



UNIVERSIDAD DE EXTREMADURA

Escuela Politécnica

Grado en Ingeniería Civil.- Transportes y Servicios Urbanos

Trabajo Fin de Grado

ESTUDIO DE EXCAVACIÓN DE TÚNELES MEDIANTE EL NUEVO MÉTODO AUSTRIACO A TRAVÉS DEL ANÁLISIS POR ELEMENTOS FINITOS

Marta Romero García-Rubio.

Julio, 2015.

Dedicado a mi padre, Juan I. Romero Martín. Por ser un gran químico, un gran profesional y una gran persona pero, ante todo, por ser todavía mejor padre. Me parecía injusto que la persona que leyese mi trabajo se acordase de mi nombre y no del tuyo.

Gracias papá.

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN Y OBJETIVO.....	7
1.1	Objetivo del estudio.....	7
1.2	Metodología empleada.....	8
1.3	Estructura del trabajo.....	8
2	HISTORIA Y EVOLUCIÓN DE LOS TÚNELES.....	10
3	OBRAS SUBTERRÁNEAS. CONSIDERACIONES GENERALES.....	14
3.1	Geología y geotecnia.....	14
3.1.1	Conceptos generales de suelos y rocas.....	16
3.1.2	Consideraciones geológicas de localización, diseño y construcción.....	20
3.1.3	Geotecnia aplicada a la construcción de túneles.....	24
3.2	Clasificaciones geomecánicas de rocas.....	25
3.2.1	Clasificación RMR de Bieniawski.....	26
3.2.2	Clasificación de Burton.....	30
3.2.3	Correlaciones entre RMR y Q.....	31
3.2.4	Clasificación de Lauffer.....	32
4	CONSTRUCCIÓN DE TÚNELES.....	34
4.1	Métodos tradicionales.....	34
4.1.1	Método Belga.....	35
4.1.2	Método Suizo.....	36
4.1.3	Método Austriaco.....	38
4.2	Métodos nuevos.....	39
4.2.1	Tuneladora.....	39
4.2.2	Nuevo Método Austriaco.....	40
4.3	Sostenimiento y revestimiento.....	47
5	RIESGOS SUPERFICIALES.....	51
5.1	Distribución de los asentamientos verticales en el terreno.....	51
5.1.1	Asentamiento vertical al eje de un túnel.....	52
5.1.2	Distribución longitudinal del asentamiento vertical.....	53
5.1.3	Túneles Múltiples.....	55
6	TÚNEL DE SANTA MARINA.....	57

6.1	Situación.....	57
6.2	Geología.	58
7	ESTUDIO DEL NUEVO MÉTODO AUSTRIACO DE CONSTRUCCIÓN DE TÚNELES.....	63
7.1.1	Riesgos geológicos.....	64
7.1.2	Estudio tensional del terreno durante la excavación y revestimiento.	71
7.1.3	Sostenimiento y revestimientos propuestos.	86
7.1.4	Presupuesto.....	95
8	LÍNEAS FUTURAS	96
9	CONCLUSIONES	98
10	REFERENCIAS.....	100
11	ANEJOS	102

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1.- A la izquierda una imagen del túnel construido bajo las aguas del río Támesis y a la derecha otra del escudo utilizado y patentado por Brunel para este mismo proyecto (1843)..	13
Figura 3.1.-Sondeo	16
Figura 3.2.- A la izquierda una imagen de la construcción de un túnel en suelo y a la derecha otra de la construcción de un túnel en roca	20
Figura 3.3.-Movimientos del terreno. De izquierda a derecha: Soliflucción, creep y deslizamiento.	23
Figura 4.1.-Orden de la construcción de un túnel por el Método Belga en terrenos resistentes	35
Figura 4.2.-Planchas Bernold.....	37
Figura 4.3.-Método Suizo o Bernold	37
Figura 4.4.-Orden de la construcción de un túnel por el Método Austriaco	38
Figura 4.5.-Vista de las cabezas de corte de dos tuneladoras tipo topo (arriba) y dos tipo escudo (abajo).....	40
Figura 4.6.-Construcción de un túnel por el Nuevo Método Austriaco.	42
Figura 4.7.-Hundimiento del barrio de El Carmel (Barcelona)	46
Figura 4.8.-Esquema del bulonado de un túnel	47
Figura 4.9.-Gunitado mediante robot mecánico.....	48
Figura 4.10.-Cerchas metálicas	48
Figura 4.11.-Paraguas de micropilotes.....	49
Figura 4.12.-Revestimiento de hormigón bombeado con carro de encofrado	49
Figura 4.13.-Dovelas prefabricadas de hormigón	50
Figura 5.1.-Distribución del asentamiento vertical sobre un túnel (Mair et al.,1996).....	52
Figura 5.2.-Perfil de asentamiento vertical (Schlosser et al, 1985).....	53
Figura 5.3.-Curso del asentamiento longitudinal en la superficie	53
Figura 5.4.-Curva de Gauss en relación con la distancia a la excavación.....	54
Figura 5.5.-Evolución del asentamiento en la superficie durante la excavación de una galería con escudo	54
Figura 5.6.-Asentamiento superficial debido a la realización de varias galerías (Schlosser, 1985)	56

Figura 6.1.-Plano de situación del túnel de Santa Marina	57
Figura 6.2.-Perfil Geotécnico.....	60
Figura 7.1.- Combinación J1-J2-J3	66
Figura 7.2.- Combinación J1-J2-J4	66
Figura 7.3.- Combinación J1-J2-J5	67
Figura 7.4.- Combinación J1-J3-J4	67
Figura 7.5.- Combinación J1-J3-J5	68
Figura 7.6.- Combinación J1-J4-J5	68
Figura 7.7.- Combinación J2-J3-J4	69
Figura 7.8.- Combinación J2-J3-J5	69
Figura 7.9.- Combinación J2-J4-J5	70
Figura 7.10.- Combinación J3-J4-J5	70
Figura 7.11.- Sección de la Excavación del Modelo.....	72
Figura 7.12.- Modelo Geométrico de la Excavación.....	73
Figura 7.13.- Condiciones de mallado	73
Figura 7.14.- Mallado del Modelo	74
Figura 7.15.- Propiedades del campo de tensiones	75
Figura 7.16.- Excavación avance- Tensiones máximas (tensiones de compresión).....	78
Figura 7.17.- Excavación avance- Tensiones mínimas.....	78
Figura 7.18.- Excavación avance- Compresión en hormigón proyectado (mínima y máxima) ...	79
Figura 7.19.- Excavación avance- Tracción en bulones (mínima y máxima)	79
Figura 7.20.- Avance- Factor de Seguridad	80
Figura 7.21.-Excavación destroza- Tensiones máximas (tensiones de compresión)	80
Figura 7.22.- Excavación destroza- Tensiones mínimas.....	81
Figura 7.23.- Excavación destroza- Compresión en hormigón proyectado (mínima y máxima)	81
Figura 7.24.- Excavación destroza- Tracción en bulones (mínima y máxima)	82
Figura 7.25.- Destroza- Factor de Seguridad.....	82
Figura 7.26.- Factor de Seguridad sin sostenimiento.....	83
Figura 7.27.- Factor de Seguridad con sostenimiento	83
Figura 7.28.- Factor de Seguridad con revestimiento	84
Figura 7.29.- Factor de seguridad del sostenimiento (opción 1.- sólo sostenimiento)	84
Figura 7.30.- Factor de seguridad del sostenimiento (opción 2- sostenimiento y revestimiento)	85
.....	85
Figura 7.31.- Factor de seguridad del revestimiento (opción 2- sostenimiento y revestimiento)	85
.....	85

Figura 7.32.- Combinación J1-J2-J3 (sostenimiento).....	87
Figura 7.33.- Combinación J1-J2-J4 (sostenimiento).....	88
Figura 7.34.- Combinación J1-J2-J5 (sostenimiento).....	88
Figura 7.35.- Combinación J1-J3-J4 (sostenimiento).....	89
Figura 7.36.- Combinación J1-J3-J5 (sostenimiento).....	89
Figura 7.37.- Combinación J1-J4-J5 (sostenimiento).....	90
Figura 7.38.- Combinación J2-J3-J4 (sostenimiento).....	90
Figura 7.39.- Combinación J2-J3-J5 (sostenimiento).....	91
Figura 7.40.- Combinación J2-J4-J5 (sostenimiento).....	91
Figura 7.41.- Combinación J3-J4-J5 (sostenimiento).....	92

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3-1.-Clasificación de las rocas según su resistencia a compresión simple	17
Tabla 3-2.-Características físico-mecánicas de varios tipos de rocas.....	18
Tabla 3-3.- Orientaciones relativas entre las juntas y el eje de la cavidad	28
Tabla 3-4.- Parámetros de Clasificación y sus Valores (Bieniawski, 1989).....	28
Tabla 3-5.-Ajuste de Valores por las Orientaciones de las Juntas (Bieniawski, 1989)	29
Tabla 3-6.- Determinación de la clase del macizo rocoso (Bieniawski, 1989).....	29
Tabla 3-7.- Relación entre RMR y propiedades geomecánicas.....	29
Tabla 3-8.- Recomendaciones Indicativas para la excavación y el sostenimiento de túneles excavados en roca (Bieniawski, 1989).....	30
Tabla 3-9.-Clasificación de Burton de los macizos rocosos.....	31
Tabla 3-10.- Intervalos de valores del RMR y Q para categorías similares de macizos rocosos .	32
Tabla 3-11.-Clasificación de Lauffer	32
Tabla 3-12.- Clasificación Rabcewic, Müller	33
Tabla 6-1.-Principales unidades litológicas del túnel de Santa Marina.....	58
Tabla 6-2.-Tramificación de cada unidad litológica.....	61
Tabla 6-3.-Caracterización geotécnica de materiales. Sustrato rocoso	61
Tabla 6-4.-Caracterización geotécnica de materiales tipo suelo	62
<i>Tabla 7-1.-Cálculo del Espesor Medio de la Unidad Litológica de las Cuarzitas (Oc).....</i>	<i>63</i>
Tabla 7-2.-Cálculo del Espesor Medio de cada material con respecto a la parte superior del túnel (h=R=6,4m).....	64
Tabla 7-3.-Valores Geotécnicos empleados para las simulaciones.....	64
Tabla 7-4.- Características de las familias de cuñas	65
Tabla 7-5.-Propiedades del hormigón.....	77
<i>Tabla 7-6.- Comparación del Factor de Seguridad de las Cuñas</i>	<i>92</i>

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVO.

La Real Academia de la Lengua Española define el término túnel como “paso subterráneo abierto artificialmente para establecer una comunicación”.

No obstante, bajo el punto de vista de la ingeniería civil, que es el ámbito en el que se mueve el presente documento, se puede definir de forma genérica un túnel como una obra subterránea de carácter lineal que permite el transporte de personas o materiales entre ciudades o lugares de importancia a través de un trazado adecuado y con una longitud reducida.

En general, la construcción de túneles se plantea, fundamentalmente, para salvar los accidentes geográficos causados por los grandes sistemas montañosos. Pero también existen túneles mineros para acceder al frente mineral y túneles subacuáticos que salvan grandes masas de agua (como el Eurotúnel que une Francia e Inglaterra bajo el Canal de la Mancha), o túneles urbanos que ahorran espacio y facilitan el transporte metropolitano (líneas de metro y avenidas subterráneas).

En cualquier caso, las técnicas de construcción de túneles se están mejorando y perfeccionando continuamente, tanto en el aspecto de seguridad como en el de rendimiento. Sin embargo, el aspecto económico es también un pilar importante en la construcción, por lo que surge la necesidad de encontrar la mejor técnica de construcción para el aprovechamiento de los recursos disponibles a un costo de operación y manutención bajos.

1.1 Objetivo del estudio.

El presente trabajo, basándose en el estudio de los efectos tensionales del terreno, pretende conocer en profundidad la construcción de túneles mediante el Nuevo Método Austriaco (NTMA), teniendo en cuenta los factores de seguridad y de economía según el tipo de material a excavar y la longitud del túnel, ejecutando un sostenimiento y revestimiento válidos y el presupuesto total de la obra.

1.2 Metodología empleada.

Para alcanzar el fin propuesto se ha seguido la siguiente metodología:

- Se ha tomado como referencia el túnel de Santa Marina (en Grimaldo), perteneciente a la línea de AVE Madrid-Lisboa, tomando como terreno representativo el tipo de roca de la unidad litológica Oc (cuarcitas).
- El cálculo de tensiones y coste del método correspondiente es el resultado de la construcción hipotética de la totalidad del túnel de Grimaldo mediante un único sistema constructivo: El Nuevo Método Austriaco (NTMA).
- Para el cálculo de tensiones se ha realizado el monitoreo del terreno teniendo en cuenta la construcción gradual del túnel, según el método constructivo, mediante el programa *Phase* de la firma Rocscience, basado en el método de elementos finitos.
- Se ha estudiado el riesgo geológico de desprendimientos de cuñas antes y después del sostenimiento a través del programa *Unwedge 4.0*.
- El coste total del método es calculado, a través de las unidades de obra correspondientes, mediante el programa *Presto*, siendo este coste total función de las tensiones y deformaciones producidas en el terreno por la construcción del túnel según el método.

1.3 Estructura del trabajo.

En principio, como introducción al mundo de los túneles, se dará a conocer el origen y evolución de estas construcciones a lo largo de la historia.

A continuación, como antecedente a las consideraciones constructivas y el análisis de los métodos de construcción de un túnel, veremos las consideraciones generales que hay que tener en cuenta en cuanto al terreno atravesado por el túnel.

En los capítulos siguientes conoceremos los principales métodos de construcción y la influencia que tienen sobre el entorno superficial del túnel.

Posteriormente haremos un breve resumen del túnel de Santa Marina que nos servirá como introducción al trabajo que realmente se pretende realizar en este documento: el estudio, mediante elementos finitos, de modelización y análisis tensional del Nuevo Método Austriaco de excavación de túneles.

2 HISTORIA Y EVOLUCIÓN DE LOS TÚNELES.

El túnel arranca de la necesidad de superar un obstáculo natural, generalmente un macizo montañoso. Pero, además de la montaña, existen otras barreras que se pueden salvar mediante túneles como los cursos de agua, fluviales o marinos, y las zonas urbanas densamente edificadas en las que a menudo se incorporan túneles.

Si bien el túnel en sentido estricto se caracteriza por su marcado carácter lineal, aquí se considerará, por extensión, el término túnel en un sentido amplio, no sólo como obra lineal sino como espacio subterráneo que incluye desde la minería y las cavernas hasta amplios recintos subterráneos transitables dentro de lo que podría englobarse como urbanismo y espacio subterráneo.

El arte de los túneles se funde en sus orígenes con el arte de la minería. La mina más antigua que se conoce en el mundo se localiza en el cerro de Bomvu, en Swazilandia, y data del año 40.000 a.C.

Se puede considerar que el primer método de perforación de galerías mineras y, posteriormente de túneles, fue la técnica del fuego, consistente en provocar un incendio en el frente de ataque para luego sofocarlo súbitamente con agua fría produciendo un brusco gradiente térmico que da lugar al resquebrajamiento de la roca.

Desde el punto de vista de la ingeniería, el primer túnel de la historia, allá donde ésta se difumina con el territorio del mito, fue el que, según la leyenda, mandara construir Semíramis, hija de la diosa siria Derceto, bajo el río Éufrates para comunicar el Palacio y el Templo de Belos en la Babilonia del 2200 a.C. En realidad, se trataba de un falso túnel ya que no se perforó en galería sino mediante zanja a cielo abierto y posteriormente recubierta, para lo cual se desviaron las aguas del Éufrates aprovechando el período de estiaje.

El siguiente túnel construido bajo el cauce de un río se perforó cuatro mil años después de aquel de Babilonia, obra de los Brunel padre e hijo quienes, tras veinte

años de lucha denodada y arrojo, lograron dominar las furiosas aguas del río Támesis que se resistía a ver perforado su lecho.

A lo largo de la historia y en el seno de distintas culturas se han proyectado y construido túneles con distintos motivos. Así, mientras que en el antiguo Egipto y en las culturas orientales, el túnel tenía un marcado carácter religioso, en zonas como las Tierras de Canaán (siglo X a.C.) el propósito no era místico o religioso sino ingenieril, concretamente hidráulico. Tenían como fin la captación de aguas y el abastecimiento a las ciudades.

También merece especial atención la época del Imperio Romano. Los romanos construyeron túneles con muy diversos propósitos: galerías mineras, túneles para abastecimiento de agua, para alcantarillado, para el drenaje de lagos volcánicos, en las calzadas romanas, sin olvidar los túneles de propósito militar y las catacumbas. En la España romana destacaron las explotaciones mineras de Montefurado, en Lugo, y Las Médulas, en León.

Ya en la Edad Media, los túneles pierden esa potencia como obras vigorosas de ingeniería civil y derivan en galerías y pasadizos en castillos y fortalezas, obras menores. Durante este período, la minería se robustece y consolida, fundamentalmente en Centroeuropa, surgiendo al filo del Renacimiento la obra maestra de la minería *De Re Metallica* de Georgius Agrícola, publicada en el siglo XVI. Dicha obra recoge con minuciosidad en su texto y en sus grabados las prácticas y técnicas mineras, siendo un libro básico de consulta durante los dos siglos siguientes a su publicación.

El Renacimiento marca el resurgir del hombre así como el de los túneles tras el letargo de la época medieval. Leonardo da Vinci concibe niveles subterráneos en sus proyectos de ciudades y piensa en la posibilidad de perforar túneles allá donde los canales se encuentran con barreras montañosas.

Pero es en el siglo XVIII cuando surge la Era de los Canales y dentro de ella los túneles comienzan a adquirir peso propio. Los túneles para canales fueron iniciados por Jean-Baptiste Colbert (1619-1683) bajo el reinado del Rey Sol (Luis XIV) con el Canal del

Midi, en Francia, para la unión de los dos mares (Atlántico y Mediterráneo). El primero lo dirigió Pierre-Paul Riquet en Malpas, cerca de Beziers. Este túnel, de 155 m de longitud, 6,5 m de altura y 8 de anchura, fue perforado empleando la pólvora por primera vez. Así comienza la Era de los túneles para canales: tras él muchos túneles se construirán en las siguientes décadas destacando los túneles ingleses para canal, muchos de ellos obra de ese prodigioso ingeniero que se llamó James Brindley.

La experiencia adquirida con la construcción de túneles para canal resultaría valiosísima en el período siguiente, la Era de los Ferrocarriles.

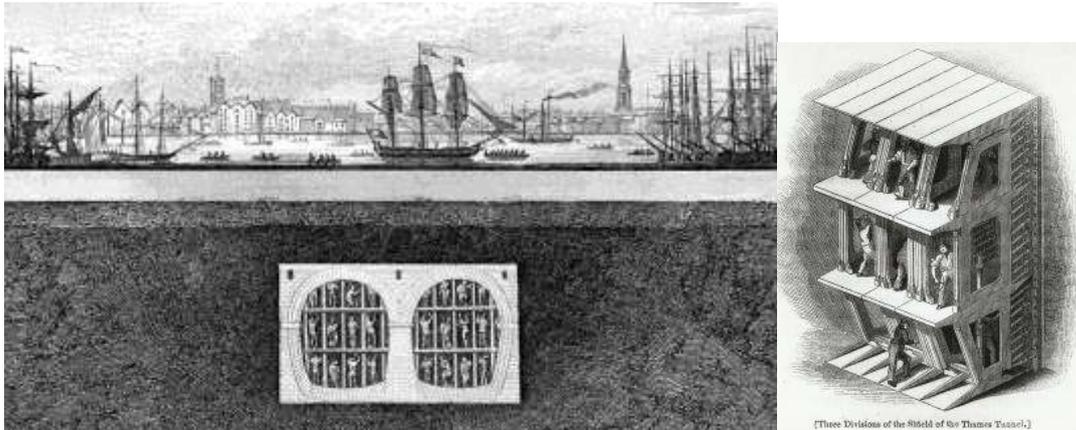
En la historia de los Ferrocarriles, que se desarrolla a partir del siglo XIX, los túneles tuvieron gran auge, incorporando progresivamente maquinaria y procedimientos constructivos a partir de los cuales el esfuerzo manual va cediendo en pro de una incipiente mecanización. El primer túnel de ferrocarril fue el de Terre-Noir en Francia, de la línea Roanne-Andrezieux, camino de carriles traccionado por caballos, construido en 1826. Con las primeras locomotoras de vapor el desarrollo del tren estaba decidido.

Durante este período también tiene lugar la gesta de la perforación del primer túnel bajo el Támesis entre Rotherhithe y Wapping (Figura 2.1), el primero que se construye en terreno blando y con enorme presencia de agua y en el que por primera vez se aplica la técnica del escudo que patentase Marc Brunel, inaugurado en marzo de 1843 tras veinte años de brutal lucha contra las inundaciones del Támesis (en cinco ocasiones) y contra la quiebra financiera.

El desarrollo de los ferrocarriles como un gran modo de transporte terrestre llevó a una revolución en el transporte en todo el mundo y a un cambio trascendental en el estilo de vida. [1]

Curiosamente, el primer túnel ferroviario de España se construyó en la primera línea de tren de la Península: Barcelona-Mataró, que fue impulsada por el catalán Miguel Biada y Bunyol en 1848. Ésta fue la primera línea de ferrocarril construida en la península, pero no la primera línea de ferrocarril español ya que ésta se construyó entre 1835 y 1837 en la isla de Cuba perteneciente a la Corona Española.

Figura 2.1.- A la izquierda una imagen del túnel construido bajo las aguas del río Támesis y a la derecha otra del escudo utilizado y patentado por Brunel para este mismo proyecto (1843)



Con la Revolución Industrial, el invento de la máquina de vapor y su aplicación al transporte ferroviario se produjo el resurgimiento de los túneles y se avanzó en el diseño y construcción de los mismos.

Los siguientes avances fueron debidos a diversas causas. Así, el descubrimiento de la electricidad y la potencia eléctrica propició la aparición del ferrocarril subterráneo: el metro. Por otra parte, las centrales de energía dieron lugar a los túneles para enfriamiento de agua y para conducción de cables. La máquina de combustión interna, no sólo extendió la potencia de la ingeniería sino que dio lugar al motor de explosión, lo que condujo al desarrollo de las carreteras y por tanto a la demanda de un número creciente de túneles para vehículos a motor, no sólo perforados bajo montañas sino también bajo colinas menores o incluso bajo los cauces de los ríos.

Son innumerables los túneles construidos desde entonces hasta la actualidad, así como las mejoras en las técnicas y elementos constructivos que poco a poco han alcanzado un grado de eficacia inimaginable. Se han desarrollado diversos sistemas o métodos constructivos, como el Belga, Suizo y Austriaco, o el Nuevo Método Austriaco, y se han introducido con posterioridad nuevos métodos con tuneladoras. Todos ellos serán estudiados en el *Capítulo 4: Construcción de Túneles*.

3 OBRAS SUBTERRÁNEAS. CONSIDERACIONES GENERALES.

Todas las construcciones subterráneas necesitan de una detallada y extensa investigación antes de su proyecto para que se pueda hacer la mejor elección de su trazado y diseño. Esta necesidad es, sin duda, mayor que para otro tipo de construcciones e implicará el estudio geológico del terreno, de sondeos y de galerías de reconocimiento. No obstante, no hay que olvidar que la investigación continuará realizándose también durante la construcción.

3.1 Geología y geotecnia.

Como primer paso y con carácter fundamental, antes de comenzar una obra subterránea es necesario conocer las características geológicas y geotécnicas de los terrenos que se van a perforar y que constituyen el ambiente físico del suelo y del subsuelo.

Las características geológicas generales (geología, morfología, hidrología, tectónica, etc.) de la zona de excavación se pueden obtener, en nuestro país, consultando los mapas e informes publicados por el Instituto Geológico y Minero de España (IGME). Su conocimiento nos ayuda a tener una visión preliminar de la zona en cuanto a tipos de materiales existentes (rocas, suelos), condiciones hidrogeológicas (permeabilidad, drenaje, acuíferos) zonas de fractura y fallas, riesgos geológicos, etc.

Todos estos datos son de carácter general y pueden ser insuficientes en determinadas zonas, por lo que se deben complementar con un minucioso estudio geotécnico.

Las características geotécnicas particulares de la zona nos indicarán la influencia que los materiales y condiciones existentes tienen sobre la construcción que se pretende realizar (resistencia del terreno, capacidad portante, empujes, etc.). Estas características geotécnicas se obtienen mediante reconocimientos y ensayos in situ del

tipo sondeos, galerías de reconocimiento, penetrómetros, calicatas y métodos geofísicos (sísmica de refracción, resistencia eléctrica y métodos magnéticos y gravimétricos).

Los sondeos son perforaciones que se realizan en el terreno con objeto de conocer la naturaleza y localización de las diferentes capas del terreno (Figura 3.1).

Aunque existen varios tipos de sondeos los más utilizados son los realizados a rotación con recuperación de testigo. Este tipo de sondeos permite entre otros aspectos, la obtención de la siguiente información:

- Tipos de terreno existente, según profundidad, mediante análisis de los testigos recuperados
- Obtención y ensayo de muestras representativas, con mayor o menor grado de alteración.
- Realización de ensayos in situ, a lo largo del sondeo.
- Instalación de tuberías piezométricas para observar la evolución del nivel freático.
- Colocación de cualquier otro tipo de auscultación, cuando fuese procedente.
- Pruebas de penetración dinámica o estática.

Por tanto, los sondeos nos darán información sobre la naturaleza de las distintas capas, su consistencia, resistencia, grado de humedad, presencia de agua, etc.

Más costosos, pero también más instructivos, son los sondeos por pozos, ya que la observación y toma de datos es directa en las paredes del pozo y por lo tanto no existe contaminación de unos terrenos con otros. En túneles de montaña son de difícil realización debido a la gran profundidad a la que habría que excavar; no obstante, conviene hacerlos al menos en la zona de las bocas y alguno intermedio.

Figura 3.1.- Sondeo



Los túneles de reconocimiento son, también un método de exploración importante para la construcción del túnel. Se pueden excavar partiendo de las bocas del túnel o del fondo de los pozos de sondeo; pueden llevar la dirección del eje como túnel piloto que posteriormente será ampliado, o pueden ir en una dirección paralela y a la distancia conveniente para su posterior utilización como galería de servicios o como túnel de drenaje o de ventilación.

En los terrenos permeables, al igual que los pozos, tienen el inconveniente de servir de drenaje, y si la excavación del túnel definitivo no se lleva a cabo en un tiempo prudencial, cuando se llega a estas zonas pueden haber cambiado sus características por saturación de los terrenos. Sin embargo, en terrenos rocosos son muy útiles para determinar el método de arranque más rentable según la dureza de la roca, prever la velocidad de avance y el comportamiento de ésta. [2]

3.1.1 CONCEPTOS GENERALES DE SUELOS Y ROCAS.

En ingeniería se define el suelo como cualquier material no consolidado compuesto de distintas partículas sólidas, líquidas y gaseosas. El suelo contiene una amplia variedad de materiales tales como la grava, la arena y las mezclas arcillosas, siendo fácilmente excavable.

Por su parte, la roca se define como un agregado natural de partículas minerales unidas mediante grandes fuerzas cohesivas que, para ser excavado, es necesario usar taladros, cuñas, explosivos y otros procedimientos de fuerza bruta.

El grado mínimo de dureza que caracteriza a una roca se ha fijado como la resistencia a compresión simple de 1 MPa (10 Kg/cm²). No obstante, esta línea divisoria entre el suelo y la roca no está tan clara en todos los casos; hay una serie de materiales, desde el suelo más suelto hasta la roca más dura y cualquier división entre las dos categorías es arbitraria. En cualquier caso este valor puede tomarse como algo indicativo, no definitivo.

La clasificación de las rocas, desde el punto de vista ingenieril se complica debido a su composición estructural y a sus discontinuidades. Una roca que es dura pero que está fracturada, puede ser más fácil de excavar que una blanda pero de un material más cohesivo. Además, la roca dura fracturada puede que necesite ser entibada, cuando la excavación es profunda, mientras que la roca blanda puede sostenerse sin soporte alguno.

La resistencia de una roca es el factor más importante en ingeniería (más que su textura o clasificación geológica). En la Tabla 3-1 se muestra la clasificación de las rocas en función de su resistencia a compresión simple y en la Tabla 3-2 se presentan algunas características físico-mecánicas de distintos tipos de rocas.

Tabla 3-1.-Clasificación de las rocas según su resistencia a compresión simple

DESCRIPCIÓN	RESISTENCIA COMPRESIÓN SIMPLE (Kg/cm ²)	HUELLA Y SONIDO
Muy blanda	10-15	El material se disgrega completamente con un golpe del pico del martillo y se deshace con navaja.
Blanda	50-250	El material se indenta de 1,5 a 3 mm con el pico del martillo y se deshace con la navaja.
Media	250-500	El material NO se deshace con la navaja. La muestra sostenida en la mano se rompe con UN (1) golpe de martillo.
Moderadamente dura	500-1000	La muestra se rompe con VARIOS golpes de martillo.
Dura	1000-2500	La muestra depositada en el suelo se rompe con UN (1) golpe.
Muy dura	> 2500	La muestra se rompe con dificultad a golpes con el pico del martillo. Sonido MACIZO.

Fuente: Conanma. "Capítulo 12: Geotecnia"

Tabla 3-2.-Características físico-mecánicas de varios tipos de rocas

TIPO DE ROCA	RESISTENCIA A COMPRESIÓN (Kg/cm ²)	DENSIDAD (Tm /m ³)
Andesita	1.500-2.500	2,5 a 2,8
Arcillita	280-800	2,2 a 2,7
Arenisca	80-2.000	1,6 a 2,9
Basalto	2.000-4.000	2,7 a 2,8
Caliza	800-1.500	1,5 a 2,8
Conglomerado	1.400	2,0 a 2,7
Cuarcita	900-4.700	2,3 a 2,7
Dacita	1200-5000	2,5 a 2,75
Diabasa	1.600-2.400	2,8 a 3,1
Dolomía	360-5.600	2,2 a 2,9
Esquisto	108-2.300	2,7 a 2,9
Gabro	1500-2800	2,8 a 3,1
Gneis	1.500-3.000	2,5 a 2,8
Granito alterado	108-1.450	2,5 a 2,6
Granito sano	800-2.700	2,5 a 2,8
Grauvaca	2.000-2.500	2,6 a 2,7
Marga	35-1.970	2,6 a 2,7
Mármol	800-1.500	2,6 a 2,8
Micacita	200-653	2,4 a 3,2
Pizarra	2.000-2.500	2,7 a 2,8
Riolita	800-1600	2,45 a 2,6
Traquita	3.300	2,70
Yeso	40-430	2,2 a 2,3

Fuente: Conanma. "Capítulo 12: Geotecnia"

En cualquier caso, el factor más importante para el proyecto de construcción de un túnel es la reacción del suelo o de la roca a los esfuerzos a los que estará sometido. Esta reacción a los esfuerzos, depende de la composición de los suelos y de las rocas, y fundamentalmente, en el caso de los suelos, de su grado de humedad. No es lo mismo una arcilla seca, que presenta buena respuesta durante su excavación, que esa misma arcilla en estado de saturación que es extremadamente inestable.

Dependiendo de las características del terreno que atravesase, podemos distinguir dos tipos de túneles: túneles en suelos y túneles en roca.

TÚNELES EN SUELOS

Son fácilmente excavables y su método de construcción está regido por la capacidad del suelo para sostenerse a sí mismo: temporalmente, durante el proceso de la construcción y, permanentemente, para aguantar las presiones que se producen en el sistema de soporte. Ambas están relacionadas con la profundidad del túnel y su diámetro, las propiedades elásticas y la resistencia del suelo y con la presión del agua subterránea.

Con la excepción de algunas arcillas resistentes y formaciones parcialmente saturadas, la mayoría de los túneles en tierra requieren soportes tanto durante la construcción como después.

El revestimiento permanente se construye dentro de un escudo a medida que progresa la excavación. En algunos casos, el soporte temporal de planchas de sostenimiento pasa a ser definitivo, pero, generalmente, se protege contra la corrosión con una cubierta de hormigón. Si las planchas de sostenimiento no son adecuadas, se construye un revestimiento permanente de hormigón armado.

Es fundamental en los túneles en suelo emplear soportes durante su construcción. Los revestimientos temporales, el drenaje, la estabilización del suelo y la presión de aire interior para balancear parcialmente la presión del agua, son medios auxiliares utilizados por los constructores de túneles en suelos. (Ver Figura 3.2) [3]

TÚNELES EN ROCAS

Los túneles en rocas tienen muchas de las características de los túneles en suelo, sin embargo, tienen algunas diferencias significativas:

- Primero, la formación puede estar sometida a grandes esfuerzos residuales debidos a movimientos tectónicos o a sobrecargas producidas por la erosión de tierras, que encubren los esfuerzos debidos al peso de la roca.
- Segundo, las juntas, planos de estratificación y zonas de esfuerzo cortante son zonas de debilitamiento que destruyen la continuidad de la masa de roca y concentran el esfuerzo cortante en esas direcciones.
- Tercero, el proceso de excavación, que a menudo requiere el uso de explosivos, puede alterar la continuidad de la masa, añadiendo esfuerzos dinámicos y abriendo las juntas y fisuras que antes estaban cerradas.

El método de excavación de túneles en roca depende de la dureza y la calidad de la roca.

En materiales más blandos, como las lutitas, los esquistos y las areniscas blandas, el trabajo se puede hacer empleando máquinas especiales para la perforación de túneles.

Las rocas duras se pueden perforar y volar avanzando de 3 a 6 m en cada explosión.

Si la roca es débil o está astillada, es necesario un soporte temporal que consiste en costillajes de acero (cerchas o marcos) que se acuñan contra la roca y, en determinadas ocasiones, se colocan tablonés entre ellos para evitar el desprendimiento de fragmentos de roca. En rocas en mejor estado se colocan pernos de anclaje.

En rocas con altos esfuerzos internos, las concentraciones locales de esfuerzo tangencial en la superficie de la roca causan unos estallidos progresivos en los segmentos de roca en forma de cuñas. El estallido se intensifica en las zonas menos duras o donde la roca ha sido debilitada por voladura.

En túneles en roca, es costumbre, aunque no siempre necesario, usar revestimientos permanentes de hormigón para resistir la presión que se produce o para reducir el rozamiento interior. (Ver Figura 3.2) [3]

Figura 3.2.- A la izquierda una imagen de la construcción de un túnel en suelo y a la derecha otra de la construcción de un túnel en roca



3.1.2 CONSIDERACIONES GEOLÓGICAS DE LOCALIZACIÓN, DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN.

Antes de la construcción de un túnel es necesario considerar los rasgos geológicos del terreno de la excavación. Es decir, analizar la litología y estratigrafía, las discontinuidades (estratificación, fracturas y fallas), el estado de alteración de las rocas, los problemas relacionados con el agua, la influencia de alteración de las rocas, la influencia de los factores de geodinámica externa y de los esfuerzos internos.

LITOLOGÍA Y ESTRATIGRAFÍA

La litología es la parte de la geología que se encarga del estudio de las rocas, especialmente de su tamaño de grano, del tamaño de las partículas y de sus características físicas y químicas. Incluye también su composición, su textura, tipo de transporte así como su composición mineralógica, distribución espacial y material cementante.

Por su parte, la estratigrafía permite establecer una relación entre las distintas unidades litológicas o formaciones presentes y así conocer el origen, espesor, distribución y posición cronológica en la secuencia de las diversas unidades. Es uno de los aspectos más influyentes en las estructuras de una excavación subterránea en rocas plegadas o estratificadas. La orientación de los estratos condicionan los diferentes modos de comportamiento frente a la estabilidad de un túnel en donde influyen factores como:

- El buzamiento de la estructura con respecto a la sección del túnel.
- La dirección de la estratificación con respecto al eje del túnel.
- Tipos de pliegues.

El conocimiento de la litología y estratigrafía es de suma importancia para saber, entre otras cosas, qué tipos de rocas se encontrarán dentro del túnel, qué problemas pueden causar durante la construcción y con qué fiabilidad se pueden proyectar los datos de superficie.

FRACTURAS O DIACLASAS

La presencia de fracturas o diaclasas, cualquiera que sea su origen y roca que afecte, puede causar serios problemas de estabilidad, ya que comúnmente se presentan asociadas en uno o varios sistemas con diversas direcciones e inclinaciones, los cuales definen bloques inestables.

En el caso de rocas estratificadas horizontalmente, el fracturamiento es importante ya que, si el espesor de la capa es grande y tiene pocas fracturas, el estrato actúa como viga proporcionando estabilidad, sin embargo, las rocas con estratos delgados y fracturas tienden a dejar una zona inestable en el techo.

FALLAS

En cuanto a las fallas, con respecto a sus implicaciones en la construcción de túneles, es importante destacar:

- Las fallas deben detectarse perfectamente. Se debe conocer su posición respecto al túnel y dónde se encuentran los bloques desplazados para planear el sentido de ataque y la forma de estabilizar las paredes.
- Es importante determinar si la falla es inactiva o activa, ya que si la falla es activa, poco podrá hacerse para proteger la construcción, ya que el túnel estaría sometido, repentinamente, a fuertes esfuerzos cortantes que podrían ocasionar desprendimientos.
- En ocasiones, las zonas de falla están formadas por materiales alterados o sin cohesión, con tendencia a fluir en el túnel y que pueden confundirse con arena. Si el relleno está formado por materiales expansivos, se producirán presiones sobre los revestimientos. También puede encontrarse milonita o algún material impermeable que podría obstaculizar el paso de agua subterránea de uno a otro lado de la falla, produciendo fuertes cargas hidrostáticas sobre el túnel, o bien, lo contrario, que estén en contacto a rocas permeables que ocasionen fuertes entradas de agua al túnel.

CONDICIONES HIDROGEOLÓGICAS

La construcción de un túnel puede variar el régimen hidrológico de un lugar, es decir, la posición del agua dentro del terreno, su dirección, velocidad de movimiento y provocar variaciones en el tiempo. Es lógico pensar que si el túnel está excavado en rocas permeables y se encuentra por debajo del nivel freático, la presencia de agua dentro de él será muy probable, por lo que es recomendable ubicar el túnel por encima del nivel hidrostático.

En general, el caudal de agua que fluye en un túnel disminuye a medida que se avanza en la construcción de éste. Esto se debe al abatimiento gradual en el origen de la corriente y en la disminución del gradiente. Pero también puede darse el caso contrario donde con las operaciones constructivas se provoque un fracturamiento de

la roca que ocasione un aumento de caudal del agua, o bien, se corte una zona acuífera (curiosamente, caso del túnel de Santa Marina, referencia del estudio, y motivo por el cual se hace necesaria una modificación del proyecto original que contemple la construcción de un túnel estanco, impermeabilizado en toda su sección y en toda su longitud).

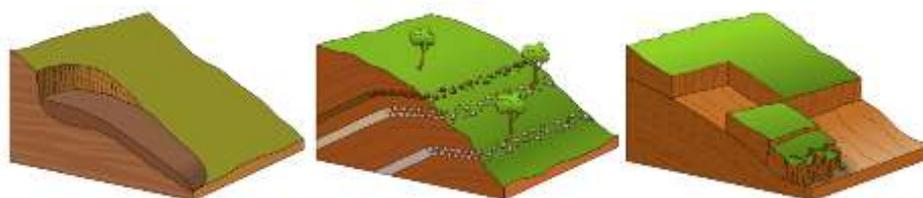
Así pues, es importante estimar correctamente el caudal de agua que entrará en el túnel, así como la distribución de los flujos a lo largo de él y sus cambios con el tiempo, ya que estos influyen en el programa de construcción y en la estabilización final del túnel.

La forma de penetración del agua en el túnel puede ser de varios modos diferentes; ya sea goteando por el techo, con intensidad variable; por las paredes, en forma de gotas o corriente continua; o bajo una fuerte presión puede irrumpir en forma de chorro por cualquier punto de la periferia debido a la presencia de alguna discontinuidad permeable (caso del túnel de Santa Marina).

GEODINÁMICA EXTERNA

Dentro de este conjunto de procesos se incluye la actividad de los agentes externos modificadores del medio natural (agua, viento, temperatura, nieve). Estudia los fenómenos de erosión y movimientos en masa del terreno como la soliflucción (desplazamiento de una masa fangosa sobre un basamento estable), *creep* (descenso gravitacional lento y discontinuo de los materiales alterados que constituyen la capa más superficial del terreno), deslizamientos y avalanchas (ver Figura 3.3). Estos parámetros adquieren una importancia muy especial en el caso de los túneles cercanos a laderas, ya que es en estas zonas donde los fenómenos de geodinámica externa adquieren mayor importancia.

Figura 3.3.-Movimientos del terreno. De izquierda a derecha: Soliflucción, creep y deslizamiento.



La presencia del agua superficial puede ocasionar infiltraciones al túnel, o bien si la fuerza de la corriente es grande, con el tiempo podría llegar a entrar completamente en la excavación.

El intemperismo o meteorización actúa sobre las rocas disminuyendo su resistencia mecánica; se produce una zona de descompresión que crea nuevas fracturas, o bien agranda las ya existentes, o las rellena con materiales perjudiciales.

3.1.3 GEOTECNIA APLICADA A LA CONSTRUCCIÓN DE TÚNELES.

La apertura de un túnel cambia las condiciones de esfuerzos en el medio original, que puede concebirse en un principio como una masa en equilibrio dentro de un campo gravitacional. Los cambios que tengan lugar pueden ocurrir en forma continua o por etapas, hasta que llegue a alcanzarse una condición final en la masa, ya relativamente invariable, que puede considerarse como de equilibrio definitivo. Esta condición final implica nuevas condiciones hidráulicas en el subsuelo y el cese de las deformaciones y los cambios de esfuerzo producidos por la excavación.

Cuando se excava un túnel se produce una región de esfuerzos cambiantes, en la que generalmente se incrementan las presiones verticales y que se localizan en el frente de la excavación, desplazándose con ella. Los estados de esfuerzo son netamente tridimensionales y los cambios de estado en estos esfuerzos, que produce la excavación, originan deformaciones en el medio; cuando hay revestimientos, estos también se deforman.

Los procesos de deformación resultantes evolucionan con el tiempo, de manera que esto último representa una nueva variable en el proceso. Además, la excavación produce cambios en las presiones de poro del agua en su vecindad; como el túnel representa siempre una zona a presión atmosférica, invariablemente el agua tenderá a fluir hacia su interior. De esta manera el juego de presiones en el agua constituye otra variable importante del problema; en suelos de permeabilidad relativamente baja, la adaptación de las presiones del agua a los nuevos estados de esfuerzo no es instantánea.

Pero además, la construcción de un túnel no sólo cambia los estados de esfuerzos en el interior del medio, sino que muchas veces cambia el propio medio. El empleo de explosivos suele reducir la resistencia de rocas y suelos duros en torno a la galería, y otros métodos de excavación como los escudos producen el remoldeo de los suelos vecinos. Solamente en túneles que puedan excavarse en forma manual y en los que no se requiera ningún tipo de sostenimiento podrá pensarse que la perturbación a los materiales de la galería sea realmente pequeña.

Las cargas que puede soportar el sostenimiento o revestimiento dependen de la condición del suelo en el momento en que dicho soporte se coloca; si el suelo hubiese alcanzado una condición de equilibrio final antes de que se coloque el revestimiento, éste no recibirá empujes posteriores, pero si el revestimiento se coloca antes de alcanzar el equilibrio final, representará una nueva condición de frontera al estado de esfuerzos y deformaciones preexistentes, de manera que estos estados evolucionarán de forma diferente a como lo harían si no se hubiese puesto.

Un cambio importante originado por la construcción de los túneles es el que se produce en las condiciones hidráulicas del subsuelo; este cambio puede ser temporal o definitivo, según sea la permeabilidad de la estructura. Un túnel, generalmente, produce el abatimiento del nivel freático hacia a él, aumentando los esfuerzos efectivos en la masa del suelo y en los pesos asociados a esa masa, generando asentamientos no reversibles. Si el revestimiento del túnel es impermeable o se toman precauciones para restaurar el contenido de agua y la condición de la misma en el suelo, el nivel freático se recuperará al cabo de un tiempo; en caso contrario el túnel será un dren permanente. La primera actitud conduce a la necesidad de que los revestimientos soporten adicionalmente presiones hidrostáticas; la segunda exige tomar todas las precauciones para que el túnel funcione efectivamente como un dren, sin que ello interfiera en su utilización principal. [3]

3.2 Clasificaciones geomecánicas de rocas.

Los sistemas de clasificación geomecánica de los macizos rocosos tienen por objetivo evaluar sus características a partir de observaciones en campo y ensayos sencillos para

determinar de forma cuantitativa su calidad, dividiendo el macizo rocoso en grupos de comportamiento similar. Su caracterización requiere el conocimiento de los siguientes parámetros:

- Resistencia y comportamiento de la roca.
- Familias de discontinuidades existentes.
- Espaciado de los planos de discontinuidad y fracturación del macizo.
- Caracteres geomecánicos de las discontinuidades: continuidad, rugosidad, separación y resistencia de los labios, meteorización y relleno.
- Condiciones del agua en las juntas.
- Tensiones in situ, naturales o inducidas.
- Alteraciones producidas en el macizo rocoso por las excavaciones.

Existen numerosos sistemas de clasificación geomecánica, entre los que se encuentran la Clasificación Geomecánica o RMR de Bieniawski y el sistema Q de Barton, Lien y Lunde, siendo éstos los dos más utilizados en la actualidad.

Ambos, se desarrollaron de forma independiente en 1973 y 1974 con el propósito común de cuantificar preliminarmente las características del macizo rocoso en base a descripciones geológicas cualitativas.

Creado originalmente para excavaciones subterráneas, particularmente túneles, el RMR se ha extendido después a otras aplicaciones, como minería subterránea metálica y de carbón o la estabilidad de taludes.

La principal aplicación de las mencionadas clasificaciones geomecánicas es la selección del sostenimiento de túneles, aunque éste nunca debe diseñarse basándose exclusivamente en estas clasificaciones sino que es necesario hacer también su diseño por medios analíticos y métodos observacionales.

3.2.1 CLASIFICACIÓN RMR DE BIENIAWSKI.

Para determinar la calidad del macizo rocoso, se divide éste en dominios estructurales, es decir, en zonas delimitadas por discontinuidades geológicas, dentro de las cuales la

estructura es prácticamente homogénea. La estructura del macizo comprende el conjunto de fallas, diaclasas, pliegues y demás características geológicas propias de una determinada región. El índice RMR (Rock Mass Rating) que define la clasificación está comprendido entre 0 y 100, y evalúa la calidad del macizo rocoso a partir de los parámetros siguientes:

- 1) Resistencia a compresión simple del material rocoso (ensayo de carga puntual o de compresión simple). Tiene un peso de hasta 15 puntos.
- 2) RQD (Rock Quality Designation). Parámetro base en la Clasificación de Deere que se obtiene a partir del porcentaje de trozos de testigo de sondeo mayores de 10 cm y permite estimar el grado de fracturación del macizo rocoso. Tiene un peso de hasta 20 puntos.

$$RQD = \frac{\sum \text{testigos} \geq 10 \text{ cm}}{\text{longitud del taladro}} * 100$$

- 3) Espaciado de las juntas: distancia media entre los planos de discontinuidad de cada familia, es decir, de cada conjunto con las mismas características geomecánicas. La resistencia del macizo rocoso se va reduciendo al aumentar el número de juntas, o sea, cuando disminuyen los espaciados de cada familia. Tiene un peso de hasta 20 puntos.
- 4) Naturaleza de las juntas, con un peso de hasta 30 puntos.
- 5) Presencia de agua. En un macizo rocoso diaclasado, el agua tiene mucha influencia en su comportamiento, debiendo estimarse el flujo de agua en litros/minuto cada 10 m de túnel. La descripción utilizada es la siguiente: completamente seco, húmedo, agua a presión moderada y agua a presión fuerte. Tiene un peso de hasta 15 puntos.
- 6) Orientación de las discontinuidades. La orientación de las discontinuidades respecto al eje de la estructura subterránea es un factor de suma importancia para determinar el sostenimiento necesario. La clasificación de Bieniawski referente a orientaciones relativas entre las discontinuidades y el eje de la cavidad se representa en la Tabla 3-3.

Tabla 3-3.- Orientaciones relativas entre las juntas y el eje de la cavidad

RUMBO PERPENDICULAR AL EJE DEL TÚNEL				RUMBO PARALELO AL EJE DEL TÚNEL		BUZAMIENTO 0°-20° (Independiente del rumbo)
DIRECCIÓN SEGÚN BUZAMIENTO		DIRECCIÓN CONTRA BUZAMIENTO				
Buzamiento 45°-90°	Buzamiento 20°-45°	Buzamiento 45°-90°	Buzamiento 20°-45°	Buzamiento 45°-90°	Buzamiento 20°-45°	
Muy favorable	Favorable	Regular	Desfavorable	Muy desfavorable	Regular	Desfavorable

Fuente: Ramírez Oyanguren; Alejano Monge, 2004. "Mecánica de Rocas: Fundamentos e Ingeniería de Taludes"

Después de haber definido los 6 parámetros de la clasificación RMR de Bieniawski, se determina la categoría del macizo rocoso. Se parte de un denominado "valor primario" de calidad que es igual a la suma de los cinco primeros parámetros cuyos valores se definen en la Tabla 3-4.

Para diseñar el sostenimiento del túnel, este valor primario se modifica en función del último parámetro descrito (orientación de las discontinuidades), de acuerdo a lo expresado en la Tabla 3-5. Así se obtiene el valor del macizo rocoso. Dependiendo del valor total del RMR, se clasifican los macizos rocosos en cinco categorías (ver Tabla 3-6).

Tabla 3-4.- Parámetros de Clasificación y sus Valores (Bieniawski, 1989)

PARAMETROS		ESCALA DE VALORES							
1	Resistencia de la roca intacta	Bajo carga puntual	>10 MPa	4-10 MPa	2-4 MPa	1-2 MPa	Para estos valores es preferible la resistencia a compresión simple		
		A compresión simple	>250 MPa	100-250 MPa	50-100 MPa	25-50 MPa	5-25 MPa	1-5 MPa	<1 MPa
	VALOR	15	12	7	4	2	1	0	
2	R.Q.D.	90%-100%	75%-90%	50%-75%	25%-50%	<25%			
	VALOR	20	17	13	8	3			
3	ESPACIADO DE LAS JUNTAS	>2 m	0,6-2 m	200-600 mm	60-200 mm	<60 mm			
	VALOR	20	15	10	8	5			
4	CONDICION DE LAS JUNTAS	Muy rugosas, sin continuidad, cerradas, roca labios sana.	Ligeramente rugosa separación <1 mm, roca labios ligeramente meteorizada.	Ligeramente rugosa separación <1 mm, roca labios muy meteorizada.	Espejo o falla o relleno de espesor <5 mm, o juntas abiertas 1-5 mm, juntas continuas.	Relleno blando de espesor >5 mm, o juntas abiertas >5 mm, juntas continuas.			
		VALOR	30	25	20	10	0		
5	AGUA	FLUJO EN CADA 10 m DE TUNEL, o bien	Ninguno	<10 l/min	10-25 l/min	25-125 l/min	>125 l/min		
		Relación presión del agua en la junta/tensión principal máxima.	0	<0,1	0,1-0,2	0,2-0,5	>0,5		
		CONDICIONES GENERALES	Completamente seco	Manchas de humedad	Muy húmedo.	Goteo.	Flujo de agua.		
		VALOR	15	10	7	4	0		

Fuente: Ramírez Oyanguren; Alejano Monge, 2004. "Mecánica de Rocas: Fundamentos e Ingeniería de Taludes"

Tabla 3-5.-Ajuste de Valores por las Orientaciones de las Juntas (Bieniawski, 1989)

ORIENTACION DEL RUMBO Y BUZAMIENTO DE LAS DISCONTINUIDADES		MUY FAVORABLE	FAVORABLE	REGULAR	DESFAVORABLE	MUY DESFAVORABLE
VALORES	TUNELES Y MINAS	0	-2	-5	-10	-12
	CIMENTACIONES	0	-2	-7	-15	-25
	TALUDES	0	-5	-25	-50	-60

Fuente: Ramírez Oyanguren; Alejano Monge, 2004. "Mecánica de Rocas: Fundamentos e Ingeniería de Taludes"

Tabla 3-6.- Determinación de la clase del macizo rocoso (Bieniawski, 1989)

VALOR TOTAL DEL R.M.R	81-100	61-80	41-60	21-40	<20
CLASE NUMERO	I	II	III	IV	V
DESCRIPCION	MUY BUENO	BUENO	MEDIO	MALO	MUY MALO

Fuente: Ramírez Oyanguren; Alejano Monge, 2004. "Mecánica de Rocas: Fundamentos e Ingeniería de Taludes"

Las propiedades geomecánicas se relacionan con el RMR tal y como se indica en la Tabla 3-7.

Tabla 3-7.- Relación entre RMR y propiedades geomecánicas.

Clase	Calidad	RMR	Cohesión (kPa)	Angulo de fricción (°)
I	muy buena	81 – 100	> 400	> 45
II	buena	61 – 80	300 – 400	35 – 45
III	regular	41 – 60	200 – 300	25 – 35
IV	mala	21 – 40	100 – 200	15 – 25
V	muy mala	0 - 20	< 100	< 15

Fuente: Ramírez Oyanguren; Alejano Monge, 2004. "Mecánica de Rocas: Fundamentos e Ingeniería de Taludes"

Se expone, a modo de ejemplo, las recomendaciones de Bieniawski para la excavación y el sostenimiento de túneles excavados en roca, las cuales se especifican en la Tabla 3-8.

Tabla 3-8.- Recomendaciones Indicativas para la excavación y el sostenimiento de túneles excavados en roca (Bieniawski, 1989)

CLASE	RMR	EXCAVACIÓN (PASE)	SOSTENIMIENTO		
			BULONES (Longitud en m)	HORMIGÓN PROYECTADO	CERCHAS METÁLICAS
I Muy buena	81-100	Sección completa (3 m)	Ocasionalmente	No necesario	No necesarias
II Buena	61-80	Sección completa (1-1.5 m). Sostenimiento terminado a 20 m del avance	Localmente en clave. L = 3 m. Espaciados a 2.5 m con mallazo ocasional	50 mm en clave donde sea necesario	No necesarias
III Media	41-60	Avance y destroza (1.5-3 m en avance) Sostenimiento empezado en el frente y terminado a 10 m del frente	Sistemáticamente en clave y hastial. L = 4 m. Espaciados 1.5 a 2.0 m. Mallazo en clave.	50-100 mm en clave. 30 mm en hastiales.	No necesarias
IV Mala	21-40	Avance y destroza (1.0-1.5 m en avance) Sostenimiento empezado simultáneamente con la excavación y hasta 10 m del frente	Sistemáticamente en clave y hastiales. L = 4 a 5 m. Espaciados a 1.0-1.5 m. Con mallazo.	100-150 mm en clave. 100 mm en hastiales.	Ligeras a medias, espaciadas a 1.5 m donde sea necesario
V Muy mala	1-20	Galerías múltiples. (0.5-1.5 en avance) Sostenimiento simultáneo con la excavación. Hormigón proyectado inmediatamente después de la voladura.	Sistemáticamente en clave y hastiales. L = 5-6 m. Espaciados a 1.0-1.5 m. Con mallazo. Bulonar la contrabóveda.	150-200 mm en clave. 150 mm en hastiales. 50 mm en el frente.	Medias a pesadas, espaciadas a 0.75 m, con forro y longarinas donde sea necesario. Contrabóveda

*.Nota Bieniawski: Sección del túnel en herradura. Ancho 10 m. Tensión vertical < 25 MPa. Excavado por voladuras

Fuente: Romana Ruiz, M. (2000) "Recomendaciones de Sostenimiento para Túneles"

3.2.2 CLASIFICACIÓN DE BURTON.

En esta clasificación se catalogan los macizos rocosos según el denominado índice de calidad Q, basado en los 6 parámetros siguientes:

- 1) RQD: "Rock Quality Designation". Tiene un peso de hasta 100 puntos.
- 2) J_n : Número de familias juntas. Su valor oscila entre 0,5 y 20 puntos.
- 3) J_r : Rugosidad de las juntas. Su valor está comprendido entre 0,5 y 4 puntos.
- 4) J_a : Meteorización de las juntas. Su valor oscila entre 0,75 y 20 puntos.
- 5) J_w : Coeficiente reductor que tiene en cuenta la presencia de agua, cuyo valor está entre 0,05 y 1 puntos.
- 6) SRF: "Stress Reduction Factor", factor dependiente principalmente de las tensiones existentes en el macizo rocoso. Valor entre 0,5 y 20 puntos.

Mediante los parámetros indicados se define la calidad del macizo rocoso de la siguiente manera:

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

Así pues, la clasificación de Burton es reflejada en la Tabla 3-9.

Tabla 3-9.-Clasificación de Burton de los macizos rocosos

TIPO DE MACIZO	VALOR DE Q
Excepcionalmente malo	$10^{-3} - 10^{-2}$
Extremadamente malo	$10^{-2} - 10^{-1}$
Muy malo	$10^{-1} - 1$
Malo	1 - 4
Medio	4 - 10
Bueno	10 - 40
Muy bueno	40 - 100
Extremadamente bueno	100 - 400
Excepcionalmente bueno	400 - 1000

Fuente: Ramírez Oyanguren; Alejano Monge, 2004. "Mecánica de Rocas: Fundamentos e Ingeniería de Taludes"

3.2.3 CORRELACIONES ENTRE RMR Y Q.

La relación entre los índices de calidad RMR y Q puede expresarse en forma general mediante la siguiente ecuación:

$$RMR = a * \ln Q + b$$

Donde, a y b son constantes que dependen del tipo de roca y de su fracturación.

A continuación se presentan las correlaciones entre el RMR y Q obtenidas por algunos investigadores.

- Bieniawski (1976) RMR= 9 LnQ+44
- Ruteledge (1978) RMR= 13,5 LnQ+43
- Moreno (1980) RMR= 12,5 LnQ+55,2
- Abad (1983) RMR= 10,53 LnQ+41,83

En 2004, Bieniawski propuso una nueva correlación que se puede expresar mediante la fórmula siguiente [4]:

$$RMR = 15 * \log Q + 50$$

En la Tabla 3-10 se muestran los intervalos de valores del RMR y Q para categorías similares de macizos rocosos.

Tabla 3-10.- Intervalos de valores del RMR y Q para categorías similares de macizos rocosos

CLASE	DESCRIPCION	RMR	Q
0	Excepcionalmente buena	----	100-1000
1	Muy buena	81-100	40-100
2	Buena	61-80	10-40
3	Media	41-60	4-10
4	Mala	21-40	1-4
5	Muy mala	0-20	0,1-1
6	Excepcionalmente mala	----	0,001-0,1

Fuente: Ramírez Oyanguren; Alejano Monge, 2004. “Mecánica de Rocas: Fundamentos e Ingeniería de Taludes”

3.2.4 CLASIFICACIÓN DE LAUFFER.

Este sistema de clasificación es nombrado muy generalmente puesto que, aunque no se trata de un sistema de clasificación geomecánico empleado en la actualidad, es el que definió las bases del Nuevo Método Austriaco, método de excavación estudiado en este proyecto.

A partir de las ideas de Stini (1950) sobre la importancia de los defectos de un macizo rocoso en su comportamiento mecánico, Lauffer en 1958 llegó a la conclusión de que el tiempo de mantenimiento para un tramo sin sostenimiento (distancia entre el frente y la zona sostenida más cercana) depende de la calidad de la roca en la que se excava.

La roca no se clasifica a partir de datos geológicos o geotécnicos sino a partir de su respuesta frente a la construcción de una excavación subterránea. Requiere, pues, experiencia previa o datos de la propia excavación.

Lauffer clasificó los terrenos en 7 categorías, las cuales se muestran en la Tabla 3-11.

Tabla 3-11.-Clasificación de Lauffer

Clase	Tipo de Roca	Calidad del terreno
A	Roca sana	Muy bueno
B	Roca sana, compacta pero fracturada	Bueno
C	Roca bastante fracturada o algo alterada	Medio
D	Roca muy fracturada o bastante alterada o blanda	Mediocre
E	Roca triturada o muy alterada, conjuntos rellenos de milonito. Roca muy blanda. Terrenos arcillosos con fuertes empujes.	Malo
F	Características análogas a los suelos	Muy difícil, requiere Métodos especiales
G		

Fuente: Abad Alvarado, A.C; Huisa Velásquez, F.R. (2011). “Procesos de Excavación y Sostenimiento de Túneles”

A partir de esta clasificación, Rabcewicz y Müller sintetizaron los métodos de excavación y sostenimiento de acuerdo con su experiencia en la aplicación del NATM. (Ver Tabla 3-12). [5]

Tabla 3-12.- Clasificación Rabcewicz, Müller

**CUADRO ESQUEMATICO DE LOS TIPOS DE REVESTIMIENTO: NUEVO M.L. OJO AUSTRIACO (RABCEWIC, MÜLLER)
(SEGUN LA CLASIFICACION DE TERRENOS DE LAUFFER)**

CLASES DE LAUFFER: A-B		C	C-D	D	E-F	F	G
LONGITUD DE AVANCE	2,00 a 3,00 m	1,50 a 2,00 m	1,00 a 1,50 m	0,50 a 0,80 m	0,30 m	OTROS METODOS	
ABRANQUE	EXPLOSIVO (CUALQUIER CANTIDAD DE CARGA) (MMA NO SUPERAR EL TIEMPO DE TRABAJO)	EXPLOSIVO (CARGA PROGRESIVA) (MMA NO SUPERAR EL TIEMPO DE TRABAJO)	EXPLOSIVO (CARGA PROGRESIVA) (MMA NO SUPERAR EL TIEMPO DE TRABAJO)	EXPLOSIVO (CARGA PROGRESIVA) (MMA NO SUPERAR EL TIEMPO DE TRABAJO)	MECANICO	MECANICO	INYECCIONES, CONSOLIDACION, ESCUDOS, ETC.
CERCHAS	NO	1 CADA 1,2 a 2,00 m (T.H. 21 kg/m)	1 CADA 1,00 a 1,50 m (T.H. 21 kg/m)	1 CADA 0,50 a 0,80 m (T.H. 21 a 28 kg/m)	1 CADA 0,30 m (T.H. 28 kg/m)	1 CADA 0,30 m (T.H. 28 kg/m)	TERRENOS MUY MALOS: ARENAS CON AGUA, ETC.
MALLAZO 15 x 15	NO	1 CADA 8 mm	2 CAPAS 8 mm	2 CAPAS 8 mm	2 CAPAS 8 mm	2 CAPAS 8 mm	
NORMAS DE CAPAS CON PROYECTADO	10 MALLADO DE 40x50 + 1 CADA 10 cm	1 CADA 10 cm	1 CADA 10 cm	1 CADA 10 cm	1 CADA 10 cm	1 CADA 10 cm	
BOVEDA	NO SISTEMATICAS (COSER LIBRES)	3 EN LAS CERCHAS + 4 ENTRE LAS CERCHAS	3 EN LAS CERCHAS + 4 ENTRE LAS CERCHAS	3 EN LAS CERCHAS + 4 ENTRE LAS CERCHAS	3 EN LAS CERCHAS + 4 ENTRE LAS CERCHAS	3 EN LAS CERCHAS + 4 ENTRE LAS CERCHAS	
Ø 25 mm	10, 10	2 EN LAS CERCHAS (Ø 4 m)					
SANJAS (LONGITUDINALES TRESILLONES)	NO	12 a 2,00 m	12 a 2,00 m	12 TRESILLONES	12 TRESILLONES	12 TRESILLONES	
PROTECCION DEL FRENTE	NO	NO	NO	NO SISTEMATICA	SISTEMATICA	SISTEMATICA	
CONTRABOVEDA	NO	SI, PARA COBERTURAS MUY GRANDES EN TERRENOS DEFORMABLES	NO	NO SISTEMATICA	SISTEMATICA	SISTEMATICA	
ELEMENTOS ESPECIALES EN MEDIA SECCION	NO	NO	NO	NO	NO	NO	
PERFIL TRANSVERSAL Y FASES DE TRABAJO	SOLAMENTE EN TERRENOS B	1, 2	1, 2	1, 2, 3	1, 2, 3, 4	1, 2, 3, 4	
SECCION DESARROLLADA	NO	NO	NO	NO	NO	NO	
PERFIL LONGITUDINAL	EL AVANCE A MEDIA SECCION PUEDE INICIARSE CON PUNTO DE LA DESTROZA DE LA DESTROZA DE LA DESTROZA DE LA DESTROZA	EL AVANCE A MEDIA SECCION PUEDE INICIARSE CON PUNTO DE LA DESTROZA DE LA DESTROZA DE LA DESTROZA DE LA DESTROZA	EL AVANCE A MEDIA SECCION PUEDE INICIARSE CON PUNTO DE LA DESTROZA DE LA DESTROZA DE LA DESTROZA DE LA DESTROZA	EL AVANCE A MEDIA SECCION PUEDE INICIARSE CON PUNTO DE LA DESTROZA DE LA DESTROZA DE LA DESTROZA DE LA DESTROZA	EL AVANCE A MEDIA SECCION PUEDE INICIARSE CON PUNTO DE LA DESTROZA DE LA DESTROZA DE LA DESTROZA DE LA DESTROZA	EL AVANCE A MEDIA SECCION PUEDE INICIARSE CON PUNTO DE LA DESTROZA DE LA DESTROZA DE LA DESTROZA DE LA DESTROZA	
OBSERVACIONES	NO	NO	NO	NO	NO	NO	

Fuente: Martín Sánchez, D. (2003). "El sostenimiento de túneles basado en las clasificaciones geomecánicas". U.P.C.

4 CONSTRUCCIÓN DE TÚNELES.

La solución al problema de ejecución de estructuras subterráneas depende de la naturaleza del terreno, de su resistencia y de la posible presencia de agua.

Según la naturaleza del terreno, la excavación se realiza con una sección de mayor o menor tamaño. En los macizos rocosos de buena calidad, la excavación subterránea puede avanzarse a plena sección incluso en el caso de bóvedas con vanos mayores de 20 m. En los terrenos sin cohesión, como por ejemplo en arenas, gravas, rocas trituradas, etc., hay que comenzar la excavación por una galería elemental de 4 o 5 m² e ir entibando según se avanza. En terrenos compuestos por arenas finas saturadas de agua a presión, arcillas o terrenos con fuertes empujes de agua, hay que utilizar procedimientos especiales y el avance es muy difícil y costoso.

Por último, los equipos de avance utilizados dependen además del tipo de terreno, del rendimiento esperado en el avance de la excavación subterránea. Este último viene determinado por consideraciones económicas y prácticas. [6]

Así pues, la perforación de un túnel, dependiendo del tipo de terreno que atravesase, se puede realizar por varios métodos. Destacamos los descritos a continuación.

4.1 Métodos tradicionales.

Estos métodos son adecuados para túneles en terrenos blandos. Se atacan por fases debido a la poca competencia del terreno a excavar. La idea es que en una sección más pequeña no se presentan tantos problemas o, al menos, se ven atenuados. Cada fase de excavación se sostiene convenientemente antes de ensancharse y proseguir con las labores.

4.1.1 MÉTODO BELGA

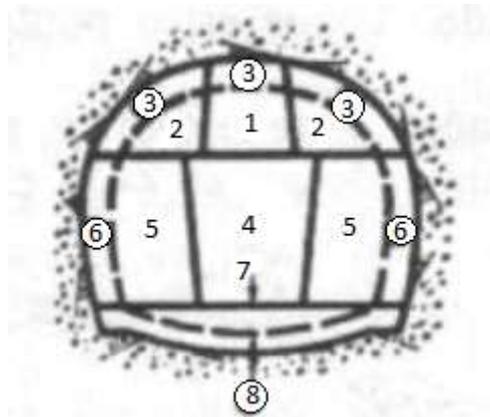
El Método Belga (también llamado, actualmente, Método Tradicional de Madrid o, técnicamente, método de la galería en clave) es uno de los métodos más utilizados para la construcción de túneles en suelos.

Se basa en los principios que permitieron la construcción, en 1828, del túnel del Charleroi en el canal que enlaza Bruselas y Charleroi. Se caracteriza por la progresiva excavación de los elementos que componen el túnel, de tal forma que se van retirando los elementos más estables del túnel evitando el hundimiento o la falta de estabilidad del frente (ver Figura 4.1).

En la actualidad, el método se denomina Método Tradicional de Madrid por ser el método más empleado en la construcción de los túneles del metro de Madrid.

Este método consiste en realizar la excavación abriendo una pequeña galería en la clave del túnel para ir ensanchándola poco a poco, protegiendo y entibando el frente, hasta permitir hormigonar toda la bóveda.

Figura 4.1.-Orden de la construcción de un túnel por el Método Belga en terrenos resistentes



Fuente: Soto Saavedra, P. S. (2004)

Una vez asegurada ya la bóveda, se realiza la excavación de la parte inferior del túnel, llamada destroza, comenzando por la zona central (zona número 4 de la Figura 4.1) y siguiendo, en cortos tramos alternativos, por los hastiales (zonas número 5 de la Figura 4.1), realizando excavaciones de pequeña longitud (4 a 6 m) que se ejecutan alternativamente de derecha a izquierda. Una vez excavados los hastiales, se revisten (zona número 6); de esta manera no se compromete la seguridad de la bóveda que

descansa siempre sobre la destroza no excavada o sobre los pilares ya construidos. Se termina por la excavación y hormigonado de la solera o contrabóveda, cuando es necesaria.

Con el Método Belga, al abrir pequeñas secciones, es posible solucionar cualquier problema que pudiera surgir de inestabilidad, puesto que la seguridad del método se basa en que se trabaja con un frente muy pequeño, normalmente inferior a 3 m². Este método tiene la ventaja de estar muy comprobado en la práctica de la ingeniería civil, aunque su rendimiento es pequeño porque es un proceso lento y trabajoso. Es ideal para situaciones en las que existe peligro de hundimiento o imposibilidad de introducir maquinaria en el terreno. [7]

4.1.2 MÉTODO SUIZO

El Método Suizo o Bernold es uno de los métodos de avance en túneles a plena sección más extendidos.

El caso ideal al perforar un túnel es colocar el sostenimiento justo después de haber excavado el túnel, sufriendo el terreno pequeñas deformaciones que no deterioran el macizo rocoso. El sistema Bernold de revestimiento de hormigón con chapas que actúan como encofrado y armaduras se aproxima al caso ideal que se ha señalado. Por otra parte, es una forma adecuada de colocar el hormigón proyectado en presencia de agua abundante.

El elemento característico del Método Suizo son unas planchas de palastro de forma y perforaciones especiales (Figura 4.2), que pueden colocarse formando un encofrado y armadura, dejándose hasta la superficie de la excavación una distancia igual al espesor del revestimiento. Durante el fraguado del hormigón, estas planchas conformadas en frío con unas nervaduras en forma de V se apoyan temporalmente sobre las cimbras de montaje (cerchas) y quedan después en el hormigón a modo de armadura. Gracias a su especial forma, son por una parte lo bastante rígidas como para absorber la presión del encofrado y, por otra parte, lo suficientemente cerradas como para impedir que un hormigón de consistencia plástica se derrame durante el fraguado. Las

planchas normalizadas (1.080 x 1.200 mm) de 1, 2 ó 3 mm de espesor se curvan convenientemente para adaptarse a la curvatura del perfil excavado.

Figura 4.2.-Planchas Bernold



El sistema de chapas Bernold o Método Suizo cumple dos funciones a la vez, la de entibación metálica y la de recubrimiento definitivo de la roca (Figura 4.3).

El hormigón vibrado se introduce por las ranuras de la chapa y junto con la roca y la chapa Bernold, formando una estructura homogénea que permite una buena repartición de cargas.

En la construcción de túneles, el Método Suizo se aplica desde rocas poco friables hasta muy friables, eliminando rápidamente la zona de peligro situada inmediatamente detrás del frente de ataque. [6]

Figura 4.3.-Método Suizo o Bernold

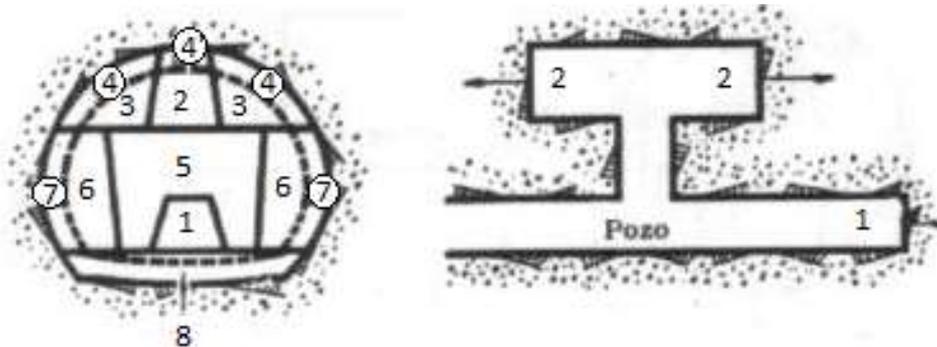


Fuente: Extremiana Vázquez, I. (2011). Tesis "Gestión de riesgos en proyectos de túneles".

4.1.3 MÉTODO AUSTRIACO

El Método Austriaco, también conocido como el método de las dos galerías, se caracteriza por el empleo de una galería de avance en el eje y base del túnel (zona número 1 de la Figura 4.4). En ella se instala una vía de evacuación que se utiliza durante toda la obra.

Figura 4.4.-Orden de la construcción de un túnel por el Método Austriaco



Fuente: Soto Saavedra, P. S. (2004)

Cuando esta galería ha avanzado cierta longitud, se sube verticalmente con un pozo hacia la clave del túnel atacando después una segunda galería por encima de la primera y trabajando hacia delante y hacia atrás (zona número 2 de la Figura 4.4).

Los escombros de la galería superior se envían por el pozo a la galería inferior que sirve para evacuar sin transbordo todos los escombros de los diferentes ataques. Por otro lado, es posible multiplicar los pozos y los ataques en la galería de coronación.

Una vez perforada la galería de clave, se continúa como en el método belga: excavación de la bóveda (zona número 3 de la Figura 4.4), construcción de ésta (zona número 4 de la Figura 4.4), destroza (zona número 5), excavación de los muros y construcción del revestimiento de éstos (zonas 6 y 7, respectivamente). Por último, se realiza la excavación y hormigonado de la solera o contrabóveda, cuando es necesaria.

El método de la galería de base se presta a la evacuación de los escombros sin desplazamiento de la vía y facilita la eliminación de las aguas de infiltración.

Abriendo dos galerías, una en la clave y otra en la solera, no sólo se reconoce el terreno, sino que mediante la comunicación entre sí por pozos permite extraer el escombros de la parte de bóveda por la galería inferior.

Con este método se pretende:

- No alterar la roca excesivamente, abriendo tajos cortos.
- Instalar, de forma completa, un sostenimiento provisional (que permite una cierta relajación, al ser de madera).
- Construir, a cierta distancia y de varios diámetros, un revestimiento definitivo, encargado de recibir las cargas totales.

Lo que se pretendía era resolver el problema derivado de la escasa potencia de los medios de excavación disponibles y adecuar la velocidad de excavación y la de colocación del sostenimiento, para que la roca no estuviera desnuda y los operarios estuvieran protegidos. La construcción del revestimiento definitivo, así, no corría excesiva prisa.

En el fondo, este Método Austriaco (limitado, como lo eran los métodos de excavación disponibles), ya estaba aventurando las ideas de lo que hoy es básico en la construcción de túneles en roca. [3]

4.2 Métodos nuevos.

Estos métodos son adecuados para túneles en terrenos medios-duros.

4.2.1 TUNELADORA

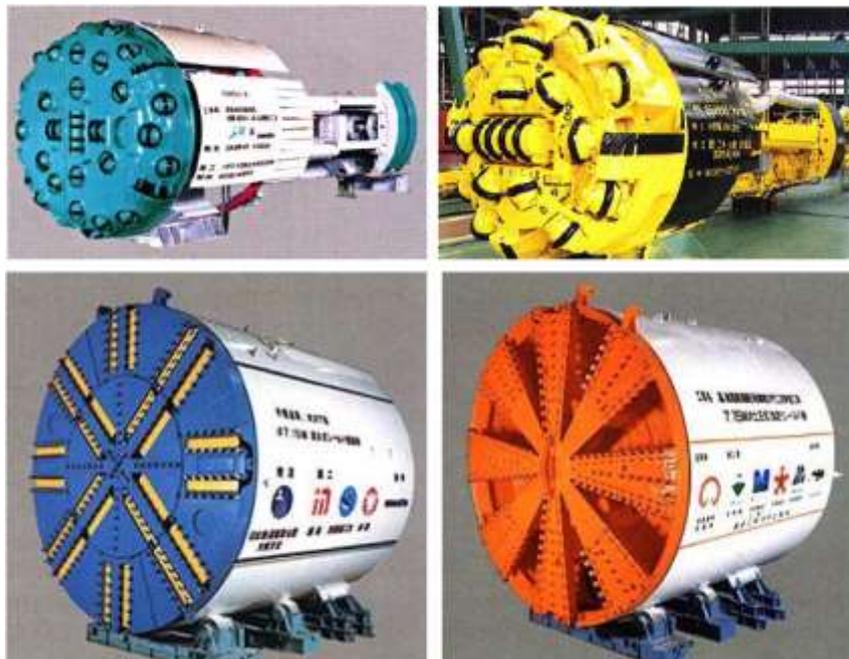
El elemento diferencial dentro de las fases constructivas es la excavación del material por encima del sostenimiento.

Las máquinas integrales para la excavación de túneles se conocen habitualmente por las siglas T.B.M. (Tunnel Boring Machine) y hacen referencia a una serie de máquinas

capaces de excavar un túnel a sección completa, a la vez que se colabora en la colocación de un sostenimiento provisional o en la puesta en obra del revestimiento definitivo.

Estas máquinas se dividen en dos grandes grupos: topos y escudos (Figura 4.5). Ambos difieren de forma importante según el tipo de roca o suelo que sea necesario excavar, así como de las necesidades de sostenimiento o revestimiento que requiera cada tipo de terreno. Así, los topos se diseñan principalmente para poder excavar rocas duras y medias, sin grandes necesidades de soporte inicial, mientras que los escudos se utilizan en su mayor parte en la excavación de rocas blandas y en suelos, frecuentemente inestables y en ocasiones por debajo del nivel freático, en terrenos saturados de agua que necesitan la colocación inmediata del revestimiento definitivo del túnel. [8]

Figura 4.5.-Vista de las cabezas de corte de dos tuneladoras tipo topo (arriba) y dos tipo escudo (abajo)



Fuente: Fernández, R. (1997). "Manual de Túneles y Obras Subterráneas".

4.2.2 NUEVO MÉTODO AUSTRIACO

El Nuevo Método Austriaco, conocido bajo las siglas NATM ("New Austrian Tunneling Method"), es uno de los métodos de diseño y ejecución de túneles en roca más

extendidos y de mayor éxito en todo el mundo dentro del ámbito de la ingeniería civil. Este método, también denominado "Avance y Destroza", fue desarrollado y patentado por Rabcewickz, Müller y Pacher entre 1948 y 1964, y está basado en la clasificación geomecánica de Lauffer, que clasificó los terrenos en siete categorías, indicando el tipo de sostenimiento más apropiado para cada uno de ellos.

En esencia, el NATM se basa en cinco principios fundamentales:

1. Utilizar la propia roca como elemento resistente frente a los incrementos locales de tensión que se producen durante la excavación.
2. Utilizar métodos de excavación que minimicen el daño producido al macizo, con gunitados de protección nada más excavar.
3. Instrumentar las deformaciones en función del tiempo, con ayuda de clasificaciones geomecánicas y ensayos de laboratorio.
4. Colocar sostenimientos iniciales flexibles, protegiendo el macizo de meteorizaciones, decompresiones, decohesiones, etc, con la velocidad adecuada, para evitar el comienzo de daños.
5. Colocar el revestimiento definitivo, si es necesario, también flexible, minimizando así los momentos flectores, añadiendo resistencia adicional con cerchas o bulones, pero no con secciones rígidas. [9]

La excavación se realiza en dos fases. Primero se ejecuta la excavación superior (avance) y después se retira el terreno que quede debajo hasta la cota del túnel (destroza), excavando, en el caso de secciones grandes, en primer lugar una primera bancada más ancha para permitir el paso de maquinaria al frente (realizando inmediatamente después la prolongación del sostenimiento ejecutado en avance) y después una segunda (ejecutándose a su vez los sostenimientos correspondientes). El método se basa en usar la tensión geológica del macizo rocoso circundante para que el túnel se estabilice a sí mismo mediante el efecto arco.

La excavación es inmediatamente protegida con una delgada capa de hormigón proyectado. Esto crea un anillo de descarga natural que minimiza la deformación de la roca (ver Figura 4.6).

Figura 4.6.-Construcción de un túnel por el Nuevo Método Austriaco.



Fuente: Voxel Studios (2010)

Debido al control exhaustivo el método es muy flexible, incluso en condiciones geomecánicas desconocidas de consistencia de la roca durante el trabajo de tunelación. Las mediciones de las propiedades de la roca nos informan de las herramientas apropiadas.

El desarrollo de la técnicas del hormigón proyectado o gunita (utilizada masivamente en Austria desde 1954 y empleado en España, por primera vez, en el Túnel de Miranda en 1958), permite el desarrollo del NATM al darle su arma preferida: un sistema de sostenimiento de colocación inmediata, graduable en resistencia (dosificación) y rigidez (en función del espesor a proyectar y de los refuerzos con cerchas, mallas, etc., que se utilicen).

Las líneas características (o sea su relación presión-desplazamiento) del terreno y del sostenimiento llegarían a un equilibrio tras la adecuada deformación y la oportuna relajación que se produce en el macizo rocoso.

La gunita es el elemento más utilizado en el NATM, pudiendo, hoy día, aplicarse con robots, de forma que los operadores queden alejados del frente de excavación, aumentando así su seguridad. A continuación, se pueden colocar cerchas. No es conveniente poner las cerchas antes de la protección con gunita, por el riesgo que entraña a los colocadores de cerchas. Sin embargo, en materiales muy fracturados, la

velocidad de deformación puede ser muy grande e impedir que la gunita fragüe, por lo que se usan, entonces, primero las cerchas y después la gunita.

Esa gunita puede armarse con mallazo metálico o con fibras metálicas, siendo esta última solución la que, actualmente, tiene más aplicación, por el ahorro de tiempo que supone la colocación de la malla (y el riesgo que siempre supone operadores cerca del frente) y por las resistencias que ya se alcanzan con las gunitas armadas con fibras. La primera capa de sellado suele darse sin fibras (ya que suele tener mayor rechazo).

El proceso de diseño y construcción mediante el Nuevo Método Austriaco es el siguiente:

- Estudio geomecánico del macizo rocoso en el que se va a construir el túnel, con determinación de tipos de materiales, direcciones de diaclasado, estado de las diaclasas, presencia de agua, toma de muestras, ensayos de laboratorio e *in situ*, etc. Se consigue, así, el disponer de estudio geológicos y geotécnicos bases, con definición de materiales y propiedades, anomalías o fallas, etc.
- Caracterización geomecánica del macizo, con utilización de las clasificaciones geomecánicas, lo que conduce a sectorizar el trazado, en función de los materiales existentes, presencia de agua, grado de fracturación, etc.
- Definición de secciones tipo de sostenimiento en cada sector antes distinguido, que se determinan según diversos tipos de análisis.
- Excavación del túnel, con los medios previstos y que se adecuen al principio fundamental de dañar la roca lo menos posible.
- Instalación del sostenimiento previsto en cada sector y que se explicita (en función de las secciones tipo disponibles) por el estado del frente que se va abriendo (con la supervisión de un técnico que debe estar a pie de obra).
- Instalación inmediata de secciones de auscultación y control, base fundamental del NATM. El control mínimo de convergencias (triangulación de la sección abierta, o sea, con referencias en clave y hastiales), suele hacerse cada 40-50 m, en función de la calidad del terreno (que, a veces, obliga a instalar referencias cada 20 m), a lo cual se suele añadir (con intervalos mayores (100-150 m, p.e.), el control de empujes sobre el revestimiento (instalando células

de presión total en el contacto gunita-terreno), los esfuerzos en cerchas (extensómetros eléctricos o de cuerda vibrante) y en bulones (células de carga), movimientos del interior del terreno respecto al sostenimiento (extensómetros múltiples de varilla), etc.

- Del seguimiento e interpretación de la instrumentación, puede deducirse si la sección de sostenimiento es la adecuada para ese sector o si es necesario reforzarlo (e, incluso, si es excesiva). Normalmente, a la magnitud absoluta de movimientos (la convergencia no debe exceder, habitualmente, del 1-2% de la anchura del túnel), presiones, etc., lo que suele ser más importante es observar el gradiente de los movimientos inducidos, que dan una mayor idea sobre la evolución y comportamiento del sostenimiento. Velocidades de deformación del orden de centímetros por día suelen ser señal de alto riesgo.
- Si es necesario, puede colocarse un revestimiento definitivo, que suele ser de hormigón en masa. Muchas veces, este revestimiento es más necesario por condiciones de ventilación (a partir de 500-600 m de longitud), para reducir la *rugosidad* con que suele quedar el sostenimiento. Si la calidad de la roca es alta puede sobrar el revestimiento y sólo proceder, simplemente, a reforzar los puntos del sostenimiento más débiles, irregulares, etc. [9]

En las últimas décadas las excavaciones mayores de 10 km en suelo blando se han convertido en usuales. Uno de los casos más conocidos, corresponden a la construcción de la Línea 4 y la Extensión de las Líneas 1, 2 y 5 del Metro de Santiago, así como algunas secciones de la Línea 7 del Metro de La Ciudad de México.

HUNDIMIENTOS PRODUCIDOS EN TÚNELES CON EL NUEVO MÉTODO AUSTRIACO

1) TÚNEL DEL CARMEL

A raíz del desastre del túnel del Carmel, se ha oído hablar mucho del Nuevo Método Austriaco de construcción de túneles.

El hundimiento del Carmel es el nombre con el que se conoce al colapso de un túnel en el barrio del Carmel de Barcelona (Cataluña, España) el 27 de Enero de 2005. La construcción del túnel se hizo para ampliar la línea 5 del metro, y debía utilizarse como

cola de maniobras. A consecuencia del colapso, el garaje de la calle Calafell 12 de Barcelona desapareció en un agujero de 18 metros de diámetro y 35 de profundidad.

El proyecto del túnel fue redactado con prisas, y la adjudicación de la dirección de obra se hizo sin concurso ni publicidad. El túnel se había excavado según el Nuevo Método Austriaco, a sección completa, y discurría por un subsuelo formado por una alternancia de areniscas y pizarras y, según los informes, era de arenisca con un RMR de 42 en la zona del accidente. Seis meses después de haberse excavado la sección completa, la convergencia del túnel detectada, que fue de 60 mm, obligó a ejecutar una contravuelta en la zona del accidente. Cuando se estaban rebajando los 70 cm necesarios para albergar la contravuelta de 30 cm, se tocó la base de un plano de discontinuidad paralelo al eje del túnel, descubierto a posteriori.

La constructora, la dirección de obra y el Departamento de Puertos y Transportes de la Generalidad de Cataluña opinan de manera diferente con respecto a si la discontinuidad era una falla vertical o simplemente una zona más diaclasada, pero lo que sí parece claro es que había servido de lecho de un antiguo torrente y, por tanto, había agua. Tampoco se sabe aún con certeza si la excavación para la contravuelta se hizo correctamente o no. Inmediatamente, apareció una chimenea (día 25) y seguidamente comenzaron las tareas de estabilización (básicamente proyección de hormigón), pero todavía nadie temía un colapso total, ya que la formación de chimeneas no es extraña. La estabilización no fue suficiente y el colapso total se produjo el día 27. Como consecuencia del episodio estalló una grave crisis política y social. [11]

En ese mismo año (2005), el gobierno catalán prohibió la construcción de túneles con el Nuevo Método Austriaco. (Véase Figura 4.7)

Figura 4.7.-Hundimiento del barrio de El Carmel (Barcelona)



2) METRO DE MADRID

Uno de los más sonados fracasos en España, hasta el caso del Carmel, se dio en Madrid en 1994 en un pequeño tramo de 277 metros, en el cierre de la Línea 6 Circular de Metro, incluso llevando a cabo un perfecto control de la auscultación dispuesta. Ese día por momentos y gracias a una gran diligencia técnica se evitó un desastroso hundimiento que podría haber entrado en los anales de la historia.

Desde entonces, la utilización del Nuevo Método Austriaco para la construcción de túneles está prohibido en Madrid.

3) METRO DE LONDRES

Los tres túneles del complejo de estaciones de la Central Terminal Area del aeropuerto de Heathrow (Londres) se hundieron el 21 de octubre de 1994 sin que, afortunadamente, hubiesen víctimas mortales. Las obras estuvieron paradas hasta que se autorizó el avance el 20 de febrero de 1995.

La Health & Safety Executive de Inglaterra publicó, después del hundimiento, un detallado informe sobre el NATM. En él se recogieron los accidentes debidos al método en suelos blandos en zonas urbanas, que desde los años 80 hasta 1996 hacían un total de 39 derrumbes.

Problemas similares han ocurrido en el Metro de Munich, con más de 18 hundimientos en los últimos años y víctimas mortales. [10]

Aunque no hubo víctimas, sí causaron graves destrozos los ocurridos en la avenida Santo Amaro, de Sao Paulo (Brasil), en 1993; en Los Ángeles, en 1996, u otro ocurrido en el metro de Santana (Brasil), en 1983, que obligó a demoler seis casas. A esta relación de accidentes habría que sumarle otros ocurridos desde 1996, como los registrados en los metros de Estambul, Shanghai, Lisboa y Atenas.

En otros casos, sin embargo, el NATM ha sido utilizado con éxito en suelos blandos, como en los metros de Bochum, Stuttgart, Nuremberg y Frankfurt, además de muchos tramos del de Viena, con suelos muy blandos y con mucha agua, y algunos del metro de Essen, que precisó en ellos aire comprimido mientras que la tuneladora EPB del tramo adyacente trabajaba sin problemas.

4.3 Sostenimiento y revestimiento.

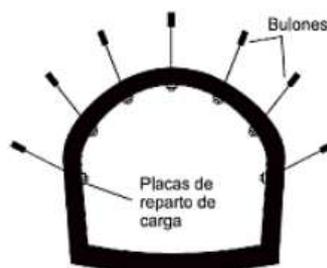
El sostenimiento de un túnel se entiende como el conjunto de elementos que, debidamente colocados colaboran a la estabilidad del mismo.

Sin embargo, la razón de ser del revestimiento no tiene por qué ser solo estructural, sino que también puede obedecer a otras motivaciones, como la estética o la impermeabilización.

Los principales elementos utilizados en el sostenimiento de los túneles son:

- **Bulones:** elementos generalmente de acero que trabajan cosiendo las discontinuidades que atraviesan. También aportan una compresión radial a la roca, evitando así descompresiones que puedan dar lugar a inestabilidades. (Ver Figura 4.8)

Figura 4.8.-Esquema del bulonado de un túnel



- **Hormigón proyectado (gunita)**: puesta en obra de un mortero u hormigón a gran velocidad a través de una manguera, con eventual malla de refuerzo. El material se adhiere perfectamente al terreno, lo que hace que las presiones sean prácticamente uniformes. (Ver Figura 4.9)

Figura 4.9.-Gunitado mediante robot mecánico



Fuente: Extremiana Vázquez, I. (2011). Tesis “Gestión de riesgos en proyectos de túneles”.

- **Cerchas metálicas**: elementos en forma de arco que presentan excelentes propiedades mecánicas (ver Figura 4.10). Trabajando junto al hormigón proyectado constituyen un buen elemento resistente. Son unas costillas que se colocan en contacto con el perímetro de la excavación, apoyando en la solera. Suelen ser perfide TH o HEB, en función de la rigidez requerida.

Figura 4.10.-Cerchas metálicas



Además de lo visto, que son soluciones generales muy utilizadas en la construcción de túneles, existen métodos específicos de sostenimiento para situaciones especiales, como por ejemplo los paraguas de micropilotes (Figura 4.11), bulonado del frente o hinca de tubos.

Figura 4.11.-Paraguas de micropilotes



En cuanto al revestimiento, los principales elementos son:

- **Hormigón bombeado:** el hormigón se vierte rellenando el hueco entre el encofrado y el terreno. Así se consigue que el hormigón se acople al contorno de la excavación, mientras que la cara vista queda con un buen acabado. (Figura 4.12).

Figura 4.12.-Revestimiento de hormigón bombeado con carro de encofrado



- **Dovelas prefabricadas:** este sistema está creciendo ligado al uso de máquinas TBM con escudo. En general, las dovelas son elementos de hormigón armado

fabricadas en un parque exterior al túnel y transportadas al interior en plataformas sobre vía o rueda. Se colocan de forma automática o semi-automática y se inyecta el trasdós de la dovela para que esté en contacto con el terreno. (Figura 4.13).

Figura 4.13.-Dovelas prefabricadas de hormigón



- **Paneles prefabricados**: los paneles no tienen finalidad resistente; su finalidad es puramente estética o de protección. Hay gran variedad de productos de diferentes casas comerciales. [12]

5 RIESGOS SUPERFICIALES.

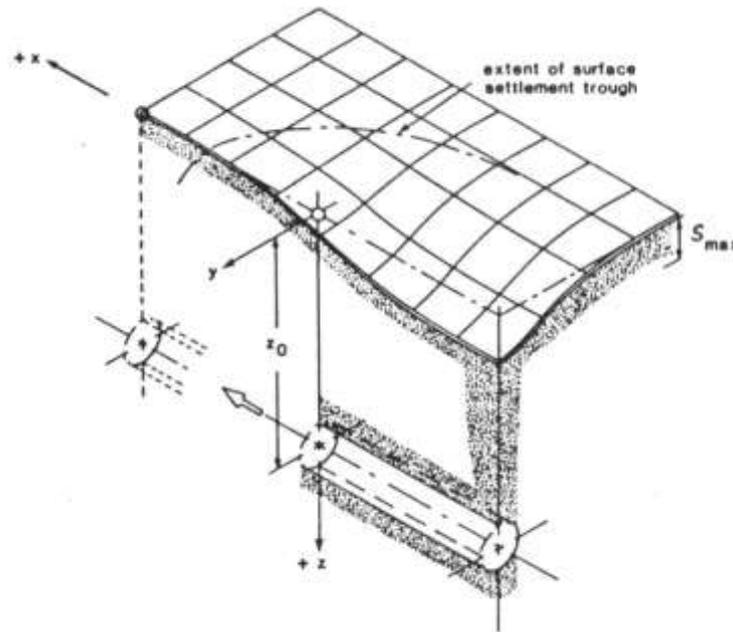
La excavación de galerías en terrenos con baja cobertura se ha hecho cada vez más frecuente y por ello ha tomado gran importancia la posibilidad de evaluar el asentamiento superficial, pues en el área urbana la excavación de un túnel puede generar problemas para los edificios y estructuras ya existentes. La estimación del movimiento del terreno y con ello la verificación del riesgo que podemos ocasionar a los edificios y la infraestructura, se ha convertido en parte fundamental de cualquier proyecto que involucre la excavación de túneles urbanos.

En este capítulo se analizarán métodos para la determinación de los asentamientos verticales transversales, longitudinales y horizontales que ocurran en superficie debido a la excavación de un túnel.

5.1 Distribución de los asentamientos verticales en el terreno

El interés por los movimientos superficiales del terreno fue estimulado principalmente después de la intervención de Peck en la conferencia de la Ciudad de México, en 1969. Allí, basándose en la poca información disponible, Peck propuso algunas soluciones empíricas, que fueron luego desarrolladas por Cording y Hansmire (1975), Clough y Schmidt (1981), Attewell (1977), Hanya (1977), Ward y Pender (1981) y Dulacska (1982). Mair et al (1996) muestra la deformación inducida por la excavación presentada en la Figura 5.1, la cual muestra que en el producto de la excavación de un túnel se presentan deformaciones verticales y horizontales en superficie.

Figura 5.1.-Distribución del asentamiento vertical sobre un túnel (Mair et al.,1996)



Fuente: Pino González, D.A (2008). Tesis “Recomendación de bases para el diseño de constructivo de túneles”

5.1.1 ASENTAMIENTO VERTICAL AL EJE DE UN TÚNEL

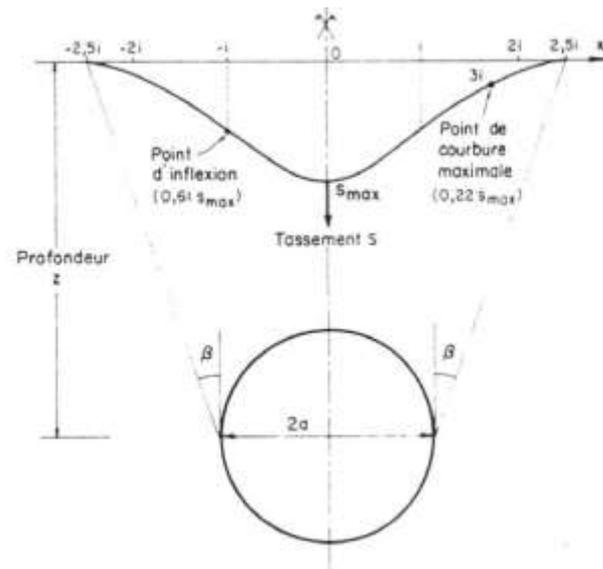
Peck estudió 25 casos de galerías excavadas en terreno cohesivo y granular, observando que el perfil de asentamiento era similar a la distribución normal gaussiana, como lo muestra la Figura 5.2. Analíticamente, con referencia a la Figura 5.1 y la Figura 5.2, el movimiento $S(y)$ puede ser expresado mediante la Fórmula (5.1):

$$(5.1) \quad S(y) = S_{max} \exp\left[-\frac{y^2}{2i^2}\right]$$

Donde:

- S_{max} = movimiento máximo sobre el eje del túnel;
- i = factor de forma que corresponde a la distancia del punto de inflexión de la curva al eje de la galería;
- y = distancia al eje de la galería.

Figura 5.2.-Perfil de asentamiento vertical (Schlosser et al, 1985)



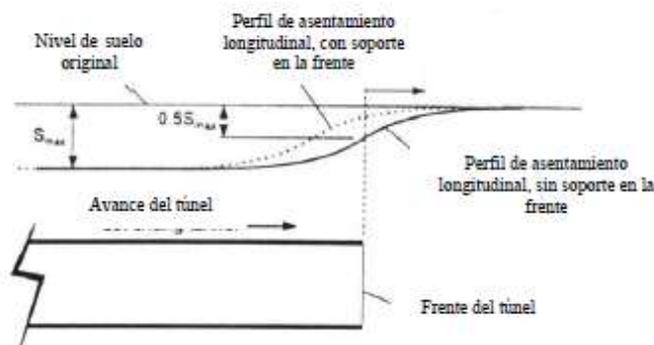
Fuente: Pino González, D.A (2008). Tesis “Recomendación de bases para el diseño de constructivo de túneles”

Se ha observado empíricamente que i depende principalmente de la profundidad z del eje y del radio a de una galería.

5.1.2 DISTRIBUCIÓN LONGITUDINAL DEL ASENTAMIENTO VERTICAL

El asentamiento superficial es un fenómeno tridimensional, como se muestra en la Figura 5.1, por lo que hay que tomar en cuenta la existencia del perfil longitudinal mostrado en la Figura 5.3.

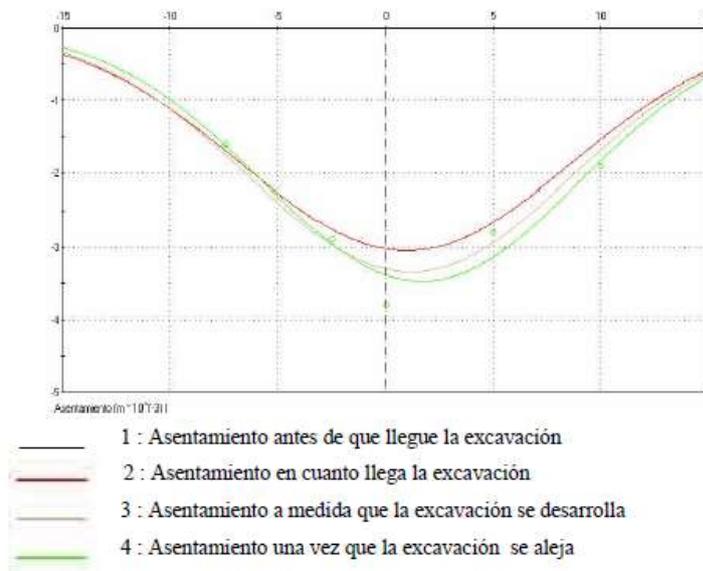
Figura 5.3.-Curso del asentamiento longitudinal en la superficie



Fuente: Pino González, D.A (2008). Tesis “Recomendación de bases para el diseño de constructivo de túneles”

Como el perfil transversal se desarrolla en forma Gaussiana, entonces el perfil longitudinal representa la curva acumulada (Figura 5.4).

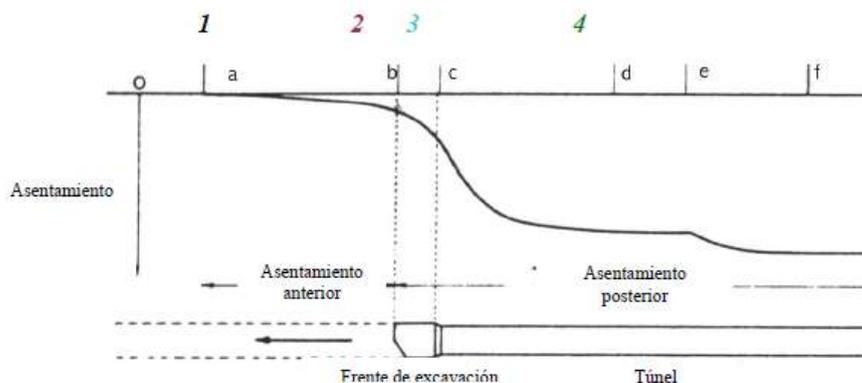
Figura 5.4.-Curva de Gauss en relación con la distancia a la excavación



Fuente: Pino González, D.A (2008). Tesis “Recomendación de bases para el diseño de constructivo de túneles”

Es interesante ver el comportamiento del asentamiento superficial a lo largo del tiempo para puntos ubicados sobre el eje del túnel, para el caso de galerías excavadas con máquinas escudadas, Figura 5.5.

Figura 5.5.-Evolución del asentamiento en la superficie durante la excavación de una galería con escudo



Inicio del asentamiento (A). Llegada del escudo (B). Paso de la cola del escudo (C). Fin del asentamiento diferido (D). Eliminación de área comprimida (E). Fin del asentamiento (F) (Hanya, 1997 – fuente: Schlosser et al. 19885) (1) Asentamiento antes de la llegada de la excavación (2) Asentamiento en cuanto llega la excavación (3) Asentamiento a medida que la excavación se desarrolla y (4) Asentamiento producido una vez que la excavación se aleja.

Fuente: Pino González, D.A (2008). Tesis “Recomendación de bases para el diseño de constructivo de túneles”

Todos los tipos de asentamiento pueden ser divididos en 2 clases: casi instantáneo y diferido en el tiempo.

El movimiento casi instantáneo se debe a:

- La acomodación del suelo delante de la galería;
- La acomodación del suelo tras el túnel;
- La acomodación del terreno en la fase de excavación y en la fase de revestimiento;
- La deformación del revestimiento.

El movimiento diferido se debe a:

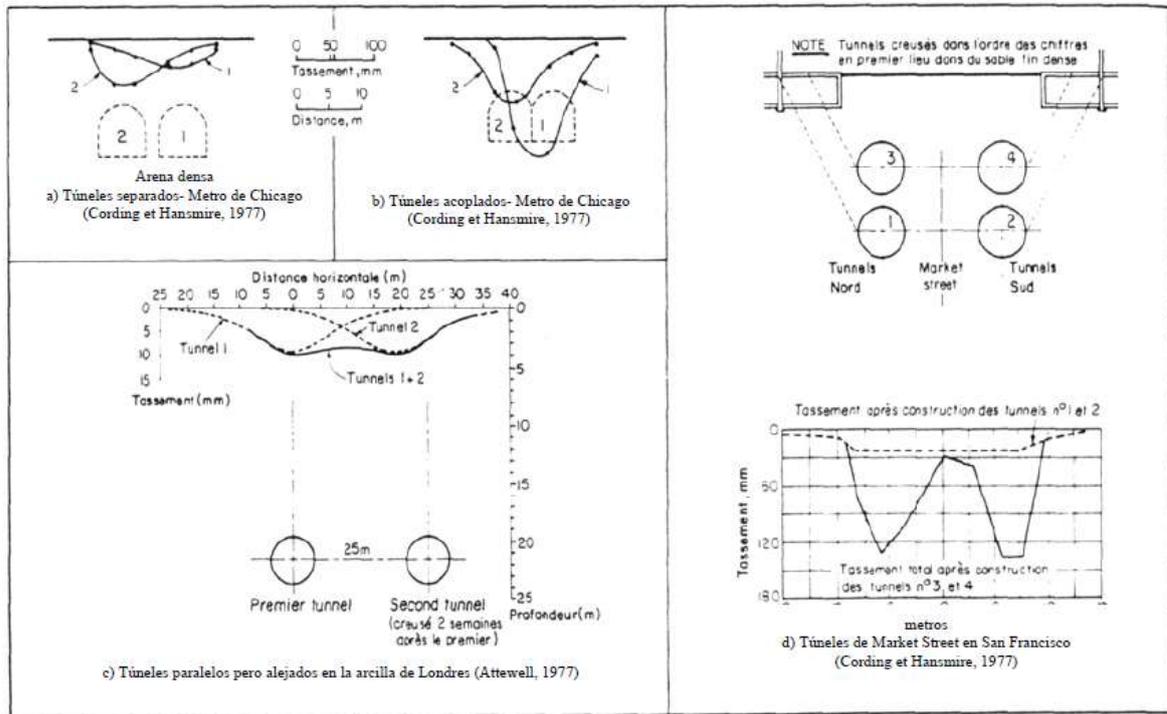
- La redistribución de las tensiones alrededor de la galería;
- La variación de la presión intersticial;
- Cambios al uso del terreno alrededor de la excavación.

5.1.3 TÚNELES MÚLTIPLES

Las observaciones realizadas en lugares donde se excavan 2 o más galerías cercanas han llevado a algunos autores a afirmar que, (Attewell, 1977), (Hanya, 1977):

- En una arena densa, la excavación de una segunda galería crea un perfil de asentamiento asimétrico y más profundo del lado de la segunda excavación Figura 5.6 (a).
- En una arcilla competente la asimetría será menos marcada. Figura 5.6 (c).
- Si se excava un segundo túnel adyacente a uno pre-existente, se crea una fuerte asimetría, dado que el asentamiento de éste será más pronunciado que el del primero. Figura 5.6 (b).
- Para calcular la amplitud de la depresión, se puede calcular la amplitud de las dos galerías por separado y luego sumar la distancia entre los ejes de ambas galerías. [13]

Figura 5.6.-Asentamiento superficial debido a la realización de varias galerías (Schlosser, 1985)



Fuente: Pino González, D.A (2008). Tesis “Recomendación de bases para el diseño de constructivo de túneles”

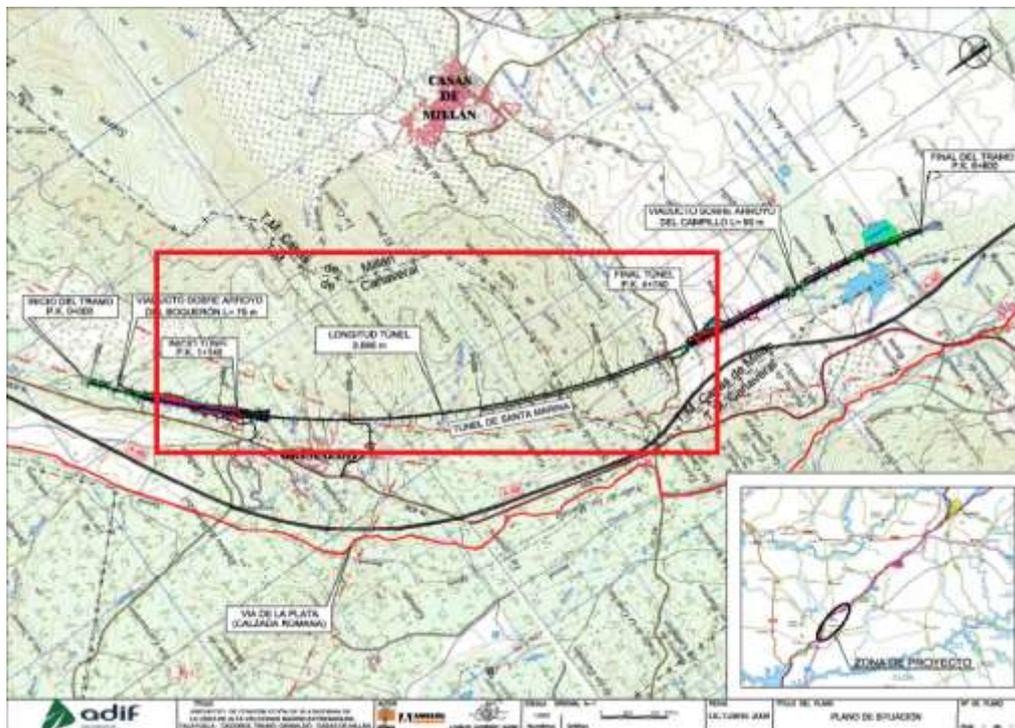
6 TÚNEL DE SANTA MARINA.

6.1 Situación.

El túnel de Santa Marina está incluido en el Proyecto de Construcción de plataforma Línea de Alta Velocidad Madrid – Extremadura, Cáceres – Talayuela, tramo: Grimaldo – Casas de Millán; desarrollado íntegramente en la provincia de Cáceres, discurriendo por los términos municipales de Cañaverál y Casas de Millán, España (ver Figura 6.1). Tiene una longitud de 3320 m, situándose entre el PK 1+360 y el PK 4+680, con un recubrimiento máximo de 205 m.

El túnel está compuesto, además, por sendos tramos artificiales en ambos extremos, de 215 metros en el emboquille norte, del PK 227+945 al PK 228+160, y 60 metros en el emboquille sur, del PK 231+480 al PK 231+540. Así pues, la sección en mina tiene una longitud total de 3320 metros, y la longitud total del túnel es de 3595 metros.

Figura 6.1.-Plano de situación del túnel de Santa Marina



Fuente: “Proyecto de Construcción de plataforma Línea de Alta Velocidad Madrid – Extremadura, Cáceres”

6.2 Geología.

El trazado del túnel de Santa Marina se encuentra dentro del Macizo Ibérico, en la Zona Centro Ibérica, y dentro de ella en el denominado dominio de los pliegues de eje vertical.

Los principales materiales a excavar corresponden al Complejo Esquisto Grauváquico, a las cuarcitas y pizarras del Ordovícico, y a depósitos tectosedimentarios.

El túnel Santa Marina atraviesa las siguientes unidades litológicas:

- Ceg -> Complejo Esquisto-Grauváquico
- Op -> Cuarcitas, Pizarras y Areniscas
- Oc -> Cuarcitas
- Opc -> Pizarras y cuarcitas
- Tcg -> Conglomerados
- FC y ZF -> Fallas

En la Tabla 6-1 se establecen las principales unidades geológicas – geotécnicas.

Tabla 6-1.-Principales unidades litológicas del túnel de Santa Marina

ATERIALES	EDAD	POTENCIA (M)
Complejo Esquisto-Gruaváquico (Ceg.)	Precámbrico	4500?
Pizarras, areniscas y cuarcitas (Op)	Ordovícico Inferior (Tremadociense)	500
Cuarcitas. Cuarcita Armoricana (Oc)	Ordovícico (Arenigiense)	150-300
Pizarras con intercalaciones de cuarcitas (Opc)	Ordovícico (Llanvim-Llandeilo)	300-350
Conglomerados con matriz arenofangosa (Tcg)	Terciario	82

Fuente: “Proyecto de Construcción de plataforma Línea de Alta Velocidad Madrid – Extremadura, Cáceres”

COMPLEJO ESQUISTO-GRAUVÁQUICO (CEG)

Está constituida fundamentalmente por pizarras, siendo minoritarios los tramos de grauvas.

En la zona Norte del túnel estos materiales se encuentran fuertemente tectonizados, al situarse entre la falla de Cañaveral y la falla del Dique Alentejo-Plasencia.

CUARCITAS, PIZARRAS Y ARENISCAS (OP)

Esta unidad está formada por pizarras, areniscas y cuarcitas, siendo más abundantes los niveles de cuarcita y arenisca que los de pizarra.

CUARCITAS (OC)

Esta unidad corresponde a la Cuarcita Armoricana, básicamente corresponde a cuarcitas con escasas intercalaciones de pizarra y arenisca, en el entorno de la falla de Cañaveral y las zonas de falla NO-SE estas se encuentran tectonizadas.

PIZARRAS Y CUARCÍAS (OPC)

Se trata de una serie pizarrosa con intercalaciones cuarcíticas y de arenisca.

GRAVAS ARENO-ARCILLOSAS (TCG)

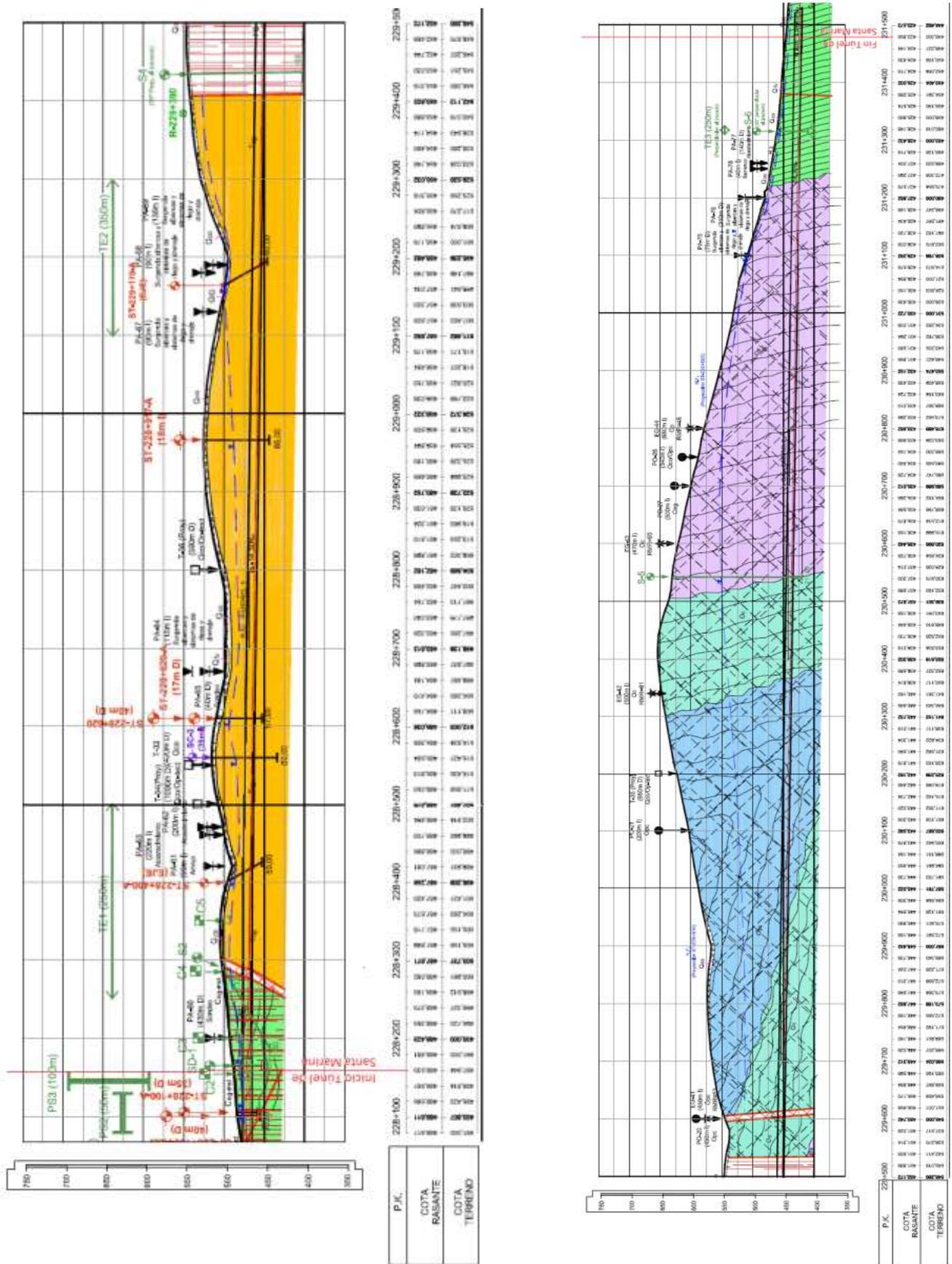
Se trata de depósitos tectosedimentarios de edad terciario a Paleocuaternario, litológicamente constituidos por una masa de cantos de cuarcita arenisca y pizarra, angulosos a subredondeados, embebidos en una matriz arcillosa rojiza y, a veces, sin presencia de esta matriz.

FALLAS (FC Y ZF)

Se distinguen dos tipos de tramos en falla en el trazado del Túnel Santa Marina, por un lado las zonas de fallas NO-SE (ZF), y por otro se encuentra la falla de Cañaveral (FC), la cual es subparalela al trazado del túnel, con orientación ENE-OSO.

A continuación se incluye en la Figura 6.2 el perfil geotécnico del terreno que atraviesa el túnel y, en la Tabla 6-2, Tabla 6-3 y Tabla 6-4, la tramificación de cada una de las unidades litológicas y los resúmenes de las características geotécnicas más importantes de cada tipo de litología. [14]

Figura 6.2.-Perfil Geotécnico



Fuente: "Proyecto de Construcción de plataforma Línea de Alta Velocidad Madrid – Extremadura, Cáceres"

Tabla 6-2.-Tramificación de cada unidad litológica

TRAMO PRINCIPALES	SUB-TRAMOS	PK'S		LONGITUDES PARCIALES m	Unidad	
		INICIO	FINAL			
		m	m			
1	1.1	1+360	1+482	122,00	Ceg-tec	
	1.2	1+482	1+492	10,00	ZF	
		1+492	2+610	1.118,00	Tcg	
		2+610	2+734	124,00	FC	
		2+734	2+754	20,00	Oc-tec	
1.3	2+754	2+784	30,00	Oc		
2	2.1	2+784	2+804	20,00	Oc-tec	
		2+804	2+814	10,00	ZF	
		2+814	2+834	20,00	Oc-tec	
	2.2	2+834	3+150	316,00	Oc	
		3+150	3+570	420,00	Opc	
		3+570	3+760	190,00	Oc/Oc-tec	
		3+760	4+430	670,00	Op	
		2.3	4+430	4+680	250,00	Ceg
						3.320,00 m

Fuente: "Proyecto de Construcción de plataforma Línea de Alta Velocidad Madrid – Extremadura, Cáceres"

Tabla 6-3.-Caracterización geotécnica de materiales. Sustrato rocoso

UNIDAD	DENSIDAD APARENTE (GCM ³)	ROCA INTACTA				MACIZO ROCOSO									
		σ_{ci} (MPa)	σ_c (MPa)	Ei (MPa)	mi	σ_{cm} (MPa)	RMR	DESMONTES		TÚNEL			DISCONTINUIDADES	MÓDULO DE DEFORMACIÓN E (MPa)	COEFICIENTE DE POISSON ν
								COHESIÓN C (MPa)	FRICCIÓN ϕ (°)	RECUBRIMIENTO (m)	COHESIÓN C (MPa)	FRICCIÓN ϕ (°)			
Ceg'	2,66	28,6	5,2	7.368	7	1,03	48	0,16	32	70	0,31	40	26	1.697	0,25
Op	2,57	22,07	2,97	6.767	7	0,87	52	-	-	180	0,45	31	32	1.784	0,25
Oc	2,66	134,2	12,33	29.264	15	8,01	54	-	-	180/230	1,51/1,69	53/51	34	3.324	0,25
Oc-tec	2,66	134,2	12,33	29.264	15	3,00	44	-	-	80	0,63	54	34	1.490	0,25
Opc	2,66	47,2	4,9	19.532	16	1,82	50	-	-	230	0,87	41	35	2.670	0,25
ZF	2,60	30	-	8.700	10	0,15	25	-	-	50/100	0,130,20	34/29	-	363	0,30

[1] Según Estudio Geológico-Geotécnico: σ_{ci} = 34,63 MPa; E_i = 9.627 MPa; E = 2.150 MPa.

Fuente: "Proyecto de Construcción de plataforma Línea de Alta Velocidad Madrid – Extremadura, Cáceres"

Tabla 6-4.-Caracterización geotécnica de materiales tipo suelo

UNIDAD		FC	Ceg-tect	Tcg	Ceg-met	
HUMEDAD Y DENSIDAD	Densidad seca. (g/cm ³)	1,68	1,84	2,03	1,84	
	Densidad aparente (g/cm ³)	1,93	2,01	2,22	1,96	
	Humedad (%)	15,89	9,55	9,24	10,62	
	Peso específico de las partículas sólidas	-	2,71	-	2,67	
CONTENIDO EN FINOS	% que pasa # 0,080mm	31,40	27,17	27,32	30,66	
PLASTICIDAD	Límite Líquido	45,40	29,09	24,46	28,29	
	Límite Plástico	32,60	22,37	18,83	21,48	
	Índice de Plasticidad	12,80	6,72	5,69	6,81	
PROCTOR MODIFICADO	Densidad máxima (g/cm ³)	-	2,16	2,19	2,02	
	Humedad óptima. (%)	-	7,35	6,33	9,62	
C.B.R.	CBR al 95%	-	19,6	25,57	12,28	
	% Hinchamiento	-	0,15	0,18	0,5	
EXPANSIVIDAD	Hinchamiento libre (%)	1,34	0,13	0,71	0,09	
	Lambe (Cambio Potencial Volumen)	Critico	No crítico	No crítico	-	
	Presión de Hinchamiento (kp/cm ²)	0,28	-	0,17	-	
COLAPSO	Índice de colapso	-	0,39	0,63	0,34	
RCS	e _v (kp/cm ²)	1,12	0,45 ¹	3	0,64	
PARÁMETROS RESISTENTES DE CÁLCULO	Corto plazo	Cu (kp/cm ²)	-	-	-	0,32
		Cohesion C (kp/cm ²)	0,83	0,12	0,8	0,16
	Largo plazo	Fricción ϕ (°)	36	34	32	37
		Módulo de deformación E (kp/cm ²)	814	1,150	2,711	200
PARÁMETROS DEFORMACIONALES DE CÁLCULO	Deformación elástica	Coefficiente de Poisson ν	0,35	0,30	0,35	0,35
		e _s	-	-	-	0,62
	Deformación plástica	e _c	-	-	-	0,015
		Co	-	-	-	-
PARAMETROS QUÍMICOS	Materia Orgánica (%)	1,32	0,40	0,56	0,73	
	Sulfatos (%)	0,13	0,04	0,10	0,12	
	Carbonatos (%)	5,11	0,07	0,07	1,26	
	Sales solubles (%)	-	-0,17	0,72	-	
CLASIFICACIÓN USCS		MH-OH SC	SM-SC	SM-SC	SM-SC	

Fuente: "Proyecto de Construcción de plataforma Línea de Alta Velocidad Madrid – Extremadura, Cáceres"

Para calcular el espesor de terreno de cada material que está por encima de la rasante del túnel nos ayudamos del perfil geotécnico y de su guitarra, donde nos especifica la cota del terreno y la cota de la rasante. Para calcular el terreno que tenemos por encima de la rasante, la cual coincide con el eje del túnel, basta restar a la cota del terreno la cota de la rasante.

Para el posterior estudio llevado a cabo en el Capítulo 7, supondremos un sólo terreno, por lo que su cota será calculada como la media del espesor inicial y final del material que corta a la rasante del túnel.

Si queremos ver qué cantidad de terreno tenemos por encima del túnel y que, por lo tanto va a ser soportado por éste, basta restar a la altura anteriormente calculada la altura del túnel.

7 ESTUDIO DEL NUEVO MÉTODO AUSTRIACO DE CONSTRUCCIÓN DE TÚNELES.

En el presente estudio se abordará la construcción de un túnel mediante el Nuevo Método Austriaco, suponiendo un tipo de terreno rocoso e isótropo a lo largo de todo el macizo, en concreto, el perteneciente a la unidad litológica de las cuarcitas (Oc) del túnel de Santa Marina. La cota del terreno, tal y como se ha dicho en el capítulo anterior, será calculada como la media del espesor inicial y final del material que corta a la rasante del túnel, según su perfil geotécnico (Figura 6.2). Para ver qué cantidad de terreno tenemos por encima del túnel y que, por lo tanto va a ser soportado por éste, basta restar a la altura anteriormente calculada la altura del túnel. En nuestro estudio, el túnel es aproximado a un círculo perfecto de radio 6,4 m, por tanto este radio será igual a su altura.

Los resultados de estos cálculos son mostrados en la Tabla 7-1 y Tabla 7-2.

Tabla 7-1.-Cálculo del Espesor Medio de la Unidad Litológica de las Cuarcitas (Oc)

Unidad	PK's		Espesor inicial			Espesor final			Espesor medio (m)
	Inicial	Final	Cota Terreno (m)	Cota Rasante (m)	Espesor inicial (m)	Cota Terreno (m)	Cota Rasante (m)	Espesor final (m)	
Oc-tec	2+734	2+754	543,714	451,743	91,970	540,341	451,314	89,027	90,499
Oc	2+754	2+784	540,341	451,314	89,027	537,517	451,028	86,489	87,758
Oc-tec	2+784	2+804	537,517	451,028	86,489	545,000	450,742	94,258	90,374
Oc-tec	2+814	2+834	551,001	450,456	100,545	554,730	450,313	104,417	102,481
Oc	2+834	3+150	554,730	450,313	104,417	579,014	445,737	133,277	118,847
Oc/Oc-tec	3+570	3+760	651,222	439,731	211,491	629,026	437,014	192,012	201,752

Tabla 7-2.-Cálculo del Espesor Medio de cada material con respecto a la parte superior del túnel ($h=R=6,4m$)

Unidad	Espesor medio desde la rasante (m)	Espesor medio de material que soporta el túnel (m)
Oc-tec	90,499	84,098
Oc	87,758	81,358
Oc-tec	90,374	83,974
Oc-tec	102,481	96,081
Oc	118,847	112,447
Oc/Oc-tec	201,752	195,352

Como vemos, de los seis tramos pertenecientes a nuestra unidad litológica Oc, se ha cogido al azar el que tiene un mayor espesor de terreno (195,352 m). Por lo tanto, será este espesor el considerado a la hora de realizar los cálculos de excavación.

En cuanto a los valores geotécnicos del terreno Oc, los parámetros que se emplearán en las simulaciones con los diferentes programas se resumen en la Tabla 7-3.

Tabla 7-3.-Valores Geotécnicos empleados para las simulaciones

LITOLOGÍA	MÓDULO DE YOUNG (Mpa)	RATIO DE POISSON	DENSIDAD APARENTE (g/cm^3)	COHESIÓN (MPa)	ÁNGULO FRICCIÓN*(°)
Oc	3324	0,25	2,65	1,51	53 (34)

(*). El valor en paréntesis de la columna "ángulo de fricción" representa el ángulo de fricción residual.)

Antes de pasar al estudio tensional de la excavación, nos centraremos en el estudio de los riesgos geológicos que están presentes en la excavación de un macizo rocoso, ya que su previsión es fundamental para preservar la seguridad del personal y la excavación.

7.1.1 RIESGOS GEOLÓGICOS.

Los escenarios de riesgo describen el comportamiento del macizo en relación al avance del túnel, sin tener en cuenta el sostenimiento. Los riesgos están caracterizados por las propiedades del macizo y determinados por la geometría. Por lo que dependerán de los siguientes factores:

- Tipo de roca
- Recubrimiento

- Estructura de la diaclasa, incluida la orientación de la estructura-obra civil
- Agua infiltrada del terreno

Entre los distintos posibles escenarios de riesgo, aquel identificado en nuestro macizo rocoso, es la posibilidad de caída de bloques/ cuñas, por lo que se procederá a su estudio mediante el programa *Unwedge 4.0*. Este programa permite realizar el truncado del tamaño de las cuñas en función de la continuidad de los planos que la forman. Para los cálculos, se ha limitado a 6 m la longitud de túnel a analizar al considerar ésta como la longitud mayor de pase de excavación prevista durante la excavación mediante el Nuevo Método Austriaco.

Para ello se han considerado las discontinuidades del proyecto original del Túnel de Santa Marina que se encuentran presentes en el tramo de macizo afectado por el tipo de terreno objeto de estudio (Oc).

En la Tabla 7-4 se incluye el patrón de fracturación y las propiedades de las cuñas empleadas en el cálculo. De forma conservadora, la cohesión en cuñas se ha considerado nula.

Tabla 7-4.- Características de las familias de cuñas

FAMILIA **	BUZAMIENTO (°)	DIRECCIÓN BUZAMIENTO (°)	P (MN/m ²)	C (MN/m ²)	Φ (°)
J1 (S ₀)	30	230	0,0265	0	34
J2	57	123			
J3	48	010			
J4	71	309			
J5	10	093			

(**.Familia S₀: Estratificación. Familia J: Diaclasa)

Fuente: “Proyecto de Construcción de plataforma Línea de Alta Velocidad Madrid – Extremadura, Cáceres

La dirección Azimut del eje del túnel varía entre 26° y 31°, así pues, la cuña mayor para el tramo homogéneo resulta en una dirección de 31°, por lo que será esta dirección la empleada para la valoración de las cuñas.

Así pues, obtenemos las siguientes combinaciones y resultados mostrados en la Figura 7.1, Figura 7.2, Figura 7.3, Figura 7.4, Figura 7.5, Figura 7.6, Figura 7.7, Figura 7.8, Figura 7.9 y Figura 7.10.

Figura 7.1.- Combinación J1-J2-J3

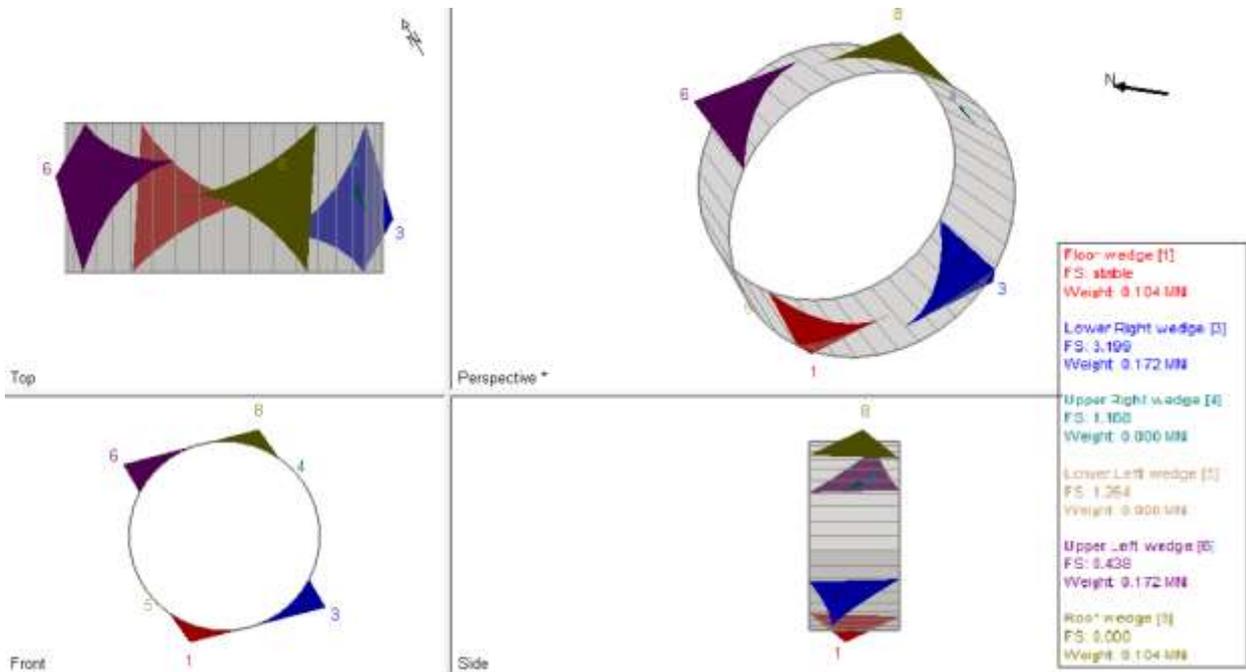


Figura 7.2.- Combinación J1-J2-J4

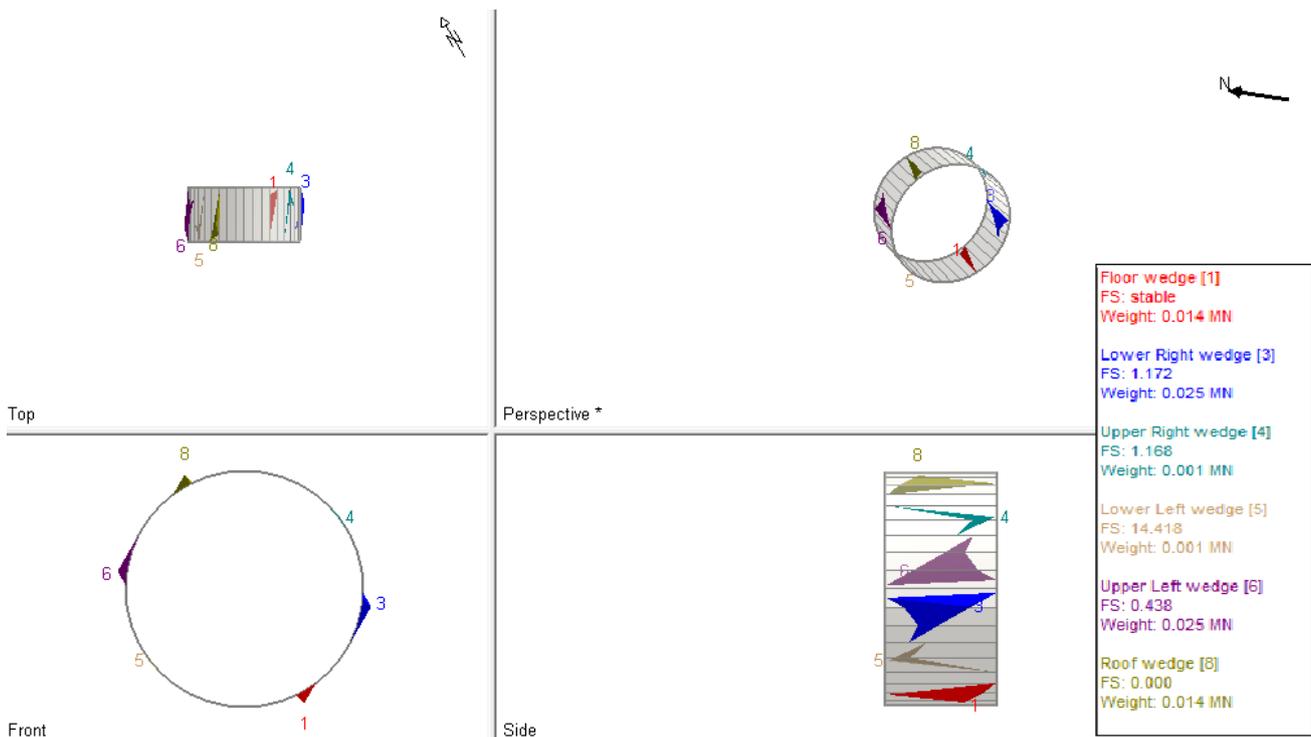


Figura 7.3.- Combinación J1-J2-J5

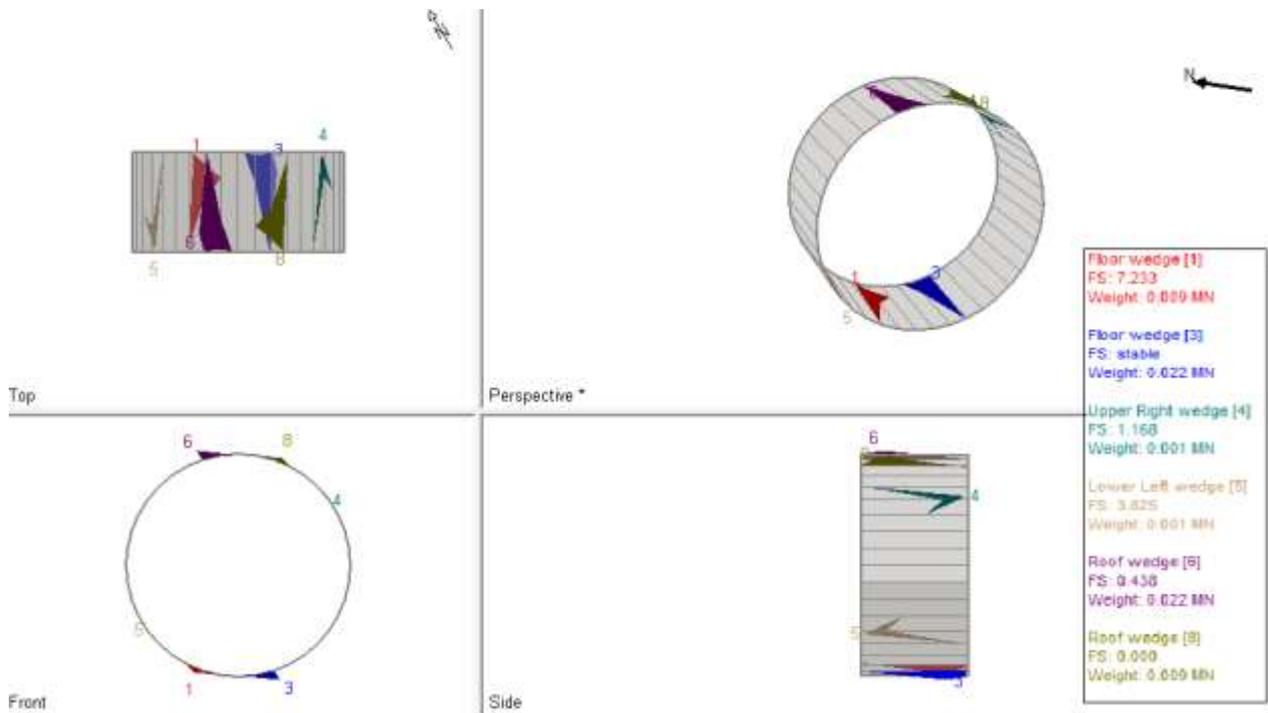


Figura 7.4.- Combinación J1-J3-J4

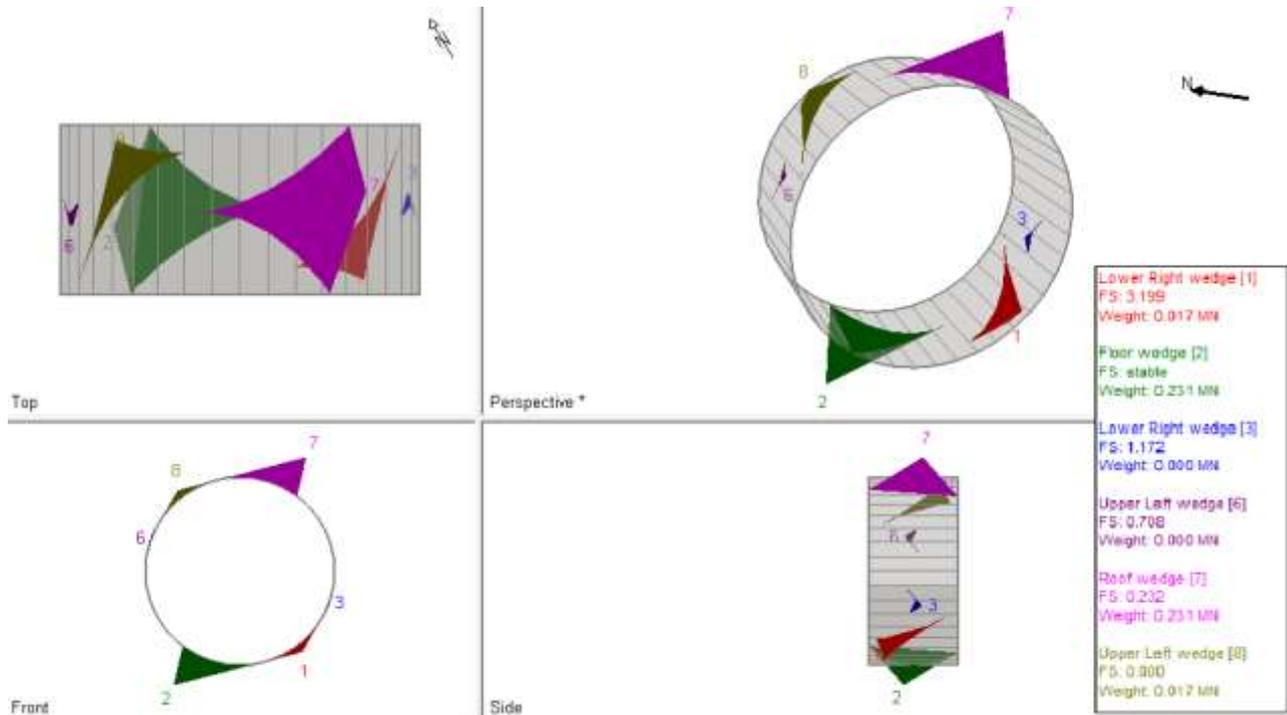


Figura 7.5.- Combinación J1-J3-J5

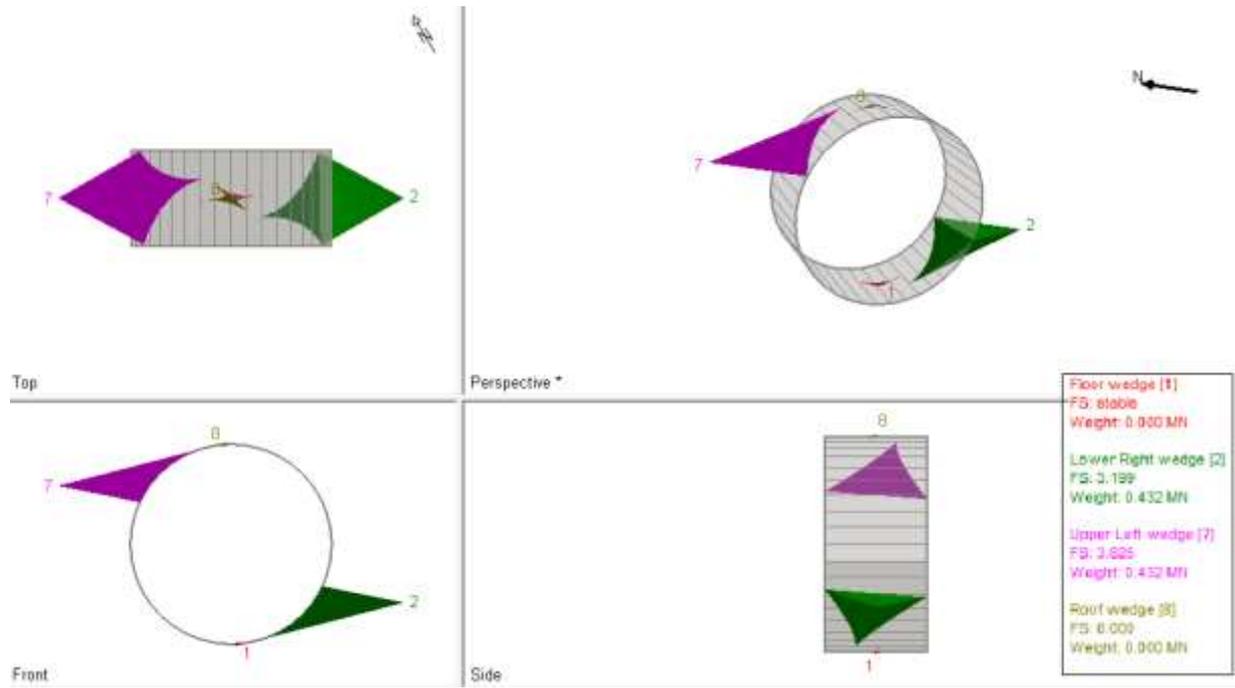


Figura 7.6.- Combinación J1-J4-J5

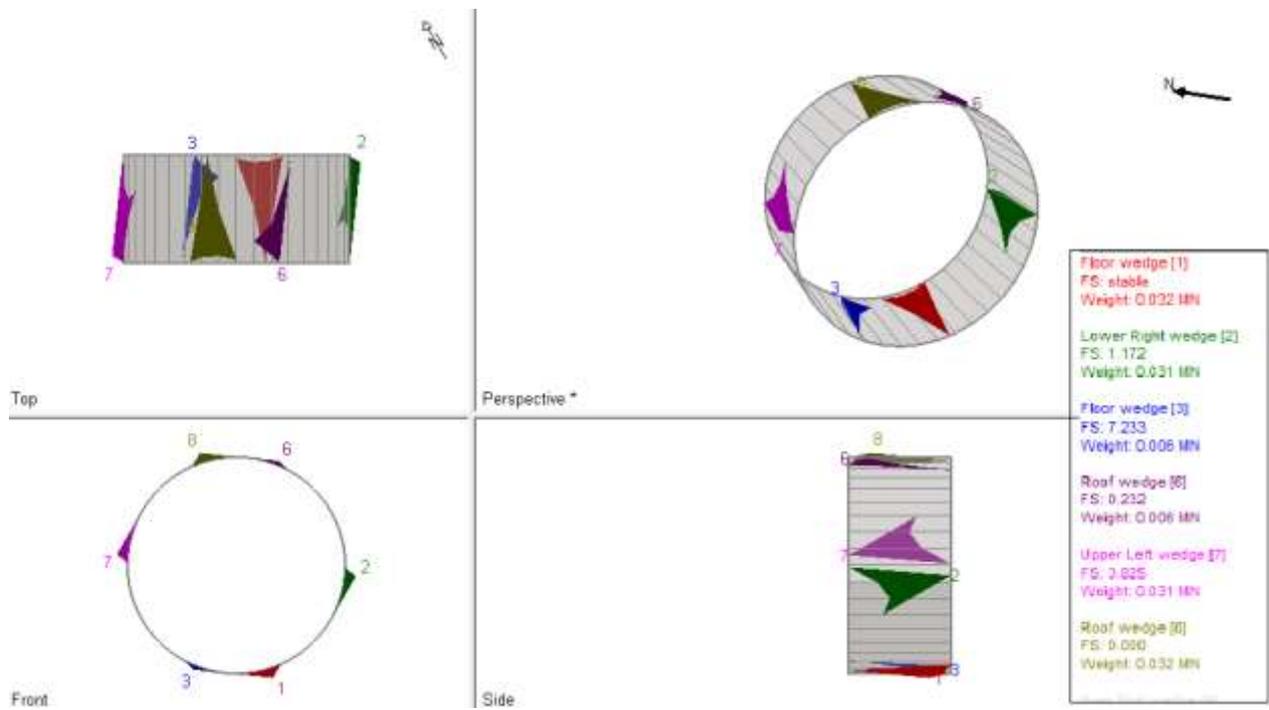


Figura 7.7.- Combinación J2-J3-J4

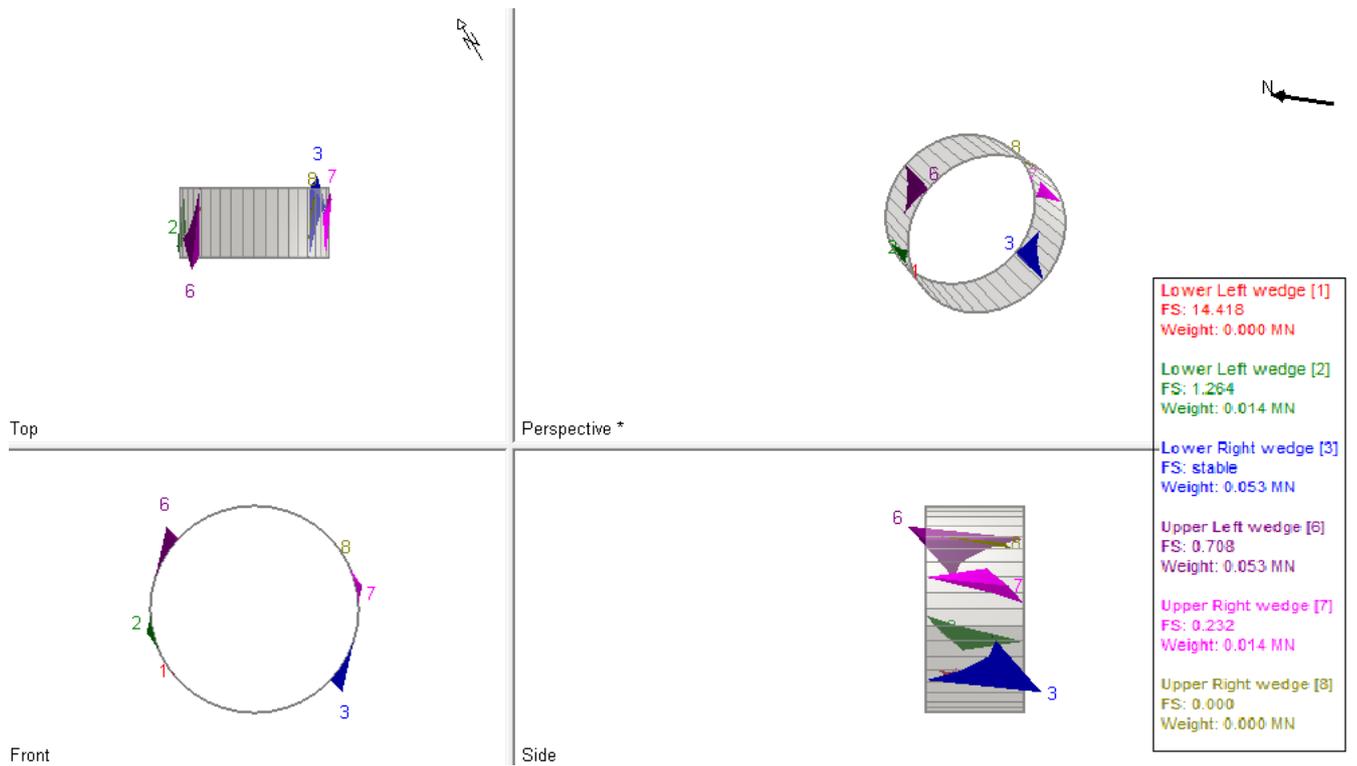


Figura 7.8.- Combinación J2-J3-J5

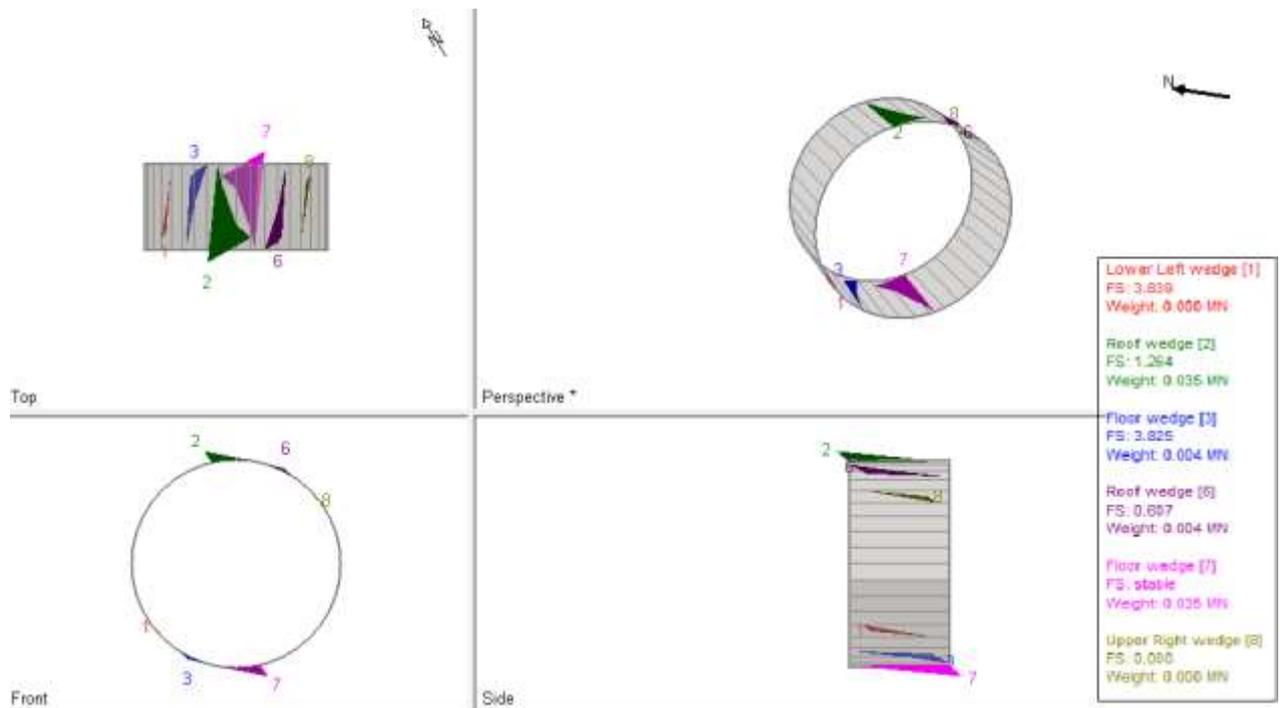


Figura 7.9.- Combinación J2-J4-J5

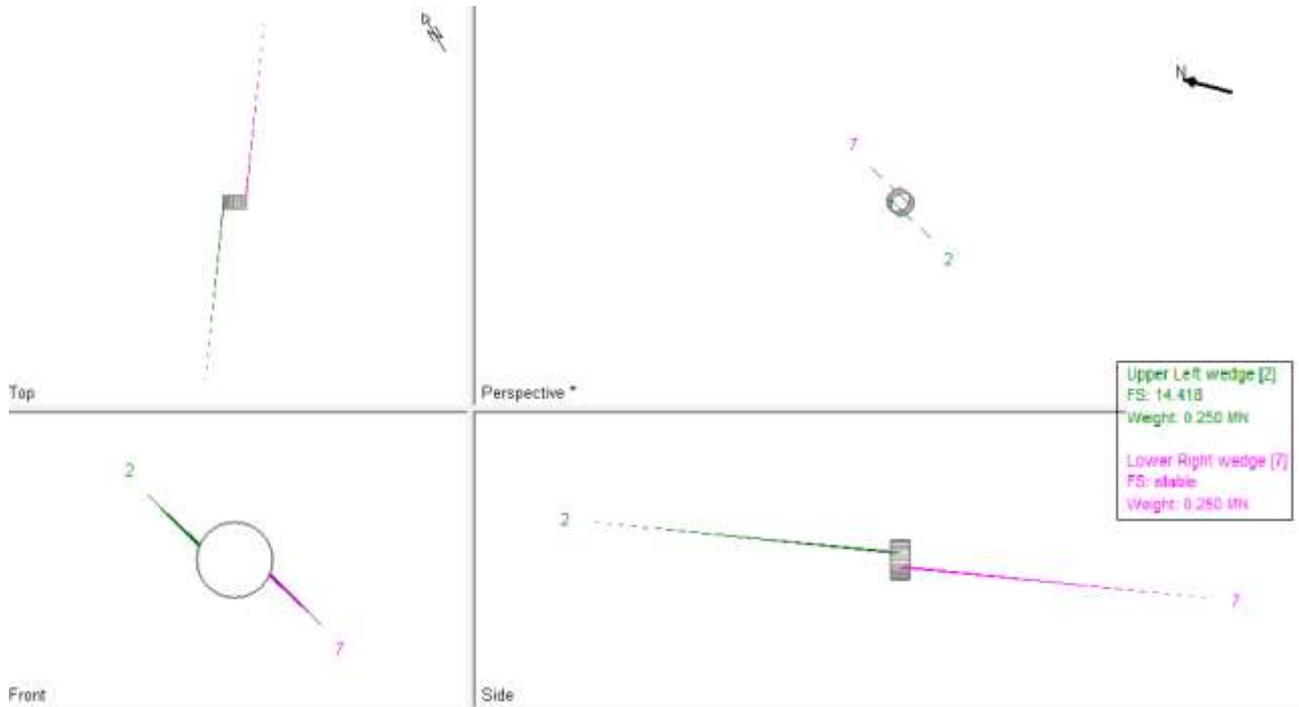
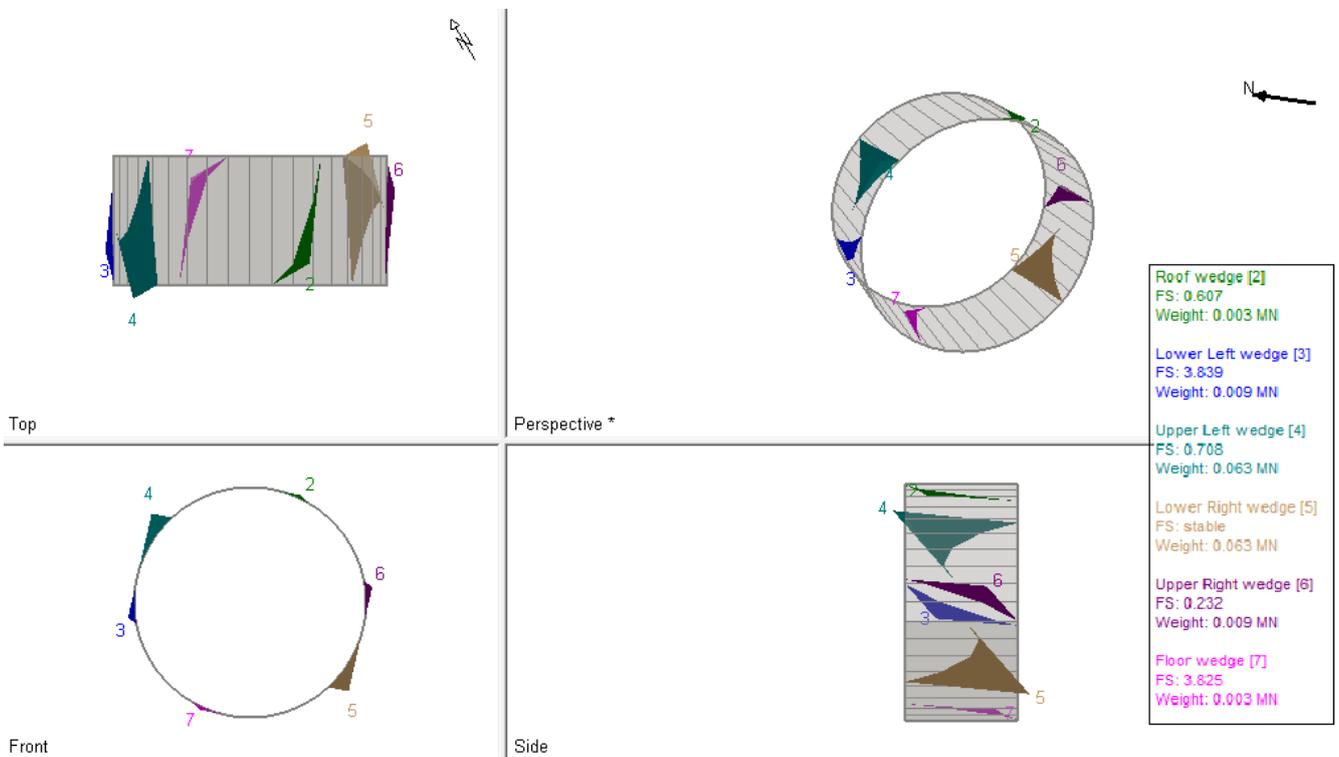


Figura 7.10.- Combinación J3-J4-J5



Si consideramos un factor de seguridad (F.S) de 1.5, los bloques/ cuñas que se forman en el terreno con un factor de seguridad inferior correrán el riesgo de desprendimiento. Posteriormente, una vez analizadas las tensiones durante la excavación, se hará de nuevo el estudio del desprendimiento de cuñas con el sostenimiento previsto para comprobar que efectivamente el riesgo se ha neutralizado.

7.1.2 ESTUDIO TENSIONAL DEL TERRENO DURANTE LA EXCAVACIÓN Y REVESTIMIENTO.

Para llevar a cabo el estudio tensional del terreno durante la excavación del túnel, así como durante su sostenimiento y revestimiento, se ha utilizado el programa de análisis mediante elementos finitos de *Phase 2* de la firma *Rocscience*.

Todos los programas de análisis mediante elementos finitos se caracterizan por tener una serie de pasos comunes, bien diferenciados. Estos podrían resumirse en los siguientes:

- Paso 1: Definir el propósito del análisis.
- Paso 2: Recopilar los datos de entrada.
- Paso 3: Crear un modelo geométrico.
- Paso 4: Crear una malla del modelo.
- Paso 5: Definir el tipo de análisis (1D, 2D, Axisimétrico...)
- Paso 6: Definir las propiedades de los materiales.
- Paso 7: Definir los apoyos del modelo.
- Paso 8: Definir las cargas y sus posibles combinaciones.
- Paso 9: Ejecución del análisis.
- Paso 10: Post-procesamiento de los resultados.

Como vemos, los pasos 1 y 2 son los pasos previos al análisis, en los cuales se responde a las preguntas “¿qué quiero hacer?” y “¿qué datos tengo y/o necesito para conseguirlo?”

A continuación, se pasa ya al uso del programa mencionado, por lo que analizaremos paso a paso el procedimiento seguido con una serie de Figuras ilustrativas que reflejen el modelo creado para el análisis tensional de nuestra excavación y revestimiento.

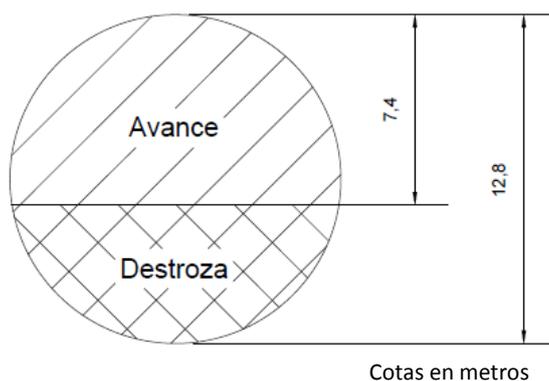
7.1.2.1 Paso 3: Crear un modelo geométrico

En este paso definimos la geometría de nuestro modelo. Para ello tenemos que definir la excavación y el terreno que tenemos. Como el análisis tensional del programa utilizado es bidimensional, siempre trabajaremos sobre el plano XY.

Los datos utilizados para la creación del modelo geométrico son los siguientes:

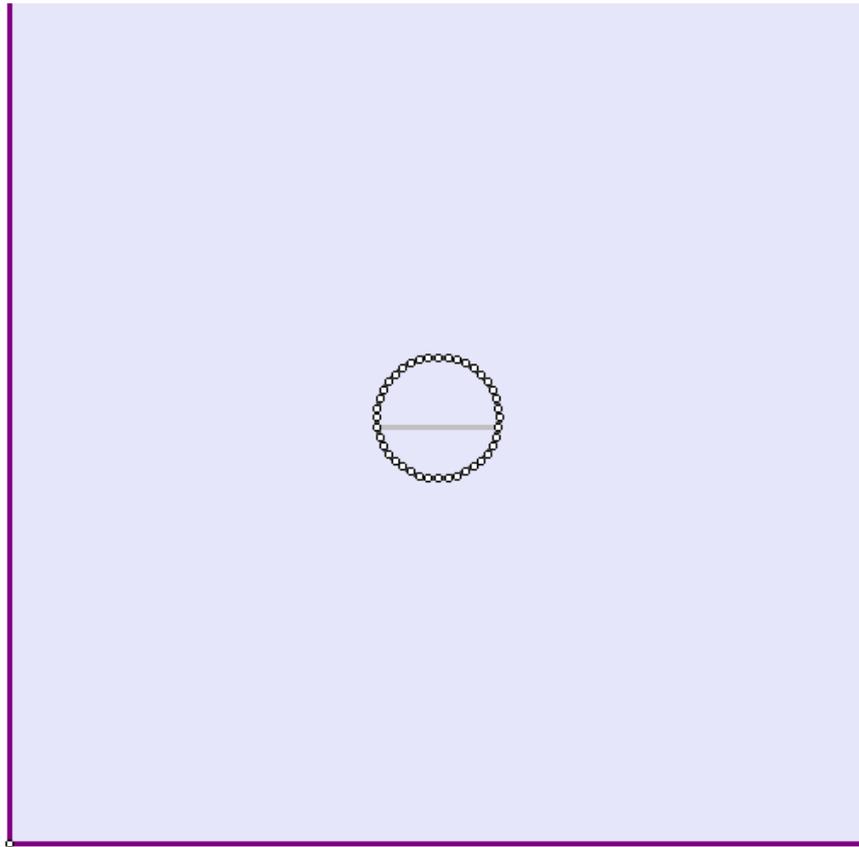
- Terreno: Roca tipo Oc, de espesor igual a 201,752 m sobre la rasante del túnel.
- Túnel: Círculo de radio 6,4 m.
- Excavación: Como la excavación se va a llevar a cabo siguiendo el Nuevo Método Austriaco y poseemos un terreno rocoso con buenas propiedades, se ha dividido la excavación del túnel en dos partes: avance (77,09 m²) y destroza (51,59 m²). La sección de la excavación se muestra en la Figura 7.11.

Figura 7.11.- Sección de la Excavación del Modelo



Así pues, dibujando con estos datos el modelo sobre el programa, obtenemos la geometría mostrada en la Figura 7.12.

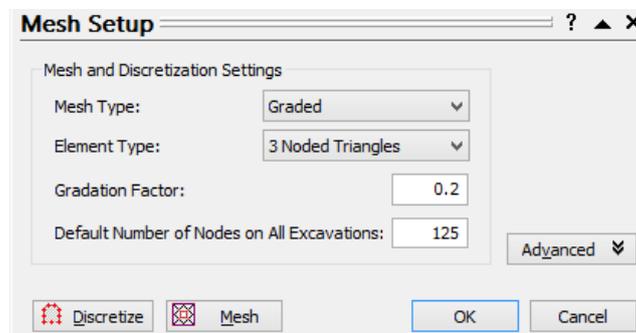
Figura 7.12.- Modelo Geométrico de la Excavación



7.1.2.2 Paso 4: Crear un malla del modelo.

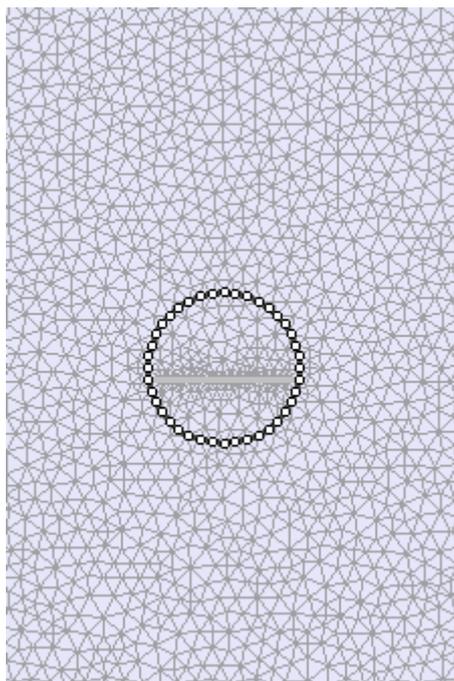
Con la geometría ya creada, pasamos al mallado del modelo. Para ello utilizamos el comando *Mesh Setup*. Y definimos las condiciones de mallado (ver Figura 7.13)

Figura 7.13.- Condiciones de mallado



Así pues, el resultado final del mallado del modelo se representa en la Figura 7.14.

Figura 7.14.- Mallado del Modelo



7.1.2.3 Pasos 5, 6, 7, 8 y 9.

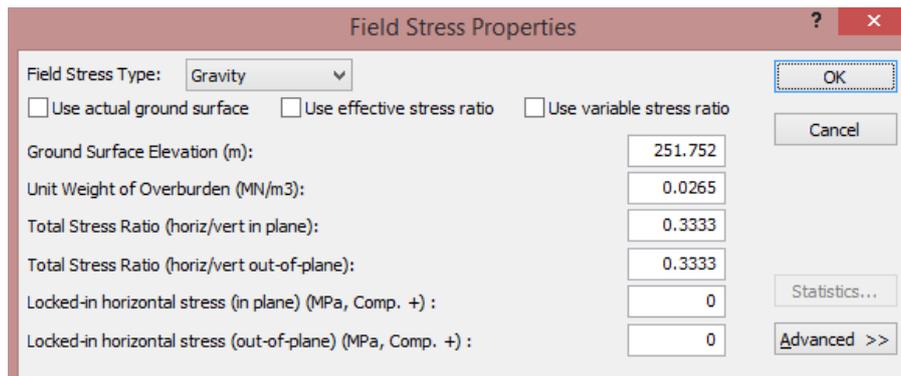
En estos pasos definiremos el tipo de material, los apoyos, las cargas y las fases de excavación, sostenimiento y revestimiento.

Primeramente le damos características a nuestro suelo, usando los datos especificados al inicio de este capítulo. El criterio de rotura considerado es el de Hoek-Brown, ampliamente aceptado en macizos rocosos.

A continuación, definimos los apoyos del modelo, restringiendo el movimiento tanto en X como en Y en la base del terreno, y sólo en X en las paredes de éste, debido a que se producirán desplazamientos del terreno a medida que excavemos, producto de su peso y la gravedad (únicas cargas que afectarán al modelo).

Para definir las tensiones que afectarán a nuestro modelo de excavación, tenemos que modificar las cargas mediante la opción *Loading/Field Stress*. Automáticamente se nos abrirá la ventana mostrada en la Figura 7.15, en la que definiremos las propiedades del campo de tensiones.

Figura 7.15.- Propiedades del campo de tensiones



- Field Stress Type. Nuestro modelo se verá afectado por un campo gravitatorio, por lo que la opción elegida en el tipo de tensión del campo es la gravedad.
- Ground Surface Elevation. En esta casilla meteremos la cota de nuestro suelo, en nuestro caso 251,752 m.
- Unit Weight of Overburden (MN/m³). Tal como nos explica *Rocscience*, la unidad de peso de sobrecarga es un valor medio de la unidad de peso de todos los materiales del modelo, debidamente ponderados. Se utiliza en combinación con la elevación del terreno para calcular la componente vertical de la tensión de campo gravitatorio en cualquier punto del modelo. Como nosotros solo tenemos un tipo de material, meteremos el de nuestro material.
- Total Stress Ratio. Las relaciones entre la tensión horizontal y vertical (in plane y out-of-plane) se utilizan para calcular las componentes horizontales de la tensión del campo gravitatorio, basado en la tensión vertical en cualquier punto en el modelo. La tensión horizontal se calcula a partir de la tensión vertical total de la siguiente manera:

$$\sigma_H = K_0 * \sigma_V \quad \Rightarrow \quad K_0 = \sigma_H / \sigma_V$$

Por tanto, podemos calcular el cociente de presión K_0 puesto que $K_0 = \frac{\nu}{1-\nu}$, donde ν es el ratio de Poisson de nuestro material (0,25).

Así pues, la relación tensión horizontal/ tensión vertical para nuestro material es de 0,3333, valor que introduciremos en el cálculo.

Por último, antes de pasar a la ejecución del análisis debemos definir las fases de la excavación. Éstas serán esencialmente 5 (aunque incorporaremos también entre la

excavación y su sostenimiento una serie de fases que nos servirán para estudiar posteriormente el cambio de tensiones del terreno y del sostenimiento a medida que se va quitando material y el hormigón va absorbiendo los esfuerzos. Éstas no influirán en el método constructivo). Por tanto las 5 fases definidas durante el proceso de excavación del túnel serán las siguientes:

- Avance.
- Sostenimiento del avance.
- Destroza.
- Sostenimiento de la destroza.
- Recubrimiento.

Por último le damos las propiedades del sostenimiento y revestimiento a la línea de contorno de la excavación, en las fases pertinentes, de acuerdo a los siguientes criterios.

- Tomaremos como referencia el sostenimiento recomendado por la clasificación RMR de Bieniawski. Nuestro terreno tiene un RMR medio de 58, por lo que el sostenimiento recomendado para un macizo rocoso de Clase III (RMR 41-60) es el siguiente:
 - Bulones: sistemáticamente en clave y hastial, de longitud igual a 4 m y espaciados de 1,5 a 2 m.
 - Hormigón proyectado: 50-100 mm en clave, 30 mm en hastiales.
 - Cerchas metálicas: No necesarias.
- Desde el punto de vista de resistencia, el revestimiento no forma parte conceptual del sostenimiento definido por el Nuevo Método Austriaco de construcción de túneles. Será, por tanto, el sostenimiento el que tenga que resistir todas las tensiones producidas por la excavación. El revestimiento será colocado como elemento funcional, atendiendo a la empírica de construcción de túneles (las funciones del revestimiento serán explicadas posteriormente).

Así pues, para llevar a cabo el estudio tensional se le ha dado las siguientes características al sostenimiento y revestimiento:

- Sostenimiento: 5 cm de hormigón proyectado reforzado con fibras de acero (40 kg/m³) del tipo H-35/B/20/bII+Qc, y colocación de bulones tipo Swellex Mn24 (carga de rotura 200 kN) corrugados, de 4 m de longitud en una malla de 1,5 (T) x 1,5 m (L).
- Revestimiento: 30 cm de hormigón HM-35/B/20/IIb+Qc.

Para el cálculo del módulo de Young del hormigón se ha tenido en cuenta la Instrucción de Hormigón Estructural (EHE-08), la cual expresa:

“Como módulo de deformación longitudinal secante E_{cm} a 28 días (pendiente de la secante de la curva real $\sigma-\epsilon$), se adoptará:

$$E_{cm} = 8500 * \sqrt[3]{f_{cm}}$$

Dicha expresión es válida siempre que las tensiones, en condiciones de servicio, no sobrepasen el valor de $0,40 f_{cm}$, siendo f_{cm} la resistencia media a compresión del hormigón a 28 días de edad”.

Así pues, con los datos del hormigón H35 mostrados en la Tabla 7-5, se ha obtenido una $E_{cm}=27804,06 \text{ N/mm}^2$, o lo que es lo mismo, igual a 27804,06 MPa.

Tabla 7-5.-Propiedades del hormigón

HORMIGÓN PROYECTADO	
Tipo de hormigón: H35	
Edad del hormigón	fc (N/mm2)
1 d	15
> 28 d	35

Los cálculos serán realizados para comprobar que este sostenimiento es efectivamente válido para nuestro túnel y proponer, en caso de que fuera posible, unos más adecuados a nuestra sección.

7.1.2.4 Paso 10: Post-análisis de los resultados.

Una vez ejecutado el análisis del modelo, se muestran los resultados obtenidos, centrándonos en las tensiones principales durante las fases constructivas, la compresión del hormigón proyectado, la tracción de los bulones y los factores de seguridad de la sección. Los resultados son mostrados en las siguientes Figuras (ver Figura 7.16, Figura 7.17, Figura 7.18, Figura 7.19, Figura 7.20, Figura 7.21, Figura 7.22, Figura 7.23, Figura 7.24 y Figura 7.25).

Figura 7.16.- Excavación avance- Tensiones máximas

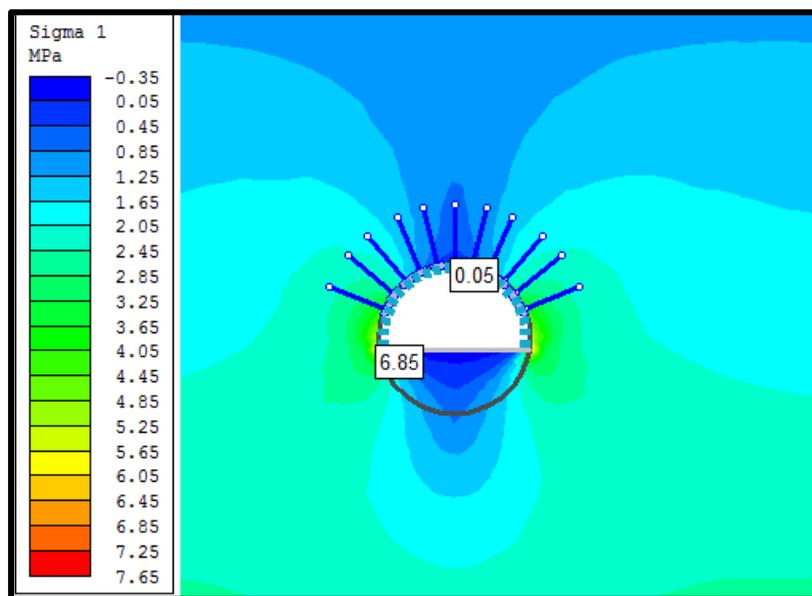


Figura 7.17.- Excavación avance- Tensiones mínimas

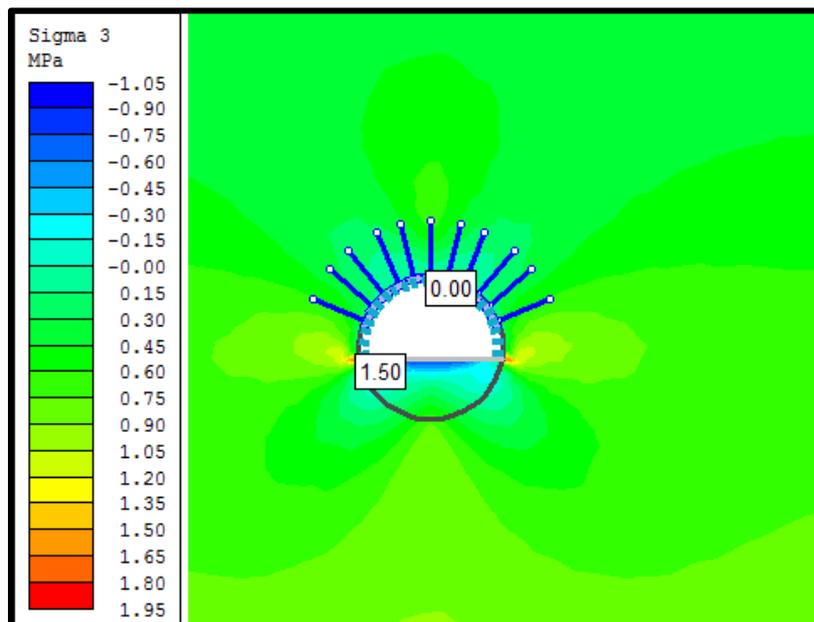


Figura 7.18.- Excavación avance- Compresión en hormigón proyectado (mínima y máxima)

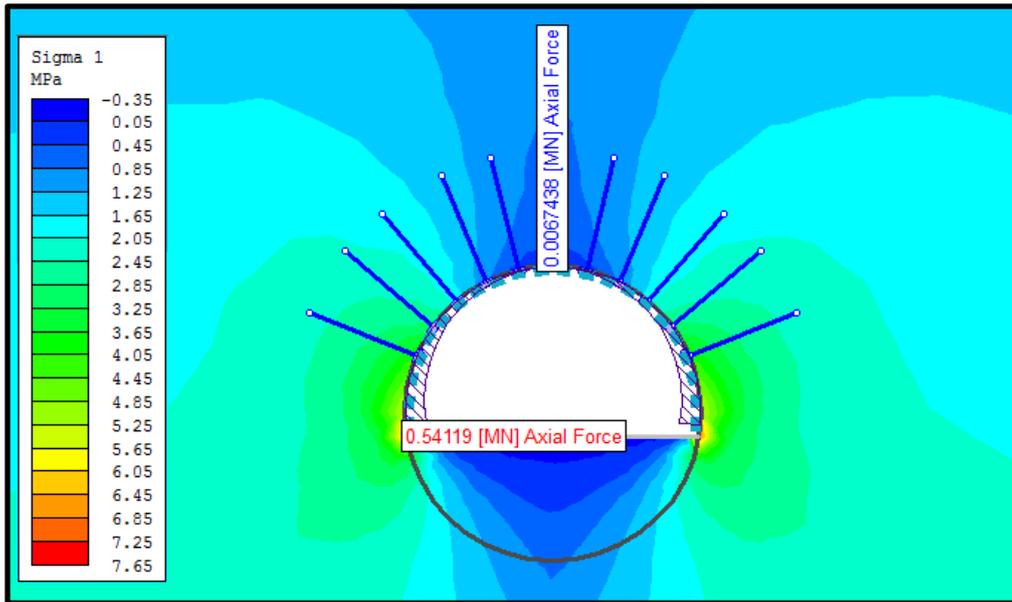


Figura 7.19.- Excavación avance- Tracción en bulones (mínima y máxima)

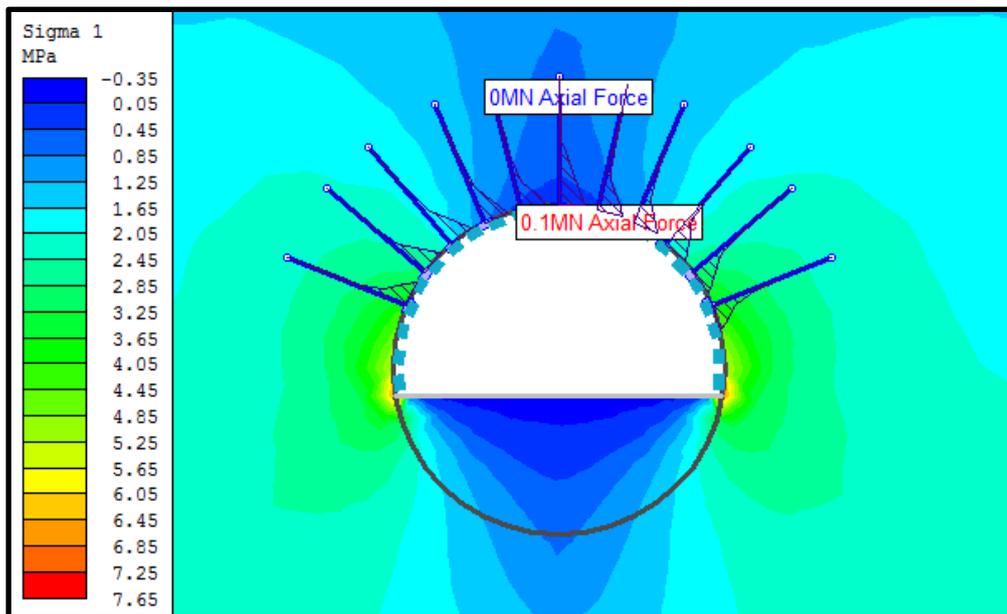
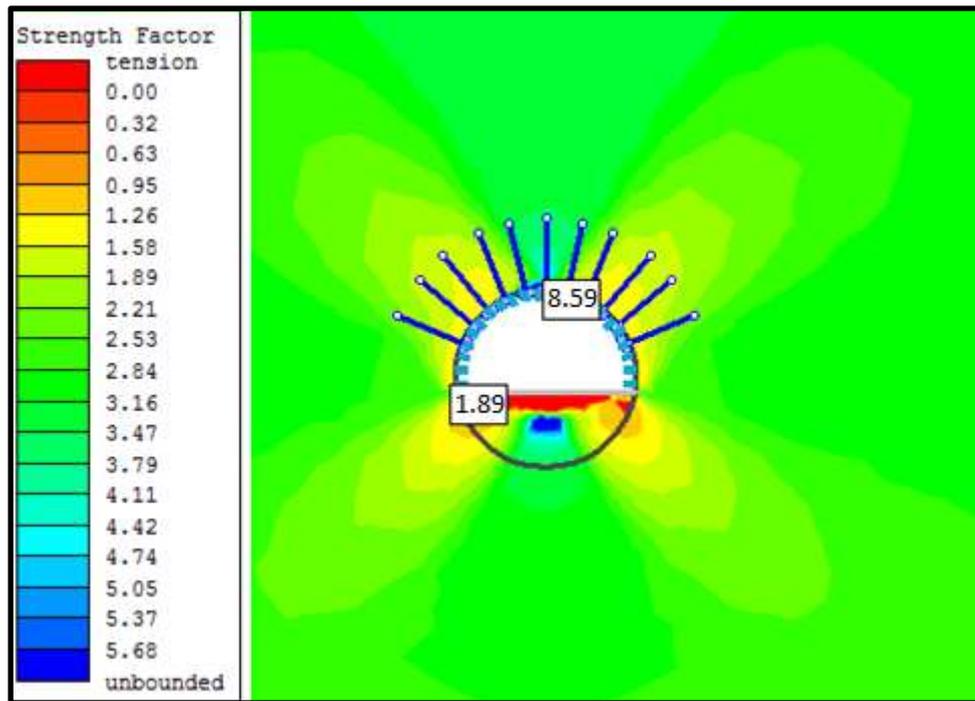


Figura 7.20.- Avance- Factor de Seguridad



Como vemos en la Figura 7.20, el factor de seguridad del suelo de la excavación en avance es menor a 1. Esto no tiene especial importancia ya que, aunque la roca se fracture, esa parte va a ser excavada durante la fase de destroza y, en ningún caso, compromete la estabilidad de la excavación.

Figura 7.21.-Excavación destroza- Tensiones máximas

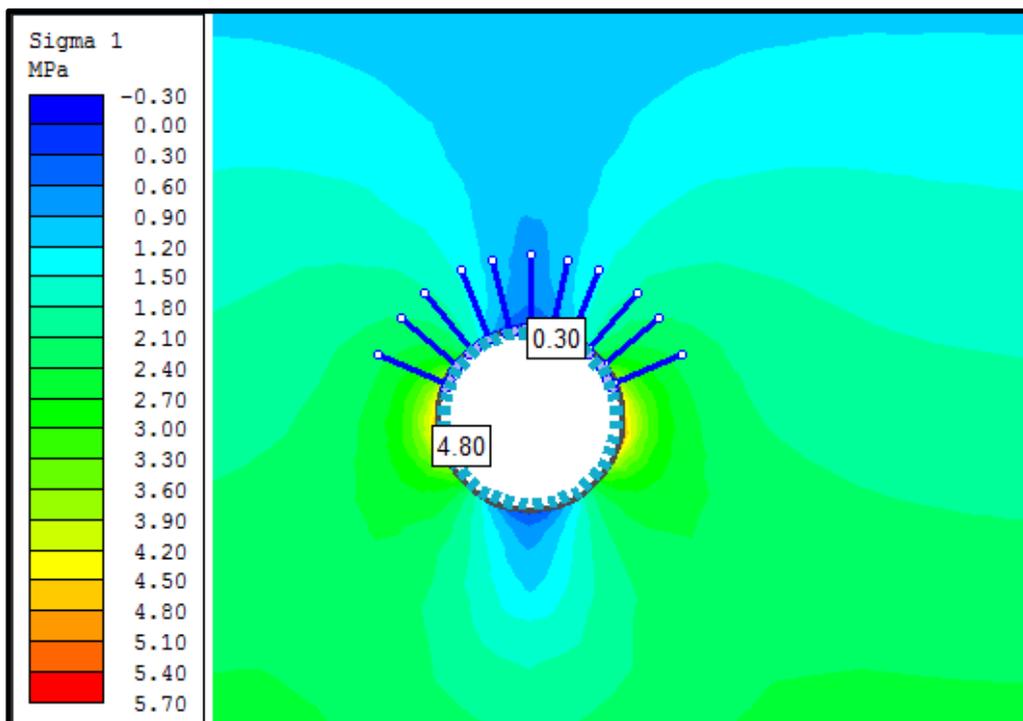


Figura 7.22.- Excavación destroza- Tensiones mínimas

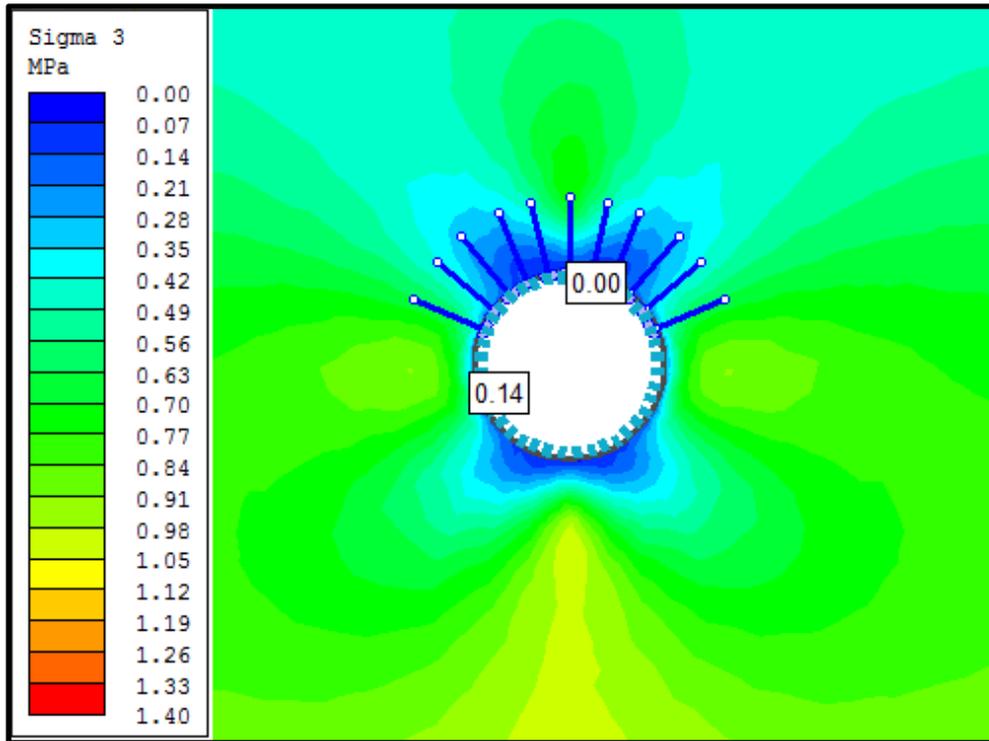


Figura 7.23.- Excavación destroza- Compresión en hormigón proyectado (mínima y máxima)

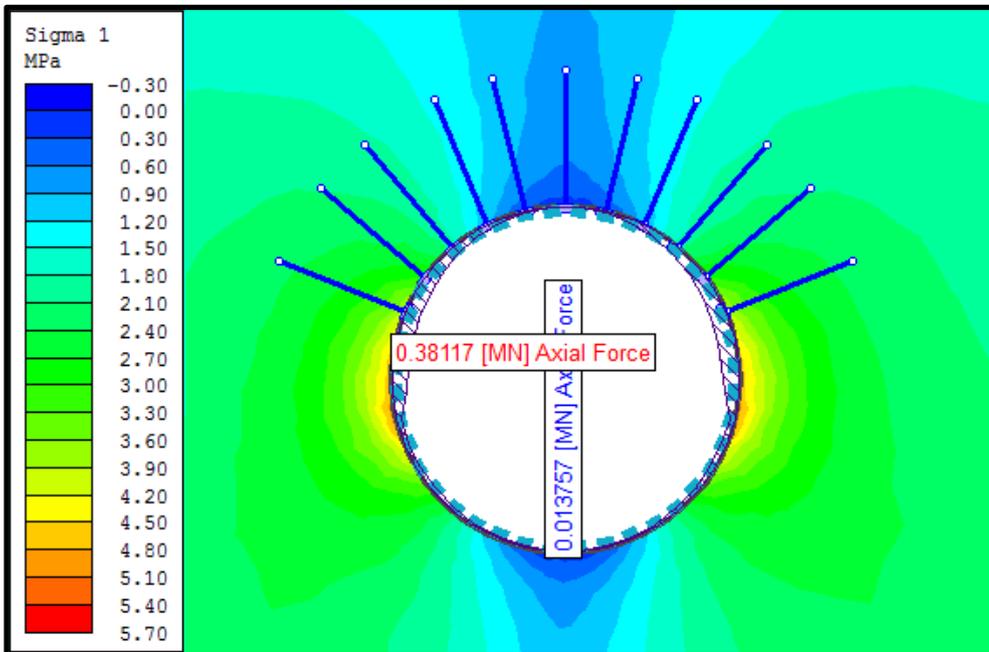


Figura 7.24.- Excavación destroza- Tracción en bulones (mínima y máxima)

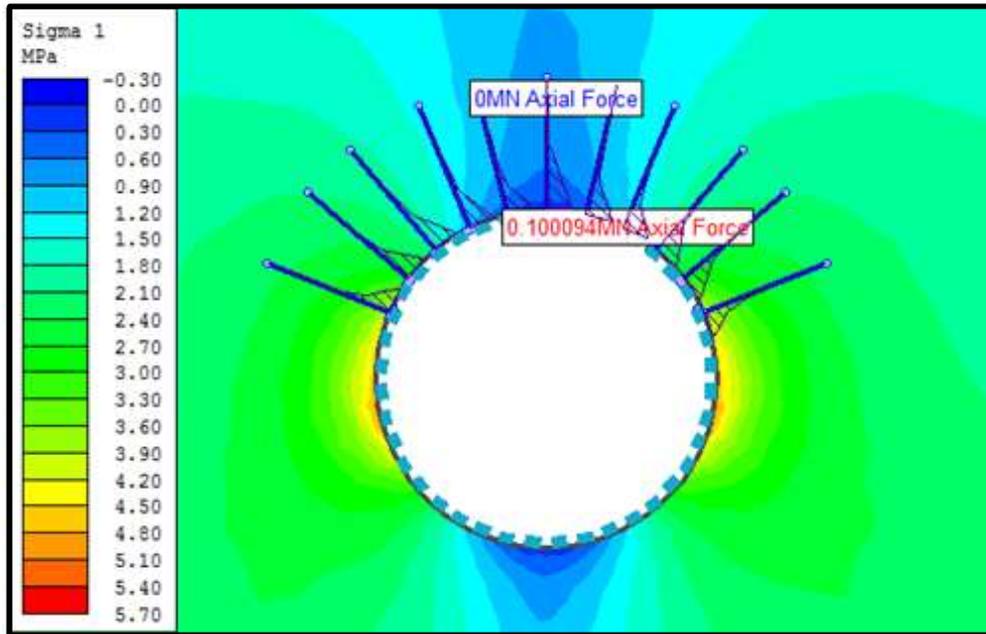
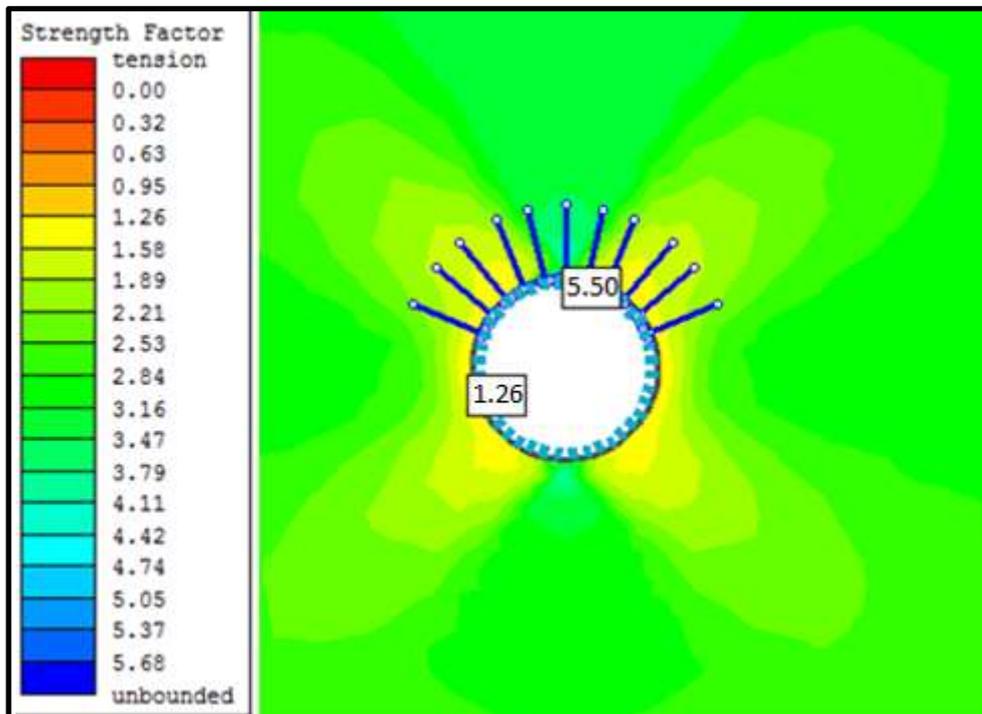


Figura 7.25.- Destroza- Factor de Seguridad



Como vemos, el sostenimiento propuesto cumple perfectamente con los requerimientos de nuestra excavación.

A continuación y como modo comparativo, se ha decidido mostrar el cambio en el factor de seguridad de un punto de la bóveda del túnel sin sostenimiento, con

sostenimiento y con el revestimiento, para ver que efectivamente, en cuestiones de seguridad, el sostenimiento y el revestimiento influyen significativamente. Los resultados son mostrados en la Figura 7.26, Figura 7.27 y Figura 7.28. Los puntos importantes son los correspondientes a la Fase 5 (sostenimiento de la bóveda), la Fase 11 (sostenimiento de la destroza) y la Fase 12 (recubrimiento, en el caso en que así se estudie), las demás fases intermedias corresponden a las fases de excavación.

Figura 7.26.- Factor de Seguridad sin sostenimiento

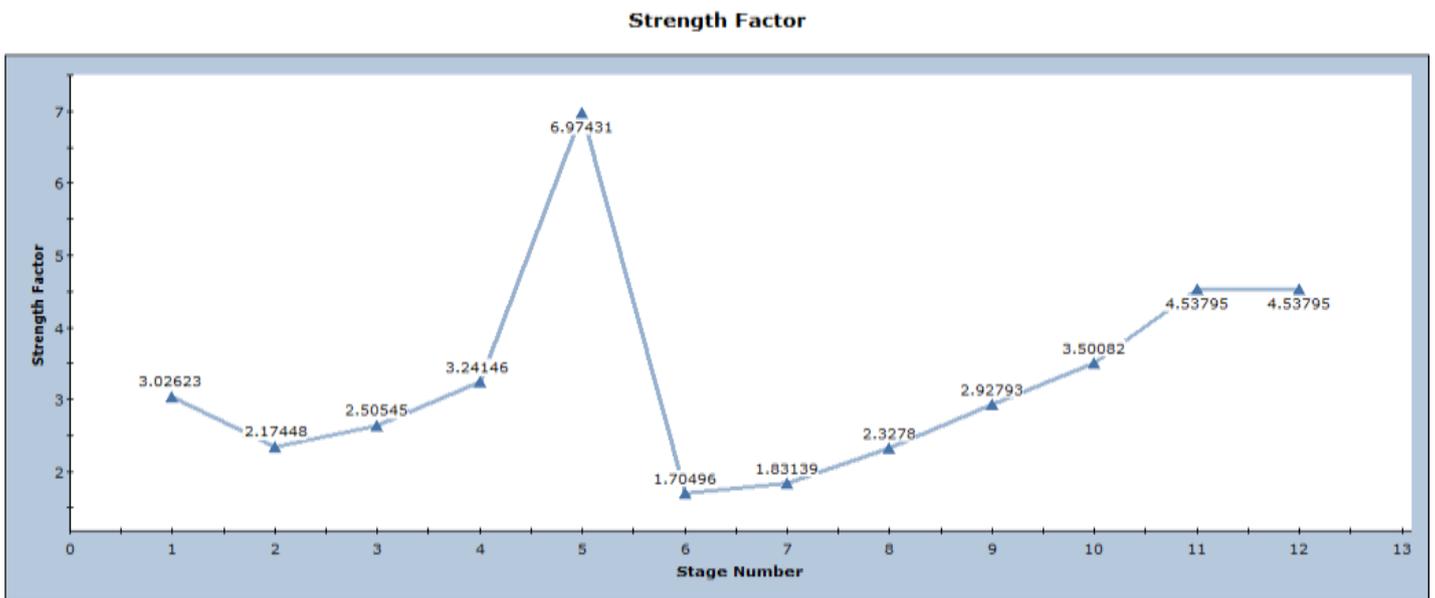


Figura 7.27.- Factor de Seguridad con sostenimiento

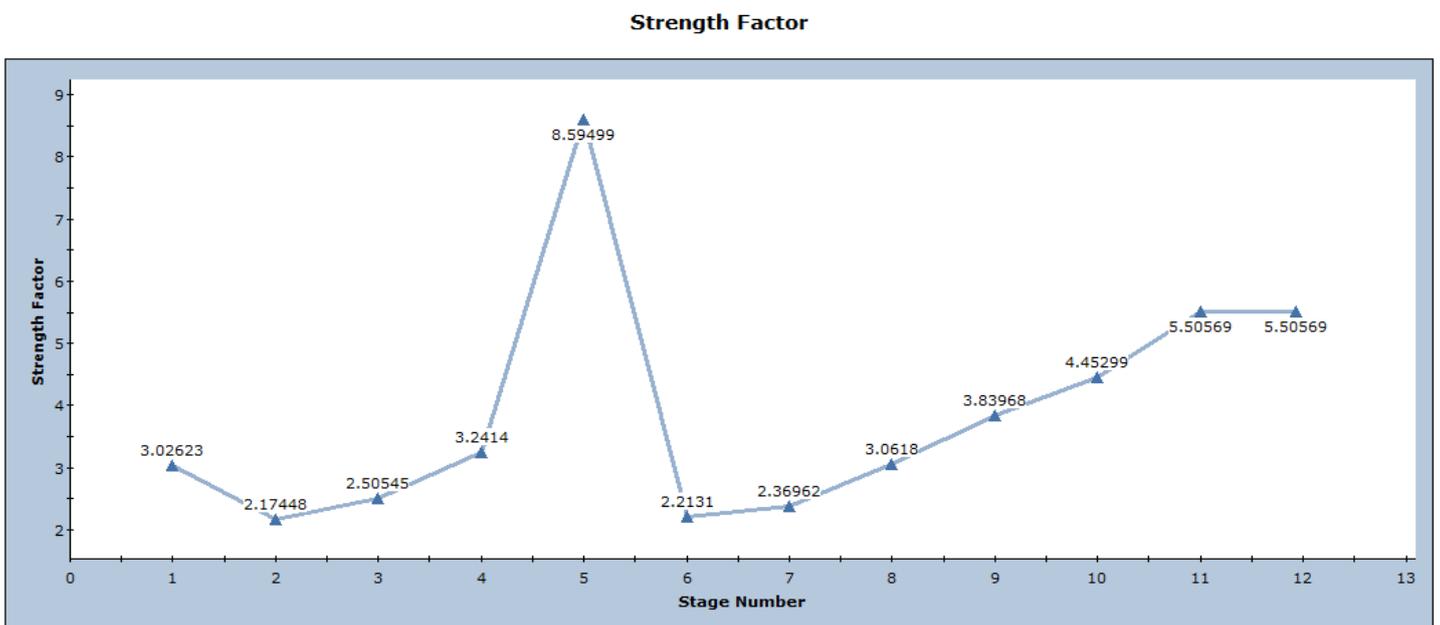
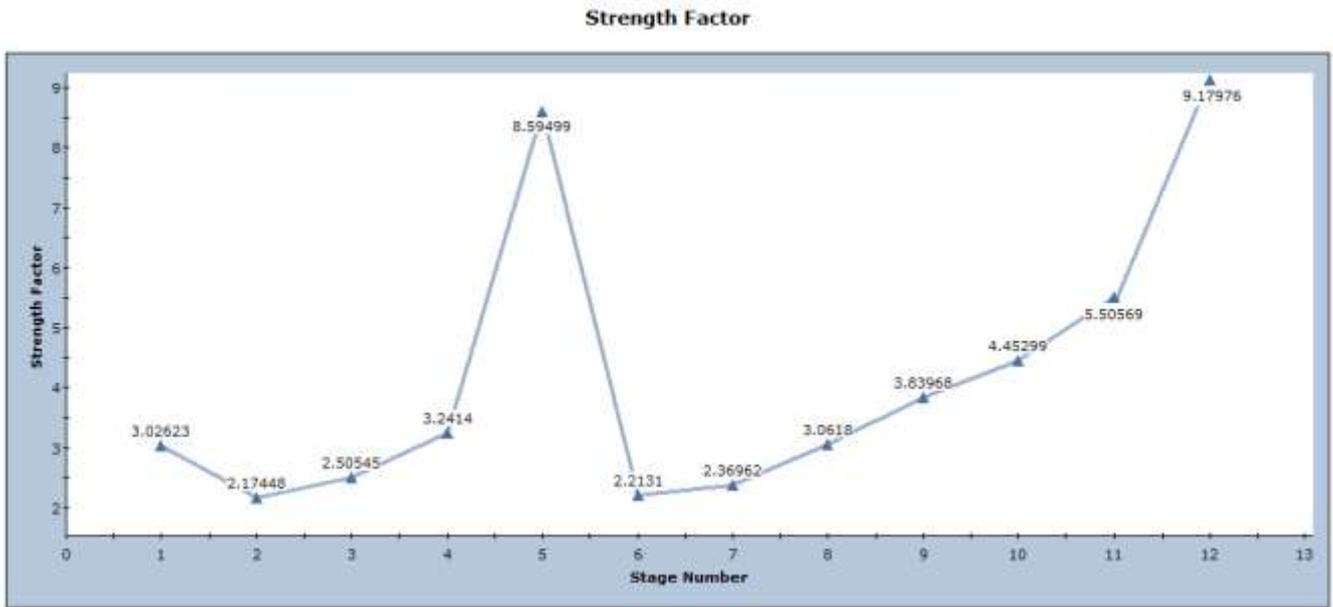


Figura 7.28.- Factor de Seguridad con revestimiento



Como vemos, el factor de seguridad con los bulones y los 5 cm del hormigón proyectado aumenta hasta 1,62 puntos respecto a la excavación sin sostenimiento que, aunque la roca soportase bien los esfuerzos sin llegar a caerse, a medio y largo plazo no sería en absoluto recomendable. Con el revestimiento de 30 cm de espesor, colocados en la fase 12 de la excavación con revestimiento, el factor de seguridad aumenta considerablemente hasta 3,67 puntos en la clave del túnel.

A continuación, los factores de seguridad del hormigón del sostenimiento y del revestimiento son mostrados en la Figura 7.29, Figura 7.30 y Figura 7.31.

Figura 7.29.- Factor de seguridad del sostenimiento (opción 1.- sólo sostenimiento)

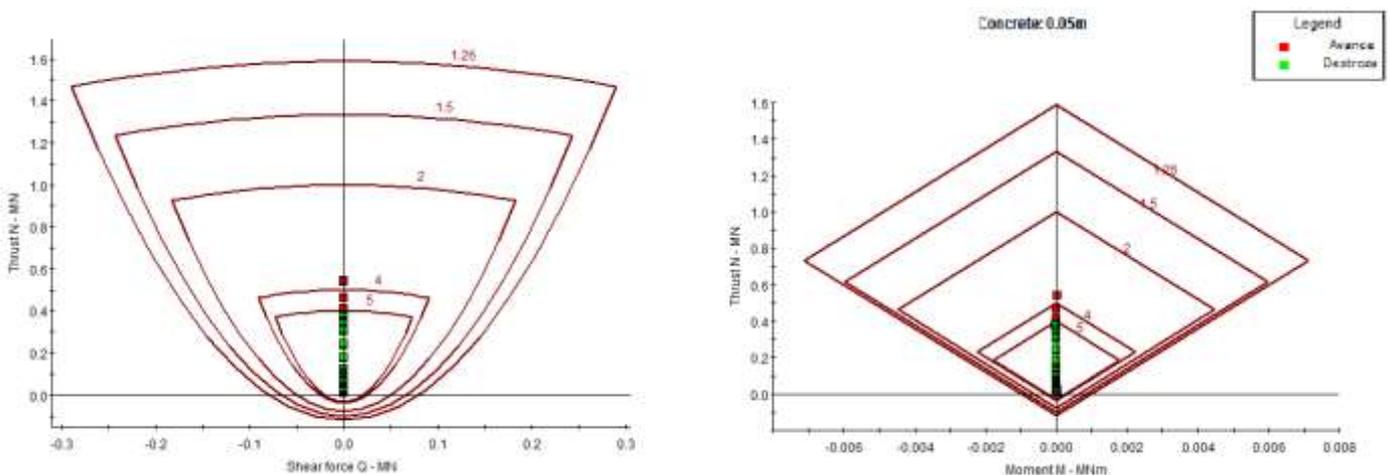


Figura 7.30.- Factor de seguridad del sostenimiento (opción 2- sostenimiento y revestimiento)

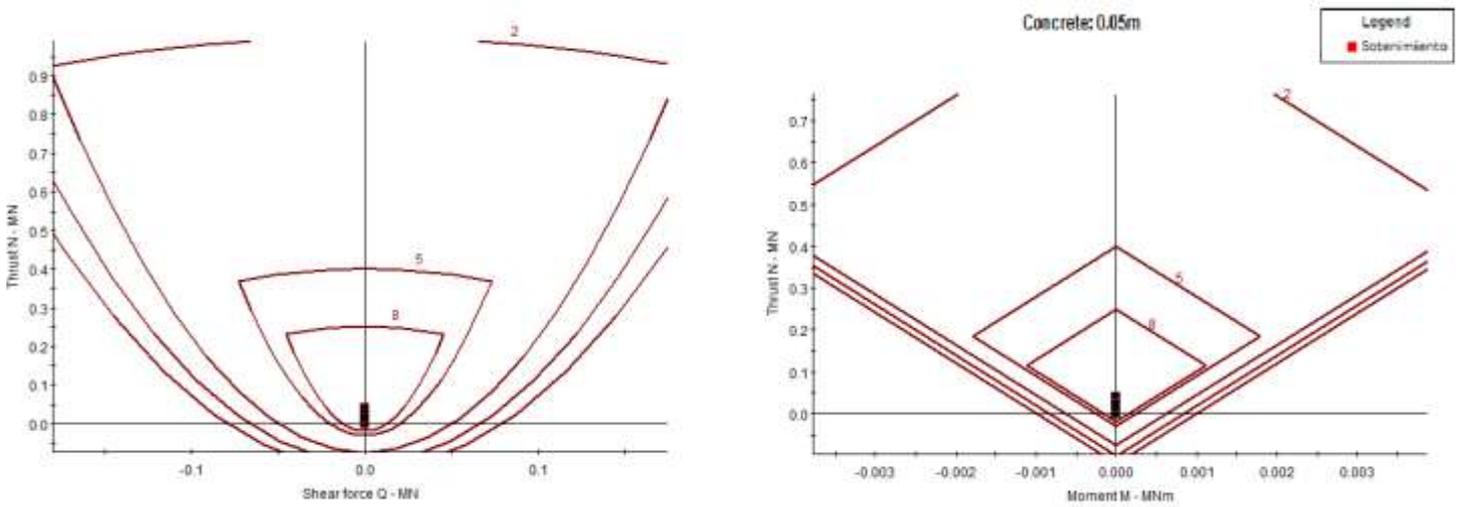
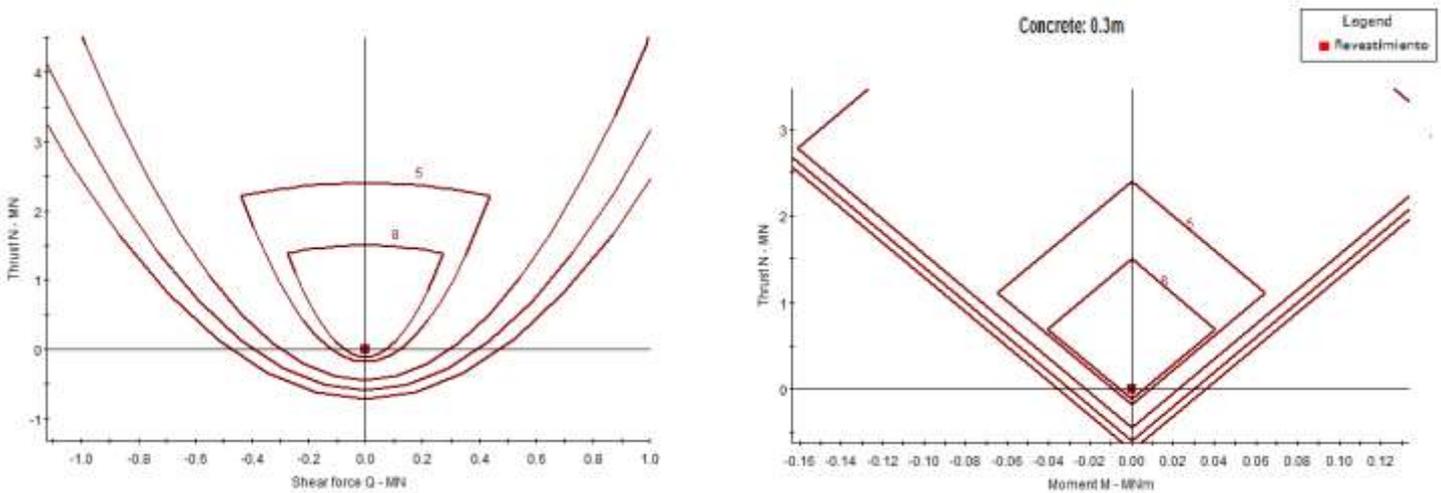


Figura 7.31.- Factor de seguridad del revestimiento (opción 2- sostenimiento y revestimiento)



Tal y como vemos, el factor de seguridad del sostenimiento aumenta también al ponerle el revestimiento puesto que se produce un reparto de cargas. Así pues, con el revestimiento conseguimos factores de seguridad del hormigón proyectado mayores a 8.

Por tanto, comprobamos que los sistemas de sostenimiento y revestimiento propuestos son adecuados para nuestra construcción y cumplen con su función portante.

Pasamos a describirlos detalladamente en el siguiente apartado.

7.1.3 SOSTENIMIENTO Y REVESTIMIENTOS PROPUESTOS.

7.1.3.1 Sostenimiento

El sostenimiento se compone principalmente de bulones y hormigón proyectado, los cuales se adaptan perfectamente a la filosofía del Nuevo Método Austriaco.

A continuación, es explicada con más detalle la sección tipo del sostenimiento de nuestra excavación:

- El arranque se realizará mediante explosivos con una longitud de pase de 3,0 m como máximo. El sostenimiento en la fase de avance se realizará mediante la siguiente secuencia:
 - o Colocación de bulones tipo Swellex Mn24 (carga de rotura 200 kN) o similar y del tipo corrugado, de 4 m de longitud en una malla de 1,5 (T) x 1,5 m (L), que deberán colocarse inmediatamente después de la capa de sellado.
 - o Proyección de una capa de hormigón reforzado con fibras de acero (40 kg/m³), de 5 cm de espesor, en bóveda (120°), cubriendo la superficie excavada.
- El arranque en fase de destroza se realizará, análogamente, mediante explosivos hasta una distancia mayor o igual a 50 m del frente de avance.
- La longitud de pase para la destroza será de 6 m como máximo. La secuencia de sostenimiento será la siguiente:
 - o Proyección de una capa de sellado con hormigón, de 5 cm de espesor mínimo, en hastiales, cubriendo la superficie excavada para poder aplicar la impermeabilización posteriormente.

COMPROBACIÓN DEL SOSTENIMIENTO

Se comprueba que el sostenimiento propuesto en el apartado anterior neutraliza el riesgo geológico de desprendimientos de cuñas, para lo que se ha utilizado nuevamente el programa *Underwedge 4.0*.

Así pues, los resultados de los cálculos de la estabilidad de cuñas con sostenimiento se muestran en la Figura 7.32, Figura 7.33, Figura 7.34, Figura 7.35, Figura 7.36, Figura 7.37, Figura 7.38, Figura 7.39, Figura 7.40 y Figura 7.41.

Los datos utilizados para los cálculos son los siguientes:

- Hormigón proyectado de 5 cm de espesor y densidad $0,024 \text{ MN/m}^3$.
- Bulones Swellex Mn24 con una capacidad de tracción de $0,2 \text{ MN}$, una fuerza de $0,3 \text{ MN/m}$ y de 4 m de longitud, colocados en una malla de $1,5 \times 1,5 \text{ m}$.

Figura 7.32.- Combinación J1-J2-J3 (sostenimiento)

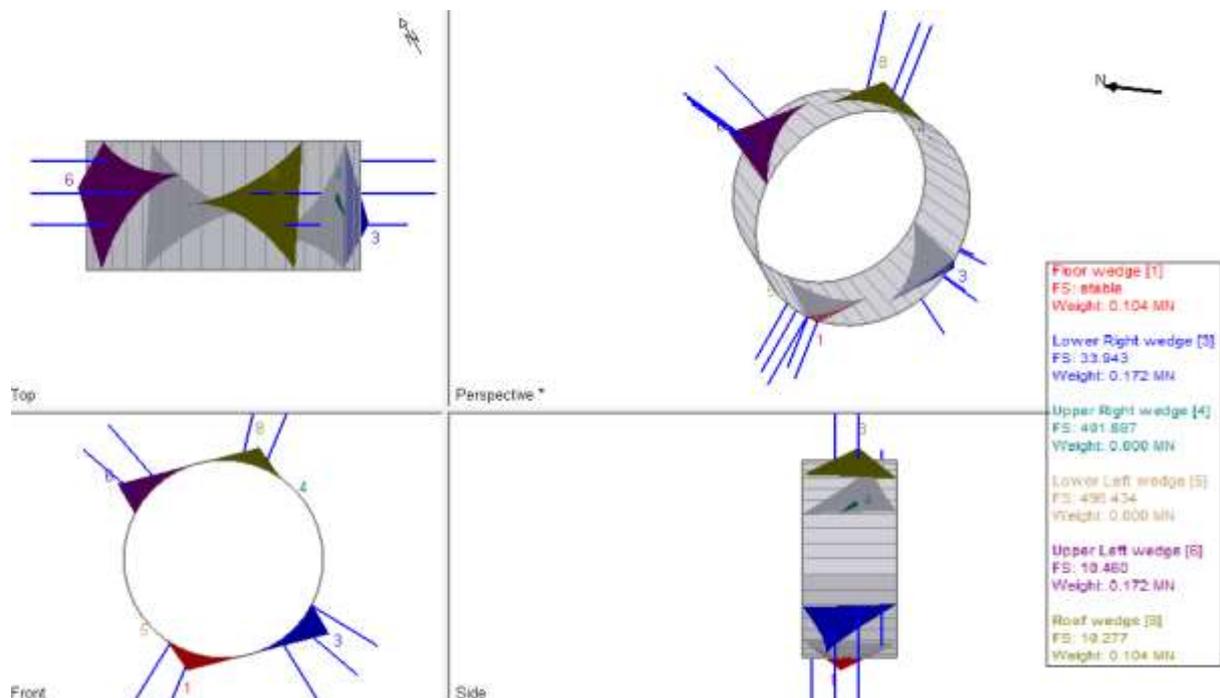


Figura 7.33.- Combinación J1-J2-J4 (sostenimiento)

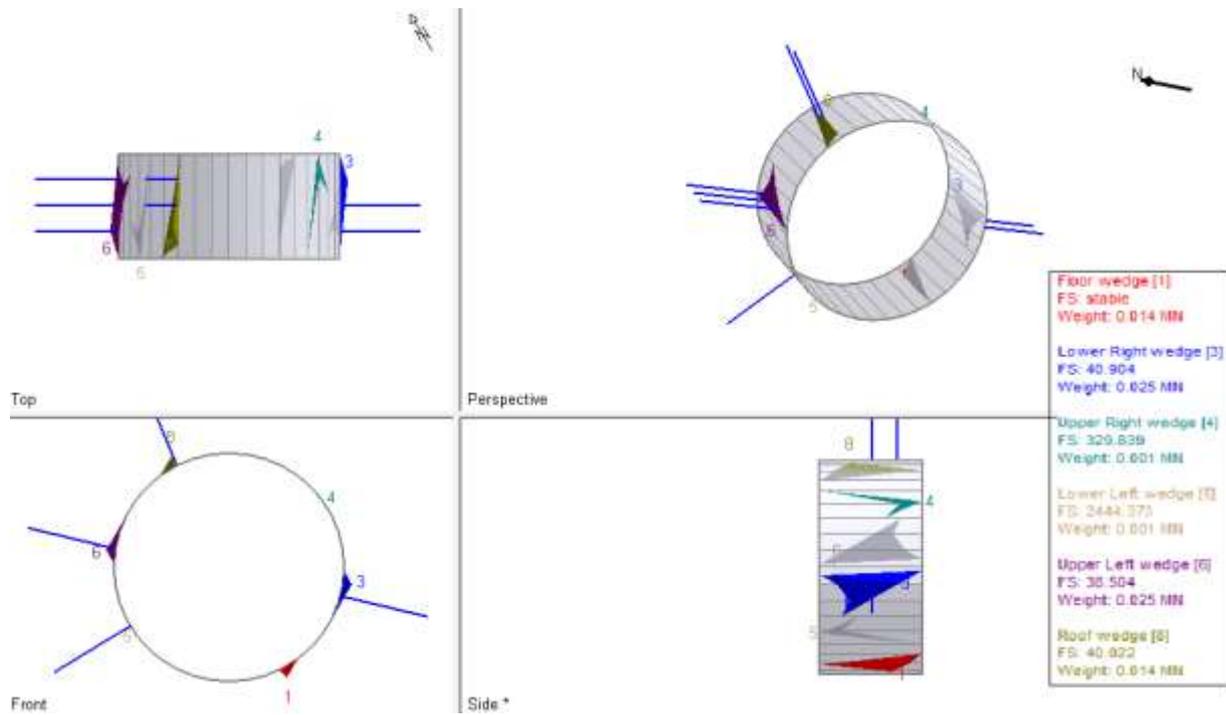


Figura 7.34.- Combinación J1-J2-J5 (sostenimiento)

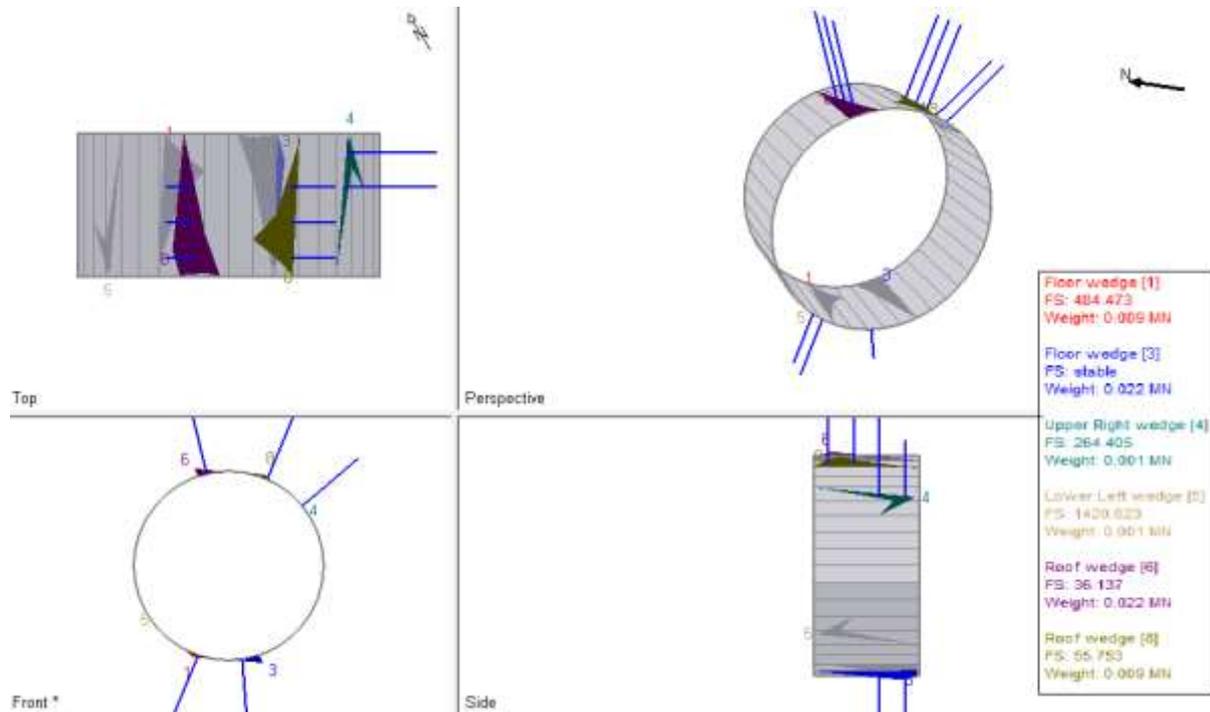


Figura 7.35.- Combinación J1-J3-J4 (sostenimiento)

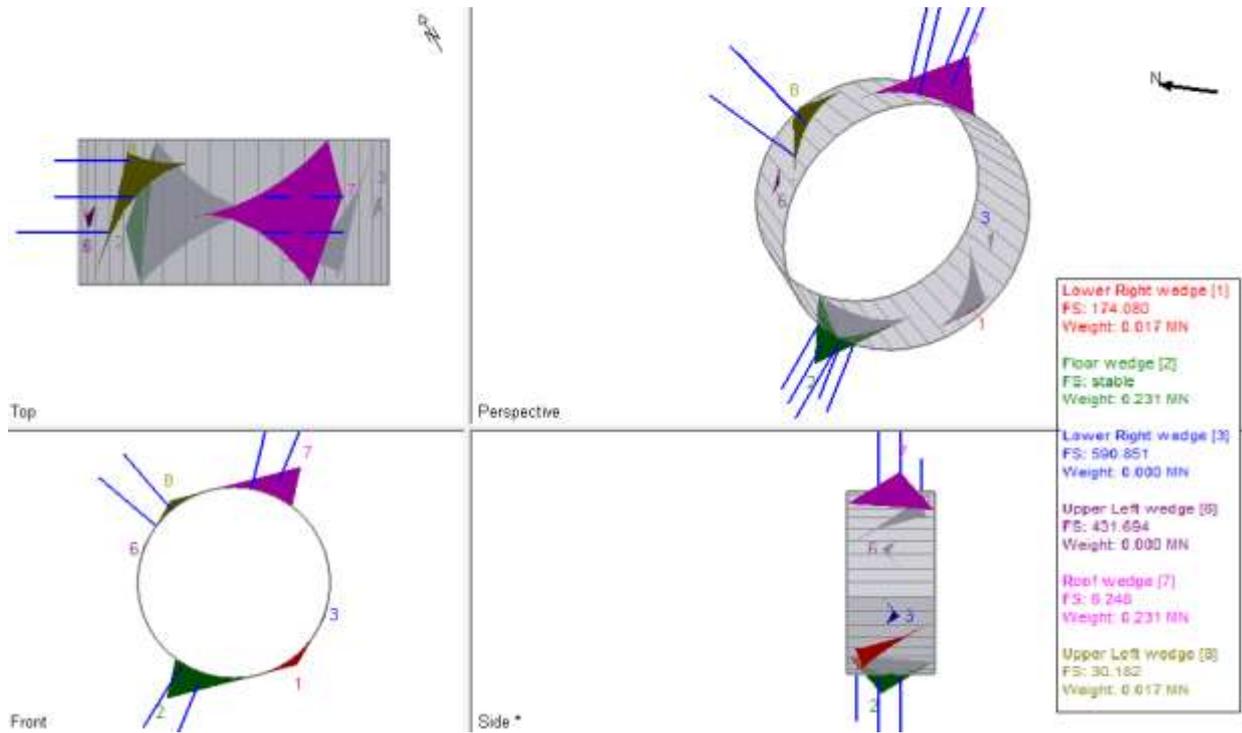


Figura 7.36.- Combinación J1-J3-J5 (sostenimiento)

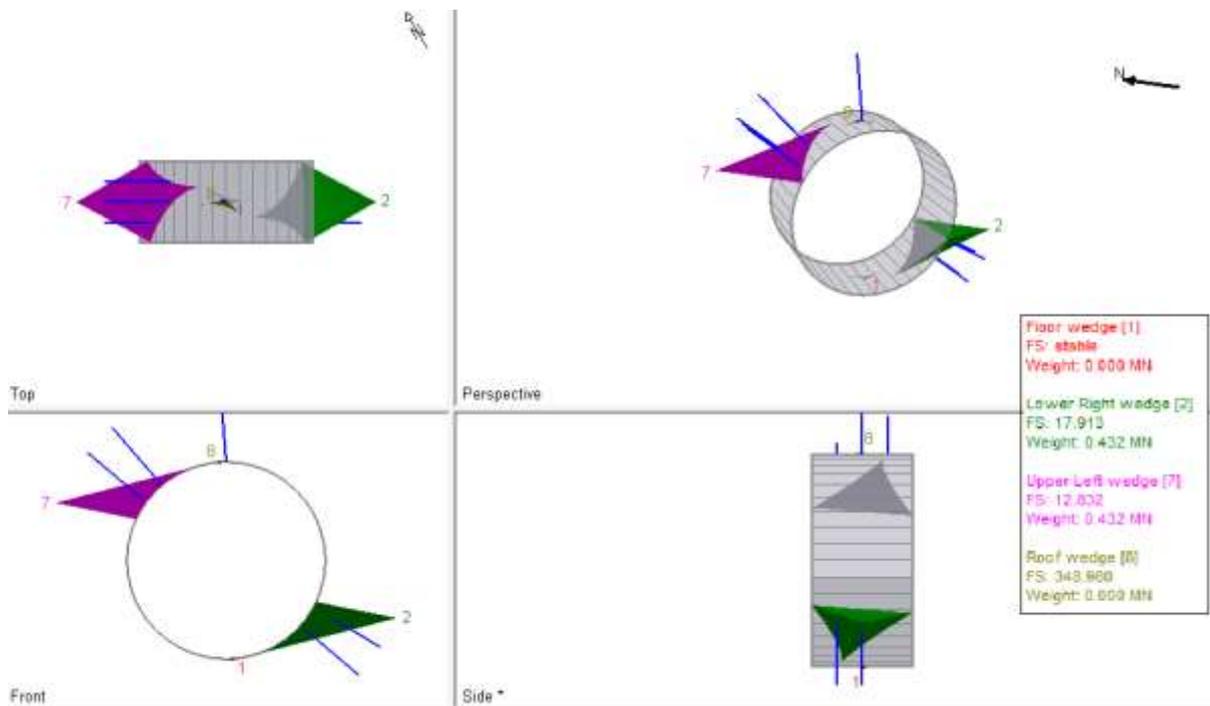


Figura 7.37.- Combinación J1-J4-J5 (sostenimiento)

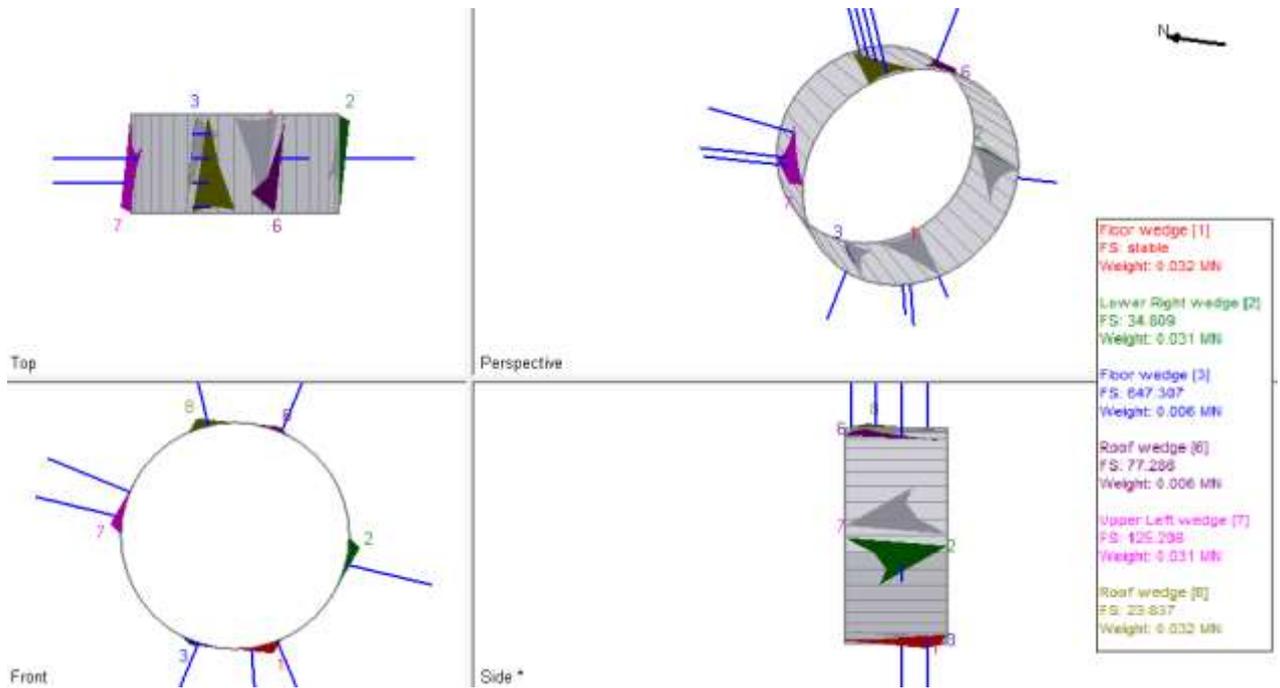


Figura 7.38.- Combinación J2-J3-J4 (sostenimiento)

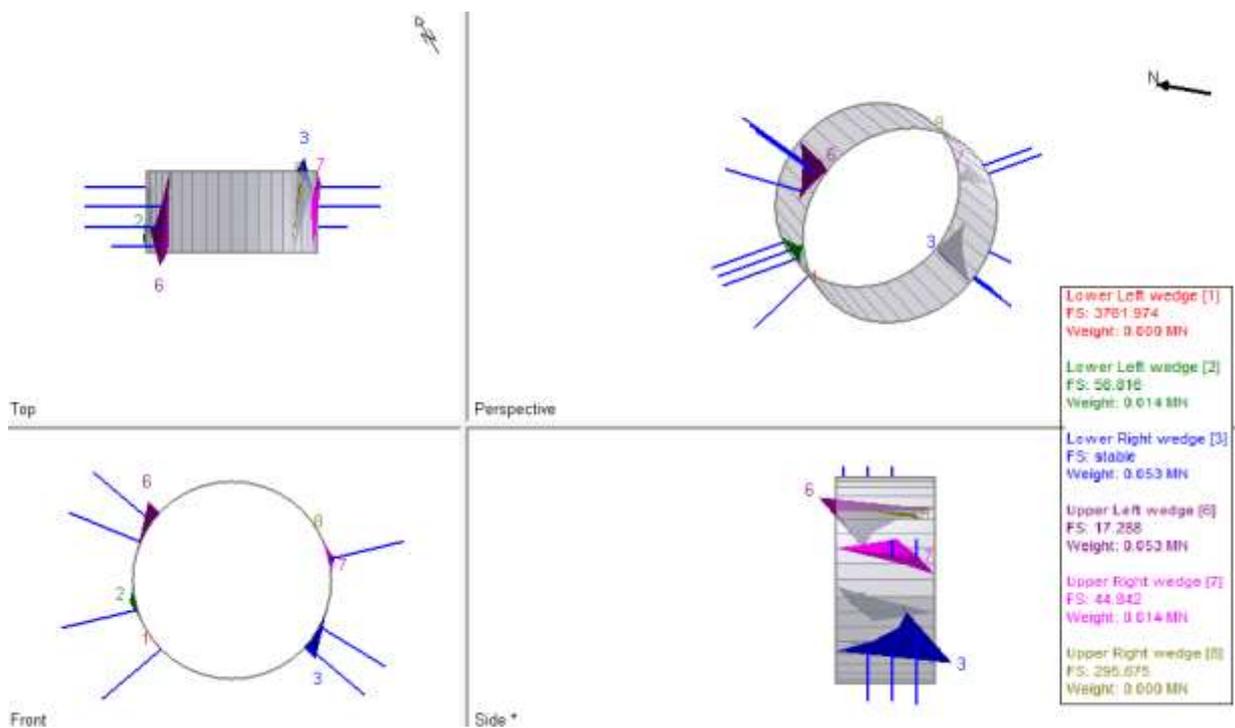


Figura 7.39.- Combinación J2-J3-J5 (sostenimiento)

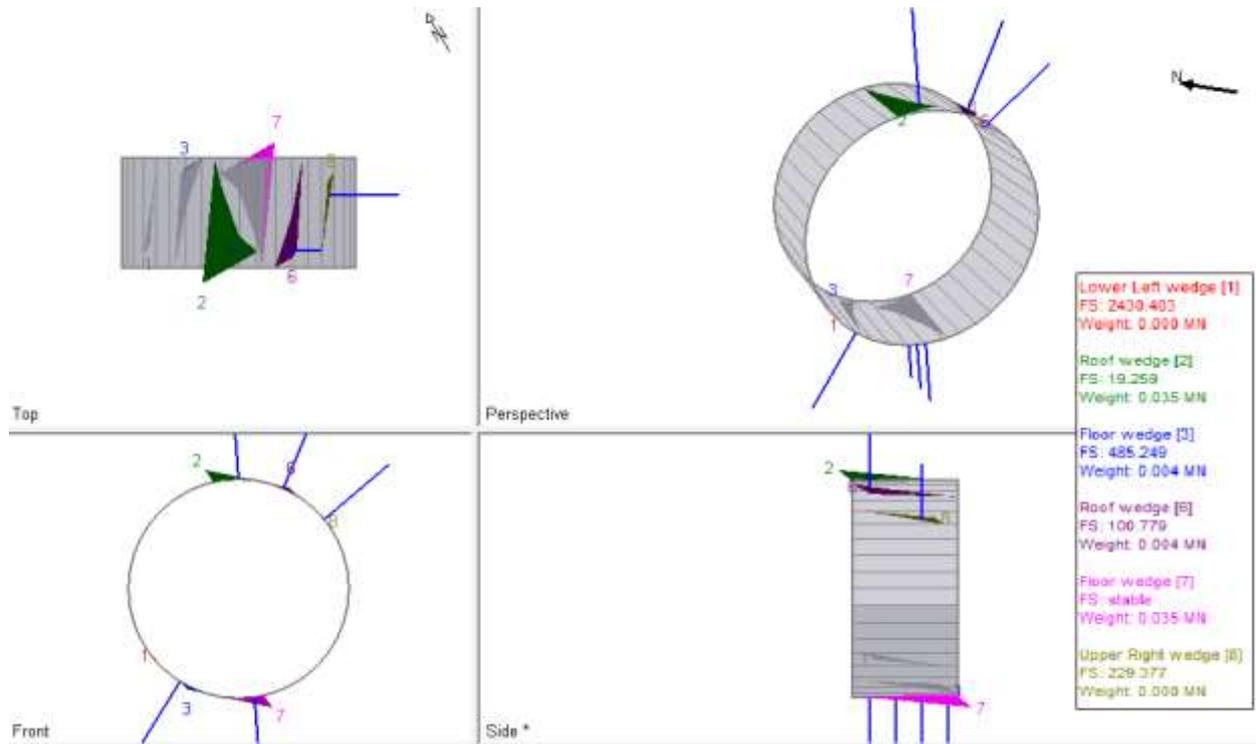


Figura 7.40.- Combinación J2-J4-J5 (sostenimiento)

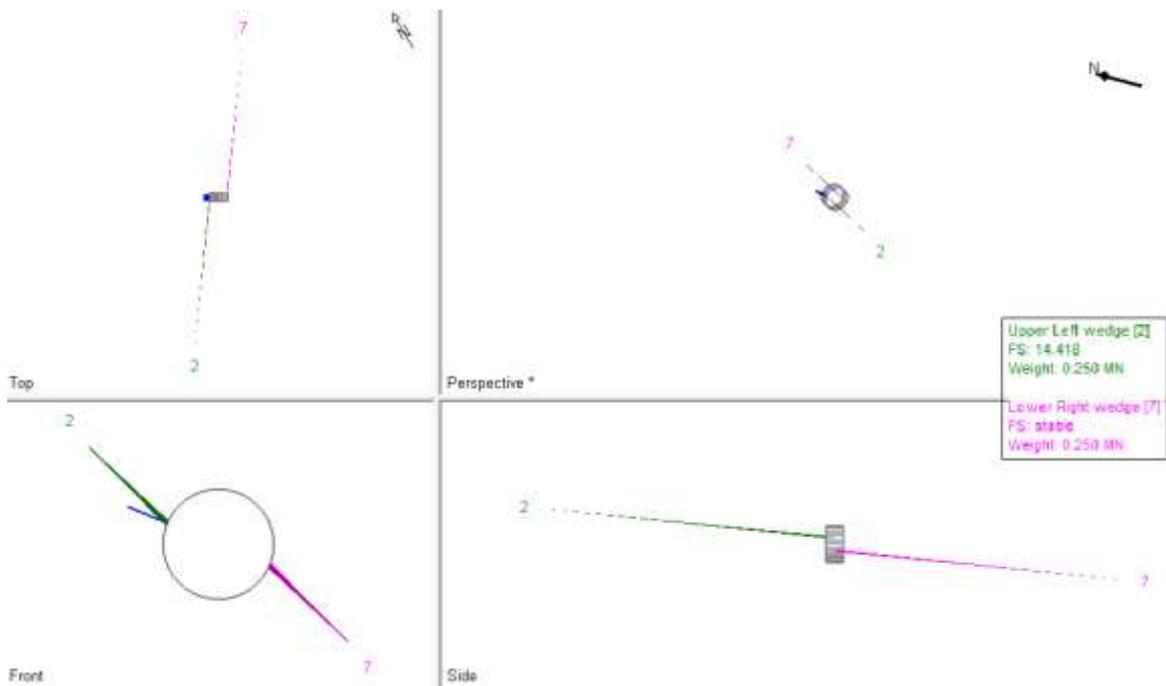
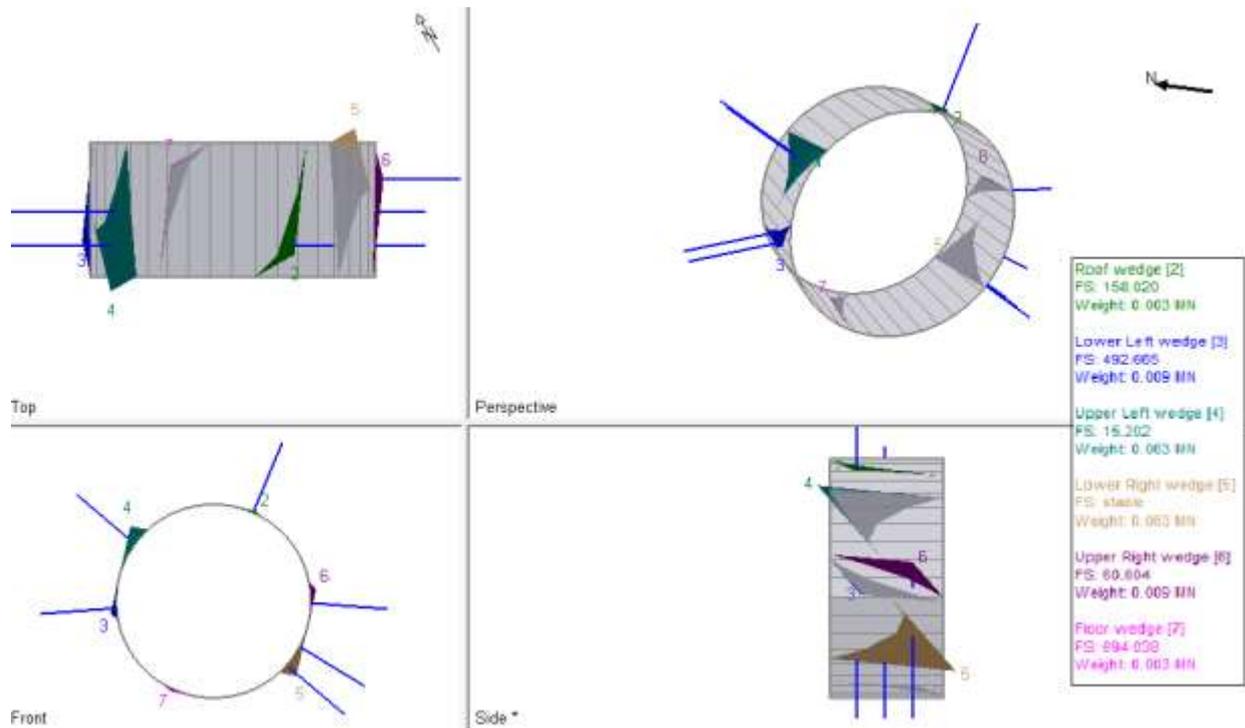


Figura 7.41.- Combinación J3-J4-J5 (sostenimiento)



Así pues, con el sostenimiento proyectado no tenemos ningún factor de seguridad por debajo de 1,5, por lo que no hay riesgo de desprendimiento de las cuñas. Concluimos que el sostenimiento es válido para nuestra excavación.

En la Tabla 7-6 se comparan los factores de seguridad de las diferentes cuñas antes y después del sostenimiento.

Tabla 7-6.- Comparación del Factor de Seguridad de las Cuñas

COMBINACIÓN	CUÑA	PESO (MN)	F.S. SIN SOSTENIMIENTO	F.S. CON SOSTENIMIENTO
J1-J2-J3	1	0,104	Estable	Estable
	3	0,172	3,2	>10
	4	0,000	1,2	>10
	5	0,000	1,3	>10
	6	0,172	0,4	>10
	8	0,104	0,0	>10
J1-J2-J4	1	0,014	Estable	Estable
	3	0,025	1,2	>10
	4	0,001	1,2	>10
	5	0,001	>10	>10
	6	0,025	0,4	>10

	8	0,014	0,0	>10
J1-J2-J5	1	0,009	7,2	>10
	3	0,022	Estable	Estable
	4	0,001	1,2	>10
	5	0,001	3,8	>10
	6	0,022	0,4	>10
	8	0,009	0,0	>10
J1-J3-J4	1	0,017	3,2	>10
	2	0,231	Estable	Estable
	3	0,000	1,2	>10
	6	0,000	0,7	>10
	7	0,231	0,2	6,2
	8	0,017	0,0	>10
J1-J3-J5	1	0,000	Estable	Estable
	2	0,432	3,2	>10
	7	0,432	3,8	>10
	8	0,000	0,0	>10
J1-J4-J5	1	0,032	Estable	Estable
	2	0,031	1,2	>10
	3	0,006	7,2	>10
	6	0,006	0,2	>10
	7	0,031	3,8	>10
	8	0,032	0,0	>10
J2-J3-J4	1	0,000	>10	>10
	2	0,014	1,3	>10
	3	0,053	Estable	Estable
	6	0,053	0,7	>10
	7	0,014	0,2	>10
	8	0,000	0,0	>10
J2-J3-J5	1	0,000	3,8	>10
	2	0,035	1,3	>10
	3	0,004	3,8	>10
	6	0,004	0,6	>10
	7	0,035	Estable	Estable
	8	0,000	0,0	>10
J2-J4-J5	2	0,250	>10	>10
	7	0,250	Estable	Estable
J3-J4-J5	2	0,003	0,6	>10
	3	0,009	3,8	>10
	4	0,063	0,7	>10
	5	0,063	Estable	Estable
	6	0,009	0,2	>10
	7	0,003	3,8	>10

7.1.3.2 Revestimiento

El revestimiento definitivo de un túnel consiste en una estructura de hormigón que reviste la cavidad y que está en contacto directo con el terreno o con el sostenimiento previamente ejecutado. El revestimiento estructural de hormigón de un túnel representa una garantía para evitar la caída de elementos del sostenimiento, como aflojes de los bulones o elementos de gunita. Las funciones fundamentales del revestimiento son:

- Impermeabilización
- Función resistente
- Funcionalidad
- Estética

En cualquier caso, el revestimiento aporta un coeficiente de seguridad adicional en la estabilidad de la excavación, colaborando con el sostenimiento. A largo plazo no se puede confiar plenamente en el bulonado del sostenimiento, pues al estar en contacto directo con las humedades del terreno tiende a corroerse y degradarse con relativa rapidez. La estabilidad a largo plazo se garantiza principalmente con el revestimiento y parcialmente con el sostenimiento.

El revestimiento de hormigón permite, por otra parte, eliminar las labores de mantenimiento y conservación del sostenimiento, crecientes con la edad del túnel, que son, normalmente, muy costosas y que, además, entorpecen el tráfico.

La superficie interior lisa del anillo de hormigón favorece en gran medida la circulación del aire a lo largo del túnel y mejora por tanto los condicionantes aerodinámicos del túnel.

En nuestra sección no se requiere armadura, estando el revestimiento formado por un anillo de hormigón en masa HM-35/B/20/IIb+Qc de 30 cm de espesor.

7.1.4 PRESUPUESTO.

Para la realización del presupuesto se ha tomado de base las unidades de obra del proyecto original del Túnel de Santa Marina, con las mediciones obtenidas en nuestro caso. Los precios de los capítulos son mostrados a continuación.

- Excavación en túnel: 15.307.763,37 euros.
- Sostenimiento en túnel: 4.305.098,28 euros.
- Relleno en trasdós del revestimiento del túnel: 13.050,69 euros.
- Control y auscultación: 223.991,19 euros.

Así pues se ha obtenido un coste total de 37.920.995,51 euros, precio que es detallado en el *Anejo 1 Presupuesto*.

Según el artículo “Predicción del coste de la obra civil de un túnel ejecutado por métodos convencionales”, publicado por el ingeniero Marcos Sancho Moreno [16], el coste total de la obra civil por metro de túnel se puede calcular mediante la fórmula:

$$C (\text{€/m}) = 83,930 * S - (148,189 * RMR) + 9578,304$$

Donde,

- S es la sección total de excavación en m²
- RMR es el índice de Bieniawski

Así pues, sustituyendo por nuestros datos (S=128,68 m² y RMR_{medio}=58) y multiplicando por la longitud total del túnel obtenemos un coste total para los 3320 m de:

$$C (\text{€/m}) = 11.783,454 \quad \Rightarrow \quad C_T = 39.121.068,61 \text{ €}$$

Como vemos, tenemos un coste muy aproximado al nuestro.

8 LÍNEAS FUTURAS

Como futuros proyectos se propone el estudio de la construcción de túneles mediante el programa de análisis de elementos finitos de *Salome: CodeAster*.

Salome es un software libre, válido para el sistema operativo Ubuntu, que proporciona una plataforma genérica de pre y post- procesamiento para la simulación numérica. *CodeAster*, acrónimo de Análisis de Estructuras y Termomecánica de Estudios e Investigación, es un software general de análisis de elementos finitos adjunto a la plataforma de *Salome*.

Este software, además de tener la ventaja de que es 100% gratuito, permite el estudio incluyendo distintas leyes de comportamiento de los materiales, la optimización de diversas funciones con otros programas también gratuitos, el estudio de modelos y comportamientos en 3D, etc. En resumen, una serie de funciones que, actualmente, no se pueden llevar a cabo con el programa *Phase* y que limitan mucho campo de estudio de ciertos modelos.

Estas aplicaciones son especialmente interesantes en el estudio de túneles puesto que, una vez realizado el modelo, se podría calcular, por ejemplo, la sección óptima de la excavación en avance y en destroza o realizar el análisis tensional en 3 dimensiones que asimilarían mejor el modelo a la realidad, proporcionando unos resultados más exactos. Sin embargo, es cierto que se trata de un software bastante complejo para un usuario inexperto y requiere unos conocimientos bastante afianzados del análisis mediante elementos finitos.

En un principio, para la realización de este proyecto fue utilizado el programa de *Salome* y *CodeAster*, pero por errores de cálculo no se pudo hacer finalmente el estudio tensional del terreno. En el *Anejo 2 Salome-CodeAster* es detallado el proyecto de la excavación del túnel mediante el Nuevo Método Austriaco, con su código fuente y los comandos, para aquellos que deseen continuar con el actual estudio. Se



pretende, por tanto, abrir un nuevo campo de estudio en esta misma línea con programas gratuitos y mucho más versátiles.

9 CONCLUSIONES

Con el presente trabajo se pretendía conocer en profundidad la construcción de túneles mediante el Nuevo Método Austriaco (NTMA), analizando las tensiones que se producen en el terreno durante la excavación y, proponiendo, un tipo de sostenimiento y revestimiento válidos.

Uno de los errores en la construcción de túneles es creer que éstos pueden diseñarse usando bien las clasificaciones geomecánicas, bien los modelos numéricos, o bien a partir de los datos de la instrumentación, cuando en realidad éste debe ser el resultado conjunto de los tres sistemas.

En este estudio se ha pretendido hacer algo similar, analizando mediante el programa de elementos finitos de *Phase* el sostenimiento recomendado según la clasificación geomecánica de Bieniawski para el RMR medio de nuestro macizo rocoso, comprobando así si, efectivamente, esta recomendación era o no válida para nuestro terreno y método constructivo.

Con los datos obtenidos del modelo se ha comprobado que las clasificaciones geomecánicas proporcionan una herramienta muy útil de punto de partida para la propuesta y el análisis de un sostenimiento que se verá modificado o no, con los resultados del modelo. En nuestro caso, este sostenimiento cumplía perfectamente con las necesidades de la excavación comprobando que, aunque inicialmente el terreno sin sostenimiento era capaz de sostenerse por sí mismo (no siendo recomendable, en absoluto, a corto y medio plazo debido a los riesgos a los que se expone directamente la roca que pueden modificar las condiciones de estabilidad de la excavación), al introducir un sostenimiento flexible de sólo 5 cm de hormigón proyectado, el coeficiente de seguridad aumentaba hasta 1,62 puntos.

Se ha decidido introducir un revestimiento de 30 cm de espesor para asegurar a largo plazo la estabilidad estructural del túnel y protegiendo el sostenimiento y la roca de los posibles riesgos de cambios de presiones, incendio en el interior del túnel, etc.

Se ha estudiado el cambio en el factor de seguridad de la excavación en un punto de la clave del túnel, el cual se dispara hasta 3,67 puntos al incluir el revestimiento. Por tanto, aunque este revestimiento tiene una función básicamente funcional, también aporta un coeficiente de seguridad adicional en la estabilidad de la excavación, colaborando con el sostenimiento a corto y largo plazo, ya que no se puede confiar plenamente en el bulonado del sostenimiento, pues al estar en contacto directo con las humedades del terreno tiende a corroerse y degradarse con relativa rapidez, por lo que la estabilidad a largo plazo también es garantizada principalmente con el revestimiento.

Además, se ha estudiado el riesgo de desprendimiento de cuñas del macizo rocoso antes y después del sostenimiento donde, sólo con 5 cm de gunita, se logra neutralizar este tipo de riesgos, elevando todos los factores de seguridad por encima de 1,5, siendo la inmensa mayoría superiores a 10.

Por tanto, podemos concluir que el sostenimiento y revestimiento previstos cumplen con las exigencias de nuestro método constructivo. El Nuevo Método Austriaco, a pesar de tener tantos problemas en suelos, en una roca con buenas cualidades se convierte en un método muy rápido y sencillo de excavación aunque siempre hay que tenerlo controlado mediante las auscultaciones pertinentes del terreno.

10 REFERENCIAS

[1] Juncà Ubierna, J. A. (1997). Capítulo 1, Historia de los túneles y su evolución tecnológica. “Manual de Túneles y Obras Subterráneas”. Editor: Carlos López Jim Madrid: Gráficas Arias Montano, 1997 (1082p.) 1ª edición.

[2] Soto Saavedra, P. S. (2004). Tesis “Construcción de Túneles”. Universidad Austral de Chile.

[3] Hernández Michaca, J.L.; Pisanty Levy, J.; Sánchez Granados, V.M; Carreón Méndez, M. A; Roldán Ortiz, M. (2000). “Impacto Ambiental de Proyectos Carreteros. Efectos por la Construcción y Operación de Túneles”. Secretaría de comunicaciones y transportes, Instituto Mexicano del Transporte.

[4] Ramírez Oyanguren, Pedro; Alejano Monge, Leandro. (2004) “Mecánica de Rocas: Fundamentos e Ingeniería de Taludes”. E.T.S.I. Minas (UPM).

[5] Abad Alvarado, A.C; Huisa Velásquez, F.R. (2011). Tesis “Procesos de Excavación y Sostenimiento de Túneles Proyecto Derivación Huascacocha – Rimac”

[6] Ayala Carcedo, F.J.; Laín Huerta, R.; Laín Huerta, L.; Perianes Valle, E. (1995) Capítulo 5, Tecnología Constructiva. “Introducción a los Usos Industriales y Urbanos del Espacio Subterráneo y su Tecnología”. Instituto Geológico y Minero de España.

[7] Martí, J.V.; González, F.; Yepes, V. (2004). “Temas de procedimientos de construcción. Métodos y equipos de excavación en túnel”. *Editorial de la Universidad Politécnica de Valencia. Ref. 2004.835. Valencia, 52 pp.*

[8] Fernández, R. (1997).Capítulo 8, Excavaciones con máquinas integrales: Topos y escudos. “Manual de Túneles y Obras Subterráneas”. Editor: Carlos López Jim. Madrid: Gráficas Arias Montano, 1997 (1082p.) 1ª edición.

[9] SCRI Group. “Métodos clásicos”.

[10] Estébanez, A. (2007). “Nuevo método austriaco (NATM)”

[11] El País. (16 de mayo de 2007). “El hundimiento del metro del Carmel: la peor crisis”.

[12] Extremiana Vázquez, I. (2011). Tesis “Gestión de riesgos en proyectos de túneles”. Universidad de la Rioja.

[13] Pino González, D.A (2008). Tesis “Recomendación de bases para el diseño de constructivo de túneles”. Universidad de Chile.

[14] Proyecto de Construcción de plataforma Línea de Alta Velocidad Madrid – Extremadura, Cáceres – Talayuela, tramo: Grimaldo – Casas de Millán. (2009). Ministerio de Fomento.

[15] Forns Corrales, I. (2009). Tesis “Desarrollo de un procedimiento de auscultación para obras subterráneas urbanas”.

[16] Sancho Moreno, M. (2013). “Predicción del coste de la obra civil de un túnel ejecutado por métodos convencionales”.



11 ANEJOS



ANEJO 1: PRESUPUESTO



Índice

1.- MEDICIONES

1.1.- Mediciones Auxiliares.

1.2.- Por Capítulos.

2.- CUADRO DE PRECIOS

2.1.- Cuadro de Precios nº 1.

2.2.- Cuadro de Precios nº 2.

3.- PRESUPUESTO POR CAPÍTULO

4.- RESUMEN DEL PRESUPUESTO



1.- MEDICIONES



1.1.- Mediciones Auxiliares

Excavación Túnel			
R (m)	Área (m ²)	Longitud (m)	Volumen tierra (m ³)
6,4	128,680	3320	427216,389

Sostenimiento				
BULONES				
Long. Tunel (m)	Espaciado transv. entre bulones (m)	N. malla bulones	N. bulones/malla	BULONES
3320	1,5	2213,333	10,5	23240
HORMIGÓN PROYECTADO				
Long. Tunel (m)	Perímetro boca. Túnel (m)	Espesor H.proyectado (m)	Volumen H.proyect. (m ³)	
3320	40,212	0,05	6675,256	

REVESTIMIENTO			
Long. Tunel (m)	Perímetro boca. Túnel (m)	Espesor Hormigón (m)	Volumen HM-35. (m ³)
3320	40,212	0,3	40051,536



1.2.- Por Capítulos

PRESUPUESTO Y MEDICIONES

Presupuesto Túnel Santa Marina con el Nuevo Método Austriaco

CÓDIGO	RESUMEN	UDS	LONGITUD	ANCHURA	ALTURA	PARCIALES	CANTIDAD	PRECIO	IMPORTE
CAPÍTULO EXCAVACION Construcción Túnel Sta.Marina mediante NATM									
SUBCAPÍTULO 5.02.01 EXCAVACIÓN EN TÚNEL									
G401N101	m³ EXCAVACION DE TUNEL EN AVANCE EN TERRENO CLASE "OC" EXCAVACION DE TUNEL EN AVANCE EN TERRENO CLASE "OC"								
	a*b*c	1	3.320,00	77,09		255.938,80		a*b*c	
							255.938,80	44,88	11.486.533,34
G401N102	m³ EXCAVACION DE TUNEL EN DESTROZA EN TERRENO CLASE "OC" EXCAVACION DE TUNEL EN DESTROZA EN TERRENO CLASE "OC"								
	a*b*c	1	3.320,00	51,59		171.278,80		a*b*c	
							171.278,80	22,31	3.821.230,03
TOTAL SUBCAPÍTULO 5.02.01 EXCAVACIÓN EN TÚNEL.....									15.307.763,37
SUBCAPÍTULO 5.02.02 SOSTENIMIENTOS EN TÚNEL									
G402N004	ud BULON DE EXPANSIÓN L=4 M, CARGA DE ROTURA = 240 KN BULÓN DE EXPANSIÓN DE 4 m DE LONGITUD, CON CARGA DE ROTURA DE 240 KN.								
	Sost. Tipo 1	1	23.240,00			23.240,00	23.240,00		
							23.240,00	110,97	2.578.942,80
G402N032	m³ HORMIGON H/MP/35 PROYECTADO, CON FIBRAS CUALQUIER ESPESOR HORMIGON H/MP/35 PROYECTADO, CON EMPLEO DE FIBRAS, EN CAPA DE CUAL- QUIER ESPESOR								
	b*c	1	1,00	6.675,26		6.675,26		b*c	
							6.675,26	258,59	1.726.155,48
TOTAL SUBCAPÍTULO 5.02.02 SOSTENIMIENTOS EN TÚNEL ...									4.305.098,28
SUBCAPÍTULO 5.02.03 RELLENO EN TRADOS DEL REVESTIMIENTO DE TUNEL									
G4030001	t MORTERO DE CEMENTO INYECTADO MORTERO DE CEMENTO INYECTADO Hipotesis!* : volumen sin rellenar por el revestimiento 1/1000 del volumen total del revestimiento. Densidad cemento inyectado= 1,2 g/cm3								
	Sost. Tipo 1 -> Medicion segun hipotesis!	1	48,06			48,06			
							48,06	271,55	13.050,69
TOTAL SUBCAPÍTULO 5.02.03 RELLENO EN TRADOS DEL									13.050,69

PRESUPUESTO Y MEDICIONES

Presupuesto Túnel Santa Marina con el Nuevo Método Austríaco

CÓDIGO	RESUMEN	UDS	LONGITUD	ANCHURA	ALTURA	PARCIALES	CANTIDAD	PRECIO	IMPORTE
SUBCAPÍTULO 5.02.04 REVESTIMIENTOS									
G303N007	m³ HORMIGON HM-35 EN REVESTIMIENTO DE TUNEL INCLUIDO FIBRAS DE POLI HORMIGÓN EN MASA HM-35 EN REVESTIMIENTO DE TUNEL INCLUIDO FIBRAS DE POLIPROPILENO 1,5 kg/m3 Y CARROS DE ENCONFRADO, CARRILES DE APOYO Y RODADURA, CIERRES, ETC. TOTALMENTE TERMINADO								
	Perfil tipo 1	1	3.320,00	12,06			40.039,20		
							40.039,20	161,99	6.485.950,01
TOTAL SUBCAPÍTULO 5.02.04 REVESTIMIENTOS									6.485.950,01
SUBCAPÍTULO 5.02.07 CONTROL Y AUSCULTACION									
G4070001	ud CABEZAL SUPERIOR, DE UNA VARILLA CABEZAL SUPERIOR, DE UNA VARILLA								
	8 Mediciones a 3 varillas	3	8,00				24,00		
							24,00	1.708,03	40.992,72
G4070002	m VARILLA EXTENSOMETRICA VARILLA EXTENSOMETRICA								
	3 varillas de 3, 6 y 9 m -> 18 m.	3	144,00				432,00		
							432,00	90,45	39.074,40
G4070003	ud ELEMENTO FONDO VARILLA EXTENSOMETRICA ELEMENTO DE FONDO PARA VARILLA EXTENSOMETRICA								
	8 Mediciones a 3 varillas	3	8,00				24,00		
							24,00	66,63	1.599,12
G4070004	ud MEDIDOR DESPL. EXTENSOMETROS VARILLA MEDIDOR DE DESPLAZAMIENTOS PARA EXTENSOMETROS DE VARILLA								
		1					1,00		
							1,00	395,97	395,97
G4070006	ud EQUIPO DE MEDIDA DE CONVERGENCIA EQUIPO DE MEDIDA DE CONVERGENCIA								
	Un equipo por cada boca del tunel	2					2,00		
							2,00	3.192,35	6.384,70
G4070008	ud LECTURA PORTATIL DIGITAL MED. SENSORES LECTURA PORTATIL DIGITAL PARA LA MEDICION DE LOS SENSORES DE CUERDA VIBRANTE								
	Medicion segun hipotesis!	1					1,00		
							1,00	3.781,95	3.781,95
G4070005	ud PERNO DE CONVERGENCIA PERNO DE CONVERGENCIA								
	5 pernos por cada 15 m en zona de Tcg y de falla	5	97,00				485,00		
	3 pernos por cada 25 m en las otras zonas	3	77,00				231,00		
							716,00	13,03	9.329,48
G10Q0001	m TUBERIA DE INCLINOMETRO TUBERIA DE INCLINOMETRO DOBLEMENTE RANURADA EN ALUMINIO ANODIZADO, INCLUYENDO ELEMENTOS AUXILIARES								
	Longitud de 25 y 35 m respectivamente	4	60,00				240,00		
							240,00	108,26	25.982,40
G10Q0002	ud HITO DE CONTROL TOPOGRAFICO HITO DE CONTROL TOPOGRAFICO EN ACERO INOXIDABLE PARA MEDICIONES DE PRECISION, INCLUIDA ARQUETA METALICA CON TAPAS								



2.-CUADRO DE PRECIOS



2.1.-Cuadro de Precios nº1

CUADRO DE PRECIOS 1

Presupuesto Túnel Santa Marina con el Nuevo Método Austriaco

CÓDIGO	UD	RESUMEN	PRECIO
CAPÍTULO 5.02.07 CONTROL Y AUSCULTACION			
SUBCAPÍTULO 5.02.01 EXCAVACIÓN EN TÚNEL			
G401N101	m³	EXCAVACION DE TUNEL EN AVANCE EN TERRENO CLASE "OC" EXCAVACION DE TUNEL EN AVANCE EN TERRENO CLASE "OC"	44,88
		CUARENTA Y CUATRO EUROS con OCHENTA Y OCHO CÉNTIMOS	
G401N102	m³	EXCAVACION DE TUNEL EN DESTROZA EN TERRENO CLASE "OC" EXCAVACION DE TUNEL EN DESTROZA EN TERRENO CLASE "OC"	22,31
		VEINTIDOS EUROS con TREINTA Y UN CÉNTIMOS	
SUBCAPÍTULO 5.02.02 SOSTENIMIENTOS EN TÚNEL			
G402N004	ud	BULON DE EXPANSIÓN L=4 M, CARGA DE ROTURA = 240 KN BULÓN DE EXPANSIÓN DE 4 m DE LONGITUD, CON CARGA DE ROTURA DE 240 KN.	110,97
		CIENTO DIEZ EUROS con NOVENTA Y SIETE CÉNTIMOS	
G402N032	m³	HORMIGON H/MP/35 PROYECTADO, CON FIBRAS CUALQUIER ESPESOR HORMIGON H/MP/35 PROYECTADO, CON EMPLEO DE FIBRAS, EN CAPA DE CUALQUIER ESPESOR	258,59
		DOSCIENTOS CINCUENTA Y OCHO EUROS con CINCUENTA Y NUEVE CÉNTIMOS	
SUBCAPÍTULO 5.02.03 RELLENO EN TRASDOS DEL REVESTIMIENTO DE TUNEL			
G4030001	t	MORTERO DE CEMENTO INYECTADO MORTERO DE CEMENTO INYECTADO Hipotesis!* : volumen sin rellenar por el revestimiento 1/1000 del volumen total del revestimiento. Densidad cemento inyectado= 1,2 g/cm3	271,55
		DOSCIENTOS SETENTA Y UN EUROS con CINCUENTA Y CINCO CÉNTIMOS	
SUBCAPÍTULO 5.02.04 REVESTIMIENTOS			
G303N007	m³	HORMIGON HM-35 EN REVESTIMIENTO DE TUNEL INCLUIDO FIBRAS DE POLI HORMIGÓN EN MASA HM-35 EN REVESTIMIENTO DE TUNEL INCLUIDO FIBRAS DE POLIPROPILENO 1,5 kg/m3 Y CARROS DE ENCONFRADO, CARRILES DE APOYO Y RODADURA, CIERRES, ETC. TOTALMENTE TERMINADO	161,99
		CIENTO SESENTA Y UN EUROS con NOVENTA Y NUEVE CÉNTIMOS	
SUBCAPÍTULO 5.02.07 CONTROL Y AUSCULTACION			
G4070001	ud	CABEZAL SUPERIOR, DE UNA VARILLA CABEZAL SUPERIOR, DE UNA VARILLA	1.708,03
		MIL SETECIENTOS OCHO EUROS con TRES CÉNTIMOS	
G4070002	m	VARILLA EXTENSOMETRICA VARILLA EXTENSOMETRICA	90,45
		NOVENTA EUROS con CUARENTA Y CINCO CÉNTIMOS	
G4070003	ud	ELEMENTO FONDO VARILLA EXTENSOMETRICA ELEMENTO DE FONDO PARA VARILLA EXTENSOMETRICA	66,63
		SESENTA Y SEIS EUROS con SESENTA Y TRES CÉNTIMOS	
G4070004	ud	MEDIDOR DESPL. EXTENSOMETROS VARILLA MEDIDOR DE DESPLAZAMIENTOS PARA EXTENSOMETROS DE VARILLA	395,97
		TRESCIENTOS NOVENTA Y CINCO EUROS con NOVENTA Y SIETE CÉNTIMOS	
G4070006	ud	EQUIPO DE MEDIDA DE CONVERGENCIA EQUIPO DE MEDIDA DE CONVERGENCIA	3.192,35
		TRES MIL CIENTO NOVENTA Y DOS EUROS con TREINTA Y CINCO CÉNTIMOS	
G4070008	ud	LECTURA PORTATIL DIGITAL MED. SENSORES LECTURA PORTATIL DIGITAL PARA LA MEDICION DE LOS SENSORES DE CUERDA VIBRANTE	3.781,95
		TRES MIL SETECIENTOS OCHENTA Y UN EUROS con NOVENTA Y CINCO CÉNTIMOS	

CUADRO DE PRECIOS 1

Presupuesto Túnel Santa Marina con el Nuevo Método Austríaco

CÓDIGO	UD	RESUMEN	PRECIO
G4070005	ud	PERNO DE CONVERGENCIA PERNO DE CONVERGENCIA	13,03
		TRECE EUROS con TRES CÉNTIMOS	
G10Q0001	m	TUBERIA DE INCLINOMETRO TUBERIA DE INCLINOMETRO DOBLEMENTE RANURADA EN ALUMINIO ANODIZADO, INCLUYENDO ELEMENTOS AUXILIARES	108,26
		CIENTO OCHO EUROS con VEINTISEIS CÉNTIMOS	
G10Q0002	ud	HITO DE CONTROL TOPOGRAFICO HITO DE CONTROL TOPOGRAFICO EN ACERO INOXIDABLE PARA MEDICIONES DE PRECISION, INCLUIDA ARQUETA METALICA CON TAPAS	187,80
		CIENTO OCHENTA Y SIETE EUROS con OCHENTA CÉNTIMOS	
G10Q0003	ud	PIEZOMETRO DE CUERDA VIBRANTE PIEZOMETRO DE CUERDA VIBRANTE COMPLETAMENTE INSTALADO A PROFUNDIDADES COMPRENDIDAS ENTRE 5 Y 20 m, INCLUSO CABLEADO HASTA CASETA DE CONTROL	1.336,49
		MIL TRESCIENTOS TREINTA Y SEIS EUROS con CUARENTA Y NUEVE CÉNTIMOS	
G407N011	m	RELEXION SISMICA EN EL TUNEL REFLEXION SISMICA EN EL TUNEL. INCLUIDO TODOS LOS TRABAJOS Y MATERIALES NECESARIOS.	87,89
		OCHENTA Y SIETE EUROS con OCHENTA Y NUEVE CÉNTIMOS	



Marta Romero García-Rubio



2.1.- Cuadro de Precios nº2

CUADRO DE PRECIOS 2

Presupuesto Túnel Santa Marina con el Nuevo Método Austriaco

CÓDIGO	UD	RESUMEN		PRECIO
CAPÍTULO 5.02.07 CONTROL Y AUSCULTACION				
SUBCAPÍTULO 5.02.01 EXCAVACIÓN EN TÚNEL				
G401N101	m³	EXCAVACION DE TUNEL EN AVANCE EN TERRENO CLASE "OC" EXCAVACION DE TUNEL EN AVANCE EN TERRENO CLASE "OC"		
			Mano de obra	9,89
			Maquinaria	27,45
			Resto de obra y materiales	7,54
			TOTAL PARTIDA	44,88
G401N102	m³	EXCAVACION DE TUNEL EN DESTROZA EN TERRENO CLASE "OC" EXCAVACION DE TUNEL EN DESTROZA EN TERRENO CLASE "OC"		
			Mano de obra	4,36
			Maquinaria	12,29
			Resto de obra y materiales	5,66
			TOTAL PARTIDA	22,31
SUBCAPÍTULO 5.02.02 SOSTENIMIENTOS EN TÚNEL				
G402N004	ud	BULON DE EXPANSIÓN L=4 M, CARGA DE ROTURA = 240 KN BULÓN DE EXPANSIÓN DE 4 m DE LONGITUD, CON CARGA DE ROTURA DE 240 KN.		
			Mano de obra	8,48
			Maquinaria	37,00
			Resto de obra y materiales	65,49
			TOTAL PARTIDA	110,97
G402N032	m³	HORMIGON H/MP/35 PROYECTADO, CON FIBRAS CUALQUIER ESPESOR HORMIGON H/MP/35 PROYECTADO, CON EMPLEO DE FIBRAS, EN CAPA DE CUALQUIER ESPESOR		
			Mano de obra	40,78
			Maquinaria	27,79
			Resto de obra y materiales	190,02
			TOTAL PARTIDA	258,59
SUBCAPÍTULO 5.02.03 RELLENO EN TRASDOS DEL REVESTIMIENTO DE TUNEL				
G4030001	t	MORTERO DE CEMENTO INYECTADO MORTERO DE CEMENTO INYECTADO Hipotesis!* : volumen sin rellenar por el revestimiento 1/1000 del volumen total del revestimiento. Densidad cemento inyectado= 1,2 g/cm3		
			Mano de obra	13,90
			Maquinaria	108,41
			Resto de obra y materiales	149,24
			TOTAL PARTIDA	271,55

CUADRO DE PRECIOS 2

Presupuesto Túnel Santa Marina con el Nuevo Método Austríaco

CÓDIGO	UD	RESUMEN	PRECIO
SUBCAPÍTULO 5.02.04 REVESTIMIENTOS			
G303N007	m³	HORMIGON HM-35 EN REVESTIMIENTO DE TUNEL INCLUIDO FIBRAS DE POLI HORMIGÓN EN MASA HM-35 EN REVESTIMIENTO DE TUNEL INCLUIDO FIBRAS DE POLIPROPILENO 1,5 kg/m3 Y CARROS DE ENCONFRADO, CARRILES DE APO- YO Y RODADURA, CIERRES, ETC. TOTALMENTE TERMINADO	
		Mano de obra	12,06
		Maquinaria	11,17
		Resto de obra y materiales	138,76
		TOTAL PARTIDA	161,99
SUBCAPÍTULO 5.02.07 CONTROL Y AUSCULTACION			
G4070001	ud	CABEZAL SUPERIOR, DE UNA VARILLA CABEZAL SUPERIOR, DE UNA VARILLA	
		Mano de obra	195,39
		Resto de obra y materiales	1.512,64
		TOTAL PARTIDA	1.708,03
G4070002	m	VARILLA EXTENSOMETRICA VARILLA EXTENSOMETRICA	
		Mano de obra	13,45
		Maquinaria	67,26
		Resto de obra y materiales	9,74
		TOTAL PARTIDA	90,45
G4070003	ud	ELEMENTO FONDO VARILLA EXTENSOMETRICA ELEMENTO DE FONDO PARA VARILLA EXTENSOMETRICA	
		Mano de obra	44,94
		Resto de obra y materiales	21,69
		TOTAL PARTIDA	66,63
G4070004	ud	MEDIDOR DESPL. EXTENSOMETROS VARILLA MEDIDOR DE DESPLAZAMIENTOS PARA EXTENSOMETROS DE VARILLA	
		Mano de obra	52,14
		Resto de obra y materiales	343,83
		TOTAL PARTIDA	395,97
G4070006	ud	EQUIPO DE MEDIDA DE CONVERGENCIA EQUIPO DE MEDIDA DE CONVERGENCIA	
		Mano de obra	29,56
		Resto de obra y materiales	3.162,79
		TOTAL PARTIDA	3.192,35
G4070008	ud	LECTURA PORTATIL DIGITAL MED. SENSORES LECTURA PORTATIL DIGITAL PARA LA MEDICION DE LOS SENSORES DE CUER- DA VIBRANTE	
		Mano de obra	34,75
		Resto de obra y materiales	3.747,20
		TOTAL PARTIDA	3.781,95
G4070005	ud	PERNO DE CONVERGENCIA PERNO DE CONVERGENCIA	
		Mano de obra	6,76
		Maquinaria	3,86
		Resto de obra y materiales	2,41
		TOTAL PARTIDA	13,03
G10Q0001	m	TUBERIA DE INCLINOMETRO TUBERIA DE INCLINOMETRO DOBLEMENTE RANURADA EN ALUMINIO ANODIZA- DO, INCLUYENDO ELEMENTOS AUXILIARES	
		Mano de obra	5,13
		Resto de obra y materiales	103,13
		TOTAL PARTIDA	108,26

CUADRO DE PRECIOS 2

Presupuesto Túnel Santa Marina con el Nuevo Método Austríaco

CÓDIGO	UD	RESUMEN		PRECIO
G10Q002	ud	HITO DE CONTROL TOPOGRAFICO HITO DE CONTROL TOPOGRAFICO EN ACERO INOXIDABLE PARA MEDICIONES DE PRECISION, INCLUIDA ARQUETA METALICA CON TAPAS		
			Mano de obra	15,92
			Resto de obra y materiales	171,88
			TOTAL PARTIDA	187,80
G10Q003	ud	PIEZOMETRO DE CUERDA VIBRANTE PIEZOMETRO DE CUERDA VIBRANTE COMPLETAMENTE INSTALADO A PROFUN- DIDADES COMPRENDIDAS ENTRE 5 Y 20 m, INCLUSO CABLEADO HASTA CASE- TA DE CONTROL		
			Mano de obra	30,11
			Resto de obra y materiales	1.306,38
			TOTAL PARTIDA	1.336,49
G407N011	m	RELEXION SISMICA EN EL TUNEL REFLEXION SISMICA EN EL TUNEL. INCLUIDO TODOS LOS TRABAJOS Y MATERIALES NECESARIOS.		
			Mano de obra	0,81
			Maquinaria	87,00
			Resto de obra y materiales	0,08
			TOTAL PARTIDA	87,89



Marta Romero García-Rubio



3.- PRESUPUESTO POR CAPÍTULOS

PRESUPUESTO

Presupuesto Túnel Santa Marina con el Nuevo Método Austríaco

CÓDIGO	RESUMEN	CANTIDAD	PRECIO	IMPORTE
CAPÍTULO EXCAVACION Construcción Túnel Sta.Marina mediante NATM				
SUBCAPÍTULO 5.02.01 EXCAVACIÓN EN TÚNEL				
G401N101	m³ EXCAVACION DE TUNEL EN AVANCE EN TERRENO CLASE "OC"	255.938,80	44,88	11.486.533,34
G401N102	m³ EXCAVACION DE TUNEL EN DESTROZA EN TERRENO CLASE "OC"	171.278,80	22,31	3.821.230,03
TOTAL SUBCAPÍTULO 5.02.01 EXCAVACIÓN EN TÚNEL.....				15.307.763,37
SUBCAPÍTULO 5.02.02 SOSTENIMIENTOS EN TÚNEL				
G402N004	ud BULON DE EXPANSIÓN L=4 M, CARGA DE ROTURA = 240 KN	23.240,00	110,97	2.578.942,80
G402N032	m³ HORMIGON H/MP/35 PROYECTADO, CON FIBRAS CUALQUIER ESPESOR	6.675,26	258,59	1.726.155,48
TOTAL SUBCAPÍTULO 5.02.02 SOSTENIMIENTOS EN TÚNEL ...				4.305.098,28
SUBCAPÍTULO 5.02.03 RELLENO EN TRADOS DEL REVESTIMIENTO DE TUNEL				
G4030001	t MORTERO DE CEMENTO INYECTADO	48,06	271,55	13.050,69
TOTAL SUBCAPÍTULO 5.02.03 RELLENO EN TRADOS DEL				13.050,69
SUBCAPÍTULO 5.02.04 REVESTIMIENTOS				
G303N007	m³ HORMIGON HM-35 EN REVESTIMIENTO DE TUNEL INCLUIDO FIBRAS DE POLI	40.039,20	161,99	6.485.950,01
TOTAL SUBCAPÍTULO 5.02.04 REVESTIMIENTOS				6.485.950,01
SUBCAPÍTULO 5.02.07 CONTROL Y AUSCULTACION				
G4070001	ud CABEZAL SUPERIOR, DE UNA VARILLA	24,00	1.708,03	40.992,72
G4070002	m VARILLA EXTENSOMETRICA	432,00	90,45	39.074,40
G4070003	ud ELEMENTO FONDO VARILLA EXTENSOMETRICA	24,00	66,63	1.599,12
G4070004	ud MEDIDOR DESPL. EXTENSOMETROS VARILLA	1,00	395,97	395,97
G4070006	ud EQUIPO DE MEDIDA DE CONVERGENCIA	2,00	3.192,35	6.384,70
G4070008	ud LECTURA PORTATIL DIGITAL MED. SENSORES	1,00	3.781,95	3.781,95
G4070005	ud PERNO DE CONVERGENCIA	716,00	13,03	9.329,48
G10Q0001	m TUBERIA DE INCLINOMETRO	240,00	108,26	25.982,40
G10Q0002	ud HITO DE CONTROL TOPOGRAFICO	10,00	187,80	1.878,00
G10Q0003	ud PIEZOMETRO DE CUERDA VIBRANTE	5,00	1.336,49	6.682,45
G407N011	m RELEXION SISMICA EN EL TUNEL	1.000,00	87,89	87.890,00
TOTAL SUBCAPÍTULO 5.02.07 CONTROL Y AUSCULTACION				223.991,19

PRESUPUESTO

Presupuesto Túnel Santa Marina con el Nuevo Método Austriaco

CÓDIGO	RESUMEN	CANTIDAD	PRECIO	IMPORTE
	TOTAL CAPÍTULO EXCAVACION Construcción Túnel Sta.Marina mediante NATM			26.335.853,54
	TOTAL.....			26.335.853,54



4.- RESUMEN DEL PRESUPUESTO

RESUMEN DE PRESUPUESTO

Presupuesto Túnel Santa Marina con el Nuevo Método Austríaco

CAPITULO	RESUMEN	EUROS	%
EXCAVACION	Construcción Túnel Sta.Marina mediante NATM	26.335.853,54	100,00
	TOTAL EJECUCIÓN MATERIAL	26.335.853,54	
	13,00 % Gastos generales	3.423.660,96	
	6,00 % Beneficio industrial	1.580.151,21	
	SUMA DE G.G. y B.I.	5.003.812,17	
	21,00 % I.V.A.	6.581.329,80	
	TOTAL PRESUPUESTO CONTRATA	37.920.995,51	
	TOTAL PRESUPUESTO GENERAL	37.920.995,51	

Asciende el presupuesto general a la expresada cantidad de TREINTA Y SIETE MILLONES NOVECIENTOS VEINTE MIL NOVECIENTOS NOVENTA Y CINCO EUROS con CINCUENTA Y UN CÉNTIMOS

Cáceres , a 5 de julio de 2015.

El promotor

La dirección facultativa



Marta Romero García-Rubio



ANEJO 2: SALOME-CODEASTER



Índice

1.- CÓDIGO FUENTE

2.- COMANDOS



1.- CÓDIGO FUENTE

```

# -*- coding: iso-8859-1 -*-

###
### This file is generated automatically by SALOME v7.4.0 with dump python functionality
###

import sys
import salome

salome.salome_init()
theStudy = salome.myStudy

import salome_notebook
notebook = salome_notebook.NoteBook(theStudy)
sys.path.insert( 0, r'/home/marta/salome/appli_V7_4_0')

###
### MED component
###

###
### GEOM component
###

import GEOM
from salome.geom import geomBuilder
import math
import SALOMEDS

geompy = geomBuilder.New(theStudy)

O = geompy.MakeVertex(0, 0, 0)
OX = geompy.MakeVectorDXDYDZ(1, 0, 0)
OY = geompy.MakeVectorDXDYDZ(0, 1, 0)
OZ = geompy.MakeVectorDXDYDZ(0, 0, 1)
Vertex_1 = geompy.MakeVertex(30.8, 0, 30.8)
Vertex_2 = geompy.MakeVertex(69.2, 0, 30.8)
Line_1 = geompy.MakeLineTwoPnt(Vertex_2, Vertex_1)
Suelo_interno = geompy.MakePrismVecH(Line_1, OZ, 38.4)
Vertex_3 = geompy.MakeVertex(0, 0, 0)
Vertex_4 = geompy.MakeVertex(100, 0, 0)
Line_2 = geompy.MakeLineTwoPnt(Vertex_4, Vertex_3)
Suelo_externo = geompy.MakePrismVecH(Line_2, OZ, 251.752)
Vertex_5 = geompy.MakeVertex(50, 0, 50)
Tunel = geompy.MakeDiskPntVecR(Vertex_5, OY, 6.4)
listSubShapeIDs = geompy.SubShapeAllIDs(Tunel, geompy.ShapeType["FACE"])
listSubShapeIDs = geompy.SubShapeAllIDs(Tunel, geompy.ShapeType["EDGE"])
[geomObj_1] = geompy.SubShapeAll(Tunel, geompy.ShapeType["EDGE"])
[geomObj_2] = geompy.SubShapeAll(Tunel, geompy.ShapeType["EDGE"])
[geomObj_3] = geompy.SubShapeAll(Tunel, geompy.ShapeType["FACE"])
[geomObj_4] = geompy.SubShapeAll(Tunel, geompy.ShapeType["FACE"])

```

```

[geomObj_5] = geompy.SubShapeAll(Tunel, geompy.ShapeType["FACE"])
[geomObj_6] = geompy.SubShapeAll(Tunel, geompy.ShapeType["EDGE"])
[geomObj_7] = geompy.SubShapeAll(Tunel, geompy.ShapeType["EDGE"])
[geomObj_8] = geompy.SubShapeAll(Tunel, geompy.ShapeType["EDGE"])
[geomObj_9] = geompy.SubShapeAll(Tunel, geompy.ShapeType["EDGE"])
[geomObj_10] = geompy.SubShapeAll(Tunel, geompy.ShapeType["FACE"])
[geomObj_11] = geompy.SubShapeAll(Tunel, geompy.ShapeType["FACE"])
O_1 = geompy.MakeVertex(0, 0, 0)
OX_1 = geompy.MakeVectorDXDYDZ(1, 0, 0)
OY_1 = geompy.MakeVectorDXDYDZ(0, 1, 0)
OZ_1 = geompy.MakeVectorDXDYDZ(0, 0, 1)
listSameIDs = geompy.GetSameIDs(geomObj_12, geomObj_1)
listSameIDs = geompy.GetSameIDs(geomObj_12, geomObj_2)
listSameIDs = geompy.GetSameIDs(geomObj_12, geomObj_3)
listSameIDs = geompy.GetSameIDs(geomObj_13, geomObj_5)
listSameIDs = geompy.GetSameIDs(geomObj_13, geomObj_6)
listSameIDs = geompy.GetSameIDs(geomObj_13, geomObj_7)
O_2 = geompy.MakeVertex(0, 0, 0)
OX_2 = geompy.MakeVectorDXDYDZ(1, 0, 0)
OY_2 = geompy.MakeVectorDXDYDZ(0, 1, 0)
OZ_2 = geompy.MakeVectorDXDYDZ(0, 0, 1)
O_3 = geompy.MakeVertex(0, 0, 0)
OX_3 = geompy.MakeVectorDXDYDZ(1, 0, 0)
OY_3 = geompy.MakeVectorDXDYDZ(0, 1, 0)
OZ_3 = geompy.MakeVectorDXDYDZ(0, 0, 1)
O_4 = geompy.MakeVertex(0, 0, 0)
OX_4 = geompy.MakeVectorDXDYDZ(1, 0, 0)
OY_4 = geompy.MakeVectorDXDYDZ(0, 1, 0)
OZ_4 = geompy.MakeVectorDXDYDZ(0, 0, 1)
listSameIDs = geompy.GetSameIDs(geomObj_14, geomObj_8)
listSameIDs = geompy.GetSameIDs(geomObj_14, geomObj_9)
listSameIDs = geompy.GetSameIDs(geomObj_15, geomObj_10)
listSameIDs = geompy.GetSameIDs(geomObj_15, geomObj_11)
Vertex_8 = geompy.MakeVertex(56.4, 0, 44.8)
Vertex_9 = geompy.MakeVertex(43.6, 0, 44.8)
Line_14 = geompy.MakeLineTwoPnt(Vertex_9, Vertex_8)
Vertex_6 = geompy.MakeVertex(56.4, 0, 50.6)
Vertex_7 = geompy.MakeVertex(43.6, 0, 50.6)
Line_13 = geompy.MakeLineTwoPnt(Vertex_7, Vertex_6)
Vertex_10 = geompy.MakeVertex(52.1, 0, 56.4)
Vertex_11 = geompy.MakeVertex(52.1, 0, 43.6)
Line_15 = geompy.MakeLineTwoPnt(Vertex_11, Vertex_10)
hormigon = geompy.MakeDiskPntVecR(Vertex_5, OY_2, 6.25)
Tunel_edge_3 = geompy.GetSubShape(Tunel, [3])
Compound_2 = geompy.MakeVertexOnLinesIntersection(Line_14, Tunel_edge_3)
Compound_2_vertex_3 = geompy.GetSubShape(Compound_2, [3])
Compound_2_vertex_2 = geompy.GetSubShape(Compound_2, [2])
Linea_contraboveda = geompy.MakeLineTwoPnt(Compound_2_vertex_3, Compound_2_vertex_2)
centro_1_contravob = geompy.MakeVertexOnCurve(Linea_contraboveda, 0.5)
Arc_5 = geompy.MakeArcCenter(Vertex_5, Compound_2_vertex_3, Compound_2_vertex_2, False)
contraboveda = geompy.MakeFaceWires([Linea_contraboveda, Arc_5], 1)
hormigon_edge_3 = geompy.GetSubShape(hormigon, [3])

```

```

Compound_3 = geompy.MakeVertexOnLinesIntersection(hormigon_edge_3, Linea_contraboveda)
Compound_3_vertex_3 = geompy.GetSubShape(Compound_3, [3])
Compound_3_vertex_2 = geompy.GetSubShape(Compound_3, [2])
Arc_6 = geompy.MakeArcCenter(Vertex_5, Compound_3_vertex_3, Compound_3_vertex_2,False)
Arc_6_vertex_2 = geompy.GetSubShape(Arc_6, [2])
Arc_6_vertex_3 = geompy.GetSubShape(Arc_6, [3])
Line_16 = geompy.MakeLineTwoPnt(Arc_6_vertex_2, Arc_6_vertex_3)
Suelo_4 = geompy.MakeFaceWires([Arc_6, Line_16], 1)
[geomObj_16] = geompy.SubShapeAll(Suelo_4, geompy.ShapeType["FACE"])
[geomObj_17] = geompy.SubShapeAll(Suelo_4, geompy.ShapeType["FACE"])
[geomObj_18] = geompy.SubShapeAll(Suelo_4, geompy.ShapeType["FACE"])
[geomObj_19] = geompy.SubShapeAll(Suelo_4, geompy.ShapeType["FACE"])
[geomObj_20] = geompy.SubShapeAll(Suelo_4, geompy.ShapeType["FACE"])
[geomObj_21] = geompy.SubShapeAll(Suelo_4, geompy.ShapeType["FACE"])
[geomObj_22] = geompy.SubShapeAll(Suelo_4, geompy.ShapeType["FACE"])
[geomObj_23] = geompy.SubShapeAll(Suelo_4, geompy.ShapeType["FACE"])
[geomObj_24] = geompy.SubShapeAll(Suelo_4, geompy.ShapeType["FACE"])
[geomObj_25] = geompy.SubShapeAll(Suelo_4, geompy.ShapeType["FACE"])
[geomObj_26,geomObj_27] = geompy.SubShapeAll(Suelo_4, geompy.ShapeType["EDGE"])
[geomObj_28,geomObj_29] = geompy.SubShapeAll(Suelo_4, geompy.ShapeType["EDGE"])
hormigon_4 = geompy.MakeCutList(contraboveda, [Suelo_4], True)
[geomObj_30] = geompy.SubShapeAll(hormigon_4, geompy.ShapeType["FACE"])
[geomObj_31] = geompy.SubShapeAll(hormigon_4, geompy.ShapeType["FACE"])
[geomObj_32,geomObj_33,geomObj_34,geomObj_35] = geompy.SubShapeAll(hormigon_4,
geompy.ShapeType["EDGE"])
[geomObj_36,geomObj_37,geomObj_38,geomObj_39] = geompy.SubShapeAll(hormigon_4,
geompy.ShapeType["EDGE"])
[geomObj_40] = geompy.SubShapeAll(hormigon_4, geompy.ShapeType["FACE"])
[geomObj_41] = geompy.SubShapeAll(hormigon_4, geompy.ShapeType["FACE"])
[geomObj_42] = geompy.SubShapeAll(hormigon_4, geompy.ShapeType["FACE"])
[geomObj_43] = geompy.SubShapeAll(hormigon_4, geompy.ShapeType["FACE"])
[geomObj_44] = geompy.SubShapeAll(hormigon_4, geompy.ShapeType["FACE"])
[geomObj_45] = geompy.SubShapeAll(hormigon_4, geompy.ShapeType["FACE"])
[geomObj_46] = geompy.SubShapeAll(hormigon_4, geompy.ShapeType["FACE"])
[geomObj_47,geomObj_48,geomObj_49,geomObj_50] = geompy.SubShapeAll(hormigon_4,
geompy.ShapeType["EDGE"])
Compound_4 = geompy.MakeVertexOnLinesIntersection(Line_13, Tunel_edge_3)
Compound_4_vertex_2 = geompy.GetSubShape(Compound_4, [2])
Compound_4_vertex_3 = geompy.GetSubShape(Compound_4, [3])
Arc_7 = geompy.MakeArcCenter(Vertex_5, Compound_4_vertex_2, Compound_4_vertex_3,False)
Arc_7_vertex_3 = geompy.GetSubShape(Arc_7, [3])
Arc_7_vertex_2 = geompy.GetSubShape(Arc_7, [2])
Line_17 = geompy.MakeLineTwoPnt(Arc_7_vertex_3, Arc_7_vertex_2)
avance = geompy.MakeFaceWires([Arc_7, Line_17], 1)
Face_5_edge_6 = geompy.GetSubShape(avance, [6])
Compound_5 = geompy.MakeVertexOnLinesIntersection(Face_5_edge_6, hormigon_edge_3)
Compound_5_vertex_3 = geompy.GetSubShape(Compound_5, [3])
Compound_5_vertex_2 = geompy.GetSubShape(Compound_5, [2])
Arc_8 = geompy.MakeArcCenter(Vertex_5, Compound_5_vertex_3, Compound_5_vertex_2,False)
Line_18 = geompy.MakeLineTwoPnt(Compound_5_vertex_3, Compound_5_vertex_2)
suelo_1 = geompy.MakeFaceWires([Arc_8, Line_18], 1)
[geomObj_51] = geompy.SubShapeAll(suelo_1, geompy.ShapeType["FACE"])

```

```

[geomObj_52] = geompy.SubShapeAll(suelo_1, geompy.ShapeType["FACE"])
[geomObj_53] = geompy.SubShapeAll(suelo_1, geompy.ShapeType["FACE"])
[geomObj_54] = geompy.SubShapeAll(suelo_1, geompy.ShapeType["FACE"])
[geomObj_55] = geompy.SubShapeAll(suelo_1, geompy.ShapeType["FACE"])
[geomObj_56] = geompy.SubShapeAll(suelo_1, geompy.ShapeType["FACE"])
[geomObj_57] = geompy.SubShapeAll(suelo_1, geompy.ShapeType["FACE"])
[geomObj_58] = geompy.SubShapeAll(suelo_1, geompy.ShapeType["FACE"])
[geomObj_59,geomObj_60] = geompy.SubShapeAll(suelo_1, geompy.ShapeType["EDGE"])
hormigon_1 = geompy.MakeCutList(avance, [suelo_1], True)
[geomObj_61] = geompy.SubShapeAll(hormigon_1, geompy.ShapeType["FACE"])
[geomObj_62] = geompy.SubShapeAll(hormigon_1, geompy.ShapeType["FACE"])
[geomObj_63,geomObj_64,geomObj_65,geomObj_66] = geompy.SubShapeAll(hormigon_1,
geompy.ShapeType["EDGE"])
[geomObj_67] = geompy.SubShapeAll(hormigon_1, geompy.ShapeType["FACE"])
[geomObj_68] = geompy.SubShapeAll(hormigon_1, geompy.ShapeType["FACE"])
[geomObj_69] = geompy.SubShapeAll(hormigon_1, geompy.ShapeType["FACE"])
[geomObj_70] = geompy.SubShapeAll(hormigon_1, geompy.ShapeType["FACE"])
[geomObj_71] = geompy.SubShapeAll(hormigon_1, geompy.ShapeType["FACE"])
[geomObj_72] = geompy.SubShapeAll(hormigon_1, geompy.ShapeType["FACE"])
[geomObj_73] = geompy.SubShapeAll(hormigon_1, geompy.ShapeType["FACE"])
[geomObj_74,geomObj_75,geomObj_76,geomObj_77] = geompy.SubShapeAll(hormigon_1,
geompy.ShapeType["EDGE"])
Vertex_12 = geompy.MakeVertexOnLinesIntersection(Line_17, Line_15)
Vertex_13 = geompy.MakeVertexOnLinesIntersection(Line_15, Linea_contraboveda)
Line_19 = geompy.MakeLineTwoPnt(Vertex_13, Vertex_12)
Line_20 = geompy.MakeLineTwoPnt(Vertex_12, Compound_4_vertex_3)
Linea_contraboveda_vertex_2 = geompy.GetSubShape(Linea_contraboveda, [2])
Line_21 = geompy.MakeLineTwoPnt(Vertex_13, Linea_contraboveda_vertex_2)
Line_21_vertex_3 = geompy.GetSubShape(Line_21, [3])
Arc_9 = geompy.MakeArcCenter(Vertex_5, Line_21_vertex_3, Compound_4_vertex_3,False)
Face_5 = geompy.MakeFaceWires([Line_19, Line_20, Line_21, Arc_9], 1)
Vertex_14 = geompy.MakeVertexOnLinesIntersection(hormigon_edge_3, Line_20)
Face_5_edge_10 = geompy.GetSubShape(Face_5, [10])
Vertex_15 = geompy.MakeVertexOnLinesIntersection(hormigon_edge_3, Face_5_edge_10)
Line_22 = geompy.MakeLineTwoPnt(Vertex_13, Vertex_15)
Face_5_vertex_5 = geompy.GetSubShape(Face_5, [5])
Line_23 = geompy.MakeLineTwoPnt(Face_5_vertex_5, Vertex_14)
Line_22_vertex_3 = geompy.GetSubShape(Line_22, [3])
Arc_10 = geompy.MakeArcCenter(Vertex_5, Vertex_14, Line_22_vertex_3,False)
suelo_2 = geompy.MakeFaceWires([Line_19, Line_22, Line_23, Arc_10], 1)
[geomObj_78] = geompy.SubShapeAll(suelo_2, geompy.ShapeType["FACE"])
[geomObj_79] = geompy.SubShapeAll(suelo_2, geompy.ShapeType["FACE"])
[geomObj_80] = geompy.SubShapeAll(suelo_2, geompy.ShapeType["FACE"])
[geomObj_81] = geompy.SubShapeAll(suelo_2, geompy.ShapeType["FACE"])
[geomObj_82] = geompy.SubShapeAll(suelo_2, geompy.ShapeType["FACE"])
hormigon_2 = geompy.MakeCutList(Face_5, [suelo_2], True)
[geomObj_83] = geompy.SubShapeAll(hormigon_2, geompy.ShapeType["FACE"])
[geomObj_84] = geompy.SubShapeAll(hormigon_2, geompy.ShapeType["FACE"])
[geomObj_85,geomObj_86,geomObj_87,geomObj_88] = geompy.SubShapeAll(hormigon_2,
geompy.ShapeType["EDGE"])
[geomObj_89] = geompy.SubShapeAll(hormigon_2, geompy.ShapeType["FACE"])
[geomObj_90] = geompy.SubShapeAll(hormigon_2, geompy.ShapeType["FACE"])

```

```

[geomObj_91] = geompy.SubShapeAll(hormigon_2, geompy.ShapeType["FACE"])
[geomObj_92] = geompy.SubShapeAll(hormigon_2, geompy.ShapeType["FACE"])
[geomObj_93] = geompy.SubShapeAll(hormigon_2, geompy.ShapeType["FACE"])
[geomObj_94] = geompy.SubShapeAll(hormigon_2, geompy.ShapeType["FACE"])
[geomObj_95,geomObj_96,geomObj_97,geomObj_98] = geompy.SubShapeAll(hormigon_2,
geompy.ShapeType["EDGE"])
Compound_6 = geompy.MakeVertexOnLinesIntersection(Line_17, hormigon_edge_3)
Compound_7 = geompy.MakeVertexOnLinesIntersection(Linea_contraboveda, hormigon_edge_3)
Compound_6_vertex_2 = geompy.GetSubShape(Compound_6, [2])
Line_24 = geompy.MakeLineTwoPnt(Compound_6_vertex_2, Vertex_12)
Compound_7_vertex_2 = geompy.GetSubShape(Compound_7, [2])
Line_25 = geompy.MakeLineTwoPnt(Vertex_13, Compound_7_vertex_2)
Line_24_vertex_2 = geompy.GetSubShape(Line_24, [2])
Arc_11 = geompy.MakeArcCenter(Vertex_5, Compound_7_vertex_2, Line_24_vertex_2,False)
suelo_3 = geompy.MakeFaceWires([Line_19, Line_24, Line_25, Arc_11], 1)
[geomObj_99] = geompy.SubShapeAll(suelo_3, geompy.ShapeType["FACE"])
[geomObj_100] = geompy.SubShapeAll(suelo_3, geompy.ShapeType["FACE"])
[geomObj_101] = geompy.SubShapeAll(suelo_3, geompy.ShapeType["FACE"])
[geomObj_102] = geompy.SubShapeAll(suelo_3, geompy.ShapeType["FACE"])
[geomObj_103] = geompy.SubShapeAll(suelo_3, geompy.ShapeType["FACE"])
[geomObj_104] = geompy.SubShapeAll(suelo_3, geompy.ShapeType["FACE"])
Line_19_vertex_3 = geompy.GetSubShape(Line_19, [3])
Line_26 = geompy.MakeLineTwoPnt(Line_19_vertex_3, Compound_4_vertex_2)
Linea_contraboveda_vertex_3 = geompy.GetSubShape(Linea_contraboveda, [3])
Line_27 = geompy.MakeLineTwoPnt(Vertex_13, Linea_contraboveda_vertex_3)
geomObj_105 = geompy.GetSubShape(Line_27, [3])
Line_27_vertex_3 = geompy.GetSubShape(Line_27, [3])
Arc_12 = geompy.MakeArcCenter(Vertex_5, Line_27_vertex_3, Compound_4_vertex_2,False)
Face_7 = geompy.MakeFaceWires([Line_19, Line_26, Line_27, Arc_12], 1)
hormigon_3 = geompy.MakeCutList(Face_7, [suelo_3], True)
[geomObj_106] = geompy.SubShapeAll(hormigon_3, geompy.ShapeType["FACE"])
[geomObj_107] = geompy.SubShapeAll(hormigon_3, geompy.ShapeType["FACE"])
[geomObj_108,geomObj_109,geomObj_110,geomObj_111] = geompy.SubShapeAll(hormigon_3,
geompy.ShapeType["EDGE"])
[geomObj_112,geomObj_113,geomObj_114,geomObj_115] = geompy.SubShapeAll(hormigon_3,
geompy.ShapeType["EDGE"])
[geomObj_116] = geompy.SubShapeAll(hormigon_3, geompy.ShapeType["FACE"])
[geomObj_117] = geompy.SubShapeAll(hormigon_3, geompy.ShapeType["FACE"])
[geomObj_118] = geompy.SubShapeAll(hormigon_3, geompy.ShapeType["FACE"])
[geomObj_119] = geompy.SubShapeAll(hormigon_3, geompy.ShapeType["FACE"])
[geomObj_120] = geompy.SubShapeAll(hormigon_3, geompy.ShapeType["FACE"])
[geomObj_121] = geompy.SubShapeAll(hormigon_3, geompy.ShapeType["FACE"])
[geomObj_122] = geompy.SubShapeAll(hormigon_3, geompy.ShapeType["FACE"])
[geomObj_123] = geompy.SubShapeAll(hormigon_3, geompy.ShapeType["FACE"])
[geomObj_124,geomObj_125,geomObj_126,geomObj_127] = geompy.SubShapeAll(hormigon_3,
geompy.ShapeType["EDGE"])
listSameIDs = geompy.GetSameIDs(geomObj_30, geomObj_16)
listSameIDs = geompy.GetSameIDs(Suelo_IN, geomObj_106)
listSameIDs = geompy.GetSameIDs(Suelo_IN, geomObj_99)
listSameIDs = geompy.GetSameIDs(Suelo_IN, geomObj_83)
listSameIDs = geompy.GetSameIDs(Suelo_IN, geomObj_78)
listSameIDs = geompy.GetSameIDs(Suelo_IN, geomObj_61)

```

```
listSameIDs = geompy.GetSameIDs(Suelo_IN, geomObj_17)
listSameIDs = geompy.GetSameIDs(Suelo_IN, geomObj_18)
listSameIDs = geompy.GetSameIDs(Suelo_IN, geomObj_31)
listSameIDs = geompy.GetSameIDs(Suelo_IN, geomObj_19)
listSameIDs = geompy.GetSameIDs(Suelo_IN, geomObj_107)
listSameIDs = geompy.GetSameIDs(Suelo_IN, geomObj_100)
listSameIDs = geompy.GetSameIDs(Suelo_IN, geomObj_84)
listSameIDs = geompy.GetSameIDs(Suelo_IN, geomObj_79)
listSameIDs = geompy.GetSameIDs(Suelo_IN, geomObj_62)
listSameIDs = geompy.GetSameIDs(Suelo_IN, geomObj_51)
listSameIDs = geompy.GetSameIDs(Suelo_IN, geomObj_52)
listSameIDs = geompy.GetSameIDs(Suelo_IN, geomObj_32)
listSameIDs = geompy.GetSameIDs(Suelo_IN, geomObj_33)
listSameIDs = geompy.GetSameIDs(Suelo_IN, geomObj_34)
listSameIDs = geompy.GetSameIDs(Suelo_IN, geomObj_35)
listSameIDs = geompy.GetSameIDs(Suelo_IN, geomObj_36)
listSameIDs = geompy.GetSameIDs(Suelo_IN, geomObj_37)
listSameIDs = geompy.GetSameIDs(Suelo_IN, geomObj_38)
listSameIDs = geompy.GetSameIDs(Suelo_IN, geomObj_39)
listSameIDs = geompy.GetSameIDs(Suelo_IN, geomObj_63)
listSameIDs = geompy.GetSameIDs(Suelo_IN, geomObj_64)
listSameIDs = geompy.GetSameIDs(Suelo_IN, geomObj_65)
listSameIDs = geompy.GetSameIDs(Suelo_IN, geomObj_66)
listSameIDs = geompy.GetSameIDs(Suelo_IN, geomObj_85)
listSameIDs = geompy.GetSameIDs(Suelo_IN, geomObj_86)
listSameIDs = geompy.GetSameIDs(Suelo_IN, geomObj_87)
listSameIDs = geompy.GetSameIDs(Suelo_IN, geomObj_88)
listSameIDs = geompy.GetSameIDs(Suelo_IN, geomObj_108)
listSameIDs = geompy.GetSameIDs(Suelo_IN, geomObj_109)
listSameIDs = geompy.GetSameIDs(Suelo_IN, geomObj_110)
listSameIDs = geompy.GetSameIDs(Suelo_IN, geomObj_111)
listSameIDs = geompy.GetSameIDs(Suelo_IN, geomObj_112)
listSameIDs = geompy.GetSameIDs(Suelo_IN, geomObj_113)
listSameIDs = geompy.GetSameIDs(Suelo_IN, geomObj_114)
listSameIDs = geompy.GetSameIDs(Suelo_IN, geomObj_115)
O_5 = geompy.MakeVertex(0, 0, 0)
OX_5 = geompy.MakeVectorDXDYDZ(1, 0, 0)
OY_5 = geompy.MakeVectorDXDYDZ(0, 1, 0)
OZ_5 = geompy.MakeVectorDXDYDZ(0, 0, 1)
listSameIDs = geompy.GetSameIDs(Suelo_IN, geomObj_40)
listSameIDs = geompy.GetSameIDs(Suelo_IN, geomObj_41)
listSameIDs = geompy.GetSameIDs(Suelo_IN, geomObj_53)
listSameIDs = geompy.GetSameIDs(Suelo_IN, geomObj_54)
listSameIDs = geompy.GetSameIDs(Suelo_IN, geomObj_67)
listSameIDs = geompy.GetSameIDs(Suelo_IN, geomObj_68)
listSameIDs = geompy.GetSameIDs(Suelo_IN, geomObj_80)
listSameIDs = geompy.GetSameIDs(Suelo_IN, geomObj_81)
listSameIDs = geompy.GetSameIDs(Suelo_IN, geomObj_89)
listSameIDs = geompy.GetSameIDs(Suelo_IN, geomObj_90)
listSameIDs = geompy.GetSameIDs(Suelo_IN, geomObj_101)
listSameIDs = geompy.GetSameIDs(Suelo_IN, geomObj_102)
listSameIDs = geompy.GetSameIDs(Suelo_IN, geomObj_116)
```

```
listSameIDs = geompy.GetSameIDs(Suelo_IN, geomObj_117)
listSameIDs = geompy.GetSameIDs(Suelo_IN, geomObj_20)
listSameIDs = geompy.GetSameIDs(Suelo_IN, geomObj_82)
listSameIDs = geompy.GetSameIDs(Suelo_IN, geomObj_103)
listSameIDs = geompy.GetSameIDs(Suelo_IN, geomObj_104)
Vertex_18 = geompy.MakeVertex(50, 0, 43.6)
Circle_1 = geompy.MakeCircle(Vertex_5, OY, 11.4)
suelo_2_3 = geompy.MakeFaceWires([Line_22, Line_23, Arc_10, Line_24, Line_25, Arc_11], 1)
[geomObj_128] = geompy.SubShapeAll(suelo_2_3, geompy.ShapeType["FACE"])
[geomObj_129] = geompy.SubShapeAll(suelo_2_3, geompy.ShapeType["FACE"])
[geomObj_130] = geompy.SubShapeAll(suelo_2_3, geompy.ShapeType["FACE"])
[geomObj_131] = geompy.SubShapeAll(suelo_2_3, geompy.ShapeType["FACE"])
[geomObj_132,geomObj_133,geomObj_134,geomObj_135,geomObj_136,geomObj_137] =
geompy.SubShapeAll(suelo_2_3, geompy.ShapeType["EDGE"])
listSameIDs = geompy.GetSameIDs(Compound_8, geomObj_55)
listSameIDs = geompy.GetSameIDs(Compound_8, geomObj_21)
listSameIDs = geompy.GetSameIDs(Compound_8, geomObj_128)
listSameIDs = geompy.GetSameIDs(Compound_8, geomObj_42)
listSameIDs = geompy.GetSameIDs(Compound_8, geomObj_69)
listSameIDs = geompy.GetSameIDs(Compound_8, geomObj_91)
listSameIDs = geompy.GetSameIDs(Compound_8, geomObj_118)
listSameIDs = geompy.GetSameIDs(Compound_8, geomObj_119)
listSameIDs = geompy.GetSameIDs(Compound_8, geomObj_43)
listSameIDs = geompy.GetSameIDs(Compound_8, geomObj_56)
listSameIDs = geompy.GetSameIDs(Compound_8, geomObj_57)
listSameIDs = geompy.GetSameIDs(Compound_8, geomObj_70)
listSameIDs = geompy.GetSameIDs(Compound_8, geomObj_71)
listSameIDs = geompy.GetSameIDs(Compound_8, geomObj_129)
listSameIDs = geompy.GetSameIDs(Compound_8, geomObj_130)
listSameIDs = geompy.GetSameIDs(Compound_8, geomObj_92)
listSameIDs = geompy.GetSameIDs(Compound_8, geomObj_93)
listSameIDs = geompy.GetSameIDs(Compound_8, geomObj_120)
listSameIDs = geompy.GetSameIDs(Compound_8, geomObj_121)
listSameIDs = geompy.GetSameIDs(Compound_8, geomObj_22)
listSameIDs = geompy.GetSameIDs(Compound_8, geomObj_23)
listSameIDs = geompy.GetSameIDs(Compound_8, geomObj_44)
listSameIDs = geompy.GetSameIDs(Compound_8, geomObj_45)
listSameIDs = geompy.GetSameIDs(Compound_8, geomObj_25)
listSameIDs = geompy.GetSameIDs(Compound_8, geomObj_26)
listSameIDs = geompy.GetSameIDs(Compound_8, geomObj_27)
listSameIDs = geompy.GetSameIDs(Compound_8, geomObj_28)
listSameIDs = geompy.GetSameIDs(Compound_8, geomObj_29)
listSameIDs = geompy.GetSameIDs(Compound_8, geomObj_47)
listSameIDs = geompy.GetSameIDs(Compound_8, geomObj_48)
listSameIDs = geompy.GetSameIDs(Compound_8, geomObj_49)
listSameIDs = geompy.GetSameIDs(Compound_8, geomObj_50)
listSameIDs = geompy.GetSameIDs(Compound_8, geomObj_59)
listSameIDs = geompy.GetSameIDs(Compound_8, geomObj_60)
listSameIDs = geompy.GetSameIDs(Compound_8, geomObj_132)
listSameIDs = geompy.GetSameIDs(Compound_8, geomObj_133)
listSameIDs = geompy.GetSameIDs(Compound_8, geomObj_134)
listSameIDs = geompy.GetSameIDs(Compound_8, geomObj_135)
```

```
listSameIDs = geompy.GetSameIDs(Compound_8, geomObj_136)
listSameIDs = geompy.GetSameIDs(Compound_8, geomObj_137)
listSameIDs = geompy.GetSameIDs(Compound_8, geomObj_74)
listSameIDs = geompy.GetSameIDs(Compound_8, geomObj_75)
listSameIDs = geompy.GetSameIDs(Compound_8, geomObj_76)
listSameIDs = geompy.GetSameIDs(Compound_8, geomObj_77)
listSameIDs = geompy.GetSameIDs(Compound_8, geomObj_95)
listSameIDs = geompy.GetSameIDs(Compound_8, geomObj_96)
listSameIDs = geompy.GetSameIDs(Compound_8, geomObj_97)
listSameIDs = geompy.GetSameIDs(Compound_8, geomObj_98)
listSameIDs = geompy.GetSameIDs(Compound_8, geomObj_124)
listSameIDs = geompy.GetSameIDs(Compound_8, geomObj_125)
listSameIDs = geompy.GetSameIDs(Compound_8, geomObj_126)
listSameIDs = geompy.GetSameIDs(Compound_8, geomObj_127)
geompy.addToStudy( O, 'O' )
geompy.addToStudy( OX, 'OX' )
geompy.addToStudy( OY, 'OY' )
geompy.addToStudy( OZ, 'OZ' )
geompy.addToStudy( Vertex_1, 'Vertex_1' )
geompy.addToStudy( Vertex_2, 'Vertex_2' )
geompy.addToStudy( Line_1, 'Line_1' )
geompy.addToStudy( Suelo_interno, 'Suelo_interno' )
geompy.addToStudy( Vertex_3, 'Vertex_3' )
geompy.addToStudy( Vertex_4, 'Vertex_4' )
geompy.addToStudy( Line_2, 'Line_2' )
geompy.addToStudy( Suelo_externo, 'Suelo_externo' )
geompy.addToStudy( Vertex_5, 'Vertex_5' )
geompy.addToStudy( Tunel, 'Tunel' )
geompy.addToStudy( Vertex_6, 'Vertex_6' )
geompy.addToStudy( O_1, 'O' )
geompy.addToStudy( OX_1, 'OX' )
geompy.addToStudy( OY_1, 'OY' )
geompy.addToStudy( OZ_1, 'OZ' )
geompy.addToStudy( O_2, 'O' )
geompy.addToStudy( OX_2, 'OX' )
geompy.addToStudy( OY_2, 'OY' )
geompy.addToStudy( OZ_2, 'OZ' )
geompy.addToStudy( O_3, 'O' )
geompy.addToStudy( OX_3, 'OX' )
geompy.addToStudy( OY_3, 'OY' )
geompy.addToStudy( OZ_3, 'OZ' )
geompy.addToStudy( O_4, 'O' )
geompy.addToStudy( OX_4, 'OX' )
geompy.addToStudy( OY_4, 'OY' )
geompy.addToStudy( OZ_4, 'OZ' )
geompy.addToStudy( Line_14, 'Line_14' )
geompy.addToStudy( Vertex_7, 'Vertex_7' )
geompy.addToStudy( Vertex_9, 'Vertex_9' )
geompy.addToStudy( Line_13, 'Line_13' )
geompy.addToStudy( Vertex_8, 'Vertex_8' )
geompy.addToStudy( Vertex_10, 'Vertex_10' )
geompy.addToStudy( Vertex_11, 'Vertex_11' )
```

```
geompy.addToStudy( Line_15, 'Line_15' )
geompy.addToStudy( hormigon, 'hormigon' )
geompy.addToStudyInFather( Tunel, Tunel_edge_3, 'Tunel:edge_3' )
geompy.addToStudy( Compound_2, 'Compound_2' )
geompy.addToStudyInFather( Compound_2, Compound_2_vertex_3, 'Compound_2:vertex_3' )
geompy.addToStudyInFather( Compound_2, Compound_2_vertex_2, 'Compound_2:vertex_2' )
geompy.addToStudy( Linea_contraboveda, 'Linea_contraboveda' )
geompy.addToStudy( centro_1_contravob, 'centro_1_contravob' )
geompy.addToStudy( Arc_5, 'Arc_5' )
geompy.addToStudy( contraboveda, 'contraboveda' )
geompy.addToStudyInFather( hormigon, hormigon_edge_3, 'hormigon:edge_3' )
geompy.addToStudy( Compound_3, 'Compound_3' )
geompy.addToStudyInFather( Compound_3, Compound_3_vertex_3, 'Compound_3:vertex_3' )
geompy.addToStudyInFather( Compound_3, Compound_3_vertex_2, 'Compound_3:vertex_2' )
geompy.addToStudy( Arc_6, 'Arc_6' )
geompy.addToStudyInFather( Arc_6, Arc_6_vertex_2, 'Arc_6:vertex_2' )
geompy.addToStudyInFather( Arc_6, Arc_6_vertex_3, 'Arc_6:vertex_3' )
geompy.addToStudy( Line_16, 'Line_16' )
geompy.addToStudy( Suelo_4, 'Suelo_4' )
geompy.addToStudy( hormigon_4, 'hormigon_4' )
geompy.addToStudy( Compound_4, 'Compound_4' )
geompy.addToStudyInFather( Compound_4, Compound_4_vertex_2, 'Compound_4:vertex_2' )
geompy.addToStudyInFather( Compound_4, Compound_4_vertex_3, 'Compound_4:vertex_3' )
geompy.addToStudy( Arc_7, 'Arc_7' )
geompy.addToStudyInFather( Arc_7, Arc_7_vertex_3, 'Arc_7:vertex_3' )
geompy.addToStudyInFather( Arc_7, Arc_7_vertex_2, 'Arc_7:vertex_2' )
geompy.addToStudy( Line_17, 'Line_17' )
geompy.addToStudy( avance, 'avance' )
geompy.addToStudyInFather( avance, Face_5_edge_6, 'Face_5:edge_6' )
geompy.addToStudy( Compound_5, 'Compound_5' )
geompy.addToStudyInFather( Compound_5, Compound_5_vertex_3, 'Compound_5:vertex_3' )
geompy.addToStudyInFather( Compound_5, Compound_5_vertex_2, 'Compound_5:vertex_2' )
geompy.addToStudy( Arc_8, 'Arc_8' )
geompy.addToStudy( Line_18, 'Line_18' )
geompy.addToStudy( suelo_1, 'suelo_1' )
geompy.addToStudy( hormigon_1, 'hormigon_1' )
geompy.addToStudy( Line_19, 'Line_19' )
geompy.addToStudy( Vertex_12, 'Vertex_12' )
geompy.addToStudy( Vertex_13, 'Vertex_13' )
geompy.addToStudy( Line_20, 'Line_20' )
geompy.addToStudyInFather( Linea_contraboveda, Linea_contraboveda_vertex_2,
'Linea_contraboveda:vertex_2' )
geompy.addToStudy( Line_21, 'Line_21' )
geompy.addToStudyInFather( Line_21, Line_21_vertex_3, 'Line_21:vertex_3' )
geompy.addToStudy( Arc_9, 'Arc_9' )
geompy.addToStudy( Face_5, 'Face_5' )
geompy.addToStudy( Vertex_14, 'Vertex_14' )
geompy.addToStudyInFather( Face_5, Face_5_edge_10, 'Face_5:edge_10' )
geompy.addToStudy( Vertex_15, 'Vertex_15' )
geompy.addToStudy( Line_22, 'Line_22' )
geompy.addToStudyInFather( Face_5, Face_5_vertex_5, 'Face_5:vertex_5' )
geompy.addToStudy( Line_23, 'Line_23' )
```


geompy.PutToFolder(Line_18, Auxiliares)
geompy.PutToFolder(Vertex_12, Auxiliares)
geompy.PutToFolder(Line_19, Auxiliares)
geompy.PutToFolder(Line_20, Auxiliares)
geompy.PutToFolder(Line_21, Auxiliares)
geompy.PutToFolder(Arc_9, Auxiliares)
geompy.PutToFolder(Vertex_14, Auxiliares)
geompy.PutToFolder(Vertex_15, Auxiliares)
geompy.PutToFolder(Line_22, Auxiliares)
geompy.PutToFolder(Line_23, Auxiliares)
geompy.PutToFolder(Arc_10, Auxiliares)
geompy.PutToFolder(Line_24, Auxiliares)
geompy.PutToFolder(Line_25, Auxiliares)
geompy.PutToFolder(Arc_11, Auxiliares)
geompy.PutToFolder(Line_26, Auxiliares)
geompy.PutToFolder(Line_27, Auxiliares)
geompy.PutToFolder(Arc_12, Auxiliares)
geompy.PutToFolder(Vertex_13, Auxiliares)
geompy.PutToFolder(Compound_7, Auxiliares)
geompy.PutToFolder(Face_7, Auxiliares)
geompy.PutToFolder(Compound_6, Auxiliares)
geompy.PutToFolder(Compound_5, Auxiliares)
geompy.PutToFolder(Face_5, Auxiliares)
geompy.PutToFolder(avance, Auxiliares)
geompy.PutToFolder(Compound_4, Auxiliares)
geompy.PutToFolder(Compound_3, Auxiliares)
geompy.PutToFolder(Compound_2, Auxiliares)
geompy.PutToFolder(contraboveda, Auxiliares)
geompy.PutToFolder(geompy.PutToFolder(geompy.PutToFolder(geompy.PutToFolder(geompy.Put
ToFolder(Suelo_interno, Auxiliares)
geompy.PutToFolder(Suelo_externo, Auxiliares)
geompy.PutToFolder(Vertex_18, Auxiliares)
geompy.PutToFolder(Circle_1, Auxiliares)
geompy.PutToFolder(geompy.PutToFolder(geompy.PutToFolder(suelo_2, Auxiliares)
geompy.PutToFolder(suelo_3, Auxiliares)
geompy.PutToFolder(geompy.PutToFolder(geompy.PutToFolder(O_5, Auxiliares)
geompy.PutToFolder(OX_5, Auxiliares)
geompy.PutToFolder(OY_5, Auxiliares)
geompy.PutToFolder(OZ_5, Auxiliares)
geompy.PutToFolder(OX_4, Auxiliares)
geompy.PutToFolder(OY_4, Auxiliares)
geompy.PutToFolder(OZ_4, Auxiliares)
geompy.PutToFolder(OZ_1, Auxiliares)
geompy.PutToFolder(O_2, Auxiliares)
geompy.PutToFolder(OX_2, Auxiliares)
geompy.PutToFolder(OY_2, Auxiliares)
geompy.PutToFolder(OZ_2, Auxiliares)
geompy.PutToFolder(O_3, Auxiliares)
geompy.PutToFolder(OX_3, Auxiliares)
geompy.PutToFolder(OY_3, Auxiliares)
geompy.PutToFolder(OZ_3, Auxiliares)
geompy.PutToFolder(O_4, Auxiliares)

```

geompy.PutToFolder(O_1, Auxiliares)
geompy.PutToFolder(OX_1, Auxiliares)
geompy.PutToFolder(OY_1, Auxiliares)
geompy.PutToFolder(Line_1, Auxiliares)
geompy.PutToFolder(Vertex_3, Auxiliares)
geompy.PutToFolder(Vertex_4, Auxiliares)
geompy.PutToFolder(Line_2, Auxiliares)
geompy.PutToFolder(Vertex_5, Auxiliares)
geompy.PutToFolder(Vertex_1, Auxiliares)
geompy.PutToFolder(Vertex_2, Auxiliares)

###
### SMESH component
###

import SMESH, SALOMEDS
from salome.smesh import smeshBuilder

from salome.StdMeshers import StdMeshersBuilder

smesh = smeshBuilder.New(theStudy)
aFilterManager = smesh.CreateFilterManager()
Length_From_Edges_1 = smesh.CreateHypothesis('LengthFromEdges')
Nb_Segments_1 = smesh.CreateHypothesis('NumberOfSegments')
Nb_Segments_1.SetNumberOfSegments( 20 )
Nb_Segments_1.SetDistrType( 0 )
Regular_1D = smesh.CreateHypothesis('Regular_1D')
MEFISTO_2D = smesh.CreateHypothesis('MEFISTO_2D')
Nb_Segments_2 = smesh.CreateHypothesis('NumberOfSegments')
Nb_Segments_2.SetNumberOfSegments( 50 )
Nb_Segments_2.SetDistrType( 0 )
Quadrangle_Parameters_1 = smesh.CreateHypothesis('QuadrangleParams')
Quadrangle_Parameters_1.SetQuadType( StdMeshersBuilder.QUAD_STANDARD )
Quadrangle_Parameters_1.SetTriaVertex( -1 )
Quadrangle_Parameters_1.SetEnforcedNodes( [], [] )
Quadrangle_2D = smesh.CreateHypothesis('Quadrangle_2D')
NETGEN_3D = smesh.CreateHypothesis('NETGEN_3D', 'NETGENEngine')
GHS3D_3D = smesh.CreateHypothesis('GHS3D_3D', 'GHS3DEngine')
NETGEN_3D_Parameters = smesh.CreateHypothesis('NETGEN_Parameters_3D',
'NETGENEngine')
NETGEN_3D_Parameters.SetMaxSize( 333.106 )
NETGEN_3D_Parameters.SetSecondOrder( 239 )
NETGEN_3D_Parameters.SetOptimize( 1 )
NETGEN_3D_Parameters.SetFineness( 2 )
NETGEN_3D_Parameters.SetMinSize( 4.01389 )
NETGEN_3D_Parameters.SetUseSurfaceCurvature( 0 )
NETGEN_3D_Parameters.SetQuadAllowed( 127 )
NETGEN_3D_Parameters.SetFuseEdges( 64 )
Prism_3D = smesh.CreateHypothesis('Prism_3D')
Max_Element_Volume_1 = smesh.CreateHypothesis('MaxElementVolume')
Max_Element_Volume_1.SetMaxElementVolume( 3.69604e+07 )
Regular_1D_1 = smesh.CreateHypothesis('Regular_1D')

```

```
MEFISTO_2D_1 = smesh.CreateHypothesis('MEFISTO_2D')
Prism_3D_1 = smesh.CreateHypothesis('Prism_3D')
Regular_1D_2 = smesh.CreateHypothesis('Regular_1D')
MEFISTO_2D_2 = smesh.CreateHypothesis('MEFISTO_2D')
aFreeNodes0x89158f0 = aFilterManager.CreateFreeNodes()
NETGEN_2D_ONLY = smesh.CreateHypothesis('NETGEN_2D_ONLY', 'NETGENEngine')
Length_From_Edges_2 = smesh.CreateHypothesis('LengthFromEdges')
Length_From_Edges_3 = smesh.CreateHypothesis('LengthFromEdges')
NETGEN_2D_Parameters = smesh.CreateHypothesis('NETGEN_Parameters_2D_ONLY',
'NETGENEngine')
NETGEN_2D_Parameters.SetMaxSize( 0.1 )
NETGEN_2D_Parameters.SetOptimize( 1 )
NETGEN_2D_Parameters.SetFineness( 2 )
NETGEN_2D_Parameters.SetMinSize( 0.02 )
NETGEN_2D_Parameters.SetUseSurfaceCurvature( 1 )
NETGEN_2D_Parameters.SetQuadAllowed( 0 )
NETGEN_2D_Parameters.SetSecondOrder( 75 )
NETGEN_2D_Parameters.SetFuseEdges( 0 )
NETGEN_2D_Parameters_1 = smesh.CreateHypothesis('NETGEN_Parameters_2D_ONLY',
'NETGENEngine')
Quadrangle_Parameters_1.SetQuadType( StdMeshersBuilder.QUAD_STANDARD )
Quadrangle_Parameters_1.SetTriaVertex( -1 )
Quadrangle_Parameters_1.SetEnforcedNodes( [], [] )
NETGEN_2D_Parameters_2 = smesh.CreateHypothesis('NETGEN_Parameters_2D_ONLY',
'NETGENEngine')
NETGEN_2D_Parameters_2.SetMaxSize( 1.5 )
NETGEN_2D_Parameters_2.SetOptimize( 1 )
NETGEN_2D_Parameters_2.SetFineness( 2 )
NETGEN_2D_Parameters_2.SetUseSurfaceCurvature( 1 )
NETGEN_2D_Parameters_2.SetQuadAllowed( 1 )
NETGEN_2D_Parameters_3 = smesh.CreateHypothesis('NETGEN_Parameters_2D_ONLY',
'NETGENEngine')
NETGEN_2D_Parameters_3.SetMaxSize( 10 )
NETGEN_2D_Parameters_3.SetOptimize( 1 )
NETGEN_2D_Parameters_3.SetFineness( 2 )
NETGEN_2D_Parameters_3.SetMinSize( 0.25 )
NETGEN_2D_Parameters_3.SetUseSurfaceCurvature( 1 )
NETGEN_2D_Parameters_3.SetQuadAllowed( 1 )
NETGEN_2D_Parameters_3.SetSecondOrder( 75 )
NETGEN_2D_Parameters_3.SetFuseEdges( 0 )
NETGEN_2D_Parameters_4 = smesh.CreateHypothesis('NETGEN_Parameters_2D_ONLY',
'NETGENEngine')
NETGEN_2D_Parameters_4.SetMaxSize( 10 )
NETGEN_2D_Parameters_4.SetOptimize( 1 )
NETGEN_2D_Parameters_4.SetFineness( 2 )
NETGEN_2D_Parameters_4.SetMinSize( 0.2 )
NETGEN_2D_Parameters_4.SetUseSurfaceCurvature( 1 )
NETGEN_2D_Parameters_4.SetQuadAllowed( 1 )
NETGEN_2D_Parameters_4.SetSecondOrder( 75 )
NETGEN_2D_Parameters_4.SetFuseEdges( 0 )
NETGEN_2D_Parameters.SetMinSize( 0.005 )
NETGEN_2D_Parameters.SetQuadAllowed( 1 )
```

```

NETGEN_2D_Parameters.SetSecondOrder( 75 )
NETGEN_2D_Parameters.SetFuseEdges( 0 )
NETGEN_2D_Parameters_2.SetMinSize( 0.02 )
NETGEN_2D_Parameters_2.SetSecondOrder( 75 )
NETGEN_2D_Parameters_2.SetFuseEdges( 0 )
Length_From_Edges_4 = smesh.CreateHypothesis('LengthFromEdges')
NETGEN_2D_Parameters_5 = smesh.CreateHypothesis('NETGEN_Parameters_2D',
'NETGENEngine')
NETGEN_2D_Parameters_5.SetMaxSize( 0.5 )
NETGEN_2D_Parameters_5.SetSecondOrder( 0 )
NETGEN_2D_Parameters_5.SetOptimize( 1 )
NETGEN_2D_Parameters_5.SetFineness( 2 )
NETGEN_2D_Parameters_5.SetMinSize( 0.02 )
NETGEN_2D_Parameters_5.SetUseSurfaceCurvature( 1 )
NETGEN_2D_Parameters_5.SetFuseEdges( 1 )
NETGEN_2D_Parameters_5.SetQuadAllowed( 1 )
NETGEN_2D = smesh.CreateHypothesis('NETGEN_2D', 'NETGENEngine')
NETGEN_2D_Parameters_1.SetMaxSize( 0.5 )
NETGEN_2D_Parameters_1.SetOptimize( 1 )
NETGEN_2D_Parameters_1.SetFineness( 2 )
NETGEN_2D_Parameters_1.SetMinSize( 0.02 )
NETGEN_2D_Parameters_1.SetUseSurfaceCurvature( 1 )
NETGEN_2D_Parameters_1.SetQuadAllowed( 0 )
NETGEN_2D_Parameters_1.SetSecondOrder( 239 )
NETGEN_2D_Parameters_1.SetFuseEdges( 0 )
NETGEN_2D_Parameters_2.SetMaxSize( 1.5 )
NETGEN_2D_Parameters_2.SetOptimize( 1 )
NETGEN_2D_Parameters_2.SetFineness( 2 )
NETGEN_2D_Parameters_2.SetMinSize( 0.02 )
NETGEN_2D_Parameters_2.SetUseSurfaceCurvature( 1 )
NETGEN_2D_Parameters_2.SetQuadAllowed( 1 )
NETGEN_2D_Parameters_2.SetSecondOrder( 239 )
NETGEN_2D_Parameters_2.SetFuseEdges( 0 )
Mesh_Pff = smesh.Mesh(smeshObj_1)
status = Mesh_Pff.AddHypothesis(NETGEN_2D_Parameters_2)
status = Mesh_Pff.AddHypothesis(NETGEN_2D_ONLY)
status = Mesh_Pff.AddHypothesis(Regular_1D_2)
status = Mesh_Pff.AddHypothesis(Nb_Segments_1)
status = Mesh_Pff.AddHypothesis(NETGEN_2D_ONLY,smeshObj_2)
status = Mesh_Pff.AddHypothesis(NETGEN_2D_Parameters_3,smeshObj_2)
[ Suelo ] = Mesh_Pff.GetMesh().GetSubMeshes()
status = Mesh_Pff.AddHypothesis(NETGEN_2D_ONLY,smeshObj_3)
status = Mesh_Pff.AddHypothesis(NETGEN_2D_Parameters,smeshObj_3)
[ Suelo, Suelo_int ] = Mesh_Pff.GetMesh().GetSubMeshes()
status = Mesh_Pff.RemoveHypothesis(NETGEN_2D_Parameters,smeshObj_3)
status = Mesh_Pff.AddHypothesis(Length_From_Edges_3,smeshObj_3)
status = Mesh_Pff.AddHypothesis(NETGEN_2D_ONLY,smeshObj_4)
status = Mesh_Pff.AddHypothesis(Length_From_Edges_1,smeshObj_4)
[ Suelo, Suelo_int, Corona ] = Mesh_Pff.GetMesh().GetSubMeshes()
status = Mesh_Pff.AddHypothesis(NETGEN_2D_ONLY,smeshObj_5)
status = Mesh_Pff.AddHypothesis(Length_From_Edges_1,smeshObj_5)
[ Suelo, Suelo_int, Corona, Revestimiento ] = Mesh_Pff.GetMesh().GetSubMeshes()

```

```
status = Mesh_Pff.AddHypothesis(NETGEN_2D_ONLY,smeshObj_6)
status = Mesh_Pff.AddHypothesis(Length_From_Edges_1,smeshObj_6)
isDone = Mesh_Pff.Compute()
[ Suelo, Suelo_int, Corona, Revestimiento, Tunel_1 ] = Mesh_Pff.GetMesh().GetSubMeshes()
suelo_4 = Mesh_Pff.GroupOnGeom(smeshObj_7,'suelo_4',SMESH.FACE)
suelo_23 = Mesh_Pff.GroupOnGeom(smeshObj_8,'suelo_23',SMESH.FACE)
suelo_1_1 = Mesh_Pff.GroupOnGeom(smeshObj_9,'suelo_1',SMESH.FACE)
Suelo_IN_1 = Mesh_Pff.GroupOnGeom(smeshObj_10,'Suelo_IN',SMESH.FACE)
hormigon_4_1 = Mesh_Pff.GroupOnGeom(smeshObj_11,'hormigon_4',SMESH.FACE)
hormigon_1_1 = Mesh_Pff.GroupOnGeom(smeshObj_12,'hormigon_1',SMESH.FACE)
hormigon_3_1 = Mesh_Pff.GroupOnGeom(smeshObj_13,'hormigon_3',SMESH.FACE)
hormigon_2_1 = Mesh_Pff.GroupOnGeom(smeshObj_14,'hormigon_2',SMESH.FACE)
bulonado = Mesh_Pff.GroupOnGeom(smeshObj_15,'bulonado',SMESH.FACE)
Excavacion = Mesh_Pff.GroupOnGeom(smeshObj_16,'Excavacion',SMESH.FACE)
Avance = Mesh_Pff.GroupOnGeom(smeshObj_17,'Avance',SMESH.FACE)
Destroza = Mesh_Pff.GroupOnGeom(smeshObj_18,'Destroza',SMESH.FACE)
Cboveda = Mesh_Pff.GroupOnGeom(smeshObj_19,'Cboveda',SMESH.FACE)
Apoyo_x = Mesh_Pff.GroupOnGeom(smeshObj_20,'Apoyo_x',SMESH.NODE)
Apoyo_y = Mesh_Pff.GroupOnGeom(smeshObj_21,'Apoyo_y',SMESH.NODE)
suelo_4_1 = Mesh_Pff.GroupOnGeom(smeshObj_7,'suelo_4',SMESH.NODE)
suelo_23_1 = Mesh_Pff.GroupOnGeom(smeshObj_8,'suelo_23',SMESH.NODE)
suelo_1_2 = Mesh_Pff.GroupOnGeom(smeshObj_9,'suelo_1',SMESH.NODE)
Suelo_IN_2 = Mesh_Pff.GroupOnGeom(smeshObj_10,'Suelo_IN',SMESH.NODE)
hormigon_4_2 = Mesh_Pff.GroupOnGeom(smeshObj_11,'hormigon_4',SMESH.NODE)
hormigon_1_2 = Mesh_Pff.GroupOnGeom(smeshObj_12,'hormigon_1',SMESH.NODE)
hormigon_3_2 = Mesh_Pff.GroupOnGeom(smeshObj_13,'hormigon_3',SMESH.NODE)
hormigon_2_2 = Mesh_Pff.GroupOnGeom(smeshObj_14,'hormigon_2',SMESH.NODE)
bulonado_1 = Mesh_Pff.GroupOnGeom(smeshObj_15,'bulonado',SMESH.NODE)
Excavacion_1 = Mesh_Pff.GroupOnGeom(smeshObj_16,'Excavacion',SMESH.NODE)
Avance_1 = Mesh_Pff.GroupOnGeom(smeshObj_17,'Avance',SMESH.NODE)
Destroza_1 = Mesh_Pff.GroupOnGeom(smeshObj_18,'Destroza',SMESH.NODE)
Cboveda_1 = Mesh_Pff.GroupOnGeom(smeshObj_19,'Cboveda',SMESH.NODE)
Apoyo_x.SetColor( SALOMEDS.Color( 1, 0.666667, 0 ))
Apoyo_y.SetColor( SALOMEDS.Color( 1, 0.666667, 0 ))
suelo_4_1.SetColor( SALOMEDS.Color( 1, 0.666667, 0 ))
suelo_23_1.SetColor( SALOMEDS.Color( 1, 0.666667, 0 ))
suelo_1_2.SetColor( SALOMEDS.Color( 1, 0.666667, 0 ))
Suelo_IN_2.SetColor( SALOMEDS.Color( 1, 0.666667, 0 ))
hormigon_4_2.SetColor( SALOMEDS.Color( 1, 0.666667, 0 ))
hormigon_1_2.SetColor( SALOMEDS.Color( 1, 0.666667, 0 ))
hormigon_3_2.SetColor( SALOMEDS.Color( 1, 0.666667, 0 ))
hormigon_2_2.SetColor( SALOMEDS.Color( 1, 0.666667, 0 ))
bulonado_1.SetColor( SALOMEDS.Color( 1, 0.666667, 0 ))
Excavacion_1.SetColor( SALOMEDS.Color( 1, 0.666667, 0 ))
Avance_1.SetColor( SALOMEDS.Color( 1, 0.666667, 0 ))
Destroza_1.SetColor( SALOMEDS.Color( 1, 0.666667, 0 ))
suelo_4.SetColor( SALOMEDS.Color( 1, 0.666667, 0 ))
suelo_23.SetColor( SALOMEDS.Color( 1, 0.666667, 0 ))
suelo_1_1.SetColor( SALOMEDS.Color( 1, 0.666667, 0 ))
Suelo_IN_1.SetColor( SALOMEDS.Color( 1, 0.666667, 0 ))
hormigon_4_1.SetColor( SALOMEDS.Color( 1, 0.666667, 0 ))
hormigon_1_1.SetColor( SALOMEDS.Color( 1, 0.666667, 0 ))
```

```

hormigon_3_1.SetColor( SALOMEDS.Color( 1, 0.666667, 0 ))
hormigon_2_1.SetColor( SALOMEDS.Color( 1, 0.666667, 0 ))
bulonado.SetColor( SALOMEDS.Color( 1, 0.666667, 0 ))
Excavacion.SetColor( SALOMEDS.Color( 1, 0.666667, 0 ))
Avance.SetColor( SALOMEDS.Color( 1, 0.666667, 0 ))
Destroza.SetColor( SALOMEDS.Color( 1, 0.666667, 0 ))
Cboveda.SetColor( SALOMEDS.Color( 1, 0.666667, 0 ))
Mesh_Pff.SetAutoColor( 1 )
[ suelo_4, suelo_23, suelo_1_1, Suelo_IN_1, smeshObj_22, hormigon_4_1, hormigon_1_1,
hormigon_3_1, hormigon_2_1, bulonado, Excavacion, Avance, Destroza, Cboveda, Apoyo_x,
Apoyo_y, suelo_4_1, suelo_23_1, suelo_1_2, Suelo_IN_2, smeshObj_23, hormigon_4_2,
hormigon_1_2, hormigon_3_2, hormigon_2_2, bulonado_1, Excavacion_1, Avance_1, Destroza_1,
Cboveda_1 ] = Mesh_Pff.GetGroups()
suelo_4.SetColor( SALOMEDS.Color( 1, 0, 0 ))
suelo_23.SetColor( SALOMEDS.Color( 1, 1, 0 ))
suelo_1_1.SetColor( SALOMEDS.Color( 0, 1, 0 ))
Suelo_IN_1.SetColor( SALOMEDS.Color( 0, 1, 1 ))
hormigon_4_1.SetColor( SALOMEDS.Color( 1, 0, 1 ))
hormigon_1_1.SetColor( SALOMEDS.Color( 0.8, 0, 0 ))
hormigon_3_1.SetColor( SALOMEDS.Color( 0.8, 0.8, 0 ))
hormigon_2_1.SetColor( SALOMEDS.Color( 0, 0.8, 0 ))
bulonado.SetColor( SALOMEDS.Color( 0, 0.8, 0.8 ))
Excavacion.SetColor( SALOMEDS.Color( 0, 0, 0.8 ))
Avance.SetColor( SALOMEDS.Color( 0.8, 0, 0.8 ))
Destroza.SetColor( SALOMEDS.Color( 0.6, 0, 0 ))
Cboveda.SetColor( SALOMEDS.Color( 0.6, 0.6, 0 ))
Apoyo_x.SetColor( SALOMEDS.Color( 0, 0.6, 0 ))
Apoyo_y.SetColor( SALOMEDS.Color( 0, 0.6, 0.6 ))
suelo_4_1.SetColor( SALOMEDS.Color( 0, 0, 0.6 ))
suelo_23_1.SetColor( SALOMEDS.Color( 0.6, 0, 0.6 ))
suelo_1_2.SetColor( SALOMEDS.Color( 0.4, 0, 0 ))
Suelo_IN_2.SetColor( SALOMEDS.Color( 0.4, 0.4, 0 ))
hormigon_4_2.SetColor( SALOMEDS.Color( 0, 0.4, 0.4 ))
hormigon_1_2.SetColor( SALOMEDS.Color( 0, 0, 0.4 ))
hormigon_3_2.SetColor( SALOMEDS.Color( 0.4, 0, 0.4 ))
hormigon_2_2.SetColor( SALOMEDS.Color( 1, 0.498039, 0.498039 ))
bulonado_1.SetColor( SALOMEDS.Color( 1, 1, 0.498039 ))
Excavacion_1.SetColor( SALOMEDS.Color( 0.498039, 1, 0.498039 ))
Avance_1.SetColor( SALOMEDS.Color( 0.498039, 1, 1 ))
Destroza_1.SetColor( SALOMEDS.Color( 0.498039, 0.498039, 1 ))
Cboveda_1.SetColor( SALOMEDS.Color( 1, 0.498039, 1 ))
smesh.SetName(Mesh_Pff, 'Malla_1406')
Mesh_Pff.ExportMED( r'/home/jesus/salome/Trabajos/Marta_Romero/Malla_1406.med', 0,
SMESH.MED_V2_2, 1, None ,1)
smesh.SetName(Mesh_Pff, 'Malla_1406')
Mesh_Pff.ExportMED( r'/home/marta/salome/appli_V7_4_0/Mesh_PF.med', 0,
SMESH.MED_V2_2, 1, None ,1)
Suelo_R = Mesh_Pff.GroupOnGeom(smeshObj_24,'Suelo_R',SMESH.FACE)
Suelo_R_1 = Mesh_Pff.GroupOnGeom(smeshObj_24,'Suelo_R',SMESH.NODE)
Suelo_R_1.SetColor( SALOMEDS.Color( 1, 0.666667, 0 ))
smesh.SetName(Mesh_Pff, 'Malla_1406')
Mesh_Pff.ExportMED( r'/home/marta/salome/appli_V7_4_0/Mesh_PF.med', 0,

```

```

SMESH.MED_V2_2, 1, None ,1)
Suelo_R.SetColor( SALOMEDS.Color( 1, 0.666667, 0 ))
smesh.SetName(Mesh_PFf, 'Malla_1406')
Mesh_PFf.ExportMED( r'/home/marta/salome/appli_V7_4_0/Mesh_PFf.med', 0,
SMESH.MED_V2_2, 1, None ,1)
[ Suelo_R_1, Apoyo_x, Apoyo_y, suelo_4_1, suelo_23_1, suelo_1_2, Suelo_IN_2, hormigon_4_2,
hormigon_1_2, hormigon_3_2, hormigon_2_2, bulonado_1, Excavacion_1, Avance_1, Destroza_1,
Cboveda_1, Suelo_R, suelo_4, suelo_23, suelo_1_1, Suelo_IN_1, hormigon_4_1, hormigon_1_1,
hormigon_3_1, hormigon_2_1, bulonado, Excavacion, Avance, Destroza, Cboveda ] =
Mesh_PFf.GetGroups()
[ Suelo, Suelo_int, Corona, Revestimiento, Tunel_1 ] = Mesh_PFf.GetMesh().GetSubMeshes()
[ Suelo_R_1, Apoyo_x, Apoyo_y, suelo_4_1, suelo_23_1, suelo_1_2, Suelo_IN_2, hormigon_4_2,
hormigon_1_2, hormigon_3_2, hormigon_2_2, bulonado_1, Excavacion_1, Avance_1, Destroza_1,
Cboveda_1, Suelo_R, suelo_4, suelo_23, suelo_1_1, Suelo_IN_1, hormigon_4_1, hormigon_1_1,
hormigon_3_1, hormigon_2_1, bulonado, Excavacion, Avance, Destroza, Cboveda ] =
Mesh_PFf.GetGroups()
[ Suelo, Suelo_int, Corona, Revestimiento, Tunel_1 ] = Mesh_PFf.GetMesh().GetSubMeshes()
Suelo = Mesh_PFf.GetSubMesh( smeshObj_2, 'Suelo' )
Suelo_int = Mesh_PFf.GetSubMesh( smeshObj_3, 'Suelo_int' )
Corona = Mesh_PFf.GetSubMesh( smeshObj_4, 'SubMesh_6' )
Revestimiento = Mesh_PFf.GetSubMesh( smeshObj_5, 'Revestimiento' )
Tunel_1 = Mesh_PFf.GetSubMesh( smeshObj_6, 'Tunel' )

## some objects were removed
aStudyBuilder = theStudy.NewBuilder()
SO = theStudy.FindObjectIOR(theStudy.ConvertObjectToIOR(smeshObj_2))
if SO: aStudyBuilder.RemoveObjectWithChildren(SO)
SO = theStudy.FindObjectIOR(theStudy.ConvertObjectToIOR(smeshObj_1))
if SO: aStudyBuilder.RemoveObjectWithChildren(SO)
SO = theStudy.FindObjectIOR(theStudy.ConvertObjectToIOR(smeshObj_23))
if SO: aStudyBuilder.RemoveObjectWithChildren(SO)
SO = theStudy.FindObjectIOR(theStudy.ConvertObjectToIOR(smeshObj_21))
if SO: aStudyBuilder.RemoveObjectWithChildren(SO)
SO = theStudy.FindObjectIOR(theStudy.ConvertObjectToIOR(smeshObj_20))
if SO: aStudyBuilder.RemoveObjectWithChildren(SO)
SO = theStudy.FindObjectIOR(theStudy.ConvertObjectToIOR(smeshObj_8))
if SO: aStudyBuilder.RemoveObjectWithChildren(SO)
SO = theStudy.FindObjectIOR(theStudy.ConvertObjectToIOR(smeshObj_7))
if SO: aStudyBuilder.RemoveObjectWithChildren(SO)
SO = theStudy.FindObjectIOR(theStudy.ConvertObjectToIOR(smeshObj_14))
if SO: aStudyBuilder.RemoveObjectWithChildren(SO)
SO = theStudy.FindObjectIOR(theStudy.ConvertObjectToIOR(smeshObj_15))
if SO: aStudyBuilder.RemoveObjectWithChildren(SO)
SO = theStudy.FindObjectIOR(theStudy.ConvertObjectToIOR(smeshObj_16))
if SO: aStudyBuilder.RemoveObjectWithChildren(SO)
SO = theStudy.FindObjectIOR(theStudy.ConvertObjectToIOR(smeshObj_17))
if SO: aStudyBuilder.RemoveObjectWithChildren(SO)
SO = theStudy.FindObjectIOR(theStudy.ConvertObjectToIOR(smeshObj_11))
if SO: aStudyBuilder.RemoveObjectWithChildren(SO)
SO = theStudy.FindObjectIOR(theStudy.ConvertObjectToIOR(smeshObj_12))
if SO: aStudyBuilder.RemoveObjectWithChildren(SO)
SO = theStudy.FindObjectIOR(theStudy.ConvertObjectToIOR(smeshObj_13))

```

```
if SO: aStudyBuilder.RemoveObjectWithChildren(SO)
SO = theStudy.FindObjectIOR(theStudy.ConvertObjectToIOR(smeshObj_10))
if SO: aStudyBuilder.RemoveObjectWithChildren(SO)
SO = theStudy.FindObjectIOR(theStudy.ConvertObjectToIOR(smeshObj_9))
if SO: aStudyBuilder.RemoveObjectWithChildren(SO)
SO = theStudy.FindObjectIOR(theStudy.ConvertObjectToIOR(smeshObj_18))
if SO: aStudyBuilder.RemoveObjectWithChildren(SO)
SO = theStudy.FindObjectIOR(theStudy.ConvertObjectToIOR(smeshObj_19))
if SO: aStudyBuilder.RemoveObjectWithChildren(SO)
SO = theStudy.FindObjectIOR(theStudy.ConvertObjectToIOR(smeshObj_6))
if SO: aStudyBuilder.RemoveObjectWithChildren(SO)
SO = theStudy.FindObjectIOR(theStudy.ConvertObjectToIOR(smeshObj_5))
if SO: aStudyBuilder.RemoveObjectWithChildren(SO)
SO = theStudy.FindObjectIOR(theStudy.ConvertObjectToIOR(smeshObj_4))
if SO: aStudyBuilder.RemoveObjectWithChildren(SO)
SO = theStudy.FindObjectIOR(theStudy.ConvertObjectToIOR(smeshObj_3))
if SO: aStudyBuilder.RemoveObjectWithChildren(SO)
SO = theStudy.FindObjectIOR(theStudy.ConvertObjectToIOR(smeshObj_24))
if SO: aStudyBuilder.RemoveObjectWithChildren(SO)
SO = theStudy.FindObjectIOR(theStudy.ConvertObjectToIOR(smeshObj_22))
if SO: aStudyBuilder.RemoveObjectWithChildren(SO)
```

```
## Set names of Mesh objects
```

```
smesh.SetName(hormigon_2_1, 'hormigon_2')
smesh.SetName(Destroza, 'Destroza')
smesh.SetName(Avance, 'Avance')
smesh.SetName(Excavacion, 'Excavacion')
smesh.SetName(Regular_1D, 'Regular_1D')
smesh.SetName(bulonado, 'bulonado')
smesh.SetName(Quadrangle_2D, 'Quadrangle_2D')
smesh.SetName(Suelo_R, 'Suelo_R')
smesh.SetName(MEFISTO_2D, 'MEFISTO_2D')
smesh.SetName(GHS3D_3D, 'GHS3D_3D')
smesh.SetName(Nb_Segments_1, 'Nb. Segments_1')
smesh.SetName(Cboveda, 'Cboveda')
smesh.SetName(NETGEN_3D, 'NETGEN_3D')
smesh.SetName(Nb_Segments_2, 'Nb. Segments_2')
smesh.SetName(Regular_1D_1, 'Regular_1D')
smesh.SetName(Prism_3D, 'Prism_3D')
smesh.SetName(Length_From_Edges_1, 'Length From Edges_1')
smesh.SetName(Prism_3D_1, 'Prism_3D')
smesh.SetName(MEFISTO_2D_1, 'MEFISTO_2D')
smesh.SetName(Apoyo_x, 'Apoyo_x')
smesh.SetName(Quadrangle_Parameters_1, 'Quadrangle Parameters_1')
smesh.SetName(Apoyo_y, 'Apoyo_y')
smesh.SetName(suelo_4_1, 'suelo_4')
smesh.SetName(suelo_23_1, 'suelo_23')
smesh.SetName(suelo_1_2, 'suelo_1')
smesh.SetName(NETGEN_3D_Parameters, 'NETGEN 3D Parameters')
smesh.SetName(Suelo_IN_2, 'Suelo_IN')
smesh.SetName(Max_Element_Volume_1, 'Max. Element Volume_1')
smesh.SetName(Mesh_PFF.GetMesh(), 'Mesh_PFF')
```

```
smesh.SetName(hormigon_4_2, 'hormigon_4')
smesh.SetName(hormigon_1_2, 'hormigon_1')
smesh.SetName(Suelo, 'Suelo')
smesh.SetName(hormigon_2_2, 'hormigon_2')
smesh.SetName(hormigon_3_2, 'hormigon_3')
smesh.SetName(Excavacion_1, 'Excavacion')
smesh.SetName(bulonado_1, 'bulonado')
smesh.SetName(Destroza_1, 'Destroza')
smesh.SetName(Avance_1, 'Avance')
smesh.SetName(Cboveda_1, 'Cboveda')
smesh.SetName(Suelo_R_1, 'Suelo_R')
smesh.SetName(NETGEN_2D_Parameters_1, 'NETGEN 2D Parameters')
smesh.SetName(NETGEN_2D_Parameters, 'NETGEN 2D Parameters')
smesh.SetName(Length_From_Edges_3, 'Length From Edges_3')
smesh.SetName(Length_From_Edges_2, 'Length From Edges_2')
smesh.SetName(Length_From_Edges_4, 'Length From Edges_4')
smesh.SetName(NETGEN_2D_Parameters_4, 'NETGEN 2D Parameters')
smesh.SetName(NETGEN_2D_Parameters_3, 'NETGEN 2D Parameters')
smesh.SetName(NETGEN_2D_Parameters_2, 'NETGEN 2D Parameters')
smesh.SetName(NETGEN_2D_Parameters_5, 'NETGEN 2D Parameters')
smesh.SetName(Regular_1D_2, 'Regular_1D')
smesh.SetName(MEFISTO_2D_2, 'MEFISTO_2D')
smesh.SetName(NETGEN_2D_ONLY, 'NETGEN_2D_ONLY')
smesh.SetName(NETGEN_2D, 'NETGEN_2D')
smesh.SetName(Suelo_int, 'Suelo_int')
smesh.SetName(Revestimiento, 'Revestimiento')
smesh.SetName(Corona, 'Corona')
smesh.SetName(suelo_23, 'suelo_23')
smesh.SetName(suelo_1_1, 'suelo_1')
smesh.SetName(Tunel_1, 'Tunel')
smesh.SetName(suelo_4, 'suelo_4')
smesh.SetName(hormigon_4_1, 'hormigon_4')
smesh.SetName(hormigon_1_1, 'hormigon_1')
smesh.SetName(Suelo_IN_1, 'Suelo_IN')
smesh.SetName(hormigon_3_1, 'hormigon_3')
```

```
###
```

```
### ASTER component
```

```
###
```

```
###
```

```
### EFICAS component
```

```
###
```

```
if salome.sg.hasDesktop():
```

```
    salome.sg.updateObjBrowser(1)
```



2.- COMANDOS

DEBUT());

Mesh_Pf=LIRE_MAILLAGE(FORMAT='MED');

Mesh_Pf=DEFI_GROUP(reuse =Mesh_Pf,
MAILLAGE=Mesh_Pf,
CREA_GROUP_NO=(_F(GROUP_MA='Suelo_IN'),
_F(GROUP_MA='Suelo_R'),
_F(GROUP_MA='Avance'),
_F(GROUP_MA='hormigon_1'),
_F(GROUP_MA='Destroza'),
_F(GROUP_MA=('hormigon_2','hormigon_3')),
_F(GROUP_MA='Cboveda'),
_F(GROUP_MA='hormigon_4'),
_F(GROUP_MA='suelo_1'),
_F(GROUP_MA='suelo_23'),
_F(GROUP_MA='suelo_4')));

Modelo=AFPE_MODELE(MAILLAGE=Mesh_Pf,
AFPE=_F(TOUT='OUI',
PHENOMENE='MECANIQUE',
MODELISATION='D_PLAN'));

Suelo_Oc=DEFI_MATERIAU(ELAS=_F(E=3324000000.0,
NU=0.25,
RHO=2650.0));

Suelo_IN=DEFI_MATERIAU(ELAS=_F(E=3324000000.0,
NU=0.499,
RHO=2650.0));

Vacio=DEFI_MATERIAU(ELAS=_F(E=1000.0,
NU=0.2,
RHO=0.0));

Hormigon=DEFI_MATERIAU(ELAS=_F(E=24854150770.0,
NU=0.2,
RHO=2400.0));

Suelo=AFPE_MATERIAU(MAILLAGE=Mesh_Pf,
AFPE=_F(GROUP_MA='Suelo_IN',
MATER=Suelo_IN));

Avance=AFPE_MATERIAU(MAILLAGE=Mesh_Pf,
AFPE=(_F(GROUP_MA='Suelo_R',
MATER=Suelo_Oc),
_F(GROUP_MA='suelo_1',
MATER=Vacio),
_F(GROUP_MA='hormigon_1',
MATER=Vacio),
_F(GROUP_MA='Destroza',

```
MATER=Suelo_Oc),  
_F(GROUP_MA='Cboveda',  
MATER=Suelo_Oc),,));
```

```
Revest_a=AFFE_MATERIAU(MAILLAGE=Mesh_Pff,  
AFFE=( _F(GROUP_MA='Suelo_R',  
MATER=Suelo_Oc),  
_F(GROUP_MA='suelo_1',  
MATER=Vacio),  
_F(GROUP_MA='hormigon_1',  
MATER=Hormigon),  
_F(GROUP_MA='Destroza',  
MATER=Suelo_Oc),  
_F(GROUP_MA='Cboveda',  
MATER=Suelo_Oc),,));
```

```
T_excav=DEFI_LIST_REEL(DEBUT=0.0,  
INTERVALLE=( _F(JUSQU_A=1.0,  
NOMBRE=1),  
_F(JUSQU_A=10.0,  
NOMBRE=1),  
_F(JUSQU_A=500.0,  
NOMBRE=1),  
_F(JUSQU_A=1000.0,  
NOMBRE=1),,));
```

```
Desconf=DEFI_FONCTION(  
NOM_PARA='INST',  
VALE=(10.0 ,1.0 ,  
500.0 ,0.5 ,  
1000.0 ,0.0 ,),);
```

```
Asig_ten=CREA_CHAMP(TYPE_CHAM='ELNO_SIEF_R',  
OPERATION='AFFE',  
MODELE=Modelo,  
AFFE= _F(TOUT='OUT',  
NOM_CMP=('SIXX','SIYY','SIZZ','SIXY'),  
VALE=(5000000.0,5000000.0,0.0,0.0),,));
```

```
cara=AFFE_CHAR_MECA(MODELE=Modelo,  
PESANTEUR= _F(GRAVITE=9.81,  
DIRECTION=(0.0,-1.0,0.0),),  
DDL_IMPO=( _F(GROUP_NO='Apoyo_x',  
DX=0.0),  
_F(GROUP_NO='Apoyo_y',  
DY=0.0),,));
```

```
Resu1=STAT_NON_LINE(MODELE=Modelo,  
CHAM_MATER=Suelo,  
EXCIT= _F(CHARGE=cara,  
TYPE_CHARGE='DIDI'),  
COMP_INCR= _F(RELATION='ELAS',
```

```
ITER_INTE_MAXI=50,  
ITER_INTE_PAS=-40,  
PARM_THETA=0.57,  
GROUP_MA='Suelo_IN'),  
ETAT_INIT=_F(SIGM=Asig_ten),  
INCREMENT=_F(LIST_INST=T_excav,  
INST_INIT=1.0,  
INST_FIN=10.0),  
NEWTON=_F(MATRICE='TANGENTE',  
REAC_ITER=1),  
CONVERGENCE=_F(RESI_GLOB_RELA=5e-06,  
ITER_GLOB_MAXI=200,));
```

```
Rea=CALC_CHAMP(RESULTAT=Resu1,  
PRECISION=1e-06,  
FORCE='REAC_NODA');
```

```
Extr_ten=CREA_CHAMP(TYPE_CHAM='ELGA_SIEF_R',  
OPERATION='EXTR',  
RESULTAT=Resu1,  
NOM_CHAM='SIEF_ELGA',  
INST=10.0);
```

```
Rc_rac_n=CREA_CHAMP(TYPE_CHAM='NOEU_DEPL_R',  
OPERATION='EXTR',  
RESULTAT=Rea,  
NOM_CHAM='REAC_NODA',  
INST=10.0);
```

```
v_cargas=AFFE_CHAR_MECA(MODELE=Modelo,  
VECT_ASSE=Rc_rac_n);
```

```
Resu1=STAT_NON_LINE(reuse =Resu1,  
MODELE=Modelo,  
CHAM_MATER=Avance,  
EXCIT=_F(CHARGE=v_cargas,  
FONC_MULT=Desconf),  
COMP_INCR=(  
_F(RELATION='ELAS',  
ITER_INTE_MAXI=100,  
ITER_INTE_PAS=-10,  
PARM_THETA=0.57,  
GROUP_MA='Suelo_R'),  
_F(RELATION='ELAS',  
ITER_INTE_MAXI=100,  
ITER_INTE_PAS=-10,  
PARM_THETA=0.57,  
GROUP_MA='Excavacion'),  
_F(RELATION='ELAS',  
ITER_INTE_MAXI=100,  
ITER_INTE_PAS=-10,  
PARM_THETA=0.57,  
GROUP_MA='hormigon_1'),),
```

```
ETAT_INIT=_F(EVOL_NOLI=Resu1,)  
INCREMENT=_F(LIST_INST=T_excav,  
INST_INIT=10.0,  
INST_FIN=500.0),  
NEWTON=_F(MATRICE='TANGENTE',  
REAC_ITER=1),  
CONVERGENCE=_F(RESI_GLOB_RELA=5e-06,  
ITER_GLOB_MAXI=500,));
```

```
Resu1=STAT_NON_LINE(reuse =Resu1,  
MODELE=Modelo,  
CHAM_MATER=Revest_a,  
EXCIT=_F(CHARGE=v_cargas,  
FONC_MULT=Desconf,)  
COMP_INCR=(  
_F(RELATION='ELAS',  
ITER_INTE_MAXI=100,  
ITER_INTE_PAS=-10,  
PARM_THETA=0.57,  
GROUP_MA='Suelo_R'),  
_F(RELATION='ELAS',  
ITER_INTE_PAS=-10,  
PARM_THETA=0.57,  
GROUP_MA='Excavacion'),  
_F(RELATION='ELAS',  
ITER_INTE_MAXI=100,  
ITER_INTE_PAS=-10,  
PARM_THETA=0.57,  
GROUP_MA='hormigon_1'),),),  
ETAT_INIT=_F(EVOL_NOLI=Resu1,)  
INCREMENT=_F(LIST_INST=T_excav,  
INST_INIT=500.0,  
INST_FIN=1000.0),  
NEWTON=_F(REAC_INCR=1,  
MATRICE='TANGENTE'),  
CONVERGENCE=_F(RESI_GLOB_RELA=5e-06,  
ITER_GLOB_MAXI=500,));
```

```
Avance_2=AFPE_MATERIAU(MAILLAGE=Mesh_Pff,  
AFPE=(  
_F(GROUP_MA='Suelo_R',  
MATER=Suelo_Oc),  
_F(GROUP_MA='suelo_1',  
MATER=Vacio),  
_F(GROUP_MA='hormigon_1',  
MATER=Hormigon),  
_F(GROUP_MA='suelo_23',  
MATER=Suelo_Oc),  
_F(GROUP_MA='hormigon_2',  
MATER=Suelo_Oc),  
_F(GROUP_MA='hormigon_3',  
MATER=Suelo_Oc),  
_F(GROUP_MA='Cboveda',  
MATER=Suelo_Oc,)),);
```

```
Destroza=AFFE_MATERIAU(MAILLAGE=Mesh_Pff,  
  AFFE=( _F(GROUP_MA='Suelo_R',  
    MATER=Suelo_Oc),  
  _F(GROUP_MA='suelo_1',  
    MATER=Vacio),  
  _F(GROUP_MA='hormigon_1',  
    MATER=Hormigon),  
  _F(GROUP_MA='suelo_23',  
    MATER=Vacio),  
  _F(GROUP_MA='hormigon_2',  
    MATER=Vacio),  
  _F(GROUP_MA='hormigon_3',  
    MATER=Vacio),  
  _F(GROUP_MA='Cboveda',  
    MATER=Suelo_Oc),),);
```

```
Revest_d=AFFE_MATERIAU(MAILLAGE=Mesh_Pff,  
  AFFE=( _F(GROUP_MA='Suelo_R',  
    MATER=Suelo_Oc),  
  _F(GROUP_MA='suelo_1',  
    MATER=Vacio),  
  _F(GROUP_MA='hormigon_1',  
    MATER=Hormigon),  
  _F(GROUP_MA='suelo_23',  
    MATER=Vacio),  
  _F(GROUP_MA='hormigon_2',  
    MATER=Hormigon),  
  _F(GROUP_MA='hormigon_3',  
    MATER=Hormigon),  
  _F(GROUP_MA='Cboveda',  
    MATER=Suelo_Oc),),);
```

```
T_excav2=DEFI_LIST_REEL(DEBUT=0.0,  
  INTERVALLE=( _F(JUSQU_A=1.0,  
    NOMBRE=1),  
  _F(JUSQU_A=10.0,  
    NOMBRE=1),  
  _F(JUSQU_A=500.0,  
    NOMBRE=1),  
  _F(JUSQU_A=1000.0,  
    NOMBRE=1),),);
```

```
Desconf2=DEFI_FONCTION(  
  NOM_PARA='INST',  
  VALE=(10.0 ,1.0 ,  
    500.0 ,0.5 ,  
    1000.0 ,0.0 ,),);
```

```
Asi_ten2=CREA_CHAMP(TYPE_CHAM='ELNO_SIEF_R',  
  OPERATION='AFFE',  
  MODELE=Modelo,
```



```

ITER_INTE_PAS=-10,
PARM_THETA=0.57,
GROUP_MA='Suelo_R'),
_F(RELATION='ELAS',
ITER_INTE_MAXI=100,
ITER_INTE_PAS=-10,
PARM_THETA=0.57,
GROUP_MA='Excavacion'),
_F(RELATION='ELAS',
ITER_INTE_MAXI=100,
ITER_INTE_PAS=-10,
PARM_THETA=0.57,
GROUP_MA='Hormigon'),),
ETAT_INIT=_F(EVOL_NOLI=Resu1),
INCREMENT=_F(LIST_INST=T_excav,
INST_INIT=10.0,
INST_FIN=500.0),
NEWTON=_F(MATRICE='TANGENTE',
REAC_ITER=1),
CONVERGENCE=_F(RESI_GLOB_RELA=5e-06,
ITER_GLOB_MAXI=500,));

```

```

Resu2=STAT_NON_LINE(reuse =Resu2,
MODELE=Modelo,
CHAM_MATER=Revest_d,
EXCIT=_F(CHARGE=v_crgas2,
FONC_MULT=Desconf2),
COMP_INCR=(_F(RELATION='ELAS',
ITER_INTE_MAXI=100,
ITER_INTE_PAS=-10,
PARM_THETA=0.57,
GROUP_MA='Suelo_R'),
_F(RELATION='ELAS',
ITER_INTE_PAS=-10,
PARM_THETA=0.57,
GROUP_MA='Excavacion'),
_F(RELATION='ELAS',
ITER_INTE_MAXI=100,
ITER_INTE_PAS=-10,
PARM_THETA=0.57,
GROUP_MA='Hormigon'),),
ETAT_INIT=_F(EVOL_NOLI=Resu2),
INCREMENT=_F(LIST_INST=T_excav,
INST_INIT=500.0,
INST_FIN=1000.0),
NEWTON=_F(REAC_INCR=1,
MATRICE='TANGENTE'),
CONVERGENCE=_F(RESI_GLOB_RELA=5e-06,
ITER_GLOB_MAXI=500,));

```

```

Destroz2=AFFE_MATERIAU(MAILLAGE=Mesh_Pf,
AFFE=(_F(GROUP_MA='Suelo_R',

```

```
MATER=Suelo_Oc),
_F(GROUP_MA='suelo_1',
MATER=Vacio),
_F(GROUP_MA='hormigon_1',
MATER=Hormigon),
_F(GROUP_MA='suelo_23',
MATER=Vacio),
_F(GROUP_MA='hormigon_2',
MATER=Hormigon),
_F(GROUP_MA='hormigon_3',
MATER=Hormigon),
_F(GROUP_MA='suelo_4',
MATER=Suelo_Oc),
_F(GROUP_MA='hormigon_4',
MATER=Suelo_Oc),,));
```

```
Cboveda=AFFE_MATERIAU(MAILLAGE=Mesh_PFf,
AFFE=(_F(GROUP_MA='Suelo_R',
MATER=Suelo_Oc),
_F(GROUP_MA='suelo_1',
MATER=Vacio),
_F(GROUP_MA='hormigon_1',
MATER=Hormigon),
_F(GROUP_MA='suelo_23',
MATER=Vacio),
_F(GROUP_MA='hormigon_2',
MATER=Hormigon),
_F(GROUP_MA='hormigon_3',
MATER=Hormigon),
_F(GROUP_MA='suelo_4',
MATER=Vacio),
_F(GROUP_MA='hormigon_4',
MATER=Vacio),,));
```

```
Revest_c=AFFE_MATERIAU(MAILLAGE=Mesh_PFf,
AFFE=(_F(GROUP_MA='Suelo_R',
MATER=Suelo_Oc),
_F(GROUP_MA='suelo_1',
MATER=Vacio),
_F(GROUP_MA='hormigon_1',
MATER=Hormigon),
_F(GROUP_MA='suelo_23',
MATER=Vacio),
_F(GROUP_MA='hormigon_2',
MATER=Hormigon),
_F(GROUP_MA='hormigon_3',
MATER=Hormigon),
_F(GROUP_MA='suelo_4',
MATER=Vacio),
_F(GROUP_MA='hormigon_4',
MATER=Hormigon),,));
```

```

T_excav3=DEFI_LIST_REEL(DEBUT=0.0,
    INTERVALLE=( _F(JUSQU_A=1.0,
        NOMBRE=1,),
        _F(JUSQU_A=10.0,
            NOMBRE=1,),
        _F(JUSQU_A=500.0,
            NOMBRE=1,),
        _F(JUSQU_A=1000.0,
            NOMBRE=1,)),);

Desconf3=DEFI_FONCTION(
    NOM_PARA='INST',
    VALE=(10.0 ,1.0 ,
        500.0 ,0.5 ,
        1000.0 ,0.0 ,));

Asi_ten3=CREA_CHAMP(TYPE_CHAM='ELNO_SIEF_R',
    OPERATION='AFFE',
    MODELE=Modelo,
    AFFE= _F(TOUT='OUI',
        NOM_CMP=('SIXX','SIYY','SIZZ','SIXY'),
        VALE=(5000000.0,5000000.0,0.0,0.0,)),);

cara_3=AFFE_CHAR_MECA(MODELE=Modelo,
    PESANTEUR= _F(GRAVITE=9.81,
        DIRECTION=(0.0,0.0,-1.0,)),
    DDL_IMPO=( _F(GROUP_MA='Apoyo_x',
        DX=0.0,),
        _F(GROUP_MA='Apoyo_y',
        DY=0.0,)),);

Resu3=STAT_NON_LINE(MODELE=Modelo,
    CHAM_MATER=Suelo,
    EXCIT= _F(CHARGE=cara,
        TYPE_CHARGE='DIDI'),
    COMP_INCR= _F(RELATION='ELAS',
        ITER_INTE_MAXI=50,
        ITER_INTE_PAS=-40,
        PARM_THETA=0.57,
        GROUP_MA='Suelo_R'),
    ETAT_INIT= _F(SIGM=Asi_ten2,),
    INCREMENT= _F(LIST_INST=T_excav2,
        INST_INIT=1.0,
        INST_FIN=10.0,),
    NEWTON= _F(MATRICE='TANGENTE',
        REAC_ITER=1,),
    CONVERGENCE= _F(RESI_GLOB_RELA=5e-06,
        ITER_GLOB_MAXI=200,));

Ex_ten3=CREA_CHAMP(TYPE_CHAM='ELGA_SIEF_R',
    OPERATION='EXTR',
    RESULTAT=Resu3,

```

NOM_CHAM='SIEF_ELGA',
INST=10.0,);

Rc_reac3=CREA_CHAMP(TYPE_CHAM='NOEU_DEPL_R',
OPERATION='EXTR',
RESULTAT=Resu3,
NOM_CHAM='REAC_NODA',
INST=10.0,);

v_crgas3=AFFE_CHAR_MECA(MODELE=Modelo,
VECT_ASSE=Rc_reac3,);

Resu3=STAT_NON_LINE(reuse =Resu3,
MODELE=Modelo,
CHAM_MATER=Cboveda,
EXCIT=_F(CHARGE=v_crgas3,
FONC_MULT=Desconf3,)),
COMP_INCR=(_F(RELATION='ELAS',
ITER_INTE_MAXI=100,
ITER_INTE_PAS=-10,
PARM_THETA=0.57,
GROUP_MA='Suelo_R'),
_F(RELATION='ELAS',
ITER_INTE_MAXI=100,
ITER_INTE_PAS=-10,
PARM_THETA=0.57,
GROUP_MA='Excavacion'),
_F(RELATION='ELAS',
ITER_INTE_MAXI=100,
ITER_INTE_PAS=-10,
PARM_THETA=0.57,
GROUP_MA='Hormigon'),),
ETAT_INIT=_F(EVOL_NOLI=Resu1,)),
INCREMENT=_F(LIST_INST=T_excav,
INST_INIT=10.0,
INST_FIN=500.0,)),
NEWTON=_F(MATRICE='TANGENTE',
REAC_ITER=1,)),
CONVERGENCE=_F(RESI_GLOB_RELA=5e-06,
ITER_GLOB_MAXI=500,));

Resu3=STAT_NON_LINE(reuse =Resu3,
MODELE=Modelo,
CHAM_MATER=Revest_c,
EXCIT=_F(CHARGE=v_crgas3,
FONC_MULT=Desconf3,)),
COMP_INCR=(_F(RELATION='ELAS',
ITER_INTE_MAXI=100,
ITER_INTE_PAS=-10,
PARM_THETA=0.57,
GROUP_MA='Suelo_R'),
_F(RELATION='ELAS',

```
ITER_INTE_PAS=-10,  
  PARM_THETA=0.57,  
  GROUP_MA='Excavacion'),  
_F(RELATION='ELAS',  
  ITER_INTE_MAXI=100,  
  ITER_INTE_PAS=-10,  
  PARM_THETA=0.57,  
  GROUP_MA='Hormigon'),),  
ETAT_INIT=_F(EVOL_NOLI=Resu2),  
INCREMENT=_F(LIST_INST=T_excav,  
  INST_INIT=500.0,  
  INST_FIN=1000.0),  
NEWTON=_F(REAC_INCR=1,  
  MATRICE='TANGENTE'),  
CONVERGENCE=_F(RESI_GLOB_RELA=5e-06,  
  ITER_GLOB_MAXI=500),);
```

FIN());

#CHECKSUM:9123a624b01976e672965667badbaf1d -:FIN CHECKSUM