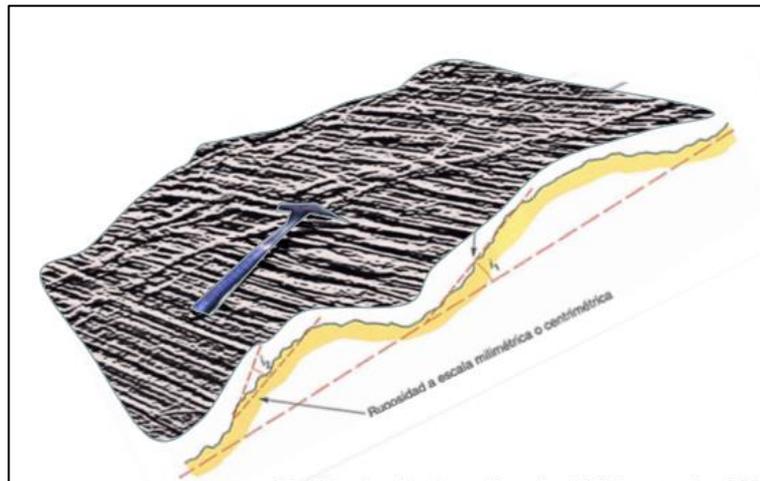


Ilustración 1-33 Rugosidad de las discontinuidades [38]

La rugosidad también puede afectar la permeabilidad del macizo rocoso. Si la superficie es muy rugosa, esto puede hacer que el agua tenga mayor dificultad para atravesar el macizo rocoso, por lo que la permeabilidad se vería considerablemente disminuida. Por lo que una rugosidad excesiva puede dificultar la excavación y el avance del túnel.

La cohesión y el ángulo de fricción del macizo rocoso también pueden afectar la estabilidad del macizo rocoso.

La cohesión se refiere a la fuerza que mantiene unidos los granos de la roca. Si la cohesión es baja, esto puede hacer que el macizo rocoso sea inestable.

El ángulo de fricción se refiere a la resistencia que ofrece una superficie al deslizamiento. Si el ángulo de fricción es bajo, esto puede hacer que el macizo rocoso sea inestable.

1.4.6 Alteración y meteorización

Las discontinuidades también pueden estar sujetas a procesos de alteración y meteorización, como la desintegración química o física de la roca (ver Ilustración 1-34). Estos procesos pueden comprometer aún más la estabilidad del macizo rocoso y requerir medidas adicionales de estabilización.



Ilustración 1-34 Alteración de las discontinuidades [38]

La alteración y meteorización pueden afectar la resistencia de las paredes de las discontinuidades. La erosión física, química o biológica puede debilitar las paredes de las discontinuidades y hacer que el macizo rocoso sea inestable.

Por ejemplo, la erosión física puede producir grietas en las paredes de las discontinuidades, lo que puede hacer que el macizo rocoso sea inestable. La erosión química puede disolver los minerales que mantienen unidos los granos de la roca, lo que también puede hacer que el macizo rocoso sea inestable.

La erosión biológica puede debilitar las paredes de las discontinuidades al exponerlas a la acción de las raíces de las plantas y otros organismos.

Estos factores (erosión física, química y biológica) se puede medir en función de la resistencia a compresión de las paredes de la discontinuidad gracias a la ayuda del esclerómetro.

El esclerómetro, también conocido como martillo de Schmidt, es un instrumento que se utiliza para estimar la resistencia a compresión simple de las paredes del macizo rocoso de manera sencilla y aproximada. Este ensayo consiste en medir la resistencia al rebote de la superficie de la roca ensayada. [42]

El esclerómetro se aplica presionando la punta del mismo sobre una superficie rocosa hasta que salta el muelle, el cual golpea la roca a través de una punta cilíndrica. En función de la dureza de la roca o superficie ensayada, el muelle sufre un mayor o menor rebote. A mayor rebote mayor resistencia de la roca. El esclerómetro debe colocarse perpendicularmente al plano o roca ensayada.

Una vez determinado el valor promedio de cada superficie, el valor del rebote del esclerómetro se correlaciona mediante el gráfico de Miller para la determinación de la resistencia a compresión simple, el cual tiene en cuenta la densidad de la roca y la orientación del martillo respecto al plano de roca ensayada. [43]

1.4.7 Presencia de agua

El agua puede afectar la estabilidad del macizo rocoso de varias maneras. En primer lugar, el agua puede afectar las discontinuidades presentes en el macizo rocoso. Si las discontinuidades están llenas de agua, esto puede reducir la resistencia del macizo rocoso. El agua también puede afectar la resistencia del macizo rocoso porque reduce las tensiones efectivas debido al criterio de Terzagui (establece que el agua debe fluir de manera rápida a través de un filtro impermeable para evitar el arrastre de partículas finas del suelo). Las tensiones efectivas son aquellas que contribuyen a la resistencia del macizo rocoso. Si el agua está presente en las discontinuidades, esto puede hacer que las tensiones efectivas sean menores y reducir la resistencia del macizo rocoso.

Además, el agua puede afectar la permeabilidad del macizo rocoso. Si el agua se filtra a través del macizo rocoso, esto puede aumentar la permeabilidad y hacer que el macizo rocoso sea más inestable. La permeabilidad es importante porque controla la cantidad de agua que se filtra a través del macizo rocoso. Si el macizo rocoso es muy permeable, esto puede hacer que el agua se filtre con mayor facilidad y aumentar el riesgo de deslizamientos.

La presencia de agua en un macizo rocoso es un problema común en muchas aplicaciones geotécnicas, como la construcción de presas, túneles y laderas.

1.5 Contenido del estudio por capítulos

Este estudio se ha estructurado en 7 capítulos diferentes, donde se sigue el método científico, donde primeramente se plantea uno o varios objetivos, se aplica unos modelos de junta en la masa rocosa, se realizan cálculos con elementos finitos para obtener unos resultados, datos y conclusiones.

En concreto cada uno de los capítulos refleja la siguiente idea:

- Introducción:

Se describen detalladamente lo que es un macizo rocoso, incluyendo los tipos de discontinuidades que se suelen dar en ellos, los criterios de resistencia que se le aplican o los distintos ensayos que se pueden aplicar. En este primer capítulo también se desarrolla el concepto de discontinuidades, explicando la caracterización de estas, el criterio de resistencia que se le aplica, los ensayos, o las clasificaciones geomecánicas que se emplean para definir las. Por último, este capítulo incluye la problemática de los macizos rocosos, como la subsidencia, la expansividad, la abrasividad, etc. Y la problemática de las discontinuidades como la orientación la rugosidad, la presencia de agua, etc.

- Objetivos:

En este capítulo se explica por un lado el objetivo principal que lleva a la realización de este estudio, es decir, el análisis de la influencia de las distintas familias de diaclasas, geometrías de túnel y estados tensionales en los desplazamientos en los desplazamientos en el contorno del túnel.

Por otro lado, se persigue los siguientes objetivos específicos para analizar la influencia de la distribución espacial de las discontinuidades en materiales como macizos rocosos:

- a) Reconocimiento y caracterización de la masa rocosa.
- b) Tipologías de discontinuidades a estudiar.
- c) Análisis de estabilidad estructural del macizo rocoso (orientación).
- d) Forma, tamaño y número de familias de discontinuidades (Tamaño del bloque).
- e) Estado de la cara o paredes de las discontinuidades. Resistencia.
- f) Resistencia al corte de la discontinuidad en función de la rugosidad, abertura y relleno.
- g) Efecto del agua en la resistencia. Tensión normal efectiva.
- h) Modelos de comportamiento de la roca matriz. Software RS2.
- i) Criterio de rotura de las discontinuidades. Software RS2.
- j) Modelos de junta. Software RS2.
- k) Análisis y conclusiones.

- Modelización numérica:

En este capítulo se comienza explicando en qué consiste y como trabaja el programa *RS2* perteneciente al software *Rocscience*. Este capítulo también incluye el estudio de las distintas tipologías de túneles a analizar y su relación con las tensiones en el contorno. Por último, este capítulo incluye la modelización en *RS2* del dominio de estudio (propiedades del material), del tipo de junta a emplear (propiedades de la junta), de los distintos tipos de familia a analizar (Paralelas, Conjugadas y Voronoi) y la modelización de las distintas secciones de túnel (circular, herradura, alcantarillado).

- Aplicación:

En base al modelo geomecánico realizada en el anterior capítulo, se realizan todos los estudios propuestos para las distintas familias de discontinuidades, geometrías de túnel y estados de carga. Se

extraen gráficos que representan los desplazamientos horizontales y verticales absolutos en las inmediaciones del túnel, así como las diferentes deformadas generadas en el contorno en cada caso de estudio y los puntos de plastificación generados.

- Análisis:

Con los datos generados en el capítulo previo, se generan ábacos y gráficos que representan los valores máximos de los desplazamientos horizontales en hastiales, los desplazamientos verticales en bóveda y contra bóveda.

- Conclusiones:

Una vez analizados todos los resultados obtenidos, se pueden extraer ciertas conclusiones con relación al buzamiento de la junta, el tipo de discontinuidad, la geometría del túnel presente en el macizo rocoso y las condiciones de carga ($k= 1, 2$ y 3).

- Líneas futuras:

Por último, se plantean varias líneas de cara a una futura continuación de este estudio, ya que los ábacos generados en el anterior capítulo pueden servir para ahondar en la problemática de las discontinuidades presentes en los macizos rocosos. También se plantea el uso de un escáner laser 2D o 3D para medir in situ los desplazamientos que se dan en el contorno del túnel y detectar la orientación de las discontinuidades.

2 OBJETIVOS

Como se ha explicado y comentado en el anterior capítulo, en este proyecto el objetivo principal es estudiar el efecto que causarían distintos tipos de discontinuidades en los desplazamientos de un túnel en un macizo rocoso, ante diferentes geometrías y distintos estado de carga.

Se comenta a continuación el objetivo principal y los objetivos específicos a alcanzar a objeto de obtener unos resultados que se puedan aplicar en otros casos parecidos al analizado en este estudio.

2.1 Objetivo general del estudio

Tras haber explicado de forma resumida lo que es un macizo rocoso, queda claro que uno de los mayores problemas que presentan estos materiales es la presencia de los planos de debilidad o discontinuidades. Los planos o superficies de debilidad en la masa rocosa pueden producir importantes movimientos, la plastificación del terreno y la rotura de la estructura subterránea o túnel.

El principal objetivo que se pretende alcanzar en este estudio es, por tanto: estudiar la influencia que tienen ciertos modelos de juntas que representan a diversas tipologías de discontinuidades, en el comportamiento deformacional de los macizos rocosos cuando estos materiales son excavados o trabajan en descarga durante la construcción de obras subterráneas como túneles.

Del análisis de la problemática que presentan tanto el macizo rocoso como los planos de debilidad se concluye la importancia de estudiar el efecto que tienen las discontinuidades ya que pueden afectar significativamente la deformabilidad y estabilidad de los túneles a medida que se excavan en el macizo rocoso.

Las discontinuidades pueden debilitar la roca y hacer que se desmorone, lo que puede ser peligroso para los trabajadores y costoso para el proyecto. Por lo tanto, es importante entender cómo los modelos de junta planteados en este estudio afectan a los movimientos, a los estados tensionales y a la resistencia al corte de los materiales. Algunas discontinuidades pueden aumentar la estabilidad al impedir el movimiento horizontal (mayor presión de confinamiento), mientras que otras pueden disminuirlas al tener menor confinamiento y peor calidad de la roca.

En resumen, la orientación, la tipología del túnel, el modelo de junta y las condiciones de carga que presentan el macizo y conjunto de discontinuidades serán los objetivos específicos a estudiar en este trabajo con el fin de garantizar la seguridad y la estabilidad de los túneles. De este estudio se espera generar unos ábacos y unas conclusiones que brinden un avance al conocimiento de la construcción de estructuras subterráneas como túneles en macizos fracturados.

2.2 Objetivos específicos del estudio

Los objetivos específicos de este estudio serán los siguientes:

- a) Reconocimiento y caracterización de la masa rocosa:

Para lograr este objetivo específico, se llevará a cabo un estudio de la geología y la estructura del macizo rocoso. Se determinarán a partir de ensayos de laboratorio e in situ las características físicas y mecánicas del macizo rocoso. Se llevará a cabo una descripción detallada de la masa rocosa, incluyendo su composición, textura, estructura y propiedades geomecánicas.

- b) Tipologías de discontinuidades a estudiar:

Para lograr este objetivo específico, se llevará a cabo un estudio de las discontinuidades más comunes y presentes en el macizo rocoso. Se identificarán estas discontinuidades en el macizo rocoso, de acuerdo con su orientación, apertura, rugosidad y relleno. Se llevará a cabo una descripción detallada de cada tipo de discontinuidad.

c) Análisis de estabilidad estructural del macizo rocoso (orientación):

Para lograr este objetivo específico, el conjunto o familia de juntas se representará en función de su buzamiento y rumbo o dirección de buzamiento. Se determinará cómo la orientación de las discontinuidades conforma una serie de mecanismos de rotura en la estabilidad del macizo rocoso (tetraedros, prismas, pentaedros, etc.). Se llevará a cabo un análisis detallado de los diferentes mecanismos que pueden aparecer en el macizo rocoso.

d) Forma, tamaño y número de familias de discontinuidades (Tamaño del bloque):

Para lograr este objetivo específico, en función de la separación, número de familias y continuidad presentes en el macizo rocoso, se llevará a cabo un estudio para determinar la forma y tamaño de los bloques. Se determinará cómo estos factores afectan al comportamiento y a la estabilidad de la masa rocosa. Se llevará a cabo un análisis detallado para determinar cómo estos factores afectan la estabilidad del macizo rocoso.

e) Estado de la cara o paredes de las discontinuidades. Resistencia:

Para lograr este objetivo específico, se estimará la resistencia y estado de las caras o paredes de las discontinuidades mediante el coeficiente JCR. Para ello, se hará uso de herramientas como el ensayo de carga puntual o el esclerómetro llamado también martillo de Schmidt. Se determinará cómo la resistencia en la cara afecta la estabilidad del macizo rocoso.

f) Resistencia al corte de la discontinuidad en función de la rugosidad, apertura y relleno:

Este objetivo específico tiene como objetivo determinar la resistencia al corte de las discontinuidades en función de su rugosidad, apertura y relleno. En este estudio se analizará el efecto que tiene la apertura cerrada y sin relleno sobre la resistencia al corte del macizo rocoso.

g) Efecto del agua en la resistencia. Tensión normal efectiva:

Este objetivo específico tiene como objetivo determinar el efecto del agua en la tensión efectiva y por ende en la resistencia del macizo rocoso representado por el criterio de Mohr Coulomb. En el estudio se considerará que el túnel es profundo y que la permeabilidad de la masa rocosa es muy pequeña por no decir impermeable. En otras palabras, las tensiones efectivas serán las mismas que las tensiones totales.

h) Modelos de comportamiento de la roca matriz. Software RS2:

Este objetivo específico tiene como objetivo utilizar el software *RS2* para simular el comportamiento elasto-plástico de Mohr Coulomb de la masa rocosa. Se introducen todas las propiedades de la roca matriz como peso unitario, porosidad, coeficiente de Poisson, módulo de Young, ángulo de fricción, cohesión y dilatancia si es necesario.

i) Criterio de rotura de las discontinuidades. Software RS2:

Este objetivo específico tiene como objetivo aplicar el software *RS2* y el criterio de rotura como método de cálculo del proceso de deslizamiento de los planos de debilidad. En este caso se utilizará el criterio elasto- plástico de Mohr-Coulomb, para simular la rotura de las discontinuidades.

j) Modelos de junta. Software RS2:

Este objetivo específico tiene como objetivo aplicar al menos tres modelos de juntas para simular el comportamiento en conjunto de las discontinuidades utilizando el software *RS2*. Se introducen todas las propiedades de la junta, como cohesión, ángulo de fricción, rigidez normal y rigidez a cortante.

k) Análisis y conclusiones:

Este objetivo específico tiene como objetivo analizar los resultados obtenidos y presentar

conclusiones en grafico o ábacos sobre el efecto de la distribución espacial de las discontinuidades en los movimientos del contorno de túneles en macizo rocoso fracturado.

3 MODELIZACIÓN NUMÉRICA

Antes de comenzar el estudio de la aplicación de los distintos modelos de juntas, se explicará desde el punto de vista del método de elementos finitos y de forma resumida, el funcionamiento del programa *RS2* de la casa *Rocscience*.

Dentro de las aplicaciones que caracterizan a *RS2*, el estudio se centrará en los movimientos del túnel en los macizos rocosos con discontinuidades.

3.1 Método de Elementos Finitos y *RS2*

El software *RS2* desarrollado por la empresa canadiense *Rocscience* es una herramienta esencial para resolver problemas relacionados con la mecánica de rocas y suelos. *RS2* usa, entre otros, el Método de Elementos Finitos (*MEF*) para simular el comportamiento de las rocas y suelos bajo diferentes condiciones de carga y contorno.

El *MEF* es una técnica numérica para analizar estructuras complejas. En lugar de considerar la estructura en su totalidad, se subdivide en pequeños elementos, y se consideran las ecuaciones para cada uno de ellos. Así es posible modelar el comportamiento de la estructura como un todo.

El *MEF* es un método general para resolver ecuaciones diferenciales parciales en dos o tres variables espaciales (es decir, algunos problemas de valores en el contorno). Para resolver un problema, el *MEF* subdivide un sistema o dominio finito en partes más pequeñas y más simples llamadas elementos. Esto se logra mediante una discretización en las dimensiones del espacio, que se implementa mediante la construcción de una malla del objeto y el dominio numérico de la solución, que tiene un número finito de puntos. La formulación del método de elementos finitos de un problema de valores en el contorno finalmente resulta en un sistema de ecuaciones algebraicas. El método aproxima la función desconocida sobre el dominio de estudio. [5]

En cuanto a la metodología de elementos finitos, se emplean elementos triangulares de 6 o 15 nodos para mallar todo el dominio de estudio, se puede decir que esta geometría es muy útil para modelar geometrías irregulares y complejas (ver Ilustración 3-1). Los elementos triangulares son muy versátiles y pueden adaptarse a cualquier forma geométrica. Además, son fáciles de generar y computacionalmente eficientes.

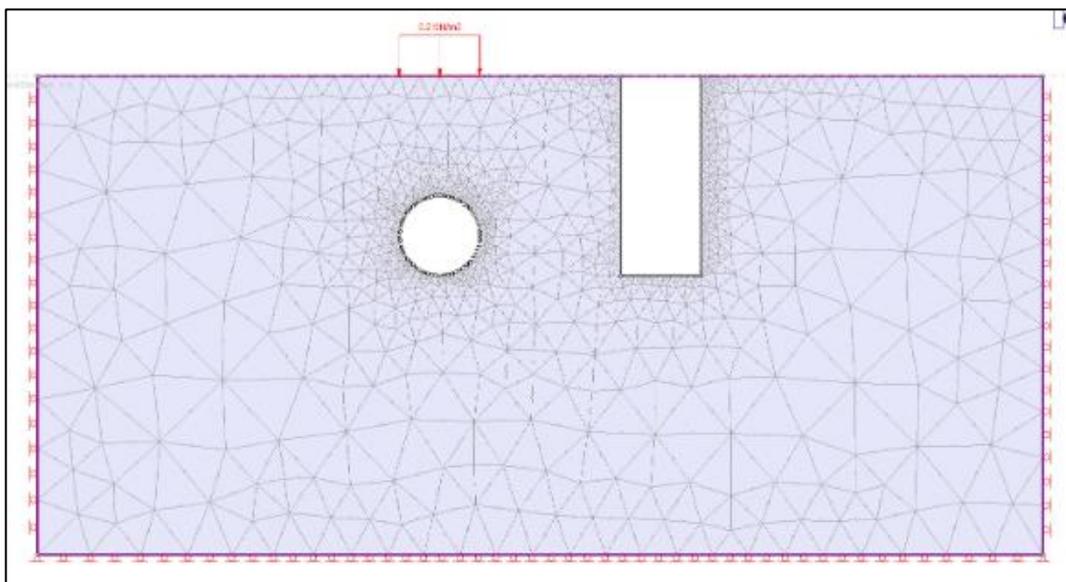


Ilustración 3-1 Mallado en *RS2*.

RS2 utiliza estos elementos finitos para modelar el comportamiento de las rocas y suelos en diferentes situaciones, como durante la excavación en la minería o en la construcción de estructuras civiles (presas, carreteras, etc.). El programa también permite simular la interacción entre diferentes materiales, como roca y hormigón, acero y arcilla, etc.

Una de las principales ventajas del uso del software *RS2* con el Método de Elementos Finitos es la capacidad de analizar problemas de resistencia y estabilidad con algo más de precisión. Esto es especialmente importante en la industria de la ingeniería civil, donde la seguridad de las estructuras es crucial.

Otra gran ventaja del *MEF* es que se puede aplicar a problemas que no tienen solución analítica. Este método numérico proporciona soluciones aproximadas utilizando cálculos matriciales complejos, lo que permite modelar una amplia variedad de situaciones, como la distribución de tensiones en materiales, el análisis de deformaciones y la solución de problemas de ingeniería.

Además, *RS2* permite simular diferentes escenarios para investigar cómo se comportará el terreno o la estructura bajo diferentes cargas y bajo distintas condiciones de contorno. Esto proporciona información valiosa para los ingenieros en la toma de decisiones sobre la construcción o para la implementación de medidas preventivas.

También se utiliza en la simulación de asentamientos en superficie o subsidencia, estabilidad de taludes de roca y para la modelación de cimentaciones profundas como pilotes.

El software *RS2* proporciona una variedad de herramientas útiles para los ingenieros que trabajan en la industria de la construcción y la minería. Por ejemplo, el programa permite a los usuarios crear modelos de diferentes situaciones y analizar el comportamiento de los materiales bajo diferentes condiciones de carga. También permite visualizar en post proceso los resultados de los modelos en 3D, lo que ayuda en la interpretación y comprensión de los datos.

Dado que los ingenieros civiles y geotécnicos a menudo tienen que lidiar con situaciones que involucran materiales complejos, como rocas y suelos, la capacidad de modelar estos materiales es importante. El *MEF*, combinado con el software *RS2*, permite a los ingenieros simular con precisión el comportamiento de estos materiales en escenarios del mundo real.

Más allá de la simulación de materiales, el software *RS2* y el Método de Elementos Finitos también permiten a los ingenieros simular diversas situaciones de carga y tensión en estructuras reales para evaluar la seguridad y la estabilidad de esas estructuras (puntual, distribuida, momentos, etc.). Esta herramienta se utiliza fundamentalmente en proyectos de construcción de obras subterráneas, así como de estructuras de tierra como presas o estribos de puente.

En conclusión, el software *RS2* de *Rocscience* es una herramienta esencial para la simulación de problemas relacionados con la mecánica de rocas y suelos, y su uso en combinación con el Método de Elementos Finitos es una técnica numérica valiosa para analizar el comportamiento de las rocas y suelos bajo diferentes condiciones de carga y entorno. *RS2* y el *MEF* son herramientas valiosas para la ingeniería civil y geotécnica debido a su capacidad de simular el mundo real y resolver complejos problemas de ingeniería.

La metodología empleada por el programa *RS2* del software *Rocscience* que implementa el Método de Elementos Finitos con elementos triangulares de 6 nodos se divide principalmente en 3 partes: preproceso, cálculo y postproceso del software.

En la etapa de preproceso, se define la geometría del modelo y se genera la malla de elementos finitos. En el caso de *RS2*, se utilizan elementos triangulares de 6 nodos para mallar todo el dominio de estudio. La malla se genera automáticamente utilizando un algoritmo que adapta los tamaños de los elementos a la geometría del modelo. También se aplican las condiciones de contorno y se le confieren las propiedades al macizo rocoso y a las juntas. También es necesario determinar un modelo de comportamiento del material, ya sea elástico o plástico.

En la etapa de cálculo, se resuelve el problema utilizando el Método de Elementos Finitos 2D. *RS2* utiliza un algoritmo iterativo para resolver las ecuaciones del sistema. El algoritmo utiliza una técnica llamada "factorización LU" para descomponer la matriz del sistema en dos matrices triangulares. Luego, se resuelven las dos matrices triangulares para obtener la solución del sistema. [44]

En la etapa de postproceso, se analizan los resultados obtenidos en la etapa de cálculo. *RS2* proporciona una amplia variedad de herramientas para visualizar y analizar los resultados. Por ejemplo, se pueden generar

gráficos de contorno del túnel para visualizar la distribución de tensiones o deformaciones en el modelo.

[45] [46]

3.1.1 Software Rocscience

La empresa que se ha encargado de desarrollar este *software* fue fundada en 1996, siendo líder mundial en el desarrollo de *softwares* 2D y 3D para ingenieros civiles, mineros y geotécnicos.

Rocscience se construyó sobre la necesidad de herramientas de análisis, diseño y visualización en las industrias de minería e ingeniería civil.

A partir de 1987, bajo la dirección del Dr. John Curran, el Grupo de ingeniería de rocas de la Universidad de Toronto desarrolló y distribuyó software de geomecánica para satisfacer esta necesidad.

[45]

Dentro de este software se incluyen multitud de herramientas que sirven para todo tipo de estudios geotécnicos necesarios para el desarrollo de un proyecto en ingeniería civil, minera o geotécnica. Cada una de las herramientas está focalizada en un tipo de estudio concreto, tales como el análisis del equilibrio límite de taludes en 2D y en 3D, el análisis de elementos finitos, también en 2D y 3D, el análisis de las tensiones en excavaciones subterráneas, estudios en 3D del asentamiento del terreno, la evaluación de los taludes de las rocas, la evaluación de las cuñas geométricas de las rocas, y su estabilidad, la estimación de los soportes necesarios en un túnel, etc.

3.1.2 Herramienta RS2 [45]

La herramienta RS2 de *Rocscience* sirve para muchos tipos de estudios del terreno, tales como:

- Excavaciones Superficiales y Subterráneas.
- Análisis de filtración de aguas subterráneas.
- Reducción de la resistencia al corte.

Dentro de las aplicaciones específicas que este programa puede brindar se pueden destacar las siguientes enfocadas en trabajos de ingeniería específicos:

- Terraplenes.
- Licuefacción.
- Minería.
- Cimientos.
- Túneles.

Esta última aplicación es la que más interesante para este estudio, ya que el programa permite el diseño y análisis de excavaciones de túneles y sistemas de soporte mediante análisis de múltiples etapas, simulación 3D de instalación de soporte y asistente de perfil de túnel (ver Ilustración 3-2).

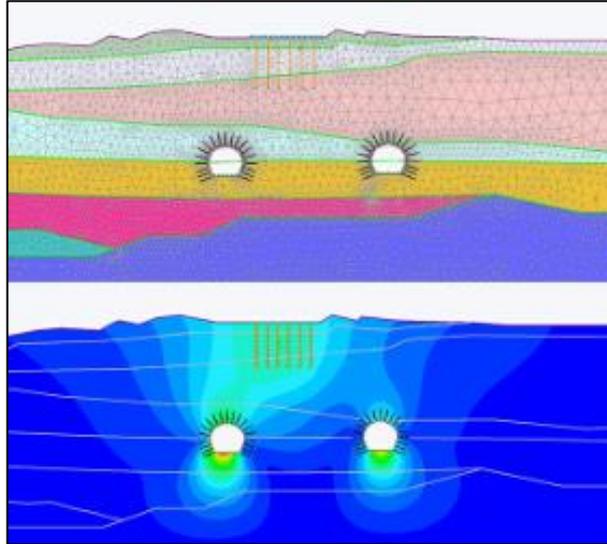


Ilustración 3-2 Túneles (RS2) [45].

3.2 Criterios que condicionan la aplicación de los modelos de juntas

Se comentó en el apartado “1.1.1 Tipos de discontinuidades en las rocas” que cada tipo de roca es más propenso a contener un tipo u otro de familias de discontinuidades, o 1 o más de 1 familia de discontinuidades.

Por ejemplo, las rocas sedimentarias son propensas a tener una familia de discontinuidades continuas y en dirección no paralelas discontinuas. Las discontinuidades paralelas o planos de estratificación se producen cuando la roca se somete a tensiones que actúan en una dirección preferente. Estas tensiones pueden ser debidas a la compresión o a la expansión de la roca. En esta roca y tipo de familias es posible modelarla las juntas con RS2 empleando el modelo de juntas paralelas para el caso de 1 sola familia de diaclasas presente en el macizo rocoso, o el modelo de juntas conjugadas para el caso en el que se presente más de 1 familia de diaclasas.

En cuanto a las calizas, que también son rocas sedimentarias, se puede dar el caso de familias de diaclasas en forma de mosaico debido a la disolución selectiva que se da en este tipo de rocas. En este caso, en con el programa RS2 sería recomendable para estudiar el efecto de las discontinuidades, el modelo Voronoi ajustando la fragmentación según la densidad por metro cúbico del número de familias de diaclasas.

Por otro parte, algunas rocas ígneas son propensas a las familias de diaclasas en forma de mosaico, en concreto las columnas de basalto. En esta tipología de roca pueden aparecer 3 o más familias principales de diaclasas y otras secundarias, como ocurre en los granitos. En el caso de más de tres familias de discontinuidades, en este tipo de roca será necesario emplear el modelo de junta Voronoi.

Las rocas metamórficas que dependen del grado de metamorfismo pueden tener una o dos discontinuidades principales y otras secundarias en dirección perpendicular o no a las anteriores. Dependiendo del grado de metamorfismo, las discontinuidades principales tendrán una u otra dirección, es decir a menor grado se observarán planos de esquistosidad, pero a mayor, dichos planos serán de foliación. Esta situación será tenida en cuenta utilizando modelos de juntas conjugadas y Voronoi del programa de elementos finitos RS2.

3.2.1 Modelos de juntas [45]

Dentro del programa RS2 se pueden encontrar diferentes tipos de familias de diaclasas, la diferencia entre ellas es fundamentalmente debido a la orientación de las familias, y a otras características como la separación, abertura y continuidad.

En los siguientes apartados, se estudian los casos más comunes de familias de discontinuidades: “Juntas Paralelas”, “Juntas Conjugadas” y “Mosaico”. así como se detallarán los aspectos que más los caracterizan.

Estos modelos representan un amplio espectro de las múltiples familias que se pueden dar en macizo rocoso, dando pie en estudios a futuro la continuación de este estudio.

3.2.1.1 Juntas o diaclasas paralelas continuadas o discontinuas (Paralell Determnistic and Statistical)

El modelo de juntas paralelas del programa *RS2* permite representar una red de juntas paralelas continuas o discontinuas (Ilustración 3-4), con distribuciones estadísticas en base a las siguientes características de la discontinuidad: espaciado, longitud y persistencia de las juntas.

En este estudio se realizará un estudio probabilístico, por ello, para definir estas propiedades (espaciado, longitud y persistencia), se selecciona un tipo de modelo de distribución estadística: Normal (ver Ilustración 3-3).

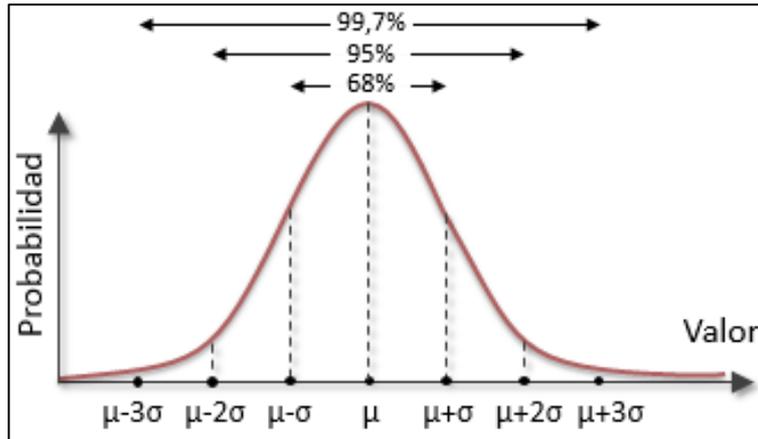


Ilustración 3-3 Distribución probabilística Normal. [47]

Para los cálculos estadísticos normales se necesita introducir en el programa *RS2*: la media (μ), la desviación típica (σ) y los valores máximo y mínimo que pueden alcanzar estas propiedades.



Ilustración 3-4 Ejemplo Paralelo discontinuo en *RS2*. [45]

3.2.1.2 Juntas Conjugadas (Cross Jointed)

Este modelo permite definir una red formada por dos conjuntos de juntas paralelas (por ejemplo, planos de estratificación con juntas conjugadas) que se cruzan para formar bloques rectangulares o trapezoidales, como se muestra en la Ilustración 3-5.

Se supone que los planos de estratificación son continuos (es decir, infinitos), mientras que las juntas transversales se cruzan con los planos de estratificación a intervalos definidos por el espaciado. Las juntas transversales no tienen por qué ser perpendiculares a los planos de estratificación, sino que pueden forman

cualquier ángulo.

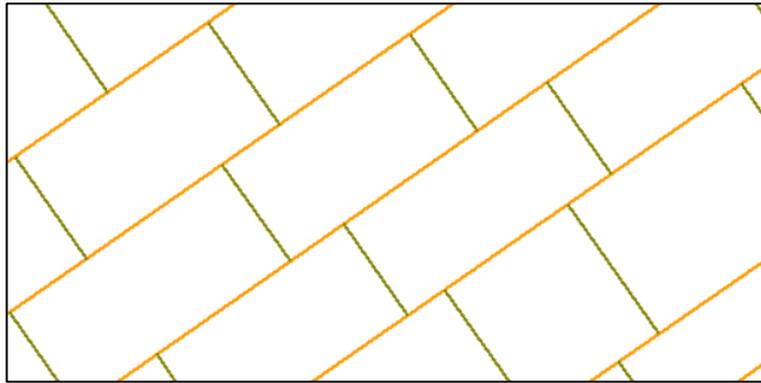


Ilustración 3-5 Ejemplo Juntas Conjugadas en RS2. [45]

Para este modelo, las propiedades de lecho y cruce se pueden especificar de forma independiente eligiendo Bedding Joint Property y Cross Joint Property. Esto determina las propiedades físicas de las juntas, por ejemplo, resistencia, rigidez, etc.

Los parámetros de orientación para el modelo de red de planos de estratificación y juntas conjugadas coinciden con el criterio del modelo de juntas paralelas y son: dirección y buzamiento del plano. Por otra parte, el modelo Cross Jointed considera lo siguiente:

- Los planos de estratificación no tienen por qué ser horizontales, pueden tener otras orientaciones.
- Las juntas transversales no tienen por qué ser perpendiculares a los planos de estratificación. Se puede definir cualquier orientación para las juntas transversales, siempre que no sean paralelas a los planos de estratificación.
- Se asume que todos los planos de estratificación son paralelos, así como todas las juntas transversales, por lo tanto, las orientaciones tienen valores constantes.

El espaciado o separación entre las juntas es la distancia perpendicular entre los planos o caras de la discontinuidad. El espaciado en el programa de los planos de estratificación se define de forma aleatoria seleccionando una distribución estadística tipo Normal, Uniforme, Exponencial o Lognormal. Para el estudio estadístico se introduce la media, la desviación típica y los valores relativos mínimo y máximo de la separación entre juntas.

3.2.1.3 Voronoi

El mosaico bidimensional de Voronoi es un proceso que subdivide aleatoriamente un plano o sección de roca en polígonos convexos no superpuestos. Una red de juntas de Voronoi está formada por planos definidos por los segmentos delimitadores de estos polígonos o celdas. [48]

El mosaico de Voronoi parte del modelo de puntos de Poisson, que define polígonos irregulares. La célula de Voronoi correspondiente a cada polígono es la región plana más cercana a ésta. Los segmentos que delimitan esta región son líneas equidistantes al polígono y a su adyacente.

Los polígonos generados mediante el modelo de puntos de Poisson no suelen estar distribuidas uniformemente en el espacio. Algunos puntos pueden estar cerca unos de otros, mientras que otros están más separados. Por ello, se recomienda que la distribución de los polígonos sea más regular.

RS2 permite a los usuarios definir la densidad de los polígonos por unidad de área o la longitud media de los lados de los polígonos de Voronoi. Este modelo se aplica a macizos rocosos fracturados en los que no existen discontinuidades con direcciones preferentes.

La homogeneidad de las formas poligonales que componen la red de Voronoi se puede determinar eligiendo una de las siguientes opciones:

- Irregular: esta opción genera una red irregular de polígonos.

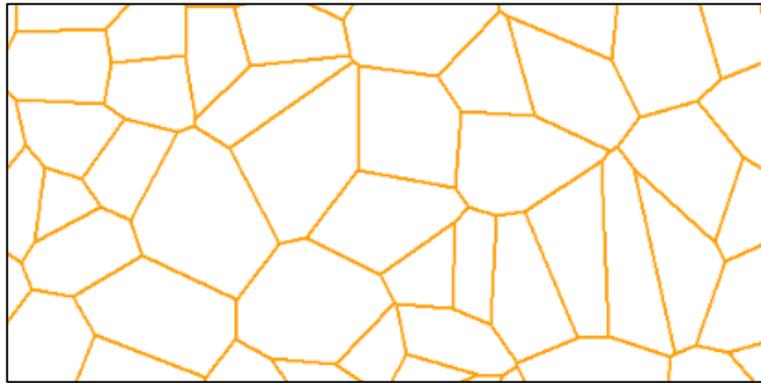


Ilustración 3-6 Ejemplo Voronoi (irregular) en RS2. [45]

- Medianamente regular: esta opción ajusta las posiciones de los polígonos a una red más regular.

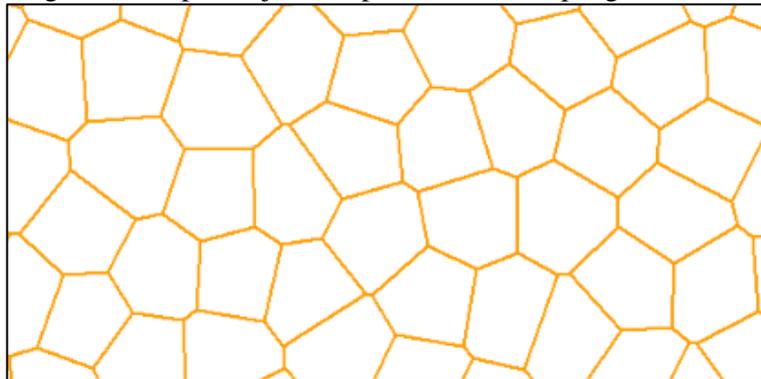


Ilustración 3-7 Ejemplo Voronoi (regular medio) en RS2. [45]

- Casi regular: esta opción ajusta las posiciones de los polígonos para obtener celdas de sección casi regular.

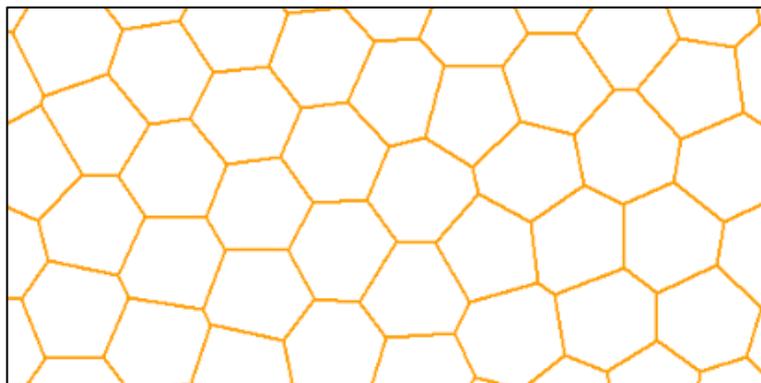


Ilustración 3-8 Ejemplo Voronoi (casi regular) en RS2. [45]

- Hexágono regular: esta opción creará una cuadrícula de hexágonos regulares e idénticos. Se puede elegir la orientación de las celdas especificando una orientación horizontal o vertical del eje largo del hexágono.

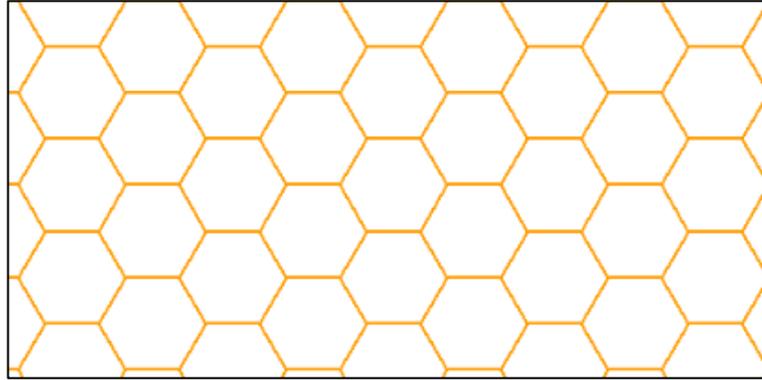


Ilustración 3-9 Ejemplo Voronoi (hexágono regular) en RS2. [45]

3.3 Criterios que condicionan la aplicación de la geometría

La construcción de túneles es una tarea compleja que requiere un profundo conocimiento de la interacción entre los materiales que la componen como son el terreno y el hormigón del sostenimiento, pero también influye la forma del túnel, las discontinuidades y el estado de tensiones. Según la forma, los túneles pueden tener varias geometrías, cada una con sus propias ventajas y desventajas en términos de estabilidad, carga y distribución de la tensión. A continuación, se describen algunos de los tipos de túneles más comunes.

[49]

3.3.1 Túneles circulares

Los túneles circulares son uno de los tipos de formas de túnel más comunes en el mundo (ver Ilustración 3-10). Se caracterizan porque proporcionan una distribución uniforme de la carga en la estructura y contorno del túnel (compresión), lo que aumenta la estabilidad de todo el túnel. Además, su construcción es relativamente fácil, lo que reduce los costes y mejora la velocidad de construcción del túnel. Los túneles circulares se utilizan en una variedad de obras civiles como carreteras, ferrocarriles, hidráulico, alcantarillado y servicios públicos.

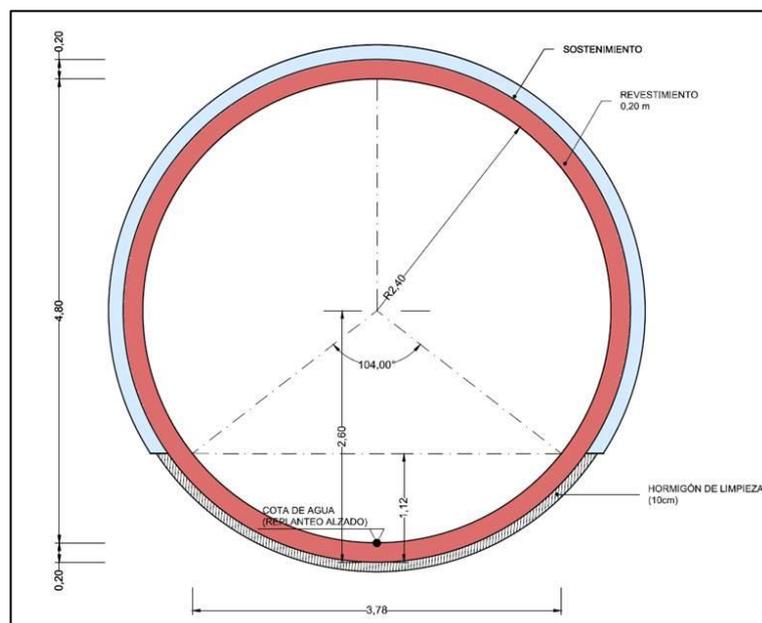


Ilustración 3-10 Ejemplo túnel circular. [50]

Una de las principales ventajas del túnel circular es que su forma simétrica permite una distribución uniforme de las tensiones alrededor del túnel. Esto resulta una menor concentración de esfuerzos en puntos específicos del túnel, lo que a su vez reduce el riesgo de discontinuidades y colapsos.

Sin embargo, una desventaja del uso de este tipo de túneles es que su construcción puede ser más costosa y requerir más materiales y duración en el proceso constructivo de túneles con otras geometrías.

Otra desventaja es que la forma circular del túnel significa que puede haber una mayor fricción por el viento en las paredes del túnel, lo que puede aumentar la resistencia al flujo de aire y disminuir la capacidad del túnel. La capacidad del túnel se refiere a la cantidad de material o tráfico que puede pasar a través del túnel en un período de tiempo determinado.

Además, la fricción del viento en las paredes del túnel también puede afectar el rendimiento del túnel en términos de su durabilidad y mantenimiento. Si hay una mayor fricción en las paredes del túnel, esto puede aumentar el desgaste en el revestimiento del túnel y en otros componentes estructurales. Esto puede requerir un mayor mantenimiento y reparación para mantener el túnel en buenas condiciones.

En cuanto a su efecto en las tensiones alrededor del túnel, un túnel circular distribuye las tensiones de manera uniforme en todas las direcciones radiales y tangenciales. Esto resulta en una disminución de las tensiones tangenciales alrededor del túnel, pero un aumento en las tensiones radiales de manera uniforme en todo el contorno del túnel.

Por la forma que tiene el contorno del túnel y desde el punto de vista tensional, el modelo circular presenta mayor tensión tangencial que la elíptica y menor que la de herradura en bóveda y contra bóveda. De manera contraria ocurre en zona de hastiales.

[51]

3.3.2 Túneles de herradura

Un túnel elíptico, es un tipo de túnel con una sección transversal que se asemeja a una herradura (ver Ilustración 3-11). A diferencia de los túneles circulares, los túneles de herradura por su forma asimétrica están sometidas a una mayor carga en la zona de mayor curvatura.

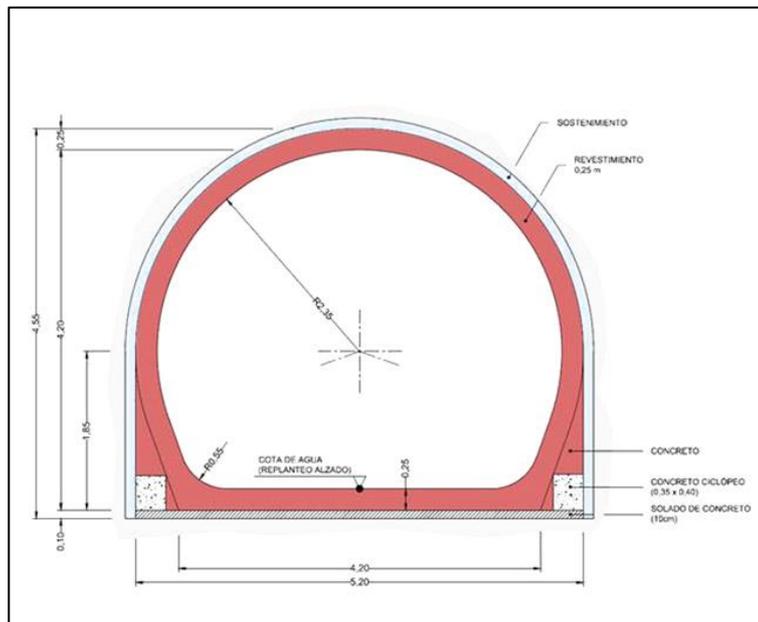


Ilustración 3-11 Ejemplo túnel de herradura. [50]

El efecto de la geometría del túnel de herradura en las tensiones que se dan alrededor del túnel puede ser muy complejo y depender de muchos factores, como las características geológicas del terreno, el estado de tensiones en el contorno, etc.

En la bóveda del túnel, las tensiones son principalmente de compresión. Según se puede ver en la ilustración 3-

12, las mayores tensiones se concentran en el vértice que forman los hastiales y la contra bóveda. En muchas obras por esta concentración se construyen para absorber esas tensiones las denominadas “Patas de Elefante”. Además, la asimetría del túnel de herradura causa esfuerzos de corte y torsión en los hastiales del túnel.

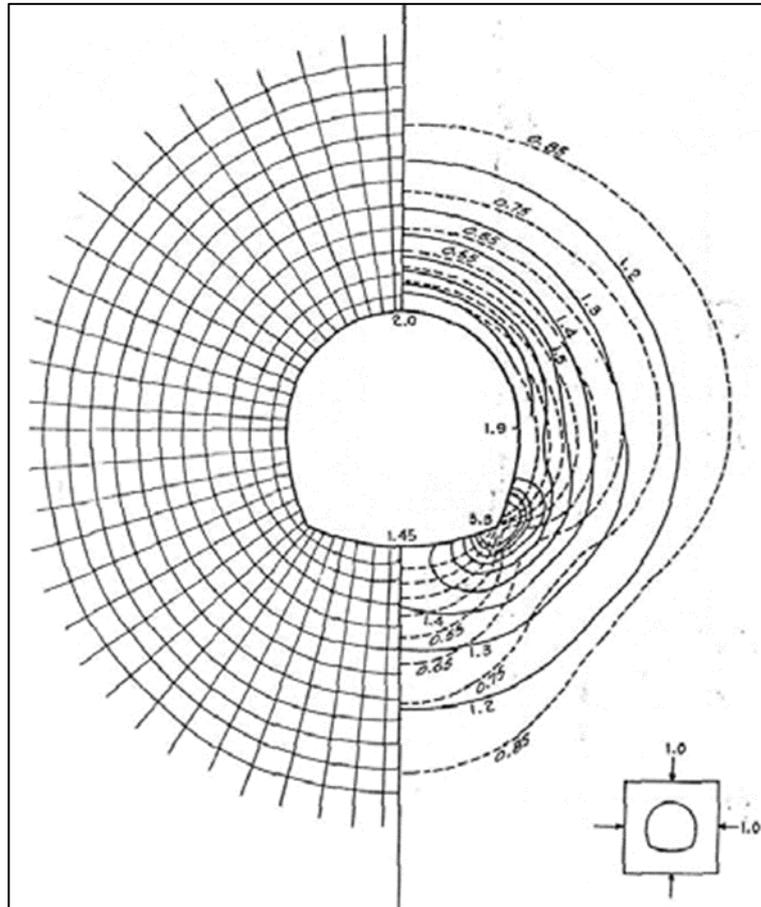


Ilustración 3-12 Distribución de tensiones en túnel de herradura. [52]

Una de las ventajas del uso de túneles de herradura es que su forma asimétrica les permite adaptarse mejor a las condiciones geológicas del terreno que los túneles circulares, ya que su forma ovalada y asimétrica distribuye las tensiones en función de la disposición de sus semiejes. En el caso de las tensiones tangenciales, en la zona de hastiales y relación entre semiejes menor y mayor = $\frac{1}{2}$, el túnel circular presenta mayores valores que la elíptica. Además, la forma de herradura tiene una mayor superficie de contacto con la roca circundante, lo que le proporciona un mayor margen de maniobra cuando se trabaja con suelos sueltos o rocas con discontinuidades.

Otra de las ventajas, se encuentra que la forma de herradura distribuye mejor las cargas en la estructura, lo que le proporciona un mayor grado de estabilidad.

Sin embargo, construir un túnel de herradura puede ser más complicado y costoso que construir un túnel circular u otro tipo de túnel. Además, la distribución asimétrica de las tensiones alrededor del túnel puede dificultar el diseño óptimo de los refuerzos y medidas de seguridad.

[53]

3.3.3 Túneles de alcantarillado

Los túneles tipo alcantarillado tienen una base ancha y plana y su parte superior tiene una forma curvada (ver ilustración 3-13). Este diseño permite una mayor estabilidad en la construcción del túnel, ya que los lados curvados distribuyen mejor las tensiones hacia el terreno circundante. Además, al tener una sección transversal más grande, este tipo de túnel puede ser utilizado para el transporte de vehículos y servicios públicos a gran escala.

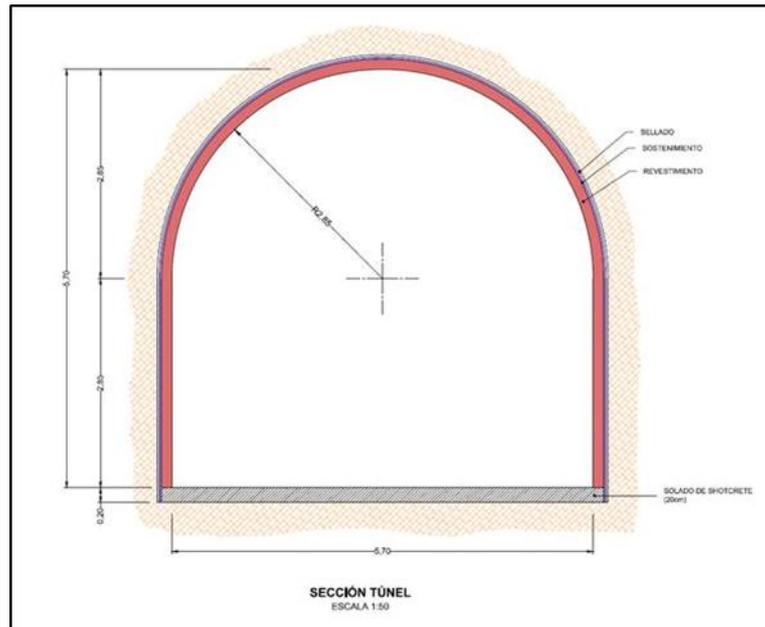


Ilustración 3-13 Ejemplo túnel tipo alcantarillado. [50]

Al utilizar una sección transversal con esta forma, se logra una mayor capacidad para soportar cargas y resistir la deformación. También proporciona una mayor resistencia a la compresión y a la flexión, lo que ayuda a prevenir el colapso del túnel y a mantener la estabilidad del macizo rocoso circundante.

Además, los túneles tipo alcantarillado reducen los escombros o proceso de excavación requerida en comparación con otras formas de túneles, lo que puede tener un efecto positivo en el comportamiento del macizo rocoso. Al reducir la excavación, se minimiza la perturbación del macizo rocoso circundante, lo que ayuda a mantener su integridad y estabilidad.

En cuanto al efecto de la geometría de esta tipología de túnel en las tensiones que se dan alrededor del mismo, se ha demostrado que este diseño reduce las tensiones de corte y torsión en los lados del túnel, lo que ofrece una mayor estabilidad estructural y una menor posibilidad de rotura (esto puede observarse en la Ilustración 3-14). Sin embargo, también genera una mayor concentración de las tensiones en la parte superior e inferior del túnel, por lo que debe ser cuidadosamente diseñado y analizado para asegurar que soporte la carga esperada.

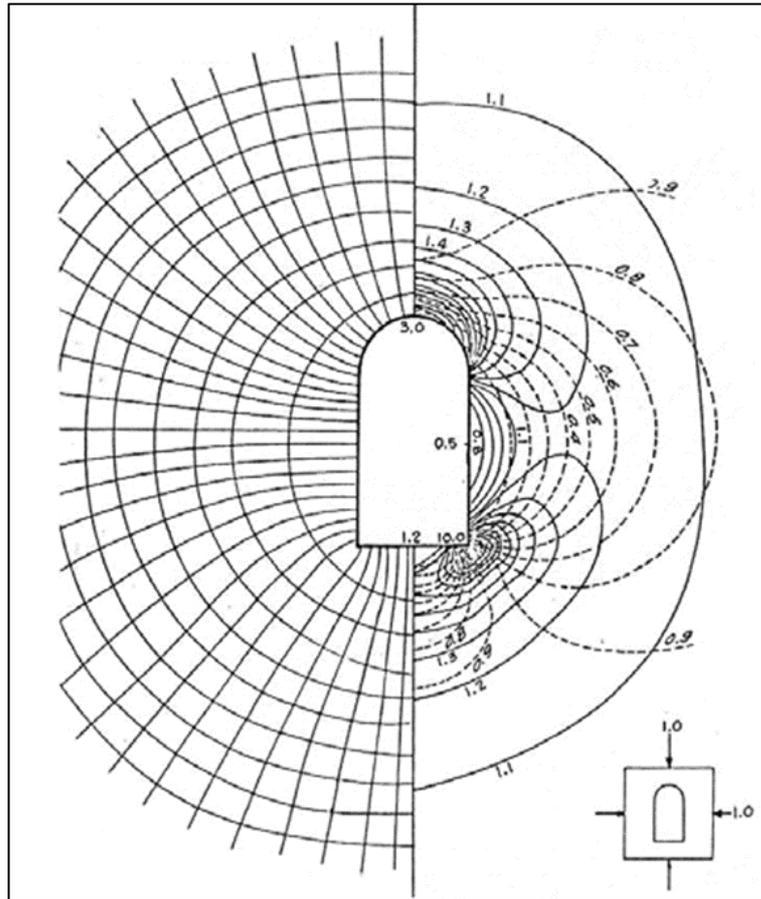


Ilustración 3-14 Distribución de tensiones en túnel tipo alcantarillado. [52]

Entre las ventajas de utilizar un túnel tipo alcantarillado, se encuentra su mayor estabilidad y resistencia en comparación con otros tipos de túneles, lo que reduce el riesgo de deformación y fallos estructurales. Adicionalmente, al tener una sección transversal o gálibo más grande, este túnel permite un mayor volumen de vehículos pesados.

No obstante, entre las desventajas de la utilización de esta tipología de túnel, está el alto coste de su construcción y mantenimiento, debido a su complejo diseño y mayor tamaño. Además, debido a la naturaleza curva de su sección transversal, la construcción de este tipo de túneles requiere una mayor precisión y cuidado en los encofrados, lo que puede incrementar el tiempo de obra.

[54]

3.4 Caracterización del macizo rocoso

Para obtener el modelo geomecánico del material a analizar con el programa *RS2* es necesario definir las características y calidad del macizo rocoso, así como la geometría a excavar del túnel.

En primer lugar y en el apartado de preproceso se genera una zona o dominio de estudio en *RS2* de 20 metros x 20 metros, con todos los bordes restringidos ante cualquier movimiento, al considerar o suponer que el túnel se encuentra a gran profundidad.

Las propiedades del macizo rocoso se definen como ya se comentó, siguiendo el modelo de comportamiento elástico perfectamente plástico Mohr-Coulomb. El material de este macizo que servirá de estudio tiene las siguientes características:

- Peso específico aparente: 0.027 MPa/m³
- Porosidad: 0.5

- Coeficiente de Poisson: 0.3
- Módulo de Young: 20000 MPa
- Ángulo de fricción en condiciones pico: 35°
- Cohesión en condiciones pico: 10.5 MPa
- Condiciones secas

En cuanto a la CALIDAD DEL MACIZO ROCOSO, se considera que el macizo rocoso es de calidad ACEPTABLE (RMR entre 41 y 60), con una puntuación de RMR de 55.

Se consideran también en los cálculos las condiciones residuales. En este caso se estima que los parámetros de resistencia residual son iguales a los de pico, por lo tanto, la cohesión en condiciones residuales es de 10.5 MPa y el ángulo de fricción residual es 35°.

Además, se malla todo el dominio, siguiendo la metodología del “Método de Elementos Finitos”, con elementos triangulares de 6 nodos (ver ilustración 3-15).

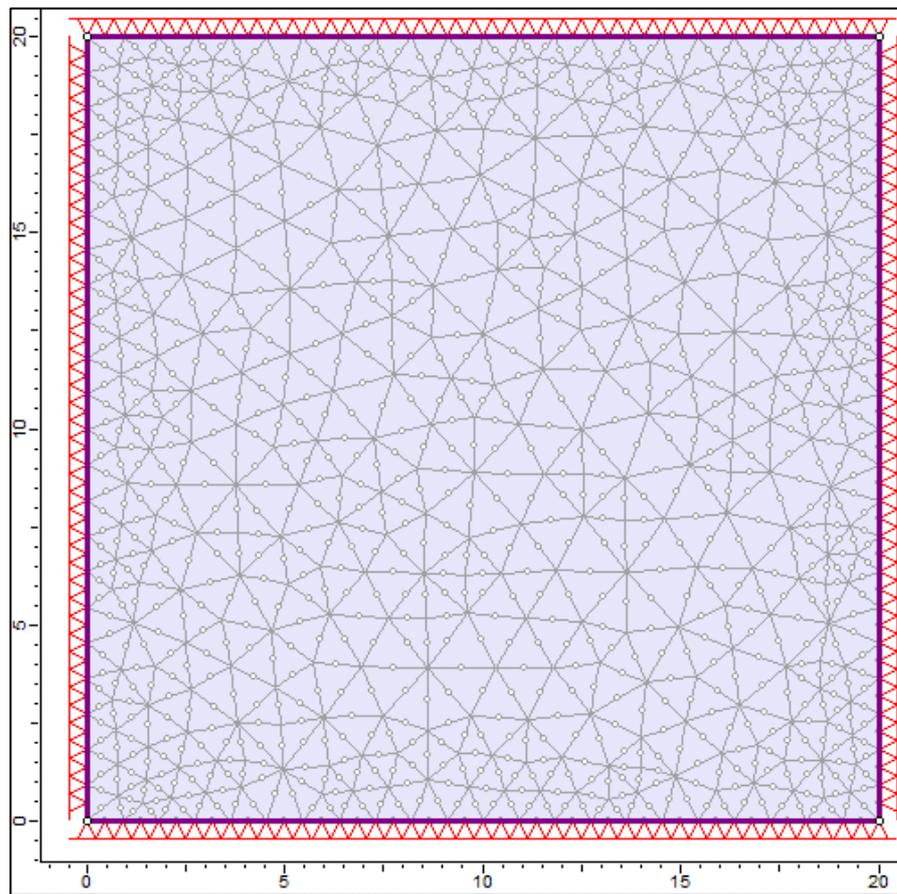


Ilustración 3-15 Dominio de estudio en RS2.

El estado tensional aplicado en el contorno del dominio será una variable a estudiar. Dentro de los distintos casos de familias de diaclasas por analizar, se estudiarán 3 estados diferentes de tensiones manteniendo la carga vertical constante y la horizontal igual a $k \cdot \sigma_v$ (ver ilustración 3-16). La tensión horizontal se aplicará de forma linealmente progresiva siendo k el coeficiente lateral que es igual a la relación entre la tensión horizontal y vertical ($k = \sigma_h / \sigma_v$) y de valores 1, 2 y 3.

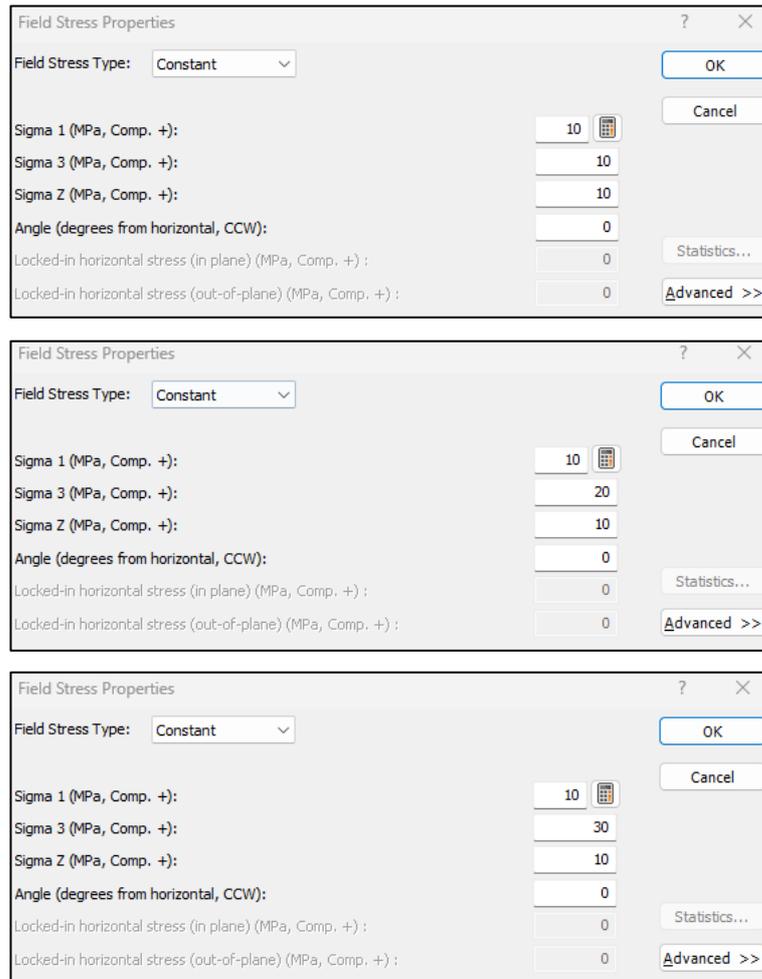


Ilustración 3-16 Campos de tensiones a analizar en RS2.

3.5 Definición de las propiedades de la junta

Para el estudio del macizo rocoso, se utilizará tres modelos de junta o familia de diaclasas, con las mismas propiedades de resistencia, mecánicas o de rigidez. En cada modelo sólo se modificará la orientación de las discontinuidades.

Para estudiar el deslizamiento de la junta se aplicará el criterio de rotura de Mohr-Coulomb, teniendo en cuenta las siguientes propiedades (ver Ilustración 3-17):

- Cohesión: 0 MPa
- Ángulo de fricción: 25°
- Rigidez normal: 100000 MPa/m
- Rigidez a cortante: 10000 MPa/m

Ilustración 3-17 Propiedades de la junta en RS2.

Por otra parte, como el estudio se realiza a grandes profundidades y consideramos que a dichas profundidades las discontinuidades están cerradas, el flujo de agua no afecta a los cálculos, es decir se hará un análisis en condiciones secas o no saturadas.

3.6 Definición de las familias de diaclasas

Como ya se ha comentado, se realizará el análisis de los desplazamientos producidos alrededor de un túnel ante diferentes modelos de juntas o familias de diaclasas. El parámetro que se va a estudiar principalmente es la orientación de las discontinuidades, permaneciendo el resto de los parámetros intactos, pudiendo así obtener unas conclusiones acerca del efecto que tienen las discontinuidades sobre el campo de desplazamiento en macizos rocosos fracturados.

En concreto, se van a analizar los siguientes modelos de junta o familias de diaclasas:

- Para macizos rocosos cuyas discontinuidades son planos de sedimentación o estratificación: Juntas paralelas continuas o discontinuas con distribución de las mismas obtenida a partir de un estudio estadístico y buzamientos de 15° y 75°.
- Para macizos rocosos cuyas discontinuidades son planos de estratificación y, en dirección perpendicular a dicho plano, diaclasas o fracturas: Juntas Conjugadas con buzamiento de los planos de estratificación de 15° y 75°.
- Por último, para macizos con discontinuidades que forma mosaicos o polígonos regulares e irregulares: Voronoi, con una densidad de 0.2 celdas Voronoi por área.

3.6.1 Juntas o diaclasas paralelas

3.6.1.1 Juntas o diaclasas paralelas 15°

Se inicia los cálculos seleccionando una familia de diaclasas continua o persistente para el macizo rocoso, del tipo Paralelo Estadístico, con un buzamiento de 15° y, una separación estándar de las juntas que sigue una distribución estadística “normal” con valor constante de la media igual a 5 m y una desviación típica de 1 m (ver Ilustraciones 3-18 y 3-19).

General Settings	
Joint Model	Parallel Statistical
Joint Property	Joint 1
Orientation	
Use Trace Plane	<input type="checkbox"/> No
Inclination	15 °
Spacing (5 m Mean)	
Mean	5 m
Distribution	Normal
Std. Dev.	1 m
Rel. Min	3 m
Rel. Max	3 m
Length (Infinite)	
Infinite Length	<input checked="" type="checkbox"/> Yes
Joint End Condition	
Joint Ends	All Closed

Ilustración 3-18 Propiedades familia de diaclasas paralelas 15°.

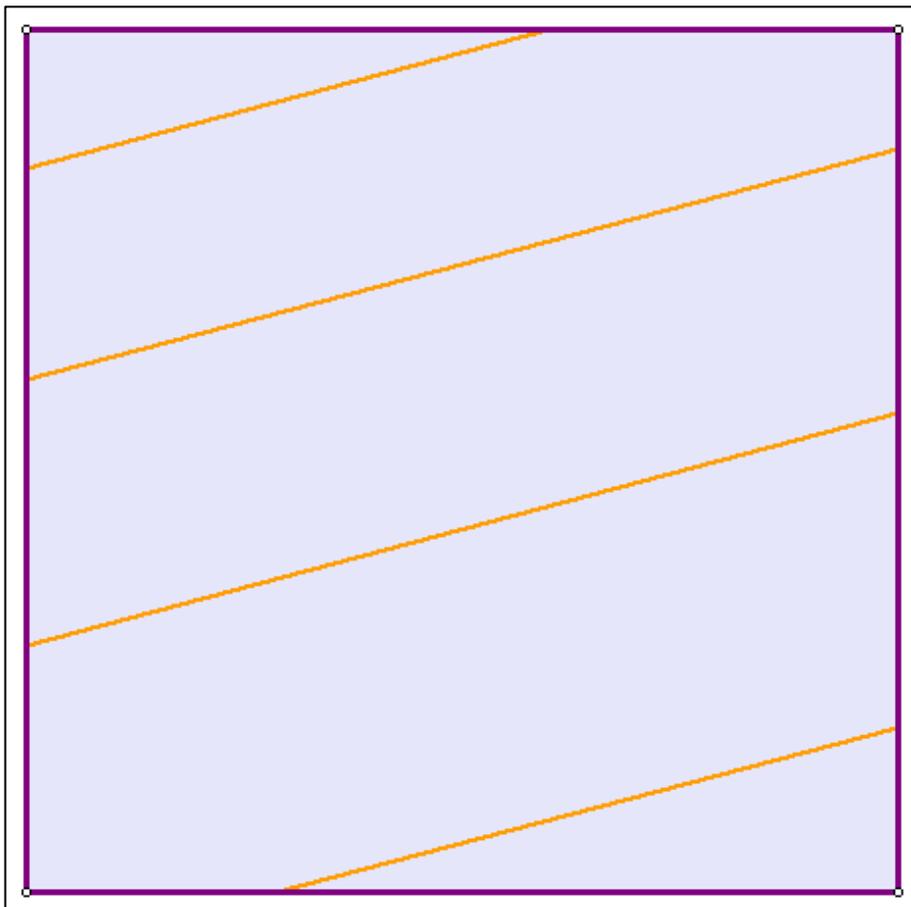


Ilustración 3-19 Familia de diaclasas paralelas 15°.

3.6.1.2 Juntas o diaclasas paralelas 75°

En la siguiente fase se modifica la orientación de la familia de diaclasas para un buzamiento de 75°. En este caso la separación de las juntas es la misma que el de la fase anterior: distribución normal con media 5 m y desviación típica 1 m (ver Ilustraciones 3-20 y 3-21).

General Settings	
Joint Model	Parallel Statistical
Joint Property	Joint 1
Orientation	
Use Trace Plane	<input type="checkbox"/> No
Inclination	75 °
Spacing (5 m Mean)	
Mean	5 m
Distribution	Normal
Std. Dev.	1 m
Rel. Min	3 m
Rel. Max	3 m
Length (Infinite)	
Infinite Length	<input checked="" type="checkbox"/> Yes
Joint End Condition	
Joint Ends	All Closed

Ilustración 3-20 Propiedades familia de diaclasas paralelas 75°.

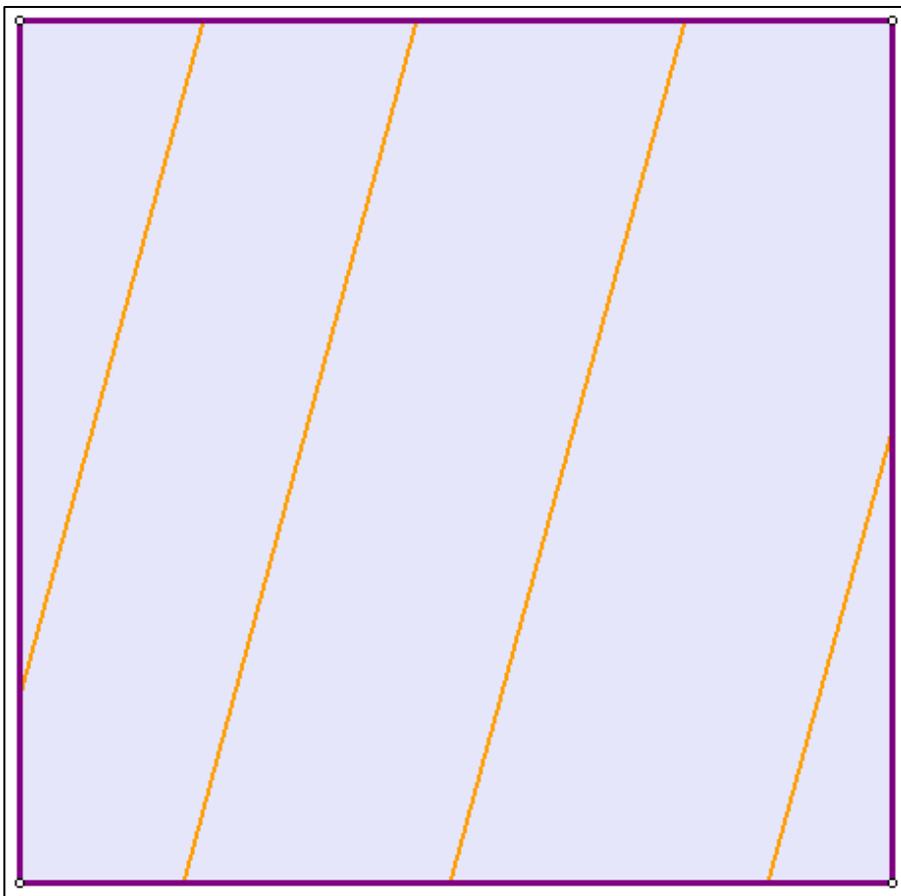


Ilustración 3-21 Familia de diaclasas paralelas 75°.

3.6.2 Juntas Conjugadas

3.6.2.1 Juntas Conjugadas 15°

En este segundo caso, se pone a prueba el tipo de Juntas Conjugadas, donde existen dos familias de diaclasas que se cruzan entre sí. El buzamiento de la discontinuidad o plano de estratificación en un primer caso será de 15°, siendo el buzamiento de las que se cruzan perpendicularmente y en el sentido de las agujas de reloj de -75°. Las dos familias de discontinuidades siempre serán perpendiculares entre sí (ver Ilustraciones 3-22 y 3-23).

La separación de los planos de estratificación sigue una distribución “normal” con media de 5 m y desviación típica de 1 m. En cuanto a la separación de las juntas que cortan a los citados planos, también sigue una distribución normal con media de 10 m y desviación típica de 2 m.

General Settings	
Joint Model	Cross Jointed
Bedding Joint Property	Joint 1
Cross Joint Property	Joint 1
Orientation	
Use Trace Plane	<input type="checkbox"/> No
Bedding Inclination	15 °
Cross Joint Inclination	-75 °
Bedding Spacing (5 m Mean)	
Mean	5 m
Distribution	Normal
Std. Dev.	1 m
Rel. Min	3 m
Rel. Max	3 m
Cross Joint Spacing (10 m Mean)	
Mean	10 m
Distribution	Normal
Std. Dev.	2 m
Rel. Min	6 m
Rel. Max	6 m
Joint End Condition	
Joint Ends	All Closed

Ilustración 3-22 Propiedades familia de diaclasas Juntas Conjugadas 15°.

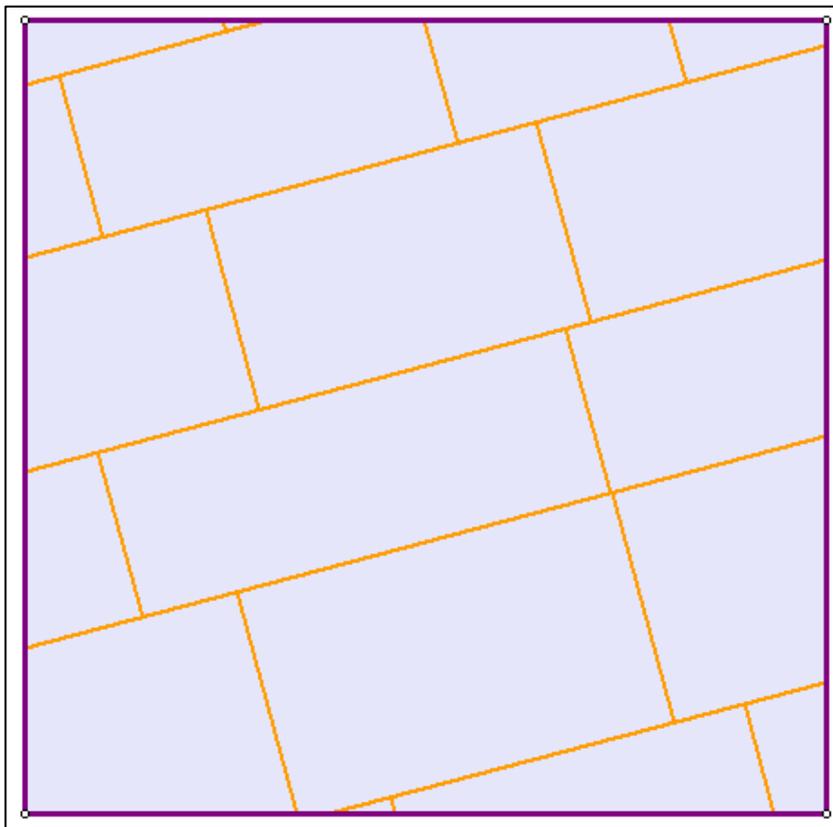


Ilustración 3-23 Familia de diaclasas Juntas Conjugadas 15°.

3.6.2.2 Juntas Conjugadas 75°

Ya por último se prueba un buzamiento de 75° de los planos de estratificación y de las juntas que cruzan con un buzamiento y sentido de las agujas del reloj en este caso de -15° (ver Ilustraciones 3-24 y 3-25)

General Settings	
Joint Model	Cross Jointed
Bedding Joint Property	Joint 1
Cross Joint Property	Joint 1
Orientation	
Use Trace Plane	<input type="checkbox"/> No
Bedding Inclination	75 °
Cross Joint Inclination	-15 °
Bedding Spacing (5 m Mean)	
Mean	5 m
Distribution	Normal
Std. Dev.	1 m
Rel. Min	3 m
Rel. Max	3 m
Cross Joint Spacing (10 m Mean)	
Mean	10 m
Distribution	Normal
Std. Dev.	2 m
Rel. Min	6 m
Rel. Max	6 m
Joint End Condition	
Joint Ends	All Closed

Ilustración 3-24 Propiedades familia de diaclasas Juntas Conjugadas 75°.

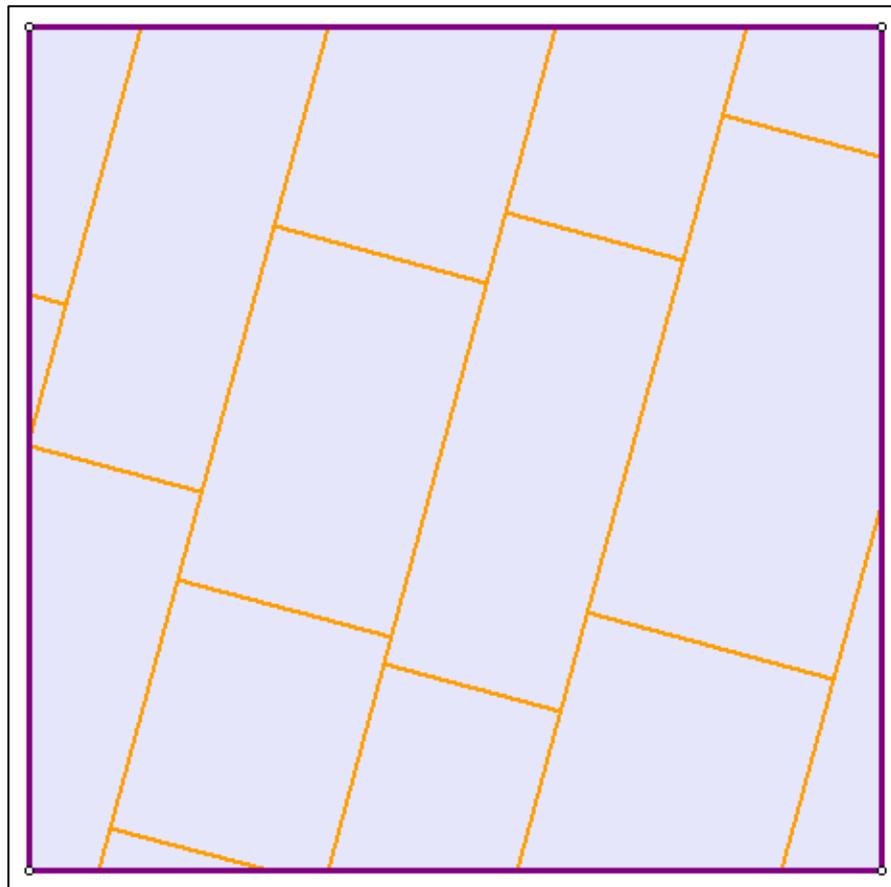


Ilustración 3-25 Familia de diaclasas Juntas Conjugadas 75°.

3.6.3 Voronoi

El último tipo de familia de discontinuidades a analizar es el tipo “Voronoi”, caracterizado por subdividir la matriz rocosa en múltiples celdas o polígonos de tamaño similar. Ante una misma densidad de celdas por área (0,2), donde se observa separaciones y orientaciones irregulares o regulares entre las discontinuidades, se examinarán al menos dos formas de distribución de las celdas siendo estas las correspondientes a polígonos irregulares (ver Ilustraciones 3-26 y 3-27) y hexagonales (ver Ilustraciones 3-28 y 3-29).

3.6.3.1 Voronoi irregular

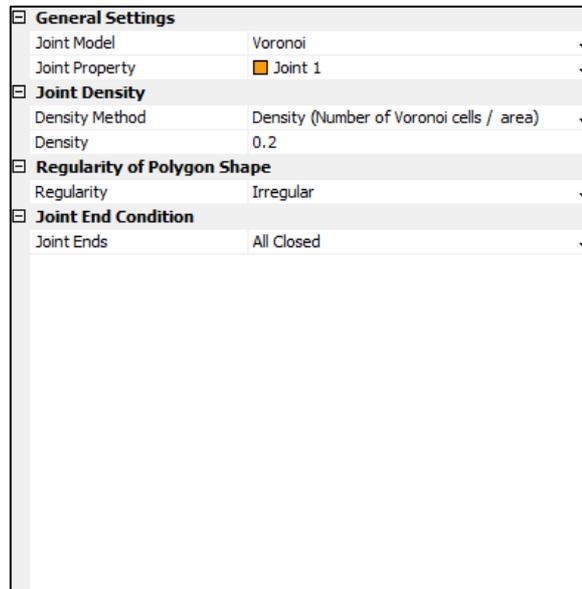


Ilustración 3-26 Propiedades familia de diaclasas Voronoi irregular.

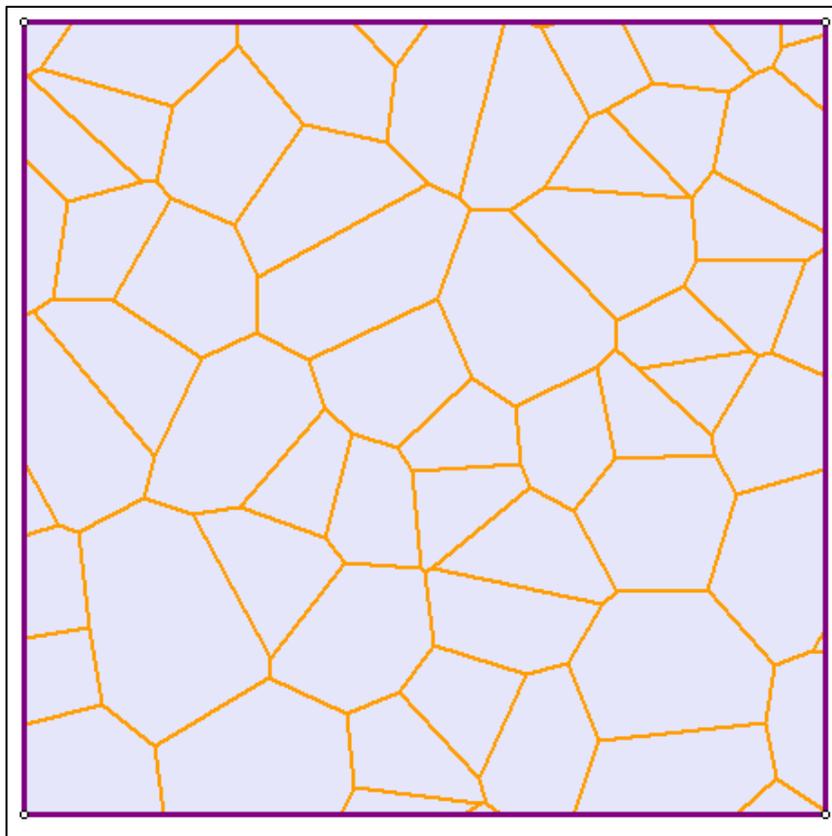


Ilustración 3-27 Familia de diaclasas Voronoi irregular.

3.6.3.2 Voronoi hexagonal

General Settings	
Joint Model	Voronoi
Joint Property	Joint 1
Joint Density	
Density Method	Density (Number of Voronoi cells / area)
Density	0.2
Regularity of Polygon Shape	
Regularity	Regular Hexagon
Hexagonal Long Axis	Horizontal Orientation
Joint End Condition	
Joint Ends	All Closed

Ilustración 3-28 Propiedades familia de diaclasas Voronoi hexagonal.

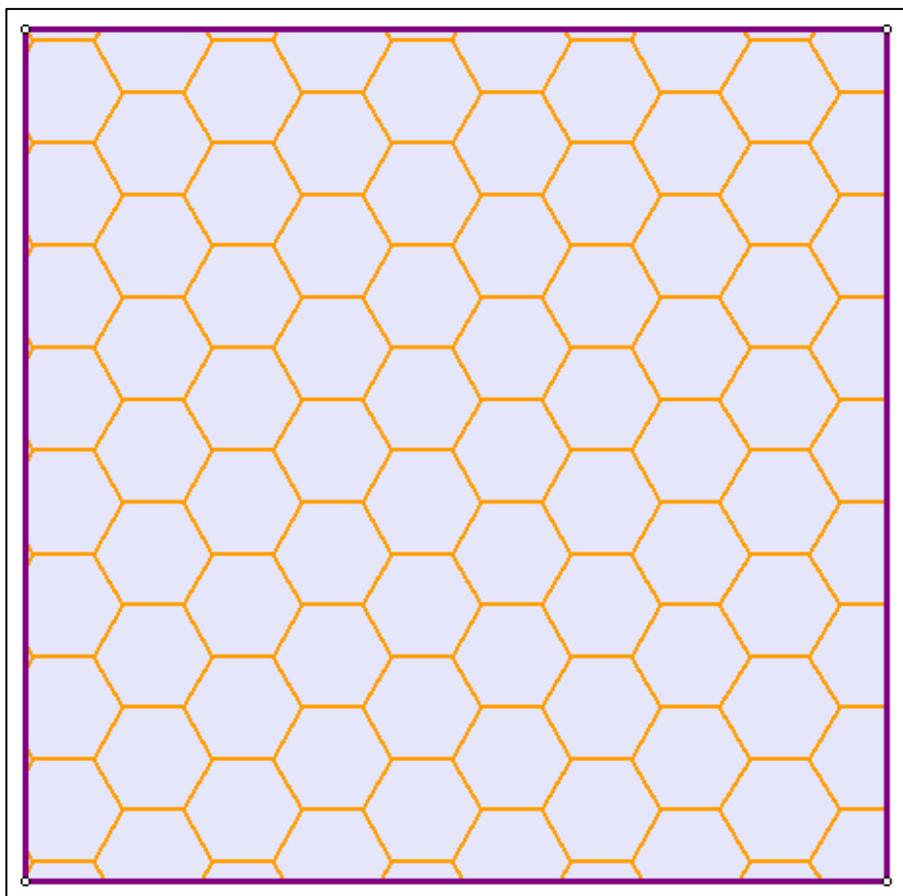


Ilustración 3-29 Familia de diaclasas Voronoi hexagonal.

3.7 Excavación del túnel

Para analizar la influencia que tiene la forma del túnel en los desplazamientos del macizo rocoso en el contorno, en este apartado se representan las geometrías a estudiar definiendo sus dimensiones y modo de excavación del túnel.

3.7.1 Túnel circular

El primer tipo de túnel a estudiar será de tipo circular con un radio de 3 metros (Ilustración 3-30), centrado en el dominio. En este caso, a excavación del túnel se hará a sección completa o mediante maquinaria integral o tuneladora para macizo rocoso de calidad $RMR > 50$ (topos).

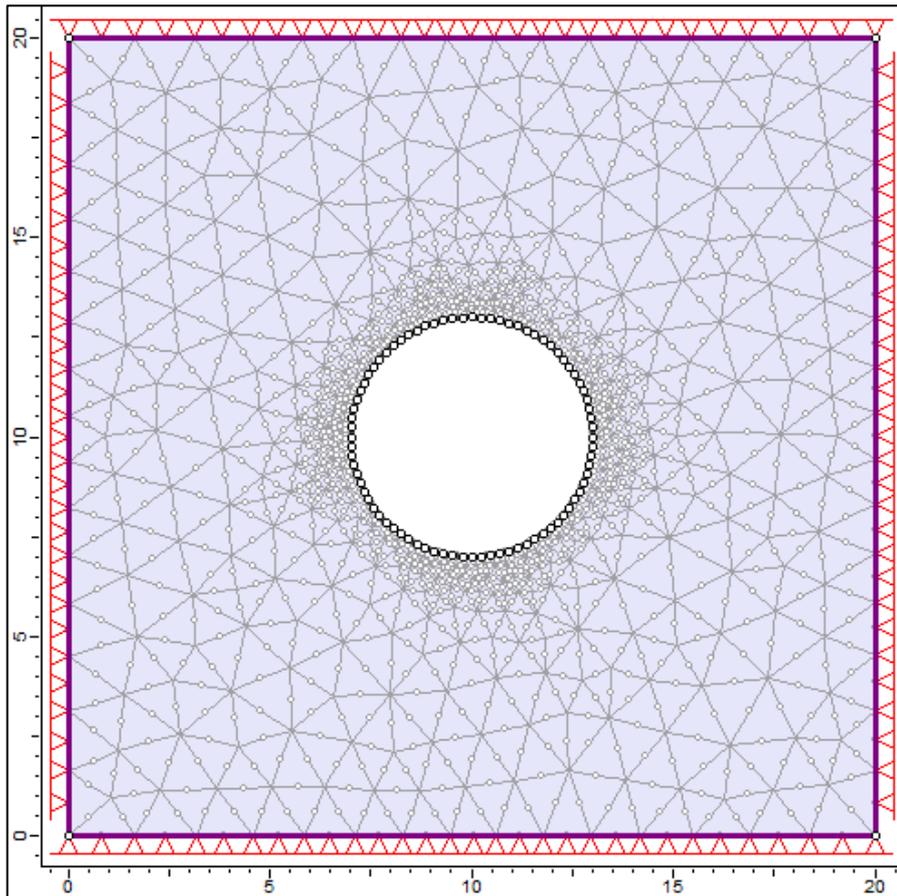


Ilustración 3-30 Excavación túnel tipo alcantarillado en RS2.

Los topos son máquinas capaces de excavar un túnel a sección completa (ver Ilustración 3-31). Colaboran en la colocación de un sostenimiento provisional o en la puesta en obra del revestimiento definitivo.

Los topos se diseñan para poder excavar rocas duras y medias (como es el caso de estudio), sin grandes necesidades de soporte inicial.



Ilustración 3-31 Tuneladora topo.

3.7.2 Túnel de herradura

El siguiente caso para analizar será un túnel de herradura modelizado según una plantilla incluida en RS2 (ver Ilustración 3-33). En concreto se realiza una excavación centrada en el dominio de un túnel de herradura, con radio de 3 metros, 4 metros de altura o gálibo y a 1 metro del vértice de los hastiales con la contra bóveda (ver Ilustración 3-32).

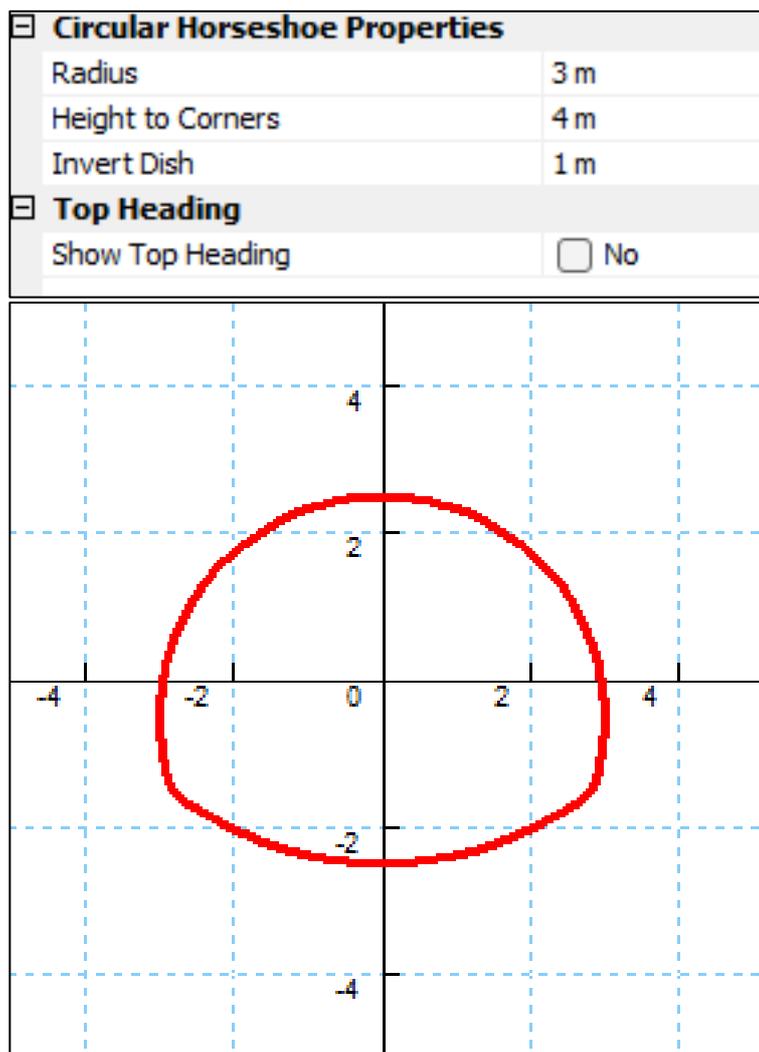


Ilustración 3-32 Dimensiones del túnel de herradura en RS2.

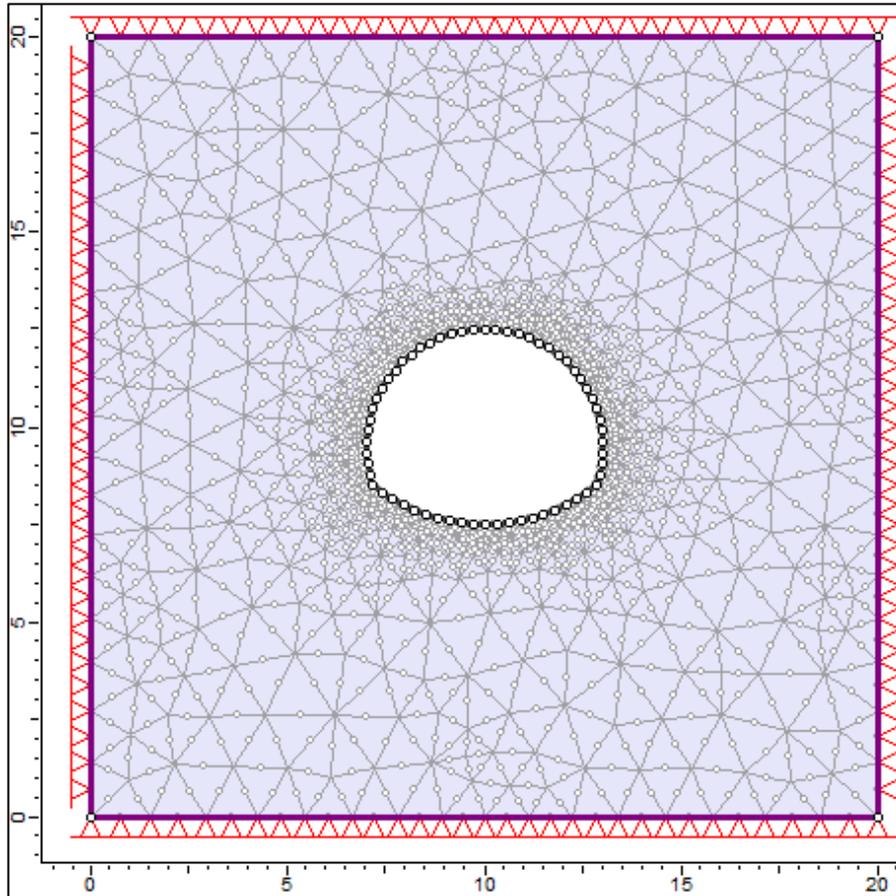


Ilustración 3-33 Excavación túnel de herradura en RS2.

La excavación del túnel de herradura, en principio se realizará a sección completa con saneamiento del contorno debido a las diferentes discontinuidades que se encontrarán presentes alrededor de este, utilizando el método de perforación y voladura, ya que la resistencia del macizo rocoso es media.

Este método es especialmente válido en la ejecución de un túnel en roca cuando ésta es muy abrasiva y resistente o se encuentra en estado masivo. Consiste en taladrar la superficie del frente del túnel, cargando estos taladros con explosivos, que luego se detonan. [55]

El ciclo de trabajo en este sistema de excavación incluye el replanteo del esquema de tiro, la perforación de los taladros, la carga del explosivo, las conexiones y comprobaciones, la voladura y ventilación, la retirada del escombros y el saneo del frente, bóveda y hastiales (ver Ilustración 3-34). [56]

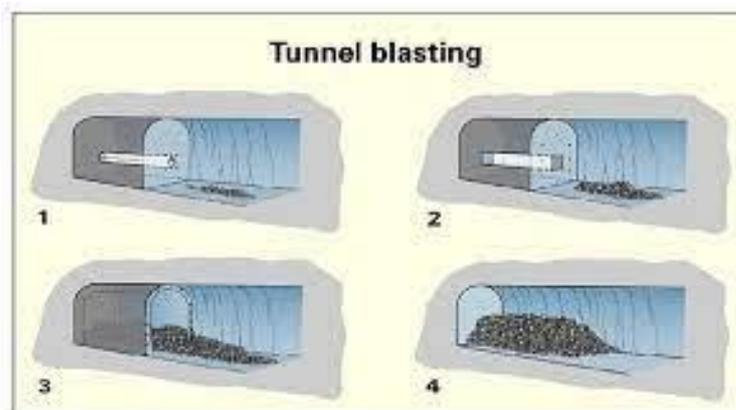


Ilustración 3-34 Ejecución excavación con perforación y voladura. [56]

3.7.3 Túnel tipo alcantarillado

Por último, se analizará un túnel de alcantarillado de 6 metros de anchura, 6 m de altura de la pared recta y 3m de radio del semicírculo en bóveda (ver Ilustración 3-35).

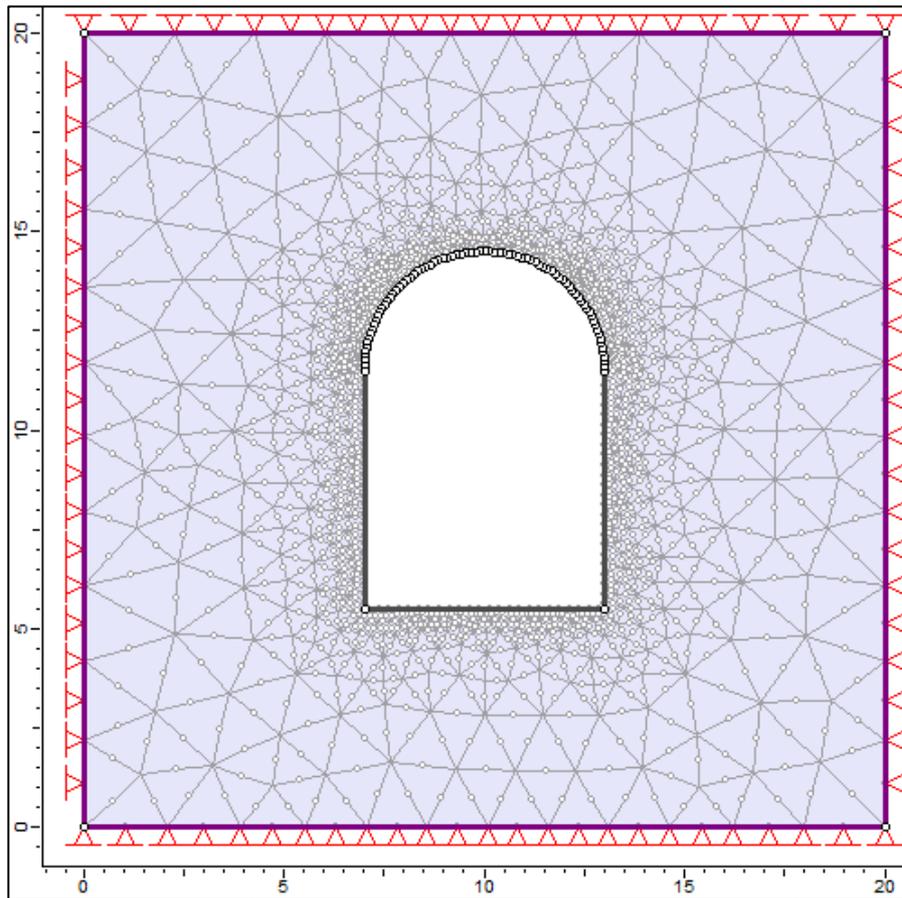


Ilustración 3-35 Excavación túnel tipo alcantarillado en RS2.

La ejecución de este túnel será igual que en el caso de túnel de herradura que aparece en la Ilustración 3-34 considerando que el método de excavación es a sección completa y mediante perforación de los taladros para la posterior voladura del macizo rocoso en estudio.

4 APLICACIÓN A DISTINTAS FAMILIAS DE DIACLASAS (ESTUDIO DE DESPLAZAMIENTOS)

En este capítulo se aplica la metodología descrita en el capítulo 3 para distintos casos de estudio y modelos de juntas.

Se empieza por introducir el modelo geomecánico en *RS2* con las propiedades o características mecánicas y de resistencia del macizo rocoso, pudiendo así calcular los diferentes desplazamientos que se dan en el contorno del túnel ante las diferentes familias de diaclasas, geometrías y estados tensionales.

A continuación, se muestran los desplazamientos absolutos resultantes de los diferentes casos considerando que la familia de discontinuidades es paralela y continua para las tres tipologías de túnel a estudiar y tres estados tensionales donde las cargas verticales por peso propio se mantienen constantes mientras que las cargas horizontales varían en función del coeficiente $k = 1, 2$ y 3 , siendo $k = \sigma_H / \sigma_V$.

En lado izquierdo de las gráficas aparecerán representados los desplazamientos correspondientes a buzamientos de 15° , mientras que a la derecha de las mismas aparecerán representados los desplazamientos correspondientes a buzamientos de 75° . En el caso del modelo de junta tipo Voronoi, a la izquierda se encuentran los casos de tipo irregular, y a la derecha las celdas hexagonales regulares.

4.1 Túnel circular

4.1.1 Juntas Paralelas

4.1.1.1 Desplazamientos horizontales

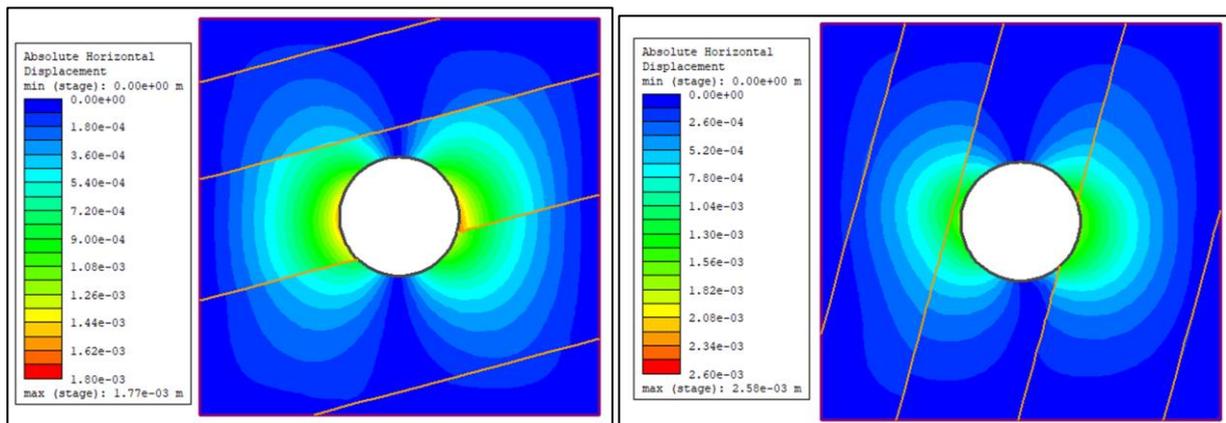


Ilustración 4-1 Desplazamientos horizontales Juntas Paralelas (k=1) – Túnel circular

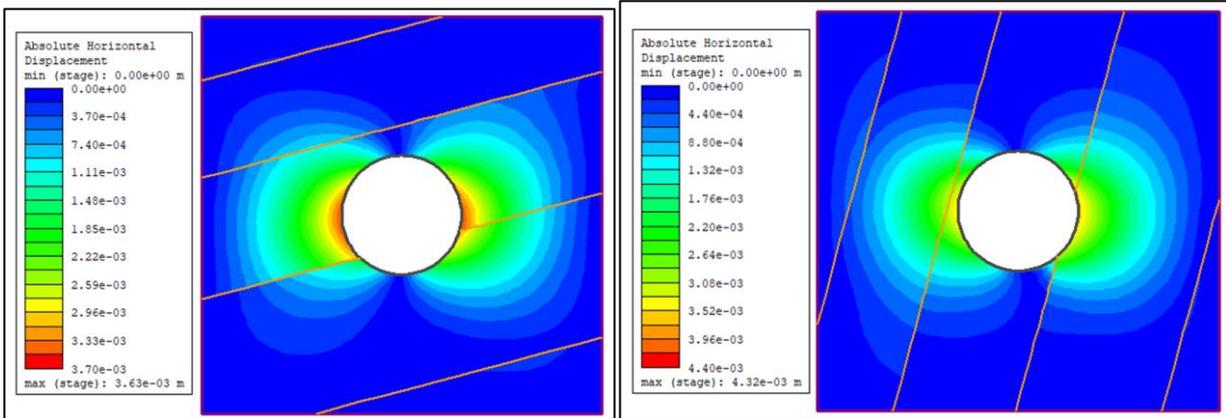


Ilustración 4-2 Desplazamientos horizontales Juntas Paralelas ($k = 2$) – Túnel circular

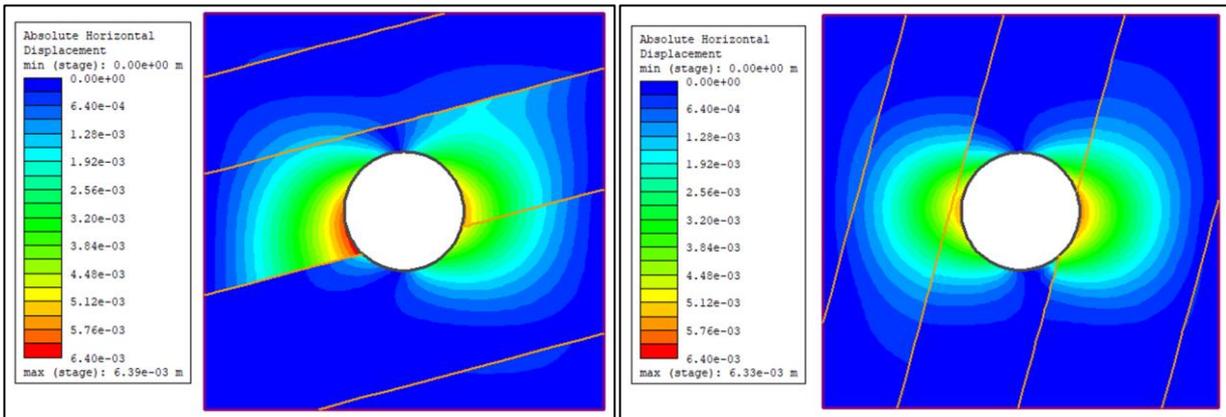


Ilustración 4-3 Desplazamientos horizontales Juntas Paralelas ($k = 3$) – Túnel circular

En cuanto a la orientación de las discontinuidades paralelas y continuas en túnel circular, se observa fundamentalmente en zona de hastiales un aumento de los desplazamientos horizontales cuando el buzamiento de la discontinuidad va de 15° a 75° .

En cuanto a la tensión de confinamiento, al aumentar el coeficiente lateral k , se aprecia un aumento de los desplazamientos horizontales mayores a menor buzamiento de la discontinuidad.

Se concluye que el aumento del desplazamiento en zona de hastiales es debido por una parte al incremento del buzamiento de la discontinuidad (de 15° a 75°) y al incremento de la tensión lateral llamada también presión de confinamiento del macizo rocoso.

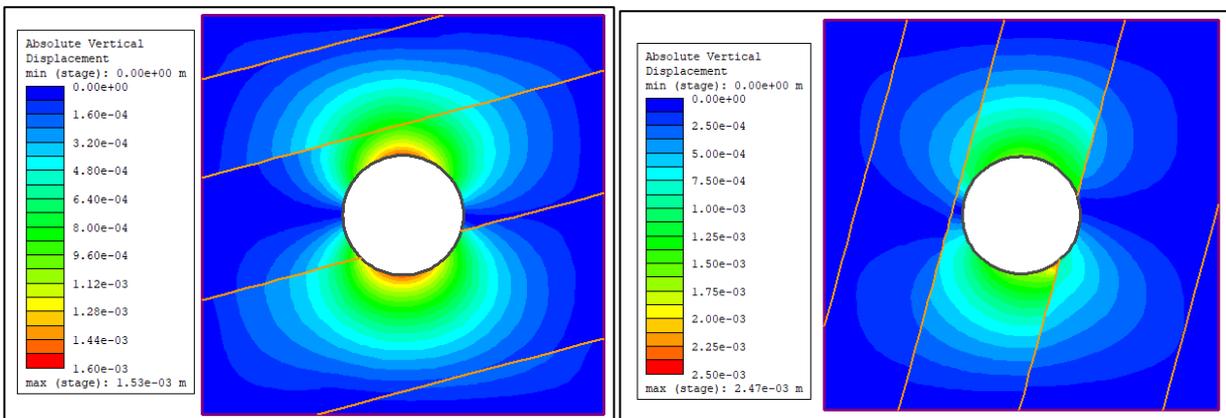
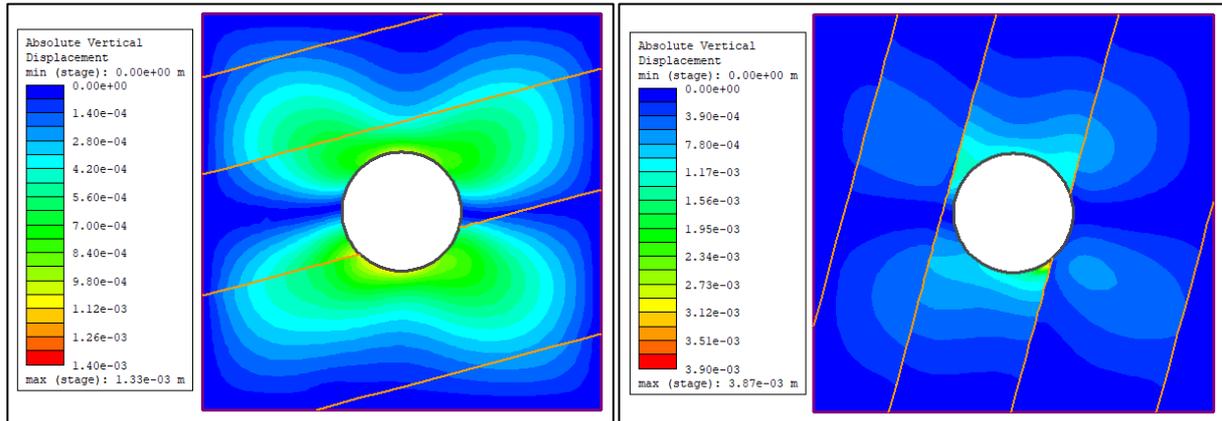
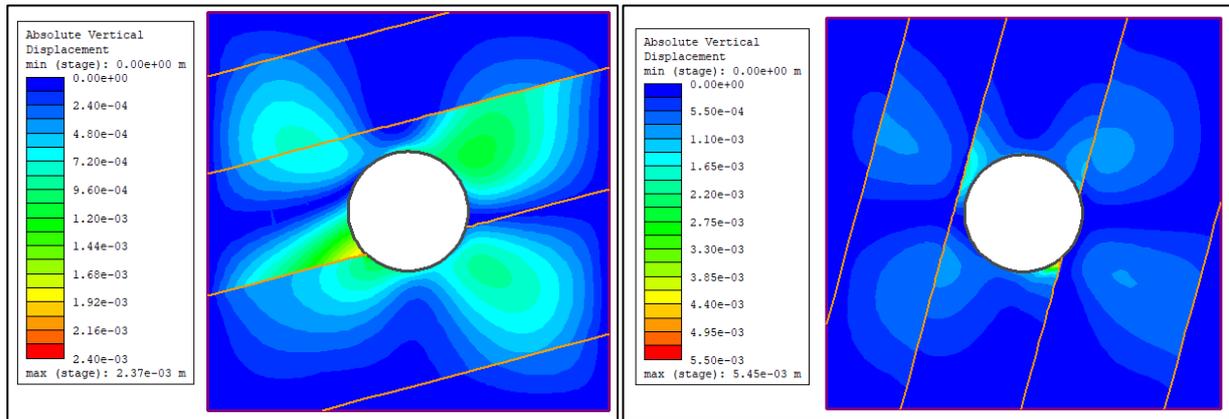


Ilustración 4-4 Desplazamientos verticales Juntas Paralelas ($k = 1$) – Túnel circular

Ilustración 4-5 Desplazamientos verticales Juntas Paralelas ($k=2$) – Túnel circularIlustración 4-6 Desplazamientos verticales Juntas Paralelas ($k=3$) – Túnel circular

En general se aprecian pocas variaciones en los campos de desplazamientos verticales entre los casos de juntas paralelas a 15° y 75° con parámetro $k=1$. En el resto de los estados tensionales si se aprecian distintos campos de desplazamientos verticales (entre las juntas con buzamientos a 15° y 75°) que varían tanto en bóveda como en contra bóveda, llegándose a disminuir según aumenta el parámetro k en la zona de bóveda, y al contrario en contra bóveda. Reflejando el efecto del aumento de la carga horizontal en comparación de la carga vertical del macizo.

Desde el punto de vista de la orientación de las discontinuidades en túnel circular, se puede ver un incremento de los máximos desplazamientos verticales sean estos en bóveda y, principalmente, en contra bóveda y contacto del plano de debilidad, cuando los buzamientos aumentan de 15° a 75° .

En referencia a la tensión lateral y siempre que el coeficiente lateral k aumente, por lo general los desplazamientos verticales disminuyen en zona de bóveda y aumentan en zona de contra bóveda y contacto de la discontinuidad.

Se concluye que el aumento del desplazamiento vertical (máximo) en zona de contra bóveda es debido por una parte a la orientación de la discontinuidad ($> 15^\circ$) y por otra al incremento de la tensión lateral llamada también presión de confinamiento del macizo rocoso.

4.1.2 Juntas Conjugadas

4.1.2.1 Desplazamientos horizontales

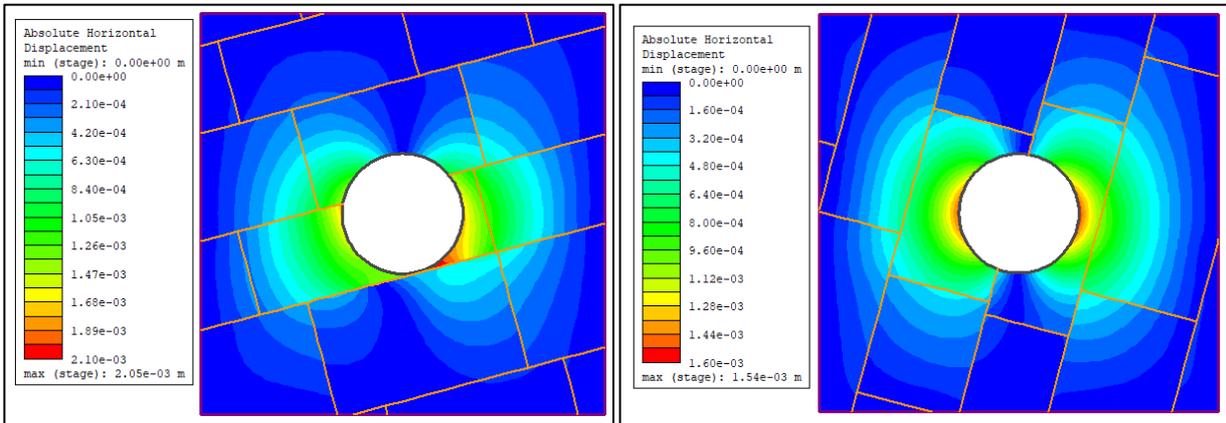


Ilustración 4-7 Desplazamientos horizontales Juntas Conjugadas (k=1) – Túnel circular

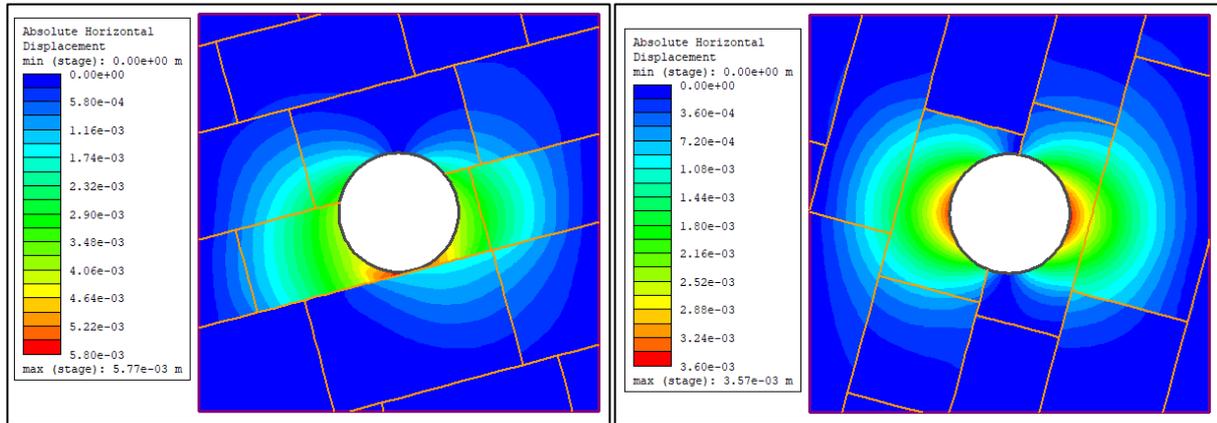


Ilustración 4-8 Desplazamientos horizontales Juntas Conjugadas (k=2) – Túnel circular

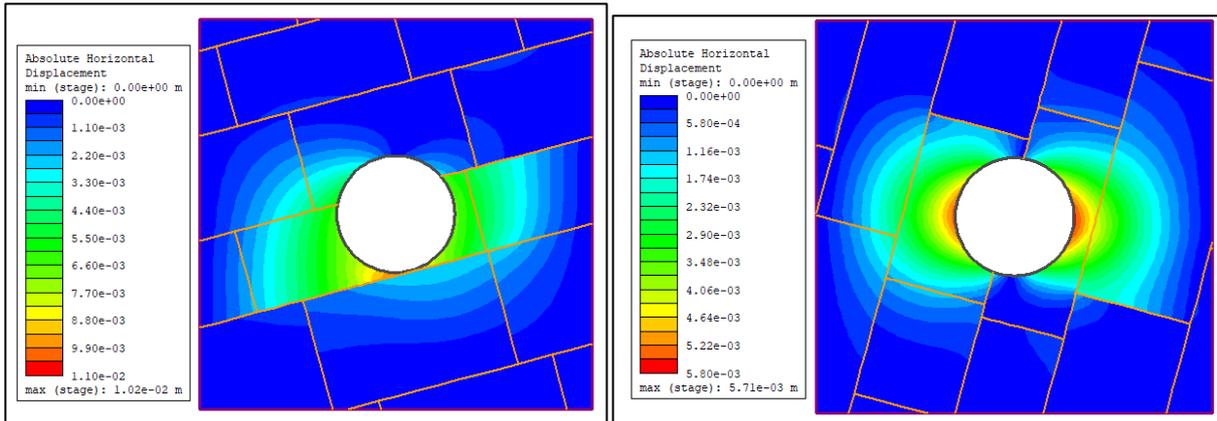


Ilustración 4-9 Desplazamientos horizontales Juntas Conjugadas (k=3) – Túnel circular

Sobre la orientación de las discontinuidades conjugadas en túnel circular, se aprecia como los desplazamientos horizontales (máximos) para buzamientos menores (15°) se concentran en las zonas de contacto plano de debilidad y contra bóveda, mientras que para buzamientos mayores los máximos desplazamientos se desplazan a zonas de los hastiales.

En referencia a la tensión de confinamiento y al incremento del coeficiente lateral k, se puede ver un aumento de los máximos desplazamientos horizontales tanto en contra bóveda como en zona hastiales, de modo que estos desplazamientos son mayores si los buzamientos disminuyen o giran en la dirección de las agujas del reloj.

Se concluye que el aumento del desplazamiento horizontal en zona de hastiales y contra bóveda es debido en parte a la orientación de la discontinuidad ($< 75^\circ$) y al incremento de la tensión lateral o llamada también presión de confinamiento del macizo rocoso.

4.1.2.2 Desplazamientos verticales

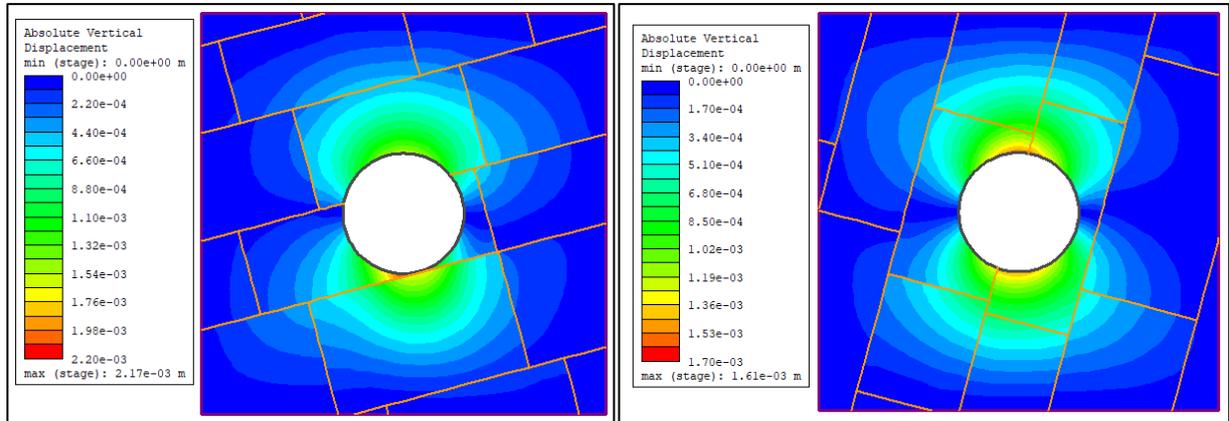


Ilustración 4-10 Desplazamientos verticales Juntas Conjugadas ($k=1$) – Túnel circular

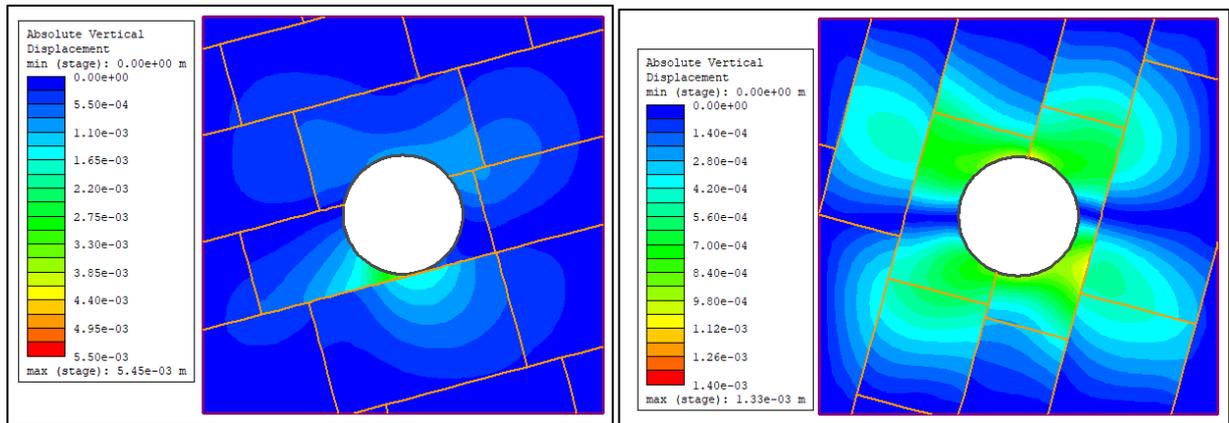


Ilustración 4-11 Desplazamientos verticales Juntas Conjugadas ($k=2$) – Túnel circular

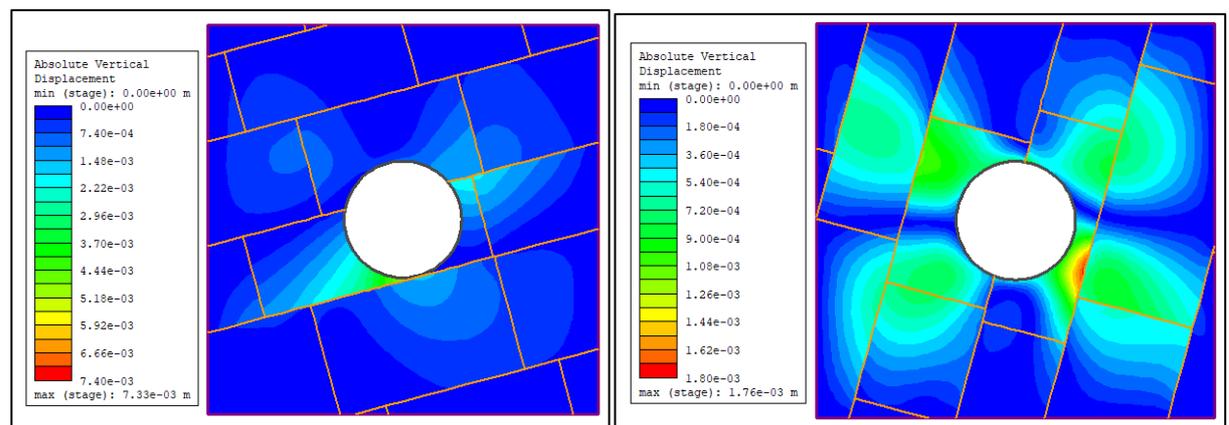


Ilustración 4-12 Desplazamientos verticales Juntas Conjugadas ($k=3$) – Túnel circular.

Si nos centramos en el efecto que puede tener la orientación de las discontinuidades conjugadas en el túnel circular, se puede ver un aumento de los máximos desplazamientos verticales, si el buzamiento es menor (15°). en zona de contacto entre la discontinuidad y la contra bóveda. Si aumenta el buzamiento de las discontinuidades (75°), los desplazamientos disminuyen en zonas de bóveda y contra bóveda y aumentan en planos de debilidad cercanos a la contra bóveda del túnel.

En referencia a la tensión lateral, si el coeficiente lateral k aumenta, por lo general los desplazamientos verticales

aumentan en zona de contacto de la junta y la contra bóveda y disminuyen en zona de bóveda para los buzamientos mayores (75°). En este último caso, al ser mayor la presión lateral ($k=3$), los máximos aparecen en los planos de debilidad cercanos a la contra bóveda

Se concluye que a medida que el buzamiento de la discontinuidad disminuye ($< 75^\circ$), aumentan los desplazamientos verticales principalmente en zona de contra bóveda, pero disminuye en zona de bóveda si aumentamos la presión lateral o de confinamiento

4.1.3 Voronoi

4.1.3.1 Desplazamientos horizontales

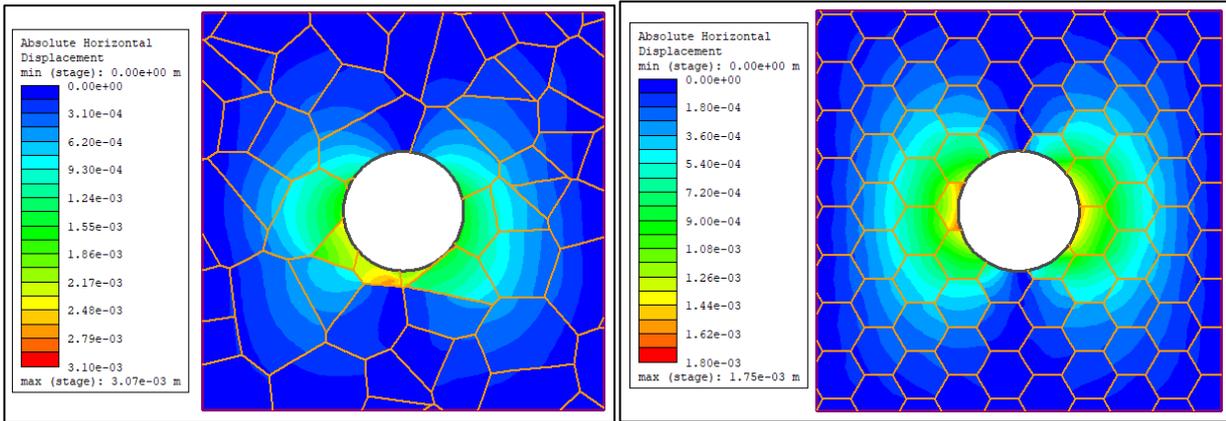


Ilustración 4-13 Desplazamientos horizontales Voronoi ($k=1$) – Túnel circular

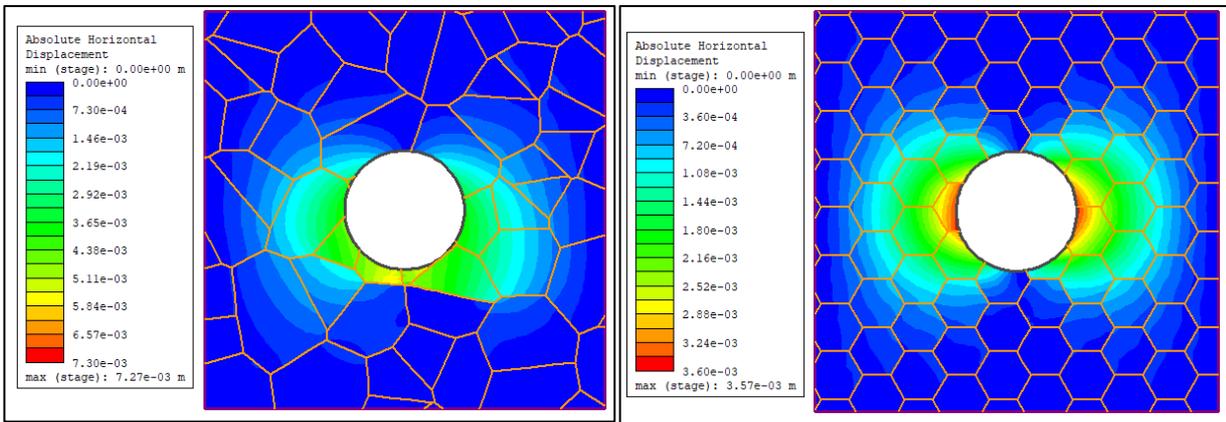


Ilustración 4-14 Desplazamientos horizontales Voronoi ($k=2$) – Túnel circular

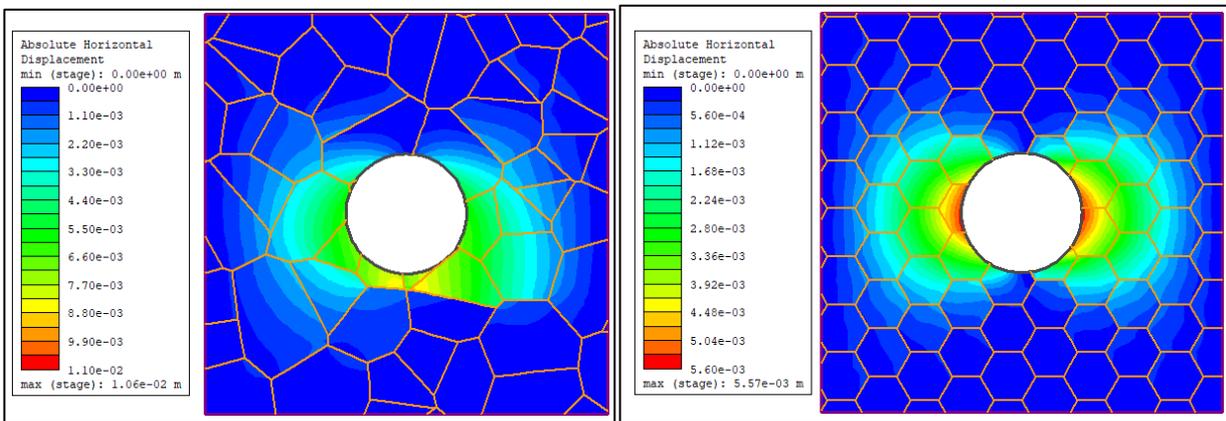


Ilustración 4-15 Desplazamientos horizontales Voronoi ($k=3$) – Túnel circular

En lo que respecta a la influencia del modelo de junta Voronoi para túnel circular, se puede ver como los desplazamientos horizontales (máximos) disminuyen y se desplazan de la zona de contra bóveda a zona de hastiales cuando la orientación de las celdas o polígonos pasan de una configuración irregular a otra regular o hexagonal.

En referencia a la tensión de confinamiento, al aumentar el coeficiente lateral k , se observa en las celdas irregulares y regulares estudiadas, un claro aumento de los desplazamientos horizontales tanto en zona de contra bóveda como en hastiales

Se concluye que el aumento del desplazamiento horizontal en zona de hastiales y contra bóveda es debido en parte a la orientación de las celdas ($< 75^\circ$) y al incremento de la tensión lateral o llamada también presión de confinamiento. Los máximos desplazamientos se aprecian en configuraciones o mosaicos irregulares y zona de contra bóveda.

4.1.3.2 Desplazamientos verticales

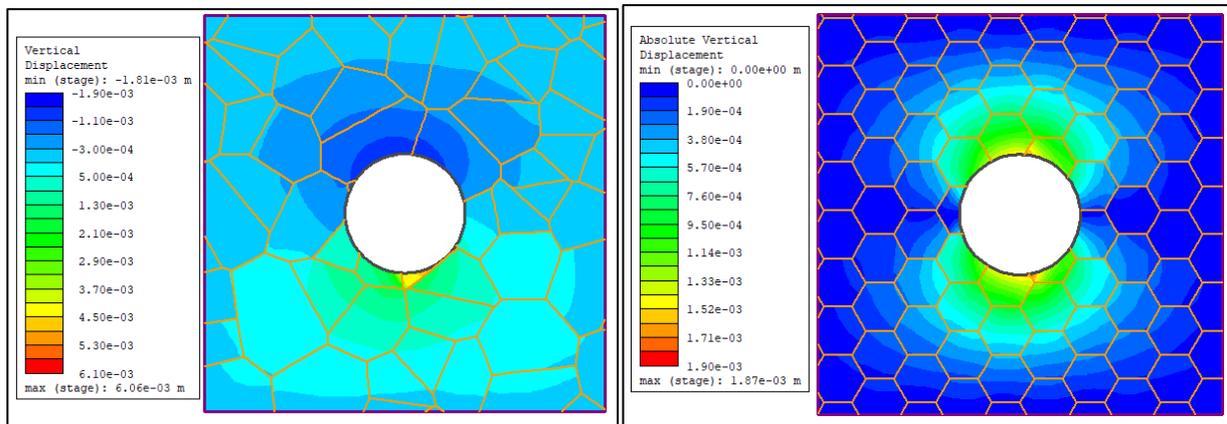


Ilustración 4-16 Desplazamientos verticales Voronoi ($k=1$) – Túnel circular

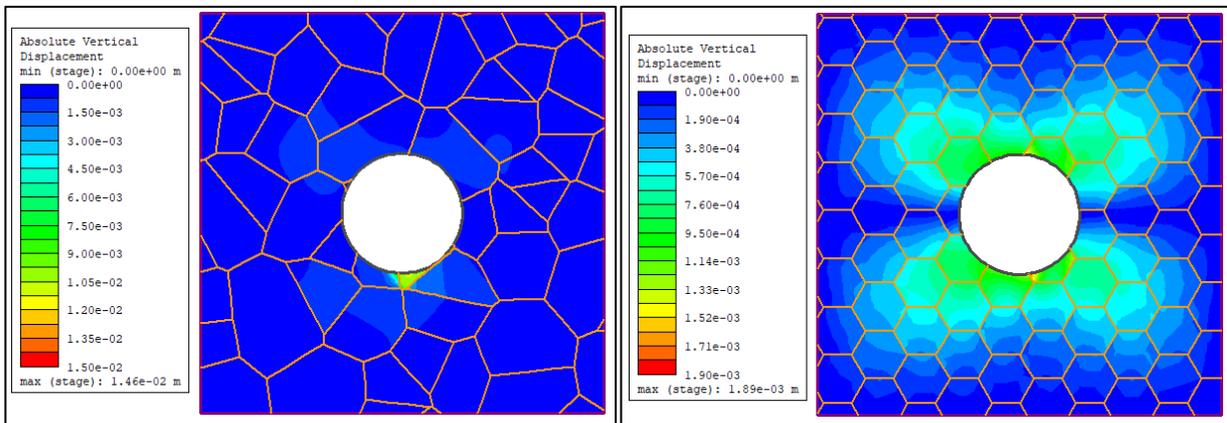


Ilustración 4-17 Desplazamientos verticales Voronoi ($k=2$) – Túnel circular

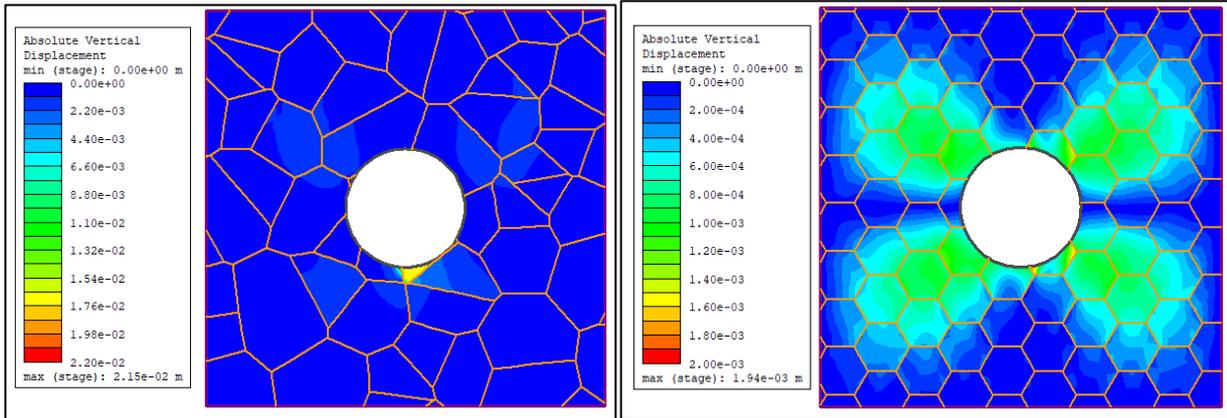


Ilustración 4-18 Desplazamientos verticales Voronoi ($k=3$) – Túnel circular

En cuanto al efecto que puede tener el modelo de juntas tipo Voronoi en el túnel circular, se puede ver un aumento de los máximos desplazamientos verticales en zona de contra bóveda si la configuración de la celda va de una forma regular a otra irregular. Puede verse también como los desplazamientos máximos se desplazan en la configuración regular, zona de bóveda y fundamentalmente en zona de contra bóveda a zonas de contacto entre las celdas que representan a las discontinuidades en el contorno del túnel.

Por lo que respecta a la tensión lateral, si el coeficiente lateral aumenta (k), por lo general los desplazamientos verticales aumentan en zona de contra bóveda y contacto de ésta con las celdas irregulares y regulares. En este último caso, al ser mayor la presión lateral ($k=3$), los máximos aparecen cerca del contorno del túnel y en los planos de debilidad que conforman la celda o mosaico.

Se concluye que a medida que la celda pasa de una configuración regular a otra irregular y la presión lateral aumenta, los desplazamientos verticales aumentan principalmente en zona de contra bóveda.

4.2 Túnel de herradura

4.2.1 Juntas Paralelas

4.2.1.1 Desplazamientos horizontales

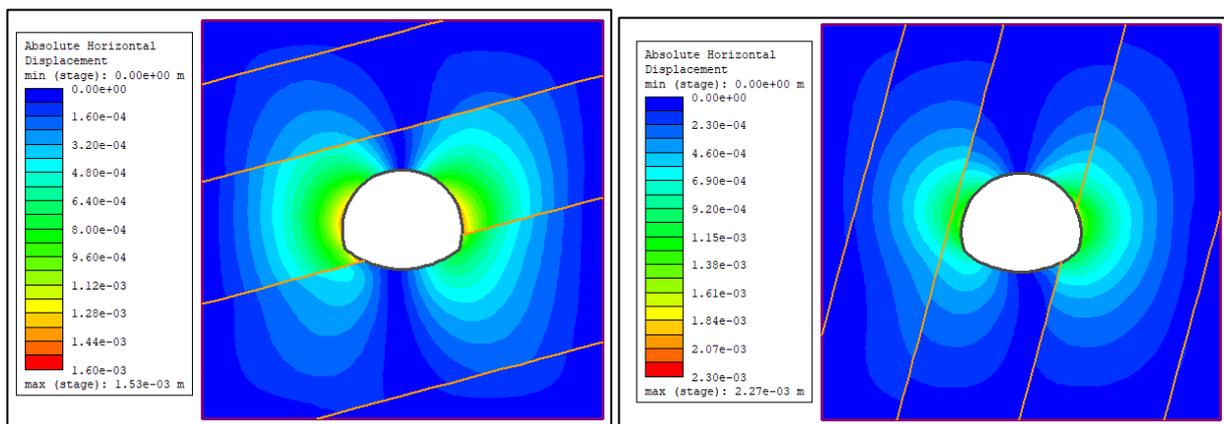


Ilustración 4-19 Desplazamientos horizontales Juntas Paralelas ($k=1$) – Túnel de herradura

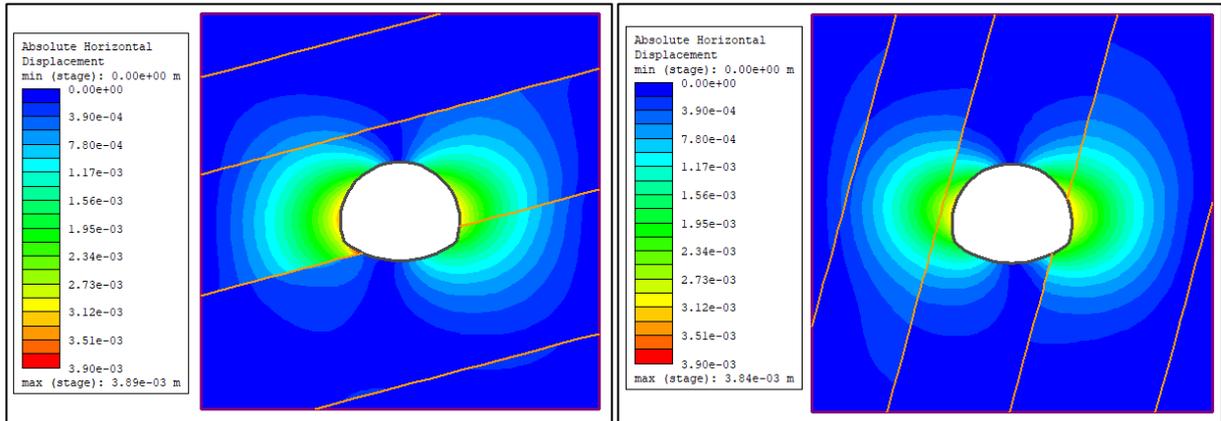


Ilustración 4-20 Desplazamientos horizontales Juntas Paralelas ($k=2$) – Túnel de herradura

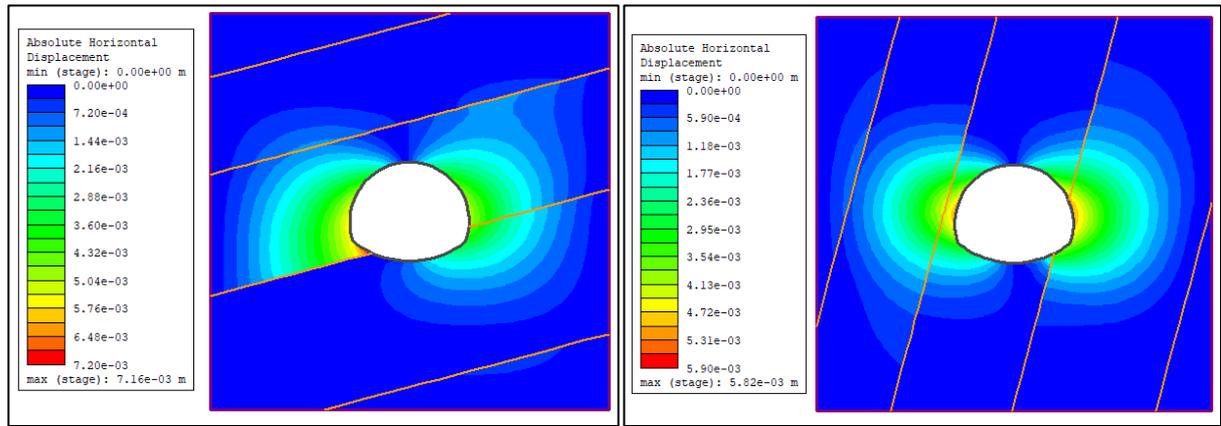


Ilustración 4-21 Desplazamientos horizontales Juntas Paralelas ($k=3$) – Túnel de herradura

Por lo que respecta a la orientación de las discontinuidades paralelas y continuas en túnel de herradura, se observa fundamentalmente en el contacto entre el plano de debilidad y los hastiales un aumento de los máximos desplazamientos horizontales cuando el buzamiento de la discontinuidad gira en sentido contrario de las agujas de reloj de 15° a 75° .

En cuanto a la presión de confinamiento, al aumentar el coeficiente lateral k , se aprecia en las zonas de contacto de los planos de fractura y hastiales un aumento de los máximos desplazamientos horizontales.

Se concluye que el aumento del desplazamiento en zona de contacto entre las discontinuidades y los hastiales es debido por una parte a la orientación de la discontinuidad ($< 75^\circ$) y por otra, al incremento de la tensión lateral llamada también presión de confinamiento del macizo rocoso.

4.2.1.1.1 Desplazamientos verticales

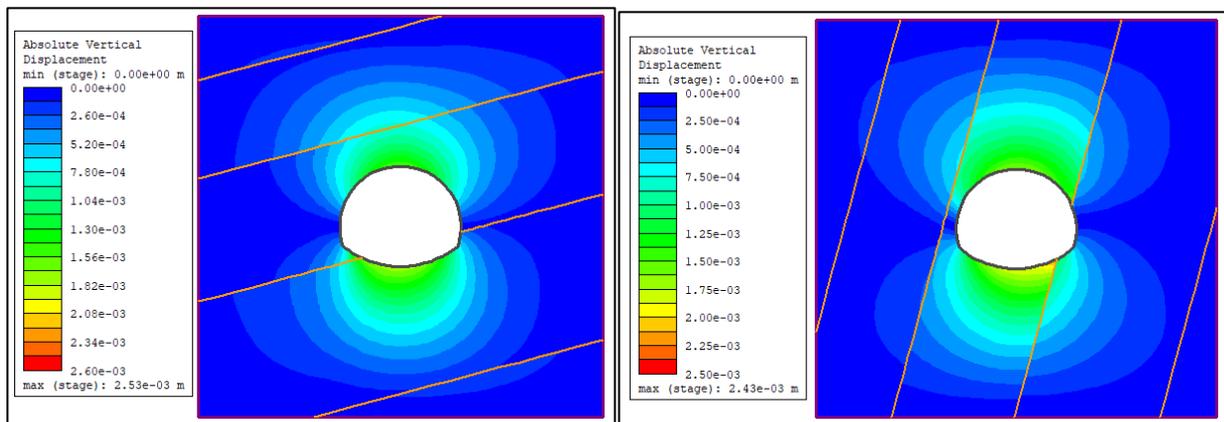
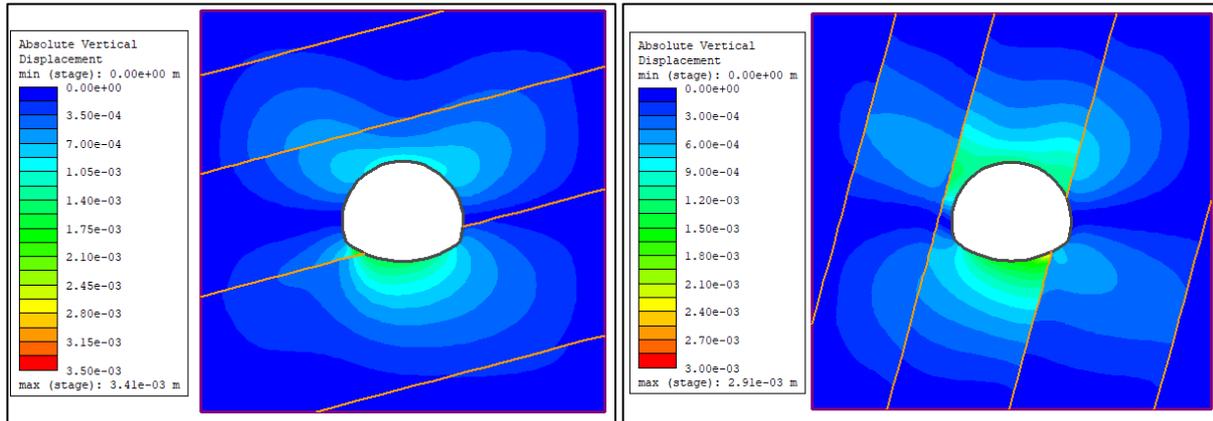
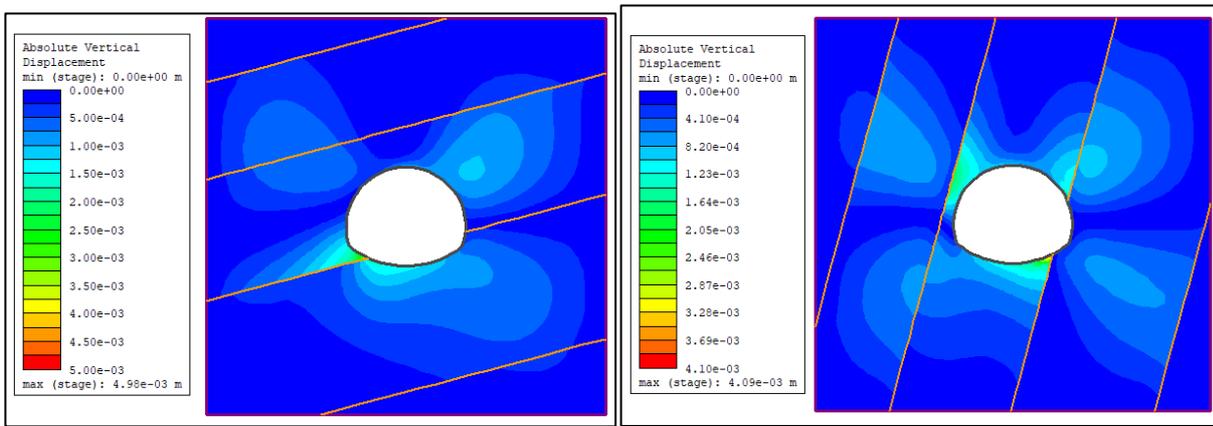


Ilustración 4-22 Desplazamientos verticales Juntas Paralelas ($k=1$) – Túnel de herradura

Ilustración 4-23 Desplazamientos verticales Juntas Paralelas ($k=2$) – Túnel de herraduraIlustración 4-24 Desplazamientos verticales Juntas Paralelas ($k=3$) – Túnel de herradura

Desde el punto de vista de la orientación de las discontinuidades en túnel de herradura, se puede ver un aumento de los desplazamientos verticales (máximos) fundamentalmente en zona de contacto entre los planos de fractura y la contra bóveda, cuando los buzamientos de los planos de debilidad disminuyen de 75° a 15° .

En cuanto a la presión lateral, por lo general los desplazamientos verticales aumentan en zona de contacto plano de debilidad y contra bóveda, cuando el coeficiente lateral k aumenta

Se concluye que el aumento de los máximos desplazamientos verticales en zona de contra bóveda es debido por una parte a la orientación de la discontinuidad ($< 75^\circ$) y por otra, al incremento de la tensión lateral llamada también presión de confinamiento por el aumento del valor de k .

4.2.2 Juntas Conjugadas

4.2.2.1 Desplazamientos horizontales

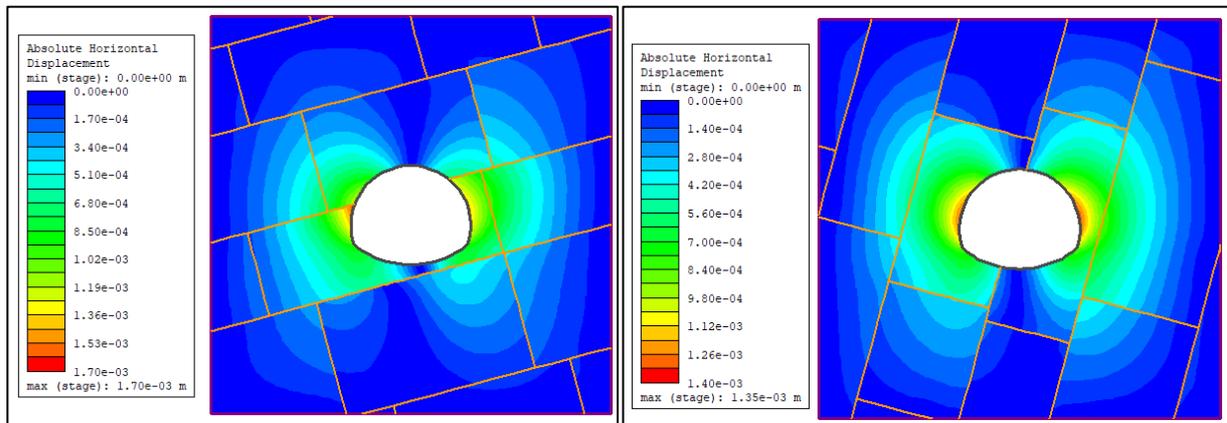


Ilustración 4-25 Desplazamientos horizontales Juntas Conjugadas ($k=1$) – Túnel de herradura

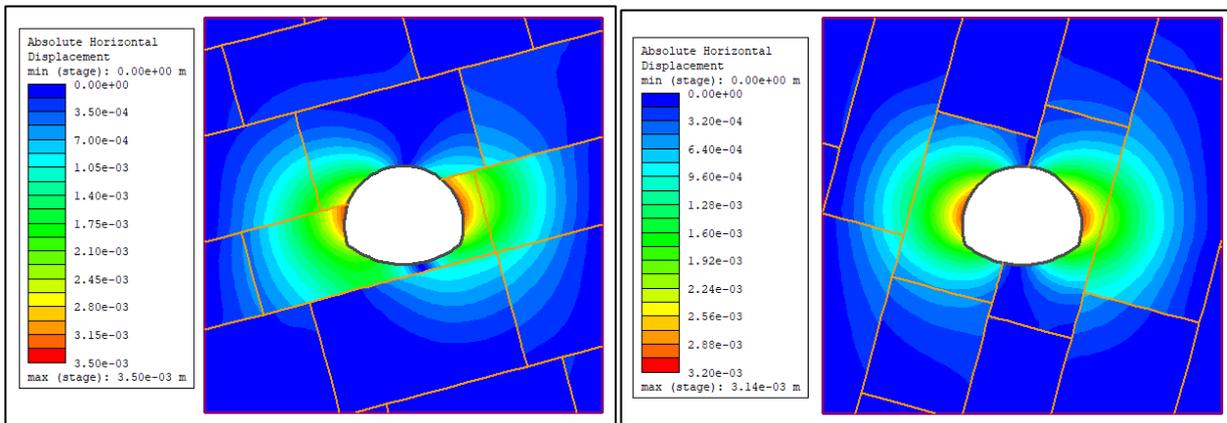


Ilustración 4-26 Desplazamientos horizontales Juntas Conjugadas ($k=2$) – Túnel de herradura

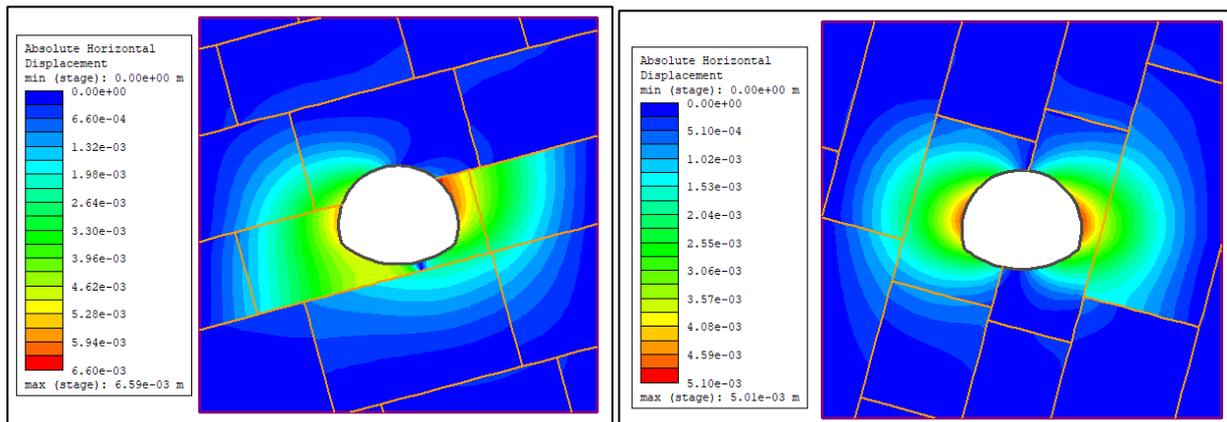


Ilustración 4-27 Desplazamientos horizontales Juntas Conjugadas ($k=3$) – Túnel de herradura

Sobre la orientación de las discontinuidades conjugadas en túnel de herradura, se aprecia que los máximos desplazamientos horizontales en zona de hastiales disminuyen a medida que los buzamientos de la discontinuidad aumentan (de 15° a 75°). Los mayores desplazamientos se dan en el hastial derecho.

En referencia a la tensión de confinamiento, al aumentar el coeficiente k , se observa en zona de hastiales un aumento de los máximos desplazamientos horizontales

Se concluye que el aumento del desplazamiento horizontal en zona de hastiales es debido en parte a la orientación de la discontinuidad ($< 75^\circ$) y al incremento de la tensión lateral o llamada también presión de

confinamiento del macizo rocoso.

4.2.2.2 Desplazamientos verticales

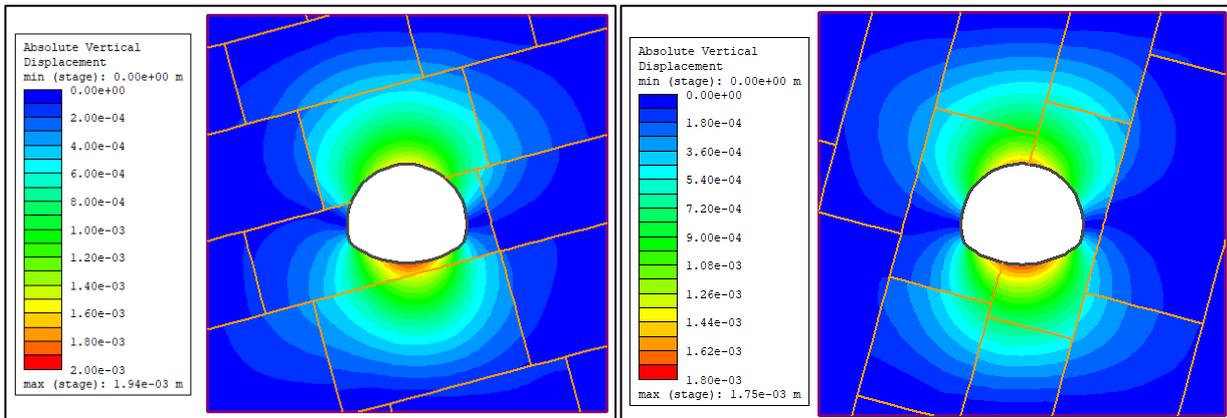


Ilustración 4-28 Desplazamientos verticales Juntas Conjugadas ($k=1$) – Túnel de herradura

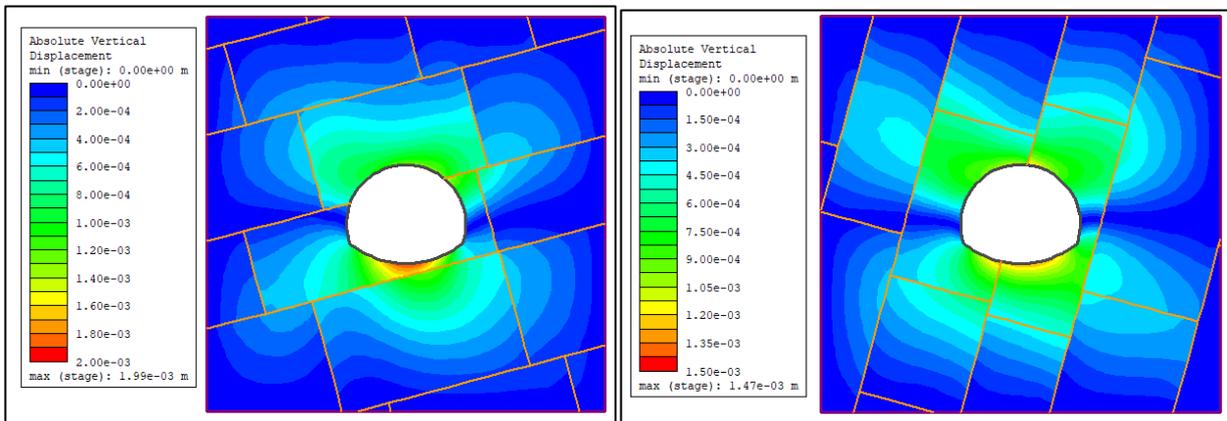


Ilustración 4-29 Desplazamientos verticales Juntas Conjugadas ($k v=2$) – Túnel de herradura

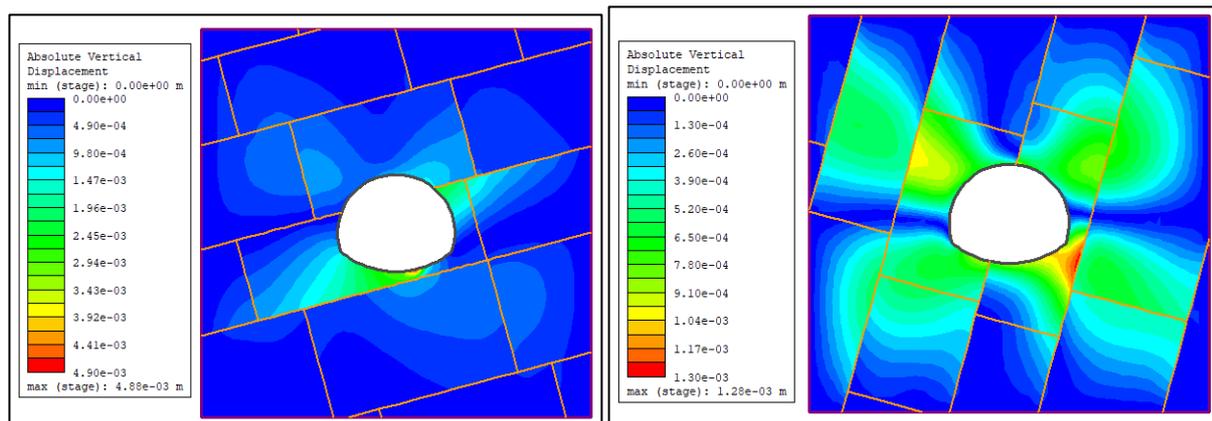


Ilustración 4-30 Desplazamientos verticales Juntas Conjugadas ($k=3$) – Túnel de herradura

Si nos centramos en el efecto que puede tener la orientación de las discontinuidades conjugadas en el túnel de herradura, se puede ver un aumento de los máximos desplazamientos verticales en zona de contra bóveda si el buzamiento es menor (15°). Si aumenta el buzamiento (75°) disminuyen en zonas de bóveda y contra bóveda y aumentan en planos de debilidad del contorno del túnel. Esta información se parece mucho a la obtenida bajo las mismas condiciones en túnel circular

En referencia a la tensión lateral, si el coeficiente lateral k aumenta, por lo general los desplazamientos verticales aumentan en zona de contra bóveda con buzamientos menores (15°) y disminuyen en zona de hastiales con

mayores buzamientos (75°). En este último caso, al ser mayor la presión lateral ($k=3$), los máximos aparecen en los planos de debilidad cerca del vértice del hastial con la contra bóveda

Se concluye que a medida que el buzamiento de la discontinuidad disminuye ($< 75^\circ$), aumentan los desplazamientos verticales principalmente en zona de contra bóveda, pero disminuye en zona de bóveda si aumentamos la presión lateral.

4.2.3 Voronoi

4.2.3.1 Desplazamientos horizontales

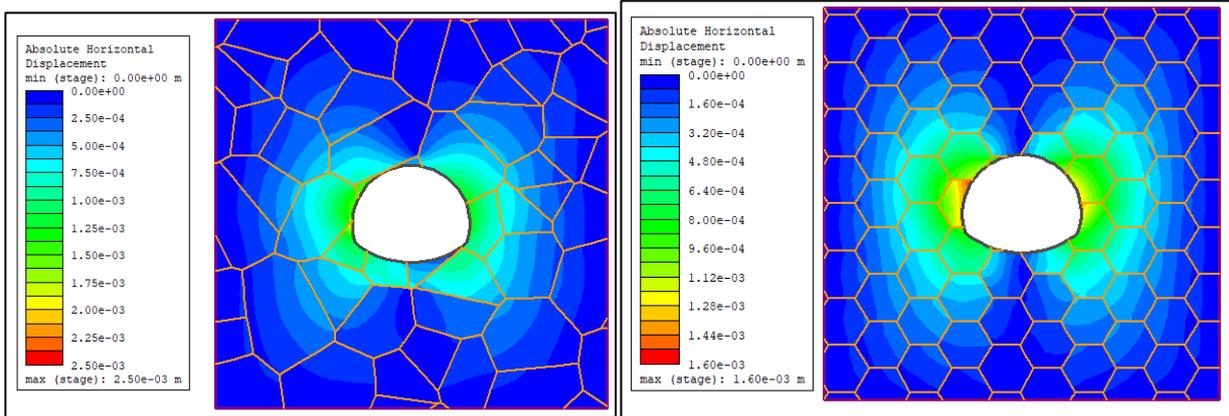


Ilustración 4-31 Desplazamientos horizontales Voronoi ($k=1$) – Túnel de herradura

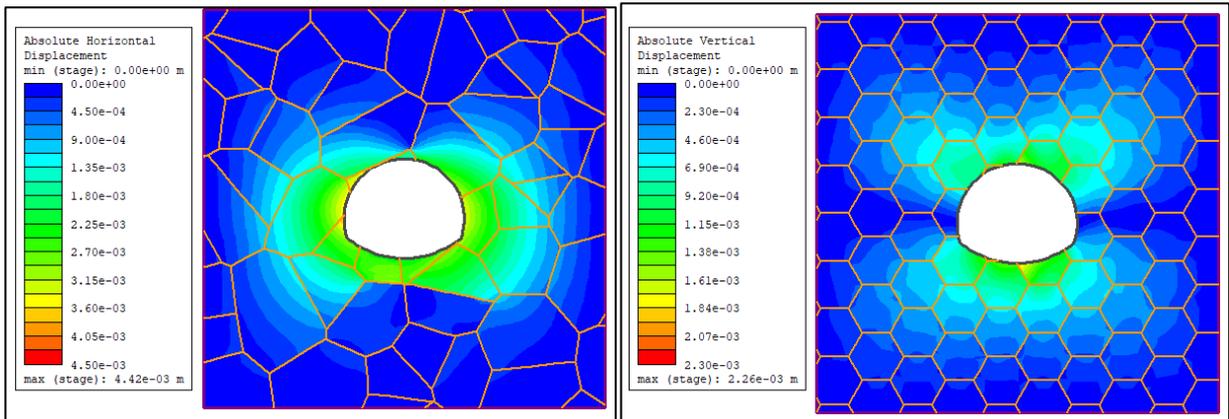


Ilustración 4-32 Desplazamientos horizontales Voronoi ($k=2$) – Túnel de herradura

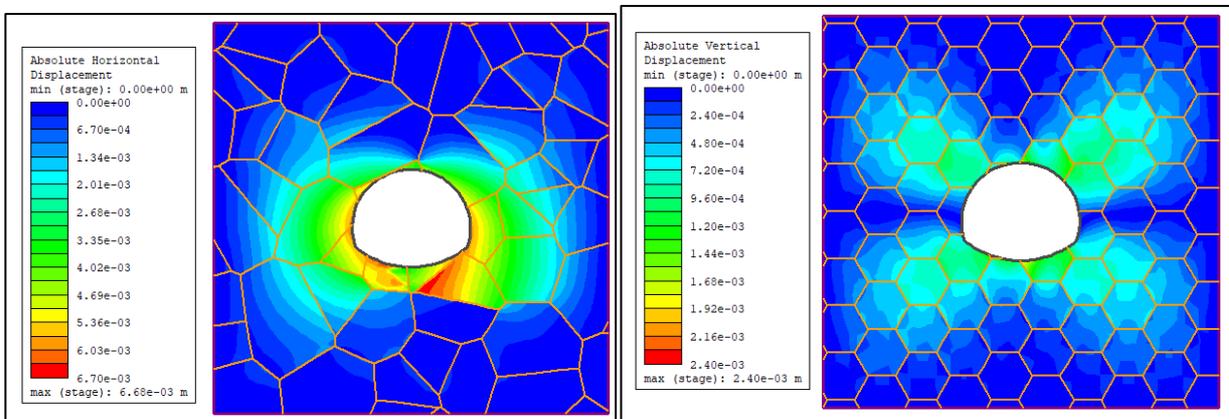


Ilustración 4-33 Desplazamientos horizontales Voronoi ($k=3$) – Túnel de herradura

En referencia al modelo de junta Voronoi en túnel de herradura, se puede ver como en condiciones isotrópicas ($k=1$), los desplazamientos horizontales (máximos) aumentan en zona de hastiales cuando la orientación de las

celdas o polígonos pasan de una configuración regular o hexagonal a otra irregular. Se aprecia también como los desplazamientos máximos se desplazan de zona de hastiales a zona de bóveda y contacto entre las celdas de discontinuidad y la contra bóveda.

En referencia a la tensión de confinamiento, al aumentar el coeficiente lateral k , puede verse en las celdas irregulares y regulares estudiadas, un claro aumento de los desplazamientos horizontales tanto en zona de contra bóveda como en zona de hastiales y, en especial, para $k=3$ en la zona de contacto entra la celda de discontinuidad y la contra bóveda

Se concluye que el aumento del desplazamiento horizontal en zona de hastiales y contra bóveda es debido en parte a la orientación de las celdas ($< 75^\circ$) y al incremento de la tensión lateral o llamada también presión de confinamiento. Los máximos desplazamientos se aprecian en configuraciones o mosaicos irregulares y zona de contra bóveda.

4.2.3.2 Desplazamientos verticales

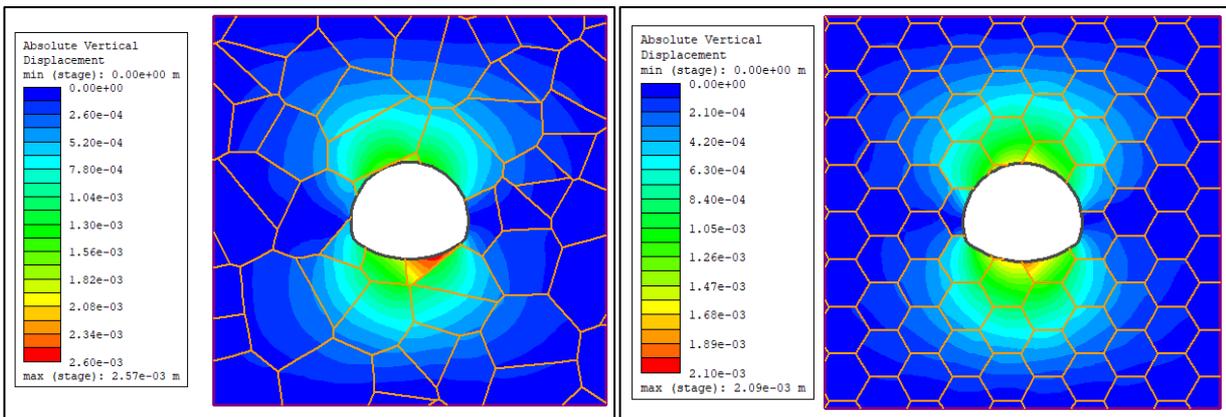


Ilustración 4-34 Desplazamientos verticales Voronoi ($k=1$) – Túnel de herradura

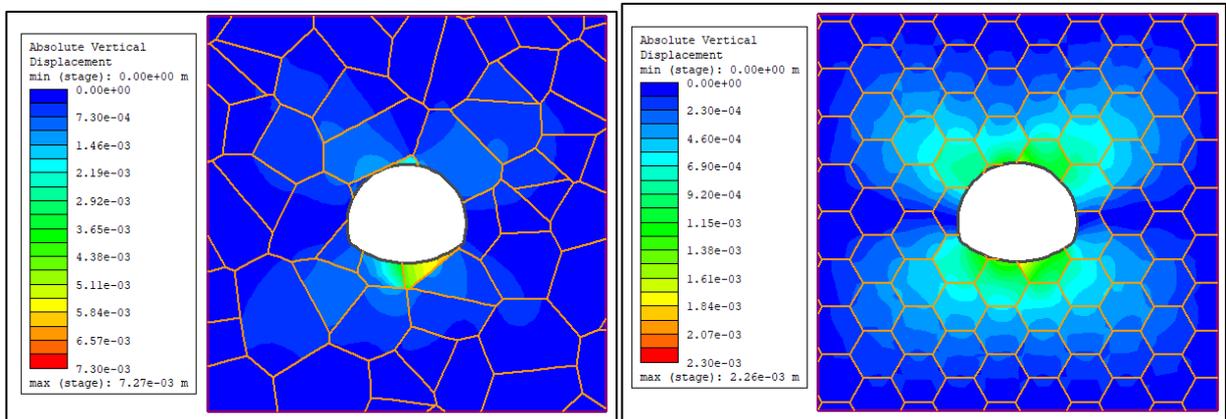


Ilustración 4-35 Desplazamientos verticales Voronoi ($k=2$) – Túnel de herradura

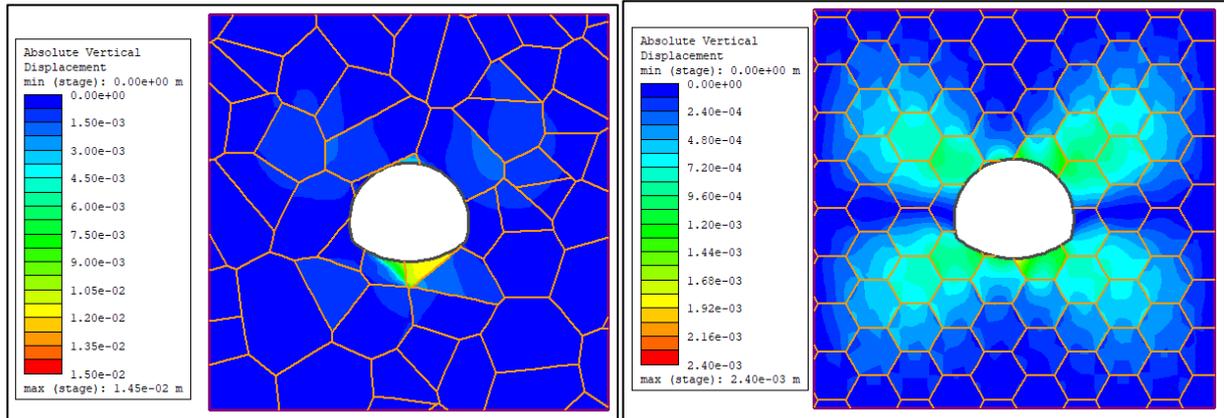


Ilustración 4-36 Desplazamientos verticales Voronoi $k=3$ – Túnel de herradura

En cuanto a la influencia que puede tener el modelo de juntas tipo Voronoi en el túnel de herradura, se puede ver que disminuyen los máximos desplazamientos verticales en zona de bóveda y fundamentalmente en contra bóveda si la configuración irregular pasa a ser regular o hexagonal. Puede verse también como los desplazamientos máximos se desplazan de zona de bóveda y contra bóveda a zonas de contacto entre los planos de debilidad y el contorno del túnel.

Por lo que respecta a la tensión lateral, si el coeficiente lateral k aumenta, por lo general los desplazamientos verticales aumentan en zona de contra bóveda y contacto de ésta con las celdas irregulares y regulares. En el caso en el que la presión lateral es mayor ($k=3$), los máximos aparecen cerca del contorno del túnel (en especial en zona de contra bóveda) y en los planos de debilidad que conforman la celda o mosaico.

Se concluye que a medida que la celda pasa de una configuración regular a otra irregular y la presión lateral aumenta. Se destaca que los desplazamientos verticales aumentan principalmente en zona de contra bóveda y en el contacto de las celdas cercanas al contorno del túnel.

4.3 Túnel tipo alcantarillado

4.3.1 Juntas Paralelas

4.3.1.1 Desplazamientos horizontales

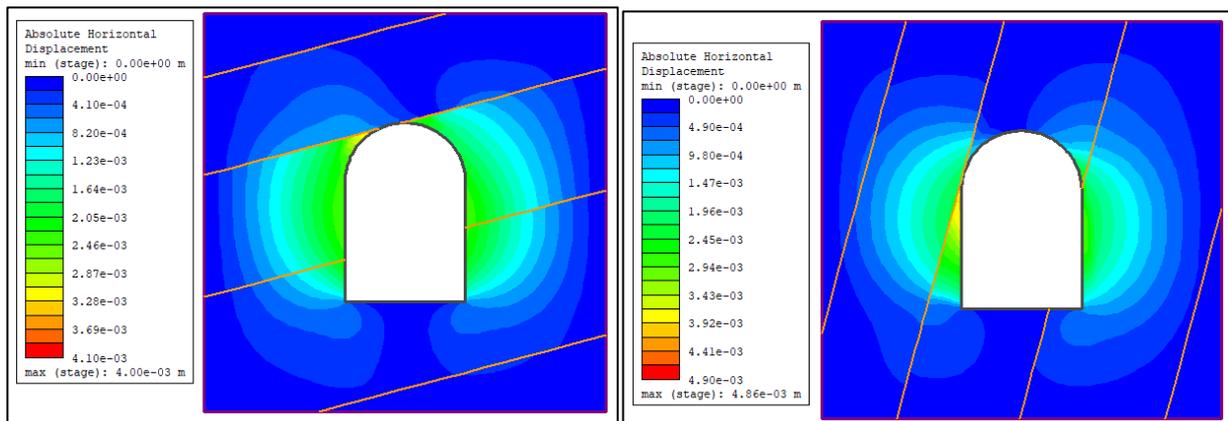


Ilustración 4-37 Desplazamientos horizontales Juntas Paralelas ($k=1$) – Túnel tipo alcantarillado

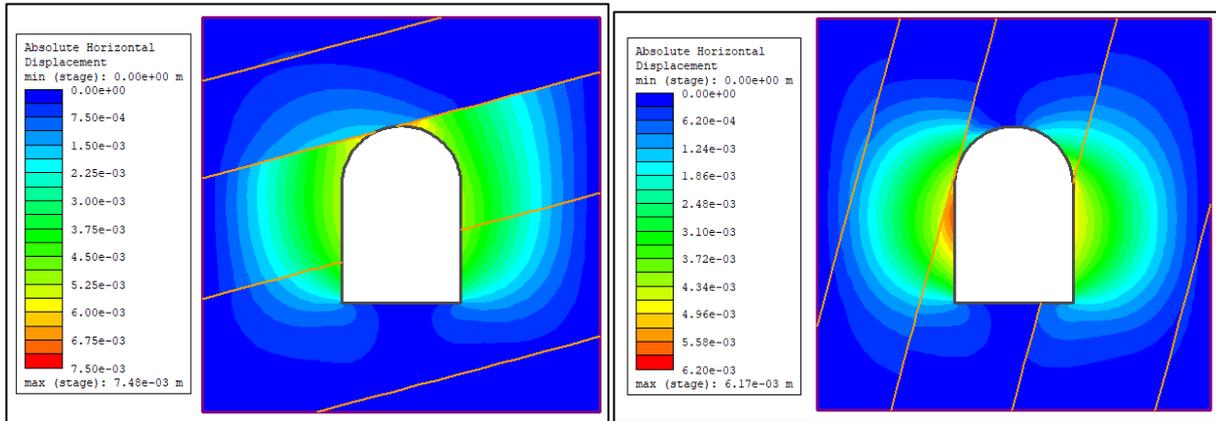


Ilustración 4-38 Desplazamientos horizontales Juntas Paralelas ($k=2$) – Túnel tipo alcantarillado

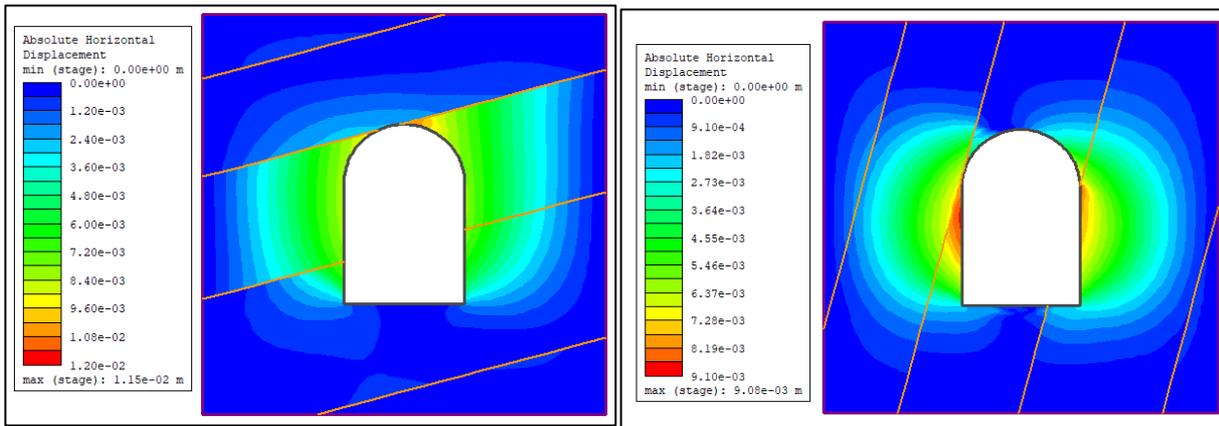


Ilustración 4-39 Desplazamientos horizontales Juntas Paralelas ($k=3$) – Túnel tipo alcantarillado

En lo que respecta a la influencia de la orientación de las discontinuidades paralelas y continuas en túnel de alcantarillado, se observa cuando los buzamientos son menores (15°) que los máximos desplazamientos horizontales se encuentran en la zona de contacto entre la bóveda y las juntas. Si aumenta el buzamiento (75°), los citados desplazamientos máximos se sitúan en el contacto entre los hastiales y los planos de debilidad cercanas al contorno del túnel

En cuanto a la presión de confinamiento, al aumentar el coeficiente lateral k , se aprecia en zona de contacto de los planos de debilidad con la bóveda y hastiales un aumento de los máximos desplazamientos horizontales.

Se concluye que el aumento del desplazamiento en zona de hastiales es debido por una parte a la orientación de la discontinuidad ($< 75^\circ$) y por otra, al incremento de la tensión lateral llamada también presión de confinamiento del macizo rocoso.

4.3.1.2 Desplazamientos verticales

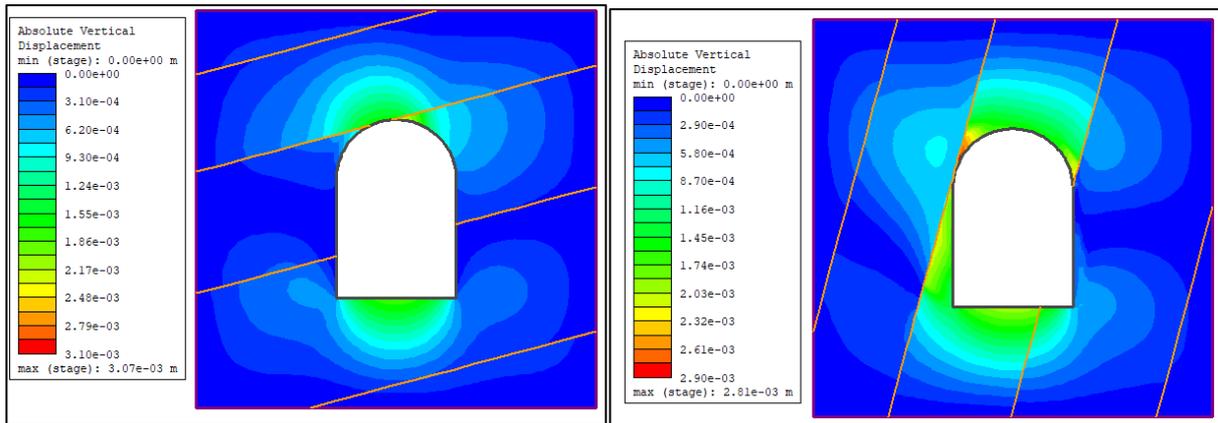


Ilustración 4-40 Desplazamientos verticales Juntas Paralelas ($k=1$) – Túnel tipo alcantarillado

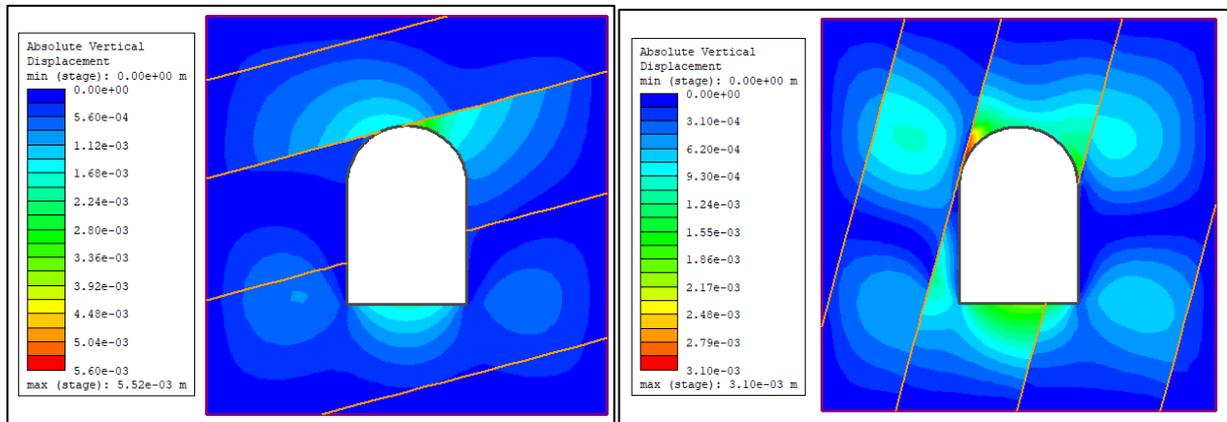


Ilustración 4-41 Desplazamientos verticales Juntas Paralelas ($k=2$) – Túnel tipo alcantarillado

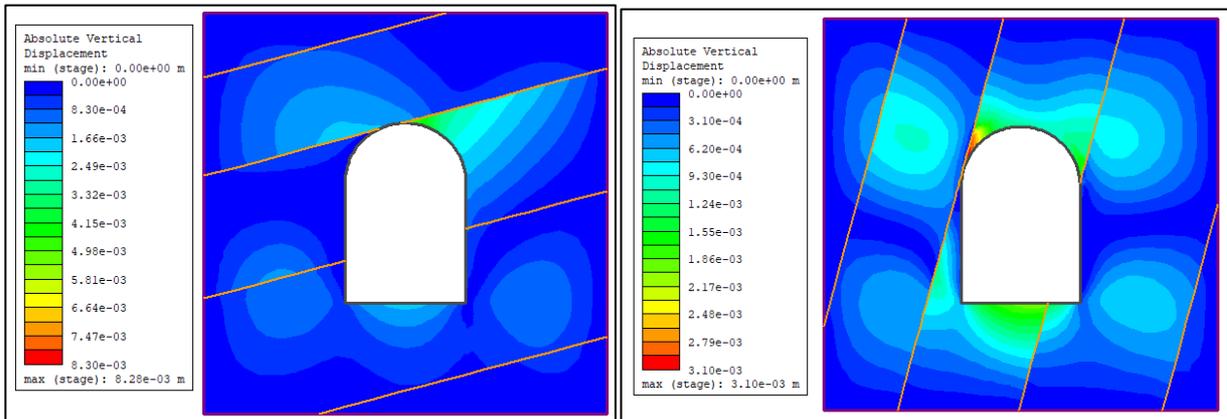


Ilustración 4-42 Desplazamientos verticales Juntas Paralelas ($k=3$) – Túnel tipo alcantarillado

Desde el punto de vista de la orientación de las discontinuidades en túnel de alcantarillado, se puede ver un aumento de los desplazamientos verticales (máximos) fundamentalmente en zona de contacto entre los planos de fractura y la bóveda, cuando el buzamiento de los planos de debilidad es menor (15°). Cuando los buzamientos son mayores (75°), estos máximos desplazamiento se desplazan a la zona de contacto entre el plano de debilidad y vértice bóveda-hastial. Los desplazamientos son mayores para buzamientos menores (15°)

En cuanto a la presión lateral, por lo general los desplazamientos verticales aumentan con el coeficiente lateral k , fundamentalmente en zona de contacto plano de debilidad, bóveda y vértice bóveda-hastial.

Se concluye que el aumento de los máximos desplazamientos verticales en zona de bóveda y vértice bóveda-hastial es debido por una parte a la orientación de la discontinuidad ($< 75^\circ$) y por otra, al incremento de la tensión

lateral llamada también presión de confinamiento por el aumento del valor de k.

4.3.2 Juntas Conjugadas

4.3.2.1 Desplazamientos horizontales

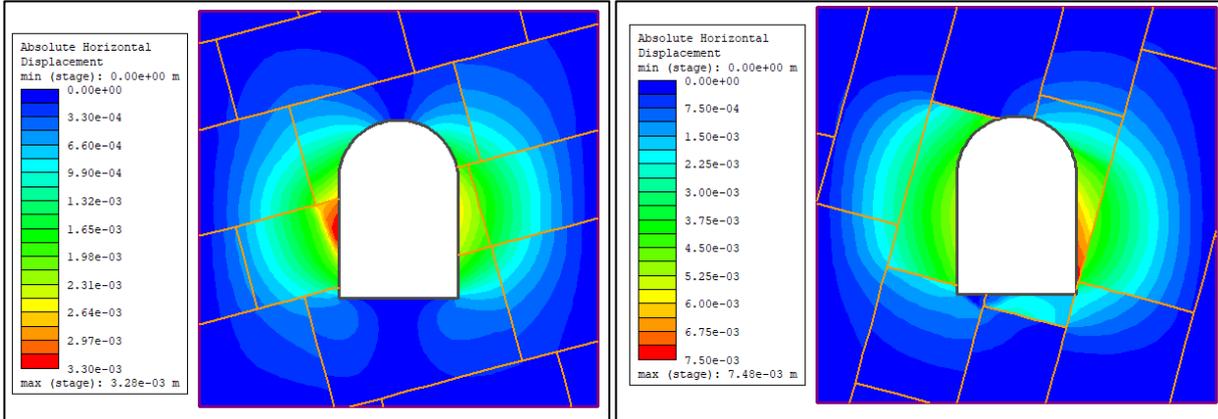


Ilustración 4-43 Desplazamientos horizontales Juntas Conjugadas (k=1) – Túnel tipo alcantarillado

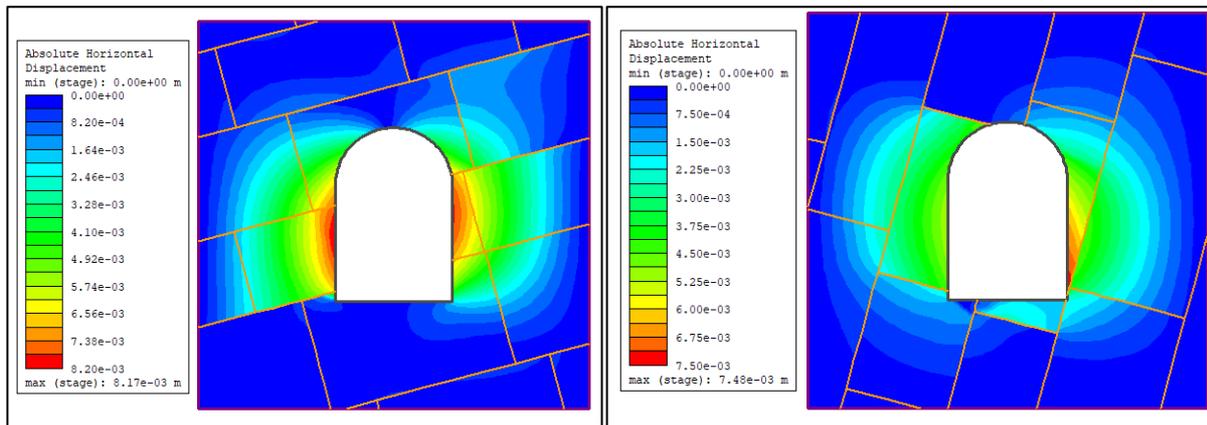


Ilustración 4-44 Desplazamientos horizontales Juntas Conjugadas (k=2) – Túnel tipo alcantarillado

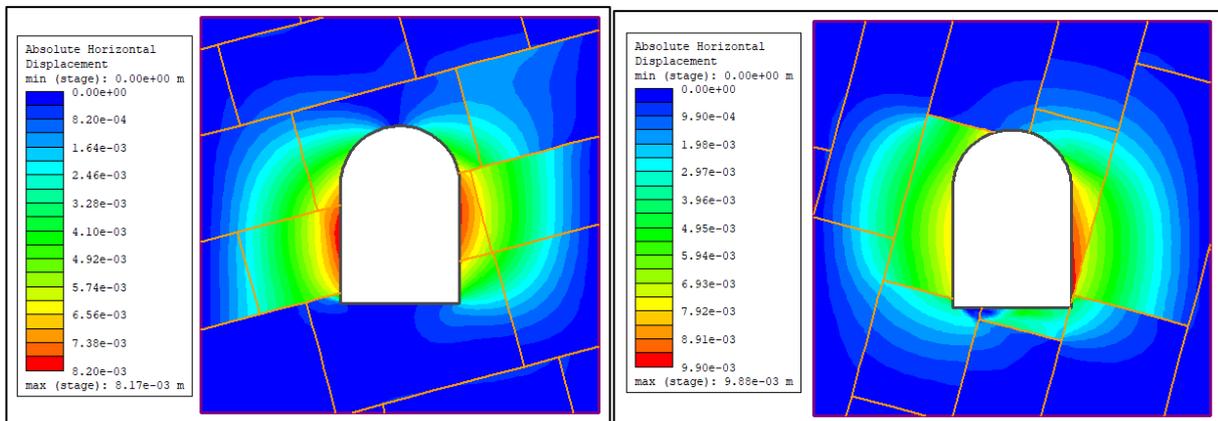


Ilustración 4-45 Desplazamientos horizontales Juntas Conjugadas (k=3) – Túnel tipo alcantarillado

En cuanto a la orientación de las discontinuidades conjugadas en túnel de alcantarillado, se aprecia como los desplazamientos horizontales (máximos) para buzamientos menores (15°) y mayores (75°) se concentran en las zonas de contacto del plano de debilidad y los hastiales.

En referencia a la tensión de confinamiento y al incremento del coeficiente lateral k, se puede ver un aumento

de los máximos desplazamientos horizontales en zona hastiales, de modo que estos desplazamientos son mayores si los buzamientos aumentan o giran en la dirección contraria a las agujas del reloj.

Se concluye que el aumento del desplazamiento horizontal en zona de hastiales y contra bóveda es debido en parte a la orientación de la discontinuidad ($>15^\circ$) y al incremento de la tensión lateral o llamada también presión de confinamiento.

4.3.2.2 Desplazamientos verticales

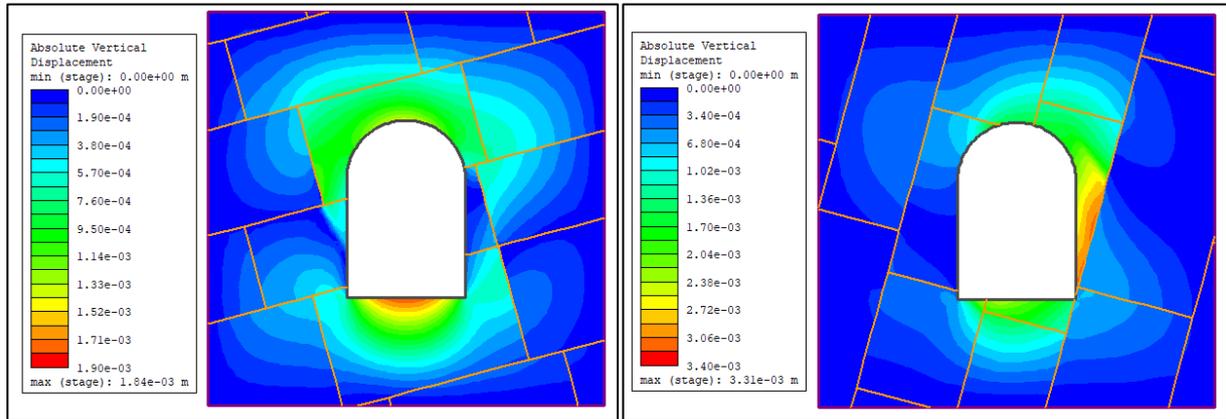


Ilustración 4-46 Desplazamientos verticales Juntas Conjugadas ($k=1$) – Túnel tipo alcantarillado

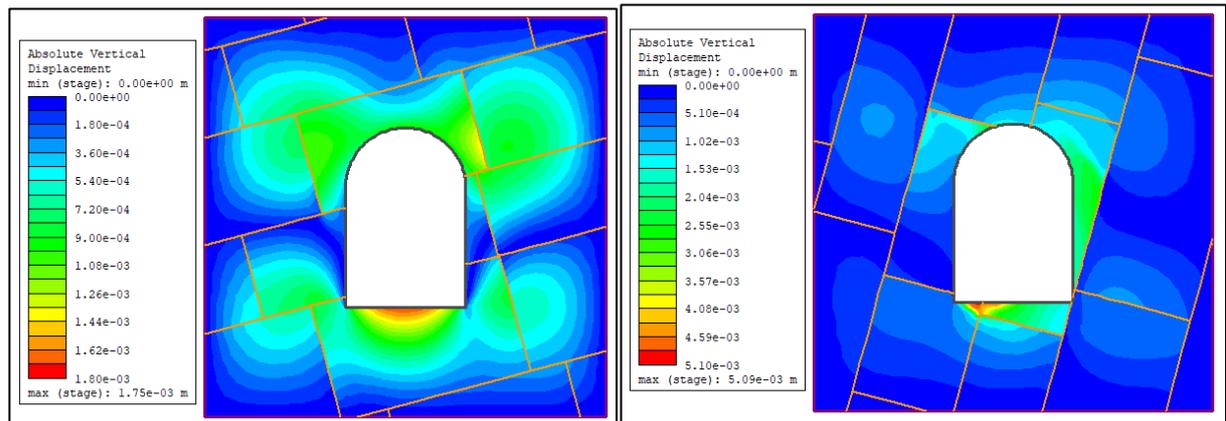


Ilustración 4-47 Desplazamientos verticales Juntas Conjugadas ($k=2$) – Túnel tipo alcantarillado

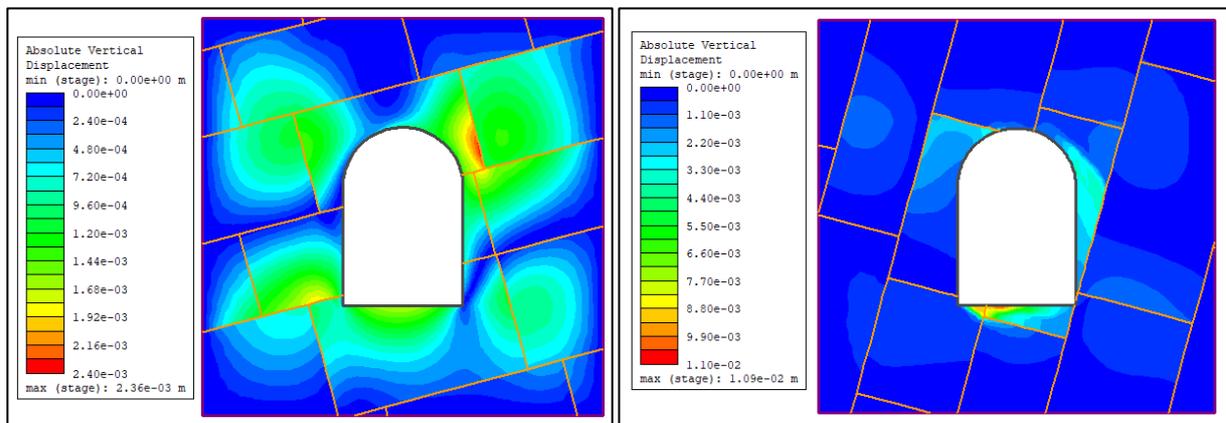


Ilustración 4-48 Desplazamientos verticales Juntas Conjugadas ($k=3$) – Túnel tipo alcantarillado

En referencia al efecto que puede tener la orientación de las discontinuidades conjugadas en el túnel de alcantarillado, se aprecian máximos desplazamientos verticales en buzamientos menores (15°) en zona de contra bóveda (condiciones isotropas), hastiales y en planos de debilidad cercanas a la bóveda. Para buzamientos mayores (75°), los máximos desplazamientos se pueden ver en la zona de contacto entre las discontinuidades y

la contra bóveda plana del túnel.

En referencia a la tensión lateral, si el coeficiente lateral k aumenta, por lo general los desplazamientos verticales aumentan pasando de zonas de contra bóveda a hastiales y a planos de debilidad cuando aumenta la tensión lateral (buzamientos menores: 15°). En cuanto a mayores buzamientos (75°), los desplazamientos máximos en zona de discontinuidad y contra bóveda disminuyen, en este caso por el incremento de las presiones de confinamiento ($k=3$).

Se concluye que a medida que el buzamiento de la discontinuidad disminuye ($<75^\circ$), aumentan los desplazamientos verticales principalmente en zona de hastiales y bóveda, pero disminuyen en zona de contra bóveda si aumentamos la presión lateral.

4.3.3 Voronoi

4.3.3.1 Desplazamientos horizontales

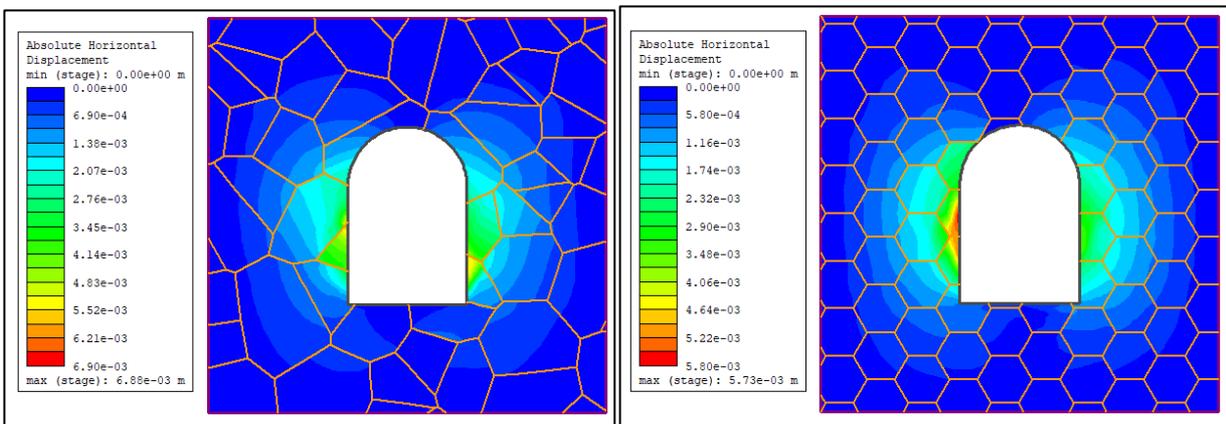


Ilustración 4-49 Desplazamientos horizontales Voronoi ($k=1$) – Túnel tipo alcantarillado

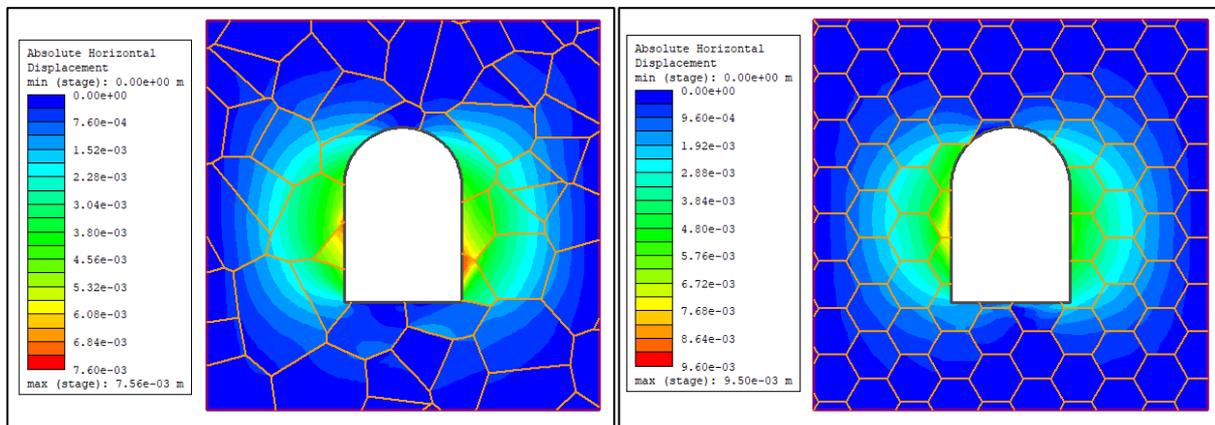


Ilustración 4-50 Desplazamientos horizontales Voronoi ($k=2$) – Túnel tipo alcantarillado

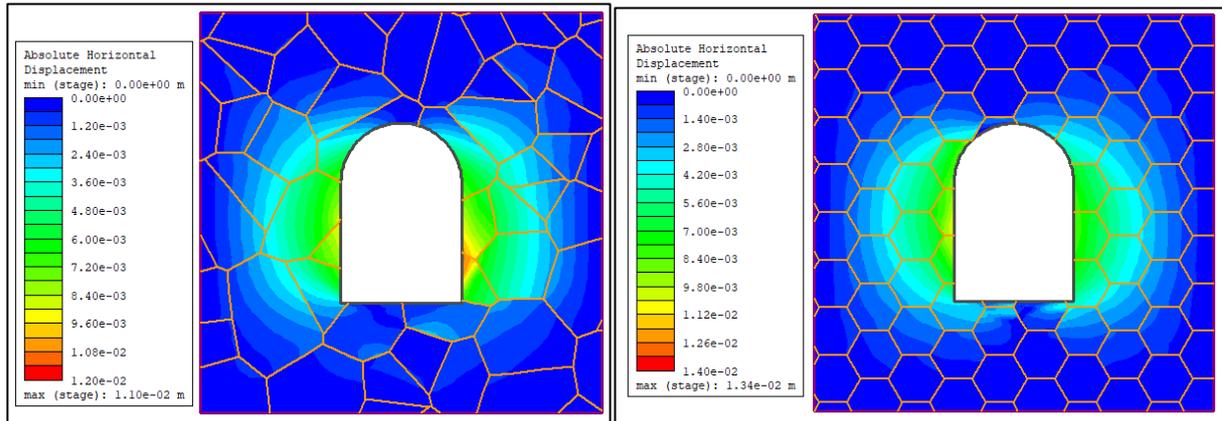


Ilustración 4-51 Desplazamientos horizontales Voronoi ($k=3$) – Túnel tipo alcantarillado

En lo que respecta al modelo de junta Voronoi en túnel de alcantarillado, se puede ver como los desplazamientos horizontales (máximos) aumentan en zona de hastiales cuando la orientación de las celdas o polígonos pasan de una configuración irregular a otra regular o hexagonal.

En referencia a la tensión de confinamiento, al aumentar el coeficiente lateral k , se observa en las celdas irregulares y regulares estudiadas, un claro aumento de los máximos desplazamientos horizontales en zona de contacto entre los hastiales y las celdas que limitan con el contorno del túnel.

Se concluye que el aumento del desplazamiento horizontal en zona de hastiales y celdas de contorno del túnel es debido en parte a la orientación de las celdas ($>15^\circ$) y al incremento de la tensión lateral o llamada también presión de confinamiento. Los máximos desplazamientos se aprecian en configuraciones o mosaicos irregulares y zona de hastiales.

4.3.3.2 Desplazamientos verticales

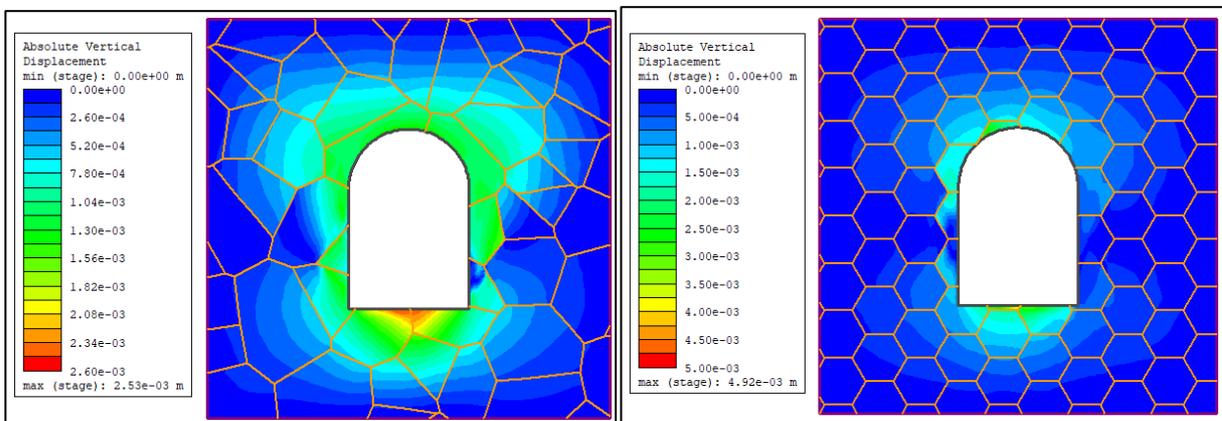
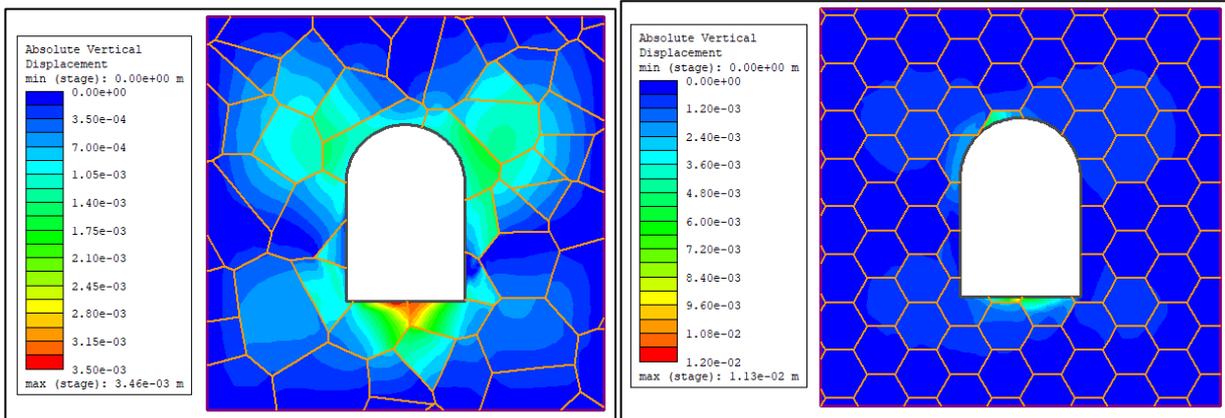
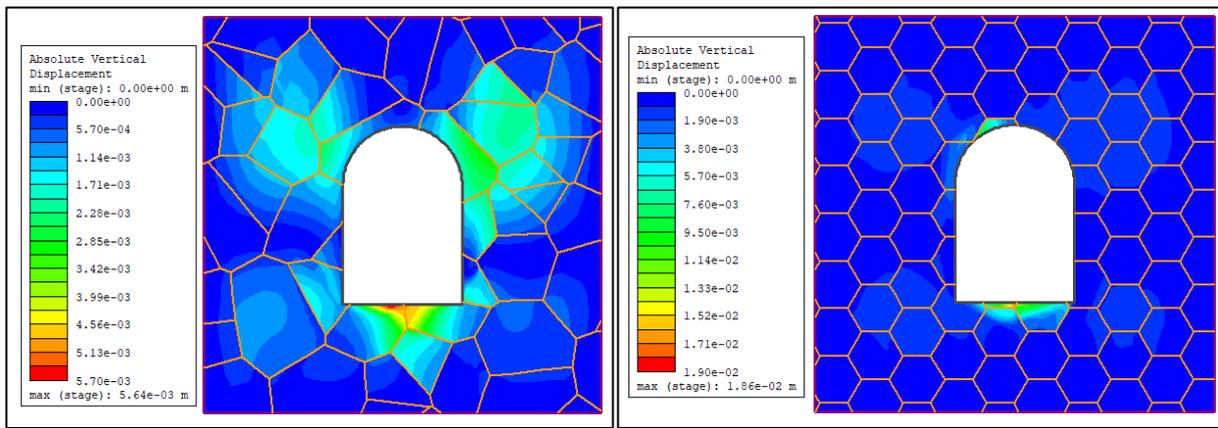


Ilustración 4-52 Desplazamientos verticales Voronoi ($k=1$) – Túnel tipo alcantarillado

Ilustración 4-53 Desplazamientos verticales Voronoi ($k=2$) – Túnel tipo alcantarilladoIlustración 4-54 Desplazamientos verticales Voronoi ($k=3$) – Túnel tipo alcantarillado

Con referencia a la influencia que puede tener el modelo de juntas tipo Voronoi en el túnel de alcantarillado, se puede ver que aumentan los máximos desplazamientos verticales en zona de contacto entre la celda y la bóveda y fundamentalmente con la contra bóveda si la configuración irregular pasa a ser regular o hexagonal.

Por lo que respecta a la tensión lateral, si el coeficiente lateral k aumenta, por lo general los desplazamientos verticales aumentan en zona contacto de la bóveda y, en especial, la contra bóveda y las celdas irregulares y regulares. En el caso en el que la presión lateral es mayor ($k=3$), los máximos aparecen en el contacto celda regular y contra bóveda

Se concluye que a medida que la celda pasa de una configuración irregular a otra regular y la presión lateral aumenta, los desplazamientos verticales se incrementan fundamentalmente en zona de contacto de la celda con la contra bóveda.

5 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Como continuación del estudio de los desplazamientos en un macizo rocoso a grandes profundidades ante diferentes tipos de familias de diaclasas, geometrías de túnel y estados tensionales, se da paso a analizar los resultados obtenidos de los cálculos con elementos finitos para así poder extraer conclusiones que sirvan de punto de referencia a la influencia que pueden tener las discontinuidades en materiales como los macizos rocosos. En concreto se analizan los desplazamientos máximos en el contorno del túnel, la deformada de la sección y los puntos de plastificación.

5.1 Desplazamientos máximos en el contorno del túnel

En el siguiente apartado se muestran diferentes tablas donde aparecen representados los valores máximos absolutos de los desplazamientos en el contorno del túnel en función de las distintas familias de diaclasas, las diferentes geometrías del túnel y los 3 estados tensionales estudiados (ver Tablas 5-1 – 5-3). Los desplazamientos máximos horizontales se dan en hastiales izquierda y derecha y los verticales en bóveda y contra bóveda, siendo estos los 4 puntos a analizar. En la Ilustración 5-1 aparecen representadas las 3 secciones de estudio, situando estas 4 partes diferenciadas de cada uno de los contornos del túnel.

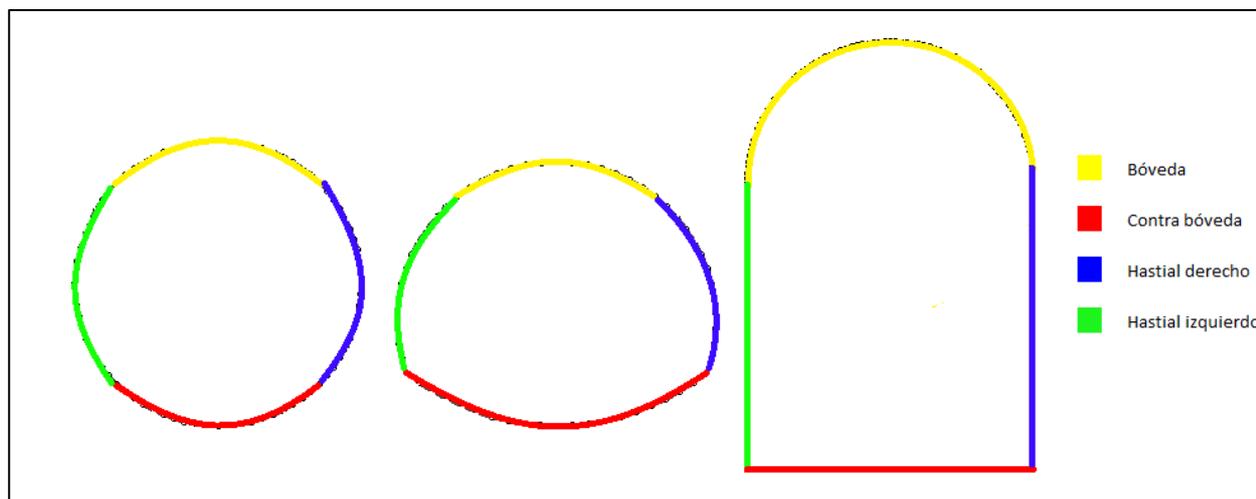


Ilustración 5-1 Situación de los puntos de estudio en las diferentes secciones.

En las tablas aparece en negrita el valor máximo para cada uno de los casos estudiados (ver Tablas 5-1 – 5-3). De esta manera se puede visualizar donde se concentran los máximos o donde se sitúan los mayores desplazamientos horizontales y verticales. Se unen a estas tablas unos gráficos donde se representan estos valores máximos de los desplazamientos en función del coeficiente lateral k que representa a la presión de confinamiento del macizo rocoso para cada familia de juntas, geometría y zona del contorno del túnel (ver Ilustración 5-2 – 5-13). Con esta información también se realizarán unos ábacos (ver Ilustración 5-14 – 5-19) que, para cada una de las familias de diaclasas, representa los desplazamientos máximos horizontales y verticales en función del estado tensional del macizo.

Como se mostró en el anterior capítulo, se sabe que los máximos desplazamientos en el contorno del túnel en los diferentes casos estudiados varían constantemente. Sin embargo, cada tipo de familia de discontinuidad y geometría de túnel presenta zonas preferentes donde ocurren los máximos desplazamientos.

Esto es probablemente debido a la configuración que ofrece la distribución normal a la hora de realizar la

separación de las juntas, junto con la inclinación de estas, que dependiendo dónde se produzca la intersección entre las distintas juntas y el contorno del túnel (según se puede comprobar en las ilustraciones presentadas en el anterior capítulo) se darán unos máximos desplazamientos en un lugar u otro. En estas intersecciones se producen grandes concentraciones de tensiones que generan los máximos desplazamientos en el contorno del túnel.

Por ello, los ábacos que se extraigan representarán únicamente los valores máximos generalizando para ambos hastiales y para zona de bóveda y contra bóveda.

5.1.1 Túnel circular

		PARA-LELAS		CONJUGADAS		VORONOI		
		k	15°	75°	15°	75°	IRREGULAR	HEXAGONAL
DESPLAZAMIENTO HORIZONTAL (metros= 10^{-3})	HASTIAL DERECHO	1	1.77	1.65	2.03	1.54	1.78	1.65
		2	3.63	3.65	5.33	3.57	4.5	3.57
		3	5.68	5.74	8.44	5.7	7.28	5.56
	HASTIAL IZQUIERDO	1	1.53	1.64	1.86	1.5	2.57	1.65
		2	3.54	3.55	5.68	3.43	4.59	3.56
		3	6.39	5.58	10.1	5.41	7.77	5.49
DESPLAZAMIENTO VERTICAL (metros= 10^{-3})	BOVEDA	1	1.5	1.6	1.52	1.61	1.81	1.79
		2	1.06	1.22	1.13	1.28	1.36	1.73
		3	1.07	1.03	1.23	1.23	1.48	1.73
	CONTRA BOVEDA	1	1.53	2.18	2.09	1.5	6.06	1.87
		2	1.15	3.87	5.45	1.02	10.6	1.89
		3	2.37	5.45	7.3	0.8	16.9	1.94

Tabla 5-1 Desplazamientos máximos túnel circular.

De los resultados mostrados en la tabla 5-1 y para los máximos desplazamientos observados en el contorno del túnel, se puede comentar lo siguiente:

Se comprueba para el modelo de juntas paralelas y continuas en túnel circular, un aumento de los máximos desplazamientos horizontales en zonas de hastiales cuando aumenta la presión de confinamiento o coeficiente lateral (k) y el buzamiento de la junta o discontinuidad va de menor a mayor (15°-75°).

Se constata para el modelo de juntas paralelas continuas en túnel circular, un incremento de los máximos desplazamientos verticales en bóveda y, principalmente, en contra bóveda cuando la presión lateral aumenta y los buzamientos de la discontinuidad van de menor a mayor (15° a 75°).

Se constata para el modelo de juntas conjugadas en túnel circular, que disminuyen los máximos desplazamientos horizontales en zonas de hastiales cuando el buzamiento de las discontinuidades va de menor a mayor (15° a 75°) o gira en el sentido contrario a las agujas del reloj. En cuanto a la presión lateral, se observa en ambos hastiales un incremento de los mencionados desplazamientos.

Se comprueba para el modelo de juntas conjugadas en túnel circular, un aumento de los máximos desplazamientos verticales en zona de bóveda para buzamientos de la discontinuidad que van de 15 a 75° (dirección contraria a las agujas del reloj). En el caso de la contra bóveda se aprecia lo contrario, es decir, menores desplazamientos verticales cuando los buzamientos de la discontinuidad van en esa misma dirección. En cuanto a la tensión lateral, por lo general los desplazamientos verticales aumentan en contra bóveda para buzamientos menores y disminuyen en zona de bóveda y contra bóveda para los buzamientos mayores.

Se constata para el modelo de juntas Voronoi en túnel circular, que disminuyen los máximos desplazamientos horizontales en zonas de hastiales cuando la orientación de las celdas o polígonos pasan de una distribución irregular a otra regular o hexagonal. En cuanto a la presión lateral, se observa en ambos hastiales un incremento de los mencionados desplazamientos. Los máximos desplazamientos se aprecian en configuraciones o mosaicos irregulares y zona de contra bóveda.

Se comprueba para el modelo de juntas Voronoi en túnel circular, un aumento de los máximos desplazamientos verticales en zona de bóveda para buzamientos de la discontinuidad que van de 15 a 75° (dirección contraria a

las agujas del reloj). En el caso de la contra bóveda se aprecia lo contrario, es decir, menores desplazamientos verticales cuando los buzamientos de la discontinuidad van en esa misma dirección. En cuanto a la tensión lateral, por lo general los desplazamientos verticales aumentan en contra bóveda para buzamientos menores y disminuyen en zona de bóveda y contra bóveda para los buzamientos mayores.

Se muestra en la ilustración 5-1 y para túnel circular, los máximos desplazamientos horizontales observados en función del coeficiente lateral y para la zona de hastiales del túnel (izquierdo y derecho).

En cuanto a las discontinuidades paralelas en túnel circular con buzamientos menores (15°) y coeficiente lateral $k=2$, se aprecia que los mayores desplazamientos horizontales aparecen en el hastial derecho del túnel. En cuanto a mayores valores de $k>2$, estos desplazamientos se desplazan al hastial izquierdo.

Por lo que respecta a las discontinuidades conjugadas en túnel circular con buzamientos menores (15°) y coeficiente lateral k cercanos a 1, se observa que los mayores desplazamientos horizontales aparecen en el hastial derecho del túnel. Para $k>1,5$, estos máximos desplazamientos se pueden ver en el hastial izquierdo.

En referencia a las discontinuidades tipo Voronoi en túnel circular con distribución de celdas irregulares e incremento del coeficiente lateral k , puede verse que los mayores desplazamientos horizontales se concentran en el hastial izquierdo del túnel.

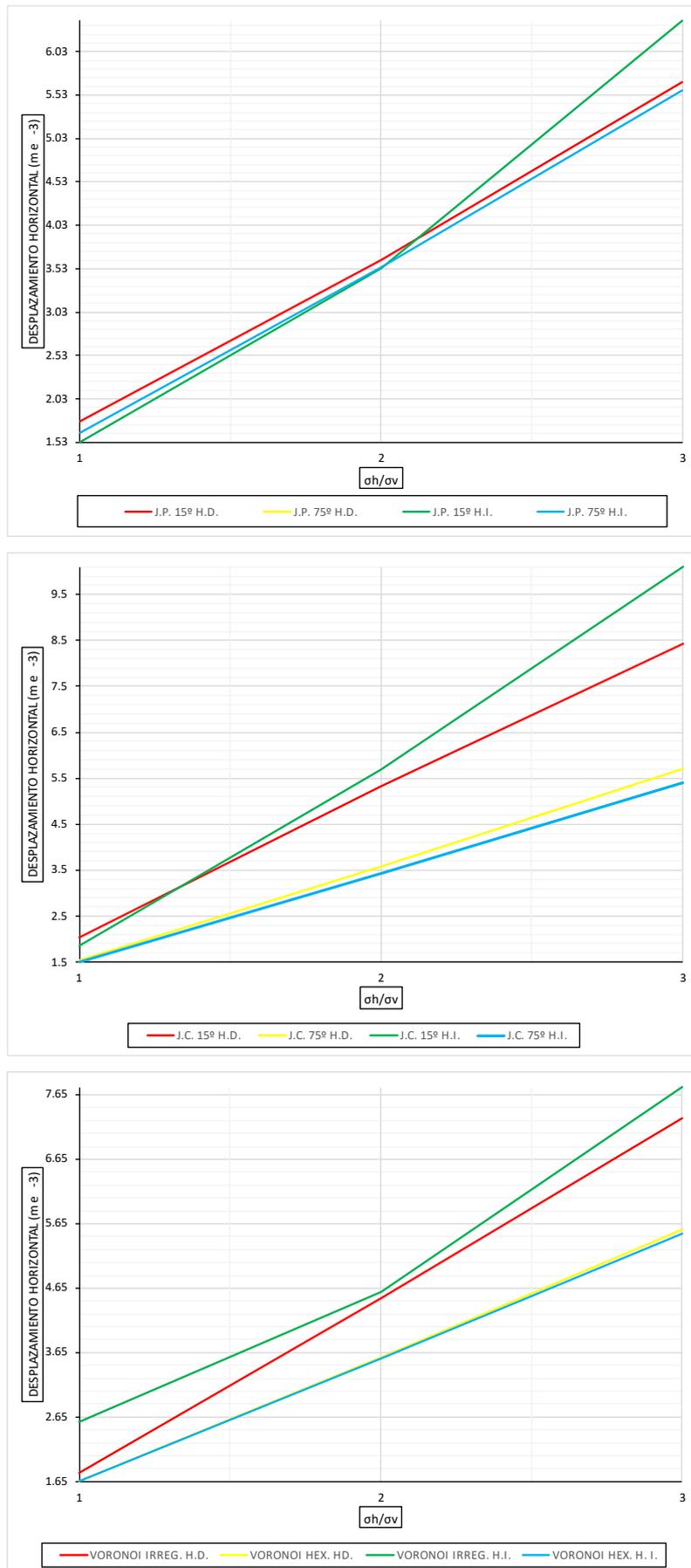
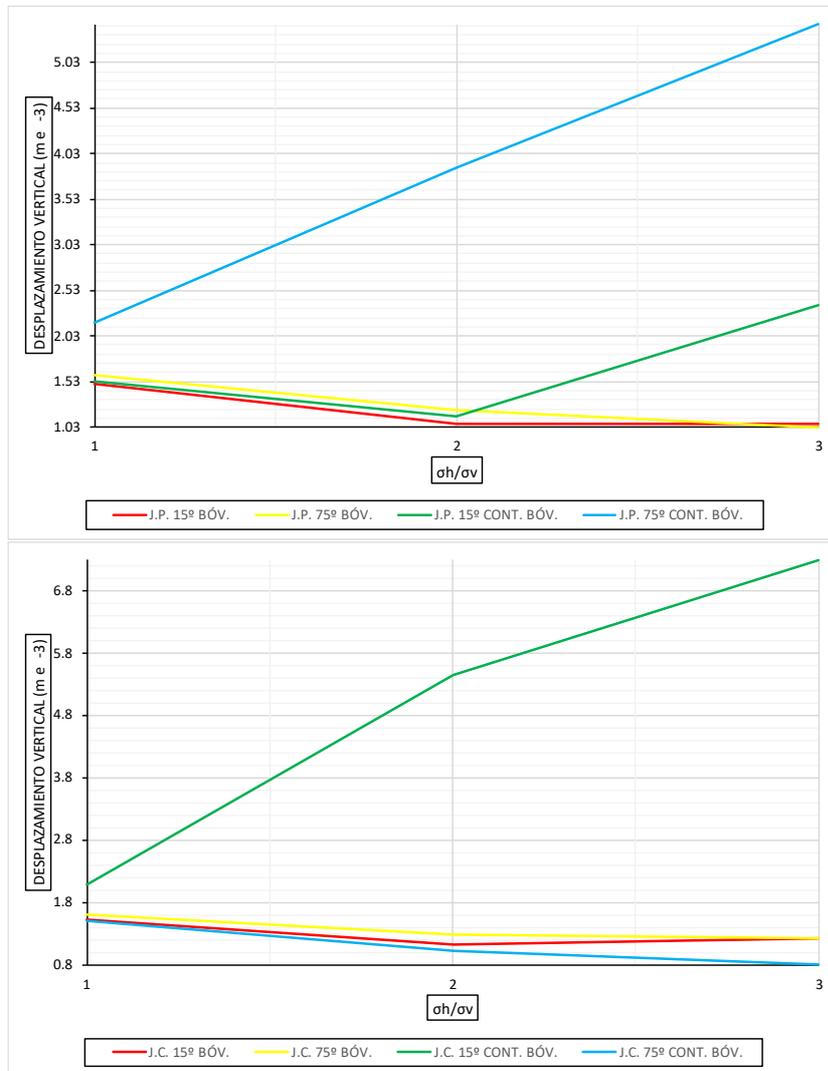


Ilustración 5-2 Desplazamiento horizontal máximo (hastiales) – Túnel circular.

Se muestra en la ilustración 5-2 y para túnel circular, los máximos desplazamientos verticales observados en función del coeficiente lateral k para zonas como la bóveda y la contra bóveda.

En lo que respecta a las discontinuidades paralelas y conjugadas en túnel circular con buzamientos mayores (75°) e incremento del coeficiente lateral, se puede ver que los mayores desplazamientos verticales aumentan y se sitúan en zona de contra bóveda.

En cuanto a las discontinuidades del tipo Voronoi en túnel circular y celda o mosaico irregular e incremento del coeficiente lateral k , se aprecia que los mayores desplazamientos aumentan y se sitúan en zona de contra bóveda.



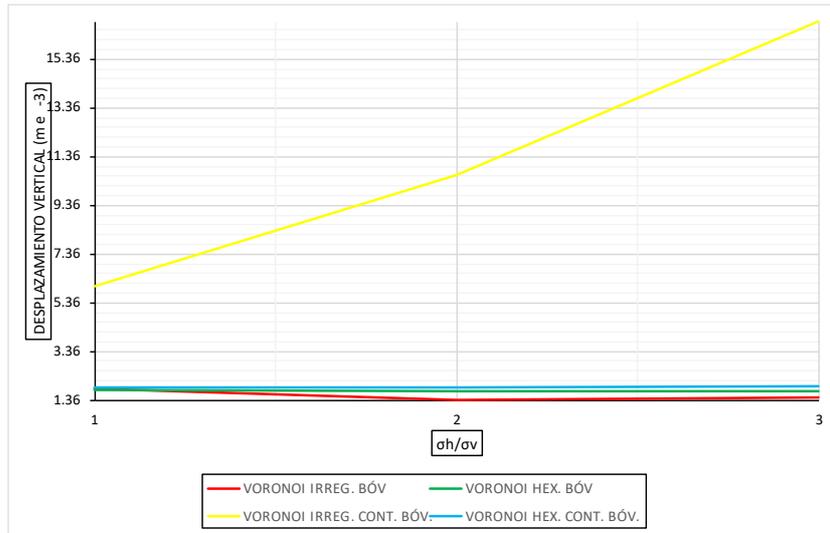


Ilustración 5-3 Desplazamiento vertical máximo (Bóveda / Contra bóveda) – Túnel circular.

Visualizados los valores máximos de los desplazamientos horizontales y verticales, se condensa la información en los siguientes ábacos (ver Ilustraciones 5-4 y 5-5) donde se representan los máximos desplazamientos en función del coeficiente lateral y el modelo de junta o discontinuidad utilizada (paralela, conjugada y Voronoi).

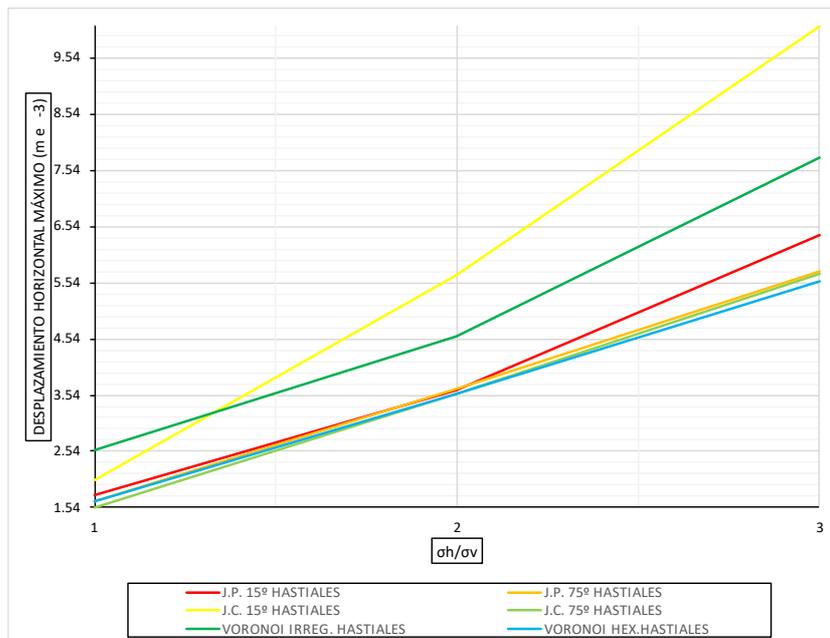


Ilustración 5-4 Despl. horizontal máximo (hastiales) – Túnel circular – Todas las familias de disc.

En túnel circular y zona de hastiales, se aprecia en la ilustración 5-3, cuando la presión de confinamiento aumenta, que los mayores desplazamientos horizontales son debidos a buzamientos menores (15º) en familia de discontinuidades conjugadas. Lo menores desplazamientos corresponden a familias tipo Voronoi y celdas o mosaicos regulares o hexagonales.

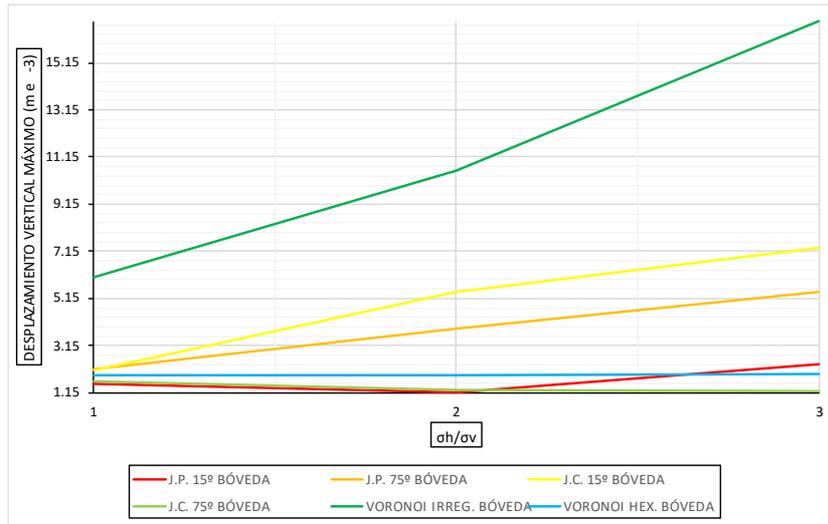


Ilustración 5-5 Despl. horizontal vertical (hastiales) – Túnel circular – Todas las familias de disc.

En la ilustración 5-4, zona de bóveda y para túnel circular, se puede ver cuando la presión de confinamiento aumenta, que los mayores desplazamientos verticales son debidos a familias de discontinuidades irregulares tipo mosaico (Voronoi). Los menores desplazamientos corresponden a familias de juntas conjugadas y buzamientos mayores (75°).

5.1.2 Túnel de herradura

		PARALELAS		CONJUGADAS		VORONOI		
		k	15°	75°	15°	75°	IRREGULAR	HEXAGONAL
			1	1.5	2.04	1.42	1.35	1.35
DESPLAZAMIENTO HORIZONTAL (m =10 ⁻³)	HASTIAL DERECHO	2	3.18	3.22	3.35	3.14	3.44	1.14
		3	5.02	5.82	6.45	5.01	5.95	4.98
		1	1.37	1.38	1.7	1.3	2.5	1.6
	HASTIAL IZQUIEDO	2	3.28	3.16	1.27	3.02	4.42	1.37
		3	6.97	4.39	5.73	4.76	6.45	5.44
		1	1.54	1.65	1.59	1.68	1.96	1.92
DESPLAZAMIENTO VERTICAL (m e-3)	BOVEDA	2	1.1	1.25	3.36	1.37	3.5	2
		3	0.94	1.1	2.06	1.15	6.18	2.02
		1	1.81	2.43	1.94	7.65	2.56	2.05
	CONTRA BOVEDA	2	3.41	2.91	1.99	1.47	7.12	2.26
		3	4.98	4.09	4.88	1.06	11.8	2.9

Tabla 5-2 Desplazamientos máximos túnel de herradura.

En la juntas paralelas a 15°, los máximos desplazamientos horizontales se dan en el hastial izquierdo, y los máximos desplazamientos verticales en contra bóveda.

En la juntas paralelas a 75°, los máximos desplazamientos horizontales se dan en el hastial derecho, y los máximos desplazamientos verticales en contra bóveda.

De los resultados mostrados en la tabla 5-2 y para los máximos desplazamientos observados en el contorno del túnel, se puede comentar lo siguiente:

Se comprueba para el modelo de juntas paralelas y continuas en túnel de herradura, un aumento de los máximos desplazamientos horizontales en el hastial izquierdo cuando aumenta la presión de confinamiento o coeficiente lateral (k) y el buzamiento de la junta o discontinuidad va en dirección contraria a las agujas del reloj (15° - 75°). Sin embargo, en el hastial derecho se observa que dicho aumento de los máximos desplazamientos va en sentido contrario, es decir, en la dirección de las agujas de reloj

Se constata en zona de bóveda para el modelo de juntas paralelas continuas en túnel de herradura, un incremento de los máximos desplazamientos verticales cuando los buzamientos de la discontinuidad van en el sentido contrario a las agujas del reloj (15° a 75°) y las presiones de confinamiento o coeficiente lateral k disminuye. En cuanto a la zona de contra bóveda, los máximos desplazamientos verticales aumentan cuando los buzamientos de la discontinuidad van en el sentido de las agujas del reloj (75° a 15°) y las presiones de confinamiento o coeficiente lateral k aumenta.

En las juntas conjugadas con junta del lecho a 15° , los máximos desplazamientos horizontales se dan en el hastial derecho, y los máximos desplazamientos verticales en contra bóveda.

En las juntas conjugadas con junta del lecho a 75° , los máximos desplazamientos horizontales se dan en el hastial derecho, y los máximos desplazamientos verticales en contra bóveda.

Se constata para el modelo de juntas conjugadas en túnel de herradura, que disminuyen los máximos desplazamientos horizontales en zonas de hastiales cuando el buzamiento de las discontinuidades va en sentido contrario de las agujas del reloj (15° a 75°). En cuanto a la presión lateral, se observa en ambos hastiales un incremento de los mencionados desplazamientos.

Se comprueba para el modelo de juntas conjugadas en túnel de herradura, que disminuyen los máximos desplazamientos verticales en zona de bóveda y contra bóveda para buzamientos de la discontinuidad que van en sentido contrario a las agujas del reloj (15° a 75°), salvo el caso de condiciones isotrópicas que aumentan estos desplazamientos en ambas zonas. Por lo que respecta a la tensión lateral, los desplazamientos verticales aumentan en zona de bóveda y disminuyen en zona de contra bóveda

En las juntas tipo Voronoi irregular, los máximos desplazamientos horizontales se dan en el hastial izquierdo, y los máximos desplazamientos verticales en contra bóveda.

En las juntas tipo Voronoi hexagonal, los máximos desplazamientos horizontales se dan en el hastial izquierdo, y los máximos desplazamientos verticales en contra bóveda.

Se constata para el modelo de juntas Voronoi en túnel de herradura, que disminuyen los máximos desplazamientos horizontales en zonas de hastiales cuando la orientación de las celdas o polígonos pasan de una distribución irregular a otra regular o hexagonal. En cuanto a la presión lateral, se observa en ambos hastiales un incremento de los mencionados desplazamientos. Los máximos desplazamientos se aprecian en configuraciones o mosaicos irregulares y zona de hastial izquierdo.

Se comprueba para el modelo de juntas Voronoi en túnel de herradura, que los máximos desplazamientos verticales en zona de bóveda y contra bóveda disminuyen desde celdas o mosaicos con forma irregular a mosaicos con forma regular o hexagonal. En referencia a la tensión lateral, para la zona de bóveda y contra bóveda y celdas irregulares y regulares, se observa un incremento de los desplazamientos verticales, siendo mayores en la zona de contra bóveda y celda irregular.

Se muestra en la ilustración 5-5 y para túnel de herradura, los máximos desplazamientos horizontales observados en función del coeficiente lateral y para la zona de hastiales del túnel (izquierdo y derecho).

En cuanto a las discontinuidades paralelas en túnel de herradura con buzamientos menores (15°) y coeficiente lateral $k < 1,5$, se aprecia que los mayores desplazamientos horizontales aparecen en el hastial derecho del túnel. En cuanto a mayores valores de $k > 1,5$, estos desplazamientos se desplazan al hastial izquierdo del túnel

Por lo que respecta a las discontinuidades conjugadas en túnel de herradura con buzamientos menores (15°) y coeficiente lateral k cercanos a 1, se observa que los mayores desplazamientos horizontales aparecen en el hastial izquierdo del túnel. Para $k > 1,2$, estos máximos desplazamientos se pueden ver en el hastial derecho

En referencia a las discontinuidades tipo Voronoi en túnel de herradura con distribución de celdas irregulares e incremento del coeficiente lateral k , puede verse que los mayores desplazamientos horizontales se concentran en el hastial izquierdo del túnel.

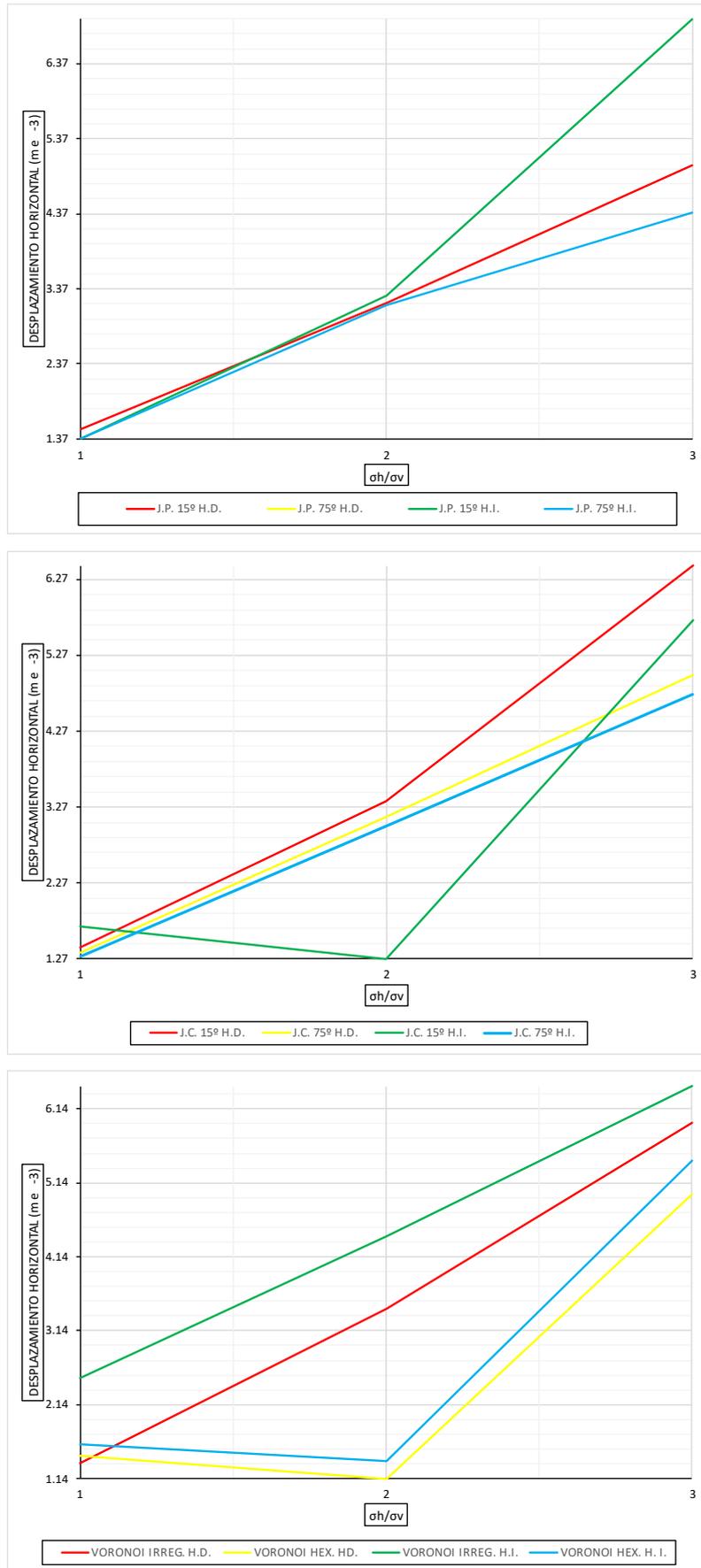


Ilustración 5-6 Desplazamiento horizontal máximo (hastiales) – Túnel de herradura.

Se muestra en la ilustración 5-6 y para túnel de herradura, los máximos desplazamientos verticales observados en función del coeficiente lateral k para zonas de bóveda y de contra bóveda

En lo que respecta a las discontinuidades paralelas con buzamientos mayores (75°) y coeficientes laterales $k > 1,5$, se puede ver que los mayores desplazamientos verticales se sitúan en zona de contra bóveda. Para mayores valores del coeficiente k , los máximos desplazamientos se generan en la misma zona, pero para buzamientos menores (15°).

Por lo que se refiere a las discontinuidades conjugadas con buzamientos mayores (75°) y coeficientes laterales $k > 1,5$, se puede ver que los mayores desplazamientos verticales se sitúan en zona de contra bóveda. Para mayores valores del coeficiente k , los máximos desplazamientos se generan en la misma zona, pero para buzamientos menores (15°).

En cuanto a las discontinuidades del tipo Voronoi y celda o mosaico irregular e incremento del coeficiente lateral k , se aprecia que los mayores desplazamientos aumentan y se sitúan en zona de contra bóveda.

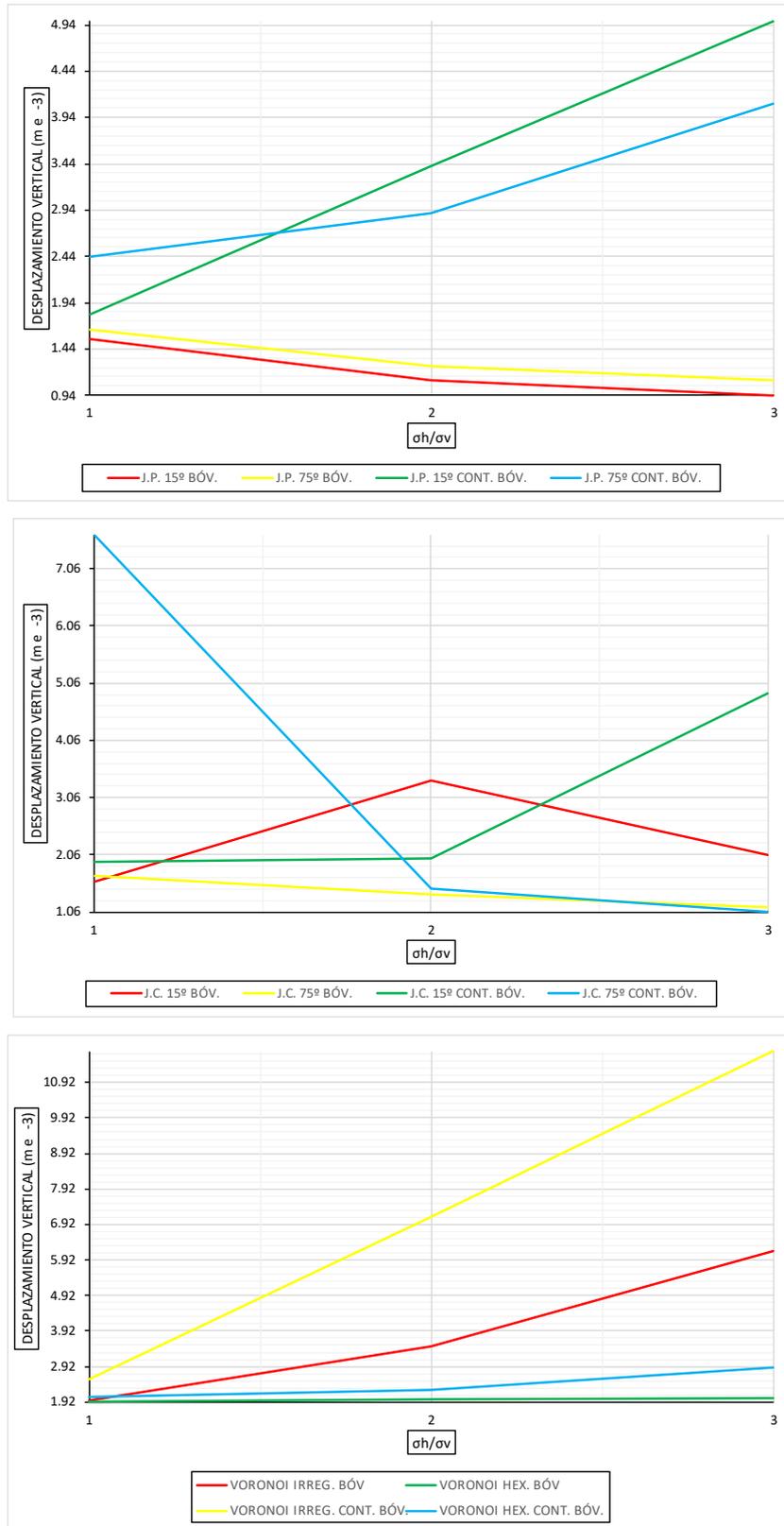


Ilustración 5-7 Desplazamiento vertical (Bóveda / Contra bóveda) – Túnel de herradura.

Visualizados los valores máximos de los desplazamientos horizontales y verticales, se condensa la información en los siguientes ábacos (ver Ilustraciones 5-7 y 5-8) donde se representan los máximos desplazamientos en función del coeficiente lateral y el modelo de junta o discontinuidad utilizada (paralela, conjugada y Voronoi).

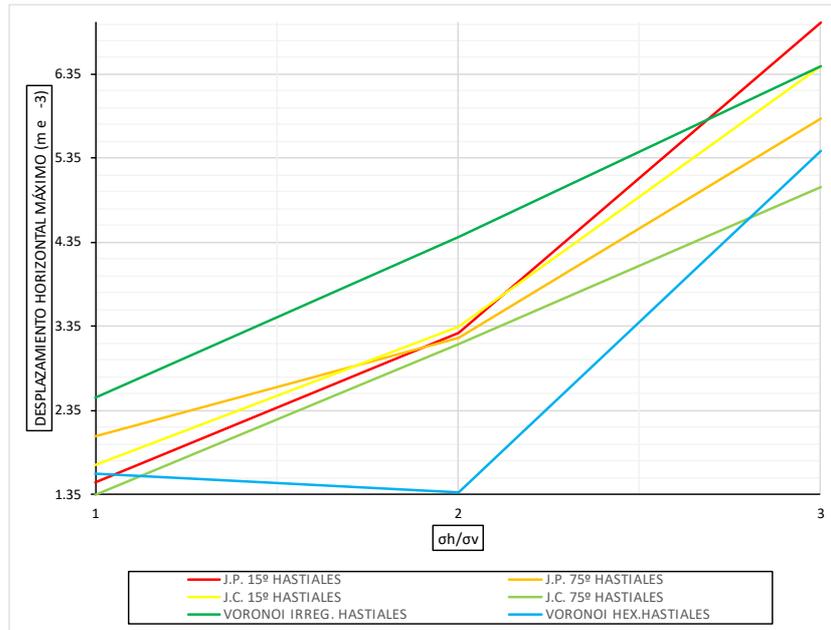


Ilustración 5-8 Despl. horizontal máximo (hastiales) – Túnel de herradura – Todas las familias de disc.

En túnel de herradura y zona de hastiales, se aprecia en la ilustración 5-7, cuando la presión de confinamiento aumenta hasta $k=2,8$, que los mayores desplazamientos horizontales son debidos a configuraciones de celdas irregulares propuestas por el modelo de juntas Voronoi. Para $k>2,8$ los mayores desplazamientos son debidos a discontinuidades paralelas con buzamientos menores (15°). Lo menores desplazamientos horizontales corresponden a familias tipo Voronoi y celdas o mosaicos regulares o hexagonales.

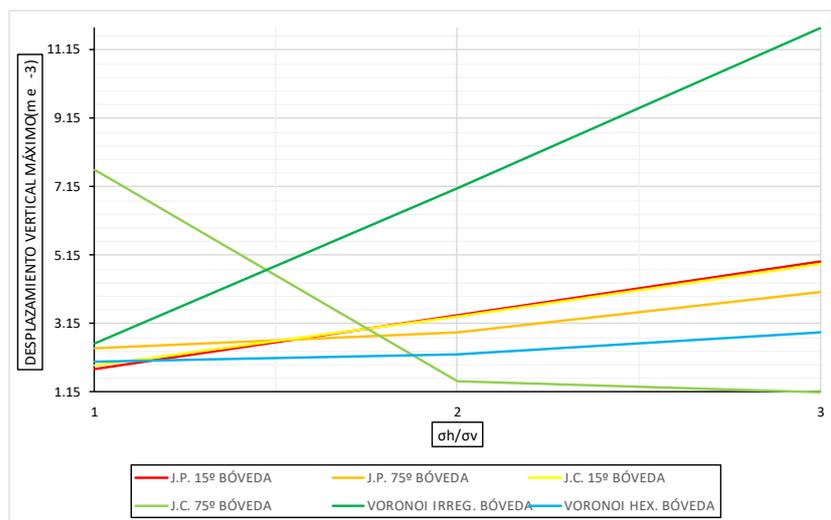


Ilustración 5-9 Despl. vertical (Bóveda / Contra bóveda) – Túnel de herradura – Todas las familias de disc.

En la ilustración 5-8, zona de bóveda y para túnel de herradura, se puede ver para $k<1,5$ que los mayores desplazamientos verticales son debidos a familias de discontinuidades conjugadas con buzamientos mayores (75°), seguidos y para $k>1,5$ por discontinuidades compuestas por celdas irregulares tipo mosaico (Voronoi). Los menores desplazamientos corresponden para $k<1,8$ a familias de celdas hexagonales y para $k>1,8$ a familias de juntas conjugadas y buzamientos mayores (75°)

5.1.3 Túnel tipo alcantarillado

		k	PARALELAS		CONJUGADAS		VORONOI	
			15°	75°	15°	75°	IRREGULAR	HEXAGONAL
DESPLAZAMIENTO HORIZONTAL (m e-3)	HASTIAL DERECHO	1	2.51	3.1	2.58	7.95	5.4	3.53
		2	5.07	6.18	5.09	7.47	7.18	5.56
		3	8.16	9.08	7.95	9.8	10.1	8.41
	HASTIAL IZQUIEDO	1	2.48	3.98	3.28	8.17	6.88	5.73
		2	5.24	5.84	5.22	5.13	7.56	8.23
		3	8.21	8.83	8.17	7.99	9.45	10.3
DESPLAZAMIENTO VERTICAL (m e-3)	BOVEDA	1	3.04	2.8	1.38	3.31	1.43	4.92
		2	5.52	2.89	1.02	2.04	1.31	9.99
		3	8.28	6.47	1.22	3.1	1.83	8.96
	CONTRA BOVEDA	1	1.87	2	1.84	2.39	2.53	4.35
		2	1.79	2	1.75	5.06	3.46	11.3
		3	1.81	4.8	1.71	10.7	5.61	18.6

Tabla 5-3 Desplazamientos máximos túnel tipo alcantarillado.

De los resultados mostrados en la tabla 5-3 y para los máximos desplazamientos observados en el contorno del túnel, se puede comentar lo siguiente:

Se comprueba para el modelo de juntas paralelas y continuas en túnel de alcantarillado, un aumento de los máximos desplazamientos horizontales en los hastiales cuando aumenta la presión de confinamiento o coeficiente lateral (k) y el buzamiento de la junta o discontinuidad va en dirección contraria a las agujas del reloj (15°-75°).

Se constata en zona de bóveda para el modelo de juntas paralelas continuas en túnel de alcantarillado, que los máximos desplazamientos verticales disminuyen cuando los buzamientos de la discontinuidad van en el sentido contrario a las agujas del reloj (15° a 75°) y aumentan cuando se incrementan las presiones de confinamiento o coeficiente lateral k. En cuanto a la zona de contra bóveda, los máximos desplazamientos verticales aumentan cuando los buzamientos de la discontinuidad van en el sentido contrario a las agujas del reloj (15° a 75°). Sin embargo, cuando se incrementan los coeficientes laterales k, por una parte, disminuyen para buzamientos menores (15°) y por otra, aumentan para buzamientos mayores (75°).

Se constata para el modelo de juntas conjugadas en túnel de alcantarillado, un aumento de los máximos desplazamientos horizontales en zonas de hastiales cuando el buzamiento de las discontinuidades va en sentido contrario de las agujas del reloj (15° a 75°). En cuanto a la presión lateral, se observa en general en ambos hastiales un incremento de los mencionados desplazamientos. Los mayores desplazamientos horizontales se aprecian en el hastial derecho y para buzamientos mayores (75°).

Se comprueba para el modelo de juntas conjugadas en túnel de alcantarillado, que los máximos desplazamientos verticales en zona de bóveda y contra bóveda aumentan para buzamientos de la discontinuidad que van en sentido contrario a las agujas del reloj (15° a 75°), salvo el caso de condiciones isotropas que disminuyen estos desplazamientos en ambas zonas. Por lo que respecta a la tensión lateral, en general los desplazamientos verticales aumentan en zona de bóveda y de contra bóveda.

Se constata para el modelo de juntas Voronoi en túnel de alcantarillado, que disminuyen los máximos desplazamientos horizontales en hastial derecho cuando la orientación de las celdas o polígonos pasan de una distribución irregular a otra regular o hexagonal. Sin embargo, en hastial izquierdo se puede ver un incremento de estos desplazamientos. En referencia a la presión lateral, se observa en ambos hastiales un incremento de los mencionados desplazamientos. Los máximos desplazamientos se aprecian en configuraciones o mosaicos regulares y zona de hastial izquierdo.

Se comprueba para el modelo de juntas Voronoi en túnel de alcantarillado, que los máximos desplazamientos verticales en zona de bóveda y contra bóveda aumenta fuertemente desde celdas o mosaicos con forma irregular

a mosaicos con forma regular o hexagonal. En referencia a la tensión lateral, para la zona de bóveda y contra bóveda y celdas irregulares y regulares, se observa en general un incremento de los desplazamientos verticales, siendo mayores en la zona de contra bóveda y celda regular o hexagonal

Se puede ver en la ilustración 5-9 y para túnel de alcantarillado, los máximos desplazamientos horizontales observados en función del coeficiente lateral y para zona de hastiales del túnel (izquierdo y derecho).

En cuanto a las discontinuidades paralelas con buzamientos mayores (75°) e incremento de la presión lateral, se aprecia que los mayores desplazamientos horizontales aparecen en el hastial izquierdo del túnel. Los menores se observan en el hastial derecho y para buzamientos menores (15°)

Por lo que se refiere a las discontinuidades conjugadas con buzamientos mayores (75°) e incremento del coeficiente lateral k , puede verse que los mayores desplazamientos horizontales aparecen en el hastial derecho del túnel. Los menores se encuentran en el mismo hastial, pero para buzamientos menores (15°)

En referencia a las discontinuidades tipo Voronoi con distribución de celdas irregulares y $k < 1,5$, se aprecia que los mayores desplazamientos horizontales se concentran en el hastial izquierdo del túnel. Para $k > 1,5$, los mencionados desplazamientos se sitúan en la misma zona, pero con celdas de distribución regular o hexagonal.

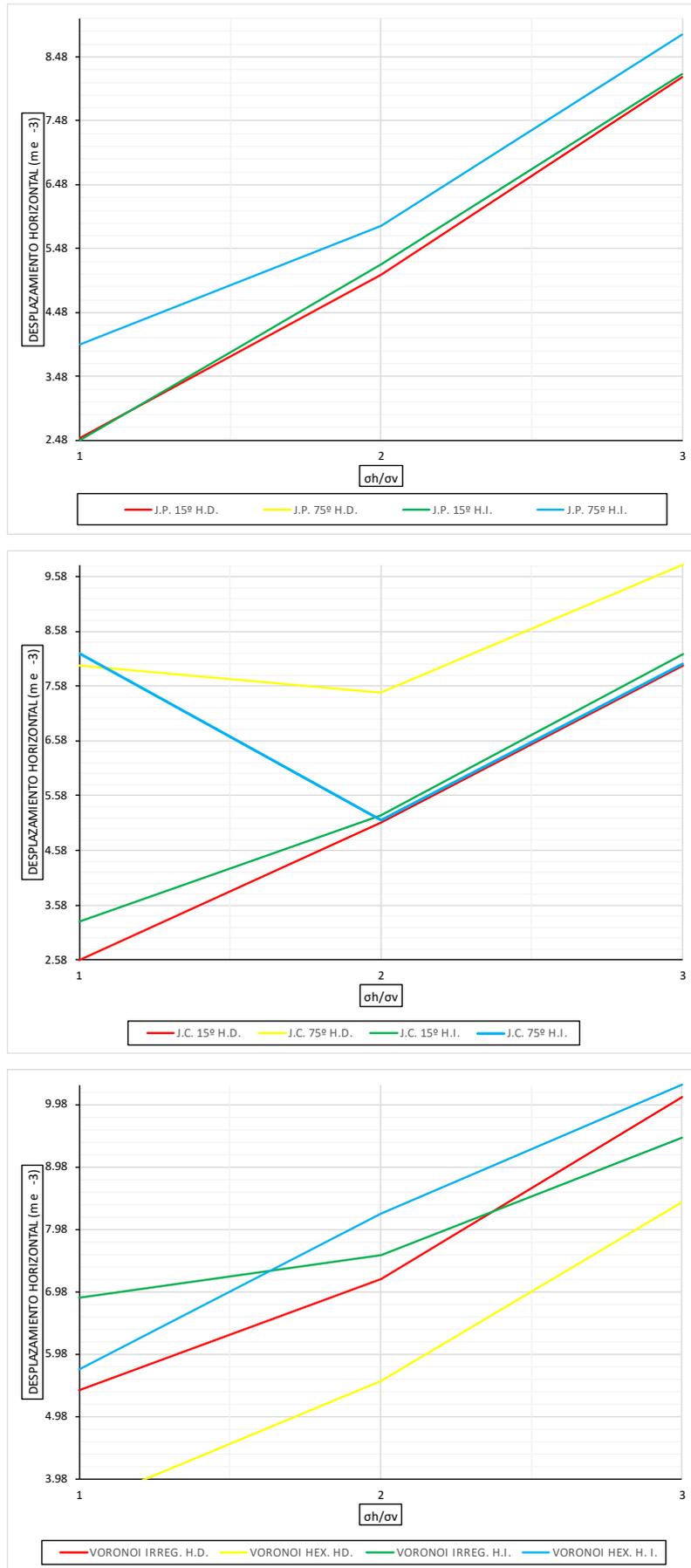


Ilustración 5-10 Desplazamiento horizontal máximo (hastiales) – Túnel tipo alcantarillado.

Se muestra en la ilustración 5-10 y para túnel de alcantarillado, los máximos desplazamientos verticales observados en función del coeficiente lateral k para zonas de bóveda y de contra bóveda

En lo que se refiere a las discontinuidades paralelas con buzamientos menores (15°) e incremento de la presión lateral, se puede ver que los mayores desplazamientos verticales se sitúan en zona de bóveda. Los menores desplazamientos para el mismo buzamiento se concentran en zona de contra bóveda.

En cuanto a las discontinuidades conjugadas con buzamientos mayores (75°) e incremento de la presión lateral, se aprecia que los mayores desplazamientos verticales se sitúan en zona de contra bóveda. Los menores desplazamiento se generan en zona de bóveda y buzamientos menores (15°)

En referencia a las discontinuidades del tipo Voronoi y celda o mosaico regular e incremento del coeficiente lateral k , se aprecia que los mayores desplazamientos aumentan y se sitúan en zona de contra bóveda

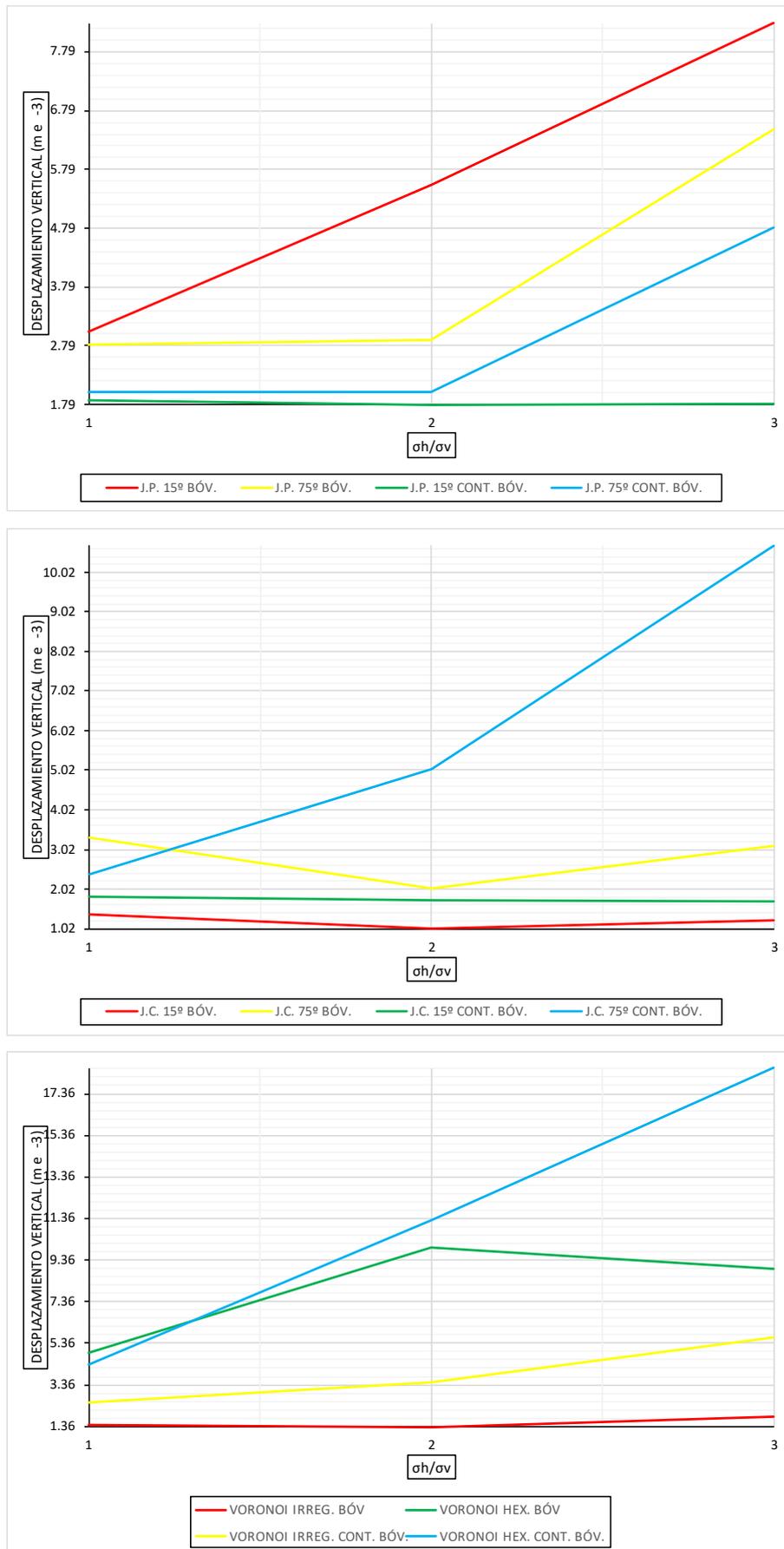


Ilustración 5-11 Desplazamiento vertical (Bóveda / Contra bóveda) – Túnel tipo alcantarillado.

Visualizados los valores máximos de los desplazamientos horizontales y verticales, se condensa la información en los siguientes ábacos (ver Ilustraciones 5-11 y 5-12) donde se representan los máximos desplazamientos en función del coeficiente lateral y el modelo de junta o discontinuidad utilizada (paralela, conjugada y Voronoi).

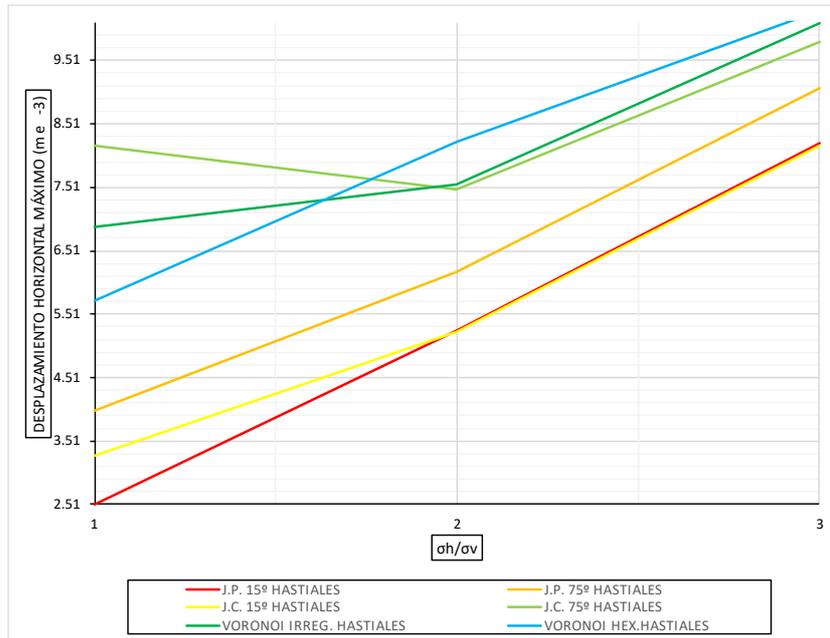


Ilustración 5-12 Despl. horizontal máximo (hastiales) – Túnel tipo alcantarillado – Todas las familias de disc.

En túnel de alcantarillado y zona de hastiales, se aprecia en la ilustración 5-11, cuando la presión de confinamiento aumenta hasta $k=1,8$, que los mayores desplazamientos horizontales son debidos a discontinuidades conjugadas con buzamientos mayores (75°). Para $k>1,8$ los mayores desplazamientos son debidos al tipo de junta Voronoi con celdas regulares o hexagonales. Lo menores desplazamientos horizontales corresponden a familias de juntas paralelas y buzamientos menores (15°).

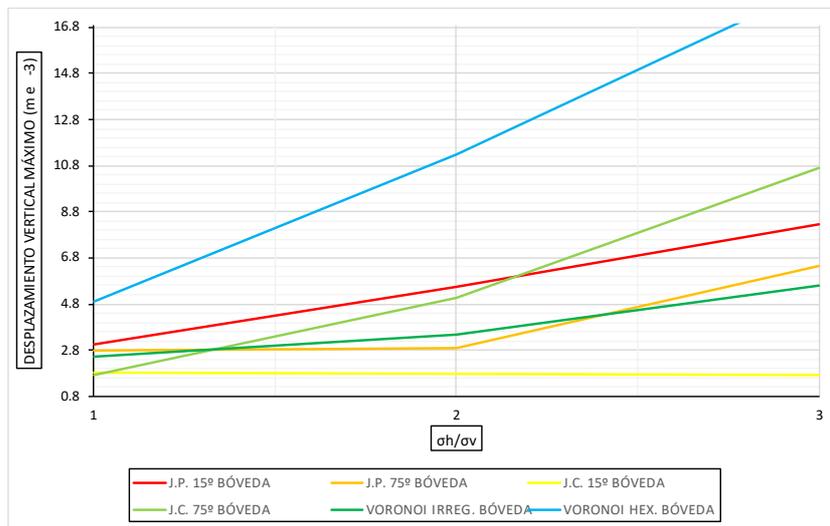


Ilustración 5-13 Despl. vertical (Bóveda / Contra bóveda) – Túnel tipo alcantarillado – Todas las familias de disc.

En la ilustración 5-12, zona de bóveda y para túnel de alcantarillado, se puede ver cuando se incrementa las presiones laterales o coeficiente k que los mayores desplazamientos verticales son debidos a familias de juntas tipo Voronoi con celdas o mosaicos regulares o hexagonales. Los menores desplazamientos corresponden a familias de juntas conjugadas con buzamientos menores (15°).

5.1.4 Ábacos de desplazamientos verticales y horizontales en función de la geometría del túnel

En este apartado se comenta sobre la información analizada, pero en este caso en función de la geometría del túnel. En total se generan 6 ábacos, 3 de ellos relativos a desplazamientos horizontales en zona de hastiales, y otros 3 relativos a los desplazamientos verticales en zona de bóveda y contra bóveda.

5.1.4.1 Desplazamientos horizontales máximos

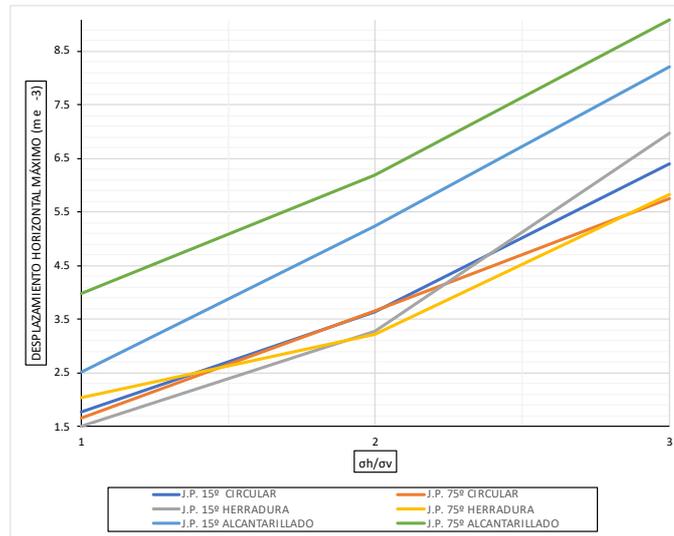


Ilustración 5-14 Despl. Horizontal máximo (hastiales) – Juntas Paralelas.

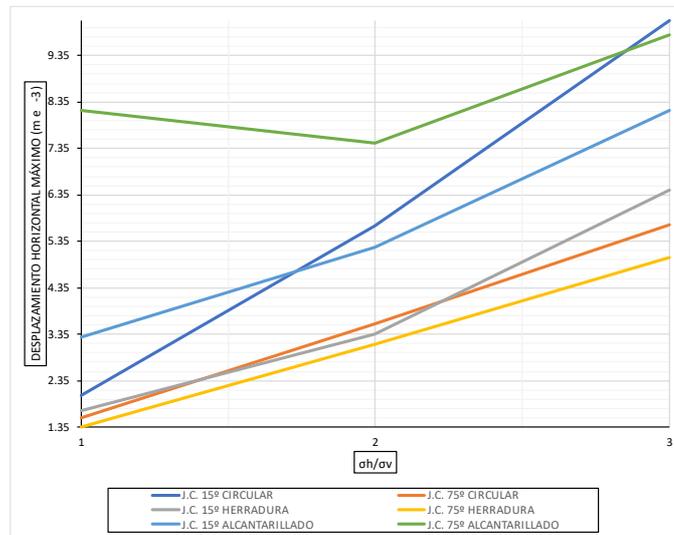


Ilustración 5-15 Despl. horizontal máximo (hastiales) – Juntas Conjugadas.

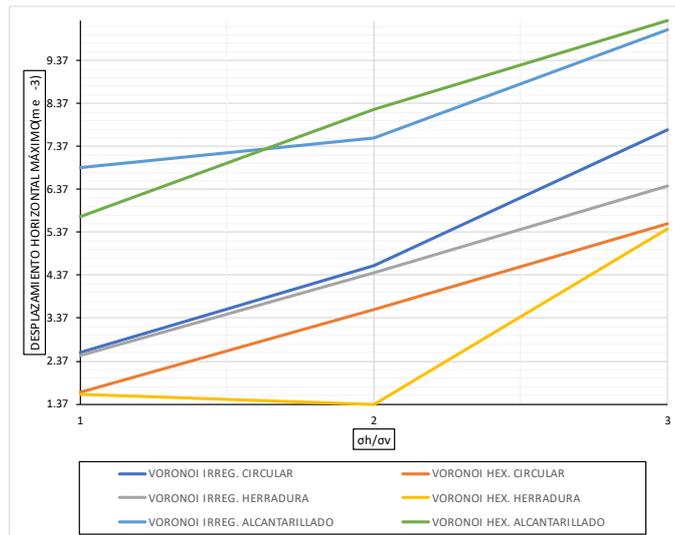


Ilustración 5-16 Despl. horizontal máximo (hastiales)– Juntas Voronoi.

Se aprecia en la ilustración 5-14 y para discontinuidades de tipo paralelo, buzamientos mayores (75°), zona de hastiales e incremento de las presiones de confinamiento, se constata que los máximos desplazamientos horizontales se producen en tipologías de túneles de alcantarillado. Los menores valores de desplazamiento para $k < 2$ y buzamiento menor (15°) se puede ver en túnel de alcantarillado, mientras que para $k > 2$ y buzamientos mayores se aprecian en túnel de herradura.

Por lo que respecta a la ilustración 5-15 y para discontinuidades conjugadas, buzamientos mayores (75°), zona de hastiales e incremento de las presiones de confinamiento, se aprecia que los máximos desplazamientos horizontales se producen en tipologías de túneles de alcantarillado. En este caso los menores desplazamientos se pueden ver en túnel de herradura para buzamientos mayores (75°).

En cuanto a la ilustración 5-16 y para el modelo de juntas Voronoi, celdas o mosaicos irregulares, zona de hastiales y coeficientes laterales $< 1,7$, puede verse que los máximos desplazamientos horizontales se producen en tipologías de túneles de alcantarillado. Para $k > 1,7$, se los máximos se observan en el mismo tipo de túnel, pero para celdas o mosaicos hexagonales. Por lo que se refiere a los menores desplazamientos, estos se aprecian en túneles de herradura con discontinuidades del tipo celda o mosaico hexagonal.

Se concluye, por tanto, que los máximos desplazamiento en zonas de hastiales para las distintas familias de discontinuidades estudiadas (paralelas, conjugadas y Voronoi), se producen en túneles de tipo alcantarillado. Una de las causas podría ser que en esta zona (hastial) y más detalladamente en el vértice entre la solera o bóveda y el hastial se producen las mayores concentraciones de las tensiones. En referencia a los menores desplazamientos horizontales, puede verse en tipos de túnel de herradura. Otro posible factor sería, la orientación que presentan las familias de discontinuidades, en especial, las que tienen buzamientos mayores (75°) y direcciones paralelas al rumbo o eje del túnel. Esta dirección es desfavorable en la construcción de túneles que presentan en zona de hastiales buzamientos prácticamente verticales (90°). También es importante tener en cuenta la interacción entre las diferentes familias de discontinuidades y cómo estas afectan a la estabilidad del macizo rocoso y a los desplazamientos en el contorno del túnel.

5.1.4.2 Desplazamientos verticales máximos

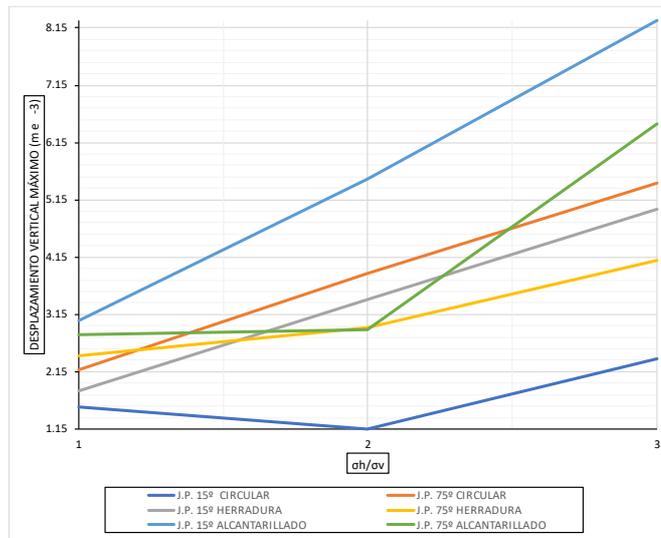


Ilustración 5-17 Despl. vertical máximo (Bóveda / Contra bóveda) – Juntas Paralelas.

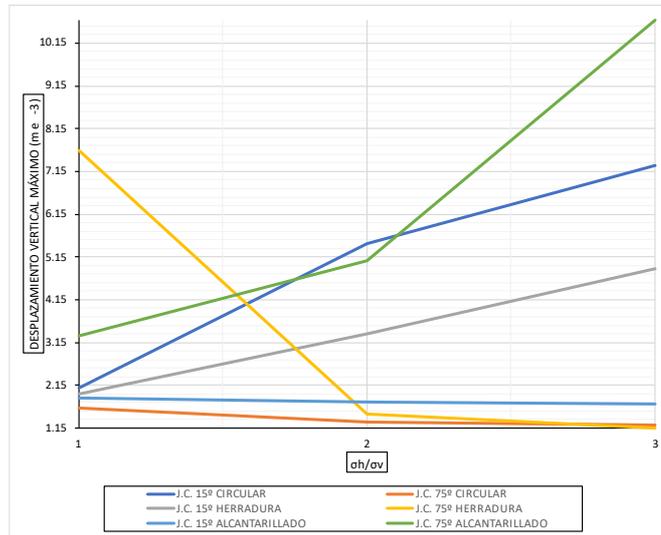


Ilustración 5-18 Despl. vertical máximo (Bóveda / Contra bóveda) – Juntas Conjugadas.

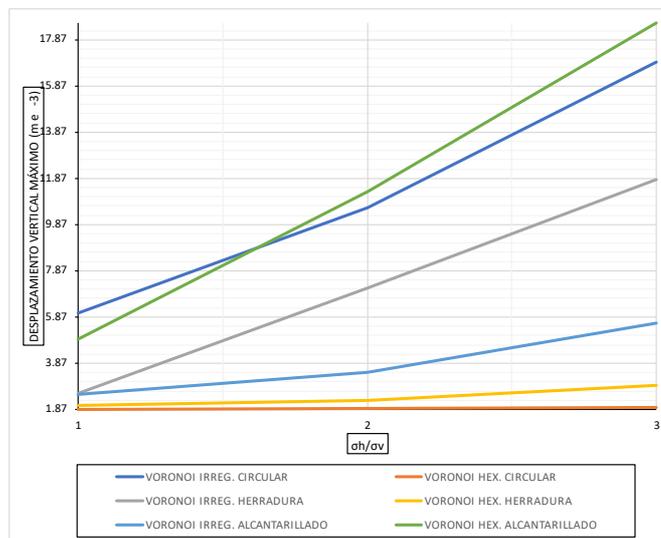


Ilustración 5-19 Despl. vertical máximo (Bóveda / Contra bóveda) – Juntas Voronoi.

En cuanto a la ilustración 5-17 y para discontinuidades de tipo paralelo, buzamientos menores (15°), zona de bóveda y contra bóveda el incremento de las presiones de confinamiento se constata que los máximos desplazamientos verticales se producen en tipologías de túneles de alcantarillado. Los menores desplazamiento se pueden ver en túneles del tipo circular y para buzamientos menores (15°)

En referencia a la ilustración 5-18 y para discontinuidades conjugadas, buzamientos mayores (75°), zona de bóveda y contra bóveda y $k < 1,6$, se aprecia que los máximos desplazamientos verticales se producen en tipologías de túneles de herradura. Para k entre 1,6 y 2, los máximos desplazamientos se pueden ver en túneles tipo circular. En cuanto a valores de $k > 2$, el tipo de túneles en los que se aprecia mayor desplazamiento es de alcantarillado con buzamientos mayores (75°).

En cuanto a la ilustración 5-19 y para el modelo de juntas Voronoi, celdas o mosaicos irregulares, zona de zona de bóveda y contra bóveda y coeficientes laterales $k < 1,6$, puede verse que los máximos desplazamientos verticales se producen en tipologías de túneles de circulares. Para $k > 1,6$, los máximos se observan en tipo de túnel de alcantarillado, pero para celdas o mosaicos hexagonales.

Se concluye, por tanto, que los máximos desplazamiento en zonas de bóveda y contra bóveda para las distintas familias de discontinuidades estudiadas (paralelas, conjugadas y Voronoi) y coeficientes $k > 1,6$, se producen en túneles de tipo alcantarillado, aunque no queda claro si a buzamientos menores (15°) o mayores (75°). La causa podría ser que en esta zona y más detalladamente en el vértice entre la bóveda o solera y el hastial se producen las mayores concentraciones de las tensiones. La orientación de las discontinuidades en este caso no tiene un claro efecto, ya que la distribución estas se ha modelado siguiendo parámetros estadísticos que marcan la intersección de las discontinuidades con el contorno del túnel.

5.2 Deformadas del túnel

Otros gráficos que pueden resultar interesantes para este estudio, es la representación de la deformada del túnel ante los desplazamientos totales que ocurren en las inmediaciones de este. De igual forma, a la izquierda se representan los correspondientes a buzamientos de 15° y Voronoi tipo irregular, y a la derecha, los de buzamientos de 75° y Voronoi regular hexagonal.

También se realizan los diferentes análisis variando el estado tensional.

5.2.1 Túnel circular

5.2.1.1 Juntas Paralelas

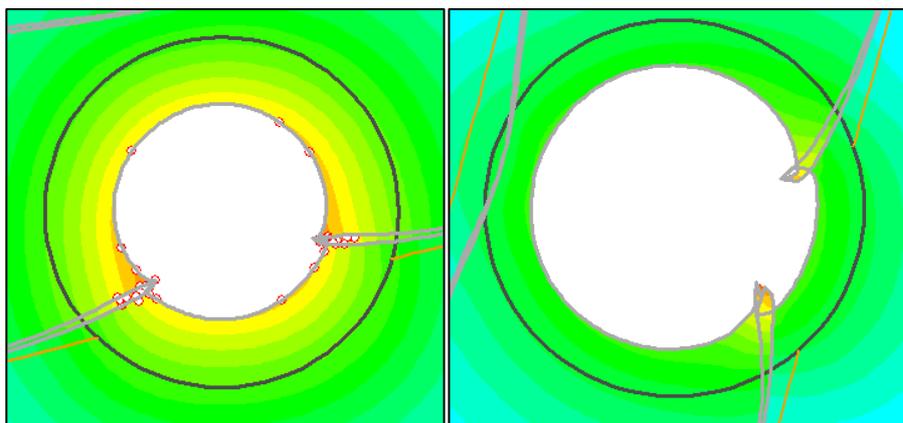
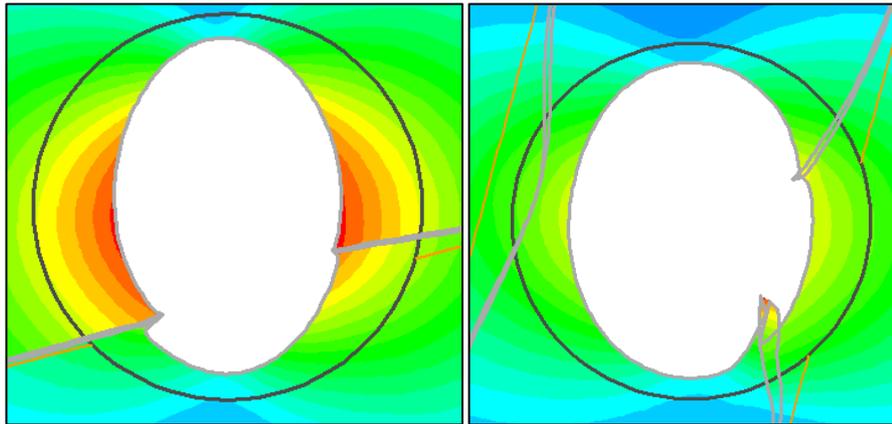
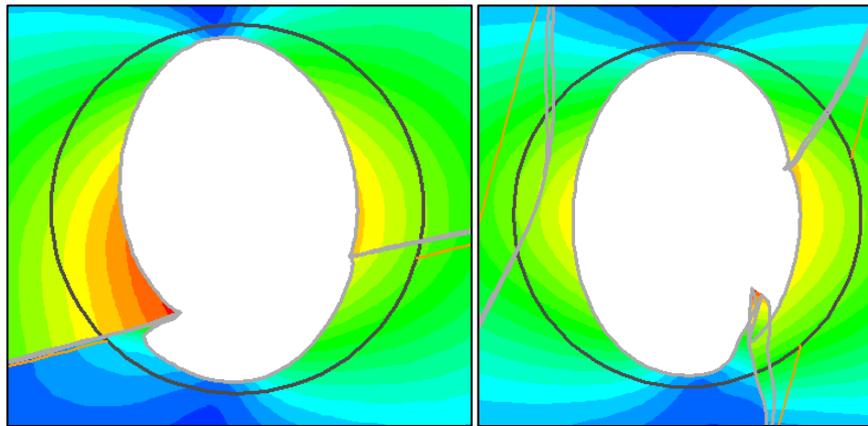
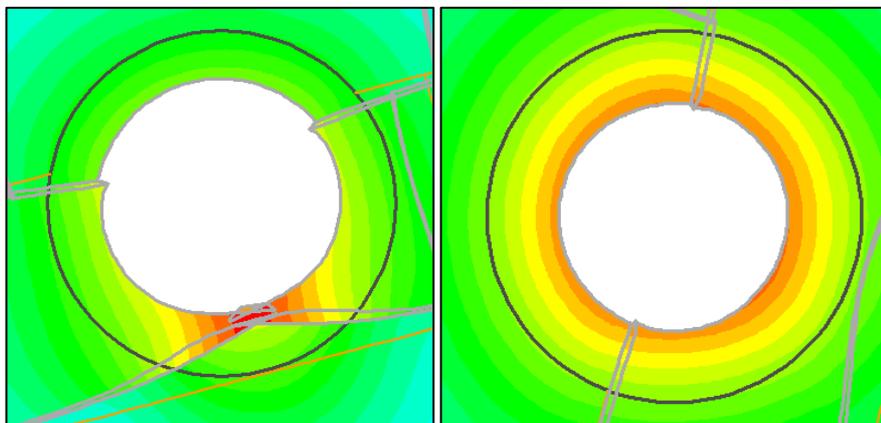


Ilustración 5-20 Deformada Juntas Paralelas ($k = 1$) – Túnel circular

Ilustración 5-21 Deformada Juntas Paralelas ($k=2$) – Túnel circularIlustración 5-22 Deformada Juntas Paralelas ($k=3$) – Túnel circular

Se aprecia en las ilustraciones 5-20, 5-21 y 5-22, como a medida que incrementamos la presión lateral o presión de confinamiento por medio del coeficiente lateral k , el contorno del túnel circular con discontinuidades paralelas tiene forma ovalada. La principal diferencia entre las figuras de la izquierda y de la derecha es que las familias de discontinuidades con buzamientos de 15° concentran las mayores deformaciones totales en el tercio inferior, mientras que las familias con buzamientos de 75° , dicha concentración de deformaciones se aprecia en zona del hastial derecho del túnel circular. El efecto del aumento del parámetro k se aprecia haciendo que se vayan deformando cada vez más las zonas de hastiales, y menos las zonas de bóveda y contra bóveda.

5.2.1.2 Juntas Conjugadas

Ilustración 5-23 Deformada Juntas Conjugadas ($k=1$) – Túnel circular

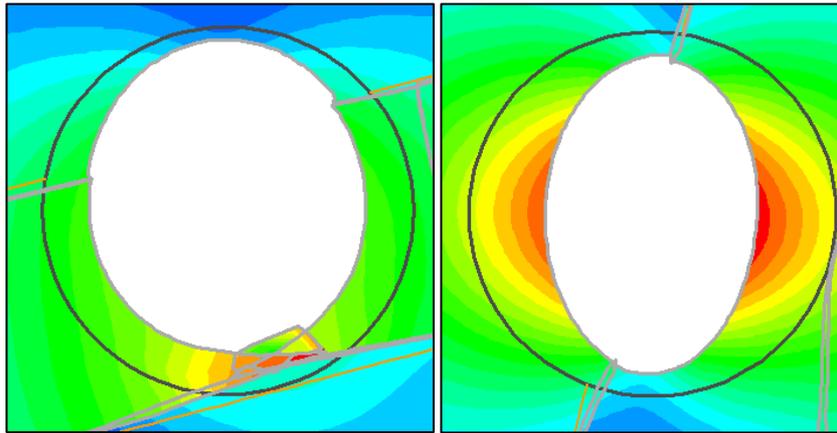


Ilustración 5-24 Deformada Juntas Conjugadas ($k=2$) – Túnel circular

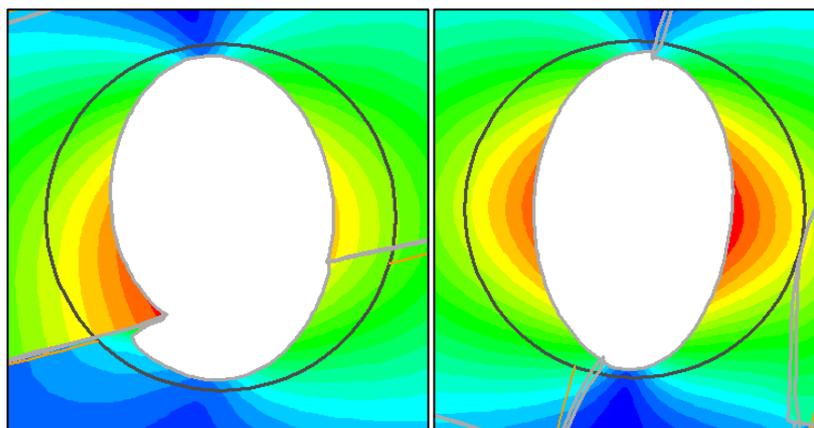


Ilustración 5-25 Deformada Juntas Conjugadas ($k=3$) – Túnel circular

Se aprecia en las ilustraciones 5-23, 5-24 y 5-25, como a medida que incrementamos la presión lateral o presión de confinamiento por medio del coeficiente lateral k , el contorno del túnel circular con discontinuidades conjugadas tiene forma menos ovalada que la de las juntas paralelas. La principal diferencia entre las figuras de la izquierda y de la derecha es que las familias de discontinuidades con buzamientos de 15° concentran las mayores deformaciones en la contra bóveda y tercio inferior, mientras que las familias con buzamientos de 75° , dicha concentración de deformaciones se aprecia fundamentalmente en zona de hastiales del túnel circular. El efecto del aumento del parámetro k se aprecia haciendo que se vayan deformando cada vez más las zonas de hastiales, y menos las zonas de bóveda y contra bóveda.

5.2.1.3 Voronoi

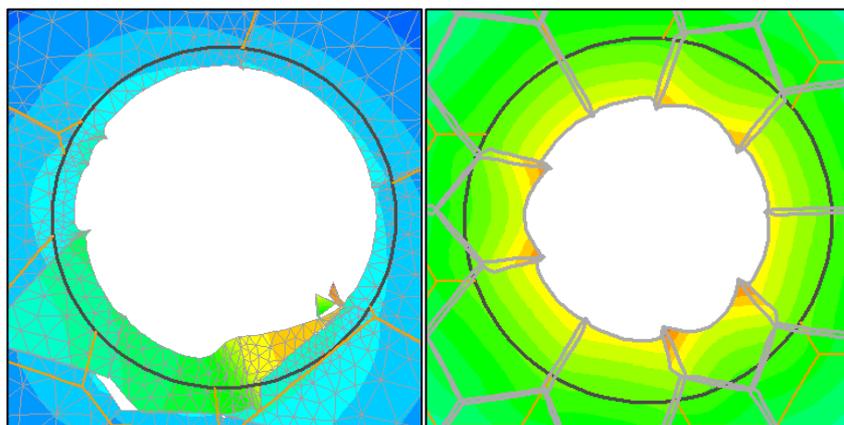
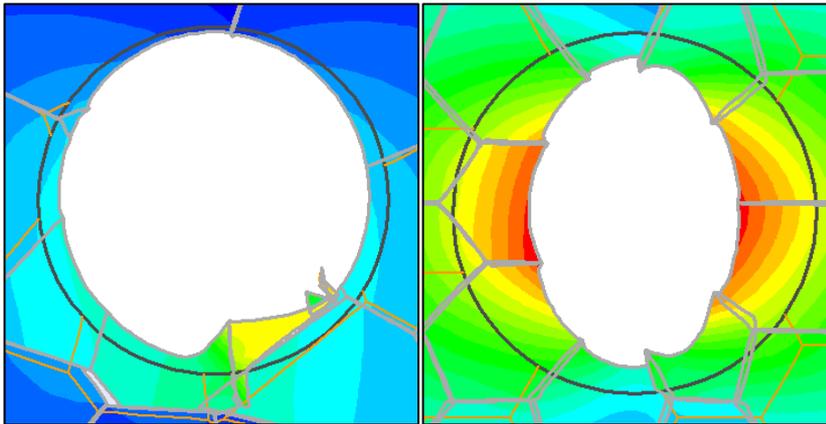
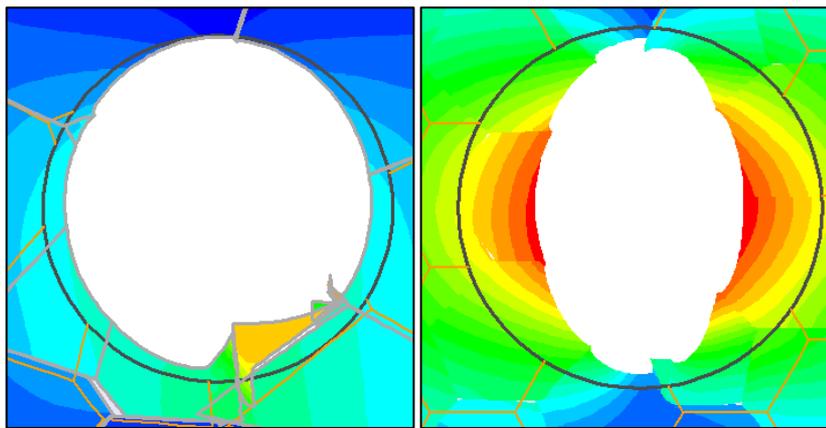


Ilustración 5-26 Deformada Voronoi ($k=1$) – Túnel circular

Ilustración 5-27 Deformada Voronoi ($k=2$) – Túnel circularIlustración 5-28 Deformada Voronoi ($k=3$) – Túnel circular

Se observa en las ilustraciones 5-26, 5-27 y 5-28, como a medida que incrementamos la presión lateral o presión de confinamiento por medio del coeficiente lateral k , el contorno del túnel circular con discontinuidades tipo Voronoi presenta una sección menos ovalada de las deformaciones totales para las familias de discontinuidades con buzamientos de 15° y Voronoi tipo irregular, y muy ovalada para las familias con buzamientos de 75° y Voronoi regular hexagonal. La concentración de las deformaciones totales de las figuras de la izquierda se aprecia fundamentalmente en zona de contra bóveda, y las de la figura de la derecha puede verse en zona de hastiales del túnel circular. El efecto del aumento del parámetro k es notable en la morfología hexagonal, que va aumentando la deformación en los hastiales y reduciéndose en bóveda y contra bóveda a medida que aumenta esta relación. Por el contrario, este efecto apenas se aprecia en la morfología irregular.

5.2.2 Túnel de herradura

5.2.2.1 Juntas Paralelas

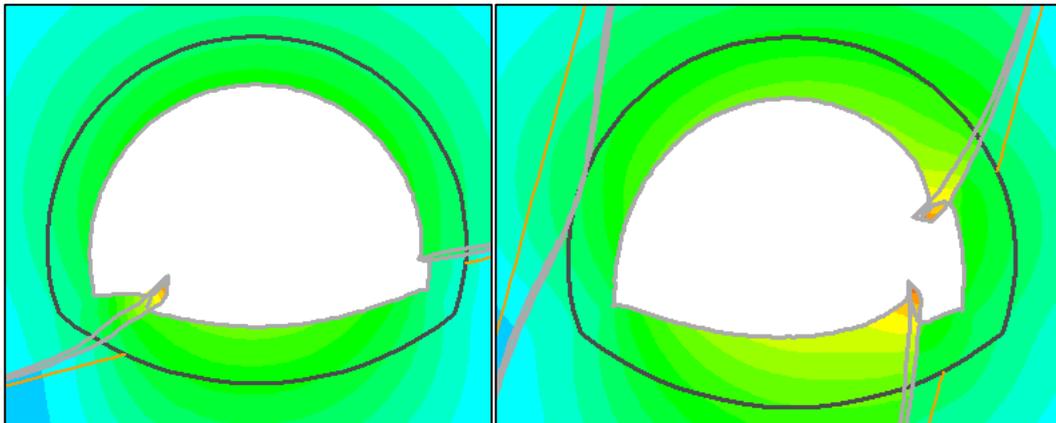


Ilustración 5-29 Deformada Juntas Paralelas ($k=1$) – Túnel de herradura

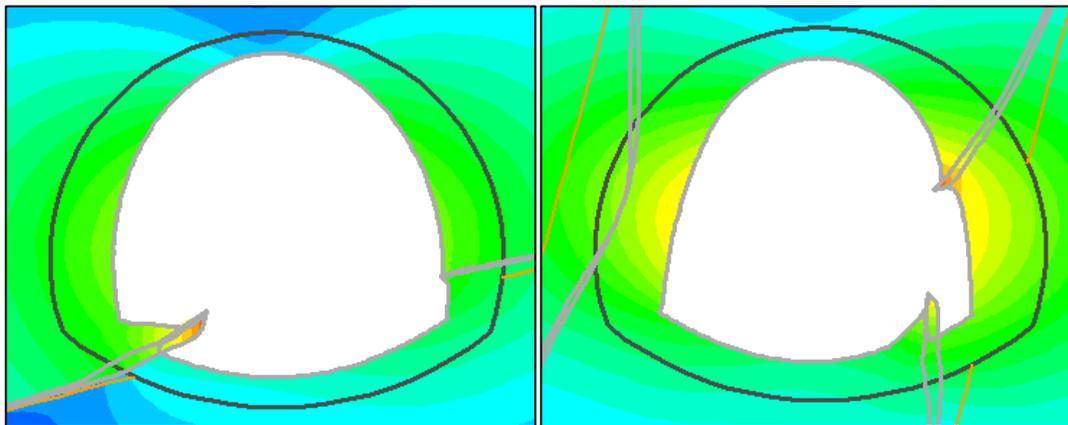


Ilustración 5-30 Deformada Juntas Paralelas ($k=2$) – Túnel de herradura

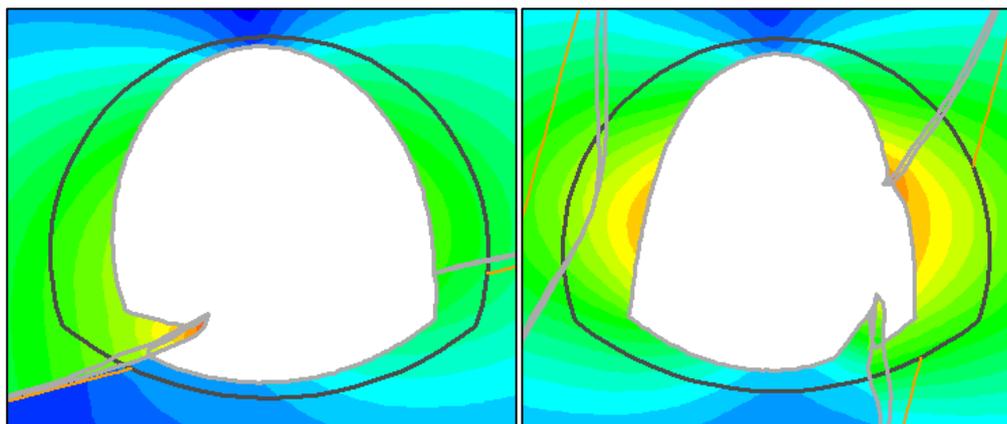


Ilustración 5-31 Deformada Juntas Paralelas ($k=3$) – Túnel de herradura

En las ilustraciones 5-29, 5-30 y 5-31, el efecto del aumento del parámetro k se aprecia haciendo que se vayan deformando cada vez más las zonas de hastiales, y menos las zonas de bóveda y contra bóveda.

También se aprecia como ocurría en los túneles circulares, la diferencia entre las juntas con buzamientos a 15° y las juntas con buzamientos a 75° radica en una ligera deformación mayor en los casos de mayor inclinación. A menores buzamientos de las discontinuidades paralelas también es posible apreciar que las mayores deformaciones se dan en el hastial izquierdo, mientras que, a mayores buzamientos, los mayores deformaciones se concentran en la zona del hastial derecho

Puede verse en la ilustración 5-29, 5-30 y 5-31, como a medida que se incrementa la presión de confinamiento por medio del coeficiente lateral k , el contorno del túnel de herradura con discontinuidades paralelas presenta una concentración de los desplazamientos totales en zona de contra bóveda y vértice hastial - contra bóveda. La principal diferencia entre las figuras de la izquierda y de la derecha en este caso es que las familias de discontinuidades con buzamientos menores (15°), concentran los mayores desplazamientos totales en el vértice izquierdo hastial – contra bóveda, mientras que las familias con buzamientos mayores (75°), dicha concentración de desplazamiento se aprecia en zona del hastial derecho y vértice de esta zona y la contra bóveda. El efecto del incremento del parámetro k se aprecia en la concentración de los desplazamientos y tensiones en los vértices tanto izquierdo como derecho del túnel, recomendándose por tanto considerar en estas zonas “elementos” que garanticen la disipación de estas tensiones o desplazamientos.

5.2.2.2 Juntas Conjugadas

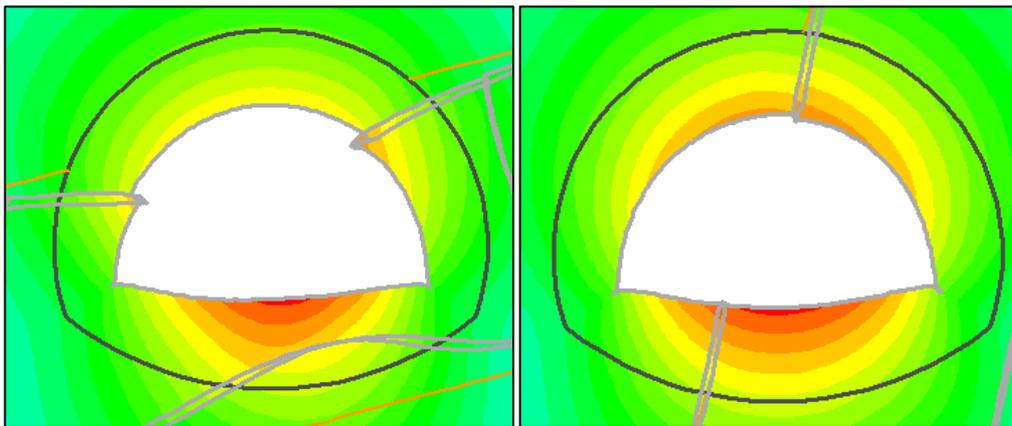


Ilustración 5-32 Deformada Juntas Conjugadas ($k=1$) – Túnel de herradura

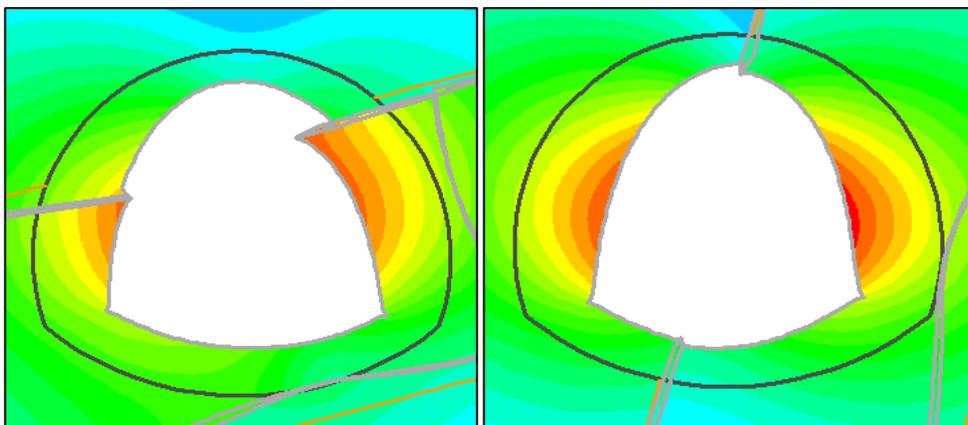


Ilustración 5-33 Deformada Juntas Conjugadas ($k=2$) – Túnel de herradura

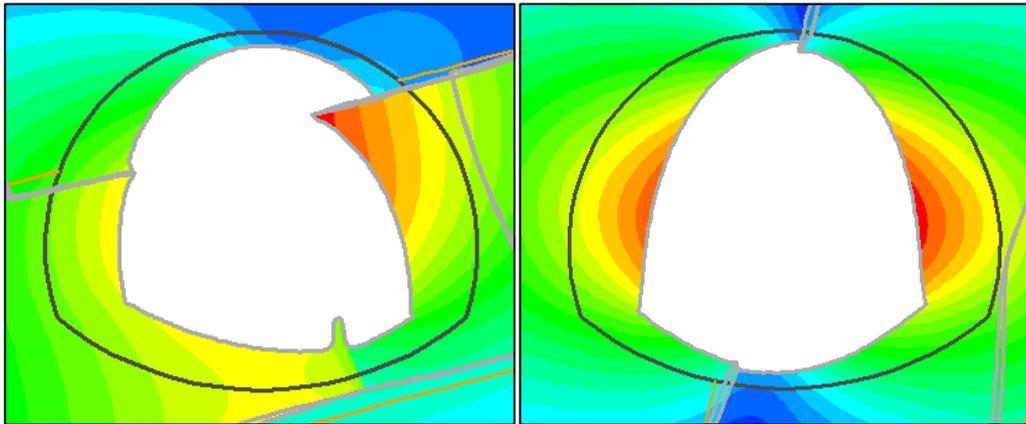


Ilustración 5-34 Deformada Juntas Conjugadas ($k=3$) – Túnel de herradura

Se aprecia en las ilustraciones 5-32, 5-33 y 5-34, como a medida que incrementamos la presión lateral o presión de confinamiento por medio del coeficiente lateral k , el contorno del túnel de herradura con discontinuidades conjugadas tiene una forma menos ovalada que la de las juntas paralelas. La principal diferencia entre las figuras de la izquierda y de la derecha es que las familias de discontinuidades con buzamientos de 15° , concentran los mayores desplazamientos totales en el vértice hastial - bóveda, mientras que las familias con buzamientos de 75° , dicha concentración de desplazamientos se aprecia fundamentalmente en zona de hastiales del túnel. El efecto del aumento del parámetro k se aprecia en la mayor deformación de las zonas de hastiales respecto a las zonas de bóveda y contra bóveda.

5.2.2.3 Voronoi

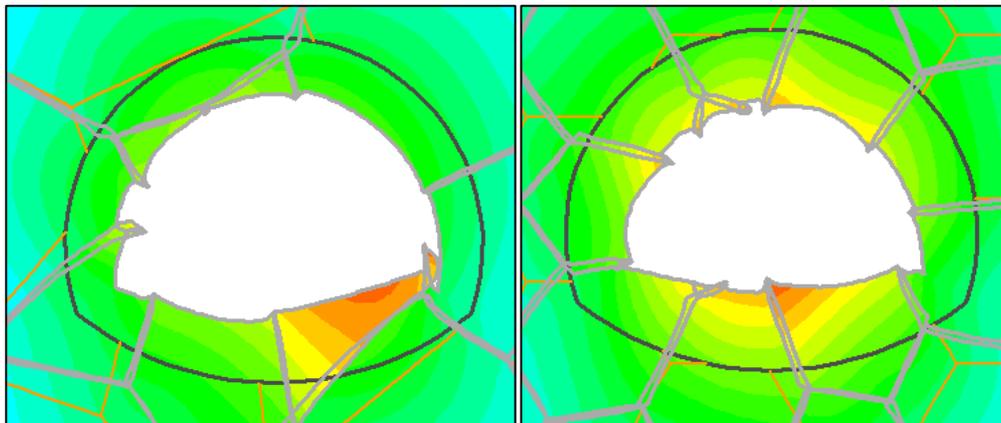


Ilustración 5-35 Deformada Voronoi ($k=1$) – Túnel de herradura

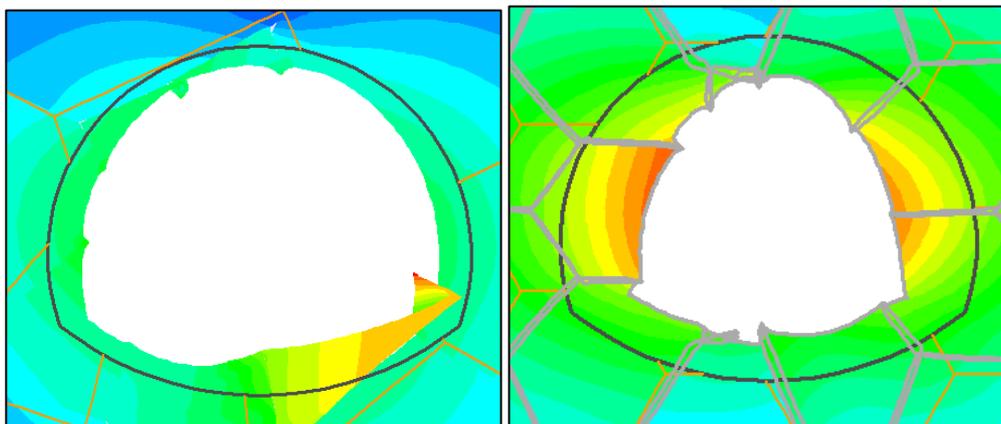


Ilustración 5-36 Deformada Voronoi ($k=2$) – Túnel de herradura

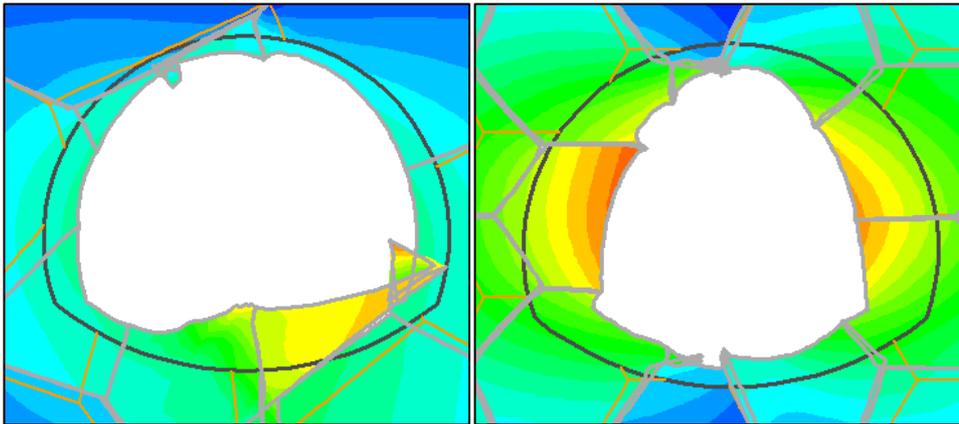


Ilustración 5-37 Deformada Voronoi ($k=3$) – Túnel de herradura

Se observa en la ilustración 5-35, 5-36 y 5-37, como a medida que aumenta la presión lateral o presión de confinamiento por medio del coeficiente lateral k , el contorno del túnel de herradura con discontinuidades Voronoi presenta máximos desplazamientos totales en zonas de contra bóveda y hastiales. La principal diferencia entre las figuras de la izquierda y de la derecha es que las familias de discontinuidades de celdas irregulares concentran los mayores desplazamientos totales en la contra bóveda, mientras que las familias de celdas regulares hexagonal, dicha concentración de desplazamiento se desplaza de bóveda y contra bóveda en el caso isótropo, y a los hastiales en el caso anisótropo. El efecto del aumento del parámetro k es notable en la morfología hexagonal, aumentando la deformación en los hastiales y reduciendo las mismas en bóveda y contra bóveda. No obstante, este efecto es aún mayor en la morfología irregular.

5.2.3 Túnel tipo alcantarillado

5.2.3.1 Juntas Paralelas

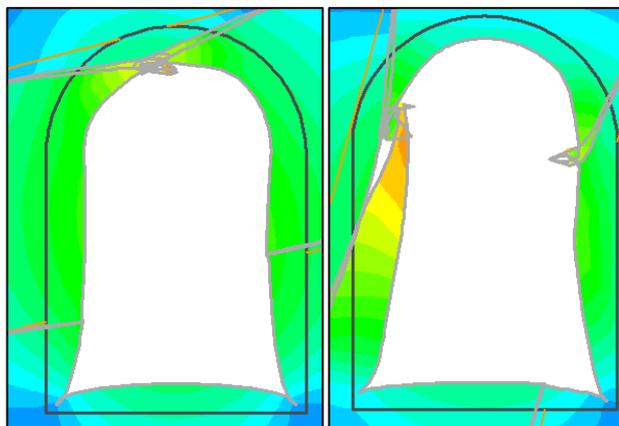


Ilustración 5-38 Deformada Juntas Paralelas ($k=1$) – Túnel tipo alcantarillado

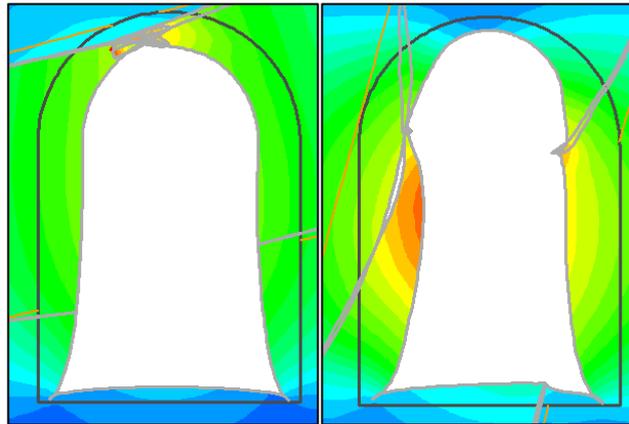


Ilustración 5-39 Deformada Juntas Paralelas ($k=2$) – Túnel tipo alcantarillado

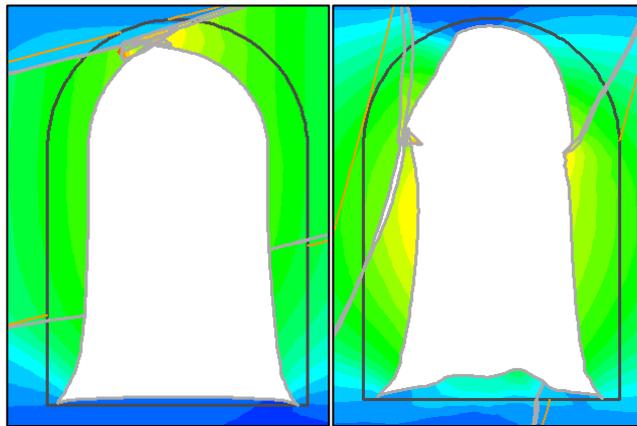


Ilustración 5-40 Deformada Juntas Paralelas ($k=3$) – Túnel tipo alcantarillado

Puede verse en la ilustración 5-38, 5-39 y 5-40, como a medida que se incrementa la presión de confinamiento por medio del coeficiente lateral k , el contorno del túnel de alcantarillado con discontinuidades paralelas presenta una concentración de los desplazamientos totales en bóveda y vértice hastial-bóveda. La principal diferencia entre las figuras de la izquierda y de la derecha en este caso es que las familias de discontinuidades con buzamientos de 15° , concentran los mayores desplazamientos totales en zona de bóveda, mientras que las familias con buzamientos de 75° , dicha concentración de desplazamiento se sitúa en ambos vértices hastial-bóveda. El efecto del incremento del parámetro k se aprecia en la concentración de los desplazamientos y tensiones en los vértices tanto izquierdo como derecho del túnel y en la bóveda en el caso de buzamientos menores (15°).

5.2.3.2 Juntas Conjugadas

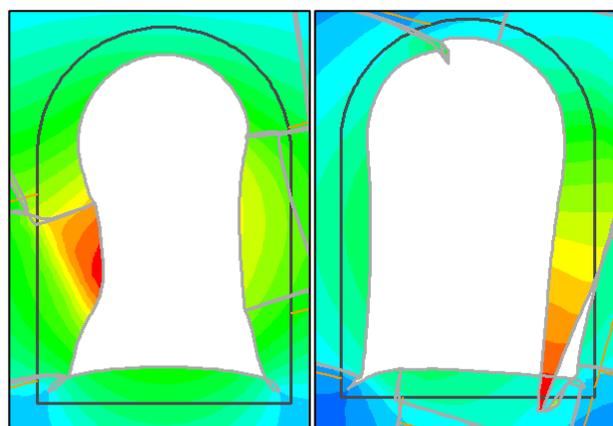


Ilustración 5-41 Deformada Juntas Conjugadas ($k=1$) – Túnel tipo alcantarillado

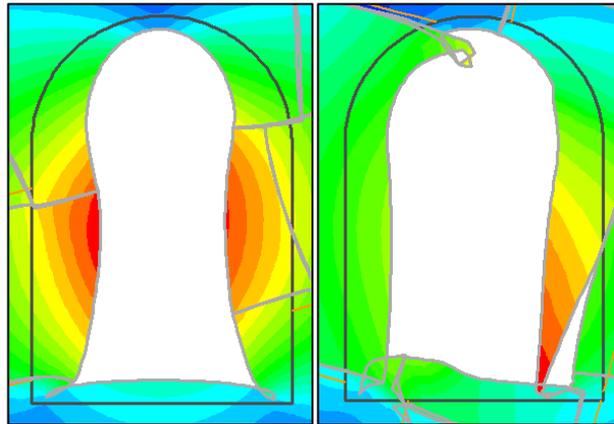


Ilustración 5-42 Deformada Juntas Conjugadas ($k=2$) – Túnel tipo alcantarillado

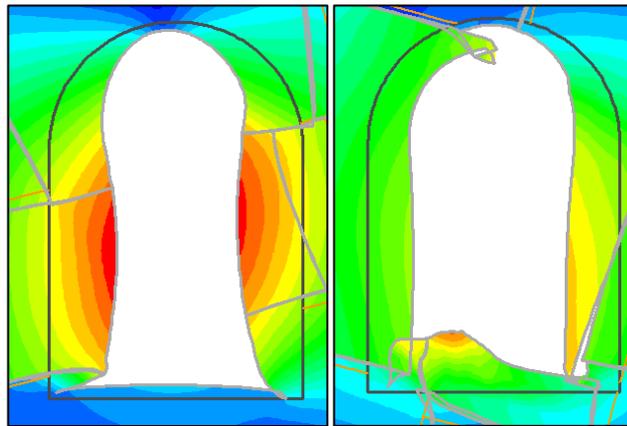


Ilustración 5-43 Deformada Juntas Conjugadas ($k=3$) – Túnel tipo alcantarillado

Se destaca en la ilustración 5-41, 5-42 y 5-43, como a medida que aumenta la presión de confinamiento por medio del coeficiente lateral k , el contorno del túnel de alcantarillado con discontinuidades conjugadas presenta una concentración de los desplazamientos totales en hastiales y vértice hastial-bóveda. La principal diferencia entre las figuras de la izquierda y de la derecha en este caso es que las familias de discontinuidades con buzamientos de 15° , concentran los mayores desplazamientos totales en zona de hastiales, mientras que las familias con buzamientos de 75° , dicha concentración de desplazamiento se sitúa en ambos vértices hastial-bóveda. El efecto del incremento del parámetro k se aprecia en el aumento de la deformación en hastiales y reducción de estos en zona de bóveda y solera. En esta última se aprecia un levantamiento por el efecto de confinamiento. La mayor concentración de los desplazamientos se puede ver en los vértices, en especial en el derecho del túnel entre hastial- solera o contra bóveda.

5.2.3.3 Voronoi

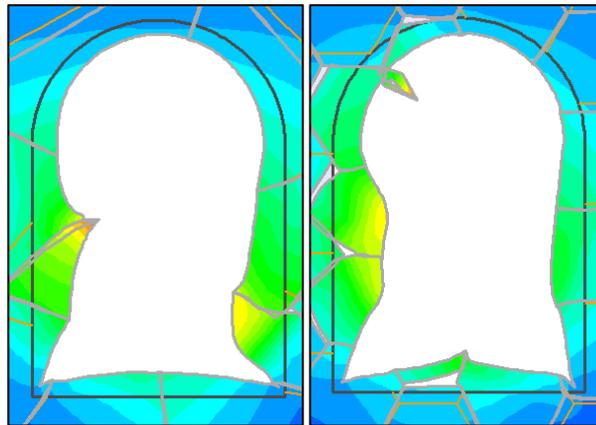


Ilustración 5-44 Deformada Voronoi ($k=1$) – Túnel tipo alcantarillado

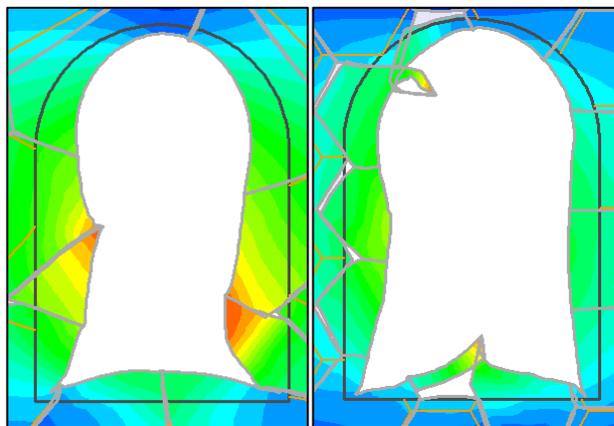


Ilustración 5-45 Deformada Voronoi ($k=2$) – Túnel tipo alcantarillado

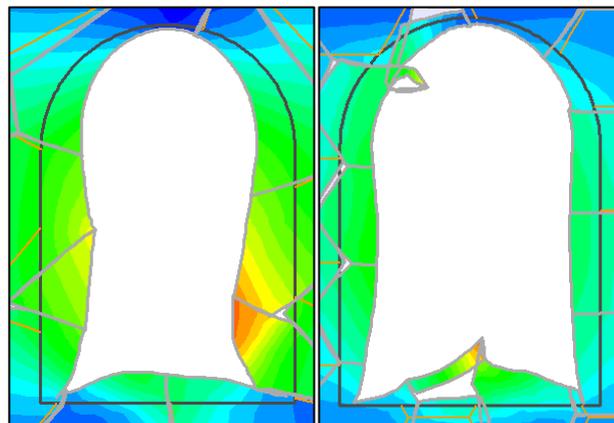


Ilustración 5-46 Deformada Voronoi ($k=3$) – Túnel tipo alcantarillado

Se aprecia en la ilustración 5-44, 5-45 y 5-46 como a medida que aumenta la presión de confinamiento por medio del coeficiente lateral k , el contorno del túnel de alcantarillado con discontinuidades Voronoi presenta un levantamiento claro de la solera. La principal diferencia entre las figuras de la izquierda y de la derecha en este caso es que, la familia de discontinuidades con celda irregular presenta una concentración de los desplazamientos totales en los vértices hastial-solera, mientras que las familias de discontinuidades con celdas hexagonales, dicha concentración de desplazamiento se sitúa especialmente en solera o contra bóveda. El efecto del incremento del parámetro k se aprecia en el aumento de la deformación en vértice hastial-solera. En esta última zona se aprecia un levantamiento por la presión de confinamiento.

5.3 Puntos de plastificación y zonas de posibles roturas para las distintas familias de discontinuidades y geometría de túnel

Por último, otro parámetro bastante significativo es el radio de plastificación que se genera en las inmediaciones del túnel. Por ello, a continuación, se representan los puntos de plastificación que se forman alrededor del túnel. De nuevo se estudian los diferentes tipos de familias de discontinuidades, con buzamientos de 15° y 75° , y formas irregulares y hexagonales del tipo Voronoi. Se estudia igualmente los distintos estados tensionales propuestos.

5.3.1 Túnel circular

5.3.1.1 Juntas Paralelas

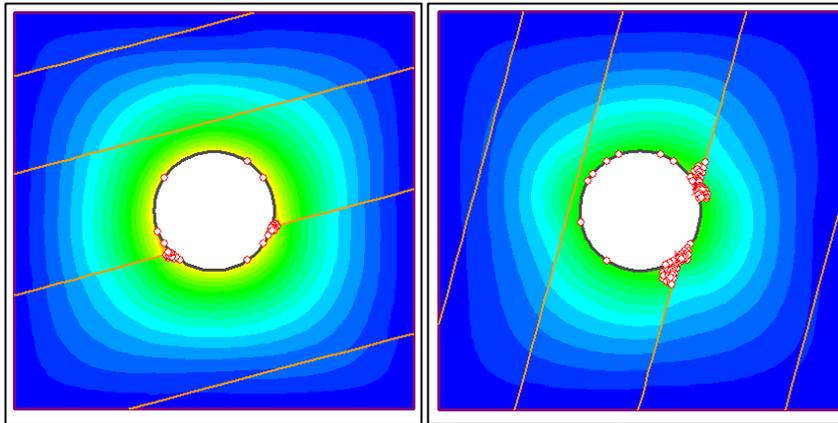


Ilustración 5-47 Plastificación Juntas Paralelas ($k=1$) – Túnel circular

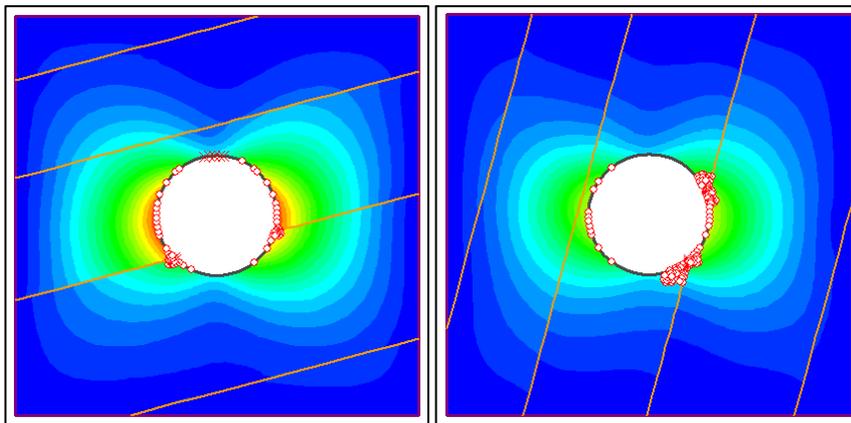


Ilustración 5-48 Plastificación Juntas Paralelas ($k=2$) – Túnel circular

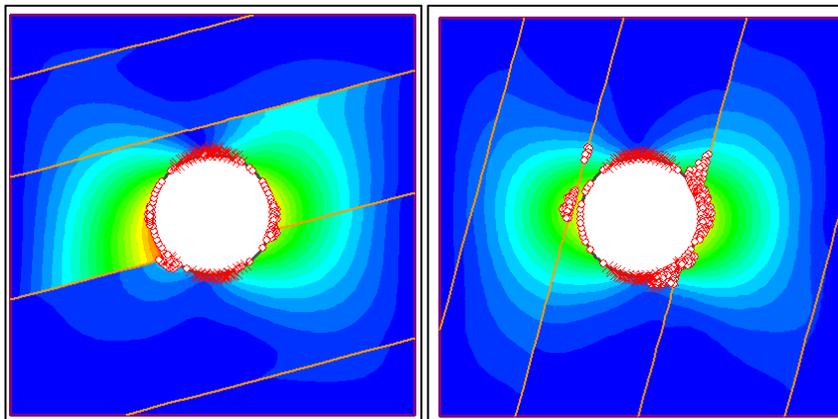


Ilustración 5-49 Plastificación Juntas Paralelas ($k=3$) – Túnel circular

En cuanto a los puntos de plastificación por cortante (círculos) y tracción (aspas), en las figuras 5-47, 5-48 y 5-49, se destaca para túnel circular y familia de discontinuidades paralelas, la concentración de estos puntos en zonas donde intersecan las discontinuidades y el contorno del túnel, como, por ejemplo, vértice hastial - contra bóveda cuando el buzamiento es menor (15°) o vértices hastial- bóveda o contra bóveda en el caso de mayores buzamientos (75°). Con el aumento de las presiones laterales se incrementa los puntos de plastificación y salen a relucir los puntos de extensión o tracción en zonas de bóveda y contra bóveda. En referencia a los radios de plastificación, se puede decir que aumenta el espesor en zona de hastial derecho, buzamiento mayor (75°) y mayor presión lateral ($k=3$).

5.3.1.2 Juntas Conjugadas

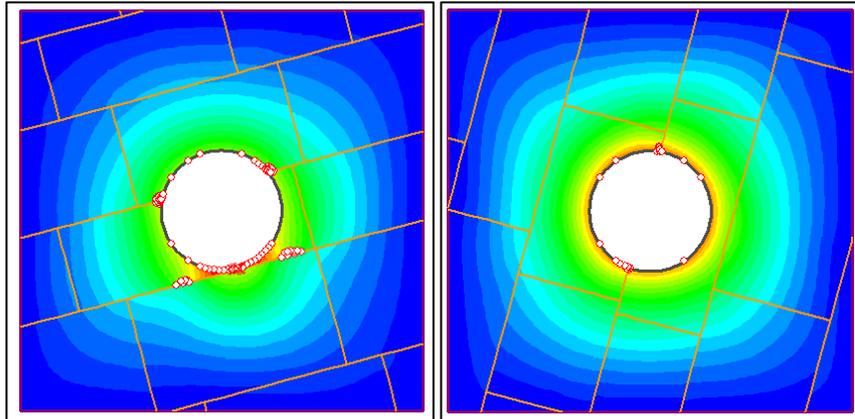


Ilustración 5-50 Plastificación Juntas Conjugadas ($k = 1$) – Túnel circular

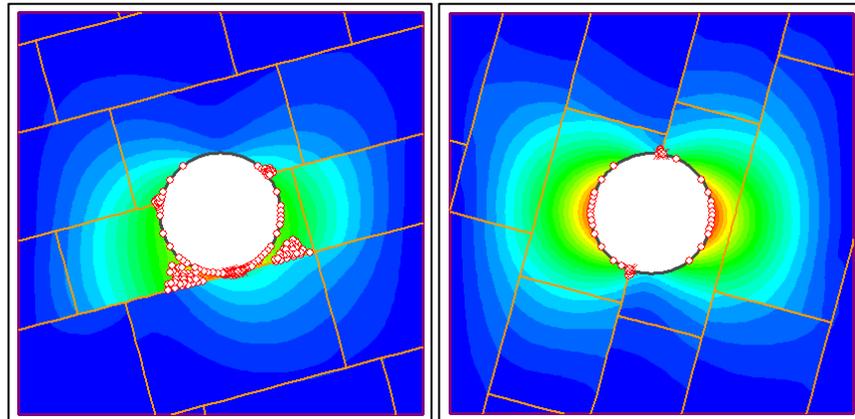


Ilustración 5-51 Plastificación Juntas Conjugadas ($k = 2$) – Túnel circular

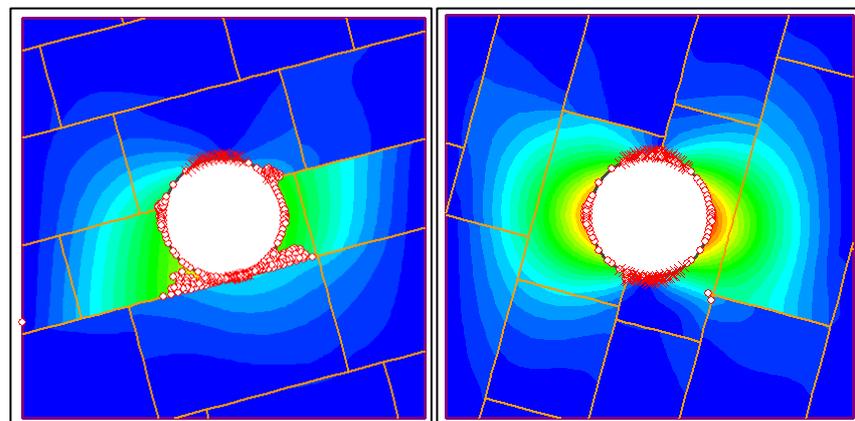


Ilustración 5-52 Plastificación Juntas Conjugadas ($k = 3$) – Túnel circular

En lo que respecta a los puntos de plastificación por cortante (círculos) y tracción (aspas), se destaca en las

ilustraciones 5-50, 5-51 y 5-52, túnel circular y familia de discontinuidades conjugadas, la concentración de estos puntos en zonas donde intersecan las discontinuidades y el contorno del túnel, como, por ejemplo, para buzamientos menores (15°) en vértice Hastial- contra bóveda. En cuanto a buzamientos mayores (75°) se concentran en zona de bóveda, contra bóveda y más marcadamente en hastiales. Con el aumento de las presiones laterales se incrementa los puntos de plastificación y salen a relucir los puntos de extensión o tracción en zonas de bóveda y contra bóveda. Con respecto a los radios de plastificación, se puede decir que son menores que las que se observan en túnel circular con discontinuidades paralelas.

5.3.1.3 Voronoi

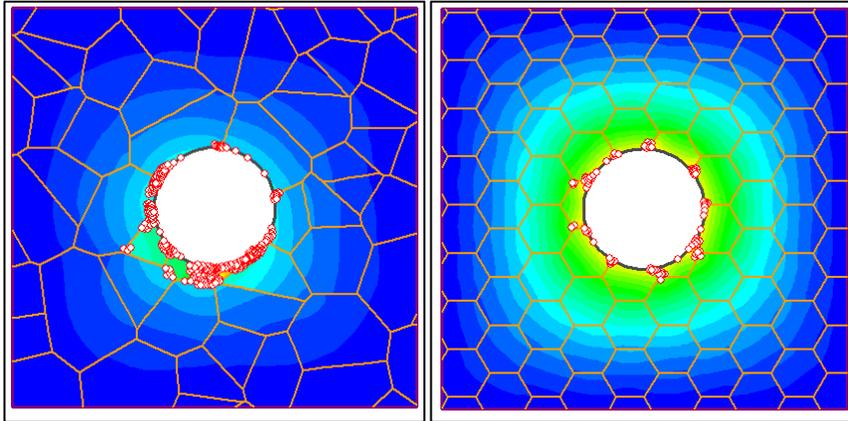


Ilustración 5-53 Plastificación Voronoi ($k=1$) – Túnel circular– Túnel circular

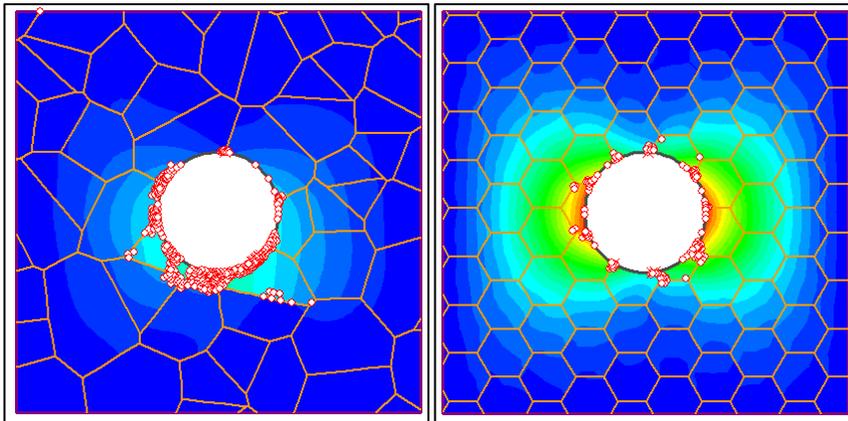


Ilustración 5-54 Plastificación Voronoi ($k=2$) – Túnel circular– Túnel circular

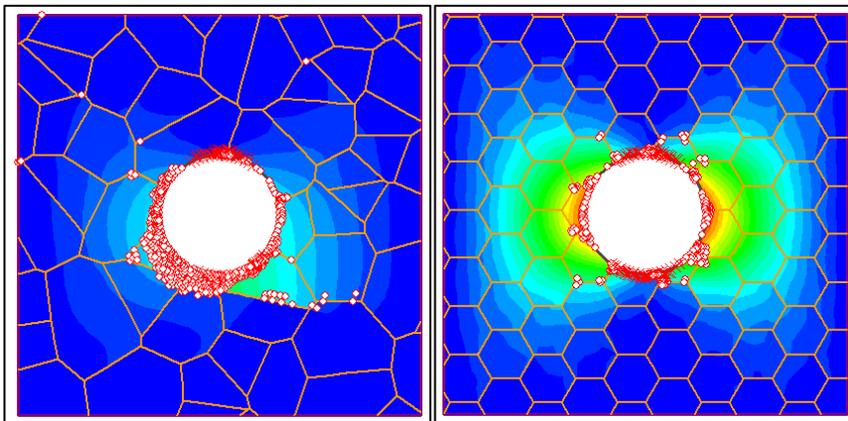


Ilustración 5-55 Plastificación Voronoi ($v=3$) – Túnel circular– Túnel circular

En referencia a los puntos de plastificación por cortante (círculos) y tracción (aspas), se destaca en las ilustraciones 5-53, 5-54 y 5-55, túnel circular y familia de discontinuidades Voronoi, la concentración de estos

puntos en zonas donde intersecan las discontinuidades y el contorno del túnel. La mayor se observa en zona de contra bóveda para celdas o mosaicos irregulares. En celdas regulares, estos puntos se sitúan en la zona de hastiales. Con el aumento de las presiones laterales se incrementa los puntos de plastificación y también salen a relucir los puntos de extensión o tracción en zonas de bóveda y contra bóveda. En cuanto a los radios de plastificación, se puede decir que son mayores que las juntas paralelas y conjugadas cuando se incrementa la presión lateral ($k=3$) y la celda o mosaico es de tipo irregular.

5.3.2 Túnel de herradura

5.3.2.1 Juntas Paralelas

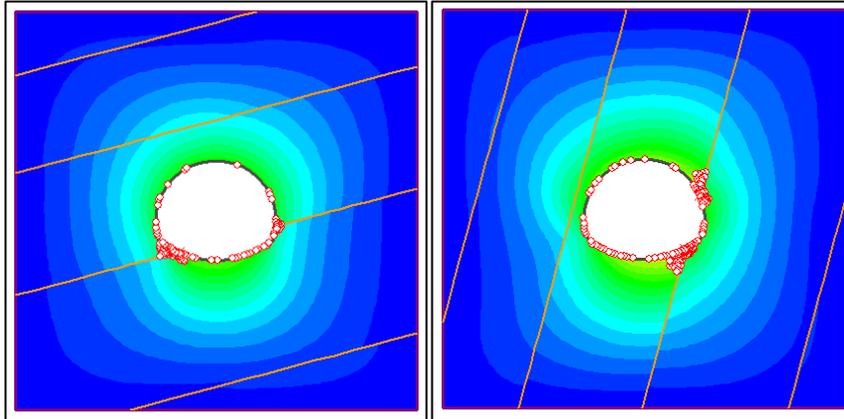


Ilustración 5-56 Plastificación Juntas Paralelas ($k = 1$) – Túnel de herradura

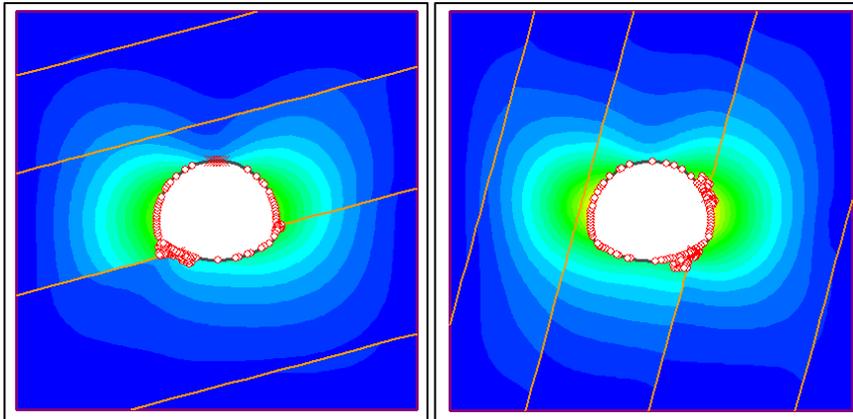


Ilustración 5-57 Plastificación Juntas Paralelas ($k = 2$) – Túnel de herradura

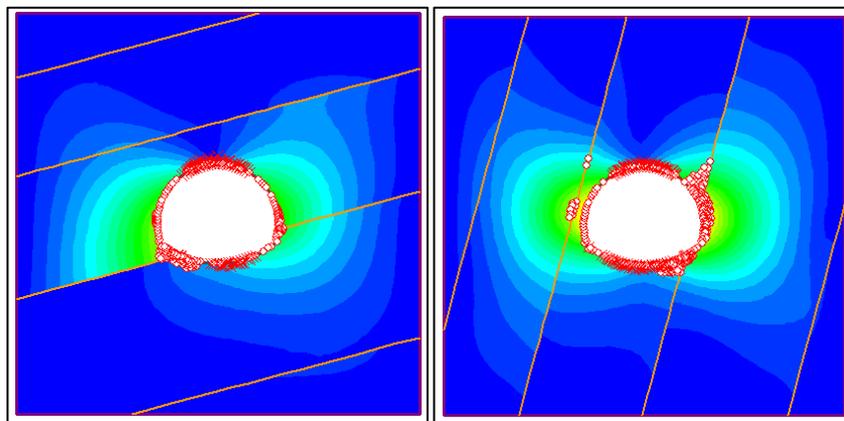


Ilustración 5-58 Plastificación Juntas Paralelas ($k = 3$) – Túnel de herradura

Por lo que respecta a los puntos de plastificación por cortante (círculos) y tracción (aspas), se aprecia en las

ilustraciones 5-56, 5-57 y 5-58 para túnel circular y familia de discontinuidades paralelas, la concentración de estos puntos en zonas donde intersecan las discontinuidades y el contorno del túnel. Por ejemplo, vértice hastial-contra bóveda cuando el buzamiento es menor (15°) o vértices hastial- bóveda o contra bóveda en el caso de mayores buzamientos (75°). Con el aumento de las presiones laterales se observa un incremento de los puntos de plastificación y salen a relucir aquellos puntos de extensión o tracción fundamentalmente en zonas de bóveda y contra bóveda. En referencia a los radios de plastificación, se puede decir que aumenta el espesor en zona de hastial derecho, buzamiento mayor (75°) y mayor presión lateral ($k=3$).

5.3.2.2 Juntas Conjugadas

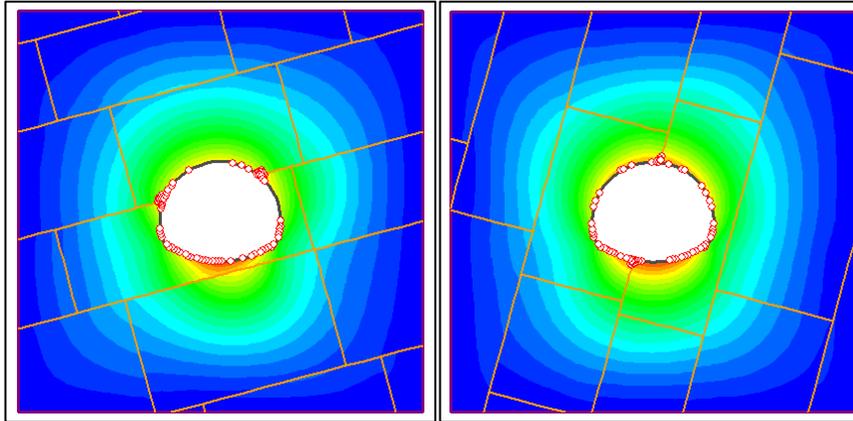


Ilustración 5-59 Plastificación Juntas Conjugadas ($k=1$) – Túnel de herradura

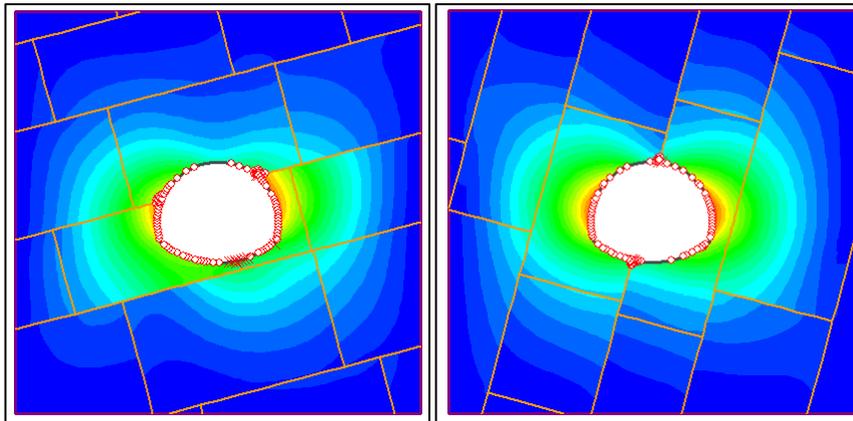


Ilustración 5-60 Plastificación Juntas Conjugadas ($k=2$) – Túnel de herradura

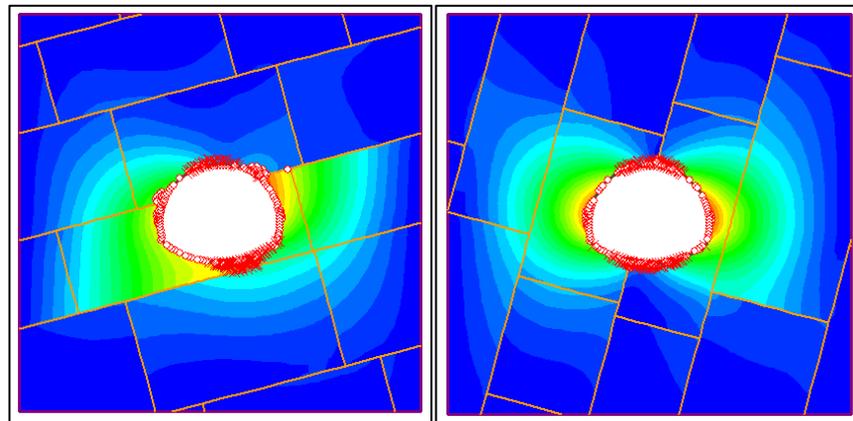


Ilustración 5-61 Plastificación Juntas Conjugadas ($k=3$) – Túnel de herradura

En referencia a los puntos de plastificación por cortante (círculos) y tracción (aspas), se puede ver en las ilustraciones 5-59, 5-60 y 5-61, túnel circular y familia de discontinuidades conjugadas, la concentración de

estos puntos en zonas donde intersecan las discontinuidades y el contorno del túnel de herradura, como, por ejemplo, para buzamientos menores (15°) en vértice hastial-bóveda. En cuanto a buzamientos mayores (75°) se concentran en zona de bóveda y contra bóveda. Con el aumento de las presiones laterales se incrementa los puntos de plastificación y salen a relucir los puntos de extensión o tracción en zonas de bóveda y contra bóveda ($k=3$). Con respecto a los radios de plastificación, se puede decir que son menores que las que se observan en túnel circular con discontinuidades paralelas.

5.3.2.3 Voronoi

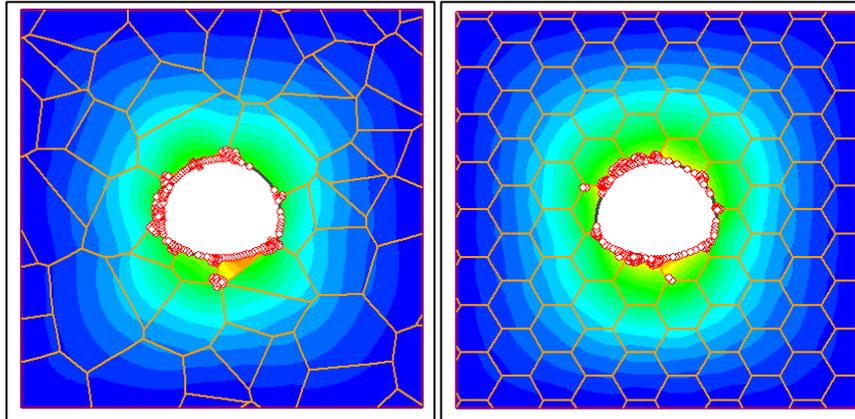


Ilustración 5-62 Plastificación Voronoi ($k=1$) – Túnel de herradura

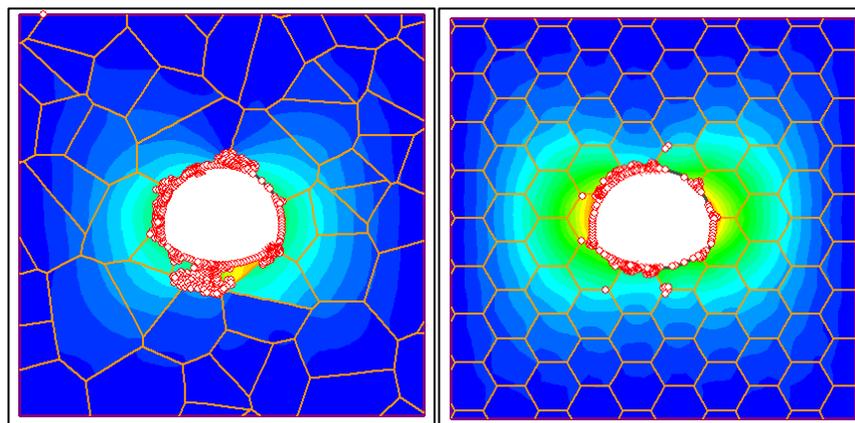


Ilustración 5-63 Plastificación Voronoi ($k=2$) – Túnel de herradura

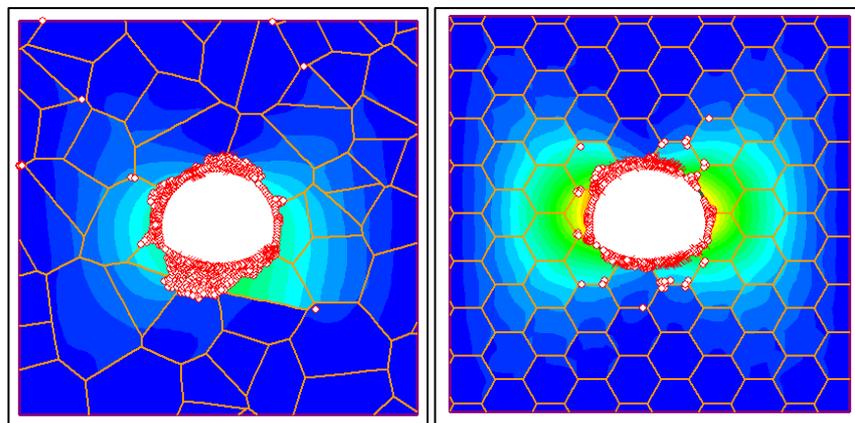


Ilustración 5-64 Plastificación Voronoi ($k=3$) – Túnel de herradura

En cuanto a los puntos de plastificación por cortante (círculos) y tracción (aspas), se destaca en las ilustraciones 5-62, 5-63 y 5-64, túnel herradura y familia de discontinuidades Voronoi, la concentración de estos puntos en zonas donde intersecan las discontinuidades y el contorno del túnel. La mayor se observa en zona de contra

bóveda para celdas o mosaicos irregulares. En celdas regulares, estos puntos se sitúan en el vértice bóveda-hastial. Con el aumento de las presiones laterales se incrementa los puntos de plastificación y salen a relucir los puntos de extensión o tracción en zonas de bóveda y contra bóveda. En cuanto a los radios de plastificación, se puede decir que son mayores que las observadas en juntas paralelas y conjugadas cuando se incrementa la presión lateral ($k=3$) y la celda o mosaico es de tipo irregular. La morfología hexagonal presenta una distribución más uniforme de los puntos de plastificación en el entorno del túnel.

5.3.3 Túnel tipo alcantarillado

5.3.3.1 Juntas Paralelas

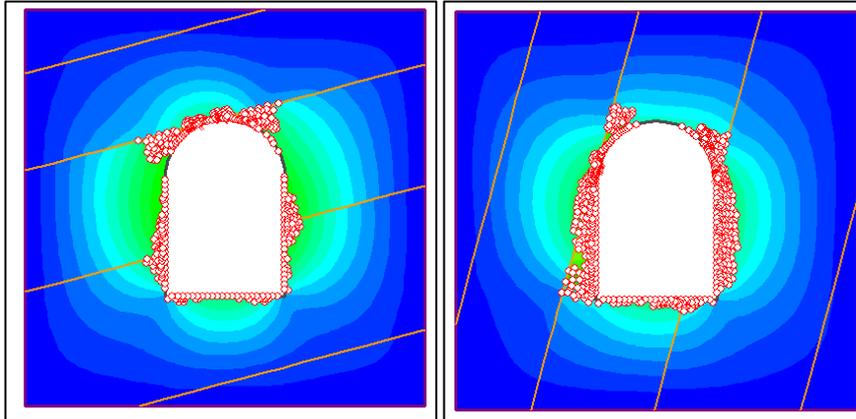


Ilustración 5-65 Plastificación Juntas Paralelas ($k=1$) – Túnel tipo alcantarillado

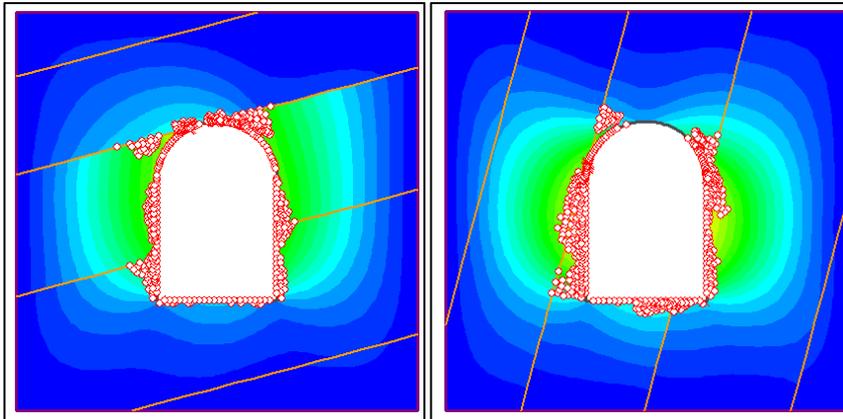


Ilustración 5-66 Plastificación Juntas Paralelas ($k=2$) – Túnel tipo alcantarillado

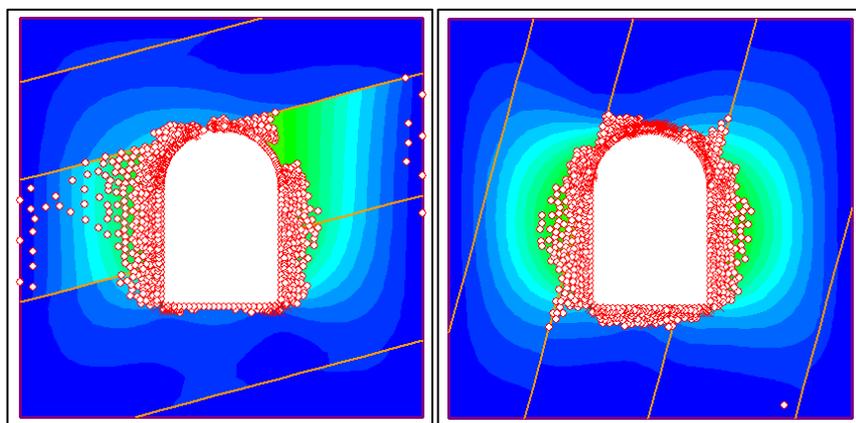


Ilustración 5-67 Plastificación Juntas Paralelas ($k=3$) – Túnel tipo alcantarillado

En lo que respecta a los puntos de plastificación por cortante (círculos) y tracción (aspas), o figuras 5-65, 5-66

y 5-67, se destaca para túnel de alcantarillado y familia de discontinuidades paralelas, la concentración de estos puntos en zonas donde intersecan las discontinuidades y el contorno del túnel, como, por ejemplo, zonas de bóveda y hastiales cuando el buzamiento es menor (15°) o vértices hastial- bóveda en el caso de mayores buzamientos (75°). Con el aumento de las presiones laterales se incrementa los puntos de plastificación y salen a relucir los puntos de extensión o tracción en zonas de bóveda y vértices hastial - bóveda o solera. En referencia a los radios de plastificación, se puede decir que aumenta el espesor fundamentalmente en zona de hastiales en ambos casos de buzamiento (15° y 75°) y mayor presión lateral ($k=3$).

5.3.3.2 Juntas Conjugadas

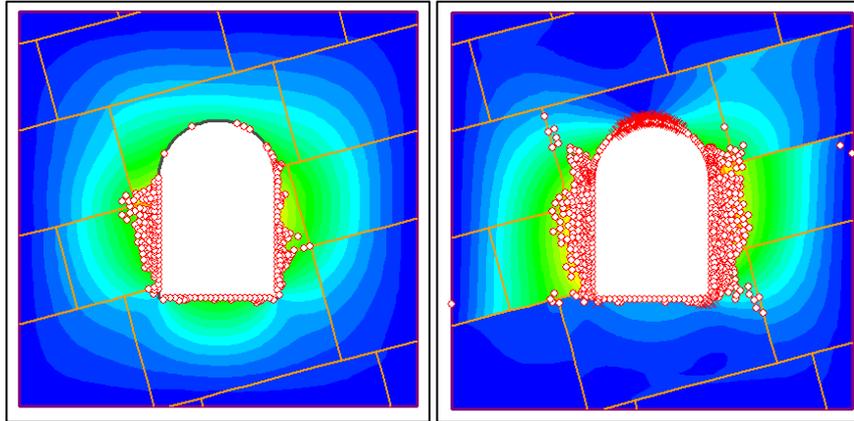


Ilustración 5-68 Plastificación Juntas Conjugadas ($k=1$) – Túnel tipo alcantarillado

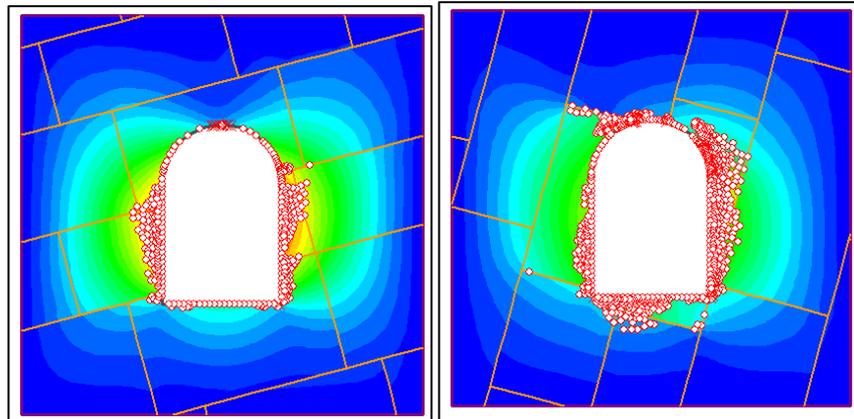


Ilustración 5-69 Plastificación Juntas Conjugadas ($k=2$) – Túnel tipo alcantarillado

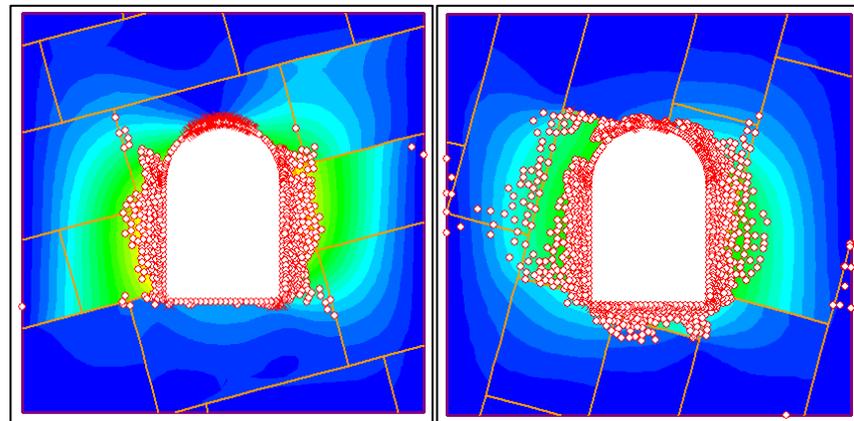


Ilustración 5-70 Plastificación Juntas Conjugadas ($k=3$) – Túnel tipo alcantarillado

En referencia a los puntos de plastificación por cortante (círculos) y tracción (aspas), se destaca en las ilustraciones 5-67, 5-68 y 5-69, túnel alcantarillado y familia de discontinuidades conjugadas, la concentración

de estos puntos en zonas donde intersecan las discontinuidades y el contorno del túnel, como, por ejemplo, para buzamientos menores (15°) en vértice hastial - bóveda. En cuanto a buzamientos mayores (75°) se concentran especialmente en zona de hastiales. Con el aumento de las presiones laterales se incrementa los puntos de plastificación y salen a relucir los puntos de extensión o tracción en zonas de bóveda y vértice hastial-bóveda. En cuanto a los radios de plastificación, se puede decir que son menores que las que se observan en túnel circular con discontinuidades paralelas, salvo para el caso de $k=3$ donde se extienden estos puntos hasta las juntas que se sitúan cerca del contorno del túnel.

5.3.3.3 Voronoi

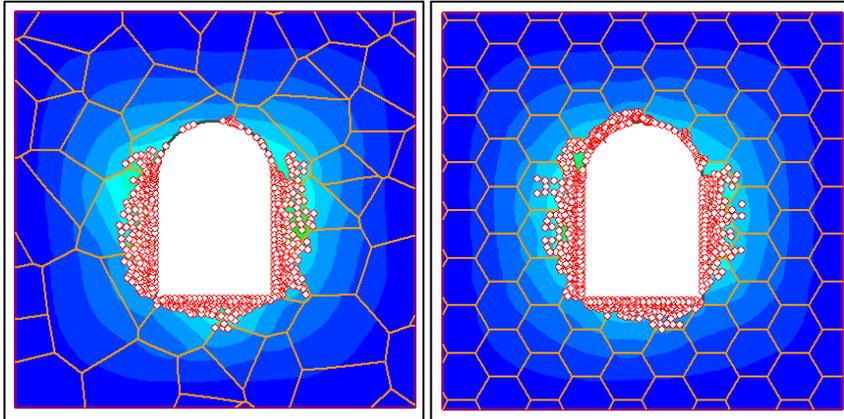


Ilustración 5-71 Plastificación Voronoi ($k=1$) – Túnel tipo alcantarillado

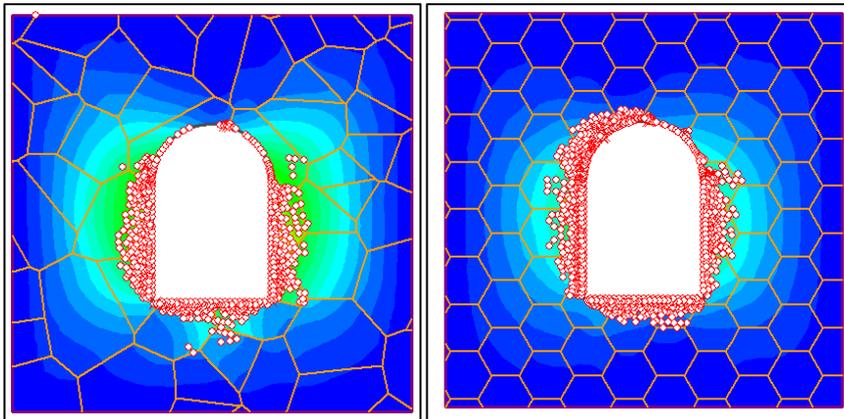


Ilustración 5-72 Plastificación Voronoi ($k=2$) – Túnel tipo alcantarillado

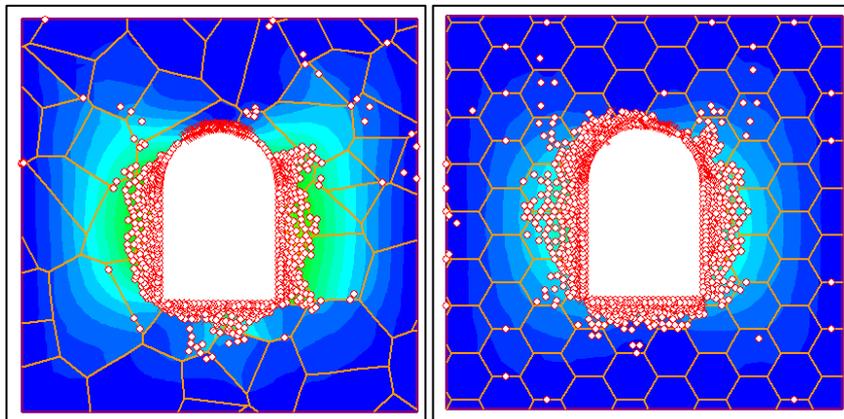


Ilustración 5-73 Plastificación Voronoi ($k=3$) – Túnel tipo alcantarillado

En lo que se refiere a los puntos de plastificación por cortante (círculos) y tracción (aspas), se destaca en las ilustraciones 5-70, 5-71 y 5-72, túnel alcantarillado y familia de discontinuidades Voronoi, la concentración de

estos puntos en zonas donde intersecan las juntas con el contorno del túnel. La mayor concentración se observa en zona de hastiales para celdas o mosaicos irregulares. En celdas regulares, estos puntos se sitúan en el vértice bóveda-hastial. Con el aumento de las presiones laterales se incrementa los puntos de plastificación y salen a relucir los puntos de extensión o tracción en zonas de bóveda y vértice bóveda-hastial. En referencia a los radios de plastificación, se puede decir que se incrementan cuando es mayor la presión lateral ($k=3$) y la celda o mosaico es de tipo regular. La morfología hexagonal presenta una distribución más uniforme de los puntos de plastificación en el entorno del túnel.

6 CONCLUSIONES

La investigación realizada en este proyecto se centra en el estudio de la influencia que pueden tener las diferentes familias de discontinuidades presentes en los macizos rocosos, que afectan como es sabido a su deformabilidad y en especial a su resistencia al corte. En concreto en este proyecto se estudia el efecto que tienen tres tipologías de discontinuidades (paralelas, conjugadas y Voronoi) similares a las observadas en algunas familias presentes en las masas de roca.

En concreto, las juntas paralelas se producen cuando la roca se somete a tensiones que actúan en una dirección preferente. Estas tensiones pueden ser debidas a la compresión o a la expansión de la roca. Por ejemplo, las rocas sedimentarias son propensas a tener una familia principal de juntas o diaclasas continuas y en dirección no paralelas discontinuas (ejemplo, las calizas).

Por otro parte, algunas rocas ígneas son propensas a las familias de diaclasas en forma de mosaico, en concreto las columnas de basalto. En el caso de más de tres familias de discontinuidades, se podría aplicar el modelo de junta Voronoi para reproducir su deformabilidad y resistencia. En las rocas metamórficas que dependen del grado de metamorfismo pueden tener una o dos discontinuidades principales y otras secundarias en dirección perpendicular o no a las anteriores. Dependiendo del grado de metamorfismo, las discontinuidades principales tendrán una u otra dirección, es decir, a menor grado se observarán planos de esquistosidad, pero a mayor, dichos planos serán de foliación y tendrán un cambio en la orientación de la discontinuidad. Esta situación será tenida en cuenta utilizando modelos de juntas conjugadas.

Este trabajo comienza por analizar el efecto que tiene los buzamientos en las familias de juntas o discontinuidades. En este caso se estudian dos tipos de buzamientos los menores de 45° (15°) y los mayores de 45° (75°). Este cambio de orientación de las discontinuidades en modelos de juntas paralelas y conjugadas manifestara una clara influencia en la deformada del contorno, así como en el radio de plastificación del túnel.

Se investiga también la influencia que puede tener, la presión lateral llamada también presión de confinamiento en los tres tipos de discontinuidades o juntas. La citada presión influye no sólo en el estado de tensión en el contorno del túnel sino también en los desplazamientos verticales y horizontales. Los estudios implican desde un estado isótropo de tensiones a otros anisótropos donde la presión horizontal aumenta manteniéndose la vertical constante.

En la investigación o proyecto, los tres modelos de junta se estudian en tres tipos de geometría de túneles ampliamente utilizados en la construcción de carreteras y ferrocarriles. La primera geometría se utiliza en la construcción de macizos rocosos muy fracturados y/o blandos como son los túneles de sección circular. El método de excavación en este caso es por tuneladora básicamente con presión en el frente como las EPB. Seguidamente tenemos a los túneles de herradura ampliamente utilizados en la construcción de ferrocarriles (por ejemplo, la línea Madrid – Sevilla). Se aplica en este caso, según la calidad del macizo y longitud del túnel, el criterio de excavación que propone el Nuevo Método Austriaco (NMA). Finalmente, está la geometría tipo alcantarillado utilizada en la construcción de canales de riego, saneamiento y abastecimiento. Dependiendo de las características geomecánicas del macizo rocoso (en general, calidad aceptable), en la construcción de este tipo de túnel se podría utilizar herramientas de excavación como las rozadoras.

En los cálculos con elementos finitos se ha intentado que la geometría de los túneles tenga un área equivalente o parecida. Las características geomecánicas y geotécnicas del macizo rocoso son las mismas salvo las que corresponde a las características de las familias de discontinuidades como la orientación, separación, abertura y continuidad. Es necesario aclarar que como el estudio se realiza a grandes profundidades y consideramos que a dichas profundidades las discontinuidades están cerradas, el flujo de agua no afecta a los cálculos, es decir se hará un análisis en condiciones sin influencia del agua. En los modelos paralelos y conjugado se tendrá en cuenta la condición de persistencia o continuidad y que la separación entre planos paralelos es de 5 m y los que van en dirección perpendicular como las conjugadas la separación es de 10 m. Finalmente, se realizará un estudio aparte

con el modelo tipo Voronoi que contiene celdas de configuración irregular y hexagonal.

Las propiedades de resistencia, mecánica o de rigidez de los tres modelos de junta o familia de diaclasas serán las mismas. Para estudiar el deslizamiento de las juntas o discontinuidades se aplicará el criterio de rotura de Mohr-Coulomb.

6.1 Máximos desplazamientos

A continuación, se detallan las conclusiones a las que se han llegado en este estudio en referencia a los máximos desplazamientos horizontales y verticales observados en zonas de bóveda. Hastiales solera o contra bóveda bajo las siguientes condiciones:

- Buzamientos menores de 45° (15°) y mayores de 45° (75°) en modelos de junta paralela y conjugada.
- Familias de discontinuidades formadas por celdas o mosaicos de configuración irregular y regular o hexagonal.
- Tres tipos de estado de carga: isótropa ($k=1$) y anisótropa ($k=2$ y $k=3$).
- Tres tipologías de túnel: circular, herradura y alcantarillado.

Con referencia a las Juntas Paralelas, se constatan para modelos de juntas paralelas y continuas que si se modifica la sección del túnel (circular, herradura y alcantarillado), los máximos desplazamientos horizontales se observan en zona de hastiales cuando el buzamiento de la discontinuidad va en dirección contraria a las agujas del reloj (de 15° a 75°) y se incrementa la presión de confinamiento o coeficiente lateral (k).

Se comprueba para modelos de juntas paralelas y continuas que si se modifica la sección del túnel (circular, herradura y alcantarillado), los máximos desplazamientos verticales se sitúan por una parte en la zona de bóveda y por otra en contra bóveda cuando los buzamientos de las discontinuidades van en un sentido u otro y las presiones de confinamiento aumenta o disminuyen. Si van en sentido antihorario (de 15° a 75°) y las presiones laterales disminuyen, dichos máximos se observan en zona bóveda. Sin embargo, si va en sentido horario (de 75° a 15°) y las presiones laterales aumentan, lo máximos se aprecian en zona de contra bóveda.

Con referencia a las Juntas Conjugadas, se constatan para modelos de juntas conjugadas que si se modifica la sección del túnel (circular, herradura y alcantarillado), los máximos desplazamientos horizontales se observan en zona de hastiales cuando el buzamiento de la discontinuidad va en dirección de las agujas del reloj (de 75° a 5°) y se incrementa la presión de confinamiento o coeficiente lateral (k).

Se comprueba para modelos de juntas paralelas y continuas que si modificamos la sección del túnel (circular, herradura y alcantarillado), los máximos desplazamientos verticales se sitúan por una parte en la zona de bóveda y por otra en contra bóveda cuando los buzamientos de las discontinuidades van en un sentido u otro y las presiones de confinamiento aumenta o disminuyen. Si van en sentido horario (de 75° a 15°) y las presiones laterales aumentan, dichos máximos se observan en zona de bóveda. Sin embargo, si va en sentido antihorario (de 15° a 75°) y las presiones laterales disminuyen, lo máximos se aprecian en zona de contra bóveda.

Por último, con referencia a las Juntas Voronoi, se constatan para modelos de juntas tipo Voronoi que si se modifica la sección del túnel (circular, herradura y alcantarillado), los máximos desplazamientos horizontales se sitúan en zona de hastiales y que aumentan si la orientación de las celdas o mosaicos pasa de un distribución regular o hexagonal a otra irregular. En cuanto a la presión lateral, se observa en ambos hastiales un incremento de los mencionados desplazamientos. Los máximos desplazamientos se aprecian en configuraciones o mosaicos irregulares.

Se comprueba para modelos de juntas Voronoi que si se modifica la sección del túnel (circular, herradura y alcantarillado), los máximos desplazamientos verticales se sitúan en zona de bóveda y contra bóveda cuando las celdas presentan fundamentalmente una distribución irregular. En referencia a la presión lateral, se aprecia tanto en celdas irregulares como regulares un incremento de los desplazamientos laterales, siendo mayores en contra bóveda.

De los modelos de junta analizados y con referencia a los máximos desplazamientos observados en función de

la presión lateral se comenta lo siguiente:

Para el túnel circular, se aprecia en zona de hastiales (ilustración 5-4), que al aumentar la presión de confinamiento los mayores desplazamientos horizontales son debidos a buzamientos menores (15°) en familias de discontinuidades conjugadas. Lo menores desplazamientos horizontales corresponden a familias tipo Voronoi y celdas o mosaicos regulares o hexagonales.

Puede verse en zona de bóveda (ilustración 5-5), que cuando la presión de confinamiento aumenta, los mayores desplazamientos verticales son debidos a familias de discontinuidades tipo mosaico o celda irregular (Voronoi). Los menores desplazamientos corresponden a familias de juntas conjugadas y buzamientos mayores (75°).

Para el túnel de herradura se destaca en zona de hastiales (ilustración 5-8), cuando la presión de confinamiento aumenta hasta $k=2,8$, que los mayores desplazamientos horizontales son debidos a configuraciones de celdas irregulares propuestas por el modelo de juntas Voronoi. Para $k>2,8$ los mayores desplazamientos son debidos a discontinuidades paralelas con buzamientos menores (15°). Lo menores desplazamientos horizontales corresponden a familias tipo Voronoi y celdas o mosaicos regulares o hexagonales.

Se aprecia en zona de bóveda (ilustración 5-9), que para $k<1,5$ los mayores desplazamientos verticales son debidos a familias de discontinuidades conjugadas con buzamientos mayores (75°), seguidos y para $k>1,5$ por discontinuidades compuestas por celdas irregulares tipo mosaico (Voronoi). Los menores desplazamientos corresponden para $k<1,8$ a familias de celdas hexagonales y para $k>1,8$ a familias de juntas conjugadas y buzamientos mayores (75°).

Para el túnel de alcantarillado se observa en zona de hastiales (ilustración 5-12), cuando la presión de confinamiento aumenta hasta $k=1,8$, que los mayores desplazamientos horizontales son debidos a discontinuidades conjugadas con buzamientos mayores (75°). Para $k>1,8$ los mayores desplazamientos son debidos al tipo de junta Voronoi con celdas regulares o hexagonales. Lo menores desplazamientos horizontales corresponden a familias de juntas paralelas y buzamientos menores (15°).

Se destaca en zona de bóveda (ilustración 5-13), que cuando se incrementa las presiones laterales o coeficiente k , los mayores desplazamientos verticales son debidos a familias de juntas tipo Voronoi con celdas o mosaicos regulares o hexagonales. Los menores desplazamientos corresponden a familias de juntas conjugadas con buzamientos menores (15°).

Con referencia a la geometría del túnel en relación con los máximos desplazamientos horizontales en zona de hastiales se concluye:

- Para discontinuidades de tipo paralelo, buzamientos mayores (75°), zona de hastiales e incremento de las presiones de confinamiento (ilustración 5-14), se constata que los máximos desplazamientos horizontales se producen en tipologías de túneles de alcantarillado. Los menores valores de desplazamiento para $k < 2$ y buzamiento menor (15°) se puede ver en túnel de alcantarillado, mientras que para $k > 2$ y buzamientos mayores se aprecian en túnel de herradura.
- Para discontinuidades conjugadas, buzamientos mayores (75°), zona de hastiales e incremento de las presiones de confinamiento (ilustración 5-15), se aprecia que los máximos desplazamientos horizontales se producen en tipologías de túneles de alcantarillado. En este caso los menores desplazamientos se pueden ver en túnel de herradura para buzamientos mayores (75°).
- Para el modelo de juntas Voronoi, celdas o mosaicos irregulares, zona de hastiales y coeficientes laterales $< 1,7$, puede verse que los máximos desplazamientos horizontales se producen en tipologías de túneles de alcantarillado (ilustración 5-15). Para $k > 1,7$, los máximos se observan en el mismo tipo de túnel, pero para celdas o mosaicos hexagonales. Por lo que se refiere a los menores desplazamientos, estos se aprecian en túneles de herradura con discontinuidades del tipo celda o mosaico hexagonal.

Se concluye, por tanto, que los máximos desplazamiento en zonas de hastiales para las distintas familias de discontinuidades estudiadas (paralelas, conjugadas y Voronoi), se producen en túneles de tipo alcantarillado. Una de las causas podría ser que en esta zona (hastial) y más detalladamente en el vértice entre la solera o bóveda y el hastial se producen las mayores concentraciones de las tensiones. Otro posible factor sería, la orientación que presentan las familias de discontinuidades, en especial, las que tienen buzamientos mayores (75°) y direcciones paralelas al rumbo o eje del túnel. Esta dirección es desfavorable en la construcción de túneles que presentan en zona de hastiales buzamientos prácticamente verticales (90°). También es importante tener en

cuenta la interacción entre las diferentes familias de discontinuidades y cómo estas afectan a la estabilidad del macizo rocoso y a los desplazamientos en el contorno del túnel.

En referencia a los menores desplazamientos horizontales, se puede ver que geometrías más ovaladas (relación radio eje menor respecto a la menor: $1/2$) presentan menores valores si las comparamos con aquellas que presentan secciones cuasi rectas (alcantarillado). En este caso secciones del tipo herradura sería recomendable para la construcción de túneles en macizos rocosos con buzamientos de las discontinuidades sobre los 45° (75°) o celdas regulares tipo Voronoi.

En cuanto a la geometría del túnel, pero en relación con los máximos desplazamientos verticales en zona de bóveda se concluye:

- Para discontinuidades de tipo paralelo, buzamientos menores (15°) e incremento de las presiones de confinamiento (ilustración 5-16), se constata que los máximos desplazamientos verticales se producen en tipologías de túneles de alcantarillado. Los menores desplazamientos se pueden ver en túneles del tipo circular y para buzamientos menores (15°).
- Para discontinuidades conjugadas, buzamientos mayores (75°) y $k < 1,6$, se aprecia que los máximos desplazamientos verticales se producen en tipologías de túneles de herradura (ilustración 5-17). Para k entre 1,6 y 2, los máximos desplazamientos se pueden ver en túneles tipo circular. En cuanto a valores de $k > 2$, el tipo de túneles en los que se aprecia mayor desplazamiento es de alcantarillado con buzamientos mayores (75°).
- Para el modelo de juntas Voronoi, celdas o mosaicos irregulares y coeficientes laterales $k < 1,6$, puede verse que los máximos desplazamientos verticales se producen en tipologías de túneles de circulares (ilustración 5-18). Para $k > 1,6$, los máximos se observan en tipo de túnel de alcantarillado, pero para celdas o mosaicos hexagonales.

Se concluye, por tanto, que los máximos desplazamiento en zona de bóveda para las distintas familias de discontinuidades estudiadas (paralelas, conjugadas y Voronoi) y coeficientes $k > 1,6$, se producen en túneles de tipo alcantarillado, aunque no queda claro si a buzamientos menores (15°) o mayores (75°), pero si en celdas de tipo Voronoi (hexagonales). La causa podría ser que en esta zona (bóveda) y más detalladamente en el vértice entre la bóveda o solera y el hastial se producen las mayores concentraciones de las tensiones. La orientación de las discontinuidades en este caso no tiene un claro efecto sobre los desplazamientos verticales. Otro factor que podría afectar sobre esta geometría es la gran superficie de contorno y las paredes que conforman este tipo de túneles, ya que es más probable que intercepten con alguna discontinuidad, en comparación con el resto de las geometrías.

Los menores desplazamientos verticales se pueden ver en túneles de secciones más ovaladas o circulares y para buzamientos menores (15°) y mosaicos de tipo regular o hexagonales (Voronoi).

Por último, la sección de túnel recomendable para la construcción de un túnel en macizo rocosos que contienen los modelos de junta paralela y conjugada, desde el punto de vista de los desplazamientos, sería: secciones de herradura o circulares con buzamientos sobre los 45° (75°) en el caso de los desplazamientos horizontales y menores de 45° (15°) en el caso de los desplazamientos verticales. En cuanto a juntas tipo Voronoi, la distribución de celdas regulares o hexagonales son las más recomendables para obtener menores desplazamientos. En cuanto a las presiones laterales, cuanto más isótropo sea el estado de tensiones o menor la presión de confinamiento ambos desplazamientos (horizontales y verticales) serán menores no sólo en zonas de hastiales u bóveda sino también en zona de contra bóveda (levantamientos).

Del estudio de los máximos desplazamientos horizontales y verticales se concluye:

- Generalmente se dan los máximos desplazamientos horizontales en el hastial derecho. Independientemente de la geometría del túnel.
- Generalmente se dan los máximos desplazamientos verticales en contra bóveda. Independientemente de la geometría del túnel.
- En túneles circulares y de herradura, el aumento de la inclinación de las juntas provoca una disminución de los desplazamientos horizontales en el contorno del túnel. En túneles tipo alcantarillado el efecto es el contrario al anterior.

- En túneles circulares, el aumento de la inclinación en juntas paralelas provoca mayores desplazamientos verticales. En juntas conjugadas el efecto es el contrario.
- La morfología hexagonal también provoca menores desplazamientos horizontales y verticales comparada con la morfología irregular. Los desplazamientos provocados por las juntas tipo Voronoi son bastante elevados comparado con el resto de las familias de discontinuidades estudiadas.
- Ante juntas paralelas y juntas conjugadas, por norma general los desplazamientos horizontales y verticales son mayores en los túneles tipo alcantarillado. La diferencia entre los desplazamientos que se dan en los túneles circulares y de herradura son muy pequeños, siendo algo mayores en los túneles de herradura.
- A rasgos generales, también se puede concluir que el aumento del coeficiente k , provoca un aumento de los desplazamientos horizontales en hastiales y de los desplazamientos verticales en zona de bóveda y contra bóveda.
- De todos los casos estudiados, en cuanto a los desplazamientos horizontales, la configuración más desfavorable o crítica se da para el túnel tipo alcantarillado con una familia de discontinuidades tipo Voronoi hexagonal y con $k=3$ en el hastial izquierdo. Los menores desplazamientos se dan con la misma geometría de túnel y familia de discontinuidades, pero con $k=2$.
- En cuanto a los desplazamientos verticales, la configuración más desfavorable se da de nuevo para el túnel tipo alcantarillado con una familia de discontinuidades tipo Voronoi hexagonal y con $k=3$ en el hastial izquierdo. La configuración más favorable es para la geometría circular, con juntas conjugadas a 75° y $k=3$ en contra bóveda.

6.2 Deformada

Se describe a continuación para cada geometría del túnel la forma del contorno y el efecto que tiene las presiones de confinamiento y buzamiento de las distintas familias de discontinuidades

En el túnel circular destaca como a medida que incrementamos la presión lateral o presión de confinamiento por medio del coeficiente lateral k , el contorno del túnel circular con discontinuidades paralelas y conjugadas tiene forma ovalada (ilustraciones 5-20, 5-21, 5-22, 5-23, 5-24 y 5-22). Se observa que las familias de discontinuidades con buzamientos menores (15°), concentran los mayores desplazamientos totales en el vértice hastial - contra bóveda, mientras que las familias con buzamientos mayores (75°), dicha concentración de desplazamientos se aprecia en zona de hastiales. El efecto del aumento del parámetro k se aprecia haciendo que se vayan deformando cada vez más las zonas de hastiales, y menos las zonas de bóveda y contra bóveda.

Se observa como a medida que incrementamos la presión lateral o presión de confinamiento por medio del coeficiente lateral k (ilustraciones 5-26, 5-27, 5-28), el contorno del túnel circular con discontinuidades tipo Voronoi presenta una sección menos ovalada de los desplazamientos totales para las familias de discontinuidades de tipo irregular, y más ovalada para las familias de discontinuidades de tipo regular o hexagonal. El efecto del aumento del parámetro k es notable en la morfología hexagonal, aumentando la deformación en los hastiales y reduciéndose en bóveda y contra bóveda. Por el contrario, este efecto apenas se aprecia en la morfología irregular.

En el túnel de herradura puede verse, como a medida que se incrementa la presión de confinamiento por medio del coeficiente lateral k (ilustraciones 5-29, 5-30, 5-31, 5-32, 5-33 y 5-34), el contorno del túnel de herradura con discontinuidades paralelas y conjugadas presentan secciones con poco efecto del problema de ovalización. Se aprecia que las familias de discontinuidades con buzamientos menores (15°), concentran los mayores desplazamientos totales en el vértice hastial - contra bóveda, mientras que las familias con buzamientos mayores (75°), dicha concentración de desplazamiento se aprecia en zona de hastiales y vértice hastial - contra bóveda. El efecto del incremento del parámetro k se aprecia en la concentración de los desplazamientos y tensiones en los vértices hastial - contra bóveda, recomendándose por tanto considerar en estas zonas “elementos” que garanticen la disipación de estas tensiones. Una posible solución para esto podría ser el uso de la técnica “pata de elefante” del NATM para reforzar las paredes y disipar las tensiones en estas zonas. Como las presiones que soporta el túnel son enormes, se refuerzan las paredes con una especie de contrafuertes llamados “*patas de elefante*”. [57]

En sí, las patas de elefante no son más que un sobrecancho de excavación en la zona inferior de la bóveda a lo

largo de todo el túnel. Esta excavación es rellena con hormigón proyectado y malla donde apoya el marco reticulado donde se sustenta la estructura una vez se han excavado los bancos. [58]

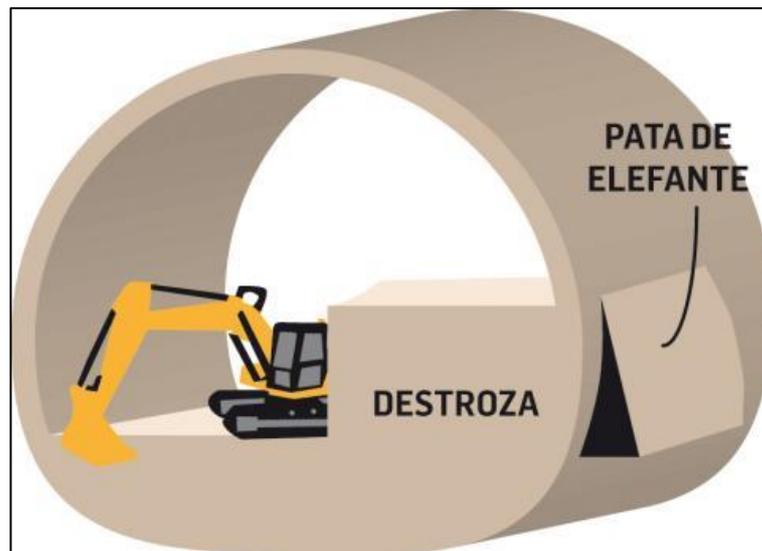


Ilustración 6-1 Pata de elefante en contorno de túnel. [57]

Se destaca, como a medida que aumenta la presión lateral o presión de confinamiento por medio del coeficiente lateral k (ilustraciones 5-35, 5-36 y 5-37) el contorno del túnel de herradura con discontinuidades Voronoi presenta máximos desplazamientos totales en zonas de contra bóveda y de hastiales. Se puede ver que las familias con discontinuidades o celdas irregulares concentran los mayores desplazamientos totales en la contra bóveda, mientras que las familias de celdas regulares o hexagonal, dicha concentración de desplazamiento se desplaza de las zonas de bóveda y contra bóveda en el caso isótropo y a las zonas de hastiales en el caso anisótropo. El efecto del aumento del parámetro k es notable en la morfología hexagonal, aumentando la deformación en los hastiales y reduciendo las mismas en bóveda y contra bóveda. No obstante, este efecto es aún mayor en la morfología irregular.

En el túnel de alcantarillado se concluye, como a medida que se incrementa la presión de confinamiento por medio del coeficiente lateral k (ilustraciones 5-38, 5-39, 5-40, 5-41, 5-42 y 5-43), el contorno del túnel de alcantarillado con discontinuidades paralelas y conjugadas presenta una concentración de los desplazamientos totales en bóveda, hastiales y vértice hastial-bóveda. Se destaca que las familias de discontinuidades con buzamientos menores (15°), concentran los mayores desplazamientos totales en zona de bóveda (paralelas) y hastiales (conjugada), mientras que las familias con buzamientos mayores (75°), dicha concentración de desplazamiento se sitúa en ambos vértices hastial-bóveda. El efecto del incremento del parámetro k se aprecia en el aumento de la deformación en hastiales y reducción de los mismos en zona de bóveda y solera. En esta última zona se aprecia un levantamiento por el efecto de confinamiento. La mayor concentración de los desplazamientos se puede ver en los vértices hastial- solera o contra bóveda.

Se aprecia, además, como a medida que aumenta la presión de confinamiento por medio del coeficiente lateral k (ilustraciones 5-44, 5-45 y 5-46), el contorno del túnel de alcantarillado con discontinuidades Voronoi presenta un levantamiento claro de la solera. Se observa también que las familias de discontinuidades con celda irregular presentan una concentración de los desplazamientos totales en los vértices hastial-solera, mientras que las familias de discontinuidades con celdas hexagonales, dicha concentración de desplazamiento se sitúa especialmente en solera o contra bóveda. El efecto del incremento del parámetro k se aprecia en el aumento de la deformación en vértice hastial-solera. En esta última zona se aprecia un levantamiento por la presión de confinamiento.

Del estudio de las deformadas finalmente se concluye:

- Se aprecia que la mayor ovalización de la sección del túnel cuando se incrementa la presión de confinamiento se produce en túneles circulares. Esta ovalización disminuye si las juntas o discontinuidades son del tipo Voronoi.
- En el túnel de herradura se dan las mayores deformaciones del contorno, siendo algo menores en el

túnel circular y bastante menores en el túnel tipo alcantarillado.

- Ante juntas paralelas o conjugadas, el efecto del aumento del coeficiente k provoca que aumente la deformación en zona de hastiales, y disminuya en zona de bóveda y contra bóveda.
- Para túneles circulares y de herradura el aumento del buzamiento de las juntas con respecto a la horizontal provoca una leve disminución de las deformaciones. Para túneles tipo alcantarillado el efecto es el contrario.
- La influencia del incremento del parámetro k o presión de confinamiento se aprecia especialmente en túneles de herradura con la concentración de los desplazamientos y las tensiones en los vértices hastial-contra bóveda, recomendándose por tanto considerar en estas zonas “elementos” que garanticen la resistencia y disipación de estas tensiones o desplazamientos (pata de elefante).
- El efecto del aumento del coeficiente k es notable en la morfología hexagonal, que va aumentando la deformación en los hastiales y reduciéndose en bóveda y contra bóveda a medida que aumenta esta relación. Por el contrario, este efecto apenas se aprecia en la morfología irregular.
- La morfología irregular de las juntas Voronoi presenta deformaciones algo mayores que la morfología hexagonal.
- Las diferentes deformadas y orientación de las familias de discontinuidades obtenidas para los distintos tipos de túneles y modelos de junta se podrán comprobar o verificar en un futuro trabajo en base al uso de herramientas con escáneres láser en 2D y 3D.

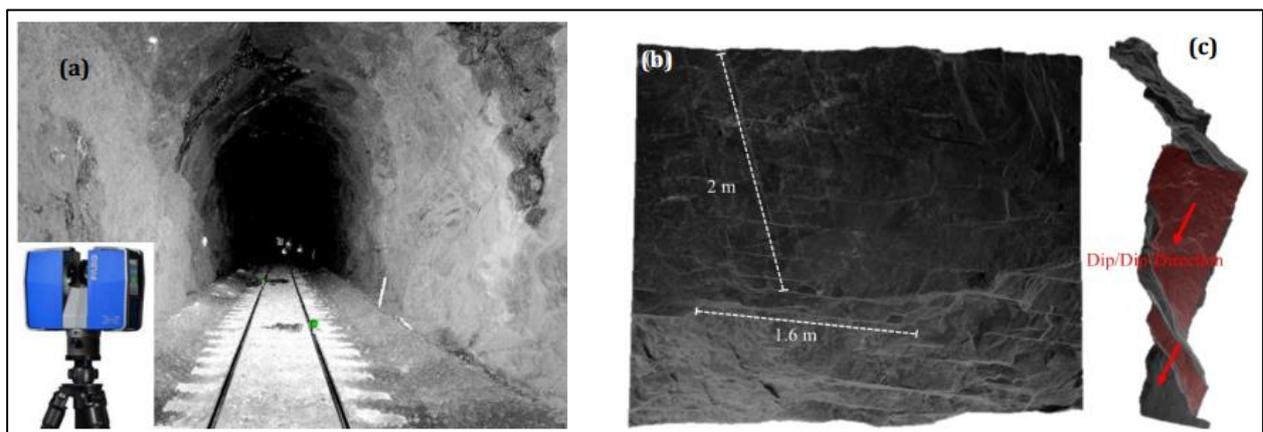


Ilustración 6-2 Herramientas con escáneres láser en 3D [59]

En la figura (a) de la ilustración 6-2 aparece representado el Faro Focus 3D Laser Scanner, perteneciente a la compañía Faro, y un ejemplo de la imagen TLS de un túnel (nube de puntos) generada por este instrumento. En la figura (b) aparecen representadas las mediciones de la nube de puntos TLS. Por último, en la figura (c) aparece representadas las longitudes y orientaciones de las discontinuidades.

6.3 Puntos de plastificación: Contorno del túnel

Se describe a continuación para cada geometría del túnel las zonas y el radio de plastificación del contorno del túnel y el efecto que tiene en la plastificación las presiones de confinamiento y buzamiento u orientación de las distintas familias de discontinuidades

En el túnel circular destaca para familias de discontinuidades paralelas y conjugadas (5-47, 5-48, 5-49, 5-50, 5-501y 5-52), la concentración de los puntos de plastificación en zonas donde intersecan las discontinuidades y el contorno del túnel. En el caso de buzamientos menores (15°) estos puntos se aprecian en zona de vértice hastial - contra bóveda y, si son mayores (75°) en zona de vértices hastial- bóveda o contra bóveda. Con el aumento de las presiones laterales se incrementa los puntos de plastificación y salen a relucir los puntos de extensión o tracción en zonas de bóveda y contra bóveda. En referencia a los radios de plastificación, se puede decir que en el caso de juntas conjugadas el espesor del radio es menor que en el caso de macizos rocosos con discontinuidades paralelas.

Se concluye para familias de discontinuidades tipo Voronoi (ilustraciones 5-53, 5-54 y 5-55), la concentración de estos puntos en zonas donde intersecan las discontinuidades y el contorno del túnel. La mayor se observa en zona de contra bóveda para celdas o mosaicos irregulares. En celdas regulares, estos puntos se sitúan en la zona de hastiales. Con el aumento de las presiones laterales se incrementa los puntos de plastificación y también salen a relucir los puntos de extensión o tracción en zonas de bóveda y contra bóveda. En cuanto a los radios de plastificación, se puede decir que son mayores que las juntas paralelas y conjugadas cuando se incrementa la presión lateral ($k=3$) y la celda o mosaico es de tipo irregular.

En el túnel de herradura se aprecia para familias de discontinuidades paralelas y conjugadas (ilustraciones 5-56, 5-57, 5-58, 5-59, 5-60 y 5-61), la concentración de estos puntos en zonas donde intersecan las discontinuidades y el contorno del túnel. Se observa dicha concentración para buzamientos menores (15°) en zona de vértice hastial- contra bóveda y cuando el buzamiento es mayor (75°) en zona de bóveda o contra bóveda. Con el aumento de las presiones laterales se observa un incremento de los puntos de plastificación y salen a relucir aquellos puntos de extensión o tracción fundamentalmente en zonas de bóveda y contra bóveda. En cuanto a los radios de plastificación, se puede decir que los espesores en geometría de herradura son menores que en sección circular.

Se observa para familias de discontinuidades Voronoi (ilustraciones 5-62, 5-63 y 5-64), la concentración de estos puntos en zonas donde intersecan las discontinuidades y el contorno del túnel. La mayor se observa en zona de contra bóveda para celdas o mosaicos irregulares. En celdas regulares, estos puntos se sitúan en el vértice bóveda-hastial. Con el aumento de las presiones laterales se incrementa los puntos de plastificación y salen a relucir los puntos de extensión o tracción en zonas de bóveda y contra bóveda. En cuanto a los radios de plastificación, se puede decir que son mayores que las observadas en juntas paralelas y conjugadas cuando se incrementa la presión lateral ($k=3$) y la celda o mosaico es de tipo irregular. La morfología hexagonal presenta una distribución más uniforme de los puntos de plastificación en el entorno del túnel.

En el túnel de alcantarillado se puede ver que, para familias de discontinuidades paralelas y conjugadas (ilustraciones 5-65, 5-66, 5-67, 5-68, 5-69 y 5-70), la concentración de estos puntos en zonas donde intersecan las discontinuidades y el contorno del túnel. Para buzamientos menores (15°), los puntos de plastificación se concentran en vértice hastial - bóveda y cuando el buzamiento es mayor (75°) en zona de hastiales. Con el aumento de las presiones laterales se incrementa los puntos de plastificación y salen a relucir los puntos de extensión o tracción en zonas de bóveda y vértices hastial-bóveda o solera. En cuanto a los radios de plastificación, se puede decir que son menores que las que se observan en túnel circular con discontinuidades paralelas, salvo para el caso de $k=3$ donde se extienden estos puntos hasta las juntas que se sitúan cerca del contorno del túnel.

Se destaca para familias de discontinuidades Voronoi (ilustraciones 5-71, 5-72 y 5-73), la concentración de estos puntos en zonas donde intersecan las juntas con el contorno del túnel. La mayor concentración se observa en zona de hastiales para celdas o mosaicos irregulares. En celdas regulares, estos puntos se sitúan en el vértice bóveda-hastial. Con el aumento de las presiones laterales se incrementa los puntos de plastificación y salen a relucir los puntos de extensión o tracción en zonas de bóveda y vértice bóveda-hastial. En referencia a los radios de plastificación, se puede decir que se incrementan cuando es mayor la presión lateral y la celda o mosaico es de tipo regular. La morfología hexagonal presenta una distribución más uniforme de los puntos de plastificación en el entorno del túnel.

Del estudio de los puntos de plastificación finalmente se concluye:

- La modificación de menor a mayor de la orientación o buzamientos de las familias de discontinuidades paralelas y conjugadas en túneles circulares o de herradura origina un cambio en la concentración de los puntos de plastificación de hastial - contra bóveda a zona de bóveda o simplemente contra bóveda.
- A medida que va aumentando el coeficiente lateral k se aprecia cómo van apareciendo más puntos de plastificación que se van concentrando en las zonas de bóveda y contra bóveda.
- La morfología Voronoi genera muchos más puntos de plastificación que el resto de las familias de discontinuidades.
- La morfología irregular de las juntas Voronoi genera una plastificación mayor que la morfología hexagonal, pero está presenta una distribución de los puntos de forma más uniforme.

- Aparecen muchos más puntos de plastificación con el túnel de tipo alcantarillado que para el resto de las geometrías, que presentan resultados similares.
- Con el aumento de las presiones laterales se incrementa los puntos de plastificación y salen a relucir los puntos de extensión o tracción en zonas de bóveda y contra bóveda.
- Aparecen puntos de plastificación por extensión o tracción en zonas de máxima curvatura como son las zonas de bóveda y contra bóveda o solera.
- Los túneles tipo alcantarillado presentan una distribución más uniforme de los puntos de plastificación en el contorno del túnel a partir de coeficientes laterales bajos, no como ocurría en el resto de las geometrías.
- En cuanto a los radios de plastificación en juntas paralelas y conjugadas, se puede decir que los espesores en geometría de herradura son menores que en sección circular. En túnel de alcantarillado estos espesores son mayores si se incrementa el coeficiente $k=3$ y las juntas se encuentra cerca del contorno del túnel.
- En cuanto a los radios de plastificación en juntas tipo Voronoi, se puede decir que son mayores que las mostradas en juntas paralelas y conjugadas cuando se incrementa la presión lateral ($k=3$) y la celda o mosaico es de tipo irregular. No obstante, en túnel alcantarillado, serán mayores a las citadas juntas si la celda o mosaico es de tipo regular o hexagonal.
- En relación con los puntos de plastificación, la sección de túnel más adecuada sería la de tipo herradura dado que el espesor del radio de plastificación es menor en este tipo de estructura para los modelos de junta analizados.

7 LÍNEA FUTURA DE ESTUDIO

Por último, en este capítulo se desarrollaran varias ideas extraídas del estudio realizado en este trabajo de cara a poder proyectar una línea futura de estudio, sobre la que continuar avanzando en este campo, y así poder llevar un mayor control del efecto de los distintos tipos de discontinuidades en un macizo rocoso.

En concreto se hablará sobre la implementación de la metodología del escáner laser 2D y 3D en túneles, y el uso de los ábacos desarrollados en el capítulo 5 de este trabajo.

7.1 Escáner láser 2D y 3D

Una posible línea de investigación futura para esta tesis sería el uso de escáneres 2D y 3D (ver Ilustración 7-1) para medir con precisión la evolución de los desplazamientos en el contorno de un túnel. Esto permitiría obtener mediciones precisas y en tiempo real del comportamiento del túnel ante diferentes estados tensionales, familias de discontinuidades y geometrías de túnel.



Ilustración 7-1 Escáner 3D. [60]

El uso de escáneres 2D y 3D para medir los desplazamientos en los contornos de los túneles es una técnica que se ha utilizado con éxito en otros campos como la construcción de puentes y edificios. Sin embargo, el uso de esta técnica en el estudio de túneles aún es limitado, por lo que su desarrollo y aplicación en este campo de investigación podría proporcionar nuevos conocimientos sobre el comportamiento de los túneles ante diferentes condiciones.

Para llevar a cabo esta línea de investigación, se necesitaría el diseño y construcción de un sistema de escaneo de alta precisión que permita obtener mediciones precisas y detalladas de los desplazamientos en los contornos de los túneles en tiempo real. Además, se necesitaría la recopilación y análisis de datos a largo plazo para proporcionar información más completa sobre la evolución del comportamiento del túnel en diferentes condiciones.

El uso de esta técnica podría permitir la identificación temprana de posibles planos de discontinuidad o deformaciones en el contorno del túnel, lo que permitiría la planificación de medidas preventivas y correctivas en el mantenimiento y reparación de los túneles. Adicionalmente, permitiría una mejor comprensión de cómo las diferentes familias de discontinuidades y geometrías de túnel afectan los desplazamientos en su contorno y, en consecuencia, su estabilidad y seguridad.

[61]

7.2 Ábacos de desplazamientos

Otra línea de investigación futura que se podría derivar de este estudio es la profundización en el uso de los ábacos obtenidos en el capítulo 5, los cuales representaban los desplazamientos horizontales máximos en hastiales y los desplazamientos verticales máximos en bóveda o contra bóveda de distintas familias de diaclasas y diferentes geometrías de túnel ante un incremento progresivo de la relación entre la carga horizontal y vertical del terreno.

Este enfoque permitiría continuar explorando el comportamiento de los túneles y su contorno ante diferentes cargas y tensiones, y podría proporcionar información valiosa para la planificación y construcción de túneles en diferentes configuraciones geológicas y topográficas.

Para llevar a cabo esta línea de investigación, se debería profundizar en el análisis de estos ábacos, y evaluar la conveniencia de ampliar su alcance y precisión. Además, sería necesario realizar nuevas mediciones y ensayos que permitan validar los datos obtenidos y mejorar su precisión.

Uno de los objetivos principales de esta línea de investigación podría ser establecer una relación más precisa entre la carga horizontal y vertical del terreno (o coeficiente lateral k) y los desplazamientos horizontales y verticales máximos en el túnel, lo que permitiría una mejor predicción de su comportamiento ante diferentes familias de discontinuidades. Esto podría proporcionar información muy útil para el diseño y construcción de túneles y para la planificación de medidas preventivas y correctivas en el mantenimiento y reparación de los túneles existentes.

REFERENCIAS

- [1] G. consulting, «Geomechanical consulting,» 2023. [En línea]. Available: <https://geomecanicaymecanicarocas.com/macizo-rocoso/>.
- [2] R. Goodman, Introduction to Rock Mechanics, 1989.
- [3] J. Castillo, Macizos rocosos, 2018.
- [4] I. T. a. U. S. A. (ITA), Manual de Diseño de Túneles.
- [5] Wikipedia, «Wikipedia,» 2023. [En línea]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Roca_plut%C3%B3nica.
- [6] [En línea]. Available: <https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Feconomiacircularverde.com%2F10-impresionantes-columnas-de-basalto-en-todo-el-mundo%2F&psig=AOvVaw0p0NAoj9VjFLpsZ7b-bMXr&ust=1690258331472000&source=images&cd=vfe&opi=89978449&ved=0CBEQjRxqFwoTCP C484y9poADF>.
- [7] [En línea]. Available: <https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fshamrockidiomas.com%2Fnoticias-shamrock%2F1a-calzada-del-gigante-contiene-unas-40000-columnas-de-basalto.htm&psig=AOvVaw0p0NAoj9VjFLpsZ7b-bMXr&ust=1690258331472000&source=images&cd=vfe&opi=89978449&ved=0CB>.
- [8] [En línea]. Available: https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fes.123rf.com%2Fphoto_56965543_falla-geol%25C3%25B3gica-en-una-pared-de-roca-caliza.html&psig=AOvVaw0bCAmHObccIQUom_rZEDaW&ust=1690259199558000&source=images&cd=vfe&opi=89978449&ved=0CBEQjRxqGAoTCLjztqrApoA.
- [9] [En línea]. Available: <https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fdimateria.com%2Frocas%2Fesquisto&psig=AOvVaw0DQod3dMrurv1ocNQguUrC&ust=1691055063354000&source=images&cd=vfe&opi=89978449&ved=0CBEQjRxqFwoTCOj5iJXVvYADFQAAAAAdAAAAABAE>.
- [10] B. B. y. E. Brown, Rock Mechanics for Engineers.
- [11] D. C. W. y. C. W. Mah, Rock Slope Engineering: Civil and Mining.
- [12] U. d. L. Laguna, 2023. [En línea]. Available: <https://campusvirtual.ull.es/ocw/course/view.php?id=94>.
- [13] [En línea]. Available: <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/8529757.pdf>.

- [14] [En línea]. Available: [https://tectonica.archi/materials/granito-postesado/#:~:text=El%20granito%20es%20un%20material,%2C3%20N%2Fmm%2C2%B2\)..](https://tectonica.archi/materials/granito-postesado/#:~:text=El%20granito%20es%20un%20material,%2C3%20N%2Fmm%2C2%B2)..)
- [15] [En línea]. Available: [https://www.researchgate.net/publication/39117826_Caracteristicas_mecanicas_del_marmol_de_Gualba_Barcelona_bajo_compresion_uniaxial#:~:text=500%2D700%20kg%2Fcm%2C,\(7.000%2D10.000%20psi\)..](https://www.researchgate.net/publication/39117826_Caracteristicas_mecanicas_del_marmol_de_Gualba_Barcelona_bajo_compresion_uniaxial#:~:text=500%2D700%20kg%2Fcm%2C,(7.000%2D10.000%20psi)..)
- [16] G. d. Canarias, 2023. [En línea]. Available: <https://www.gobiernodecanarias.org/optv/doc/labobras/galeria/geotecnia/index.html>.
- [17] [En línea]. Available: <https://www.finesoftware.es/ayuda-en-linea/geo5/es/resistencia-a-la-traccion-sobre-roca-01/>.
- [18] [En línea]. Available: http://info.igme.es/SidPDF/038000/796/Estudio%20geotecnico%20y%20de%20subsistencia.%20Ensayos%20de%20laboratorio/38796_0007.pdf.
- [19] [En línea]. Available: <https://bibliotecadigital.univalle.edu.co/bitstream/handle/10893/23371/3747%20C448.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- [20] [En línea]. Available: <http://ingenieriacivil.cedex.es/index.php/ingenieria-civil/article/view/489>.
- [21] [En línea]. Available: <https://geologiaweb.com/ingenieria-geologica/macizo-rocoso/>.
- [22] [En línea]. Available: <https://www.alamy.es/foto-un-fallo-rock-es-una-fractura-planar-o-discontinuidad-en-un-volumen-de-roca-en-el-que-ha-habido-un-desplazamiento-significativo-como-resultado-del-movimiento-de-masas-de-roca-90828054.html>.
- [23] [En línea]. Available: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1794-91652019000100043.
- [24] [En línea]. Available: <https://geol00.geol.uniovi.es/TDG/Volumen24/TG24-07.PDF>.
- [25] [En línea]. Available: https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fusuarios.geofisica.unam.mx%2Fgvazquez%2FyacimientosELIA%2Fzonadesplegar%2FClases%2FClase%252010%2520Pliegues.pdf&psig=AOvVaw0v_HgOGrSHDHQnxOn5--gW&ust=1690296492423000&source=images&cd=vfe&opi=89978449&ved
- [26] [En línea]. Available: <https://prezi.com/xovazqzrjsgu/anisotropia-rocas-anisotropicas/>.
- [27] [En línea]. Available: <https://escholarship.org/content/qt69w6d964/qt69w6d964.pdf>.
- [28] [En línea]. Available: <https://www.google.com/url?sa=i&url=http%3A%2F%2Fcivildocs.blogspot.com%2F2011%2F05%2Fdigramas-de-ruptura-de-mohr-suelos.html&psig=AOvVaw2LC9lTY28pKMODNFnxjJAI&ust=1690263975330000&source=images&cd=vfe&opi=89978449&ved=0CBEQjRxqFwoTCKDEm5HSpOADFQAAAAAdAAA>.

- [29] J. C. N. a. Z. R. Jaeger, *Fundamentals of Rock Mechanics* (4th ed.), 2007.
- [30] Wiley-Blackwell, Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics*, 1978.
- [31] G. F. Z. Q. L. & Z. A. N. Wang, *Expansion of rocks and soils: Mechanisms and control*. CRC Press., 2009.
- [32] N. P. S. S. M. & N. S. K. Kumar, Stability of gravity dam slope with consideration of rock mass expansivity. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering.*, 2019.
- [33] [En línea]. Available: <https://www.geotecniaconsultores.com/que-es-expansividad/>.
- [34] [En línea]. Available: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/feart.2021.805378/full>.
- [35] [En línea]. Available: <https://geotecniafacil.com/indice-schimazek/>.
- [36] [En línea]. Available: <https://geotecniafacil.com/abrasividad-cerchar-ensayo/>.
- [37] [En línea]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Estabilidad_de_taludes.
- [38] A. G. D. y P. M. Cedrún, «Caracterización geomecánica de suelos y rocas,» [En línea]. Available: https://ocw.unican.es/pluginfile.php/2899/course/section/2824/6.4.%20Medida%20de%20Discontinuidades_Revisado_OCW.pdf.
- [39] [En línea]. Available: https://oa.upm.es/4517/1/TESIS_MASTER_MIRIAM_CABRERA_CARPIO.pdf.
- [40] [En línea]. Available: <https://es.slideshare.net/MIRIANASCUAQUIROGA/resistencia-y-deformabilidad-de-roca>.
- [41] [En línea]. Available: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%291090-0241%281998%29124%3A3%28223%29#:~:text=The%20structural%20looseness%20and%20the%20permeability%20of%20rock,mass%20and%20hence%20the%20stability%20of%20nearby%20structure s..>
- [42] [En línea]. Available: <https://1library.co/article/c/C3%A1lculo-macizo-rocoso-an-C3%A1lisis-geomec-C3%A1nico-utilizando-m-C3%A9todo-macizo.wyexj5eq>.
- [43] [En línea]. Available: <https://geotecniafacil.com/martillo-schmidt-rocas/>.
- [44] J. Puig-Pey, «Introducción al método de los Elementos Finitos en 2D,» [En línea]. Available: https://personales.unican.es/puigpey/Lec11_2014_InterpDiscreEF2D_v6.pdf.
- [45] «Rocscience,» [En línea]. Available: <https://www.rocscience.com/>. [Último acceso: 2023].
- [46] O. C. & T. R. L. Zienkiewicz, *The Finite Element Method: Volume 2: Solid Mechanics.*, 1989.
- [47] [En línea]. Available: https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.matematicas10.net%2F2017%2F02%2Fejemplos-de-distribucion-normal.html&psig=AOvVaw36ZfoFCf3p0uo_7atCsvcj&ust=1690302010930000&source=images&cd

=vfe&opi=89978449&ved=0CBEQiRxqFwoTCJjo3unfp4ADFQAAAAAdAAAAAB.

- [48] W. S. Dershowitz, Rock joint systems, 1985.
- [49] Z. Bieniawski, Engineering Rock Mass classifications: A complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering., 1989.
- [50] [En línea]. Available: <https://www.cobraih.com/areas-de-negocio/tuneles/>.
- [51] [En línea]. Available: <https://tunnelsmanual.piarc.org/es>.
- [52] [En línea]. Available: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/6215/01.pdf?sequence=2&isAllowed=y>.
- [53] [En línea]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1003632622658229>.
- [54] [En línea]. Available: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1794-91652019000100043.
- [55] [En línea]. Available: <https://arreglos.biz/blog/metodo-de-excavacion-de-tuneles-perforacion-y-voladura/>.
- [56] [En línea]. Available: <https://blog.structuralia.com/metodos-de-excavacion-de-tuneles-perforacion-y-voladura>.
- [57] «Diario de Navarra,» [En línea]. Available: <https://www.diariodenavarra.es/noticias/navarra/zona-norte/2023/01/22/el-metodo-austriaco-el-construira-el-tunel-belate-555464-1009.html>.
- [58] [En línea]. Available: <https://es.scribd.com/document/325074955/Terminologia-de-Tuneles#>.
- [59] C. y. Futai, https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-28132017000100007, 2016.
- [60] [En línea]. Available: <http://geocaptiva.com/comparativa-de-perfil-de-tunel-en-guatemala/>.
- [61] S. V. C. & P. P. Cacciari y M. M. Futai, «Statistical-Based Generation of Joint Systems for Stability».
- [62] Autor, «Este es el ejemplo de una cita,» *Tesis Doctoral*, vol. 2, nº 13, 2012.
- [63] O. Autor, «Otra cita distinta,» *revista*, p. 12, 2001.
- [64] S. I. y. S. S. d. CV, «DOCUMENTO DESCRIPTIVO DEL PROCESO CONSTRUCTIVO Y CÁLCULO ESTRUCTURAL,» 2013.
- [65] H. y. Brown, 1980. [En línea].
- [66] C. C. Villegas, Mecánica de Suelos y Cimentaciones.