6.7.

ÁREA: B

MÓDULO: DISEÑO Y PROYECTO DE TÚNELES

BULONES, TIPOS PROPIEDADES, DIMENSIONADO

Ponente: Marcelo Usabiaga Lasa
EUROESTUDIOS

Día: 23/03/07

Hora: 16:00 A 20:00

MASTER UNIVERSITARIO EN TÚNELES Y OBRAS SUBTERRÁNEAS

(II EDICIÓN)

BULONES, TIPOS, PROPIEDADES, DIMENSIONADO

INDICE

1. GENERALIDADES 2

2. TIPOS DE BULONES. PROPIEDADES 6

3. VENTAJAS E INCONVENIENTES 25

4. TENDENCIAS ACTUALES 28

5. ASPECTOS CONSTRUCTIVOS 29

6. DIMENSIONADO 35

7. MÉTODOS DE CÁLCULO 49

1.- GENERALIDADES

El bulonaje es una técnica que consiste en introducir en el macizo rocoso barras de distinto tipo de material que por medio de su resistencia a tracción fundamentalmente, colabora en la estabilización de la excavación practicada en el mismo.

Como tantas otras técnicas de la ingeniería civil, el bulonaje comenzó en la minería y de manera extensiva, después de la segunda guerra mundial. En los inicios, los bulones eran del tipo de anclaje puntual por sistemas mecánicos en su punta, con el objeto de conseguir el efecto de "suspensión" de la roca situada entre ambos extremos (ver figura 1, 2).

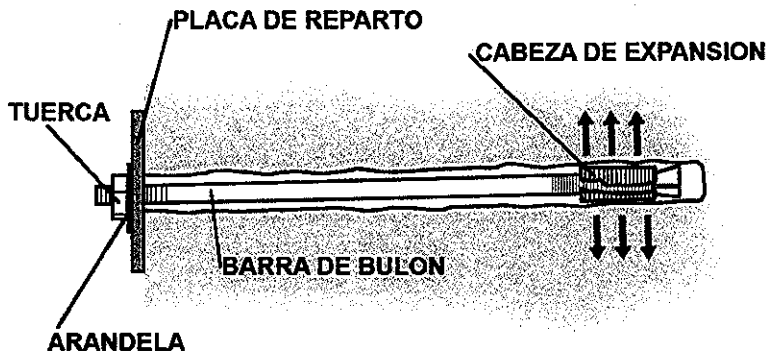


Figura 1 Bulón de anclaje puntual

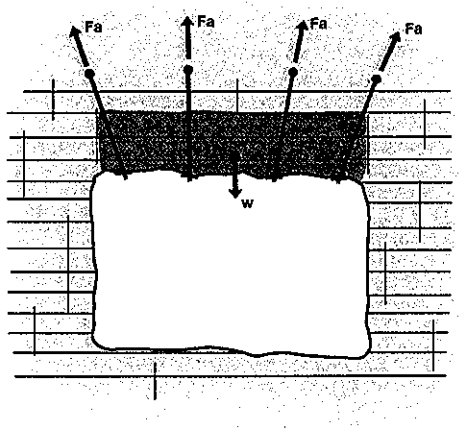


Figura 2 Suspensión de estrato de roca

Posteriormente, hacia los años 60, se desarrolló el bulón de anclaje repartido, que además del efecto de " suspensión " conseguía " armar" la roca, de manera similar a la tierra armada (ver figura 3).

De ésta manera, la aparición del bulón de anclaje repartido permitió el desarrollo de técnicas de sostenimiento de excavaciones en macizos rocosos altamente plastificados, mediante sostenimientos flexibles, que es la base de la filosofía del conocido como Nuevo Método Austríaco.

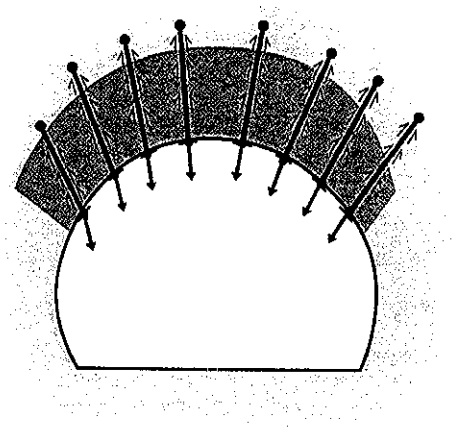


Figura 3 Efecto de armado con bulón de anclaje repartido

La finalidad del bulón de anclaje puntual consiste en soportar, mediante su resistencia a tracción, el peso de roca inestable, bien sea en suspensión libre o bien deslizando a favor de algún plano de discontinuidad existente en el macizo. En este caso, la longitud del bulón deberá ser tal que, el punto de anclaje se sitúe por detrás del plano de discontinuidad. En la figura 4 se presenta dos situaciones de inestabilidad de bloques de roca en una excavación subterránea: la primera consiste en una caída libre, mientras que la segunda lo hace deslizando a favor de un plano preexistente. En el primer caso, el cálculo del número de bulones se determina contrarrestando el peso del bloque por una fuerza de anclaje vertical, que dependerá del tipo de bulón. En el segundo de los casos difiere del anterior en que interviene la fuerza de rozamiento del plano sobre el que desliza, reduciendo la fuerza desestabilizadora de la componente del peso del bloque según el plano de discontinuidad (ver figura 4).

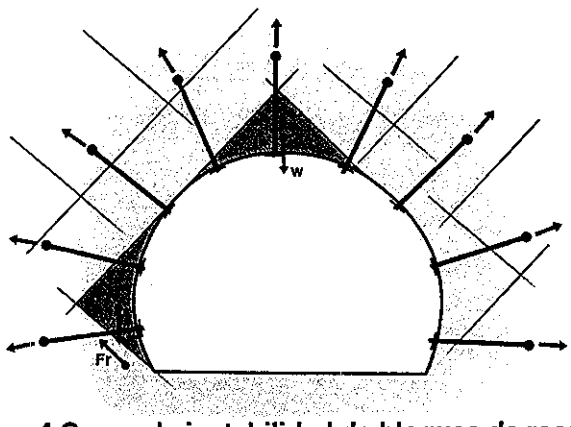


Figura 4 Casos de instabilidad de bloques de roca

En resumen, el bulón de anclaje puntual concentra su funcionamiento en el mecanismo de anclaje, en un punto muy concreto del macizo lo que hace depender en gran medida su eficacia de fallos del mecanismo en si, variaciones locales de las propiedades de la roca y diámetro de la perforación. En el otro extremo, la placa proporciona el efecto sustentador del peso del bloque Actualmente no se aplica en la ingeniería civil.

Por otro lado, el bulón de anclaje repartido, basa su funcionamiento en la adherencia bulbo-roca a lo largo del mismo. El bulbo se obtiene rellenando el espacio anular existente entre la barra y las paredes de la perforación, mediante un producto que endurece con el tiempo, que suele ser lechada de cemento o resina (ver figura 5).

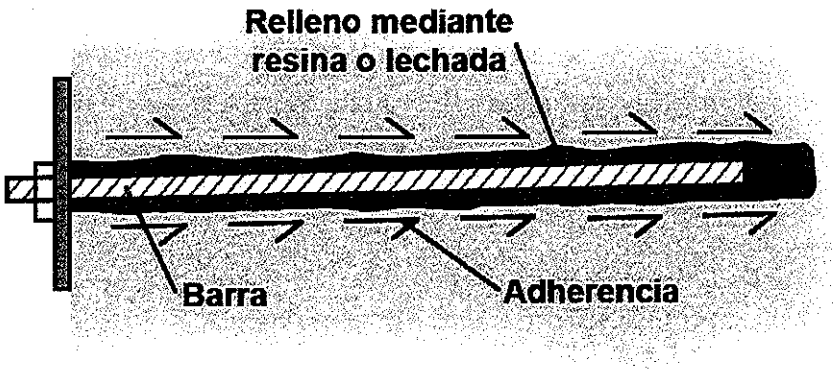


Figura 5 Esquema de bulón de anclaje repartido

De éste modo, en el caso de sostenimiento de bloques de roca en macizos en régimen elástico, la fuerza de anclaje se reparte a lo largo de la longitud del bulón situado por detrás

del plano de discontinuidad que limita el bloque, y el efecto sustentador se reparte a lo largo de la longitud de barra situada dentro del bloque, sumada a la capacidad de la placa (ver figura 6). En terrenos con alta plasticidad el bulón ejerce una función de "armado", oponiéndose al desplazamiento relativo del macizo entre los extremos del bulón.

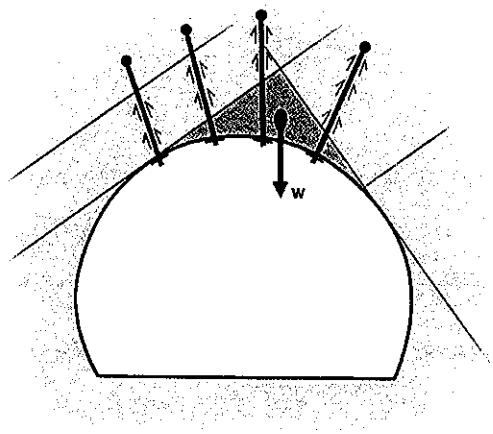


Figura 6 Bulón de anclaje repartido en sostenimientos de bloques de roca

En todos los casos, la máxima fuerza que un bulón puede soportar queda limitada por su capacidad mecánica que, de una manera simplificadora, se suele adoptar su resistencia a tracción.

2.- TIPOS DE BULONES

Atendiendo al sistema transmisión de esfuerzos con el macizo rocoso, los bulones se podrían clasificar en :

- ***ADHERENCIA*** (Barra, fibra de vidrio, autoperforantes, cable)
- ***FRICCIÓN*** (Swellex, split set)
- ***MECÁNICOS*** o anclaje puntual

De los mecánicos, o de anclaje puntual conseguido mediante expansión de un mecanismo ubicado en su punta, no es necesario extenderse más puesto que hoy en día se ha abandonado su utilización en la ingeniería civil, por las razones expuestas anteriormente.

Los otros dos se diferencian principalmente en la manera de transferir esfuerzos entre el bulón y la roca. Considerando un comportamiento Mohr-Coulomb de la interfaz bulón-roca, ésta tendría una cohesión (c) y un ángulo de rozamiento (Φ) y por lo tanto la tensión tangencial vendría dada por la expresión :

→ Bulones de adherencia

$$\tau = c + \sigma \, tg \, \Phi$$

→ Bulones de fricción

Así pues, basándonos en ésta fórmula vemos que la tensión de transferencia se divide en una componente cohesiva, constante para cualquier tensión normal en la interfaz, y una componente friccional, variable en función de esa tensión normal De éste modo se pueden distinguir los tipos de bulones en, aquellos que consiguen su adherencia (τ) en un término constante (c) independiente de la tensión normal (bulones de adherencia), y los que lo hacen mediante una presión de contacto (σ) aumentando de este modo la componente friccional. En éste último grupo se podrían incluir tanto los mecánicos en los que concentran en la punta una elevada fuerza de anclaje (presión de contacto), como los clasificados como de fricción (swellex, split set) que consiguen un anclaje repartido por medio de la expansión lateral hasta entrar en contacto con las paredes de la perforación (ver figura 7).

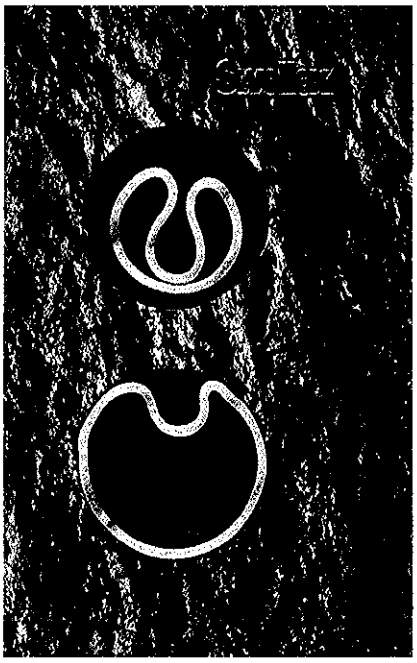


Figura 7 Bulón de expansión lateral (friccional)

Por su parte, los bulones de anclaje por adherencia (barra, fibra de vidrio, autoperforantes,....)son aquellos que el espacio anular entre la barra y la pared de perforación se rellena mediante resina o lechada de cemento. La resina viene en forma de cartuchos de dos compartimentos, , en uno de los cuales se encuentra la resina de poliéster con fibra de vidrio y en el otro el agente endurecedor (catalizador).

La manera de trabajar con la resina es la que sigue. En primer lugar los cartuchos de resina, que tienen diámetros entre 19 y 40 mm. y longitudes entre 300 y 750 mm. son introducidos en la perforación. Acto seguido se hace lo propio con la barra mediante un movimiento de rotación que se mantiene una vez alcanzado el final de la perforación, hasta que la resina fluya por la boca. De ésta manera se sabrá que los cartuchos han sido destruidos y la resina y el catalizador han entrado en contacto. Existen cartuchos de resina con diferentes velocidades de fraguado, entre 20 y 180 segundos, que se pueden usar combinados (los rápidos en el fondo y los lentos en la boca) para el caso de que los bulones sean activos (ver foto 1).

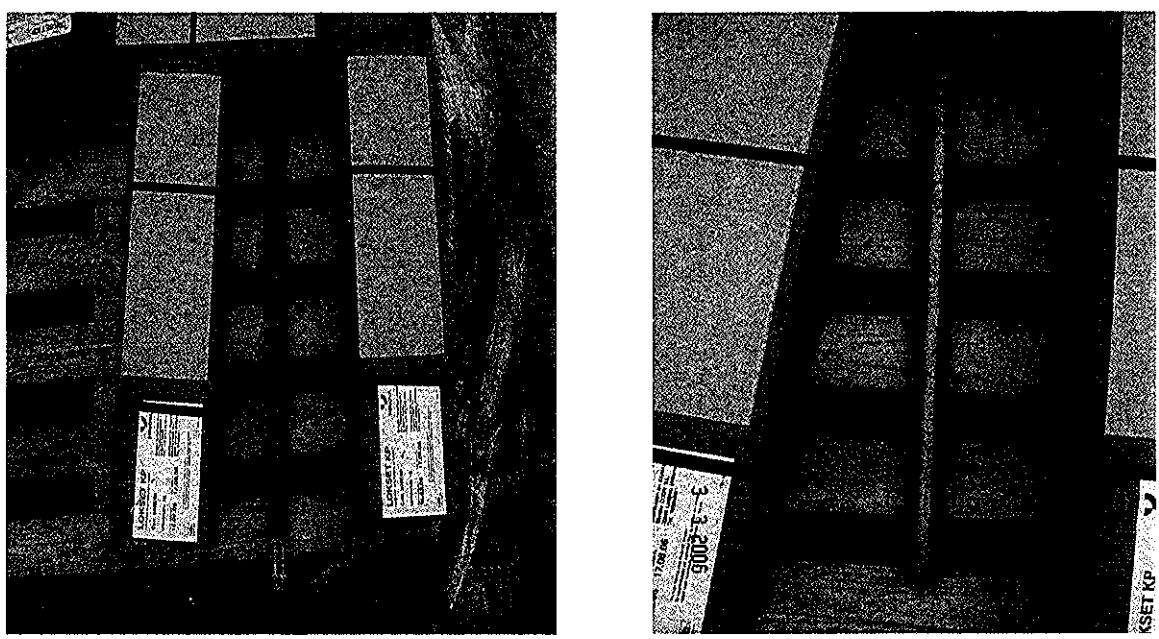


Foto 1 Cartuchos de resina lenta y rápida

El anclaje mediante inyección de lechada de cemento es menos frecuente, reservándose fundamentalmente para bulones de longitudes superiores a 6 metros, en los cuales es complicado conseguir una buena mezcla de los cartuchos de resina, y en las perforaciones de paredes inestables donde se está imponiendo la utilización de bulones autoperforantes, que viene provistos de un hueco interior para la introducción de la lechada.

También existen, aunque con escaso uso, los cartuchos de cemento en el que añaden agentes para facilitar el proceso de fraguado. El procedimiento que se sigue con los cartuchos de cemento que previamente a la introducción en el taladro es sumergido en agua para iniciar su hidratación. es similar al de los de resina salvo que la barra se introduce a percusión y no a rotación.

La ventaja de los cartuchos de resina está en la rapidez de fraguado ya que el de cemento requiere varias horas para el endurecimiento. Por el contrario, los de resina dependen de la buena ejecución del proceso para asegurar una buena mezcla de la resina con el catalizador.

2.1 BULONES DE BARRA

Los bulones más comunes son los de barra de acero corrugado. Las características principales son :

- ***Diámetros 25, 32 mm***
- ***Otros diámetros 6,8,10,12,16 y 20 mm***
- ***Acero B 500 S (corrugado)***
- ***Límite elástico 500 Mpa***
- ***Límite de rotura 600 Mpa***
- ***Alargamiento a la rotura 1,6 %***
- ***Longitudes 4, 5 , 6 metros***
- ***Anclaje con resina o lechada de cemento***
- ***Punta biselada*** rotura cartucho
- ***Anclaje continuo (pasivos)***
- ***Anclaje zona bulbo (activos) con resina de doble velocidad***

Foto 2 Bulón de barra biselada

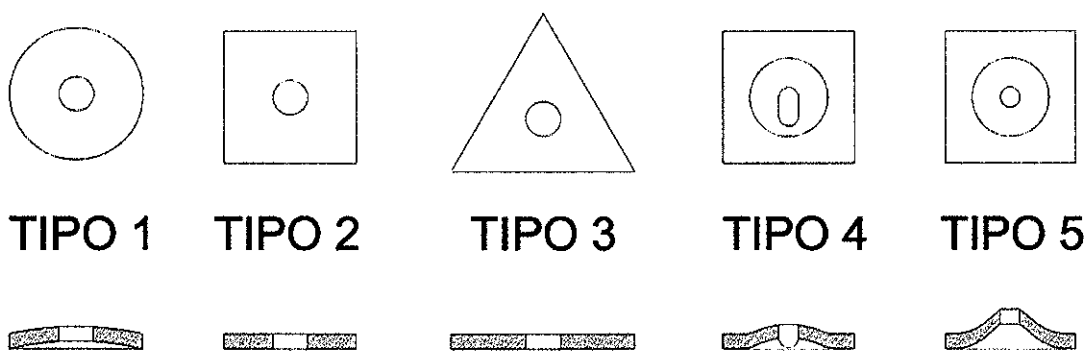
Las barras más comunes, de diámetros 25 o 32 mm, admiten cargas de 14 a 25 toneladas, trabajando a un 60% del límite elástico. Todas ellas vienen biseladas para facilitar la rotura del os cartuchos (ver foto 2)

Para longitudes superiores a los 6 metros, hay que recurrir a las barras tipo Gewi o a los autoperforantes, los cuales están provistos de una corruga-rosca que permite el empalme de barras mediante manguitos de unión. Al tener el manguito un diámetro superior al de la barra, obligaría en este caso a aumentar el diámetro de la perforación.

Un elemento fundamental de la técnica de los bulones es la placa de reparto. En los de anclaje puntual su eficacia descansa totalmente en este elemento, mientras que en el caso de bulón de barra con anclaje repartido la importancia es menor, pero es aconsejable que la capacidad mecánica de la placa sea similar a la de la barra. A continuación se presentan los tipos de placas más usuales y sus características (ver tabla 1).

TIPO	UNIDAD	1	2	3	4	5
Dimensiones	mm.	125 Ø	125x125	350x350x350	125x150	125x150
Espesor	mm.	6	7	7	7	7
Área contacto	cm^2	28,48	23,57	23,57	40,25	44,76
Presión	Kp/cm^2	351	424	424	248	223
Carga máxima	t	10	8	8	14	18

Tabla 1 Características de placas de reparto



Ø25 resist a tracción = 14t.

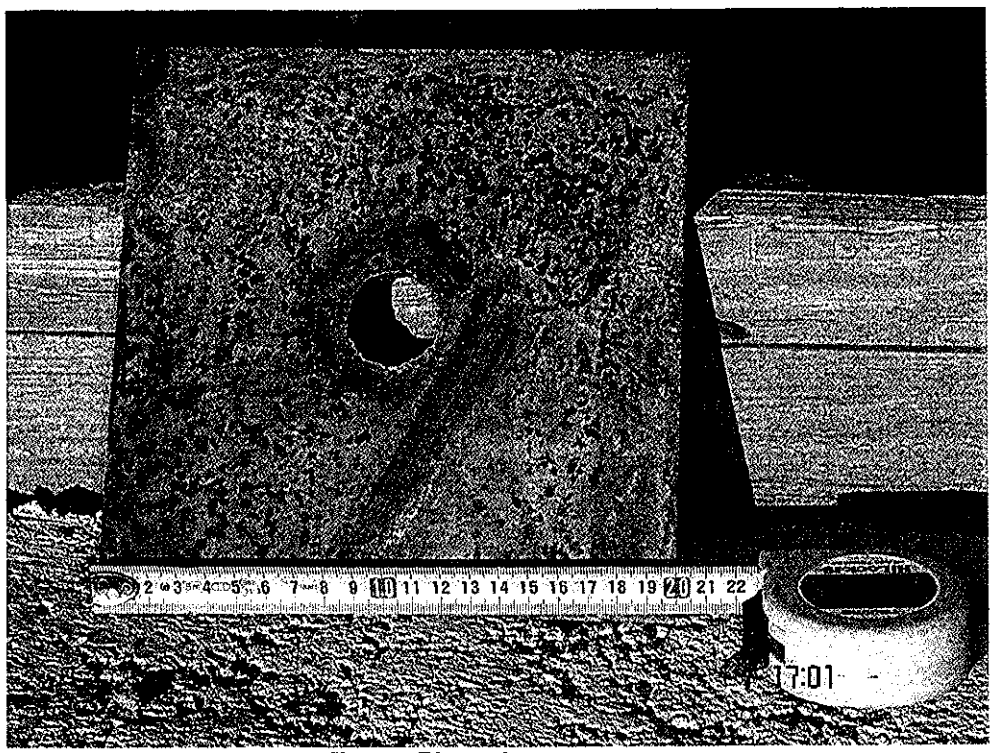


Foto 3 Placa de reparto

2.2 BULONES AUTOPERFORANTES

Se tratan de bulones de acero con broca perdida ver foto 4), que por lo tanto la perforación e introducción del bulón se hace en una sola operación, con corruga-rosca que le permite el empalme de varias barras mediante manguitos (ver foto 5) hasta alcanzar longitudes de hasta 18 metros, y que poseen un orificio longitudinal en su interior por donde se canaliza la inyección de lechada (ver foto 6).

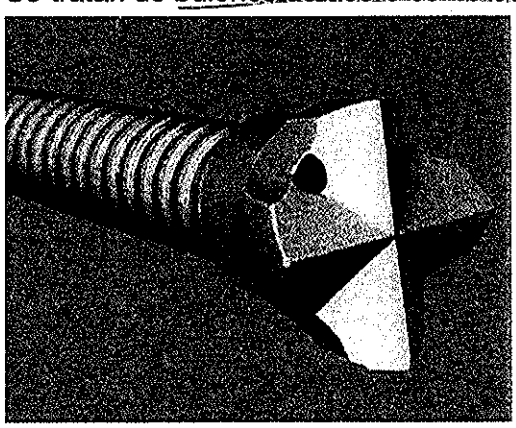


Foto 4 Bulón autoperforante. Detalle de broca

Por lo tanto es un sistema ideal para terrenos de mala calidad donde las paredes de la perforación son inestables, que puede dificultar o impedir la introducción de una barra convencional. Su alto precio los hace indicados únicamente en los casos especiales antes citados.

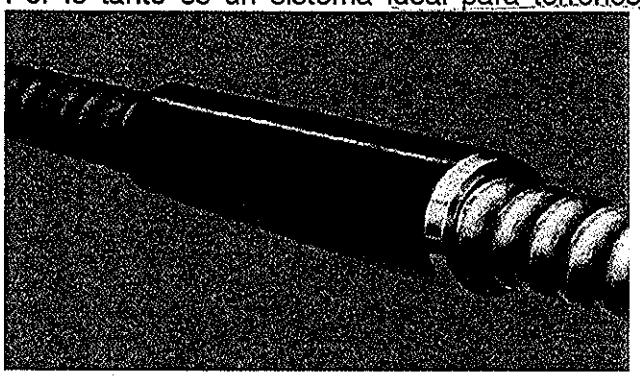


Foto 5 Manguito de unión de barras autoperforantes

Longitudes de hasta 18 m

Las características técnicas de estas barras dependen de cada casa comercial y son las siguientes: (ver tablas 2,3,4 y 5)

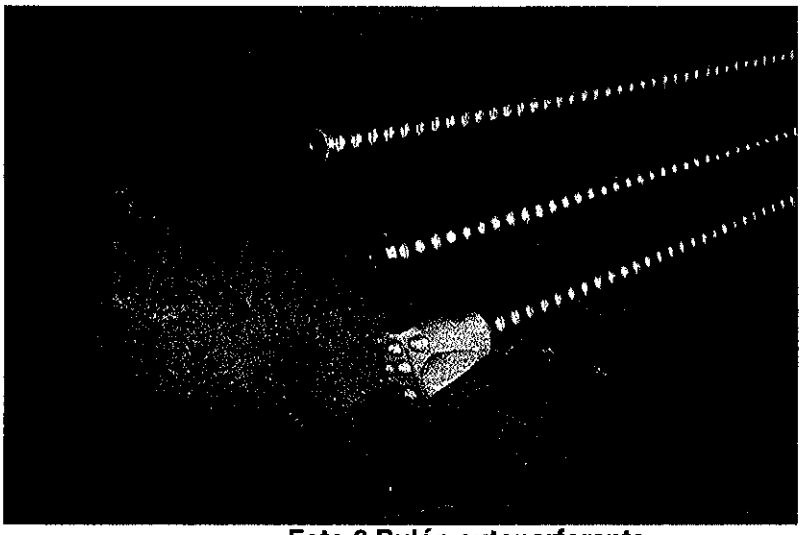


Foto 6 Bulón autoperforante

[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
DIÁMETRO EXTERIOR	mm	25	32	32	32	38
DIÁMETRO INTERIOR	mm	14	22	18,5	15	19
SECCIÓN	mm2	290	340	430	520	770
CARGA DE ROTURA	kN	200	220	280	360	500
CARGA LÍMITE ELÁSTIC.	kN	150	180	230	280	400
LÍMITE DE ROTURA	N/mm2	690	650	650	690	650
LÍMITE ELÁSTICO	N/mm2	520	530	540	540	520
PESO	Kg/m	2,3	2,7	3,4	4,1	6,1
LONGITUD ESTANDAR	m	1,2,3,4,6				

Tabla 2 Propiedades Bulón autoperforante DSI

ϕ25 Bom <> ϕ32 autoperforante.

DIÁMETRO EXTERIOR	mm	32	32
DIÁMTERO INTERIOR	mm	18,5	15
DIÁMETRO EXT. EFECTIVO	mm	29,1	29,1
SUPERFICIE EFECTIVA	mm^2	396	488
CARGA DE ROTURA	kN	280	360
CARGA LÍMITE ELÁSTICO	kN	230	280
LÍMITE DE ROTURA	N/mm^2	720	740
LÍMITE ELÁSTICO	N/mm^2	560	570
PESO	Kg/m	3,4	4,1

Tabla 3 Propiedades bulón autoperforante ATLAS COPCO

DIÁMETRO EXTERIOR	mm	25	32	38
DIÁMETRO EXT. EFECTIVO	mm	22,5	29,1	35,7
DIÁMETRO INTERIOR	mm	12	17,5	19
ÁREA EFECTIVA	mm^2	284	425	717
CARGA ROTURA	kN	208	308	500
CARGA LÍMITE ELÁSTICO	kN	150	250	400
PESO	Kg/m	2,8	3,65	6
LONGITUD	m	1,2,3,4,6		

Tabla 4 Propiedades Bulón autoperforantes WELDGRIP

DIÁMETRO EXTERIOR	mm	30	30	40	52
DIÁMETRO INTERIOR	mm	16	11	16	26
SECCIÓN	mm^2	382	446	879	1337
CARGA DE ROTURA	kN	220	320	660	929
CARGA LÍMITE ELÁSTICO	kN	180	260	525	730
CARGA DE SERVICIO	kN	100	150	300	400
PESO	Kg	3,0	3,5	7,0	10,5
TIPO ACERO	ACERO St 550 / 750				

Tabla 5 Propiedades bulón autoperforante TITAN

2.3 BULONES DE FIBRA DE VIDRIO

El material del que están formados son compuestos de distintos tipos de resinas (poliéster, vinilo) y fibra de vidrio, que como podemos comprobar en las tablas que a continuación se adjuntan, les confiere una resistencia a tracción similar o algo superior a la del acero, peso muy inferior, módulo de elasticidad menor, y por último una resistencia al corte baja.

Foto 7 Bulón de fibra de vidrio

Por éstas características, los bulones de fibra de vidrio son especialmente útiles en los sostenimientos de excavaciones provisionales que posteriormente deberán ser ensanchadas, ya que pueden fácilmente ser recortados con cualquier medio mecánico de excavación utilizado (retroexcavadora, rozadora, ...).

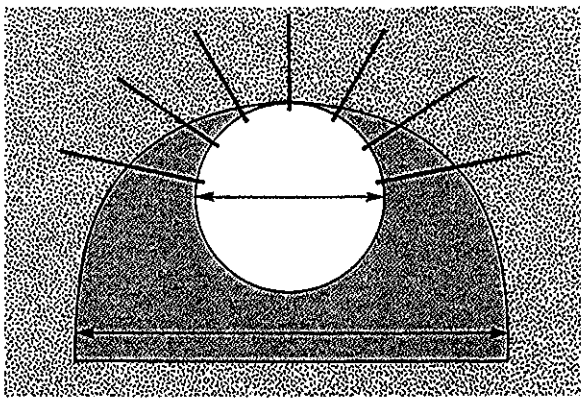


Figura 8 Ensanche de galería piloto

A continuación se presentan algunas características técnicas de estos bulones: (ver tablas 6 y 7).

DIÁMETRO EXTERIOR	mm	22	25
DIÁMETRO INTERIOR	mm	_	9
RESINA	Poliester (epoxi)		
VIDRIO	Tipo E		
CONTENIDO EN VIDRIO	75 %		
MÓDULO YOUNG	Mpa	35000	
ELONGACIÓN A LA ROTURA	%	2,5	
CARGA DE ROTURA	kN	300	325
RESISTENCIA A CORTE	kN	20	35

Tabla 6 Propiedades de Bulones de fibra DSI

También llevan ~~[illegible]~~ orificios para la lechada.

[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
DIÁMETRO	mm.	22	25	31
CARGA ROTURA	kN.	470	510	730
RESISTENCIA A CORTE	kN.	129	167	275
CARGA DE SERVICIO	kN.	150	170	270
PESO	Kg / m.	0,75	1,02	1,67
LONGITUDES	m.	Hasta 12 m.		
LÍMITE DE ROTURA	Mpa.	1040		
ELONGACIÓN A LA ROTURA	%	2,3		
MÓDULO DEFORMACIÓN	GPa.	47		

Tabla 7 Propiedades de Bulones de fibra WELDGRIP

2.4 BULONES SWELLEX

El Sistema Swellex (marca comercial) fue desarrollado a finales e los 70 por la casa Atlas Copco y comercializado en los primeros de los 80. Es el sistema que más auge está teniendo en los últimos tiempos, debido principalmente a la rapidez en su colocación, a pesar de su mayor precio.

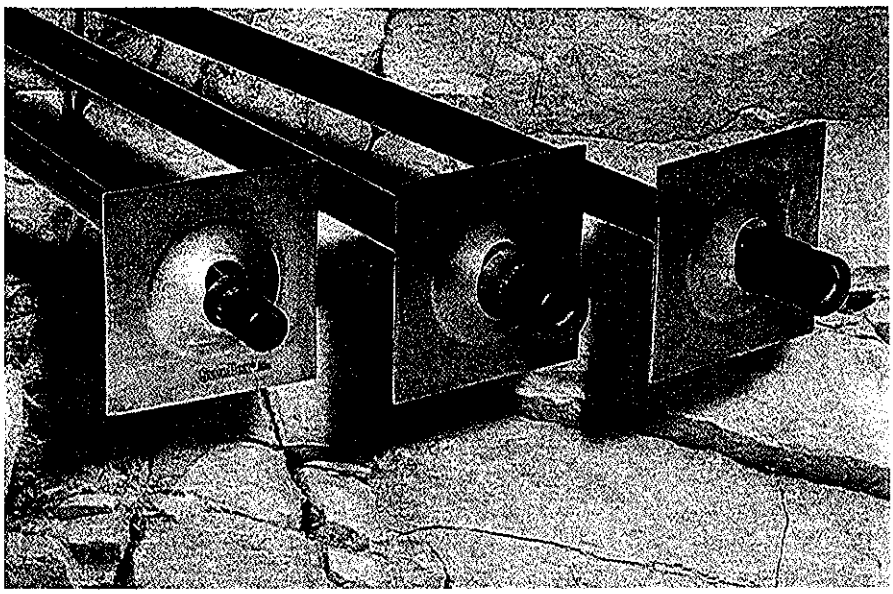


Foto 8 Bulón Swellex

Consisten en bulones de acero tubular, doblados longitudinalmente para reducir su diámetro. El sistema se compone de tubo, casquillos en ambos extremos, placa y como medios auxiliares el brazo de instalación y bomba de inyección a alta presión, neumática, hidráulica o eléctrica.

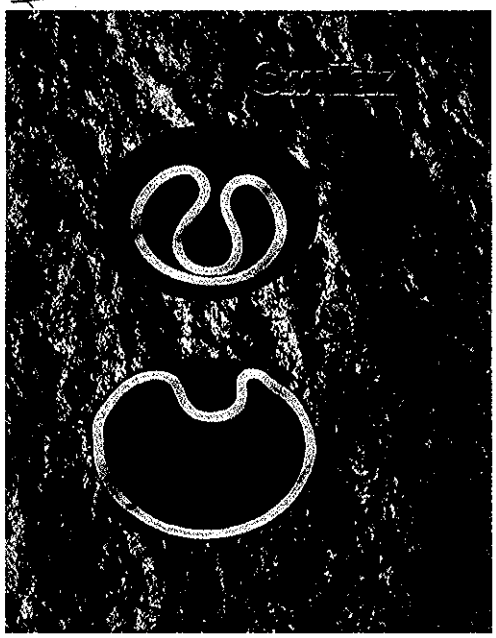


Figura 9 Expansión del Bulón Swellex

Una vez realizada la perforación se introduce el bulón ayudado por el brazo de instalación (ver foto 9) para pasar a bombear agua a alta presión (300 bares) por el interior del bulón, a través del orificio del casquillo. Finalmente el casquillo el bulón se expande hasta comprimir las paredes de la perforación, acortándose ligeramente su longitud y acomodándose a las irregularidades de las paredes (ver figura 9 y 10).

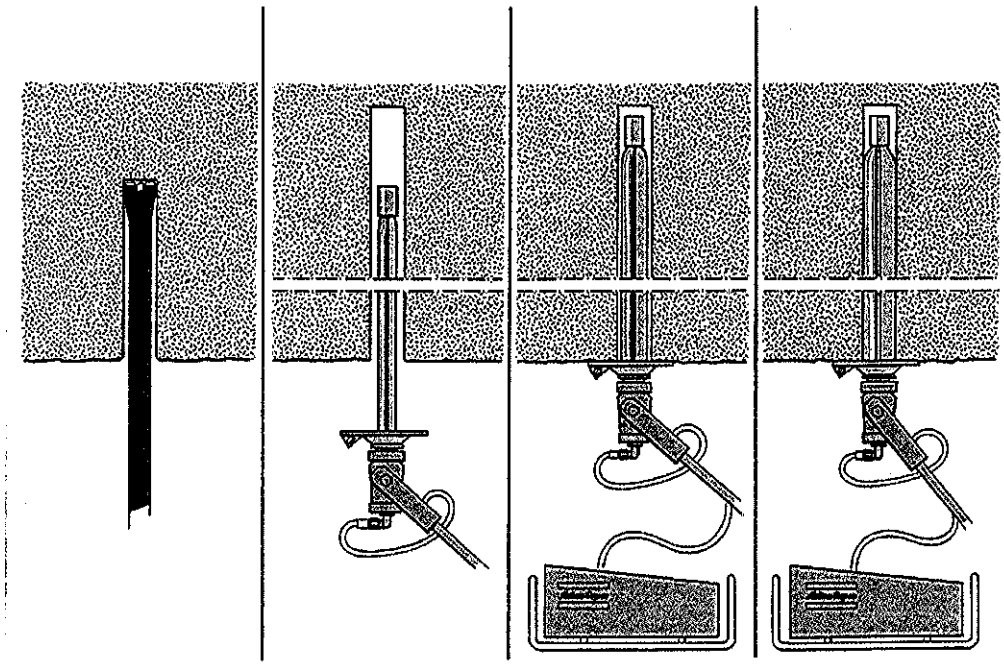


Figura 10 Fases de colocación de los bulones Swellex

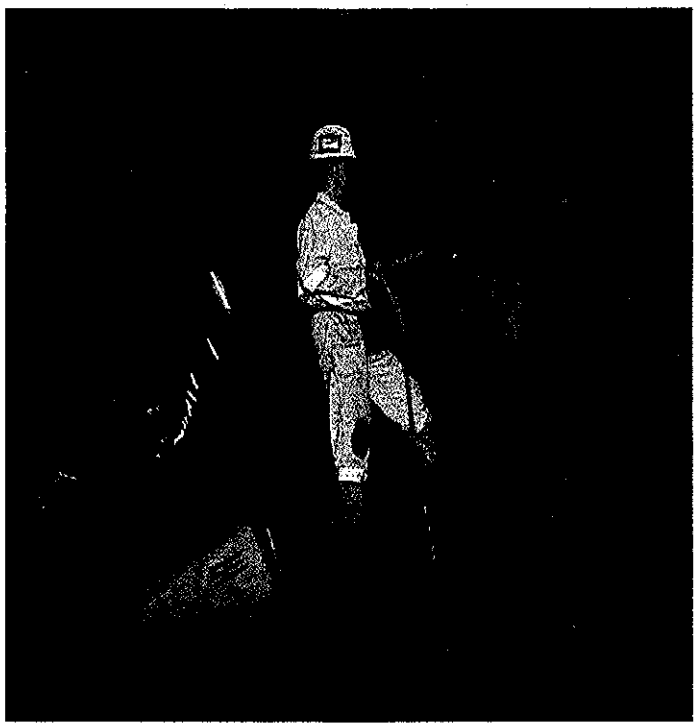


Foto 9 Detalle de bomba de inyección y brazo de instalación

De ésta manera, el bulón expandido transmite una tensión normal al terreno y una fuerza de rozamiento que se opone a desplazamientos relativos a lo largo del bulón.

Dependiendo de las necesidades existen siete tipos de bulones Swellex, cuyas características se recogen en la tabla adjunta.

- ***ESTANDAR SWELLEX***
- ***MIDI SWELLEX***
- ***SUPERSWELLEX***
- ***MANGANESO*** hasta 24 t.
- ***CONECTABLES***
- ***ACERO INOXIDABLE***
- ***CON FUNDA DE PLÁSTICO***

En un primer momento se introdujo el bulón Estándar Swellex de baja capacidad mecánica (100 kN) y con el tiempo han ido apareciendo otros productos (MIDI SWELLEX, SUPER SWELLEX) mejorando esta característica hasta alcanzar los 200 kN. También se ofrece la posibilidad de los CONECTABLES para longitudes superiores a las estándar (6 m) y los de ACERO INOXIDABLE y CON FUNDA DE PLÄSTICO para mejorar la durabilidad.

Actualmente se está utilizando el último producto que consiste en el bulón SWELLEX al MANGANESO (MN 12, MN 16, MN 24) que proporciona una mayor capacidad mecánica (120, 160, 240 kN) a la vez que una mayor deformabilidad (hasta 30% elongación a la rotura).

Además de ésta última cualidad muy interesante en terrenos que van a sufrir altas plastificaciones, lo que le hace interesante a este producto es principalmente su rapidez de colocación, ya que una vez ejecutado el taladro se tarda menos de 45 segundos en colocarlo.

A continuación se incluyen características técnicas de algunos bulones Swellex (ver tabla 8).

"Problema de durabilidad" por estar en contacto con el terreno.

DIAMETRO ORIGINAL	mm	41x 2	54x3	54x3	54x2		41x1
DIÁMETRO ÓPTIMO TALADRO	mm	35-38	45-51	45-51	45-51		35-58
DIÁMETRO TALADRO RECOMENDADO	mm	32-39	43-52	43-52	43-52	48-51	32-39
CARGA MÍNIMA ROTURA	Kn	100	120	200	160	200	100
ELONGACIÓN	%	15-20	20	15	20-30	20	20
LONGITUDES ESTANDAR	m	0,2-4	3-6	3-6		3	0,2-4
LONGITUDES DISPONIBLES	m	0,6-9	1,5-11	1,5-12			
PRESIÓN DE INFLADO	Mpa	30					

UN-24

240 <> L-lo. ϕ32

Tabla 1 Propiedades bulones Swellex

A continuación se presenta un cuadro comparativo de algunos tipos de Swellex (ver tabla 9).

Rock Bolt type	Ultimate Load		Elongation (A5)		Work Index	
	kN	Increase	%	Increase	kN x %	Increase
Standard Swellex	100		15		1500	
Swellex Mn12	120	+20%	25	+66%	3000	+100%
Midi Swellex	120		20		2400	
Swellex Mn15	150	+25%	25	+25%	3750	+56%
Super Swellex	190		15		2850	
Swellex Mn23	230	+21%	25	+66%	5750	+102%

Tabla 9 Comparación propiedades bulones Swellex

Es en las rocas fracturadas cuando presenta dificultades, ya que algunos casos parece que la tensión que imprime el bulón a las paredes del taladro provoca el desconche de la roca fracturada más superficial. Este fenómeno puede solucionarse mediante la colocación de manguitos en el tramo más superficial, que impidan la expansión en ésta zona (ver figura 11).

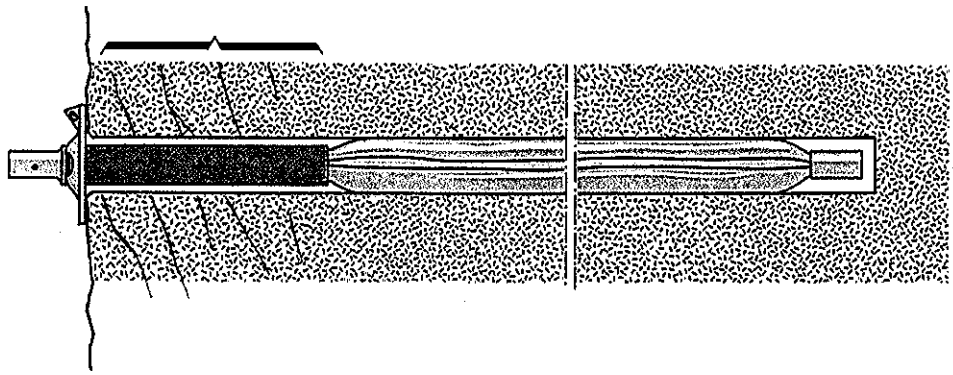


Figura 11 Protección de macizos fracturados mediante manguitos Swellex

2.5 BULONES SPLIT-SET

En último lugar cabe citar como otro tipo de bulón friccional al comercializado por la casa INGERSOLL, con el nombre de SPLIT SET.

Es un bulón de instalación muy sencilla, puesto que se introduce a percusión en un taladro de diámetro algo inferior al del bulón (ver figura 12).

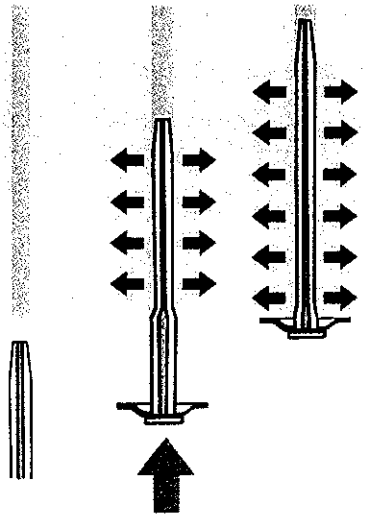


Figura 12 Instalación de los bulones Split-Set

A continuación se incluye algunas de las características técnicas de estos bulones (ver tabla 10).

DATOS	UNIDAD	SS39	SS46	SS45
DIÁMETRO PERFORACIÓN	mm	31-33	35-38	41-45
CARGA ROTURA MEDIA	Tn	10,9	12,7	16,3
CARGA ROTURA MÍNIMA	Tn	7,3	9,1	13,6
CARGA DE TRABAJO	Tn	2,7-5,4	2,7-5,4	4,5-8,2
LONGITUD	m	0,9-2,4	0,9-3,0	0,9-3,6
DIÁMETRO EXT. TUBO	mm	33	39	46
PROTECCIÓN GALVANIZADO		si	si	Si
ACERO INOXIDABLE		no	si	no

Tabla 10 Propiedades bulones Split Set

Como se puede ver el mayor inconveniente de éstos bulones es su baja capacidad mecánica, que unido a la dudosa durabilidad y la dependencia de unas dimensiones muy precisas en las dimensiones del taladro, lo hace un bulón poco utilizado en la ingeniería civil.

3.- VENTAJAS E INCONVENIENTES

Dejando aparte los de anclaje puntual y los de cable por encontrarse en desuso actualmente en la ingeniería civil, la relación de tipos de bulón más recomendable para cada caso es la que sigue:

- ***CAPACIDAD DE CARGA (barra, autoperforantes, fibra de vidrio)*** tracción
- ***DURABILIDAD (barra, fibra de vidrio)*** → con capa de protección (lechada, resina)
- ***DEFORMABILIDAD (Swellex, Split-set)***
- ***TERRENOS DIFÍCILES (Autoperforantes)***
  → perforación inestable
- ***TEMPORALES (Fibra de vidrio, Swellex)*** → Facilidad de corte
- ***RAPIDEZ (Swellex, Split-Set)***
- ***FIABILIDAD (Barra)***
- ***LONGITUD VARIABLE (Autoperforantes, Swellex conectables)***

En cuanto a capacidad de carga, es claro que los de barra, autoperforantes y fibra de vidrio, consiguen elevadas resistencias a tracción en comparación con el resto (ver gráfico 1).

En cuanto a la durabilidad, los de adherencia superan a los friccionales debido a la protección que supone el relleno del espacio anular entre el bulón y la perforación, mediante resina o lechada de cemento. Como excepción cabe nombrar los Swellex de aluminio.

En cuanto a túneles en los que el sostenimiento va a estar sometido a elevadas convergencias (alta plastificación), los bulones más recomendables son los Swellex y Split Set por su alta elongación a la rotura. Sobre éste aspecto cabe señalar que túneles en estas condiciones son más bien escasos. En el gráfico 1, que ha continuación se adjunta, se puede observar los resultados de los ensayos a rotura sobre distintos tipos de bulones. Por un lado resaltar la alta capacidad mecánica de los bulones de barra y fibra de vidrio, pero con reducida elongación, y por otro la baja capacidad mecánica de los Swellex (salvo los Yielding Super Swellex); a cambio poseen una elevada elongación a la rotura.

CURVAS CARACTERÍSTICAS DE DIVERSOS BULONES (Stillborg,1990)

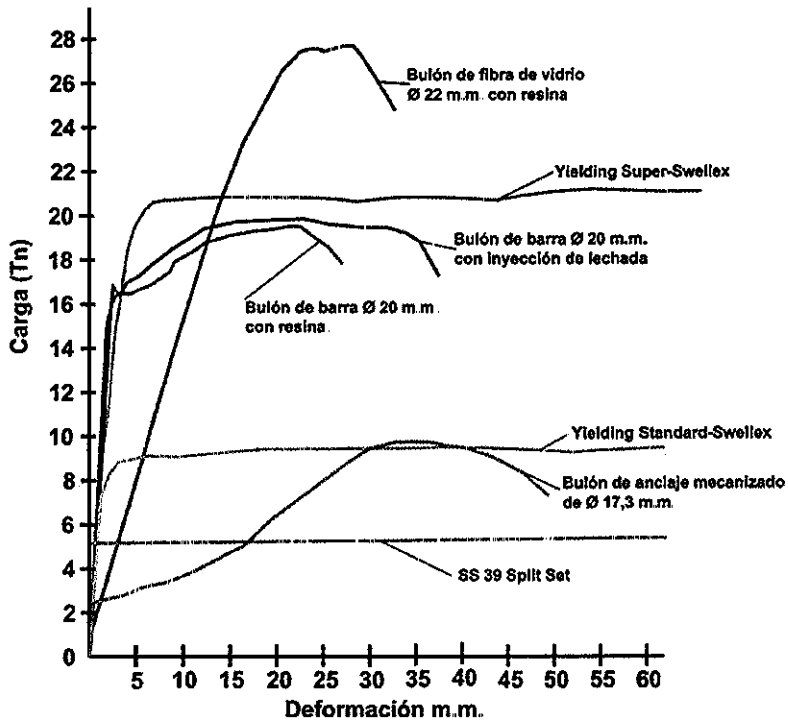
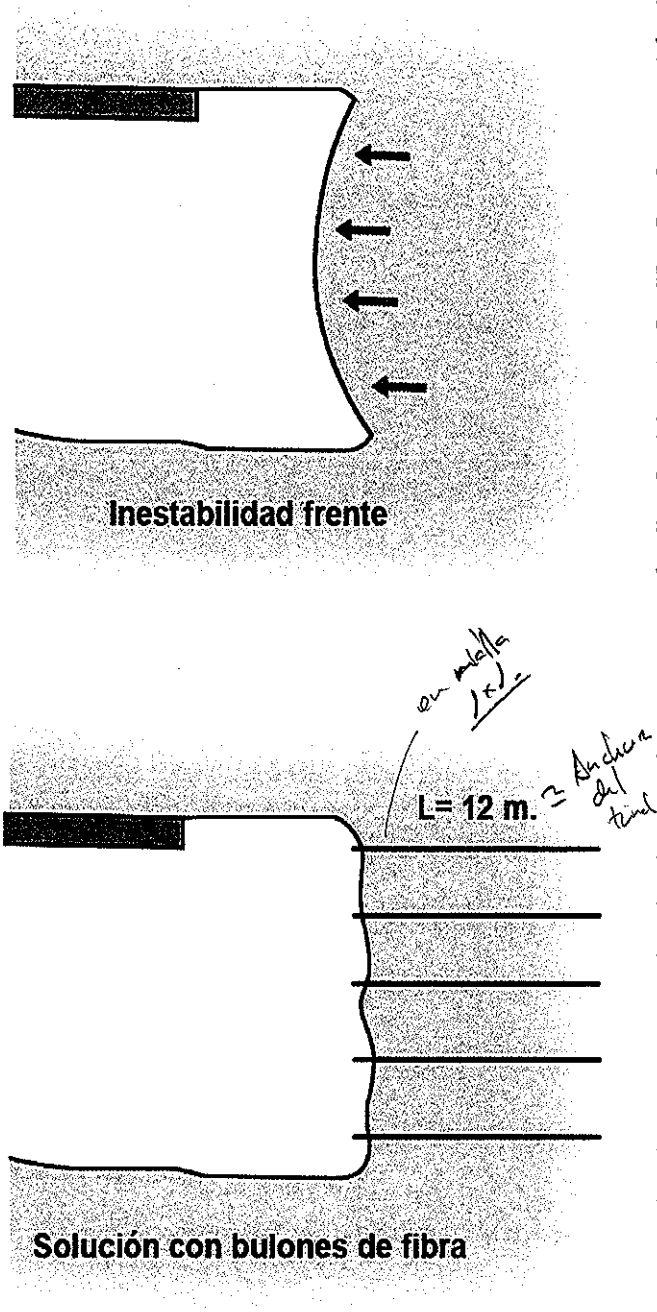


Gráfico 1 Curvas características de diversos bulones (Stillborg, 1990)

Para terrenos difíciles, denominados como tales aquellos en los que las paredes de la perforación no es estable, dificultando la introducción del bulón, los más recomendables son los autoperforantes, ya que la perforación e introducción del bulón se hace en una sola operación.

Para el sostenimiento provisional de galerías de avance o frentes de avance en terrenos de muy mala calidad, los más utilizados por su baja resistencia al corte son los de fibra de vidrio, aunque también suelen ser utilizados loa Swellex. Una utilización muy común de los bulones de fibra de vidrio es la de refuerzo de los frentes e avance. Cuando el terreno, por sus malas características geotécnicas, presenta inestabilidades del frente o se quieren reducir las preconvergencias del frente, es útil la rigidización de éste último mediante la introducción de bulones de fibra de vidrio de longitud no inferior al diámetro del túnel (ver figura 13).



Por su sencillez y rapidez de colocación los más recomendables son los Swellex y los Split-Set.

En macizos que no van a sufrir especiales plastificaciones las solución que menos fallos suele dar durante la puesta en obra son de barra de acero con relleno de resina. Los de relleno de lechada de cemento suelen sufrir pérdidas en la inyección sin que se consiga rellenar el espacio anular. Por su parte, los bulones de fricción (Swellex y Split-Set) dependen su eficacia en gran medida de las dimensiones del taladro.

Si en algún momento, para sostenimiento de caídas p.ej., se requiere bulones de longitudes superiores a las previstas en proyecto que, por regla general, suelen rondar los 4 o 5 metros, los bulones autoperforantes y las barra Gewi tienen posibildad de prolongarse mediante manguitos puesto que, la corruga sirve también de rosca. Los Swellex tienen un tipo de bulón que también permite la conexión. Para casos excepcionales de longitudes superiores a los 10 metros se debe de acudir a los cables.

Figura 13 Estabilización y rigidización del frente de excavación con bulones de fibra de vidrio

4.- TENDENCIAS ACTUALES

Una práctica recomendable para un gran número de proyectos es la de prever distintos tipos de bulones, sobre todo en aquellos túneles donde las características geológicas-geotécnicas son complicadas.

A continuación se exponen los tipos de bulones que en la actualidad se están proyectando o ejecutando.

- Predomina el bulón de barra con longitudes de 4 metros. Los de 5 metros exigen alturas libres importantes en el avance.
- Por rapidez en la colocación se impone el Swellex y dentro de éste tipo cabría señalar el de Manganeso, por su mayor capacidad de carga y mayor elongación.
- En terrenos de mala calidad (perforaciones no estables) se propone el autoperforante, tanto en bulones como en paragüas de avance.
- Para estabilización del frente es muy común la Fibra de vidrio por su facilidad de corte y longitudes (12 m.)
- En ejecución por fases, bulones temporales de Swellex (se cortan con cierta facilidad).

Precio swellex 50% + que 1 m
Autoperfo. 2 doble que el de 5 m.

5.- ASPECTOS CONSTRUCTIVOS

◆ *LONGITUD-GÁLIBOS*

De una manera empírica, en la mayor parte de los casos la longitud de los bulones suele rondar el tercio de la anchura de la excavación lo que supone para la mayor parte de los túneles actuales, longitudes de 4 a 5 metros.

En terrenos con importantes espesores de plastificación las longitudes se pueden alargar hasta alcanzar la mitad de la anchura de excavación.

En cualquier caso, la longitud vendrá dada por las dimensiones de las pirámides de roca en terrenos de comportamiento elástico (UNWEDGE), y por los cálculos tensodeformacionales en el caso de terrenos de comportamiento plástico.

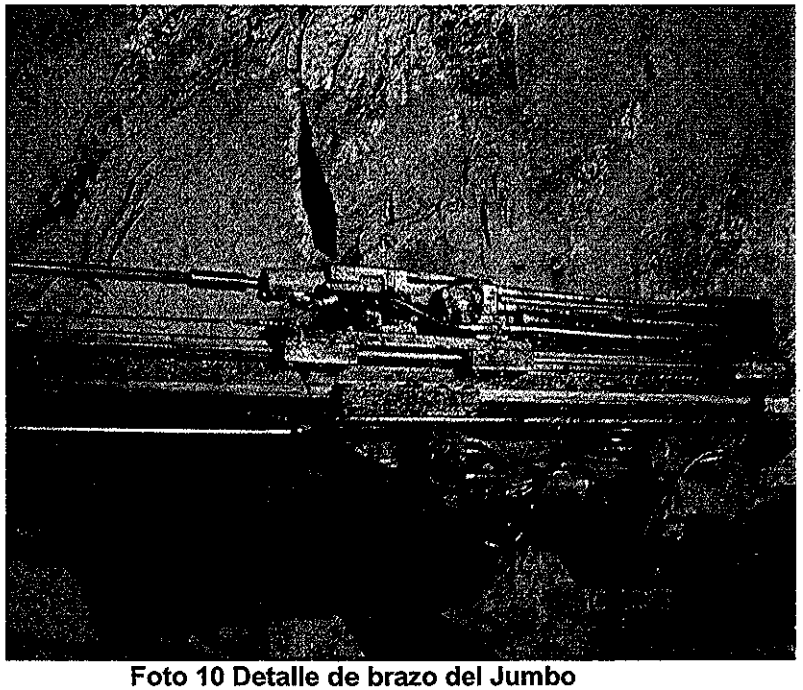


Foto 10 Detalle de brazo del Jumbo

De todas maneras, en el proyecto de túneles se tendrá en cuenta la longitud de los bulones previstos, a la hora de diseñar las dimensiones de las fases de excavación (avance, destroza). Para longitudes de bulón de 4 metros la altura mínima de la excavación en avance es de 5, 8 metros, para 5 metros es de 6,8 metros y para 6 metros, 7,8 metros. El motivo es, que para los bulones de la clave que son los que condicionan la altura, a la longitud del bulón hay que sumarle la longitud del martillo en cabeza y las conexiones (ver figura 14).

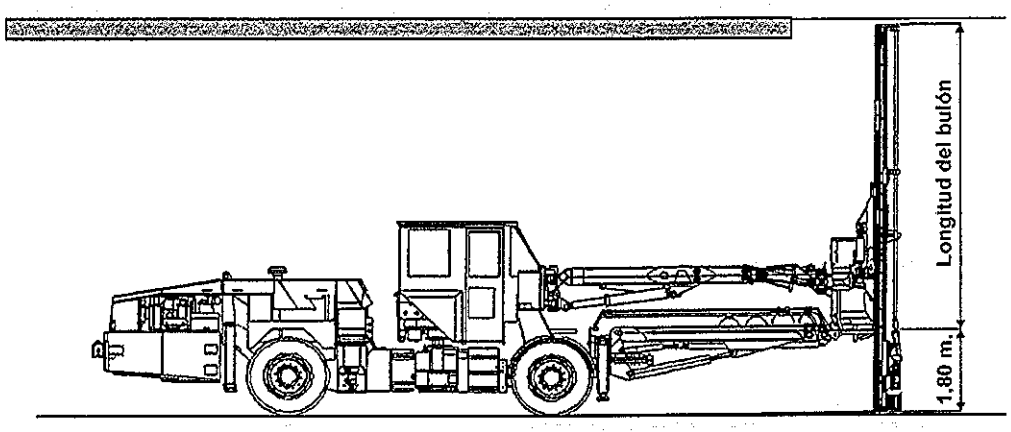


Figura 14 Limitación de la longitud de los bulones por el gálibo en la fase de avance

- ***ORIENTACIÓN***

Por regla general y con el fin de sistematizar la producción y por facilidad en el replanteo la mayoría de los bulones se colocan radiales. No obstante en el caso de inestabilidad de bloques en los hastiales ésta orientación suele corregirse, labor que debe ser realizada por el equipo de obra a la vista de las orientaciones reales de los planos de discontinuidad (ver figura 15).

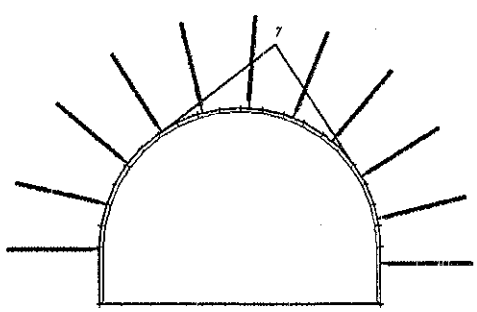


Figura 15 Disposición de los bulones en la sección del túnel

◆ *ESPACIADOS (Clasificaciones, cálculos). Longitud de pase*

Para sistematizar los trabajos de replanteo y ejecución de los bulones, los espaciados tanto transversales como longitudinales al túnel, suelen ser regulares, para una misma calidad de macizo rocoso.

Es habitual discretizar el túnel en varios tipos de terrenos atendiendo a su calidad (RMR, Q), o por dominios estructurales, resultando para cada uno de ellos una sección tipo a aplicar Normalmente el número de éstas secciones tipo suelen oscilar entre tres y cinco. Menos de tres secciones se podrían conseguir en túneles muy cortos o en macizos de homogeneidad extraordinaria. Más de cinco, resulta excesivo e innecesario por las pequeñas diferencias entre cada una de ellas.

Para cada una de las secciones se suele definir un espaciado longitudinal y otro transversal, que pueden repetirse en algunas secciones. Estos espaciados suelen variar entre 1,0 y 3,0 metros, dando mallas de 1x1 en los casos de terrenos de muy baja calidad, y de 2,5x3,0 en los de muy buena, lo que suponen densidades de 1 Ud./ m^2 hasta 1 Ud / 7.5 m^2.

Es recomendable que los espaciados longitudinales coincidan con la longitud de pase para cada sección tipo.

Además de los bulones previstos en cada sección suele ser habitual que se coloquen otros adicionales para el sostenimiento o refuerzo de bloques que han quedado fuera de la malla, por lo que es conveniente que se contemple una unidad en el presupuesto de M.L. de bulón de refuerzo a un precio distinto de los sistemáticos.

◆ *VARIOS TIPOS*

Salvo en los túneles cortos y de geología sencilla, en el resto se recomienda prever la utilización de varios tipos de bulones. Ya se ha visto en apartados anteriores las ventajas de cada bulón en cada caso, siendo muy normal encontrarse en un túnel largo con complejidad geológica, bulones de barra, Swellex, de fibra de vidrio y autoperforantes.

◆ *ACTIVOS-PASIVOS?*

La mayor parte de los bulones se colocan pasivos. En terrenos con convergencias, no es preciso un pretensado puesto que las propias deformaciones del terreno lo pondrá en carga. En cambio, en régimen elástico, para sujeción de bloques de roca es preferible un pretensazo, o al menos una pequeña tensión para evitar desplazamientos del bloque.

Al menos un peq apriete para ver si está trabajando.

Sin embargo, el exigir que los bulones sean activos es beneficioso para el control de obra puesto que, de éste modo, se detectan aquellos bulones que tienen fallos de ejecución.

◆ ***CONTROL-PRUEBA ARRANCAMIENTO***

Es recomendable prever en proyecto la realización de pruebas de arrancamiento para cada tipo de bulón y terreno en un número cercano a las diez unidades para cada tipo de bulón. Es en las pruebas de arrancamiento donde se mide la adherencia bulón-terreno y conviene realizarlas con longitudes de bulón corta para no sobrepasar la resistencia a tracción del material.

Inicialmente para el prediseño se puede partir de valores extraídos de la bibliografía. Por ejemplo en algún caso se habla de adherencias entre 40 y 60 kg/cm^2 para bulones de resina, y de 5 a 30 kg/cm^2 para los cartuchos de mortero de cemento. A éste respecto cabe citar los resultados de ensayos de adherencia realizados en el Túnel de Arlabán de 3440 metros de longitud de la futura autopista de Peaje AP-1 Vitoria-Eibar. Los ensayos se llevaron a cabo con bulones de barra y cartuchos de resina, y con bulones Swellex, sobre una roca blanda de unos 100 kg/cm^2 de resistencia a compresión simple y RQD 90%. Los resultados se recogen en las tablas 11, 12 y 13, adjuntas:

TIPO	DIÁMETRO [illegible]	LONGITUD [illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
RESINA	38	500	596	17,5	29,3	35,00	17,77	21,21
RESINA	38	500	596	17,5	29,3	35,00	17,77	21,21
RESINA	38	500	596	5,0	8,3	10,00	5,08	6,06
RESINA	38	1000	1193	25,0	20,9	25,00	12,69	15,15
RESINA	38	1000	1193	20,0	16,7	20,00	10,15	12,12
RESINA	38	1000	1193	12,5	10,4	12,50	6,35	7,58

Tabla 11 Resultados prueba de arrancamiento en bulones de barra y resina

Para pruebas de arrancamiento se hace con bulbos cortos, ya que si no se no pone la barra entera de cimentar el bulbo.

Cm

TIPO SWELLEX	DIÁMETRO PERFORACIÓN (mm)	LONGITUD (cm)	S (cm²)	Carga (Tn)	Tensión (kg/cm²)	Radial (N/mm²)	Tangencial (N/mm²)	Radial (MPa)
MN16	51	104	596,9	11,7	7,07	11,33	4,28	6,86
MN16	51	89	596,9	9,9	7,00	11,22	4,24	6,80
MN16	51	59	596,9	11,8	12,55	20,10	7,60	12,18
MN16	51	59	1193,8	11,3	11,99	19,20	7,26	11,64
MN16	51	64	1193,8	12,0	11,72	18,78	7,10	11,38
MN16	51	79	1193,8	9,3	9,50	15,22	5,76	9,22
MN16	51	49	785,08	9,5	11,92	19,10	7,23	11,58
MN16	51	64	1025,4	13,0	9,33	14,95	5,66	9,06

Tabla 12 Resultados prueba de arrancamiento en bulones Swellex Mn-16

< Adh. que un bulón de barra con resina.

TIPO SWELLEX	DIÁMETRO PERFORACIÓN (mm)	LONGITUD (cm)	S (cm²)	Carga (Tn)	Tensión (kg/cm²)	Radial (N/mm²)	Tangencial (N/mm²)	Radial (MPa)
MN16	51	387	6200	15,5	Rotura casquill	Rotura casquill	Rotura casquill	Rotura casquill
MN16	52	388	6338	15,2	2,40	3,92	1,45	2,37
MN16	52	388	6338	16,4	2,59	4,23	1,57	2,56
MN16	52	388	6338	16,4	2,59	4,23	1,57	2,56
MN16	52	388	6338	16,8	Rotura casquill	Rotura casquill	Rotura casquill	Rotura casquill
MN16	52	388	6338	17,6	Rotura casquill	Rotura casquill	Rotura casquill	Rotura casquill

Tabla 13 Resultados prueba de arrancamiento en bulones Swellex MN-16

La rotura (- long. del bulbo es gde.

El resumen de las pruebas realizadas es que para los bulones de resina la tensión de adherencia última,oscila entre 10 y 30 kg/cm^2, mientras que para los Swellex lo hace entre 7 y 16 kg/cm^2 inferiores a los referidos en la bibliografía. Por otro lado se puede observar en la tabla 13, que los valores de tensión de adherencia calculados, no son válidos puesto que

se produjo la rotura del material al alcanzar la resistencia a tracción (16 tn) `por tratarse de Swellex MN-16. El motivo se encuentra en las excesivas longitudes utilizadas (388 cm) para el ensayo.

En cuanto al control durante la obra, se suelen realizar un ensayo por cada 50 unidades de bulón colocado. En estos controles es usual encontrase con un índice de fallos del 10%.

- ***INSTRUMENTACIÓN ?***

Existen dispositivos denominados células de carga que, colocadas entre la placa de reparto y el terreno, nos dan en todo momento la tensión real a la que trabaja el bulón en la zona más superficial de la roca. No es habitual su utilización, siendo más frecuente la observación de los elementos externos como la placa y hormigón circundante.

En cualquier caso, en casos de importantes convergencias, en zonas concretas, no está de más su previsión.

6.- DIMENSIONAMIENTO

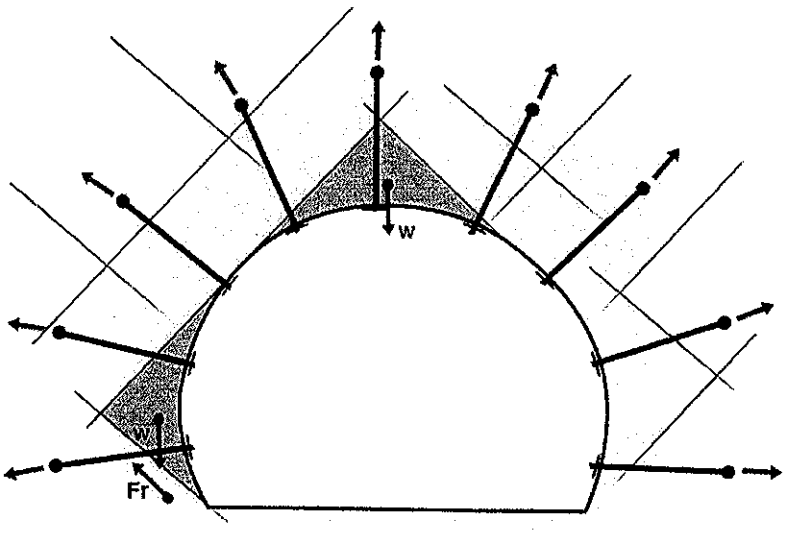
Los bulones tienen su mayor aplicación en sostenimientos de túneles en rocas fracturadas y en régimen elástico. En el resto de los casos, su eficacia es escasa o dudosa.

El cálculo de la fuerza de anclaje necesaria, y por lo tanto el nº de bulones a colocar, se realiza mediante ecuaciones simples de equilibrio de fuerzas en las que intervienen:

- Peso de la pirámide roca inestable
- Resistencia al corte de los planos
- Empuje del agua
- Fuerza de anclaje

La resolución de estas ecuaciones se pude realizar bien gráfica- analíticamente, o bien mediante los programas existentes actualmente en el mercado, y en general no entrañan dificultad alguna.

De las cuatro acciones señaladas, las tres primeras son conocidas y la cuarta (fuerza de anclaje) es la incógnita.



Para determinar el peso de las pirámides se requiere un conocimiento detallado de la estructura del macizo rocoso y de las características geométricas de las familias de las discontinuidades (dirección de buzamiento, buzamiento, continuidad según rumbo y buzamiento, etc,).

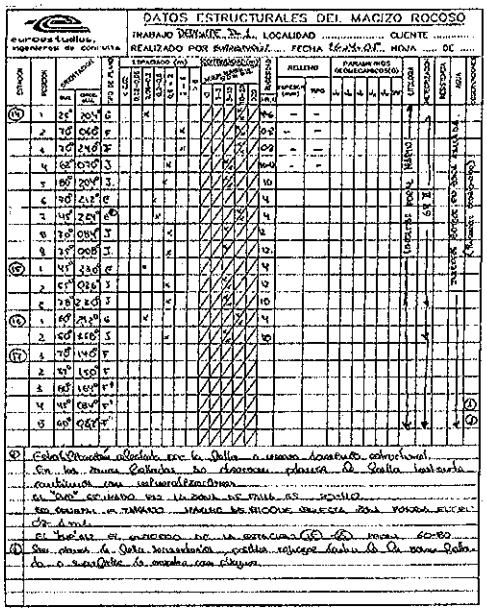
Figura 16 Esquema de fuerzas

En el caso de la resistencia al corte de los planos (discontinuidades) es indispensable conocer con la mayor precisión posible el estado de los mismos (abiertos, cerrados,

sellados, tipos y espesor de rellenos, rugosidad, ondulación, meteorización de los labios, etc,).

Por lo tanto, para el diseño de los bulones, como de cualquier otro elemento de sostenimiento, se hace imprescindible contar con un conocimiento exhaustivo de la geología y geotecnia del terreno que se ha de atravesar.

Para ello, en primer lugar, se deberá disponer de una geología de superficie de detalle.



La base cartográfica irá acompañada de un listado de datos estructurales diferenciados por dominios estructurales. Además de los datos de orientación de las discontinuidades es preciso registrar sus continuidades, aperturas, rellenos, rugosidades, etc.

La investigación de superficie es preciso acompañar con un reconocimiento en profundidad mediante sondeos con recuperación de testigo, en los que se pretenderá correlacionar los datos de superficie con los obtenidos en profundidad, y en especial en lo relativo a las discontinuidades y su estado.

Figura 17 Datos estructurales del macizo rocoso

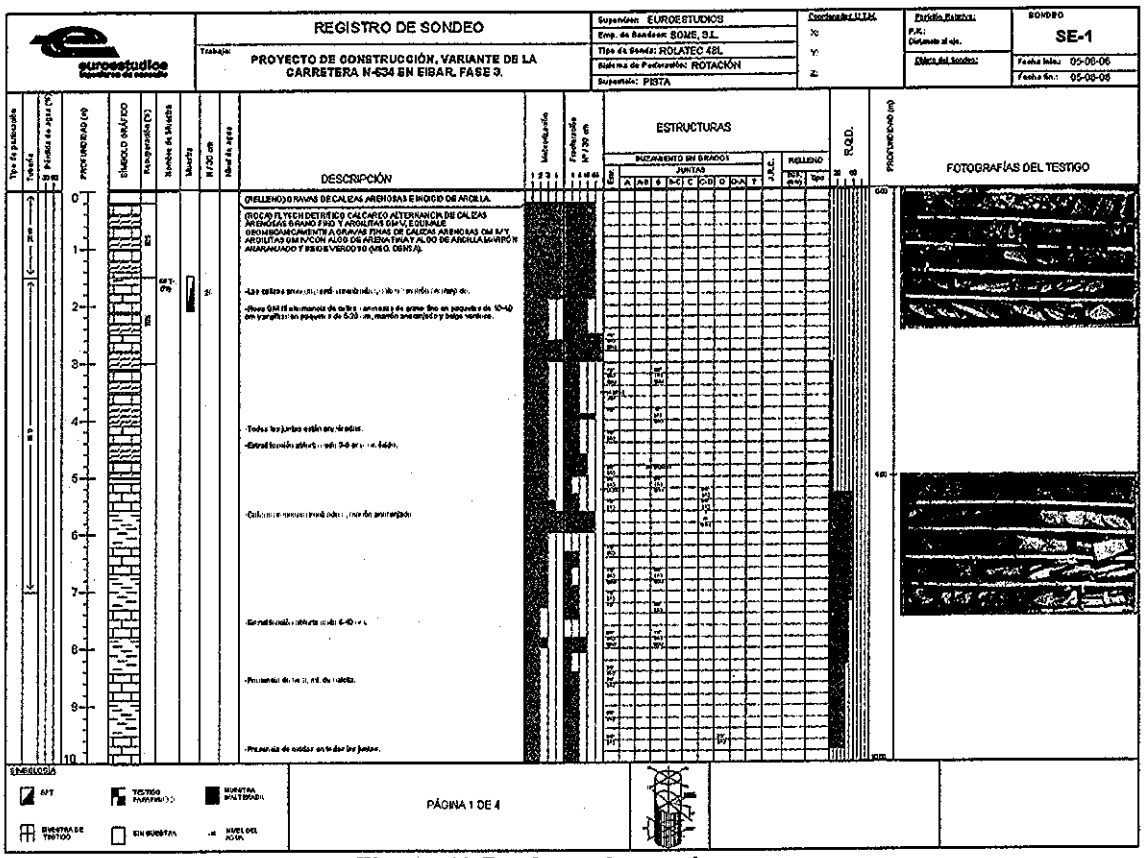


Figura 18 Registro de sondeos

Con la geología de superficie y la investigación en profundidad (que puede complementarse con medios geofísicos) se elaborará un perfil longitudinal interpretado, cuyo objetivo final es el de tramificar el túnel en tramos geotécnicamente homogéneos.

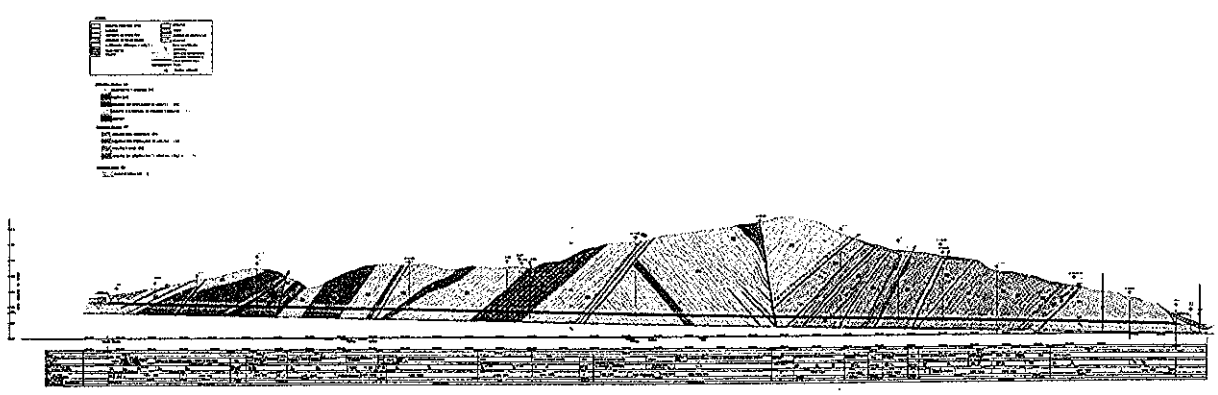


Figura 19 Perfil geológico

Finalmente, por cada dominio estructural se deberá disponer de la estructura del macizo en profundidad, con todas las familias de discontinuidades y sus características geotécnicas.

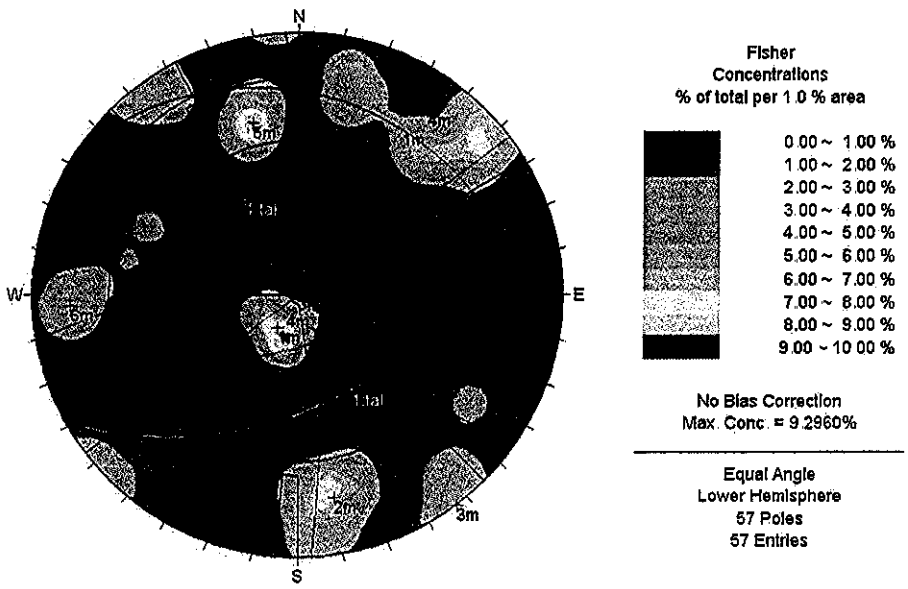


Figura 20 Familias de discontinuidades

Las distintas familias de discontinuidades junto con la dirección del túnel se representará en proyección estereográfica para analizar las distintas inestabilidades provocadas por la excavación en cada tramo.

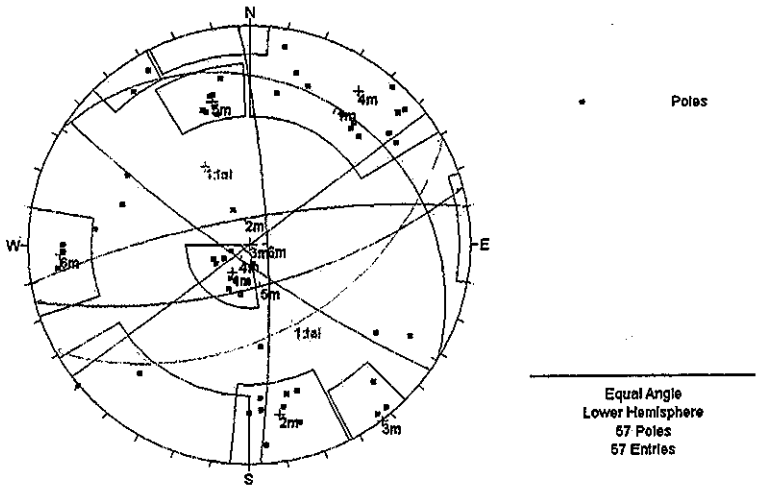


Figura 21 Proyección estereográfica de los planos

Una vez concluida esta labor inicial de toma de datos y de diagnóstico se estaría en condiciones de dimensionar las distintas secciones resistentes para cada tramo o dominio estructural en la fase de proyecto.

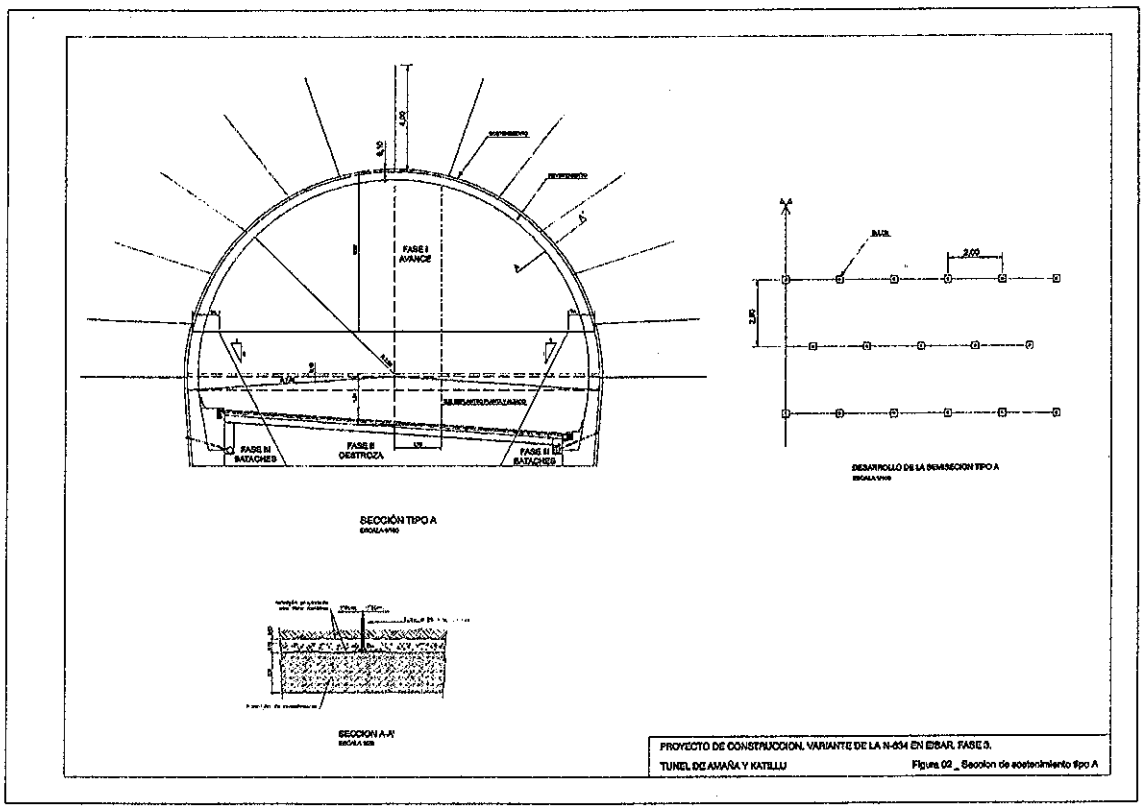


Figura 22 Sección tipo A

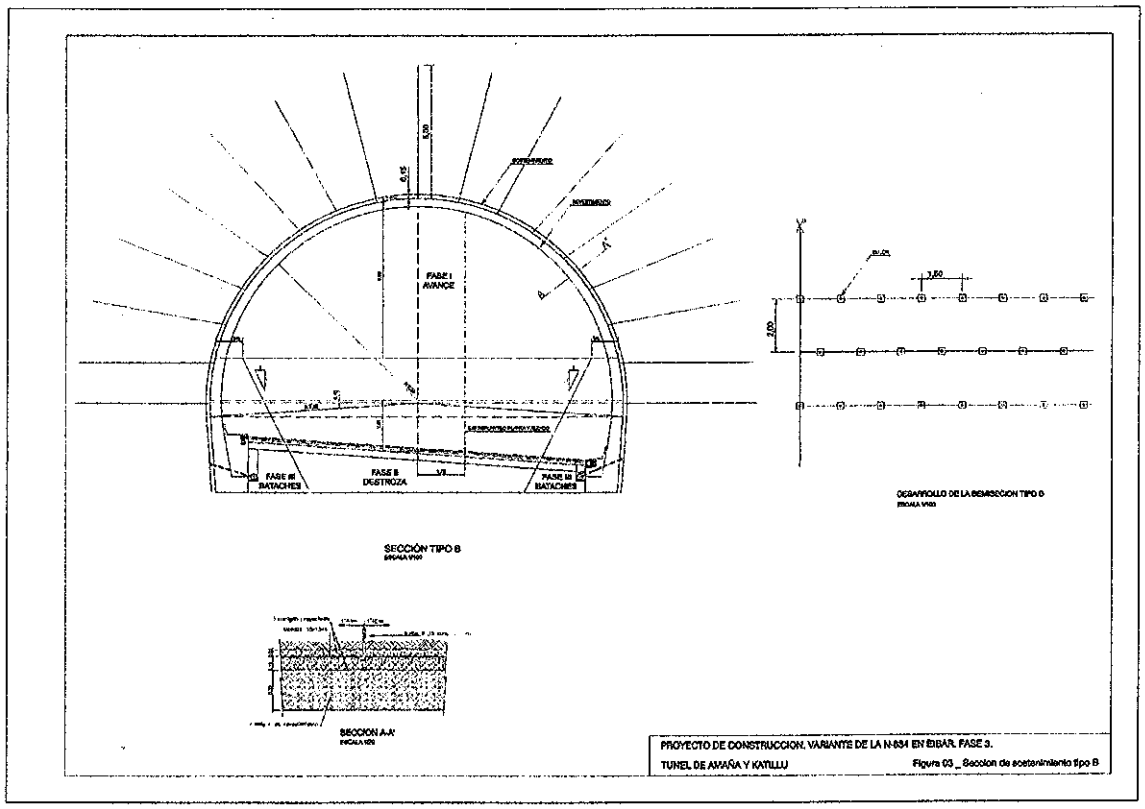


Figura 23 Sección tipo B

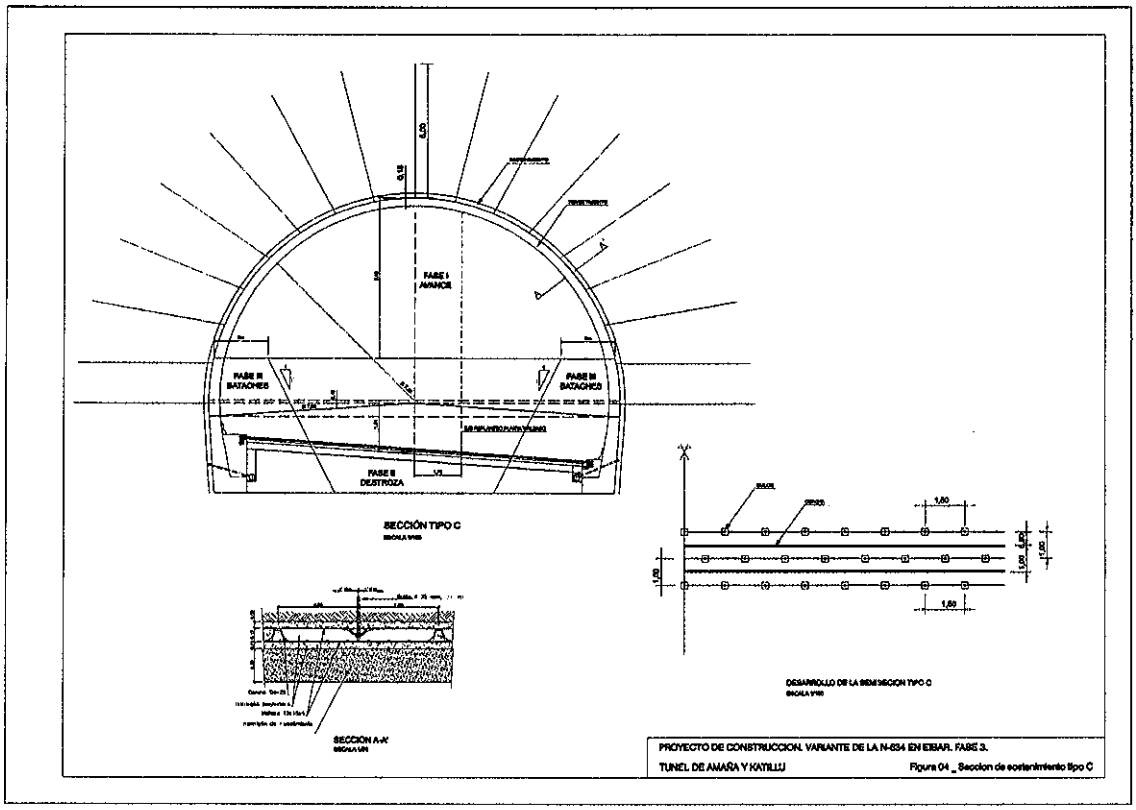


Figura 24 Sección tipo C

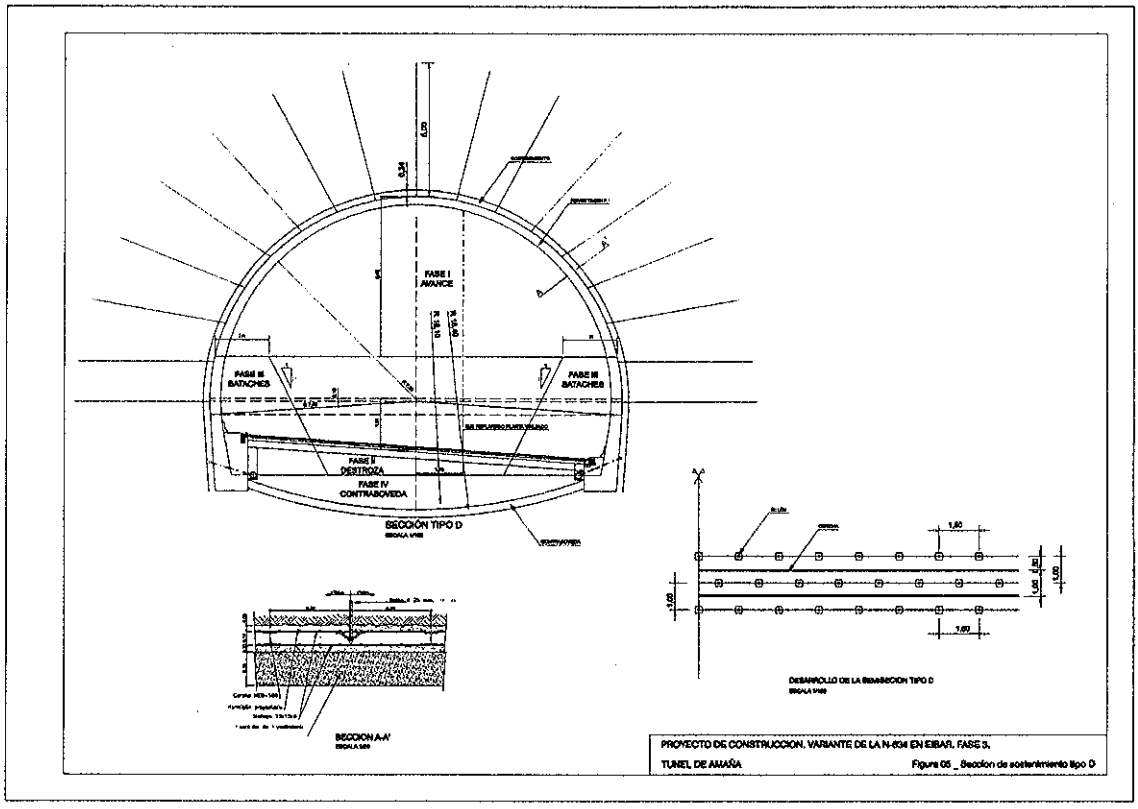


Figura 25 Sección tipo D

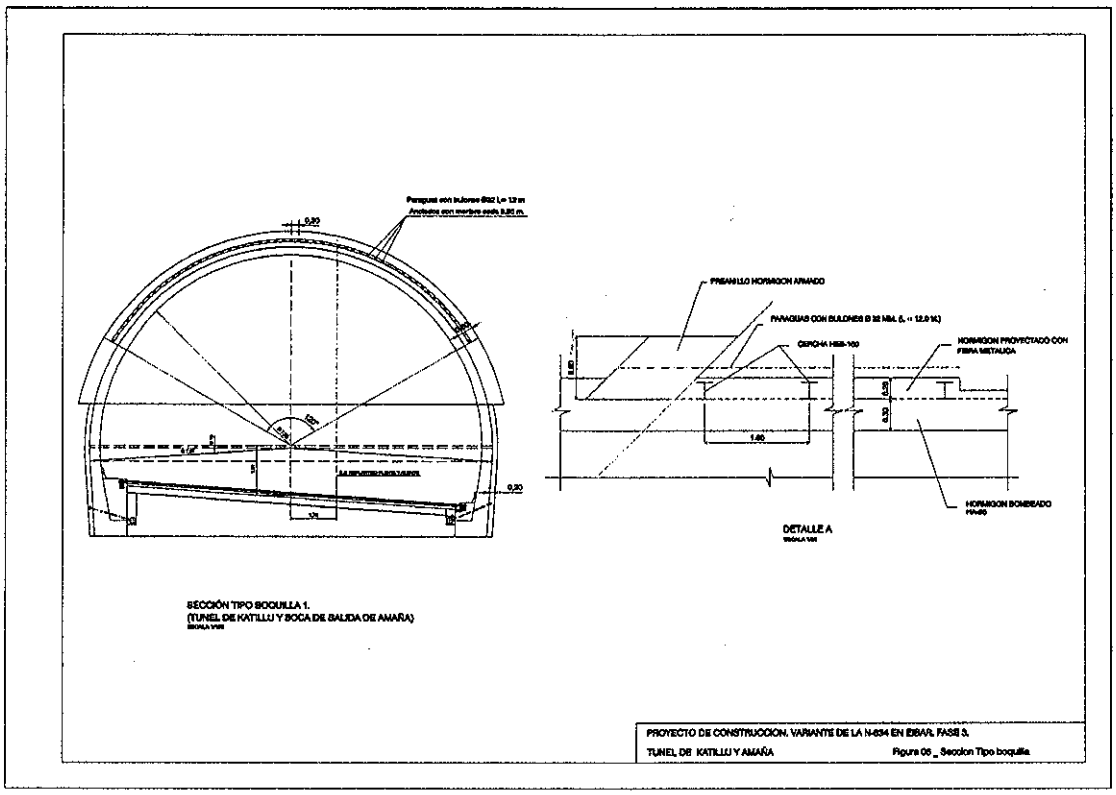


Figura 26 Sección tipo Boquilla

Durante la construcción, estos datos deben ser revisados por lo que es preciso realizar un levantamiento de cada frente de excavación y en su caso recalcular la sección si existieran diferencias sustanciales.

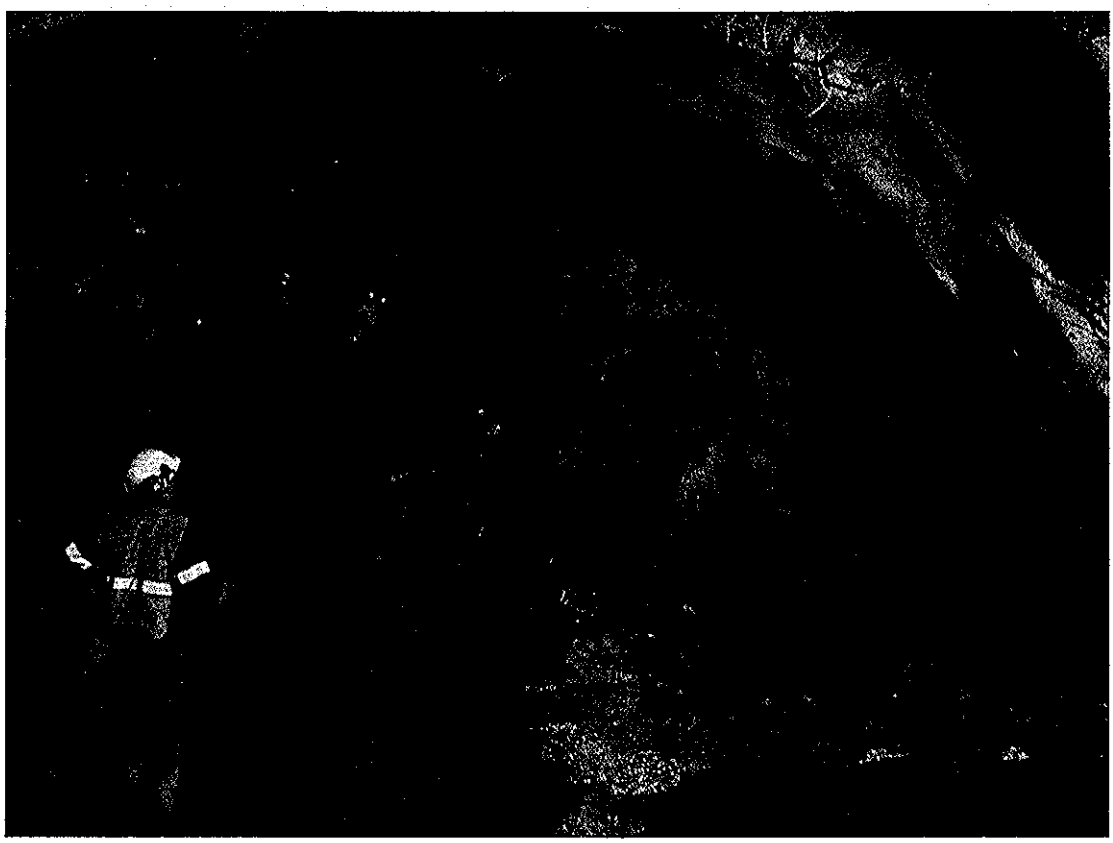


Foto 11 Levantamiento geológico del frente

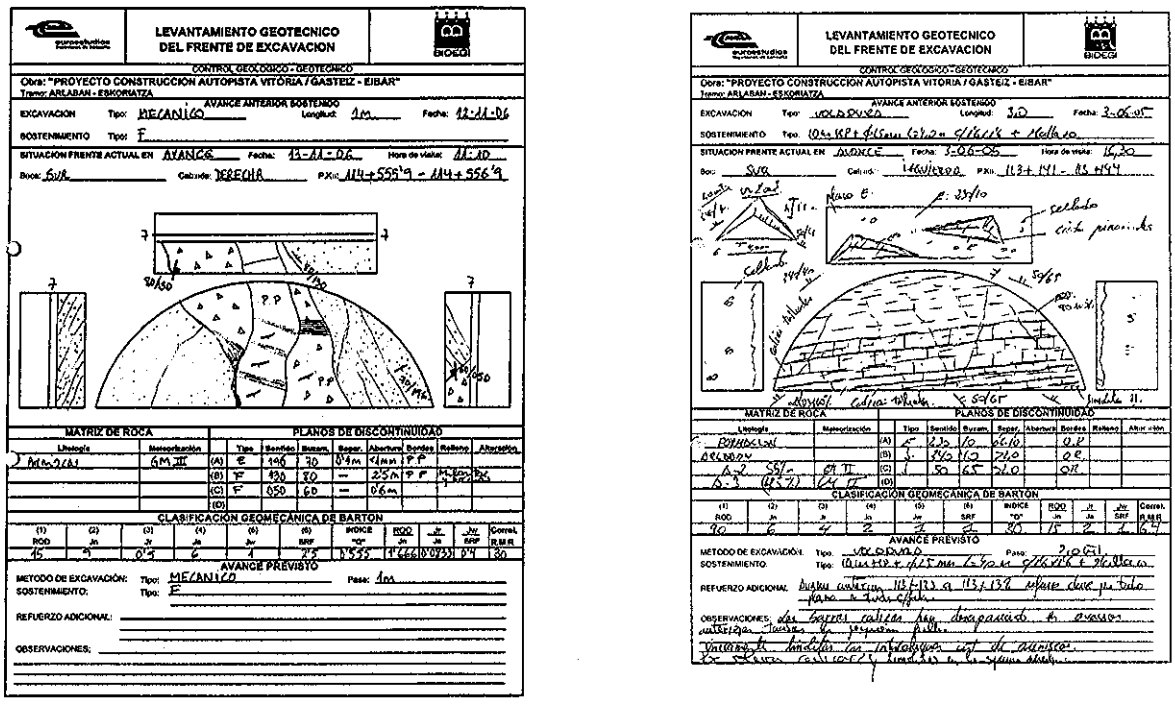


Figura 27 Fichas geológicas del frente

Una vez determinada con la proyección estereográfica las distintas combinaciones posibles de discontinuidades que cinemáticamente se inestabilizan con la excavación del túnel se requiere introducir las características geométricas de los planos (continuidades) y las resistentes (resistencia al corte). Es en esta fase del cálculo donde normalmente se presentan las mayores incertidumbres.

En el caso de las continuidades, estas determinan el tamaño de la pirámide a estabilizar y por lo tanto influyen tanto en el nº de bulones como en su longitud. Hay que tener en cuenta que el conocimiento de estas propiedades siempre será limitada y que por lo tanto el valor a introducir tendrá una componente interpretativa. En la mayor parte de los casos se podrá ser conservador y adoptar los valores máximos observados, sin que esto influya significativamente en la fuerza de anclaje y por lo tanto en el coste. Este es el caso de las pirámides con planos de ángulos de buzamientos bajos.

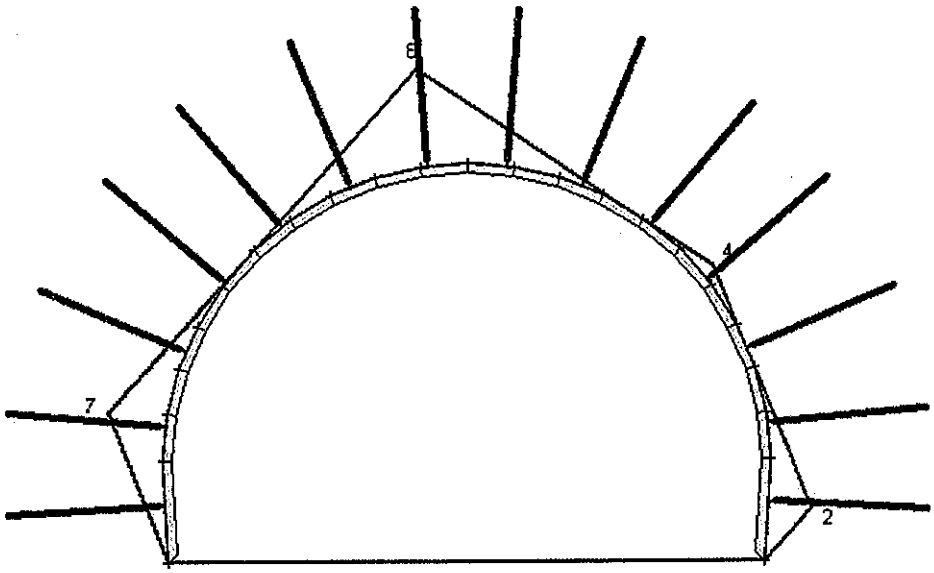


Figura 28 Geometría de las pirámides inestables

En estos casos, los tamaños de las pirámides son reducidos y la eficacia de los bulones es total, para las longitudes habituales.

La incertidumbre se presenta en los casos en que los buzamientos son altos y el utilizar dimensiones máximas en los planos nos conducen a tamaños de pirámides exageradas.

Importante saber las continuidades de los planos y la resistencia al corte de las juntas

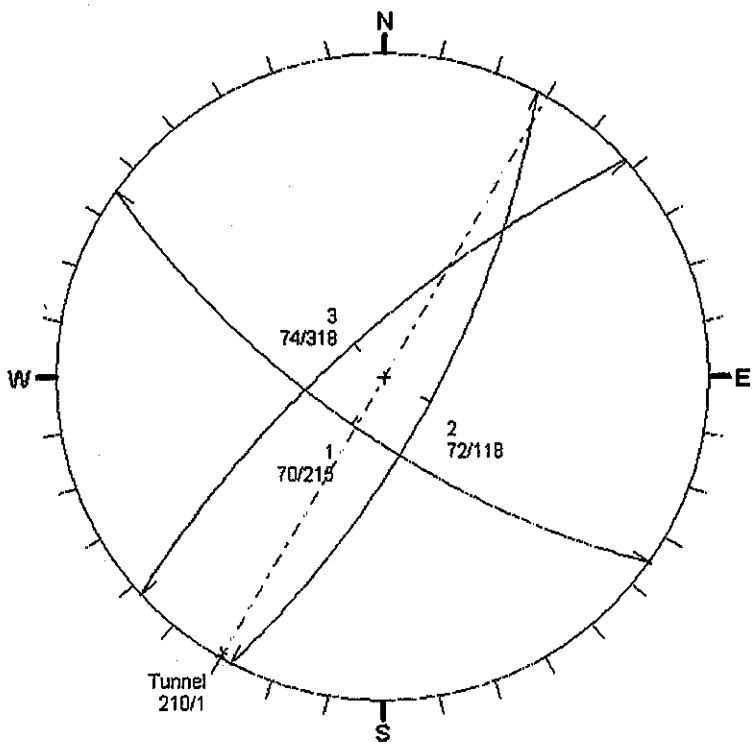


Figura 29 Caso particular de planos verticales

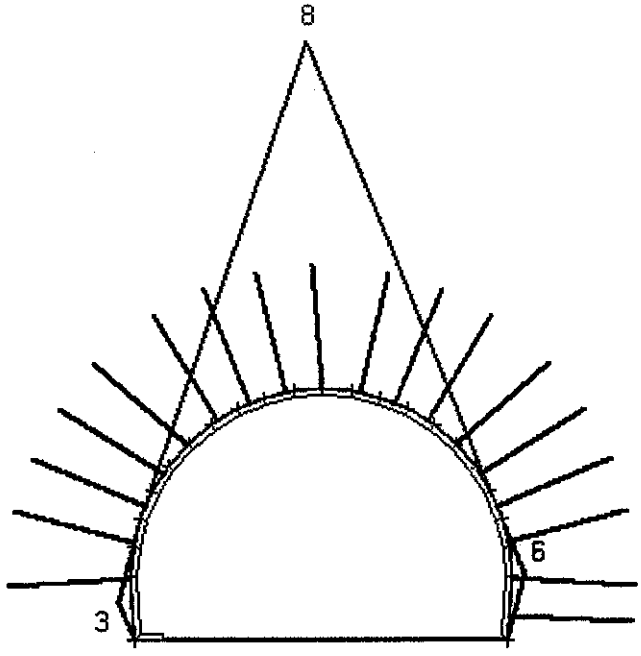


Figura 30 Pirámide con continuidad de planos no reales

En estos casos juega un papel esencial el conocimiento de las continuiddes de los planos y deben de ser introducidos de una manera más realista en función de los datos obtenidos, obteniendo unas dimensiones del problema más cercana a la realidad.

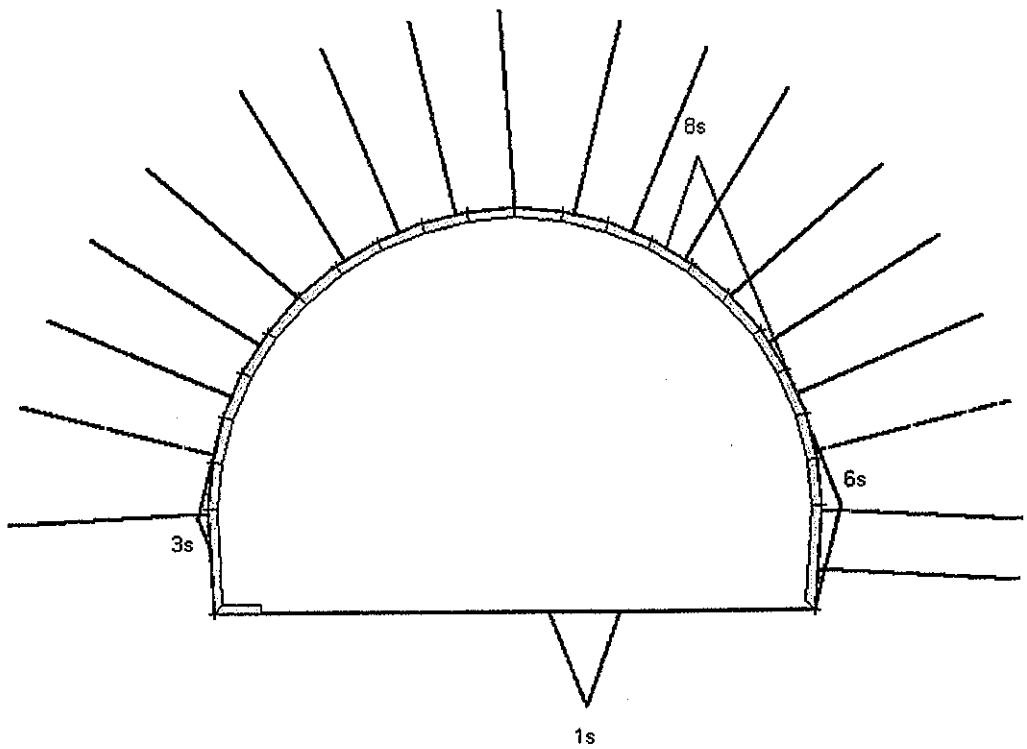


Figura 31 Pirámides con continuidades reales

En cuanto a la resistencia al corte de los planos de discontinuidad hay que hacer las siguientes consideraciones. Se parte de la base que las discontinuidades están abiertas o pueden abrirse por efecto de la excavación (voladuras). En el resto de casos, de discontinuidades cerradas o selladas con recristalizaciones de calcita, sílice u otro mineral, no se deben de considerar en el cálculo pues la cohesión que en esos casos poseen los planos es suficiente para garantizar la estabilidad de la pirámide o bloque de roca.

Por lo tanto, en el caso de las discontinuidades abiertas es preciso determinar la resistencia al corte, para lo que existen principalmente dos criterios :

- ***Criterio de Mohr- Coulomb***

Relaciona la resistencia al corte de pico τ_p con la tensión normal aplicando σ_n mediante la expresión:

$$\tau_p = c + \sigma_n . \tan\phi_p$$

El término de cohesión sólo existe, como ya hemos señalado, en el caso de que entre los planos de discontinuidad exista algún tipo de cementación o recristalización. Es por lo tanto habitual, para planos de discontinuidad abiertos, eliminar éste termino, quedando por lo tanto la expresión en :

$$\tau_p = \sigma_n . \tan\phi_p$$

Donde:

τ_p y σ_n son la resistencia a corte y la tensión normal y ϕ_p la fricción de los planos de discontinuidad.

Es por lo tanto una ley lineal.

- ***Critrio de Barton- Choubey*** De fricciones de rasgado geles. OJO con su utilización

Se trata de una ley no lineal con la siguiente fórmula:

$$\tau = \sigma'_n . \tan\left[JRC . \log_{10}\left(\frac{JCS}{\sigma'_n} \right) + \phi_r \right]$$

en donde :

JRC es el coeficiente de rugosidad de la discontinuidad, JCS la resistencia a compresión de las paredes, y ϕ_r el ángulo de rozamiento residual

Como se puede observar ambas expresiones son similares y únicamente cambian en la determinación de la fricción del plano de discontinuidad.

El valor de éste parámetro puede oscilar entre 14° y 40° dependiendo de la rugosidad, meteorización y relleno existente.

7.- MÉTODOS DE CÁLCULO

Hoy en día existen varios métodos para determinar la fuerza de anclaje en el sostenimiento de los túneles, desde los empíricos, más sencillos y rápidos basados en las clasificaciones mecánicas de los macizos rocosos (RMR, Q) hasta los más sofisticados y caros, de diferencias finitas (FLAC) o elementos finitos (ANSYS).

Las clasificaciones geomecánicas, en la mayor parte de los casos, son útiles para un predimensionamiento a nivel de Anteproyecto. Los índices calculados en base a unos parámetros geotécnicos dan una idea de la calidad del macizo y los espaciados de los bulones obtenidos a través de las tablas, se aproximan con suficiente precisión a los finalmente calculados con otros métodos.

Ya en la fase de Proyecto es necesario el cálculo de los bulones mediante métodos matemáticos, basados unos en análisis cinemáticos de los bloques (Unwedege) y otros en análisis tensodeformacional del terreno, una vez que se realiza en el mismo una excavación.

El análisis cinemático, normalmente se considera suficiente para túneles que claramente se van a encontrar en régimen elástico. El análisis tensodeformacional se requiere cuando el túnel va a sufrir plastificaciones o convergencias importantes.

Para el análisis cinemático, el Programa más utilizado y mejor desarrollado hoy en día es el UINWEDGE. Este método requiere determinar los planos de discontinuidad, polos medios, sus continuidades y parámetros resistentes (cohesión y fricción), la geometría de la excavación y la dirección de la misma, y el sostenimiento a calcular su factor de seguridad (espaciado y longitud de bulones, espesor de hormigón proyectado). Para el sostenimiento el programa solicita además la adherencia del bulón con el terreno, su límite de rotura, la capacidad mecánica de la placa de carga (salvo en los Swellex) y del hormigón proyectado su espesor y resistencia a cortante.

Los pasos que el sigue el Programa son los siguientes:

1° Determina la geometría de la pirámide

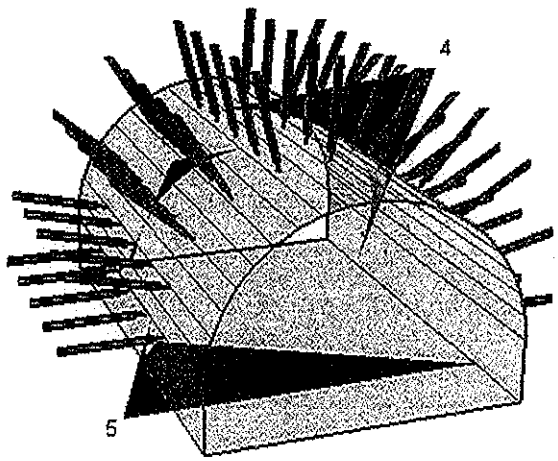
2° Determina las fuerzas actuantes sobre la pirámide (peso, agua, sísmicas, etc....)

3° Determina la dirección del movimiento de la pirámide

4° Determina las fuerzas normales en cada plano (3)

5° Calcula las fuerzas resistentes (al corte mediante Mohr-Coulomb u otros)

6° Calcula el Factor de Seguridad, con o sin sostenimiento (Bulones, hormigón proyectado)



Perspective *

Figura 32 Pirámides de roca calculadas por el programa

Al final del cálculo el programa presenta las pirámides analizadas alrededor de la excavación, su movimiento (caída, deslizamiento por planos), el factor de seguridad del sostenimiento para cada una de ellas.

El programa tiene en cuenta entre otras cuatromodos de rotura, arrancamiento (pull-out), cortante (shear), punzonamiento (stripping) y tracción (tensil).

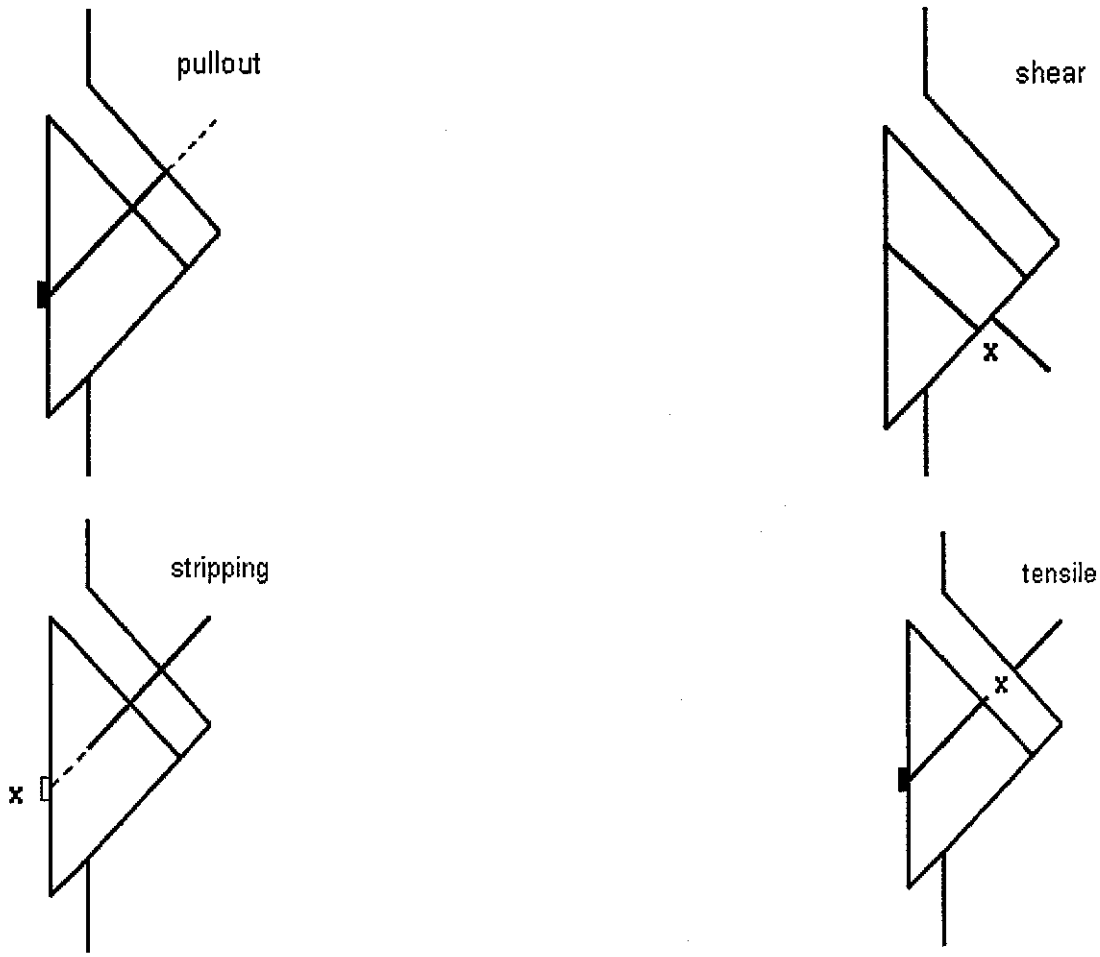


Figura 33 Modos de rotura de un bulón

Dependiendo de la disposición del bulón respecto de los planos que delimitan el bloque o la pirámide, el bulón trabaja de tres maneras diferentes (tracción y cortante, tracción pura, cortante y compresión). Lo habitual es analizar únicamente los bulones trabajando a tracción.

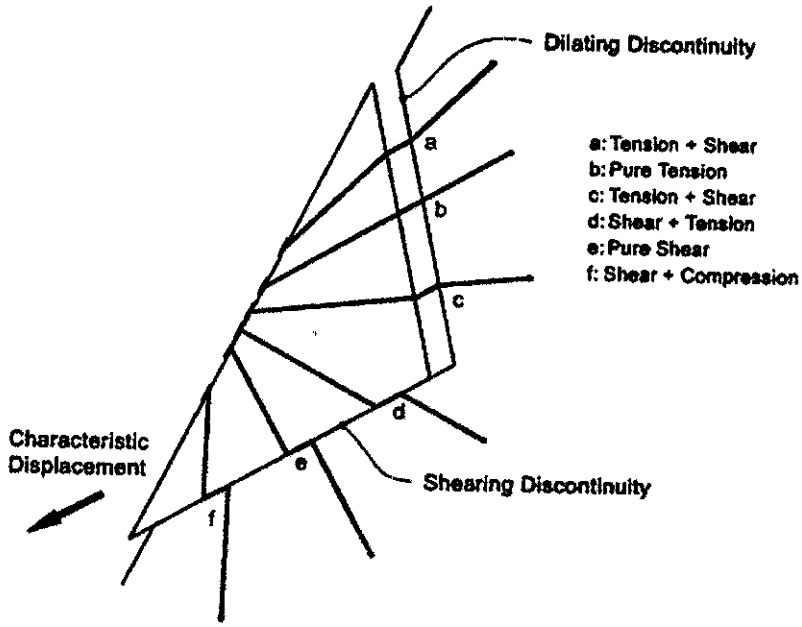


Figura 34 Distintas maneras de trabajar un bulón

El Unwedge, para cada bulón y para cada tipo define un diagram de fuerza. Este diagrama representa la fuerza de tracción que un bulón puede aplicar a una cuña-pirámide, a lo largo de su longitud.

En el programa se pueden utilizar cuatro tipos de bulones, que se diferencian en el diagrama de fuerza. Estos tipos son:

- De anclaje mecánico
- De cable
- De barra inyectada
- Swellex, Split-Set

La capacidad efectiva de un bulón de anclaje mecánico viene limitada por el menor de los siguientes componentes:

- Capacidad del anclaje
- Capacidad de la placa
- Capacidad del acero

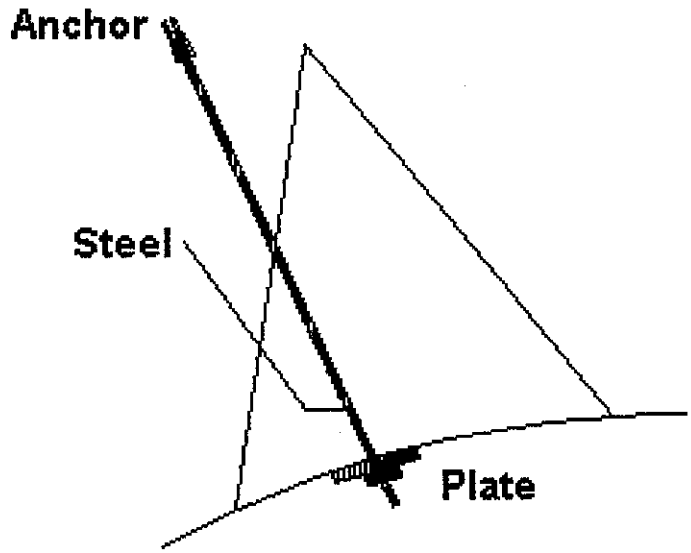


Figura 35 Bulón de anclaje mecánico (puntual)

Para los bulones de anclaje mecánico, el diagrama es una línea horizontal ya que independientemente de donde intersecte el plano al bulón la misma fuerza aplicará al bloque.

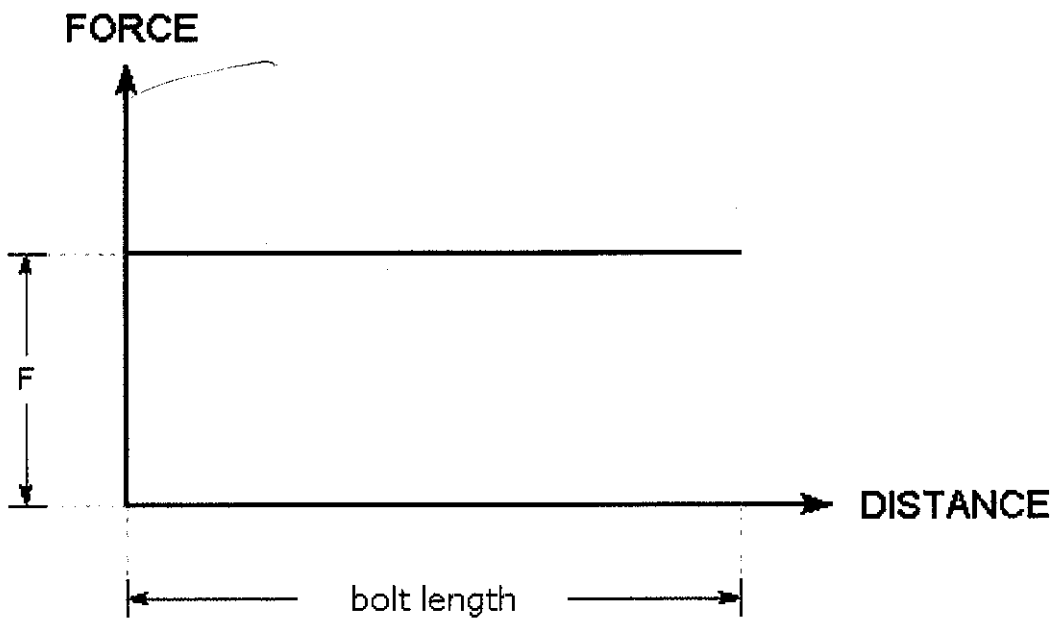


Figura 36 Diagrama de fuerza de un bulón de anclaje mecánico

Los tipo de cable pueden ser utilizados para modelizar bulones con anclaje continuo de resina o lechada y placa.

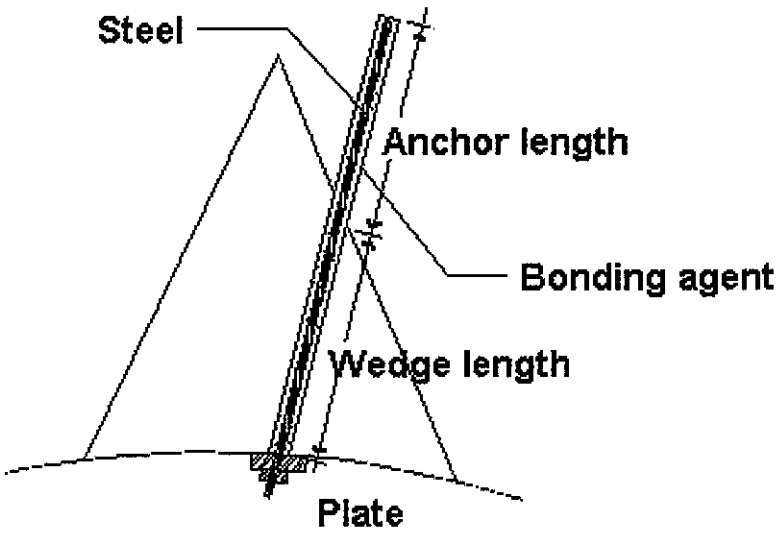


Figura 37 Bulón tipo cable

El funcionamiento de un bulón de cable en el Unwedge es exactamente el mismo que el de barra inyectado, salvo que el de cable la longitud de bulbo es siempre el 100% y en los de barra inyectados la longitud puede ser menor del 100%.

El diagrama de fuerza para estos bulones contiene los tres tipos de rotura. En el caso que se muestra a continuación, la capacidad de la placa es menor que la capacidad a tracción y por lo tanto el punzonamiento es posible. Si por el contrario, la capacidad de la placa fuese mayor, entonces el punzonamiento no puede ocurrir y por lo tanto el bulón sólo podría fallar por tracción o por arrancamiento.

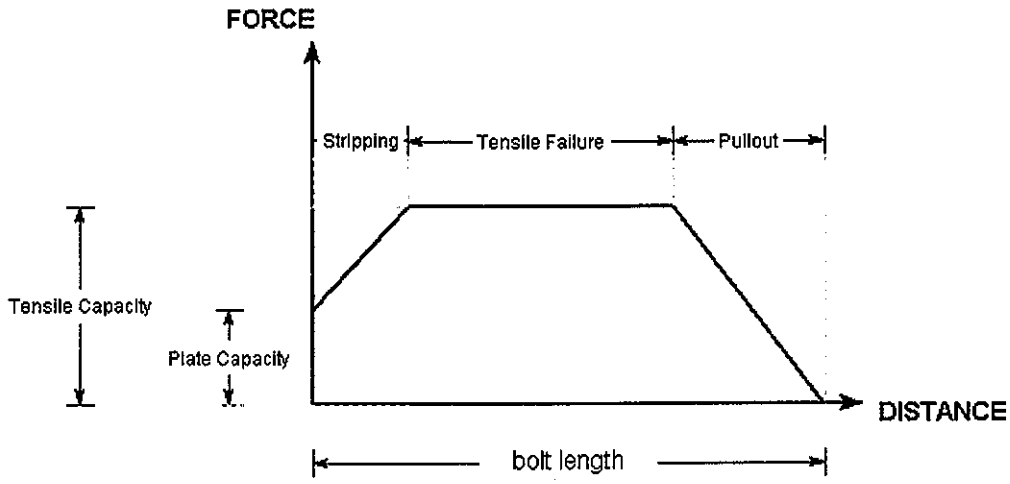


Figura 38 Diagrama de fuerza de un bulón de cable

Los de barra inyectada pueden ser usados para simular bulones con longitud de bulbo variable.

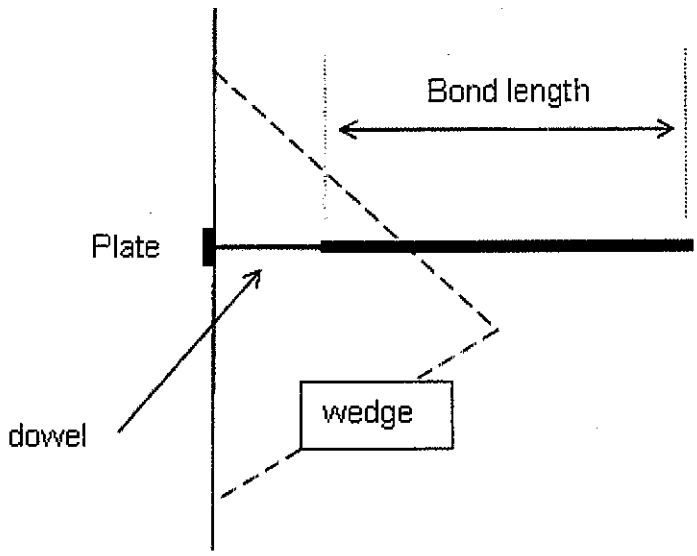


Figura 39 Bulón de barra inyectada

Las propiedades de los bulones de barra inyectada son usados para determinar el diagrama de fuerzas del siguiente modo.

Supongamos que un bulón intersecta un bloque como muestra la figura 24.

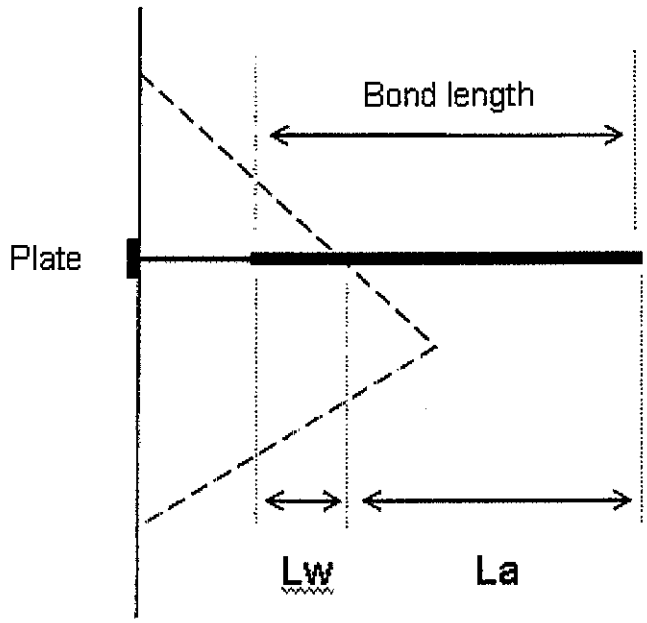


Figura 40 Partes de un bulón de barra inyectada

Lw = longitud dentro del bloque = longitud de bulbo dentro del bloque

La = Longitud de anclaje = longitud de bulbo en la roca fuera del bloque

Parámetros del bulón :

T = Resistencia a tracción

P = Capacidad dela placa

B = Adherencia (fuerza/ unidad de longitud de bulbo)

Para un bulón de barra inyectada existen tres posibles modos de rotura:

1. Arrancamiento (Pullout) (fuerza requerida para sacar la longitud anclada La de la roca)
2. Tracción (tensile) (máxima capacidad de la barra)
3. Punzonamiento (Stripping) (el bloque cae y el bulón permanece embebido en la roca)

La máxima fuerza que se puede movilizar en cada modo de rotura, en cada punto de la barra, viene dada por las siguientes ecuaciones:

Arrancamiento : F1 = BLa Adherencia

Tracción : F2 = T

Punzonamiento: F3 = P + BLw Placa + pirámide.

En cualquier punto a lo largo de la longitud del bulón, la fuerza que se aplica al bloque es la menor de la tres fuerzas.

El diagrama de fuerza de un bulón de barra inyectado se presenta continuación. En éste caso, la capacidad de la placa es inferior a la tracción de la barra, y por lo tanto es posible el punzonamiento. Si fuera mayor, entonces el punzonamiento no puede ocurrir, y por lo tantota rotura puede venir únicamente por tracción o por arrancamiento.

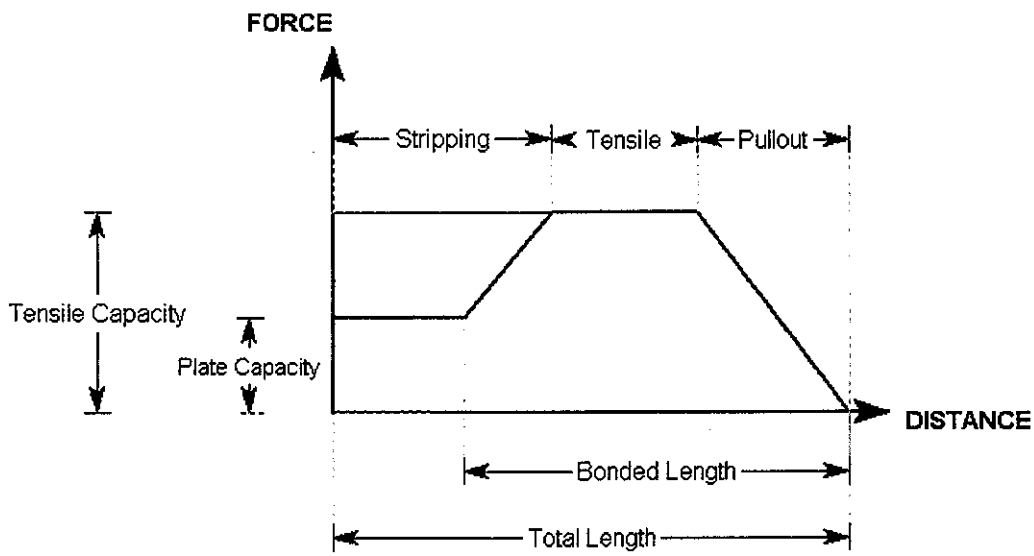


Figura 41 Diagrama de un bulón de barra inyectada

Los bulones Split Set y Swellex pueden ser modelizados en el Unwedge. Permite comprobar los bulones de tipo friccional, asumiendo como nula la capacidad de carga de la placa.

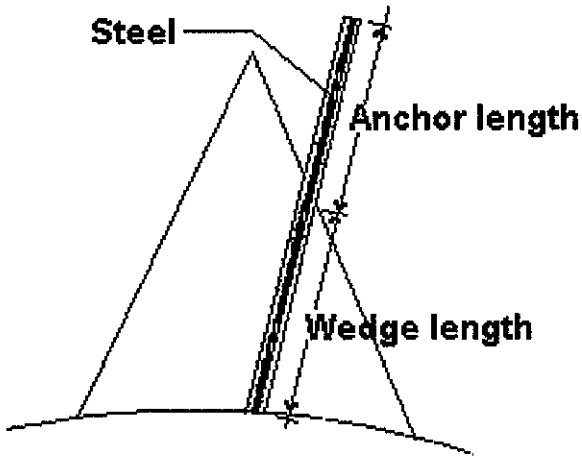
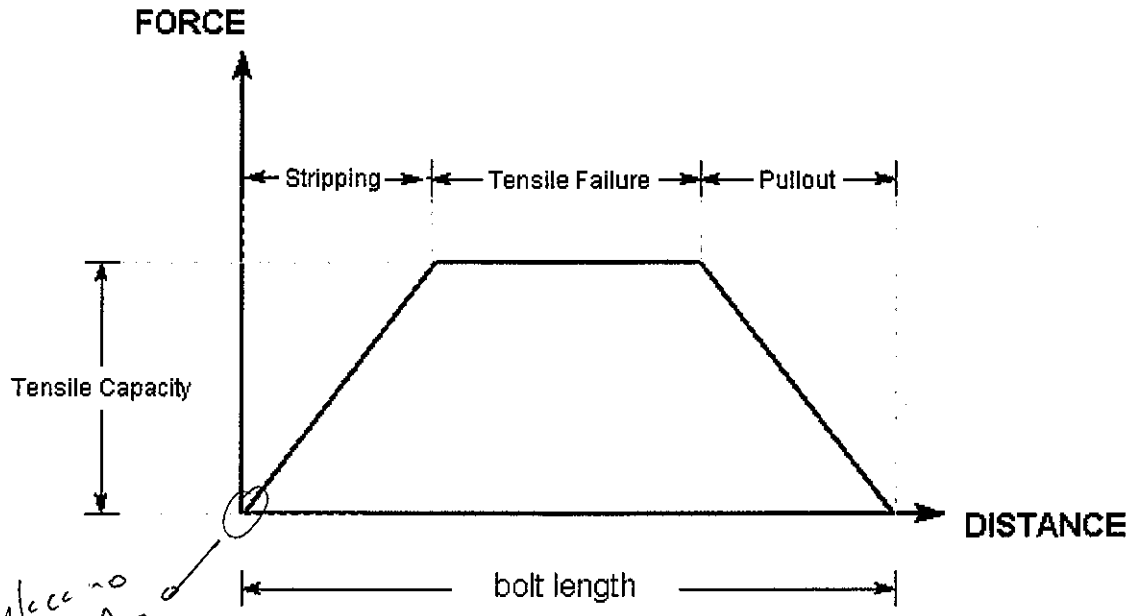


Figura 42 Bulón Swellex o Split Set

Por defecto el programa presenta un valor de adherencia para ambos bulones, siendomenor en el caso del Split Set. Estos valores pueden ser cambiados por el usuario.

Este tipo de bulones se diferencian de los de barra inyectados en que la longitud de bulbo es siempre el 100% y la capacidad de la placa es cero.

A continuación se presentan los diagramas de fuerza de los bulones Swellex y Split Set, donde se puede apreciar que el origen del diagrama de fuerzas es cero por serlo la capacidad de la placa y que la capacidad del bulbo no es suficiente para igualar, en éste caso de bulón Split Set, a la resistencia a tracción. Por lo tanto el bulón ni puede romper a tracción y solamente se puede producir punzonamiento o arrancamiento.



La placa no se considera en calculo.

Figura 43 Diagrama de fuerza de un bulón Swellex

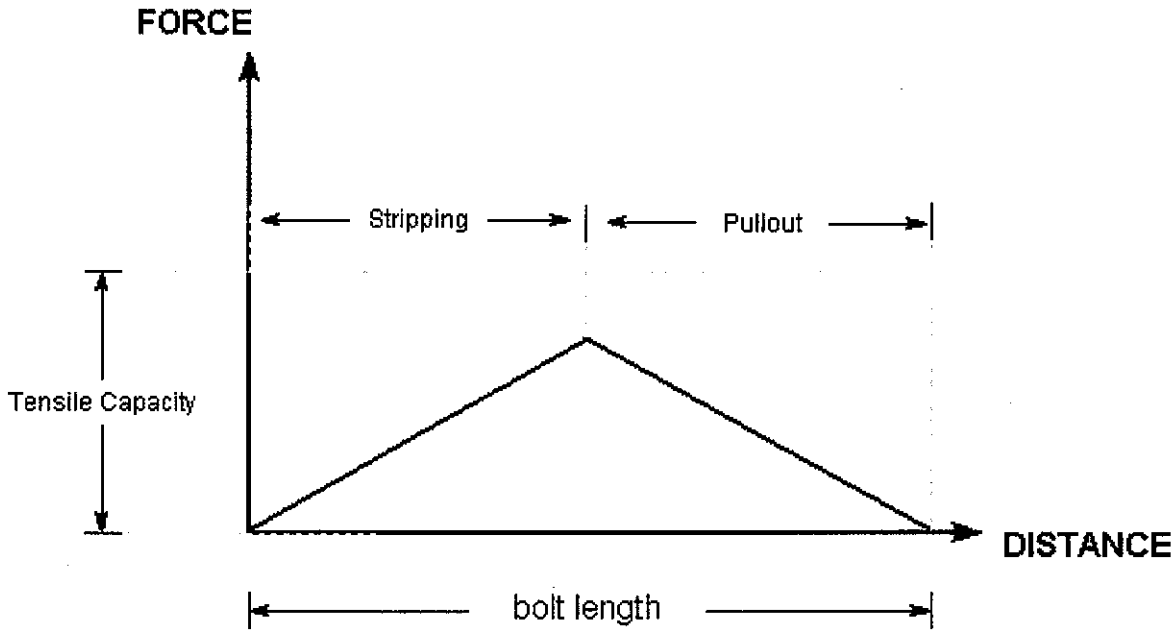


Figura 44 Diagrama de fuerza de un bulón Split Set

Resist a fracción muy bajo.

Otro tipo de cálculos, aplicables principalmente a túneles en régimen plástico, son los tensodeformacionales mediante elementos finitos o diferencias finitas. Uno de los de mayor aplicación hoy en días se encuentra entre los del segundo grupo y se denomina FLAC. Este programa permite modelizar el comportamiento de estructuras degeometría y propiedades arbitrarias, y su interacción tonel terreno.

Dentro de las estructuras, el programa permite modelizar bulones denoiminándolos CABLE ELEMENT, que son unideimensionales, pueden ser anclados a un punto concreto de la malla (anclaje puntual), o inyectados de tal manera que el bulón desarrolla fuerzas a lo largo de su longitud mientras la malla se deforma. Estos elementos pueden romper a tracción o compresión, pero no pueden soportar momentos flectores. Pueden ser pretensionados.

Los parámetros de entrada de las propiedades de los bulones son como los de cualquier otro tipo de elementos estructurales:

- área del bulón
- densidad
- módulo de elasticidad
- espaciado
- resistencia a tracción
- resistencia a compresión
- perímetro
- rigidez del bulbo (Kbond) (N/m/m)
- adherencia bulbo-terreno (N/m)

Los siete primeros parámetros son propiedades o geometrías bien conocidas del bulón. Sin embargo las dos últimas se obtiene mediante fórmulas más o menos contrastadas o bien mediante ensayos de laboratorio o campo.

El programa permite simular las secuencias de excavación y colocación del sostenimiento, así como el efecto de confinamiento por la presencia del frente a escasa distancia, mediante la aplicación una presión de sustentación calculada mediante la teoría de Panet.

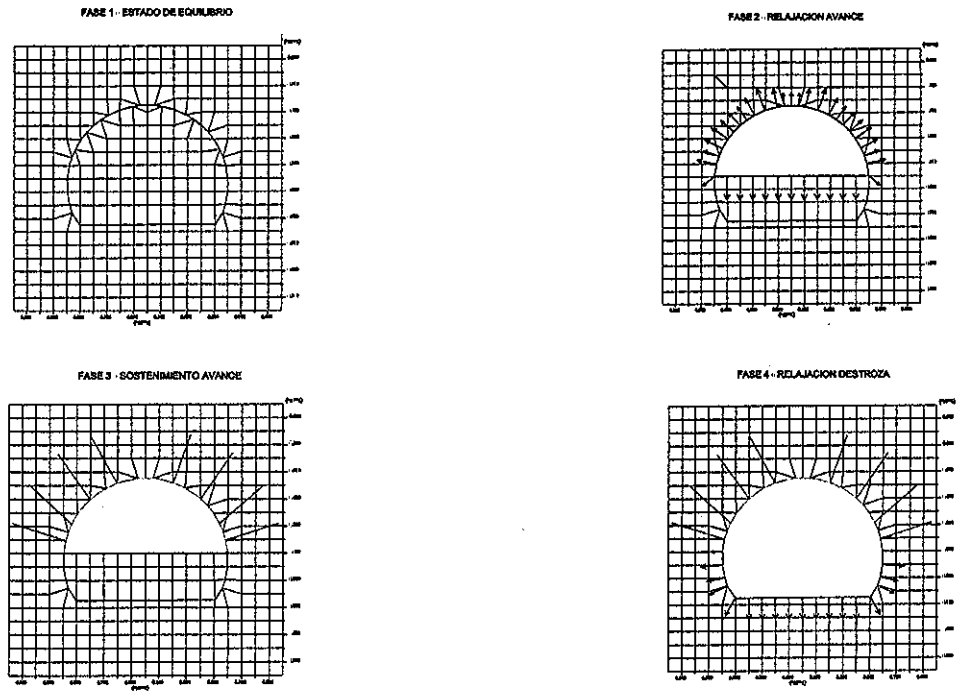


Figura 45 Fases cálculo FLAC

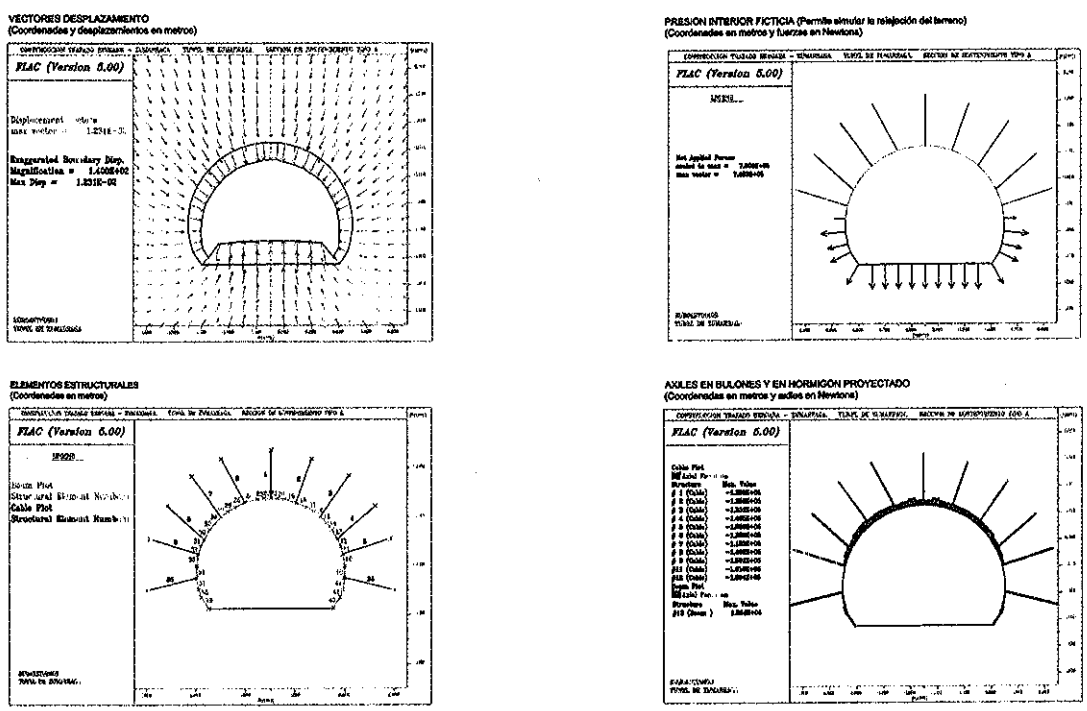


Figura 46 Salidas programa FLAC