



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES

ARAGÓN

**“EXCAVACIÓN DE TÚNELES EMPLEANDO EL MÉTODO
CONVENCIONAL”**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL

PRESENTA:

WILFRIDO OSWALDO ROMERO GRANADOS

ASESOR DE TESIS:

ING. JOSÉ ANTONIO DIMAS CHORA



FES Aragón

MÉXICO 2013



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



Esta tesis está dedicada a mis padres: Mario Romero y Martha Granados; a mis hermanos: Jesús y Oliver, pero muy especialmente dedico este trabajo a mi abuelito Erasmo, a mi tío Memo y a mí tío Pancho, que desde que era tan solo un niño y sin saber, fueron los primeros Ingenieros que conocí. A todos ellos les doy las gracias por todo su apoyo y paciencia durante todos estos años.

Agradezco a mis profesores y a todas las personas que integran la jefatura de carrera de Ingeniería Civil de la FES Aragón por todo el apoyo y la atención prestada para la realización de este trabajo.



INDICE.

INTRODUCCIÓN.	1
I. GENERALIDADES.	6
1.1 Importancia de los Túneles.	6
1.2 Tipos de túneles y consideraciones preliminares.	8
1.3 Clasificación empírica de los suelos.	13
1.4 Clasificación geomecánica de Lauffer (Tiempo libre de soporte).	16
1.5 Tunelería convencional.	20
II. CRITERIOS DE DISEÑO.	25
2.1 Aspectos generales.	25
2.2 Alcance de los trabajos.	27
2.3 Etapas en el diseño.	32
2.4 Condiciones del subsuelo.	34
2.5 Parámetros a considerar en la construcción del túnel.	40
2.6 Excavación y soporte.	44
2.7 Revestimiento final.	60
III. CRITERIOS DE CONSTRUCCIÓN.	61
3.1 Introducción.	61
3.2 Aspectos generales.	65
3.3 Secuencia de la excavación.	66
3.4 Maquinaria y equipos empleados.	80
3.5 Proceso administrativo.	82
3.6 Construcción.	85
3.7 Soporte inicial.	90
3.8 Medidas de control antes y durante la excavación.	92
IV. USO DEL CONCRETO LANZADO CON FIBRAS.	97
4.1 Definición.	97
4.2 Usos y aplicaciones más comunes del concreto lanzado.	100



4.3	Materiales utilizados en la elaboración del concreto lanzado reforzado con fibras.	101
4.4	Consideraciones generales para el uso de fibras en el concreto lanzado.	106
4.5	Tipos de fibras.	109
4.6	Procedimiento de lanzado y métodos de colocación.	120
4.7	Pruebas de calidad en el concreto lanzado.	124
V.	ESTABILIZACIÓN DEL TERRENO EMPLEANDO SISTEMAS DE PARAGUAS.	126
5.1	Definición.	126
5.2	Conceptos generales.	127
5.3	Clasificación.	128
5.4	Campos de aplicación.	131
5.5	Fases de ejecución de un paraguas.	134
5.6	Equipos de perforación.	138
5.7	Criterios generales de perforación e inyección.	139
5.8	Posibles inconvenientes en la instalación de paraguas	141
VI.	MEDICIÓN Y CONTROL DE TÚNELES.	142
6.1	Introducción.	142
6.2	Instrumentación y equipos.	149
6.3	Instrumentación en túneles convencionales.	161
6.4	Control de excavación de un túnel.	163
6.5	Control de las deformaciones de un túnel.	165
	Anexo Fotográfico.	167
	CONCLUSIÓN.	179
	BIBLIOGRAFÍA.	180



INTRODUCCIÓN.

La primera valoración para definir el método constructivo de túneles es identificar el tipo de terreno, según la dificultad para excavarlos.

La forma más elemental es por clasificaciones empíricas.

Es por ello que podemos decir que incluso la excavación mediante el uso de tuneladoras, puede también definirse como tuneleo convencional, dado que día a día se realizan mejoras en estas maquinas y con ello cuando se piensa en excavar un túnel muchas veces lo primero es en construirlos con dichos escudos.

Sin embargo no podemos dejar de lado y por ello el presente trabajo, que los túneles excavados casi “a mano” también forman parte de nuestro entorno, debido a que en muchas ocasiones es mucho más factible en cuanto a costo-tiempo la excavación de túneles empleando maquinaria de cierta forma “pequeña” como el uso de rozadoras, y la estabilización del terreno con tan solo el uso de acero de refuerzo y concreto lanzado, y no el uso de maquinas tan sofisticadas como son las tuneladoras y el uso de dovelas para revestir el túnel.

Son muchos los túneles que se han construido empleando este método, en ocasiones resulta más complejo y más interesante el uso del método convencional para la excavación de túneles, una de las cosas más interesantes es que este método nos permite estar en contacto todo el tiempo con el terreno, podemos percibir de mejor forma la estratigrafía del suelo, y en numerosas ocasiones te encuentras que en unos pocos metros estas excavando en terrenos rocosos, y cuando realizas avances considerables poco a poco percibes como cambia el terreno, sean rocas, arcillas, limos en incluso los complicados terrenos arenosos que permiten realizar unos pocos centímetros de excavación antes de que el terreno comience a caerse.

En forma general se le llama “Método Convencional” debido a que se excava en forma cíclica, es decir, se excava la parte superior del túnel, se retira la rezaga, se



reviste el túnel, continuamos con la parte inferior de la sección, se retira la rezaga, y se reviste.

Dentro de las secciones más comunes de túneles excavados convencionalmente, está el de herradura y el de sección circular, cada uno de ellos con su propio método de excavación y revestimiento.

Es importante conocer la finalidad de la construcción de un túnel, muchas de estas obras construidas de forma cíclica las podemos observar en los túneles de desvío de presas, cavernas o túneles carreteros y todos ellos de sección diferente y sobre terrenos diferentes, es por ello que es esencial conocer el proyecto geotécnico para que los ingenieros tuneleros conozcan a lo que se están enfrentando.

Un punto que no se puede dejar de lado es el costo-beneficio. Muchas veces resulta más conveniente excavar túneles convencionalmente para unos cuantos metros. De igual forma tenemos que considerar que en ocasiones estos túneles con base en el proyecto resultan ser trabajos sumamente quirúrgicos, debido a la zona donde se estará construyendo, al uso de modernos sistemas de estabilización, monitoreo, etc.

En cuanto a la mano de obra y maquinaria necesaria para la construcción, se requiere que en estas obras intervengan y estén a la cabeza gente experimentada y con los conocimientos que requiere el proyecto, desde gerentes, superintendentes, jefes de obra, jefes de control de proyecto y de seguridad industrial y que se mantengan en constante capacitación, además de que en todo momento se cuente con el equipo y maquinaria necesaria, así como herramientas básicas.

La administración y planeación de este tipo de obras es fundamental, debido a que es necesario reportar al cliente el estatus del proyecto en cuanto a tiempo y costo.

Un punto de gran importancia en cuanto a la estabilización de las paredes del túnel así como el revestimiento del mismo es que en los túneles excavados empleando el método convencional es el uso de concreto lanzado.



El concreto lanzado es un método para lanzar mortero o concreto transportado a través de una manguera y proyectado neumáticamente a alta velocidad sobre una superficie. A diferencia del concreto convencional, que se coloca y posteriormente se compacta, el concreto lanzado se coloca y se compacta al mismo tiempo, debido a la fuerza con que se proyecta desde la boquilla.

El método en general no es algo nuevo, desde años atrás, en la época de los romanos se empleaba una mezcla de mortero para repellar edificaciones y dar un acabado bastante fino.

Además del concreto lanzado a mediados del siglo XX se comenzó a usar el concreto lanzado pero ahora reforzado con fibras de acero, en un principio estos trozos de acero eran simples alambres cortados y con el paso de los años se han hecho innovaciones desde cambiar la sección de estos trozos de acero e incluso hacerlas en forma de gancho, para que funcione como anclas entre la mezcla del concreto. También se inventaron las fibras sintéticas que tienen diferentes propiedades y diferentes usos, pero finalmente todos los tipos de fibras son proyectadas junto con el concreto.

Retomando un poco el tema del uso de mortero en edificaciones romanas, también ahí se dio origen de lo que podría ser el antecedente al uso de fibras, ellos añadían al mortero pelo de animales, para ser mas específico pelo de caballo, y lo empleaban para reforzar el mortero.

El concreto lanzado reforzado con fibras además de estabilizar el terreno y dar un soporte provisional, también y dependiendo del proyecto, se puede emplear como revestimiento definitivo del túnel.

Algunos estudios arrojan que no es muy conveniente, sin embargo si este concreto lanzado reforzado con fibras se lanza sobre la estructura a base de acero de refuerzo, todo en conjunto funciona a la perfección y no habría mayor problema en que ese fuera el revestimiento definitivo.



Hoy día, la tecnología del concreto lanzado continúa desarrollándose gracias a la creación de nuevos aditivos, fibras, máquinas de control remoto, etc.

El uso de métodos que permiten mejorar el terreno como son los sistemas de paraguas también es algo que lleva bastante tiempo empleándose, sin embargo es en los últimos años que estos sistemas de estabilización están teniendo mejoras, esto debido a la necesidad de excavar y de estabilizar terrenos bastante malos, el uso de la maquinaria para perforar el terreno e inyectar también es un punto importante debido a que se requiere de gran experiencia para realizar estos trabajos tan complicados. Estos sistemas de paraguas pueden ser tan rudimentarios contruidos a base de simples varillas, hasta sistemas tan complejos y controlados a base de perfiles y de tuberías galvanizado, pero todos ellos cumplen con el objetivo de mejorar el terreno y de estabilizar.

Es muy común que estos sistemas se empleen casi siempre al inicio de la excavación del túnel, o mejor dicho en el portal de acceso, sin embargo, es bien sabido que para tener seguridad durante la excavación es necesario el uso de estos sistemas durante toda la excavación.

En cuanto a los sistemas de instrumentación durante la construcción es importante que gente especializada en el tema se encargue de dicho proceso, debido a que de ello depende la seguridad en todo momento dentro y fuera del túnel, aplicando, en su caso, acciones preventivas o correctivas.

Es importante tener cuidado en la confiabilidad del diseño aplicado, confirmando o ajustando las teorías y procedimientos aplicables, así como el desarrollo de nuevas teorías y procedimientos de diseño.

Básicamente es importante mantener mucho cuidado durante la construcción del túnel, el terreno, y muy importante sobre las estructuras vecinas si es que el túnel será construido sobre una zona urbana.



Además toda la información recabada como lo son deformaciones, asentamientos, etc, sea un acopio de información para la investigación y futuros diseños de túneles.

Podemos decir que la instrumentación es una relación entre las habilidades del personal encargada de este trabajo y las capacidades de los instrumentos que nos ayudan a determinar los distintos parámetros.

El uso de la instrumentación geotécnica no se limita solamente a seleccionar el instrumento sino al desarrollo paso a paso de un proceso ingenieril, que empieza con la definición de objetivos y termina con la implementación de los datos obtenidos.

Generalmente la observación del comportamiento de las obras de construcción, geotécnicas, forma parte del proceso de diseño.



I. GENERALIDADES.

1.1 IMPORTANCIA DE LOS TÚNELES.

Los túneles son un medio de comunicación artificial entre dos puntos separados por un suelo o roca. Su objetivo es el de permitir el paso de personas, ferrocarriles, vehículos, conducciones eléctricas, de agua u otros.

Debido a su utilización diversa elevan su importancia a medida que la sociedad avanza y son inevitables en grandes núcleos urbanos muy masificados por edificios para establecer líneas de metro; en la comunicación de poblaciones separadas por una orografía pronunciada o incluso por mar, como es el túnel del Canal de la Mancha.

Las razones habituales para desarrollar un túnel son:

- **Terreno:**

La topografía puede limitar la implantación de una autopista cuyas especificaciones obligan a tener unas pendientes límite.

- **Economía:**

En muchas ocasiones resulta más rentable atravesar un obstáculo mediante un túnel que rodearlo; por lo cual, es lógico pensar que el tiempo también puede disminuir considerablemente al ejecutar un túnel en vez de decantarse por rodear el obstáculo.

- **Ordenación urbanística y de tráfico:**

La implantación de metros facilita la movilidad en las grandes urbes.

- **Estética y salud:**

Para la circulación de aguas residuales y saneamiento en las ciudades.



- **Minería:**

Aunque se suelen denominan galerías o pozos, dependiendo de la orientación, su fin es unir dos puntos, en el caso, para acceder a una mineralización.

El desarrollo de un túnel se realiza de igual manera que cualquier obra a cielo abierto teniendo en cuenta el tipo de sección elegida.

Después de determinar los puntos entre los que se traza el túnel se deberán realizar:

- **Planta:**

El diseño en planta del túnel se desarrollará en función de los puntos de entrada y salida, así como del estudio geotécnico que determinará la estabilidad del terreno.

En el caso de autopistas o ferrocarriles se tendrá en cuenta también la curvatura máxima permitida.

- **Rasante:**

La rasante dependerá de los parámetros definatorios de la obra a realizar, como pueden ser la velocidad específica de la vía o ferrocarril, la pendiente máxima admitida, del mejor drenaje del agua motivo por el cual es normal diseñar túneles convexos.

- **Sección:**

Está directamente relacionado con el estudio geotécnico del terreno para construirlo y de las características de la obra.



1.2 TIPOS DE TÚNELES Y CONSIDERACIONES PRELIMINARES.

- **Obras de paso:**

Las obras de paso bajo las vías de comunicación, para aguas u otros viales.

- **Conducciones y galerías de alcantarillado y saneamiento:**

Sistemas de saneamiento y alcantarillado de los núcleos urbanos precisan del proyecto y construcción de conducciones y galerías subterráneas de diversos tipos.

- **Túneles de carreteras, ferrocarriles y canales:**

Túneles dedicados al paso de vehículos, trenes y metro.

- **Conducciones de agua a presión:**

Para el transporte de agua a presión desde el vaso de una presa de embalse de aprovechamiento hidroeléctrico a las turbinas de una central de producción de energía eléctrica aguas abajo, por ejemplo.

- **Galerías de mina:**

En una galería o túnel de mina se tienen unas condiciones de proyecto y diseño muy diferentes respecto de un túnel carretero, puesto que en el de mina se buscan soluciones para acceder a las capas de mineral, para luego seguir esas capas, excavarlas y efectuar la extracción del mineral. Desde el punto de vista de la topografía estas galerías tienen una exigencia de precisión en el replanteo menor que en el caso de los túneles carreteros.

Clasificación de los túneles.

- **Según su servicio:**

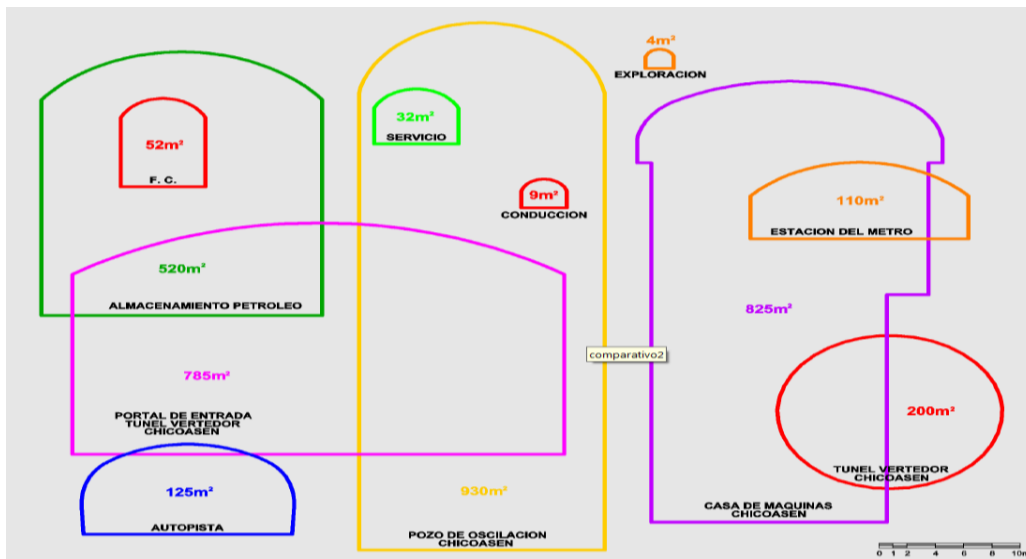
- Minería



- Carreteros
- Ferroviarios
- Acueductos y Drenes
- Cavernas

- **Según su localización:**
 - Urbanos
 - Bajo el agua
 - De Montaña

- **Según su entorno geológico:**
 - Túneles en Rocas
 - Túneles en Suelos
 - Túneles con Frentes Mixtos



Secciones típicas en túneles construidos por el método convencional.



Para poder definir o seleccionar el procedimiento de construcción de un túnel, antes de seleccionar el método de excavación y el sistema de fortificación del mismo, es importante conocer diversos aspectos como son:

Aspectos geotécnicos.

- ***Exploración del subsuelo.***
 - Estudios Geológicos
 - Estudios Hidrológicos
 - Determinación de las propiedades Físicas y Mecánicas de suelos

- ***Determinación de sus propiedades mecánicas.***
 - Resistencia al Corte
 - Ángulo de Fricción Interna.
 - Peso Volumétrico.
 - Dureza del terreno.
 - Flujo de Agua.

Aspectos geométricos.

- Trazo y localización en planta
- Alineamiento vertical
- Profundidad de la clave
- Sección transversal



- Instalaciones existentes

Aspectos técnicos

- Tecnología disponible
- Experiencias de generaciones tuneleras

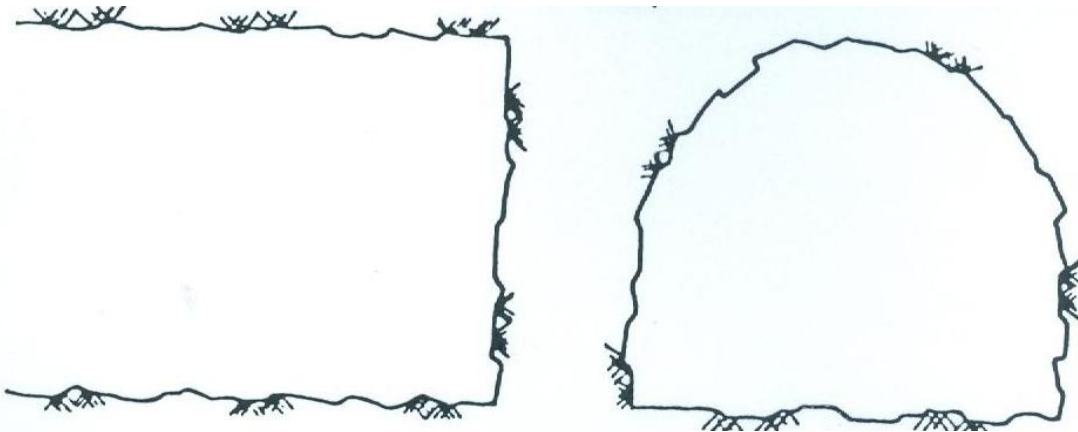


1.3 CLASIFICACIÓN EMPÍRICA DE LOS SUELOS.

La clasificación Empírica de los suelos, son una de las primeras valoraciones a considerar para poder definir método constructivo de un túnel, basadas en el tipo de terreno según la dificultad para excavarlo.

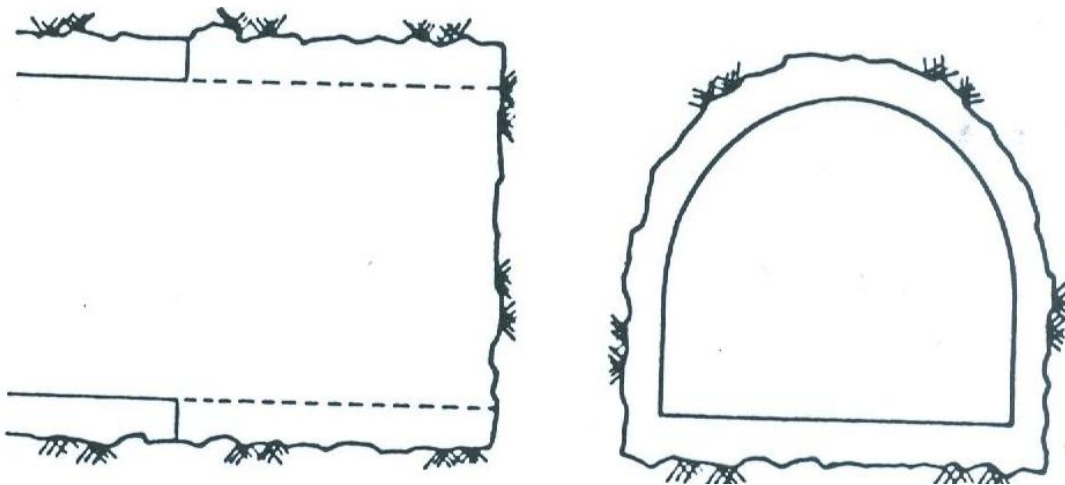
- **Duro**

El frente de excavación puede avanzar sin requerir soporte.



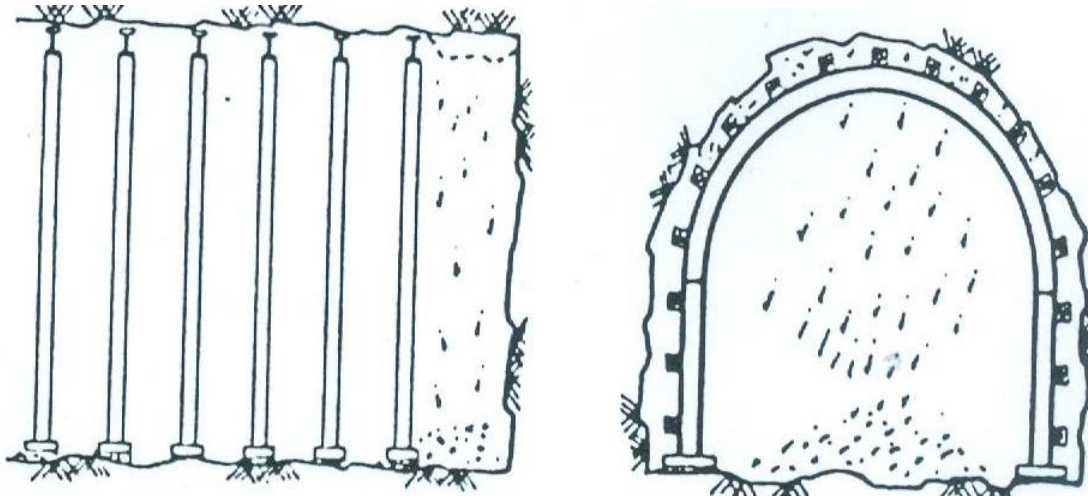
- **Firme**

El frente de excavación puede avanzar sin requerir soporte y el revestimiento definitivo puede instalarse antes de que el terreno empiece a moverse.



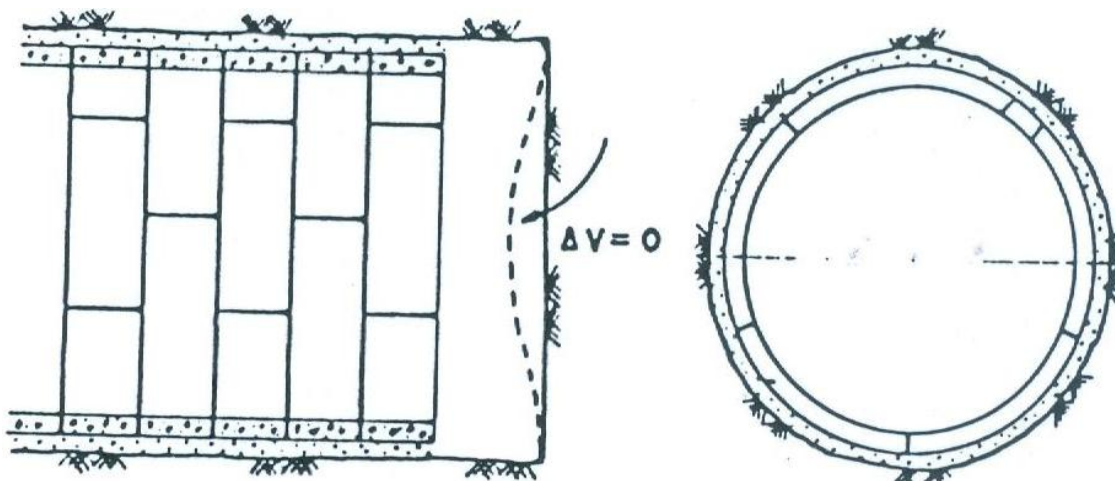
- **Graneo lento o graneo rápido**

Una vez que el terreno ha quedado expuesto, el frente y/o paredes de excavación empiezan a desprenderse en forma de terrones o gajos. Cuando el proceso inicia en pocos minutos se le denomina graneo rápido.



- **Extrusión lenta**

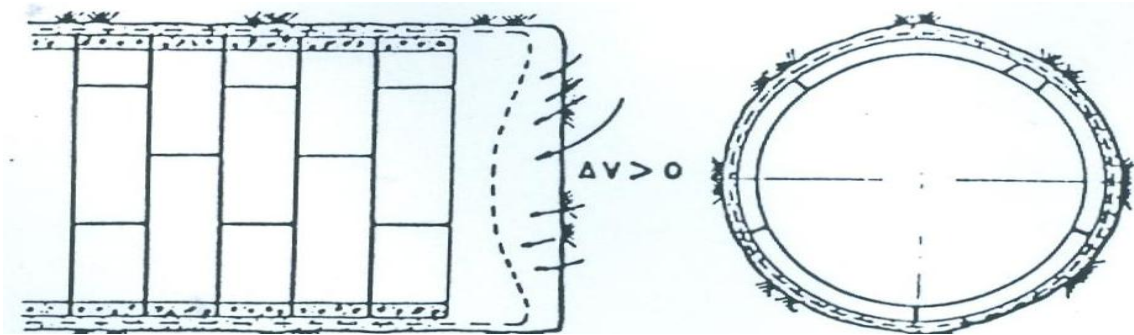
El terreno avanza lentamente hacia el túnel sin fracturarse y sin incremento perceptible de agua si la existiera, también puede provocar movimientos en la superficie aunque los mismos no sean muy notables en el túnel.





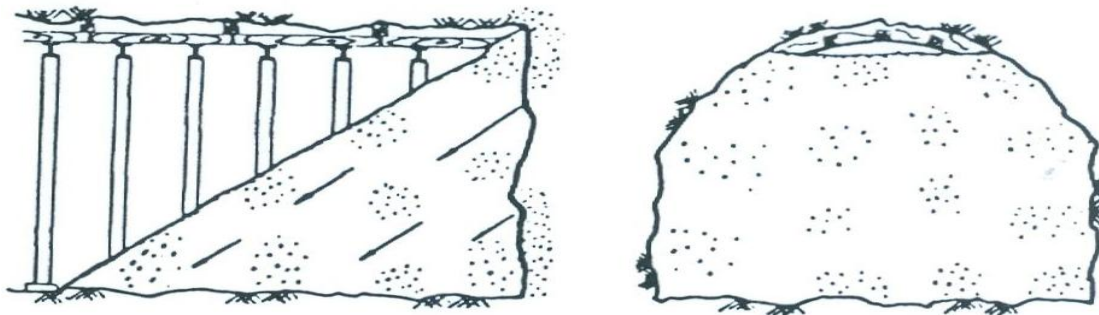
- **Expansivo**

El terreno avanza lentamente hacia el túnel pero con un fuerte incremento de volumen en el material que rodea al túnel.



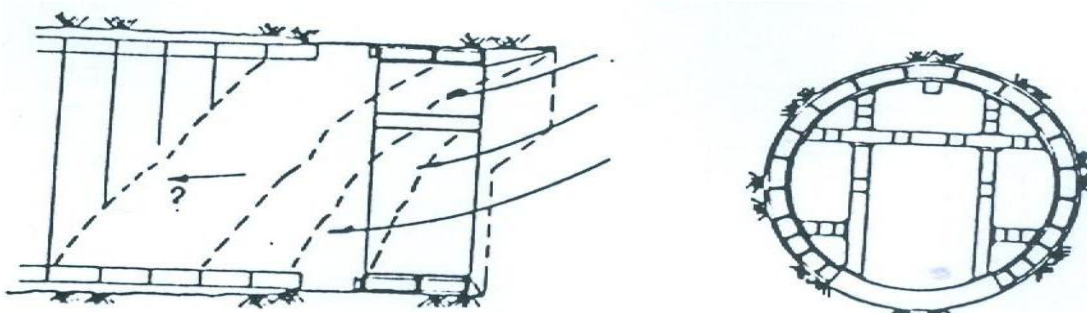
- **Corrida franca o cohesiva**

Es cuando al retirar el soporte lateral en cualquier superficie con talud mayor a 34° , se provoca un deslizamiento de material comportándose como azúcar granulada. Si la corrida va precedida de un breve periodo de graneo se le denomina Corrida Cohesiva.



- **Extrusión rápida**

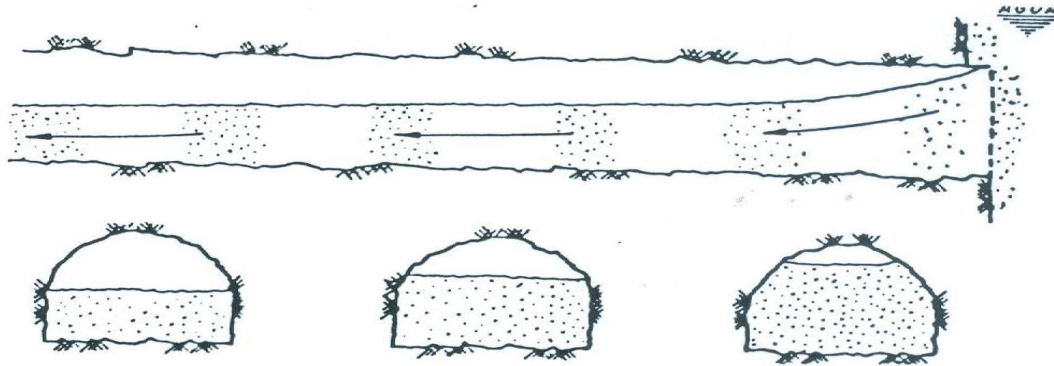
El terreno avanza rápidamente hacia el túnel como flujo plástico.





- **Fluyente**

El terreno se mueve como un fluido viscoso que puede invadir la sección completa del túnel. Si el flujo no es detenido puede llenar el túnel completamente.





1.4 CLASIFICACIÓN GEOMECÁNICA DE LAUFFER. (TIEMPO LIBRE DE SOPORTE).

Se acepta que fue Terzaghi (1946) quien propuso la primera clasificación del terreno orientada a la construcción de túneles. Sus datos provenían de túneles sostenidos fundamentalmente por cerchas metálicas. A partir de los años 50 fue generalizándose la utilización del concreto lanzado en la construcción de túneles para usos civiles. La clasificación de Lauffer de 1958 refleja perfectamente el uso combinado de cerchas y concreto lanzado en la construcción de túneles en roca. Su utilización requiere, sin embargo, la experiencia directa en obra y es poco práctica en las fases de proyecto y anteproyecto.

Las clasificaciones geomecánicas están adaptadas a los macizos rocosos (como contraposición a los suelos). La transición suelo-roca es siempre difusa. El término "roca blanda", bastante generalizado, define esta transición. La resistencia a compresión simple de la roca intacta proporciona un criterio, utilizado por muchos autores, para clasificar la roca.

Además de la clasificación empírica del comportamiento exhibido por los suelos al ser tuneleados, existen otras clasificaciones como la de Lauffer, que se basa en el tiempo que puede permanecer abierto el frente de excavación sin soporte alguno antes de derrumbarse.

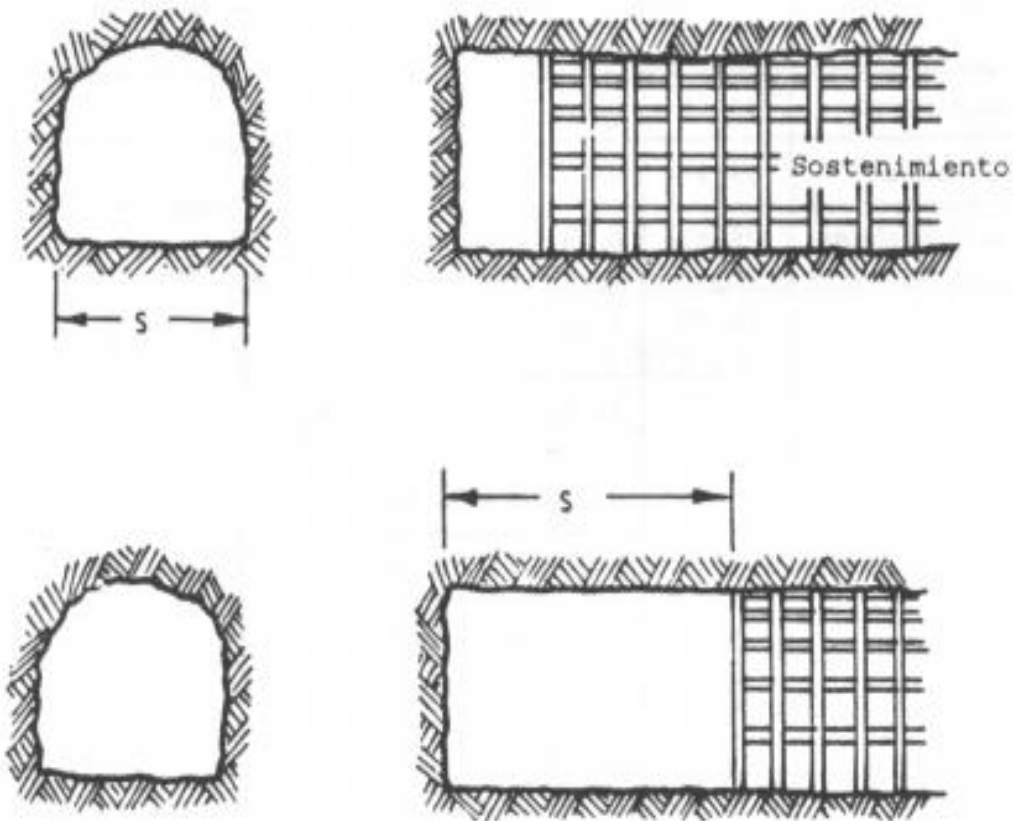
La clasificación geomecánica de Lauffer parte de la idea de la importancia de los defectos del macizo rocoso en su comportamiento mecánico. La hipótesis principal de la clasificación es que el sostenimiento depende, en gran medida, de la calidad de la roca.

Para cuantificarlo, Lauffer estudió diferentes tipos de excavación (incluso minas abandonadas) en diferentes tipos de roca, midiendo el tiempo que eran capaces de mantenerse estables antes de desmoronarse.



A partir de los datos obtenidos, clasificó los terrenos en siete categorías, indicando el tipo de sostenimiento más apropiado para cada terreno en función de dos parámetros:

- La longitud libre o vano crítico: Menor de las dos dimensiones -diámetro o longitud de galería- que se puede mantener estable sin revestimiento.
- Tiempo de estabilidad o mantenimiento (Stand Up Time): Tiempo que puede mantenerse, sin desmoronarse, dicha longitud libre.

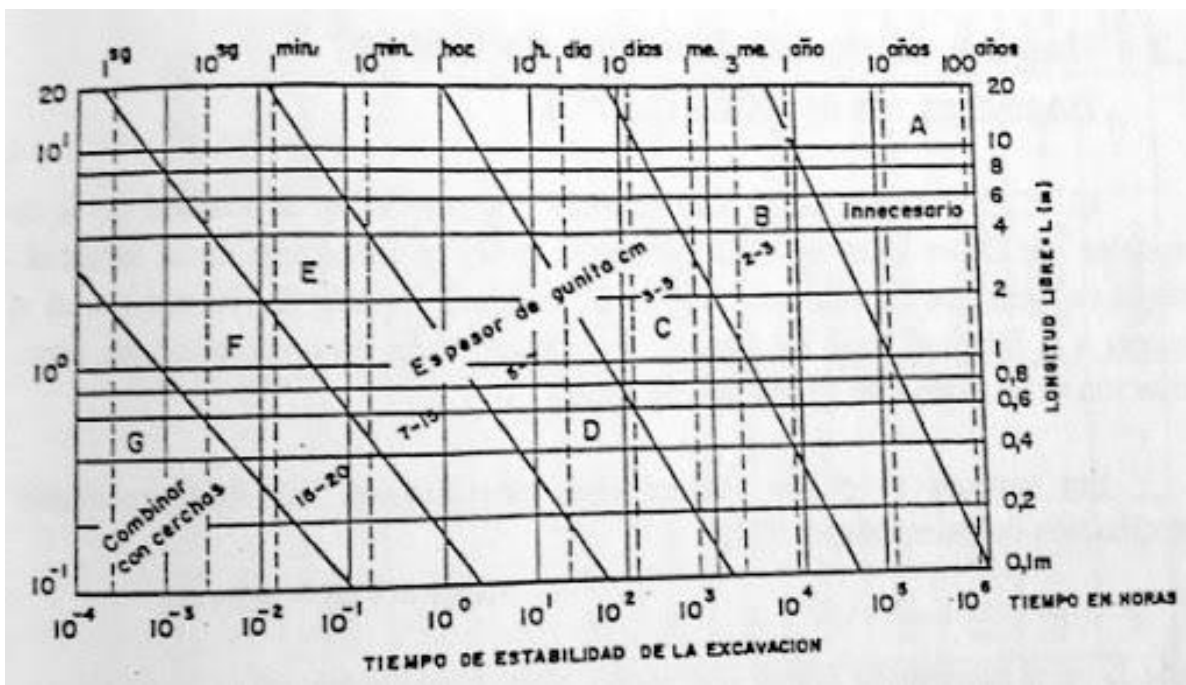
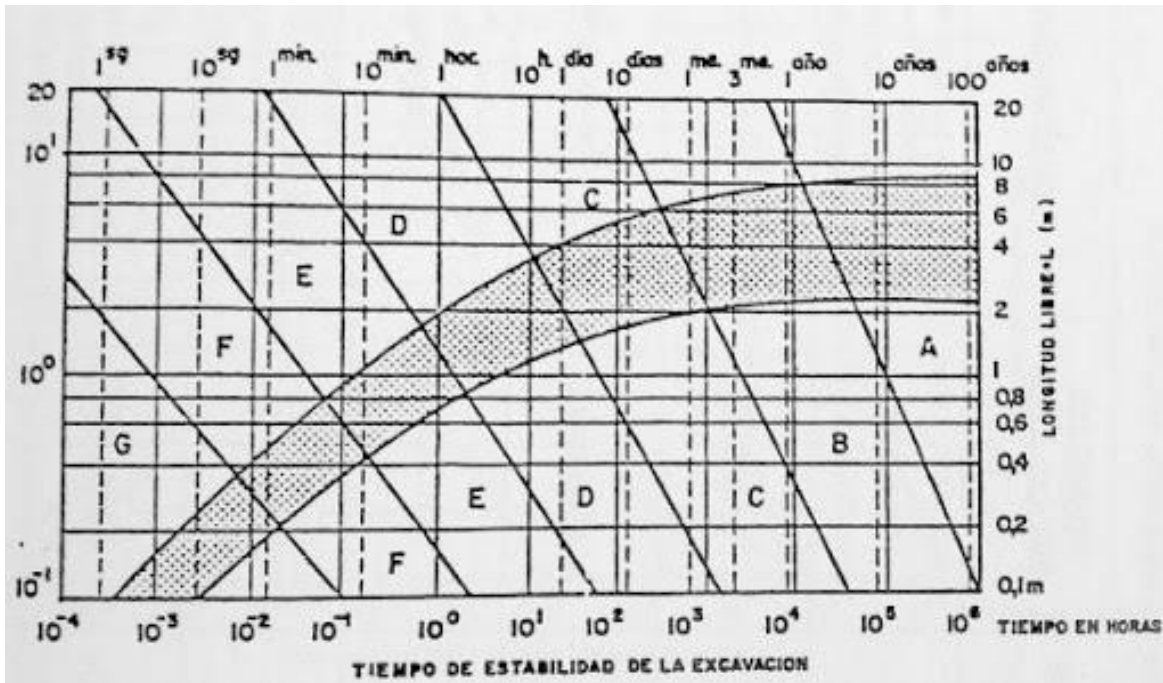




CLASE	TIPO DE ROCA	CALIDAD DEL TERRENO
A	ROCA SANA	MUY BUENO
B	ROCA SANA, COMPACTA PERO FRACTURADA	BUENO
C	ROCA BASTANTE FRACTURADA O ALGO ALTERADA	MEDIO
D	ROCA MUY FRACTURADA O BASTANTE ALTERADA O BLANDA	MEDIOCRE
E	ROCA TRITURADA O MUY ALTERADA, CONJUNTOS RELLENOS DE MILONITO. ROCA MUY BLANDA. TERRENOS ARCILLOSOS CON FUERTES EMPUJES	MALO
F	CARACTERISTICAS ANALOGAS A LOS SUELOS	MUY DIFICIL, REQUIERE METODOS ESPECIALES
G		

CLASE	DESCRIPCION	SOSTENIMIENTO	LONGITUD LIBRE (M)	TIEMPO DE ESTABILIDAD	OBSERVACIONES
A	SANA	--	4.00	20 AÑOS	TERRENO MUY BUENO, UNA EXCAVACION NO REVESTIDA, CON LUZ LIBRE DE 12.00 M PERMANECE ESTABLE DURANTE 20 AÑOS
B	ALGO FRACTURADA	DE TECHO	4.00	6 MESES	TERRENO BUENO
C	FRACTURADA	DE TECHO	3.00	1 SEMANA	TERRENO MEDIO
D	FRIABLE	CERCHAS LIGERAS	1.50	5 HORAS	TERRENOS MEDIOCRE, ROCAS BLANDAS
E	MUY FRIABLE	CERCHAS PESADAS	0.80	20 MINUTOS	TERRENO MALO, ROCA BLANDA DE DEBIL COHESION, TERRENOS ARCILLOSOS CON FUERTES EMPUJES
F	DE EMPUJE INMEDIATO	PESADO Y DE FRENTE	0.40	2 MINUTOS	SE CONSIDERAN MUY DIFICILES Y NECESITAN METODOS ESPECIALES, PARA SER ATRAVESADOS POR UN TUNEL, COMO INYECCIONES, CONGELACION, USO DE ESCUDOS, ETC.
G	DE EMPUJE INMEDIATO FUERTE	PESADO Y DE FRENTE	0.15	10 SEGUNDOS	

Clasificación del terreno según Lauffer.



Graficas para determinar el tiempo de estabilidad de la excavación sin requerir algún soporte.



1.5 TUNELERÍA CONVENCIONAL.

La definición de lo que es “Tunelería Convencional” es más bien subjetiva y puede variar dependiendo del concepto adoptado.

Si el concepto se basa en el equipo de excavación, el término túnel convencional puede aplicarse a cualquier túnel que no es excavado usando una tuneladora (TBM). Pero hoy en día en Tunelería la técnica de excavación mediante el empleo de una tuneladora se ha vuelto común y de esta manera podríamos, también, referirnos a ella como “convencional”.

Excavación de túneles por el método convencional se refiere a la construcción de excavaciones subterráneas de cualquier forma mediante un proceso cíclico que incluye:

- Excavación, mediante el uso de perforadoras y métodos explosivos o excavadoras mecánicas excepto los equipos de excavación de cara completa (tuneladoras), así como el transporte del material de rezaga.
- Instalación de los elementos de soporte primario tales como:
 - Arcos de acero o arcos en celosía.
 - Anclajes para suelos o rocas.
 - Concreto lanzado o fundido in situ, no reforzado o reforzado con fibras o mallas electrosoldadas.

La excavación de túneles por el método convencional se lleva a cabo mediante un proceso de ejecución cíclico o mediante procesos repetitivos de excavación seguida por la aplicación de un soporte primario de importancia, y ambos dependen de las condiciones y comportamiento del subsuelo. Un grupo experimentado de obreros de túneles (mineros), asistidos por una planta normal o



una especial y equipo, podría ejecutar cada ciclo individual de la construcción del túnel.

El método usa principalmente equipo convencional y permite el acceso a la cara expuesta del túnel en todo momento, por tal razón es muy flexible en el manejo de situaciones o áreas donde es necesario hacer cambios en el análisis estructural o en el diseño, y donde, como resultado de lo anterior, es necesario modificar las medidas de soporte de la excavación.

Un equipo estándar para la construcción de un túnel convencional consiste de:

- Un jumbo para hacer los barrenos requeridos en voladuras, anclajes de rocas, aliviar presiones producidas por el agua, hacer inyecciones, etc.
- Rozadora o excavadora en los casos en que no es posible hacer voladuras o no es económico hacerlo.
- Plataforma de izaje que permita a los obreros (mineros) alcanzar cualquier parte de la clave o del frente de excavación del túnel.
- Equipo de izaje de los arcos metálicos
- Cargador o excavadora para cargar el material excavado a los camiones transportadores.
- Camiones transportadores para extraer la rezaga
- Equipo de lanzado de concreto por vía seca o por vía húmeda.

Usando este conjunto estándar de equipos pueden ser aplicados fácilmente los siguientes cambios durante la construcción, si las condiciones del subsuelo cambian o si del monitoreo se deduce que hay que aplicar acciones:

- Incrementar o reducir el soporte, por ejemplo el espesor de la capa de concreto lanzado, número y/o longitud de los pernos por metro lineal de túnel, espaciamiento y dimensiones de los arcos de acero, número y



longitud de marchabantes, aplicación de concreto lanzado en el frente de excavación del túnel, pernos en el frente, etc.

- Variación de tiempo de cierre del anillo, el cual es el tiempo entre la excavación de una sección del túnel y la aplicación de un soporte total o parcial o la variación de la distancia de anillo de cierre desde el frente de la excavación.
- Introducción de un soporte primario de anillo de cierre.
- Variación de la carga de explosivos por cada voladura y variación de la secuencia de detonación.

Otras variaciones en el diseño permiten reaccionar a los cambios en el tiempo de sostenimiento del subsuelo encontrado:

- Incremento o reducción de la longitud de avance de excavación (los avances comunes tienen longitudes que varían entre 0,5 m y 4,0 m.
- Excavación parcial, dividiendo el frente de la excavación por etapas en sección superior, sección inferior y cubeta, o, incluso, realizar en túnel piloto y galerías laterales o en secciones alternadas de sección inferior y/o cubeta.

En el caso de condiciones excepcionales del subsuelo que se está encontrando, sin importar si fueron previstos o no, el método convencional permite reaccionar con una variedad de tecnologías auxiliares de construcción tales como:

- Inyecciones: inyecciones de consolidación (groutings), inyecciones de fisuras, inyecciones a presión, inyecciones de compensación.



- Tecnologías para estabilizar y mejorar el suelo adelante del frente de excavación del túnel como marchabantes, sombrilla de micropilotes, pilotes horizontales con inyecciones (jet grouting), congelamiento del terreno, etc.

La tunelería convencional junto con una amplia gama de métodos auxiliares de construcción permite hacer las más adecuadas elecciones para conseguir una construcción de túneles económica y segura aún en condiciones cambiantes o imprevistas del terreno. También les permite reaccionar en dos direcciones, dependiendo del terreno, bien cambiando al lado más favorable o al menos favorable. Esta flexibilidad hace de la tunelería convencional el método más ventajoso de construcción en muchos proyectos.

Los trabajos subterráneos, realizados por el método convencional, incluyen no solo túneles lineales, tales como los túneles ferroviarios, en autopistas, túneles hidráulicos, sino también cavernas de centrales hidroeléctricas, cavernas subterráneas para almacenamiento, estaciones de metro y de trenes. Ellas pueden estar localizadas a baja profundidad o con una gran cobertura, en terrenos estables o suelos cargados, bajo una presión real de un macizo rocoso, bajo el nivel freático o en condiciones secas.

El método convencional para la excavación de túneles es el mejor método para proyectos con una alta variabilidad del terreno y para proyectos con secciones variables, lo cual permite:

- Una mayor variabilidad de secciones
- Mejor conocimiento del subsuelo mediante el uso de perforaciones exploratorias al nivel del túnel más allá del frente de excavación.
- Más posibilidades en la selección de las etapas de excavación de acuerdo con las condiciones del subsuelo.



- Fácil optimización del soporte primario usando el método observacional en casos especiales.
- Más posibilidades en la selección de los métodos auxiliares de construcción de acuerdo con las condiciones del subsuelo.

La excavación de túneles por el método convencional es especialmente apropiada para:

- Terrenos difíciles con condiciones variantes del subsuelo
- Proyectos con formas altamente variables de su sección transversal
- Proyectos con alto riesgo de inundaciones bajo altas presiones
- Proyectos donde el acceso es difícil
- Túneles cortos

Es responsabilidad de los ingenieros experimentados tomar las decisiones más apropiadas de acuerdo con la ciencia de la ingeniería y su experiencia personal, de tal manera que la construcción del túnel sea segura y económica.



II. CRITERIOS DE DISEÑO.

2.1 ASPECTOS GENERALES.

El trabajo de diseño incluye en general:

- La determinación de la distribución geométrica de las estructuras subterráneas, es decir el alineamiento horizontal y vertical de los túneles, la localización y la dirección del eje de las cavernas y la selección del sistema de túnel.
- La determinación de la forma y tamaño del perfil (sección transversal del túnel)
- La determinación del tipo de excavación (excavación a sección completa o de sección parcial), secuencia de las etapas de excavación a lo largo del eje del túnel), las medidas de soporte temporal o definitivo, así como de las medidas auxiliares de construcción tales como drenajes, o mejoramiento del subsuelo.

El alcance y el grado de refinamiento del diseño dependen de la misma fase en que esté el diseño y del tipo de contrato.

El proyecto es el resultado de un proceso de optimización que implica la evaluación de variantes de diseño. El objetivo es determinar la solución más económica para la construcción, uso, operación y mantenimiento de las obras subterráneas, teniendo en cuenta:

- El uso planeado para la estructura.
- Las exigencias funcionales de los equipos.
- Los requisitos de seguridad para el usuario.



- La vida útil de servicio.
- Los requerimientos de impermeabilidad.
- Las exigencias de seguridad, funcionalidad, y medio ambiente en las etapas de ejecución y operación.

Una exploración apropiada tanto geológica como geotécnica y una completa descripción del subsuelo en las primeras etapas de la planeación son muy importantes, ya que las condiciones del subsuelo son decisivas, no solo para definir la forma de la sección transversal y el método de construcción, sino también para la selección del sistema de túnel y su alineamiento.



2.2 ALCANCE DE LOS TRABAJOS.

Actividades a realizar durante el desarrollo de los trabajos.

- **Estudios topográficos.**

Comprende toda la recopilación de información obtenida por cualquier medio, los trazos, los bancos de nivel, la nivelación, los levantamientos topográficos (planimetría, altimetría), elaboración de los planos correspondientes, etc. que se levanten a lo largo de todo el túnel y áreas aledañas o relacionadas que se requieran para elaborar los proyectos ejecutivos.

- **Estudios Geotécnicos.**

Comprende el establecimiento del plan de estudios de los suelos, la ejecución de todo tipo de sondeos, la recopilación de toda la información en la materia, trabajos de laboratorios, instrumentaciones, integración de perfiles estratigráficos, mapas, su análisis, interpretación y aplicación en los proyectos y diseño de procedimientos constructivos.

- **Estudios de Instalaciones Municipales.**

Comprende, si fuera el caso, el acopio de la información de todas las instalaciones municipales y de todo lo que se aloje a lo largo del recorrido del túnel, incluyendo los trabajos de exploración para detección, calas, los levantamientos topográficos y la integración de documentos para elaborar los proyectos ejecutivos de las obras inducidas, la liberación de interferencias.



- **Estudios Arqueológicos.**

Recopilación de la información, si fuera el caso, en materia e investigación para identificar las zonas arqueológicas, artísticas e históricas catalogadas de valor patrimonial, su naturaleza, ubicación, las disposiciones legales en la materia para que el proyecto integral incluya todas las consideraciones necesarias y las recomendaciones de las dependencias e institutos correspondientes, para así dar cumplimiento a la legislación correspondiente.

- **Estudios en Materia Ecológica.**

Son los estudios que se requieren elaborar para integrar el informe preventivo de impacto ambiental que debe presentar “La Contratista” ante las autoridades correspondientes y obtener el Resolutivo en la materia que autorice la realización del proyecto.

- **Estudios en materia de Impacto Urbano.**

Estudios necesarios para dar cumplimiento a lo establecido en la Ley de Desarrollo Urbano y su reglamentación.

- **Anteproyecto.**

Conjunto de plantas, cortes, perspectivas, diagramas, análisis de ingeniería, maquetas y demás documentos, materiales y apoyos que “La Contratista” podrá utilizar para expresar objetivamente el planteamiento para el desarrollo del proyecto.



- **Proyecto.**

- a. Proyectos arquitectónico, estructural y de todas las instalaciones propias de la obra incluyendo cálculos, diseños, especificaciones, procedimientos, planos y documentos complementarios para construir las obras.
- b. Los servicios de Residencia de Proyecto durante la construcción.
- c. La integración, elaboración y entrega de planos de cómo quedó la obra para la entrega de la misma al organismo operador.

- **Infraestructura.**

Trazo, liberación de interferencias, excavaciones y cimentación de todas las partes de la obra, incluidas en la partida.

- **Superestructura.**

Columnas, muros, armaduras, trabes, losas, techos y todos los elementos que desempeñen una función estructural de todas las partes de la obra, incluidas en la partida.

- **Instalaciones.**

Instalaciones eléctricas, hidráulicas, sanitarias, especiales y otras que sean propias de la obra, incluyendo lo correspondiente a muebles, aparatos, dispositivos, motores, tuberías, ductos, cables y en general todos sus materiales.



- **Equipamiento.**

Adquisición, transporte, en su caso tramitología y gastos de importación, aseguramientos, instalación o entrega de materiales, equipos, máquinas, dispositivos, motores, etc. de lo indicado en el proyecto.

- **Otros estudios.**

Serán aquellos que el concursante considere que debe efectuar para cumplir con la legislación, normatividad y demás disposiciones que rigen este proceso.

- **Obra.**

Demolición de estructuras o elementos existentes, construcción de obras provisionales necesarias, construcción de tablestacas; ejecución de las excavaciones; construcción de losa de piso, muros, cimientos, columnas, travesaños, losas de techo, impermeabilizaciones, estructura de rejillas de ventilación, todos los elementos que forman la estructura de la obra y todo lo necesario para señalamiento, protección al público, confinamiento, y todo lo que esté vinculado con el trabajo a desarrollar, para poder construir la obra.

- **Obras Inducidas.**

- a. El pago de lo necesario para autorizar los proyectos y construcción de retiros, movimientos, modificaciones, etc., de todo tipo de instalaciones públicas o privadas que se requieran para liberar el paso de la obra.
- b. Los costos de la ejecución de los trabajos o el pago correspondiente para quien los ejecute.



- c. El análisis del entorno de la obra y los inventarios notariales necesarios para delimitar responsabilidades en caso de daños a edificaciones vecinas.
- d. Las erogaciones necesarias para dar cumplimiento a lo establecido en materia de ecología, arqueología, etc., y en general lo necesario para poder implantar el proyecto.

- **Proyecto del Sistema.**

La integración de los planos y documentos con los cuales se adquirirán materiales, equipos, máquinas y todo lo necesario para instalar el sistema.

- **Fabricaciones.**

El proceso íntegro desde el mercadeo, selección, pedidos, procesos técnicos, fabricación, integración, pruebas en planta, embalaje, transporte, gastos de importación, almacenaje, hasta la puesta en sitio de los materiales, equipos fijos, máquinas, dispositivos, etc.

- **Prototipo.**

Elaboración y pruebas de los modelos conforme al proyecto.

- **Instalación.**

Instalación de todos los materiales, dispositivos, aparatos y otros componentes del sistema en sitio. Entrega de maquinaria o equipo móvil que forme parte del proyecto.



2.3 ETAPAS EN EL DISEÑO.

El diseño de un túnel se subdivide, siempre, en diferentes fases de acuerdo con las etapas del proyecto:

- ***Diseño conceptual.***

El alcance del diseño conceptual es seleccionar o confirmar el alineamiento del túnel y suministrar al cliente la información necesaria para el proceso de toma de decisiones. Deben realizarse e investigar detalladamente los aspectos de construcción del túnel relacionados con un alineamiento particular.

- ***Diseño preliminar.***

Con base en el alineamiento seleccionado, se refina el diseño conceptual del proyecto y se adelanta el estudio del impacto ambiental. La prioridad de la fase del diseño preliminar se centra en los aspectos legales de los recursos de agua, vegetación y protección al medio ambiente.

Distintos clientes y autoridades pueden requerir subfases individuales cuando se trata de túneles ferroviarios o de vías. La meta común, sin embargo, es recibir la aprobación de las autoridades para la construcción del proyecto.

- ***Diseño para licitación.***

El alcance del diseño para licitación es detallar los trabajos en tal forma que sea posible presupuestar exactamente cada actividad del trabajo. De igual manera, en esta fase, se elaboran los documentos contractuales.



- ***Diseño final.***

El alcance del diseño final es el de detallar el trabajo descrito en el diseño propuesto de tal manera que pueda ser construido de manera económica, y sea estructuralmente seguro, preciso dimensionalmente y funcional.



2.4 CONDICIONES DEL SUBSUELO.

La investigación geológica constituye la base para la descripción del subsuelo.

La descripción del subsuelo es necesaria para la elaboración de un modelo geológico que sea adecuado para la preparación del modelo geotécnico, para la descripción del subsuelo, su subdivisión en diferentes unidades geológicas o en zonas homogéneas y el reconocimiento y la descripción de escenarios potencialmente riesgosos. Las propiedades características del subsuelo deben ser reportadas en el modelo geotécnico.

Previamente debe llevarse a cabo investigaciones geológicas, geotécnicas e hidrogeológicas, incluso de manera suplementaria, durante las fases de diseño, construcción y deben estar disponibles para la construcción y puesta en uso de la estructura subterránea.

La investigación geológica es responsabilidad del dueño del proyecto. La investigación debe ser planeada y supervisada por ingenieros geotecnistas expertos, en estrecha colaboración con el ingeniero diseñador y el dueño. La elaboración del modelo geotécnico es responsabilidad del ingeniero geotecnista.

Métodos de exploración y evaluación de los resultados obtenidos.

- Análisis de la información geológica existente (por ejemplo de estructuras ya construidas en la misma o en una formación geológica similar).
- Mapeos de campo.
- Sensores remotos.
- Perforaciones de exploración.
- Ensayos de campo.
- Ensayos de laboratorio.



- Socavones y galerías (túneles piloto).
- Mediciones geofísicas

El origen de todos los datos debe quedar bien documentado de manera clara y entendible. Debe quedar reportado si la información proviene de:

- Ensayos de laboratorio o de campo,
- Referencias a literatura técnica.
- Información de informes geológicos existentes.
- Valores empíricos.
- Estimaciones o suposiciones

Debe hacerse observaciones sobre los vacíos observados en los resultados reportados, así como describirse la investigación y los métodos de medición empleados. En lo posible debe emplearse métodos estandarizados para la determinación de las propiedades geotécnicas del suelo y la roca mediante ensayos estandarizados de laboratorio o de campo.

El alcance de las investigaciones de campo en la fase de diseño, debe ser específica del proyecto, ejecutable en etapas convenientes, debe corresponder a las etapas planeadas y a la complejidad de la geología y debe tener en cuenta criterios de economía. En zonas donde se prevea riesgos (Ej.: fallas, discontinuidades, cavidades, etc.), en áreas de portal y en zonas con bajas coberturas el terreno debe estudiarse con mayor detalle.

El alcance de las investigaciones de campo llevadas a cabo durante la construcción depende de las condiciones reales encontradas y los riesgos previstos (discontinuidades, cavidades, presencia de gas y de agua). Las

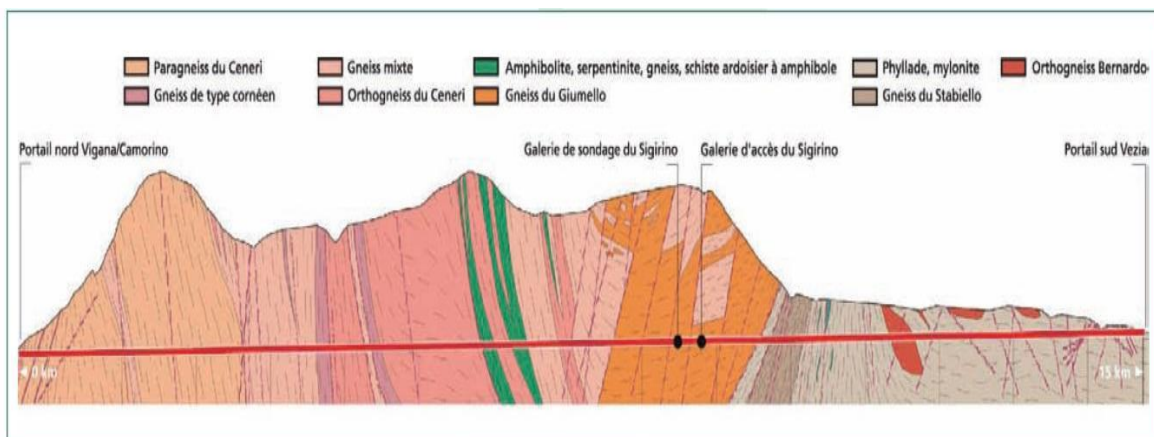


investigaciones sirven para especificar las medidas tendientes a reducir y manejar el riesgo de acuerdo con los escenarios de amenaza.

Condiciones geológicas.

Se debe entregar la descripción geológica por cada unidad geológica o por cada zona homogénea. La base para este trabajo proviene de la investigación geológica. La descripción cualitativa debe, en la medida de lo posible, estar acompañada por información cuantitativa.

Las unidades geológicas en los suelos se describen normalmente como formaciones geológicas del mismo origen (Ej.: morenas, gravas de río, margas intemperizadas, depósitos de arcilla). La descripción del suelo se basa en clasificaciones estandarizadas, combinada con información referente a la petrografía de los componentes y sus propiedades (forma, grado de redondez, grado de meteorización, resistencia, capacidad de hinchamiento, etc.). Debe ser descrita la estructura del suelo (estratificación, anisotropía) así como cualquier otra característica especial (Ej.: la presencia de bloques o componentes orgánicos). La descripción debe complementarse con información adicional, por ejemplo: distribución granulométrica, densidad, grado de saturación, comportamiento cuando se expone al agua libre, etc.



Diferentes tipos del suelo en un macizo rocoso donde cruza un túnel.



En el caso de rocas debe distinguirse entre la descripción de la roca basada en el análisis de un espécimen intacto o la descripción del macizo rocoso como un todo. La descripción de un espécimen incluye el contenido de minerales, estructura y textura, así como la identificación petrográfica. La descripción del macizo rocoso debe incluir los siguientes elementos:

- Estructura geológica general (zonas homogéneas, secuencia de los diferentes tipos de rocas, estratificación, foliación, densidad, zonas de falla, etc.).
- Descripción de las discontinuidades.
- Grado de meteorización, formaciones cársticas, transformaciones hidrotérmicas.
- Esfuerzos in situ y esfuerzos tectónicos residuales supuestos.
- Zonas de falla, tales como zonas rocosas transformadas mecánicamente por procesos tectónicos, así como las formaciones cársticas. Estas zonas deben ser descritas como zonas geológicas homogéneas, dependiendo de su extensión y su frecuencia. Los datos geométricos sobre la posición en el espacio de las discontinuidades y de las zonas de fallas deben reportarse como absolutos en el espacio y también relativos a la estructura (Ej.: con respecto al eje del túnel).

Condiciones hidrogeológicas.

Deben describirse las condiciones hidrogeológicas locales y regionales. En particular, acuíferos, su posible interacción, agua subterránea que aflora, y tabiques aisladores, de igual manera deben mencionarse las condiciones de flujo regionales y su relación con aguas de escorrentía. En particular deben describirse los siguientes elementos:



- Efectos sobre la estructura durante su construcción y durante la vida de servicio sobre la base de las condiciones hidrogeológicas existentes (efectos cualitativos y cuantitativos).
- Efectos del agua subterránea sobre las instalaciones durante la construcción (inundaciones) y en la operación, debido a los efectos de la presión, agresividad química, concreciones, etc.
- Para cada acuífero el tipo de circulación (poros, discontinuidades, formaciones cársticas), los parámetros de permeabilidad, el nivel del agua subterránea, la dirección de flujo del agua, etc.

Condiciones geotécnicas.

Deben ser descritas las propiedades geotécnicas del suelo y de la roca. Deben presentarse las mediciones de las propiedades geotécnicas, tales como resistencia, deformación, hinchamiento y parámetros de permeabilidad, abrasividad, indicando número de especímenes, rango de los valores, y validez espacial. Deben incluirse como tales los valores comparativos, valores empíricos y estimados. Debe proveerse el origen o la fuente de las informaciones.

Para la roca es necesario distinguir claramente entre los datos geológicos para la misma roca intacta, así como para las discontinuidades (límites de la roca, superficies de fractura, karst) así como el material de relleno de las cavidades.

Ocurrencia de gases e información adicional.

Dentro del marco de la investigación debe indicarse la presencia de rocas con una fuente potencial de gases o con depósitos de gases, junto con las trayectorias correspondientes de migración, así como las señales conocidas de presencia de gases en formaciones geológicas similares. Para esto debe dejarse en claro si existe la posibilidad de encontrar depósitos de gases y de su infiltración y cuáles



podrían ser los efectos que se podrían esperar y las medidas apropiadas a tomar para mitigar el riesgo.

La descripción así como la entrega de los informes correspondientes debe incluir los siguientes datos, cuando apliquen:

- Esfuerzos in situ.
- Movimientos causados por fluencia / áreas con deslizamientos.
- Movimientos neotectónicos.
- Temperatura del macizo rocoso.
- Riesgo sísmico.
- Sustancias que presentan riesgo para la salud (cuarzo, asbestos, etc.).
- Radiactividad (incluido radón).
- Zonas de aguas residuales o de suelos contaminados.
- Contaminación del agua subterránea

La experiencia ha demostrado que hacer una buena y completa presentación de la información geotécnica reduce los riesgos tanto para el cliente como para el contratista. Por esta razón se recomienda, para la excavación de túneles por el método convencional, presentar la más completa información acerca de la geotecnia del proyecto.



2.5 PARÁMETROS A CONSIDERAR EN LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL.

El sistema a elegir para la construcción de un túnel comprende todos los trabajos subterráneos necesarios para conseguir el uso pretendido y garantizar la seguridad tanto de personas como de los bienes materiales. Además del túnel principal, el sistema del túnel puede comprender nichos, galerías de extracción, pozos, chimeneas, rutas de escape y otras estructuras complementarias como ductos de ventilación o cavernas para instalar equipos técnicos.

La selección del sistema de un túnel depende principalmente de consideraciones operacionales, organizacionales y de seguridad.

Las condiciones del subsuelo y la topografía (distribución de los túneles de acceso y de las chimeneas o pozos) también pueden tener cierta influencia en la selección del sistema de túnel. Por ejemplo el tiempo de construcción y el valor de los riesgos pueden ser diferentes para un sistema de dos túneles unidireccionales o para un túnel bidireccional.

El alineamiento, tanto vertical como horizontal también depende de varios factores tales como:

- El uso del túnel (máxima pendiente longitudinal, curvatura mínima).
- Consideraciones de drenaje durante la construcción y operación.
- Accesibilidad y peligros naturales en las áreas del portal.
- Las condiciones del subsuelo.

En lo posible el alineamiento debe adaptarse a las condiciones del subsuelo desde la etapa más temprana del proyecto, ya que los peligros, y los respectivos costos de construcción y de riesgos pueden evitarse o reducirse con la selección de un alineamiento diferente.



Aspectos de la ejecución o de operación y seguridad (tales como la necesidad de hacer galerías, ductos de ventilación y rutas de escape) también pueden influir en la selección de un alineamiento distinto. Esto es particularmente importante para túneles largos.

Las condiciones del subsuelo deben tenerse en cuenta al especificar el espacio entre dos túneles (tubos) adyacentes. Otros criterios pueden ser decisivos en casos especiales (bifurcaciones, zonas de portales).

Consideraciones similares aplican a la selección de la localización y orientación del eje de las cavernas.

Secciones transversales típicas de túneles excavados mediante el método convencional.

La forma y las dimensiones de la sección transversal de las obras subterráneas están determinadas esencialmente por:

- Los requisitos de servicio asociados con el uso de las obras subterráneas.
- Las condiciones geológicas y geotécnicas.
- Los aspectos constructivos

El perfil de la sección libre requerida para el túnel es un factor clave para la determinación de la sección transversal de la excavación subterránea. El perfil de la sección se define de acuerdo con el alcance y propósito para la que se construye la estructura, por ejemplo: vías férreas, metros, autopistas, líneas de servicios públicos, accesos, rutas de escape, almacenamiento, plantas de energía, refugios protectores o instalaciones militares.



Paralelamente con el propósito de la estructura, pueden ser decisivos para la selección de la sección transversal criterios adicionales respecto a las condiciones de servicio requeridos por el cliente, por ejemplo:

- Requerimientos de espacio adicional para equipos de operación o de seguridad (instalación de cables, sistemas de señalización, iluminación, ventilación, etc.).
- Requerimientos aerodinámicos.
- Impermeabilidad requerida con respecto al agua que se infiltra desde el subsuelo o al agua que puede salir desde el túnel (por ejemplo, los requerimientos de un sello completo contra agua subterránea presurizada implican la construcción de un arco invertido o incluso una sección circular completa).
- Requerimientos de mantenimiento.
- Requerimientos provenientes de la seguridad y del concepto de rescate (rutas de escape dentro del túnel, disponibilidad de instalaciones durante las emergencias).

La forma y el tamaño de la sección transversal dependen también de la condición del subsuelo, ya que esta última determina el alcance de las medidas de soporte requeridas en la etapa de construcción (soporte del túnel) y en la etapa de servicio (revestimiento final). Debe evitarse una reducción del tamaño de la sección debido a la convergencia del terreno, que se logra mediante la ejecución de una sobre excavación para albergar las deformaciones y las medidas correspondientes de soporte.

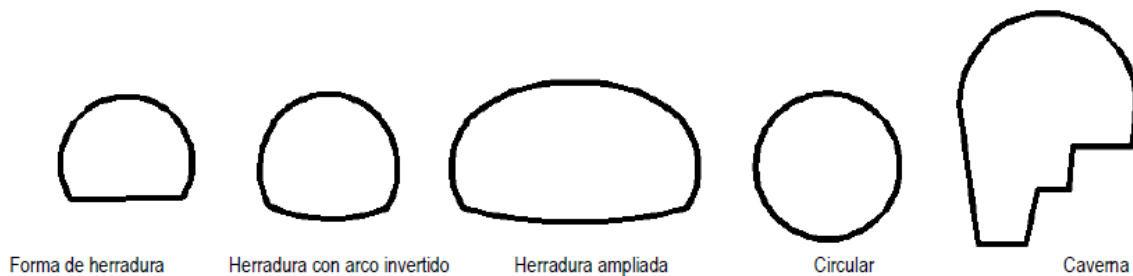
Zonas con rocas débiles, con rocas que fluyen hacia la excavación o que se expanden y rocas blandas (suelos) hacen que se requiera una sección circular o al menos una sección en forma de herradura que incluya un arco invertido.



Algunas consideraciones económicas y la disponibilidad de los equipos necesarios pueden ser decisivas para el método de construcción y tienen, por lo tanto, una influencia considerable sobre la forma de la sección transversal. En contraste con el sistema de perforación con tuneladora (TBM), la sección transversal de un túnel convencional puede ser escogida libremente pero teniendo en cuenta las condiciones impuestas por la geología del terreno.

Las principales formas son:

- Sección transversal en forma de herradura.
- Sección transversal en forma de herradura con arco invertido.
- Sección transversal circular.



Secciones transversales típicas.

En la determinación de la forma y las dimensiones de la sección circular se debe prestar atención a las tolerancias con respecto a la precisión, las tolerancias de construcción y las tolerancias en el levantamiento topográfico.



2.6 EXCAVACIÓN Y SOPORTE.

El propósito del análisis estructural es la determinación de una estructura final económica y de un método de construcción que cumpla con los requerimientos de seguridad, servicio y protección al medio ambiente para unas condiciones del subsuelo dadas. El ingeniero diseñador es responsable de la precisión del diseño.

El diseño estructural sirve de base para los procedimientos tendientes a la aprobación del proyecto, la elaboración de los documentos de la licitación (definición de la excavación, clases de soporte y su distribución) y la determinación de los métodos de excavación y soporte a ser usados en la obra.

El trabajo de diseño consiste en la preparación de las diferentes alternativas estructurales teniendo en cuenta las condiciones de frontera relevantes, verificando su practicidad y evaluando las posibilidades de implementación, teniendo en cuenta, siempre, el cumplimiento de los requerimientos del diseño.

La construcción exitosa de las obras subterráneas depende de la consideración detallada de todos los factores que son relevantes para el comportamiento estructural. En las obras subterráneas, la estructura incluye el terreno que rodea la excavación y todo elemento de soporte temporal o definitivo necesario para el equilibrio o para limitar las deformaciones. Los factores que gobiernan el diseño estructural pueden resumirse como sigue:

- La estructura del terreno y sus propiedades.
- Condiciones hidrogeológicas.
- Esfuerzos iniciales.
- Dimensión y forma, localización y alineamiento de la excavación.
- Método de excavación (en la sección transversal y en la dirección longitudinal).
- Medidas de soporte (temporal y permanente)



La información requerida para el diseño estructural de las obras subterráneas es diversa y puede ser agrupada de acuerdo con las siguientes fuentes:

- Exploraciones geológicas y ensayos de campo.
- Investigaciones de laboratorio.
- Análisis estructural usando modelos de interacción subsuelo – estructura.
- Ensayos y mediciones en campo.
- Experiencia propia de los ingenieros

Procedimiento de diseño de excavación y soporte.

El diseño se desarrolla por pasos, empezando con la determinación de las zonas que tienen un mismo comportamiento del suelo durante la construcción (zonas homogéneas) y terminando con la definición de las clases de excavación y de soporte.

En un primer paso, el área del proyecto es dividida en zonas homogéneas que presenten condiciones similares en cuanto a:

- Condiciones geológicas y geotécnicas.
- Condiciones topográficas (Ej.: cobertura, taludes en las vecindades, etc.).
- Aspectos ambientales (Ej.: estructuras en la superficie cercanas a las obras subterráneas, aguas subterráneas que requieran protección, etc.).

La definición de los sectores del túnel debe hacerse con base en el conocimiento actualizado de cada etapa del proyecto. El número de sectores del túnel es especificado por el proyecto y depende de la etapa de diseño y de la complejidad de las condiciones del subsuelo en el área de proyecto. En general, una subdivisión aproximada del alineamiento puede ser suficiente en las primeras



etapas de un proyecto, mientras que la información en las subsecuentes etapas del proyecto puede requerir de mayor precisión.

En el siguiente paso y con base en la experiencia y en cálculos simples, se lleva a cabo un balance aproximado de las condiciones del proyecto, riesgos o peligros potenciales y las medidas necesarias para enfrentarlos y se toma una decisión preliminar con respecto a la sección transversal, y el método de construcción para cada sector del alineamiento.

La sección transversal usual en una roca suficientemente firme y cuando no existe ninguna presión de agua, es generalmente en forma de herradura. En este caso la roca que bordea la excavación es parte de la estructura portante y el revestimiento final tiene que soportar solamente cargas pequeñas debidas al terreno.

En rocas menos firmes o más meteorizadas las cargas debidas al terreno se incrementan de tal manera que la sección transversal del túnel tiene que cerrarse en la cubeta.

Como una primera mejora se debe planear una losa recta, llegando a ser más y más curva en la medida en que aumente la debilidad del subsuelo. En suelos blandos o bajo grandes presiones la sección circular llega a ser un anillo circular.

En el siguiente paso hay que desarrollar la excavación y las clases de soporte para cada sección del alineamiento. Esto está determinado por las condiciones previstas del subsuelo y de agua.

Estas clases describen la manera de proceder con la secuencia de excavación y las medidas para instalación del soporte, cada una dentro de un rango cierto y definido. Las clases varían de acuerdo con el comportamiento que se anticipa del subsuelo después de la excavación.

Los principales rasgos de las clases de excavación y de soporte son los tiempos entre la excavación y la instalación del soporte, los requerimientos de subdivisión de la sección transversal, la necesidad de alguna medida especial de soporte y los requerimientos de soporte del frente de excavación del túnel.



En condiciones pobres del terreno, por ejemplo, la sección transversal del túnel se divide en varios frentes de avance, los cuales deben ser cuidadosamente excavados y soportados en etapas cortas.

En otra sección del alineamiento puede haber una roca medianamente firme, aquí debe planearse una excavación y soporte con dos subdivisiones de la sección transversal, y excavando mediante perforación y voladura en avances largos y con menores medidas de soporte.

Para cada sección del alineamiento la excavación y el soporte deben ser planeados teniendo en mente la más probable condición del subsuelo, así como las condiciones de peligro potenciales que pueden ser deducidas de la información geotécnica.

Subsecuentemente, los peligros potenciales deben ser descritos y analizados en detalle teniendo en cuenta la solución técnica seleccionada preliminarmente.

Dependiendo de los resultados de esta evaluación, se planean las medidas de mitigación.

Estas pueden dar como resultado la modificación del método inicial, o la introducción de elementos adicionales de soporte o incluso la selección de otro método.

La evaluación se lleva a cabo para cada etapa de la construcción así como para la fase de operación.

Como regla general todos los tipos de procedimientos de construcción tienen sus escenarios de riesgos propios y específicos que deben ser evaluados en detalle.

Por lo tanto, la solución técnica se desarrolla iterativamente repitiendo el procedimiento esbozado arriba hasta que se logre una solución que cumpla todos los requerimientos de seguridad y de servicio para la sección del alineamiento bajo análisis.



Podría ser de utilidad desarrollar alternativas de diseño técnicamente equivalentes para cada sección de alineamiento y seleccionar la solución definitiva en el siguiente paso, donde es llevada a cabo una síntesis de las diferentes secciones del alineamiento teniendo, adicionalmente, en cuenta el tiempo de construcción y las consideraciones de costo, así como aspectos relacionados con la ejecución de los trabajos de construcción.

Por ejemplo, cambiar frecuentemente los métodos de excavación y de soporte puede ser, en muchos casos, técnicamente y económicamente impracticable.

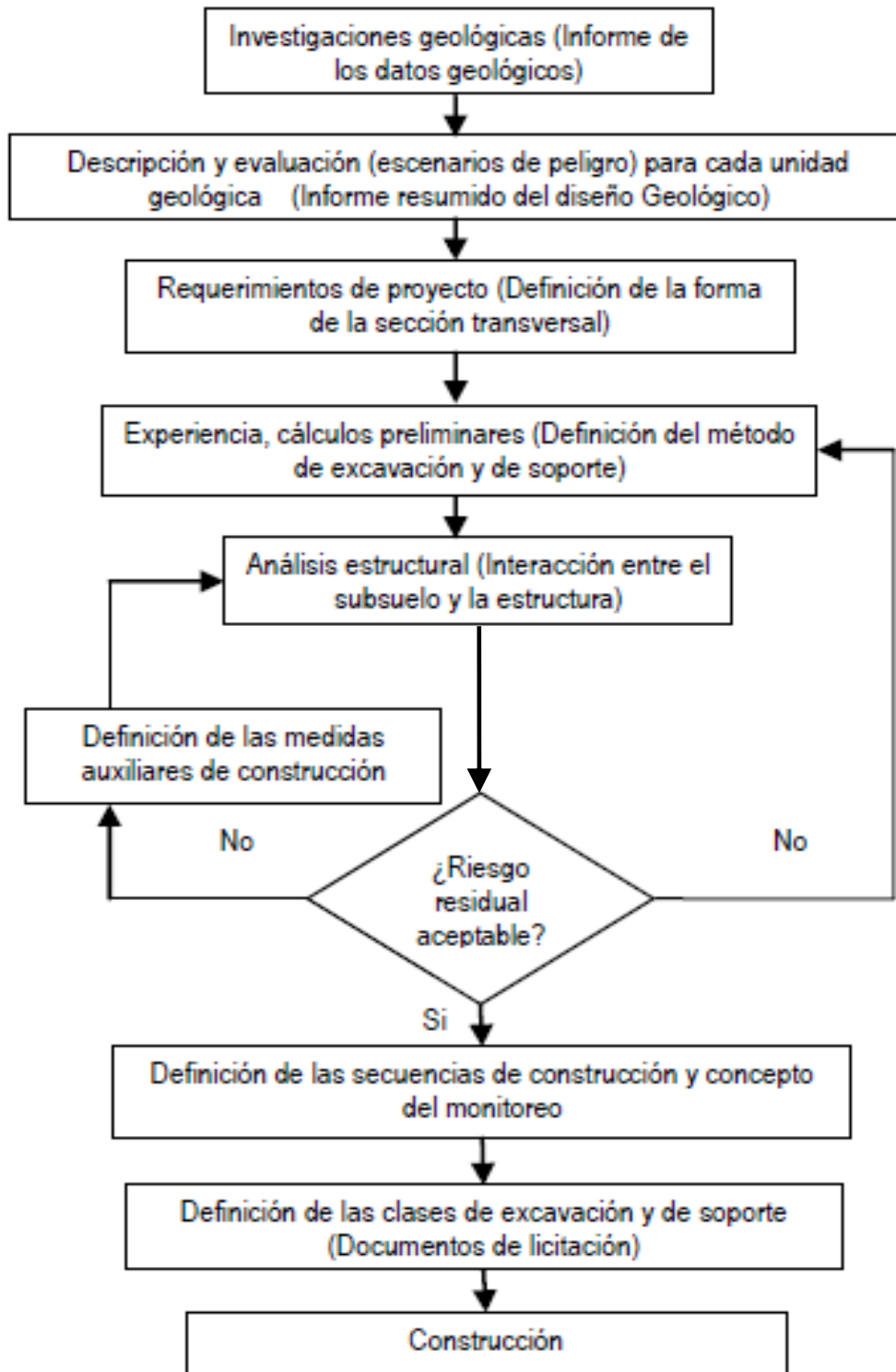


Diagrama para la investigación, el diseño y la construcción de un túnel excavado empleando el método convencional.



Con base en los resultados de los pasos previos se divide el alineamiento en sectores con similares requerimientos de excavación y soporte. Tanto la excavación como el soporte deben quedar bien definidos previamente a la construcción. Todas las posibles condiciones geológicas deben quedar solucionadas con un rango de métodos de excavación y soporte, así como la probabilidad de su ocurrencia.

En la fase final el diseño debe ser transformado en un estimativo de costo y de tiempo, para el proceso de licitación. Las clases de excavación y de soporte se deben especificar con base en la evaluación de las medidas a tomar para excavar y dar soporte. Las clases de excavación y de soporte forman la base de la cláusula de compensación en los documentos de la licitación. Una clase de excavación y de soporte puede estar asignada a más de una sección del túnel, en la medida que las mismas acciones pueden ser apropiadas para distintas condiciones.

Se requiere una predicción de las clases de excavación y de soporte para establecer el pago de las cantidades de obra. Esta distribución debe hacerse para las condiciones más probables y debe incluir, también, las variaciones esperadas en las clases de excavación, resultantes de las condiciones del subsuelo. Al establecer la distribución de las clases de excavación y de soporte a lo largo del alineamiento del túnel debe considerarse la heterogeneidad del suelo.

Riesgos en la excavación.

El reconocimiento y la evaluación de los riesgos potenciales así como la planeación de las posibles medidas de mitigación son fundamentales para el diseño de las estructuras subterráneas.

El término “riesgo” se refiere a un posible evento que tiene el potencial de causar un impacto en aspectos relacionados con el proyecto, los cuales pueden desencadenar consecuencias asociadas con:



- La salud y la seguridad.
- El medio ambiente.
- El diseño.
- El programa de diseño.
- Los costos del diseño.
- La ejecución del proyecto.
- El programa de construcción.
- Los costos asociados con la construcción.
- Terceras partes y estructuras existentes tales como: edificaciones, puentes, túneles, vías, vías férreas superficiales o subterráneas, pavimentos, canales, trabajos de protección contra crecientes, estructuras superficiales o subterráneas, y toda otra estructura o infraestructura que pueda verse afectada por la ejecución de los trabajos.

Los riesgos deben ser evaluados con base en el proyecto específico y sus consecuencias deben ser identificadas y cuantificadas mediante una evaluación de riesgos a través de todas las etapas del proyecto.

Los riesgos potenciales en trabajos subterráneos incluyen, pero no están limitados a:

- Colapso de la clave o del terreno sobre la excavación practicada hasta la superficie del terreno.
- Caída de rocas.
- Estallido de la roca.
- Falla del frente donde se trabaja.
- Reducción de sección (convergencia).



- Levantamiento del piso del túnel debido al hinchamiento.
- Deterioro del revestimiento debido al ataque de aguas agresivas.
- Asentamiento o elevación de la superficie del terreno que causen daños (Ej.: cuando se excava debajo de vías transitadas, edificios, puentes, presas, etc.).
- Afluencia de agua o de lodo.
- Escape de gas (metano, radón, etc.) o liberación de sustancias peligrosas a la atmósfera tales como polvo que afecte los pulmones (cuarzo, asbesto).
- Altas temperaturas en el macizo rocoso o en el agua subterránea.
- Acciones sísmicas (Ej.: transición entre la excavación subterránea y la construcción con corte y relleno).
- Efecto sobre manantiales y aguas superficiales.

Los riesgos, individualmente o en combinación, constituyen posibles escenarios de riesgo. La descripción de los peligros en forma de escenarios de peligro es en principio cualitativa y debe, en lo posible, soportarse a través de datos cuantitativos. Deben reportarse sus causas y sus mecanismos. La evaluación de los riesgos debe cubrir los diferentes sectores de la obra subterránea y del macizo rocoso circundante, así como las diferentes etapas de la construcción y la vida útil de servicio planeada.

La evaluación debe llevarse a cabo en cooperación cercana con los expertos involucrados en el proyecto (diseñador, ingeniero geotecnista, e ingeniero residente).

En general los riesgos pueden contrarrestarse evitándolos, previniéndolos o reduciendo el peligro, con los siguientes ejemplos:

- Escoger un alineamiento diferente.



- Escoger una estructura con menor susceptibilidad respecto a los riesgos previstos.
- Escoger una estructura que sea capaz de sufrir daños localizados, incluso la pérdida de uno de sus elementos estructurales individuales o una sección completa, sin colapsar.
- Escoger una estructura que no va a colapsar sin avisar.
- Escoger medidas auxiliares apropiadas de geotecnia.
- Escoger materiales de construcción apropiados.
- Apropiado análisis estructural y dimensionamiento.
- Detalles cuidadosos de los elementos estructurales incluyendo impermeabilizaciones y drenajes.
- Ejecutar la obra de acuerdo con lo planeado y de manera cuidadosa.
- Revisiones apropiadas de la ejecución y sistemas de alarmas (monitoreo con instrumentos).
- Medidas especiales de protección para estructuras vecinas y planta.
- Medidas para manejar eventos críticos.
- Monitoreo apropiado y mantenimiento

Tanto la evaluación de los riesgos y el diseño de medidas de mitigación se basan en un profundo entendimiento de los mecanismos esenciales, experiencia en proyectos anteriores similares, análisis estructural y cuidadoso dimensionamiento.

El método seleccionado de construcción debe ser evaluado con respecto a los requerimientos de seguridad y de servicio, (por ejemplo las deformaciones deben estar dentro de límites aceptables) para todas las etapas de la construcción.



Además, debe revisarse el cumplimiento de los requisitos ambientales (asentamiento de la superficie, vibraciones, perturbaciones en el agua subterránea, etc.).

Debe ser evaluada la variabilidad de los factores influyentes.

Los diseños, el dimensionamiento, y los métodos de construcción deben revisarse tan a fondo como sea posible y deben evaluarse de acuerdo con la experiencia ganada en proyectos comparables. Deben ser analizadas y sustentadas las divergencias substanciales con respecto a la práctica normal de la construcción. En la evaluación de las posibilidades de implementación se debe poner especial atención a:

- La simplicidad de la ejecución.
- La insensibilidad a inexactitudes inevitables de ejecución o posibles errores durante la misma.
- La ejecución de los trabajos.

Para la evaluación de los riesgos individuales (con o sin medidas para remediarlos), se debe llevar a cabo un análisis de riesgo por medio de una evaluación cualitativa de la probabilidad de ocurrencia y mediante una cuantificación del impacto. Debido al hecho de que los diferentes datos de entrada tienen cierto grado de inexactitud, se recomienda usar, para su análisis, un método cualitativo simple en lugar de modelos matemáticos complicados. Un simple pero efectivo método de evaluación del riesgo es determinar el riesgo (R) como el producto de la probabilidad de ocurrencia (P) multiplicada por el impacto o la pérdida de tiempo (I), es decir $R = P * I$. La probabilidad de ocurrencia y el impacto son valores estimados.



Los criterios de evaluación y la estrategia de intervención dependen del proyecto. El valor del riesgo R después de implementar las medidas planeadas de corrección es el riesgo remanente e inevitable.

Análisis y dimensionamiento del túnel.

Las decisiones de diseño deben hacerse sobre la base de un análisis cuidadoso, tanto cualitativo como cuantitativo, de los factores relevantes. Además del juicio ingenieril, basado en la propia experiencia del ingeniero, se pueden aplicar métodos modernos de análisis estructural (Ej.: métodos numéricos).

La verificación cuantitativa de la seguridad estructural y la aptitud para el servicio puede dejarse de lado si los requerimientos de diseño respectivos pueden ser asegurados, de una manera confiable, usando prácticas de diseño probadas y/o medidas de ejecución apropiadas. En efecto, algunas acciones pueden a menudo ser mitigadas de mejor manera generando medidas con respecto al diseño o eliminando la acción, que mediante el dimensionamiento usando estados límite. Con el fin de juzgar la eficacia de las medidas de construcción y ejecución adoptadas, debe contarse con experiencia real, comparable y transferible.

El uso apropiado del análisis estructural requiere el completo entendimiento del complejo proceso que involucra la construcción de las obras subterráneas y una excelente experiencia previa en ingeniería geotécnica y geológica. Por esta razón el análisis estructural no puede desarrollarse a partir de una experiencia inadecuada o de un discernimiento intuitivo de los problemas.

Así, la información que provee el análisis estructural suplementa el conocimiento básico que se espera de un ingeniero de túneles. Por un lado es menos probable que se genere un error cuando se parte del conocimiento ya acumulado en la práctica de la tunelería y luego se encaja la información obtenida mediante el análisis estructural dentro del marco de trabajo de este conocimiento básico.



La meta del análisis estructural es investigar cuantitativamente el comportamiento de la estructura (descrita básicamente en términos de deformaciones y esfuerzos) en el caso de dimensionamiento bajo análisis, teniendo en cuenta los factores críticos influyentes.

Se requiere una clara formulación del problema que enfrenta el ingeniero antes de empezar a llevar a cabo el análisis estructural. Sobre la base de esta formulación del problema se puede establecer un modelo adecuado y las variaciones en los datos de entrada pueden ser definidas si se especifican los límites superior e inferior.

El modelo estructural idealiza la compleja realidad con respecto al sistema estático, el comportamiento del material y las cargas.

El modelo estructural comprende la estructura entera, e incluye el subsuelo alrededor de la excavación y los elementos de soporte temporal o definitivo. El modelo conecta acciones, formas geométricas, y las propiedades de los materiales de construcción y del terreno, con el propósito de efectuar el análisis estructural.

El modelo del terreno es parte del modelo estructural y comprende, de manera ideal, la estructura geológica y las propiedades del terreno. El modelo estructural debe ser apropiado para predecir el comportamiento estructural en las situaciones de dimensionamiento en análisis. Debería, por un lado, aproximarse tanto como sea posible a las condiciones reales y, por el otro, ser tan simple como sea posible.

Los métodos del análisis estructural deben estar basados en prácticas estandarizadas de ingeniería o sino en teorías empíricas probadas.

Dependiendo de los interrogantes particulares que deban ser respondidos por el análisis estructural, puede ser decisivo contar con diferentes modelos estructurales. Es posible considerar diferentes modelos para un mismo problema (hipótesis de comportamiento) y llevar a cabo una variación de los parámetros



para cada modelo. De esta manera es posible escoger los factores importantes y comparar los resultados correspondientes a estimaciones pesimistas y optimistas.

Debe prestarse atención a los parámetros que ejercen gran influencia. A los resultados del análisis estructural debe verificárseles su validez, teniendo en mente que ellos no se refieren a las condiciones reales, sino al modelo escogido. La validez de los resultados de computador está condicionada por qué tan bien reflejan la realidad.

Dado que los modelos estructurales involucran también suposiciones subjetivas, los resultados finales no están exentos de duda.

El análisis estructural provee indicaciones útiles pero no pruebas del comportamiento estructural. Por lo tanto, los resultados de cómputos no pueden tomar decisiones importantes, sino, suministrar una razón para la toma de dichas decisiones.

Los casos de dimensionamiento, las suposiciones hechas en el análisis estructural, los modelos analíticos y las verificaciones de la seguridad estructural y la aptitud para el servicio deben quedar claramente documentados en el informe técnico.

Los resultados de computador deben presentarse en forma de diagramas, que constituyan un buen resumen de los resultados y permitan comparar, fácilmente, varios casos calculados. Las deformaciones del terreno y los esfuerzos en el revestimiento calculados son de gran valor al generar conclusiones que afecten las decisiones constructivas.

Modificaciones previas a la construcción del túnel.

La información acerca del subsuelo puede estar sujeta a incertidumbres dependiendo de la complejidad geológica, la amplitud de la pre – investigación



geológica y la experiencia en otros proyectos con condiciones geológicas similares que esté disponible.

Si el comportamiento estructural no puede predecirse con suficiente confianza, con base en las investigaciones de campo, el análisis estructural y experiencias comparativas, el diseño debe permitir o prever modificaciones en los métodos de construcción durante la construcción, con tal que los riesgos o peligros relevantes puedan ser detectados y ubicados a tiempo, mediante observaciones y no conduzcan a fallas súbitas o incontrolables.

Por otro lado, se debe reducir el riesgo potencial mediante la implementación de medidas que contemplen varios tipos de soporte y otras medidas constructivas que permitan cumplir con los requerimientos de seguridad.

Con el propósito de efectuar las modificaciones en los métodos de construcción en la obra, la información adquirida durante la ejecución, tanto acerca de las propiedades del terreno como sobre el comportamiento estructural, deben ser introducidas en el proceso de ejecución y de diseño que se encuentre en desarrollo.

En particular, el diseño debe especificar:

- Mecanismos relevantes que pongan en peligro la seguridad o que desmejoren el servicio durante la construcción.
- La información a ser recolectada en obra durante la construcción, por ejemplo: registros geológicos del frente de excavación del túnel, resultados de perforaciones exploratorias, observaciones cualitativas (como signos de esfuerzos excesivos en el revestimiento o fallas del frente) o resultados de monitoreo.
- Criterios para la selección de la excavación, soporte y medidas auxiliares.



- El criterio debe basarse en observaciones cualitativas o valores a controlar (en general las deformaciones en la excavación y sus alrededores) determinados por análisis estructurales o la experiencia que se tenga.
- Las acciones a ser tomadas para cada desviación significativa e imprevista de los hallazgos hechos por observación con respecto a lo esperado.
- Un criterio de manejo, con todas las provisiones técnicas y organizacionales, que facilite un oportuno proceso de toma de decisiones.

Durante la construcción, todos los datos relevantes, conceptos, consideraciones y decisiones deben ser archivados de tal manera que sea posible la revisión del proceso de toma de decisiones.



2.7 REVESTIMIENTO FINAL.

Un espacio subterráneo, excavado mediante el método convencional puede necesitar un revestimiento final como complemento del soporte primario y de acuerdo con los requerimientos del proyecto con respecto a:

- Provisión para todos los casos de carga final.
- Cumplimiento del margen de seguridad final.
- Lograr las medidas de protección necesarias (Ej.: impermeabilidad al agua).
- Garantizar el tiempo de servicio requerido.

Existen, generalmente, dos opciones para construir el revestimiento final:

- Instalar un revestimiento secundario e independiente, el cual se dimensiona para contrarrestar todos los casos de carga final. El revestimiento secundario puede ejecutarse en concreto lanzado o en concreto fundido en el sitio.
- De acuerdo con los requerimientos de proyecto el revestimiento final puede o no ser de concreto reforzado (barras de acero o fibras).
- Instalación de capas adicionales de concreto lanzado para reforzar el soporte primario para soportar todos los casos de cargas.



III. CRITERIOS DE CONSTRUCCIÓN.

3.1 INTRODUCCIÓN.

El llamado “Nuevo método austriaco de construcción de túneles” (New Austrian Tunnelling Method NATM) ya no es tan nuevo porque tiene más de 50 años.

Actualmente hay cierta confusión porque en varios países se utilizan nombres diversos para definir al mismo método:

- Neue Österreichische Tunnelbaumethode, NÖT, nombre original, acuñado por Rabcewicz en 1962 y utilizado en Austria.
- Spritz betonbauweise, en Alemania.
- Sprayed concrete lined tunnels, SCL, en Inglaterra.
- Methode convergence-confinement, en Francia.
- Upper half vertical subdivision, UHVS, en Japón.
- Cross diaphragm method, CDM, en Japón.
- Sequential excavation method, SEM, nombre “neutral”, recomendado por ITA, sin connotaciones nacionales.

El método debería haber alcanzado la madurez pero todavía se producen (cada vez menos) polémicas sobre él.

Su fundamento teórico se debe a Rabcewicz en la década 1940-50. Es curioso constatar que Terzaghi y Rabcewicz entraron simultáneamente en el mundo de los túneles. El austriaco Terzaghi asesorando durante la construcción del metro de Chicago y presentando en 1947 su clasificación empírica para túneles, por primera vez, en el prontuario de la “Shearing and Stamping Company” en USA.



El austriaco Rabcewicz construyendo bunkers para aeródromos militares, como oficial de ingenieros de la Wehrmacht en la campaña de Rusia, y trabajando después en la reconstrucción europea tras la II Guerra Mundial. En base a esas experiencias obtuvo en 1948 la patente austriaca nº 165.573 como primera definición de su método.

Su desarrollo práctico inicial se inscribió en la revolución tecnológica de la década 1950-60, durante la cual se introdujeron en los túneles nuevos métodos constructivos: anclas pasivas, concreto lanzado, formas deslizantes TH; que venían en muchos casos de la práctica minera.

En 1956-58 se construye, en Caracas, el primer túnel vial con sostenimiento de concreto lanzado, y también se patentó (patente austriaca nº 197.851, Brunner, 1958). Como referencia temporal hay que recordar que el mismo año 1956 se construye el túnel hidráulico de Oahe, en USA, con la primera máquina tuneladora Robbins. Las dos tecnologías, tan diferentes entre sí, son coetáneas.

El método se divulgó en la década 1960-70. El “bautizo” del método tuvo lugar en el XIII Coloquio Geomecánico de Salzburgo, donde Rabcewicz acuñó, por primera vez, la expresión New Austrian Tunnelling Method.

Y la “puesta de largo” fueron los artículos de Rabcewicz en la revista “Water Power” (1964, 1965) En 1969 el austriaco Müller lo utilizó en el Metro de Frankfurt, y luego en otros metros alemanes.

Los tres “padres” del NATM fueron Ladislaus von Rabcewicz (1893-1975), Leopold Müller (1908-1988) y Franz Pacher (1919-) los tres trabajando profesionalmente en Salzburgo, una ciudad cuya tradición universitaria era solamente eclesiástica. Por eso se habla de una “escuela de Salzburgo”. El epígono actual más importante del método es probablemente el profesor Wolf Schubert, de la Universidad Técnica de Graz (y nieto de Rabcewicz).

En la década 1970-80 se postularon en varios países europeos los llamados “principios” del NATM.



- Utilizar la roca en torno al túnel como elemento resistente.
- No dañar la roca durante la excavación.
- Colocar sostenimientos flexibles con la velocidad de instalación más adecuada para cada clase de terreno.
- Clasificar el terreno en el proyecto y verificar la clasificación en obra para definir los sostenimientos.
- Controlar la influencia del tiempo, y distancia al frente, en el comportamiento del conjunto terreno túnel.
- Medir las convergencias, y otros datos de la instrumentación, para modificar los sostenimientos a la medida del comportamiento del terreno.
- Construir sostenimientos / revestimientos definitivos flexibles.

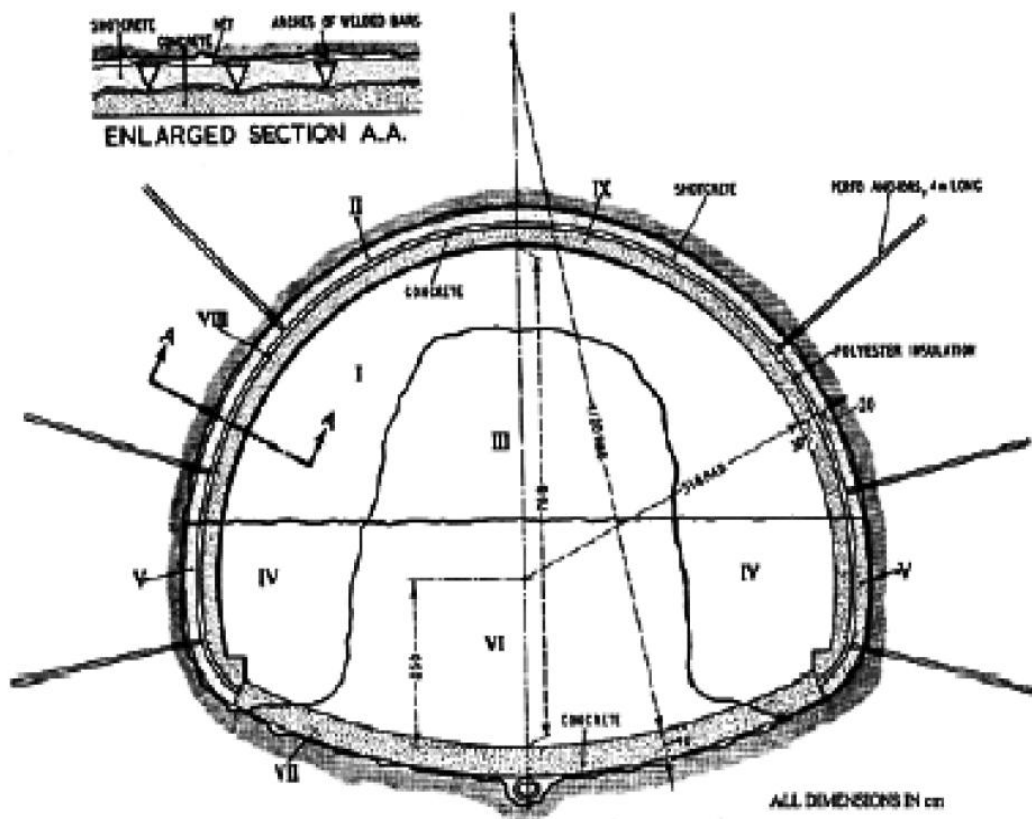
Además de los principios básicos:

- Movilizar la resistencia del terreno en torno al túnel.
- Proteger los paramentos del túnel con concreto lanzado.
- Instrumentar.
- Colocar sostenimientos flexibles.
- Cerrar la contrabóveda rápidamente (especialmente en terrenos blandos).
- Tener contratos adecuados (para una aplicación que puede variar en función del desarrollo de la obra).
- Clasificar la masa rocosa para definir los sostenimientos.

La siguiente figura, tomada de Rabcewicz (1965), esquematiza el complejo proceso constructivo original del método en terrenos blandos. Los números romanos indican el orden de construcción:



- I.- Excavación de la clave, dejando un machón central sin excavar para proteger el frente.
- II.- Construcción de la primera capa de sostenimiento en la clave.
- III.- Excavación del núcleo central por debajo de la clave.
- IV.- Excavación de las zapatas.
- V.- Construcción de la primera capa de sostenimiento en las zapatas.
- VI.- Excavación del núcleo central inferior.
- VII.- Construcción de la losa o cubeta.
- VIII.- Construcción de la capa intermedia del sostenimiento, impermeabilización.
- IX.- Construcción del revestimiento (o de la 2ª capa del sostenimiento).



Sección tipo para un túnel convencional, propuesta por Rabcewicz (1965)



3.2 ASPECTOS GENERALES.

Métodos de excavación.

Los métodos de excavación en la construcción de túneles empleando el método convencional son:

- Perforación y voladura, se aplican principalmente cuando se cuenta con roca dura en el terreno.
- Excavación mecánica, principalmente cuando se tiene suelos blandos y rocas fracturadas (usando máquinas fresadoras, excavadoras con palas, máquinas escarificadoras, martillos hidráulicos, etc.).

Ambos métodos de excavación pueden ser usados en el mismo proyecto en caso de que exista una gran variedad de condiciones del terreno. En los dos métodos la excavación es adelantada paso a paso y por tramos.

La longitud de un tramo generalmente varía desde 4m, cuando existen buenas condiciones, hasta 1m o menos en suelos y en condiciones de terrenos malos.

La longitud del tramo es el factor de mayor importancia al evaluar la velocidad de avance de la excavación.

El ingeniero diseñador debe prescribir o limitar la selección del método de excavación sólo si existen razones que fuercen a hacerlo, con base en las restricciones del proyecto. La responsabilidad de la selección del método de excavación debe dejarse en manos del constructor, con base en la descripción hecha por el dueño del proyecto de las condiciones del terreno y los límites impuestos por el ingeniero diseñador.



3.3 SECUENCIA DE EXCAVACIÓN.

El método convencional permite excavar la sección transversal del túnel en toda la sección o mediante excavación parcial. Junto con el análisis estructural, un importante criterio para seleccionar la secuencia adecuada de excavación, es la longitud de cada avance individual de la excavación, la cual depende del tiempo que pueda permanecer el terreno sin soporte.

Con buenas condiciones del terreno la máxima longitud del tramo está limitada por la tolerancia aceptable para la sobre excavación, lo cual es principalmente un criterio económico, en la medida que la sobre excavación deba ser llenada de nuevo hasta la línea de diseño de la circunferencia del túnel.

Ambos tipos de excavación (sección completa y excavación parcial) permiten hacer sondeos exploratorios desde el frente en cualquier momento.

La excavación de sección completa es usada para secciones transversales pequeñas, con buenas condiciones de terreno y con largo tiempo de auto soporte. En vista de que ha empezado a ser común un cierto alto grado de mecanización del trabajo con el empleo de equipos grandes y de alto desempeño, se excavan con el método de sección completa incluso grandes secciones transversales (70 a 100 m²) aún con condiciones difíciles de la roca, por ejemplo roca descompuesta.

En cualquiera de los casos, debe ponerse mucha atención a la estabilidad del frente y a menudo se hace necesario el soporte en el frente (anclajes, concreto lanzado).

La excavación a sección completa permite el cierre inmediato del anillo de soporte primario, cerca del frente de la excavación.

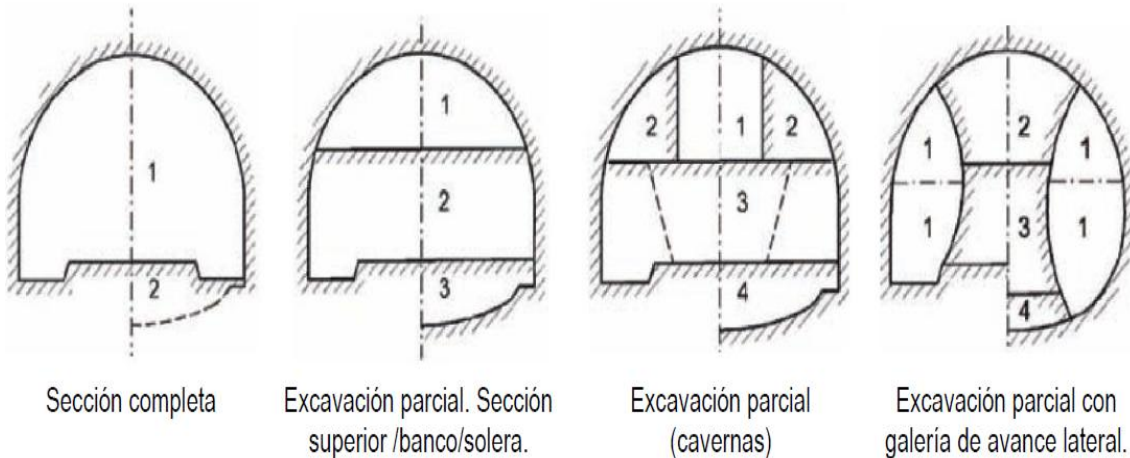
La excavación parcial es usada principalmente para grandes secciones transversales en suelos y cuando se cuenta con un terreno desfavorable. Hay varios tipos de excavaciones parciales tales como: sección superior, banco, solera, galería lateral de avance, túnel piloto, etc.



La excavación parcial permite la combinación de diferentes métodos de excavación en la misma sección transversal, por ejemplo voladuras en la sección superior y excavación mecánica del banco, por ejemplo con una fresadora.

La selección de cuál de los dos métodos de excavación (parcial o de sección completa) es mejor, depende de las condiciones del terreno, pero también de aspectos medio ambientales, de la magnitud de los asentamientos en la superficie y de consideraciones económicas.

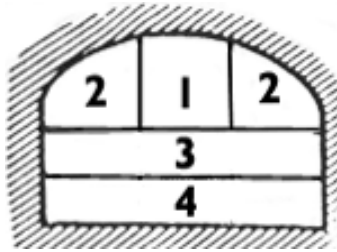
En casos especiales pueden ser usadas ambas secuencias de excavación. Sin embargo, cambios frecuentes del tipo de excavación pueden resultar antieconómicos. Hoy en día las excavaciones de sección completa han llegado a ser posibles incluso en condiciones de terreno difíciles.



Secuencias de excavación en tunelería convencional.

Método Inglés:

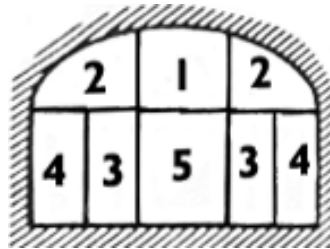
Recibe su nombre por haber sido aplicado en túneles a través del tipo de terreno que usualmente se localiza en Inglaterra, como son las arenas y areniscas. Su principal característica es proceder el avance de la perforación a sección completa del túnel, en una sola operación.



Método Inglés.

Método Belga:

Se basa en los principios que permitieron la construcción, en 1828, del túnel del Charleroi en el canal que enlaza Bruselas y Charleroi.

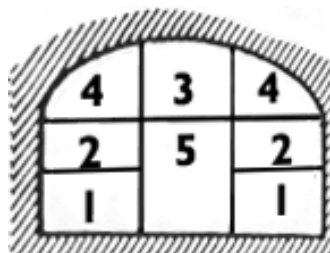


Método Belga.

Método Alemán:

En este método se procede siguiendo el sistema de núcleo central.

Método Alemán Modificado: Se aplica en el caso en que durante la operación de perforación del túnel a través de un terreno bastante firme, surja la aparición de agua, lo que origina una alteración en el método Clásico Alemán en cuanto a las etapas sucesivas de ataque del frente.

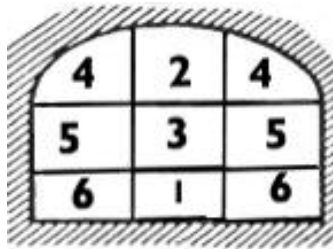


Método Alemán.



Método Austríaco:

Los austríacos desarrollaron un plan de trabajo basado en la utilización de puntales de madera formando un sistema de entibación. La excavación se realiza como se muestra a continuación.



Método Austriaco.

Método Italiano:

Consiste en extraer solo el medio arco más la galería central por la cual se retira la marina, luego se concreta el medio arco, luego se extrae el resto del material por zonas y se van concretando los muros (método similar al método belga).

- **Excavación.**

Implica remover los materiales que se encuentran dentro del trazo del túnel, utilizando los métodos y equipos.

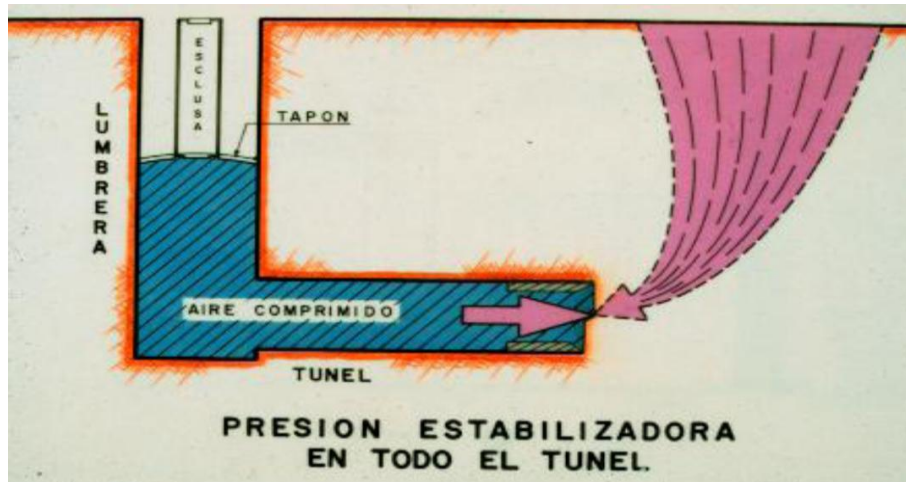


Excavación del frente mediante el uso de rozadora hidráulica.



- **Estabilización del frente.**

Se refiere a detener los materiales que pudieran ser inestables en el frente de ataque al momento de llevar a cabo la excavación del túnel.



Estabilización frontal con aire comprimido.

- **Estabilización de las paredes.**

Tiene que ver con la colocación oportuna del soporte primario, para detener la tendencia natural del terreno vecino a cerrar el hueco abierto.



Uso del concreto lanzado y aplicado directamente sobre el terreno.



- **Revestimiento.**

Es la colocación del acabado final que debe tener el túnel para cumplir con su funcionamiento previsto.



Uso del concreto lanzado y acero de refuerzo.

PREPARACIÓN DE PORTAL DE ENTRADA Y/O SALIDA.

Es importante prevenir el acceso a la excavación del túnel posterior a la terminación de la construcción de la lumbrera. Para esto es necesario dejar las preparaciones correspondientes en los muros de las lumbreras de tal forma que nos permita el fácil acceso al túnel sin demoras de tiempo por demolición de concreto y retiro de acero pero que a su vez garantice la estabilidad de la excavación y la seguridad del personal, por lo que se colocará un marco metálico de geometría cuadrada amarrado al muro de la lumbrera, de esta manera el hueco que queda en el mismo solo estará reforzado por la malla electro-soldada y el concreto lanzado.



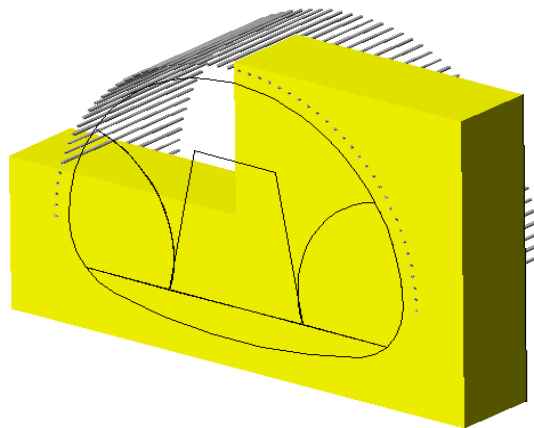
EXCAVACIÓN Y REZAGA DEL TÚNEL CONVENCIONAL.

Una vez concluida la construcción de las lumbreras y de haber colocado todos los equipos y maquinaria para ascenso y descenso de personal, herramienta, etc., se procede a la excavación del túnel por el método convencional.

Primeramente hay que construir la trabe de borde que nos ayudará a abrir caja para la construcción así como soportar el primer avance de excavación de la clave. Esta trabe quedará sujeta, a su vez, por un sistema de anclaje de marchabantes que ayudarán a dar un soporte a la clave y paredes del túnel.

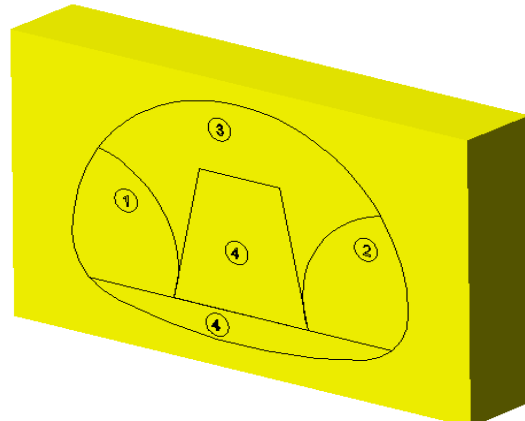
- **Soporte de portal de entrada.**

Lo ideal es que se coloque un sistema de marchabantes (paraguas) en la periferia de lo que será la sección del túnel, por medio de anclas de acero.



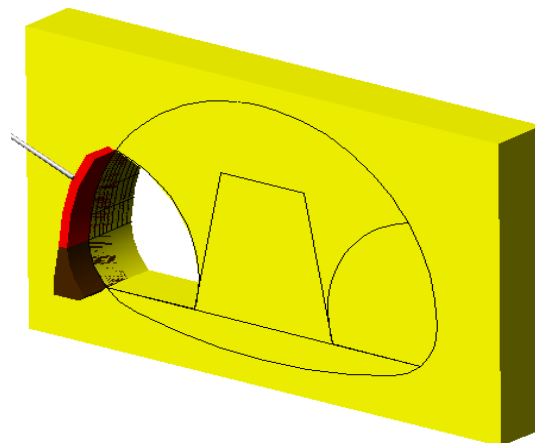
- **Seccionamiento del Túnel.**

Una vez que se ha soportado el inicio de la excavación, se continúa con el seccionamiento del túnel, esto es cuatro pasos empezando por las paredes, siguiendo con la clave, continuando por el prisma central y terminando con la cubeta.



- **Primer etapa de excavación:**

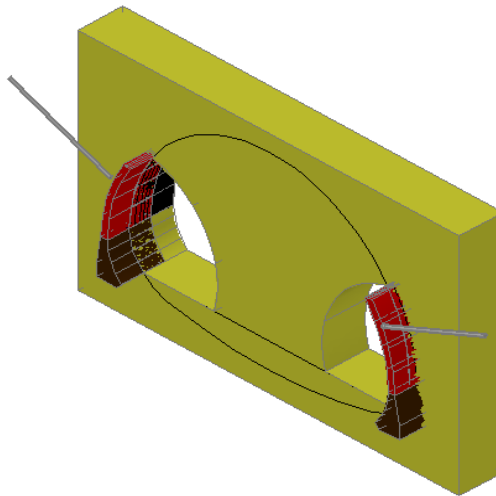
Inicia la excavación con uno de los dos muros del túnel, con un avance promedio y dependiendo del terreno de 1.50 m a 2.00 máximo o lo que indique el proyecto, esto da forma a un túnel piloto. Una vez excavado se conforma la superficie para efectiva poder construir una zapata y proseguir a la colocación de malla electrosoldada en toda la sección excavada del túnel y la zapata, fijándola con anclas de sujeción. Se procede a colocar concreto lanzado hasta un espesor de 0.25 m o lo que indique el proyecto, Posteriormente se irá colocando un sistema de anclaje de tensión en los muros, dependiendo del % de resistencia alcanzado en el concreto lanzado.





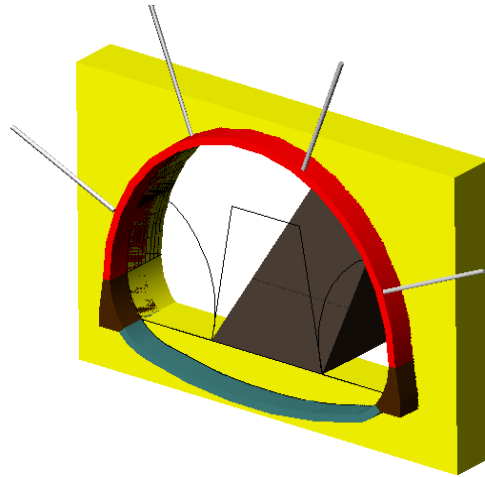
- **Segunda etapa de excavación.**

Inicia la excavación en el muro opuesto, una vez excavado se conforma la superficie para poder construir la zapata y así poder colocar malla electro - soldada en toda la sección excavada del túnel y la zapata, fijándola con anclas. Se coloca el concreto lanzado con un espesor de 0.25 m o lo que indique el proyecto; posteriormente se colocara un sistema de anclaje en el muro.



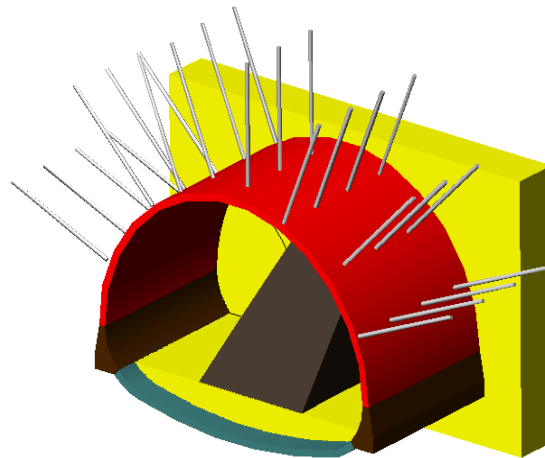
- **Tercera etapa de excavación.**

Una vez excavados y protegidos lo túneles piloto y construidas las zapatas se hace la excavación de la clave con un avance de 1.50 a 2.00m o lo que indique el proyecto, dejando un prisma central para mantener el soporte frontal y se procede a colocar malla electro - soldada en toda la sección excavada del túnel. Se coloca el concreto lanzado con espesor de 0.25 m o lo que indique el proyecto; posteriormente se colocara el sistema de anclaje en la clave para serrar el sistema de anclaje.



- **Cuarta etapa de excavación.**

Esta etapa se ejecutará cuando ya se logró un avance en las etapas 1, 2 y 3 a manera de no obstruir las actividades de éstas, ya que se refiere a la excavación primeramente del prisma central y posteriormente la excavación de la cubeta para continuar con el armado y colado de la misma y finaliza con la colocación del sistema de anclas (en función del % de resistencia del concreto).



Sobre la marcha de la excavación suelen presentarse incidencias como caídos por inestabilidad del suelo ya sea por la intemperización o por que las características y propiedades de la estratigrafía del terreno que en ocasiones no se pueden



reconocer con los estudios geotécnicos; o simplemente porque es necesario soportar el terreno para cruzar alguna interferencia de importante aportación de cargas, por lo que la experiencia en este tipo de obras nos lleva a la conclusión de tomar en cuenta otro tipo de soportes para el terreno como lo son los marcos metálicos que serán buena solución para este tipo de eventos.

- **Recubrimiento.**

Es importante tener cuidado en contar con el mínimo el espesor de concreto lanzado que solicita el proyecto por lo que para cubrir este punto, en muchas ocasiones se colocan escantillones de varilla.

- **Retiro de rezaga.**

Este es uno de los puntos importantes que hay que tomar en cuenta, ya que todo material compactado al ser movido de su estado real de reposo tiende a configurar su estructura representándose este evento en un abudamiento que generalmente es del 30 %, lo importante de esto es el retiro del mismo desde el frente de excavación hasta su elevación y su posterior retiro.

La rezaga de material se transportará en vagonetas conducidas por una locomotora desde el punto de fresado hasta la lumbrera donde acto seguido será la elevación de este material hasta la superficie por medio de una draga y tolvas de recepción de capacidad suficiente para satisfacer la oferta de este producto, posteriormente se descargará directamente en los camiones para su retiro final.

- **Sistema de iluminación y energía.**

Es importante que en la excavación de la lumbrera y a lo largo del túnel, se cuente con un sistema de electrificación que proporcione la energía suficiente para los equipos de trabajo que lo requieran y para la iluminación dentro y fuera de las excavaciones y del área de obra.



Este sistema contará con circuitos, líneas, tableros, interruptores, contactos, lámparas, etc. necesarios para la correcta funcionalidad del sistema eléctrico.

- **Ventilación.**

Además de la iluminación y la energía eléctrica es importante contar con un sistema de ventilación conformado por un tubo de lona de longitud variable y un motor de capacidad adecuada para poder ventilar el frente de la excavación del túnel y así, además de tener aire limpio, poder retirar el aire contaminado por el polvo y la emisiones de gases quemados por la maquinaria de combustión que se llegue a utilizar, este sistema se colocará elevado y sujeto a lo largo de la clave del túnel; el motor se queda en la entrada del túnel y el tubo de lona se irá añadiendo conforme al avance de excavación y a manera de que no obstruya las actividades del frente de excavación.

REVESTIMIENTO FINAL DEL TÚNEL CONVENCIONAL.

Finalmente después de haber terminado la excavación del túnel se procede a la colocación del revestimiento final.

Este será como lo marca el proyecto, respetando las especificaciones en cuanto al armado y colocación del acero y las características del concreto.

- **Armado de acero.**

Por lo regular el acero de refuerzo para el revestimiento final, se habilita desde la superficie y se transporta hasta la zona donde esté el avance.

Se debe tener cuidado en todo momento de los traslapes, ganchos, silletas, separadores, detalles, etc. que exijan los planos estructurales.



- **Cimbra deslizante.**

De igual forma que el revestimiento de las lumbreras, en algunos casos y a reserva de emplear el concreto lanzado reforzado con fibras de acero como revestimiento final, se modulan cimbra metálicas que cumpla con el diseño geométrico del túnel y que permita su fácil maniobrabilidad, su práctico deslizamiento, su adecuada sujeción, su descimbre, su efectiva nivelación y su segura orientación.

- **Colado y vibrado de concreto.**

El colado del concreto es otro punto de importancia y principalmente en los tramos alejados a las lumbreras y esto se debe a la longitud que tendrá que recorrer el concreto para llegar a su disposición final.

Para lograr este fin se colocan sistemas de bombeo a base de tuberías, codos, abrazaderas rápidas, atraques, etc. de tal forma que permita la desinstalación eficaz al momento de un taponamiento del mismo.

Durante la colocación del concreto se debe garantizar el compactado del mismo para evitar porosidades en el espesor del recubrimiento que indica el proyecto, para lo cual es común que se utilicen vibradores de banco que se mantengan sujetos a la cimbra, estos vibradores deben de ser eléctricos o de aire.

- **Calidad del concreto.**

Es importante que se cuente con personal de laboratorio que se encargue de hacer las pruebas correspondientes del concreto, desde la revisión de los agregados a la hora de fabricar la mezcla, en caso de hacerse en obra, hasta la obtención de las resistencias del mismo mediante especímenes.



El laboratorista corroborará la dosificación del concreto y los revenimientos, y nos apoyará en la dosificación de mezclas para casos especiales que se lleguen a presentar.

- **Verificación de niveles y ejes.**

En este punto se hace un trazo de niveles y ejes para la colocación de la cimbra, al terminar el cimbrado y antes del colado se verifica que los niveles y líneas se hayan respetado; durante el colado y al término de este se continúa con la revisión de estos puntos para que en caso de requerirse se hagan las maniobras requeridas para cumplir topográficamente.

Posteriormente a la terminación de la obra se entrega un levantamiento del como quedaron los niveles y ejes y donde se indique si hubo algún cambio en el trazo por cualquier motivo que se halla presentado.



3.4 MAQUINARIA Y EQUIPOS EMPLEADOS

Para la excavación de túneles por el método convencional se requiere de una serie de maquinaria, equipos y herramientas especiales conforme se avance en la ejecución de la obra, algunos serán de combustión, otros eléctricos, otros neumáticos y otros simplemente manuales; algunos básicos y otros de importancia.

A continuación se enuncian algunos de ellos, esto no quiere decir que sean todos o que se limite a ellos.

- Excavadora 320 / Orugas
- Fresadora con cabeza cortadora transversal.
- Equipo para Excavación de Muro Milán (Almeja Hidráulica)
- Grúas Hidráulicas
- Draga Link Belt LS – 118
- Almeja
- Equipo de bombeo de concreto.
- Plataformas con tracto camión.
- Plantas de Lodos Bentoníticos.
- Equipo Jet Grouting.
- Equipos de perforación para el sistema de anclaje (track drill)
- Equipos de inyección.
- Camiones de Volteo.
- Cargadores sobre neumáticos.
- Plantas de Luz.



- Plantas de soldar de combustible
- Grúas hidráulicas sobre camión.
- Camioneta de estacas
- Retroexcavadora / Neumáticos
- Compresor de 750 PCM portátil
- Camión pipa para agua
- Rompedora de pavimento
- Dobladora y cortadora de varilla
- Subestación Eléctrica.
- Transformadores.
- Manipulador Telescópico.
- Equipo de corte oxi-acetileno
- Bomba de Lodos 4" Ø
- Bomba sumergible eléctrica de 4"Ø
- Equipo electrógeno de iluminación



3.5 PROCESO ADMINISTRATIVO.

Para poder llevar a cabo todos los trabajos que se requieren en la ejecución de la obra se llevará también ligeramente en paralelo al proceso constructivo un proceso administrativo que irá respaldando todas las necesidades de la obra.

Este proceso administrativo implica la elaboración de programas de obra, programas de suministro de maquinaria y equipo, programas de suministro de materiales, control de personal, control de avances de obra, control de generadores y estimaciones de obra, elaboración de bitácoras de obra, minutas de trabajo, boletines constructivos, juntas para aclaraciones y reporte de obra así como para solucionar problemas que se presenten en los procesos constructivos.

También en este proceso se realizará la planeación y la organización de la obra, se generará la logística de las instalaciones así como el control de subcontratistas y de proveedores.

Los siguientes enunciados indican algunas actividades administrativas que influyen directamente para la ejecución de la obra.

- ***Pre-operativos para la excavación del túnel.***

Estas actividades nos van a evitar muchos apuros si se realizan con tiempo.

- Adquisición de rozadora.
- Fechas de compromiso del proveedor.
- Lugares probables de adquisición.

- ***Actividades Previas para la excavación del túnel.***

- Programación para ejecutar los trabajos de mejoramientos y preliminares a la construcción de lumbreras de acceso.



- **Trabajos Preliminares para la excavación de túnel.**
 - Distribución de Instalaciones en superficie.
 - Ubicación del Cárcamo de rezaga.

- **Diseño del Revestimiento en lumbreras y túnel.**
 - Diseño del Revestimiento de lumbreras y túnel.
 - Cotización de moldes y accesorios para cimbra deslizante.

- **Actividades que requieren órdenes de trabajo y/o subcontrato.**
 - Ingenieros de Subcontratos.
 - Ingenieros de Control de Proyecto.

- **Servicios.**
 - Suministro de agua potable.
 - Acarreos de agua potable y agua tratada.
 - Cableado de alta tensión para subestación.
 - Cableado eléctrico del sistema de alumbrado y accesorios.
 - Sistema de ventilación.
 - Accesorios de soporte para líneas de tuberías.
 - Líneas de aire y bombeo.

- **Recursos humanos.**
 - Superintendente de excavación.



- Ingeniero Jefe de Obra.
- Jefes de Frente.
- Ingeniero con dominio de Inglés.
- Ingeniero Geotecnista.
- Renta de oficinas de campo.



3.6 CONSTRUCCIÓN.

Los túneles se construyen excavando en el terreno, manualmente o con máquinas. Los sistemas habituales de excavación subterránea son medios mecánicos, voladuras y manual:

- **Manual.**

Derivado de la minería clásica usando martillo neumático en la sección a excavar.

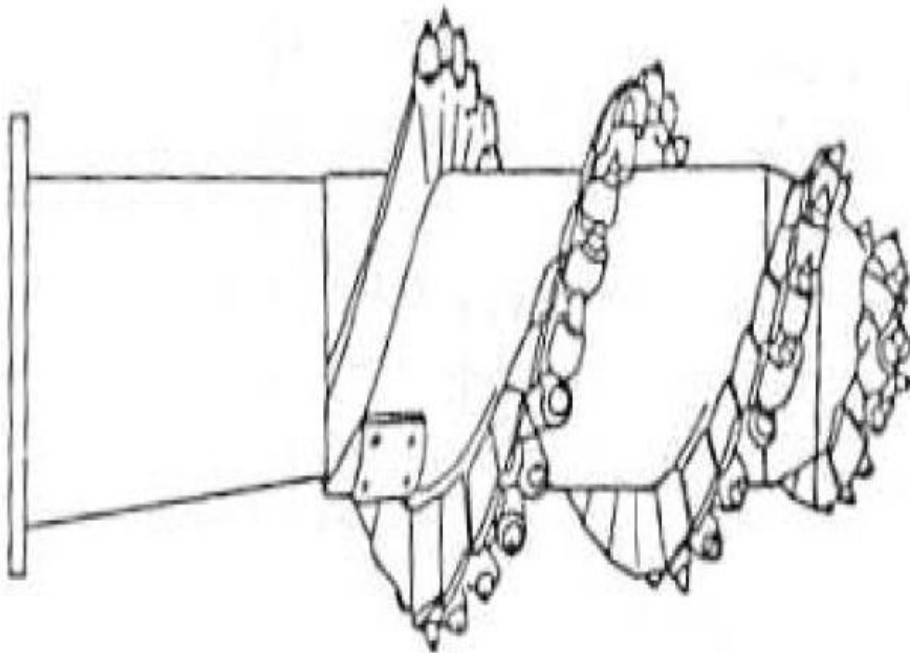


Uso de martillos neumáticos para excavación.

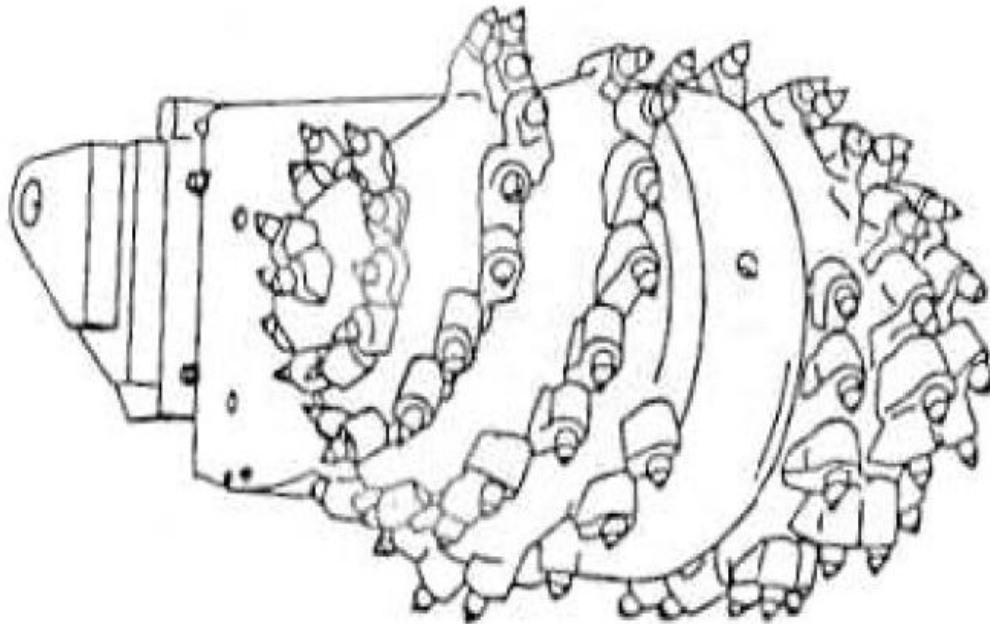
- **Medios mecánicos.**

Se consideran en este grupo las excavaciones que se avanzan con máquinas rozadoras; con excavadoras, generalmente hidráulica – brazo con martillo pesado o con cuchara, sea de tipo frontal o retro-; con tractores y cargadoras (destrozadoras), e, incluso, con herramientas de mano, generalmente hidráulicas o eléctricas.

Maquinaria convencional (excavadoras con bote o con martillo hidráulico), Rozadora, Topo, Tuneladora.



Rozadoras Hidráulicas. Cabeza Longitudinal. El eje de giro es perpendicular al eje de trazo de excavación.



Rozadoras Hidráulicas. Cabeza Transversal. El eje de giro es paralelo al eje de trazo de excavación.



Uso de martillo hidráulico.



- **Voladuras.**

Durante muchos años ha sido el método más empleado para excavar túneles en roca de dureza media o alta, hasta el punto de que se conoció también como Método Convencional de Excavación de Avance de Túneles. La excavación se hace en base a explosivos, su uso adecuado, en cuanto a calidad, cantidad y manejo es muy importante para el éxito de la tronadura y seguridad del personal, generalmente se usa dinamita.

La excavación mediante explosivo se compone de las siguientes operaciones:

- Perforación.
- Carga de explosivo.
- Disparo de la carga.
- Evacuación de humos y ventilación.
- Saneamiento de los hastiales y bóveda.
- Carga y transporte de escombros.
- Replanteo de la nueva tronadura.

Perforación y voladura mediante explosivos (Jumbos, Track Drill, Perforadoras de Pierna).



Excavación del terreno mediante voladuras.



- **Mejoramiento de las propiedades del suelo.**

Inyección de Lechadas, Químicos o Paraguas.



Sistemas de estabilización. Paraguas de anclas. (Marchabantes).



3.7 SOPORTE INICIAL.

El propósito del soporte inicial o primario es el de estabilizar la excavación subterránea hasta que se instale el revestimiento final.

De esta manera la instalación del soporte es, como primera medida, un tema de salud ocupacional y de seguridad pero, también, es un tema de hacer posible el uso del túnel mismo, así como de protección del medio ambiente (edificaciones vecinas, líneas de comunicación dentro o sobre las instalaciones bajo tierra).

En muchos casos puede llegar a ser necesario aplicar el soporte en combinación con medidas complementarias de construcción. Los elementos más comunes de un soporte primario son:

- Anclajes a la roca.
- Concreto lanzado (no reforzado y reforzado con fibras o con mallas).
- Arcos de acero o reticulados.
- Mallas.
- Encamisado.

Estos elementos se aplican individualmente o en combinación en diferentes tipos de soporte dependiendo de la evaluación de las condiciones del terreno por el ingeniero responsable de la obra y teniendo en cuenta el diseño correspondiente.

En cada avance deben instalarse elementos de soporte primario cerca del frente de la excavación por razones de seguridad y de salud de acuerdo con la investigación de las condiciones reales del terreno y del análisis estructural.

La selección de los elementos de soporte debe hacerse considerando el principio de funcionamiento y la presión de soporte de cada elemento. De acuerdo con los requerimientos del análisis estructural, de las condiciones del terreno y de la



secuencia de construcción, puede ser necesario instalar elementos adicionales para el soporte primario.

El plan base de construcción indica los tipos de soporte disponibles para dada zona homogénea del modelo geotécnico e incluye los límites y los criterios para sus posibles modificaciones o variaciones en obra.

El plan base de construcción incluye también criterios de advertencia y medidas para remediar en el caso en que se excedan los límites aceptables de comportamiento.



3.8 MEDIDAS DE CONTROL ANTES Y DURANTE LA EXCAVACIÓN.

En casos especiales, la excavación puede ser llevada a cabo sólo con el uso de medidas auxiliares de construcción. Estas medidas auxiliares de construcción pueden ser clasificadas dentro de las siguientes categorías:

1. Mejoramiento del terreno.
2. Refuerzo del terreno.
3. Abatimiento (desección).

- **Mejoramiento y refuerzo del terreno.**

El mejoramiento del terreno tiene que ver con la aplicación de métodos que mejoren las propiedades mecánicas o hidráulicas del terreno.

El mejoramiento del terreno tiene que ser adelantado, generalmente, en forma paralela a la excavación y da como resultado interrupciones del avance de excavación.

En casos especiales esta mejora del terreno se puede llevar a cabo desde la superficie o a través de túneles piloto por fuera de la sección transversal del futuro túnel.

Los principales métodos son:

- **Inyecciones.**

Las diferentes técnicas de inyecciones son: inyecciones de consolidación, inyección de fisuras, inyecciones a presión e inyecciones de compensación.

La inyección puede ser llevada a cabo en la excavación del túnel como una inyección del frente o como una inyección radial desde el túnel excavado o desde un túnel piloto.



El material de inyección más comúnmente usado es el cemento. En casos especiales son aplicados también algunos productos químicos como resinas o espumas. En tales casos debe tenerse en cuenta, especialmente, el medio ambiente y las restricciones de seguridad.

- ***Inyección Consolidante (jet grouting).***

La inyección consolidante se aplica, generalmente, en forma horizontal o con un ligero ángulo hacia arriba o hacia abajo desde el frente del túnel. Se puede conseguir un mejoramiento de la clave construyendo columnas a partir de una o más capas de inyección en etapas que se correspondan con las operaciones de excavación.

Un mejoramiento de la estabilidad del frente se consigue instalando columnas individuales de relleno en dirección paralela a la dirección de avance en el frente de trabajo.

Menos común en tunelería es la inyección vertical o ligeramente inclinada usando inyecciones consolidantes, excepto en túneles superficiales donde esta es aplicada desde la superficie.

Desde el interior de un túnel vertical o muy inclinado la inyección consolidante es aplicada con el fin de recalzar el fondo del arco de la clave.

- ***Congelamiento del terreno.***

Las técnicas de congelamiento del terreno para impermeabilizar o estabilizar temporalmente el terreno más empleadas son:

- Generación de masas continuas congeladas que proveen capacidad de soporte a largo plazo.



- Congelamiento local, de acción inmediata y a corto plazo, de zonas húmedas cercanas al frente o en su vecindad por fuera de la sección transversal excavada.

Este congelamiento de acción inmediata y de corto plazo se consigue por medio de tuberías de inyección de nitrógeno líquido enfriador.

El congelamiento a largo plazo de una masa es producido a lo largo de la clave y de las paredes cercanas a la sección transversal excavada, y en algunos casos en la zona de la solera.

El congelamiento se consigue mediante un sistema de tuberías perforadas, instaladas a lo largo del terreno y por el cual se bombea un refrigerante. Las masas congeladas se pueden ir generando en forma alterna con los trabajos de excavación desde la cara sobre excavada del túnel y en forma traslapada o previamente desde galerías laterales o desde la superficie del terreno en casos de una baja cobertura.

El refuerzo del terreno incluye la aplicación de métodos por los cuales se insertan elementos estructurales con una dimensión predominante.

Pernos, anclajes o micropilotes son algunos de estos elementos.

Los principales métodos de instalación son:

- **Paraguas de tubos.**

Los paraguas de tubos se usan específicamente para reforzar las estructuras del arco en la clave y en las zonas de los hombros, también para la estabilización del frente y, de manera preventiva, del frente inmediatamente después de la excavación.

Un escudo de tubos para reforzar el portal se perfora en las paredes de este y a lo largo de la sección transversal, generando un escudo de tubos, paralelamente a la



dirección de avance, el cual sirve para puentear zonas con alteraciones detrás de dichas paredes.

Para la construcción del túnel se instalan tubos, por etapas, alternadamente con la excavación. El paraguas de tubos debe extenderse al menos un 30% más allá del frente del siguiente tramo a excavar.

- **Estacados.**

Los estacados son barras de acero que se dejan en el terreno, en los alrededores de la excavación, con los cuales se logra una estabilización local de corto plazo tanto para la clave como para el frente de trabajo.

Los estacados se instalan sobre el primer arco de acero frontalmente y deben ser, por lo menos, 1,5 veces el largo del siguiente tramo de avance de la excavación.

Dependiendo del tipo de suelo, los estacados pueden estar encamisados, hincados o insertos en perforaciones previas. Para mejorar las condiciones del terreno pueden usarse estacados con un hueco central y aberturas laterales de alivio (pernos perforados).

Una vez se hace la inyección a través de ellos, se consigue una excelente adherencia con el material que los rodea. Estos estacados se instalan durante el ciclo de la excavación en etapas predefinidas.

- **Instalación de sistema de pernos.**

El pernado del frente (frente de excavación) es a menudo necesario para estabilizar o reforzar dicho frente. Dependiendo del escenario relativo de peligro, debe definirse en el diseño el tipo de perno pertinente y su longitud. Son posibles cualquier tipo de perno y de longitud.

Cuando se busca protección contra la caída de rocas, los puntos de pernado deben ser suficientes ya que cuando las condiciones del terreno son difíciles



(rocas fisuradas y terrenos alterados) pueden requerir un anclaje sistemático con un gran número de pernos metálicos o de fibra de vidrio, de gran longitud y traslapados.

En caso de requerirse, los pernos son instalados en el frente del túnel durante la secuencia de excavación, en cada ciclo, o en etapas predefinidas.

- **Abatimiento y drenaje.**

En algunos casos la construcción del túnel sólo es posible con la aplicación de medidas especiales de abatimiento del agua presente. De acuerdo con las condiciones del terreno y otras condiciones de frontera, pueden ser usados pozos verticales u horizontales convencionales, o drenajes por vacío. En el diseño de las medidas de drenaje deben tenerse en cuenta los detalles medio ambientales, por ejemplo los límites en el abatimiento de la tabla de agua, asentamientos, etc.

En el caso de poca cobertura, se puede realizar el abatimiento con medidas desde la superficie. En otros casos el abatimiento se puede realizar desde el frente de la excavación o desde galerías piloto.



IV. USO DEL CONCRETO LANZADO CON FIBRAS.

4.1 DEFINICIÓN.

El reforzamiento del concreto lanzado con fibras de acero (CLRFA) cortas y discontinuas fue desarrollado en los Estados Unidos a principios de los años 70's por la Batelle Research Corporation. La primera aplicación práctica de un concreto lanzado reforzado con fibras de acero se efectuó en 1972 cuando el Cuerpo de Ingenieros de la armada de los Estados Unidos utilizó un CLRFA vía seca para la estabilización de un talud y revestimiento de una contramina en la presa Ririe en Idaho

Es un método para lanzar mortero o concreto transportado a través de una manguera y proyectado neumáticamente a alta velocidad sobre una superficie.

A diferencia del concreto convencional, que se coloca y posteriormente se compacta (vibrado), el concreto lanzado se coloca y se compacta al mismo tiempo, debido a la fuerza con que se proyecta desde la boquilla.



Uso del concreto lanzado sobre las paredes del túnel para estabilizar el terreno.



Una ventaja fundamental del concreto lanzado es que permite estabilizar de manera rápida y efectiva de grandes áreas.

Las fibras añadidas al concreto lanzado pueden ser de acero, fibras de vidrio, sintéticas o hechas de materiales naturales.

El objetivo de un recubrimiento “temporal” de concreto lanzado es el ESTABILIZAR el terreno, pero no de soportarlo.

Las estructuras fabricadas con concreto lanzado no están diseñadas para tensión, únicamente para estabilizar.

El concreto lanzado reforzado con fibras es un importante método de alto desempeño para la estabilidad temporal de suelos

Es importante conocer las características de los diferentes tipos de fibras que existen, y en base a ello y al tipo de proyecto a construir, determinar cuál de ellas es más rentable.

Al inicio de cada proyecto en los que se considera el uso de concreto lanzado se recomienda definir los requisitos de servicio de la estructura a construir. Estos requisitos permitirán al constructor evaluar diferentes alternativas de concreto lanzado con fibras seleccionar la mejor opción.

Es importante que al mezclar las fibras de acero con el concreto húmedo o seco, se distribuyan uniformemente mientras se mezclan en el camión revolvedor, o las máquinas revolvedoras, para evitar que las fibras se concentren solo en ciertas partes, el tiempo de mezclado varía en cada caso dependiendo del diseño.

Para concreto lanzado o bombeado reforzado con fibras de acero, se recomienda utilizar un aditivo para darle mayor fluidez, evitando problemas de estancamiento al realizar el lanzado o vaciado.

Las fibras de acero son compatibles con cualquier aditivo.

Para el diseño de las mezclas de concreto proyectado es importante cumplir con las especificaciones de los estándares o normas para el trabajo del concreto. Se



recomienda deben siempre adaptarse a las propiedades del agregado y del cemento disponible para poder obtener la resistencia inicial, final y la manejabilidad requeridas.

En los primeros colados se emplearon mezclas de agregado fino con relación arena cemento de 2:4:1 (50-53%) por peso 557.70 kg/m³ “Se le llamo mezcla estándar de mortero”

Cuando la mezcla sólo cuenta con agregados finos, se le llama mortero lanzado, y si los agregados son gruesos se le denomina concreto lanzado.

El concreto con agregado fino es conocido como gunite, y cuando incluye agregado grueso, como shotcrete.

El diseño del soporte mediante concreto lanzado para excavaciones subterráneas es generalmente impreciso y empírico. La compleja interacción entre la masa rocosa fallando alrededor de una abertura subterránea y la capa de concreto lanzado con diferentes espesores y con propiedades cambiantes al endurecer desafía casi todos los intentos de análisis teórico. Es importante reconocer que el concreto lanzado es rara vez utilizado sin refuerzo, y su uso combinado con bulones, anclas y otros tipos de reforzamiento complica aún más el análisis de su contribución al soporte. Las metodologías y teorías actuales de diseño de soporte mediante concreto lanzado se basan ampliamente en métodos prácticos y experiencia previa.



4.2 USOS Y APLICACIONES MÁS COMUNES DEL CONCRETO LANZADO.

- Estabilización de taludes y muros de contención
- Cisternas y tanques de agua
- Albercas y lagos artificiales
- Rocas artificiales (rockscaping)
- Canales y drenajes
- Rehabilitación y refuerzo estructural
- Recubrimiento sobre panel de poliestireno
- Túneles y minas
- Muelles, diques y represas
- Paraboloides, domos geodésicos y cascarones
- Concreto refractario para chimeneas, hornos y torres



4.3 MATERIALES UTILIZADOS EN LA ELABORACIÓN DEL CONCRETO LANZADO REFORZADO CON FIBRAS

Los materiales usados en el Concreto Lanzado son básicamente los mismos que los utilizados en un concreto convencional: cemento, agregados, agua, aditivos, y a partir de los 70's se empezaron a usar fibras.

Agregados.

Es el material pétreo de construcción (grava y arena), su función es proporcionar la parte de relleno de la matriz para el material cementante, es apto para resistir la acción de cargas aplicadas.

Limites granulométricos para combinación de agregados ACI 506 R-05		
Malla	Porcentaje en peso que pasa por malla individual	
	Mezcla 1	Mezcla 2
3/4" (19 mm)	---	---
1/2" (13 mm)	---	100
3/8" (10 mm)	100	90 – 100
No. 4 (4.75 mm)	95 – 100	70 – 85
No. 8 (2.4 mm)	80 – 100	50 – 70
No. 16 (1.2 mm)	50 – 85	35 – 55
No. 30 (600 µm)	25 – 60	20 – 35
No. 50 (300 µm)	10 – 30	8 – 20
No. 100 (150 µm)	2 – 10	2 – 10

Limites granulométricos empleados en la mezcla de concreto lanzado.



Agua.

Inicia la reacción química del cemento produciendo el fraguado y el endurecimiento del concreto siempre se debe cumplir para el caso de mezclas de concreto lanzado una relación con el material cementante de 0.40 a 0.45%.

Primicias Mala Calidad:

- Puede retardar el fraguado y endurecimiento del concreto.
- Disminuir su resistencia.
- Reducir su durabilidad.
- Acelerar la corrosión del acero de refuerzo.
- Causar un mal acabado, manchas.

Cemento.

Este puede ser Portland o Portland-Puzolana.

- El comportamiento del cemento se debe de evaluar mediante pruebas preliminares con todos los materiales en el sitio, es muy importante verificar la compatibilidad con los aditivos.
- Cuando el concreto lanzado este colocado en un suelo y en contacto directo de agua, con concentraciones de sulfatos, debe usarse cemento resistente a los mismos.

Aditivos Tecnología:

Son sustancias inorgánicas y/o orgánicas, en estado líquido y en polvo, reaccionan con la hidratación del cemento y se agregan antes, durante o después del mezclado, modifican las propiedades del concreto.



Es importante realizar pruebas en ellos donde se mida la compatibilidad, adaptabilidad, adquisición de resistencias a través del tiempo.

- Reductores de agua (fluidificantes)
- Súper reductores de agua (Súper fluidificantes)
- Retardantes.
- Inclusores de aire
- Inhibidores de hidratación
- Acelerantes
- Aluminatos silicato de sodio “wáter glass”
- Libres de álcalis

Adicionales.

Pueden sustituir parcialmente el contenido de cemento, el tipo y cantidad de las adiciones debe de ser evaluado cuidadosamente en pruebas preliminares.

- Son sustancias diferentes a los agregados, cemento y agua, se agregan directamente a la mezcla en dosificaciones proporcionales al 5% del peso del material cementante.
- Son sustancias inorgánicas y/o orgánicas, en estado líquido y en polvo, reaccionan con la hidratación del cemento y se agregan antes, durante o después del mezclado, modifican las propiedades del concreto.
- Micro sílice “silica fume”
- Ceniza Flotante “Flay Ash”
- Escoria Granulada de Alto Horno
- Fibras metalizas y sintéticas.

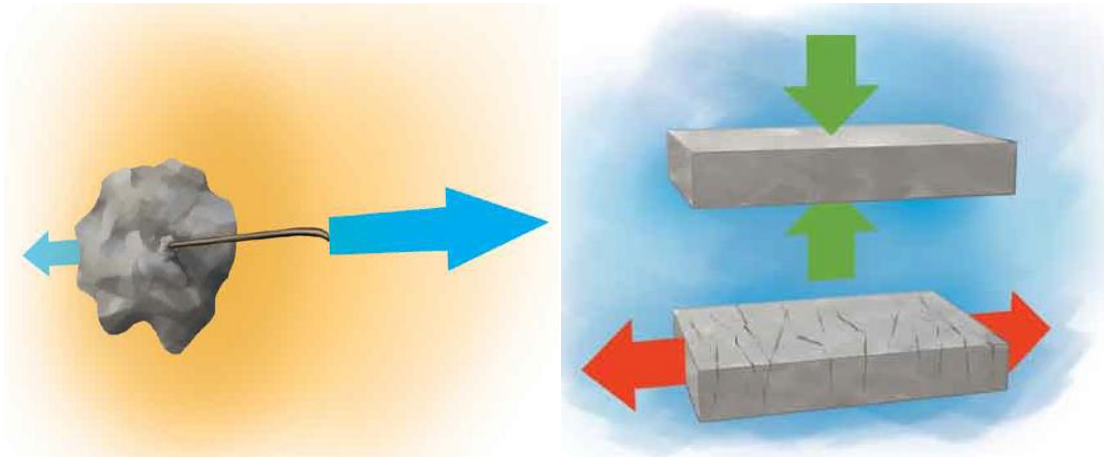


- *Agentes de Curado.*

Consideraciones generales de parámetros para diseño de mezclas de concreto lanzado	
Materiales	Proporciones por Masa
Cemento Portland (Tipo I, II, III,V)	16 – 20 %
Microsílice	1.3 – 2.5 %
Fly Ash.	2.4 – 5 %
Agregados (Grava y Arena)	75 – 80 %-30-20%
Acelerante (Opcional)	Según se requiera
Reductor de agua de alto rango	Para Obtener adecuada Trabajabilidad
Inclisor de aire (Opcional)	Según se requiera
Fibras Sintéticas HPP (Opcional)	7 a 12 Kg/m ³
Fibras Metálicas (Opcional)	35 a 60 Kg/m ³
Relación Agua Cemento	0.45

El concreto hecho con cemento Portland tiene ciertas características:

- Es relativamente resistente en compresión pero débil en tensión y tiende a ser frágil.
- La debilidad en tensión puede ser superada por el uso de refuerzo convencional de varilla y en cierta medida, por la inclusión de un volumen suficiente de ciertas fibras.



Representación grafica de las ventajas del uso de fibras en el concreto lanzado.



4.4 CONSIDERACIONES GENERALES PARA EL USO DE FIBRAS EN EL CONCRETO LANZADO.

Clasificación de fibras

- Alambre cortado
- Lámina cortada

Parámetros que describen la calidad de la fibra

- Radio de Aspecto (Longitud / Diámetro)
- Resistencia a la tensión
- Forma geométrica

Características mecánicas de la fibra

- Peso Específico
- Módulo de Young o Módulo de elasticidad
- Módulo de Tensión de ruptura por tracción
- Elongación de Rotura

Geometría de las fibras.

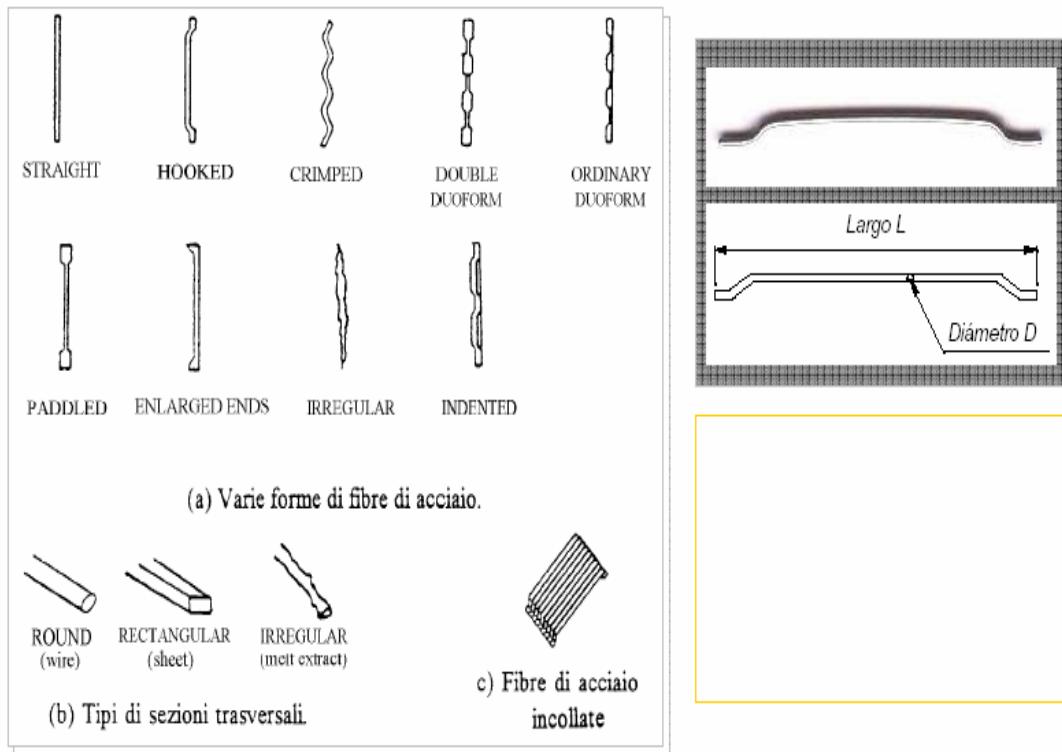
La geometría de la fibra, se describe con la "Relación de Aspectos", donde: $L = l/d$

Donde:

l = longitud de la fibra

d = diámetro de la fibra

Las fibras con alta relación de aspectos, se unen al concreto (es decir, no se desprenden del concreto al alcanzar su esfuerzo ultimo) y generalmente, son altamente eficientes en términos estructurales.



Formas más comunes de las fibras de acero adicionadas al concreto lanzado.

Para el uso efectivo de fibras en el concreto lanzado se deben tener contempladas las siguientes características:

- Las fibras deben ser significativamente más rígidas que el concreto, es decir, un módulo de elasticidad más alto.
- El contenido de fibras por volumen debe ser adecuado.
- Debe haber una buena adherencia entre la fibra y el concreto.
- La longitud de las fibras debe ser suficiente.
- Las fibras deben tener una alta relación de aspecto; es decir, deben ser largas con relación a su diámetro.

Longitud de las fibras:

- Puentear las fisuras
- Superponerse a 2 agregados
- Trabajabilidad: bombeo y diámetro de la manguera.



Representación grafica. Longitud de la fibra = 2 agregados.

Selección de fibras pequeñas:

- Mas fibras por kilo
- Menor distancia entre fibras – efecto de red
- Mas superficie de contacto con el acero/ concreto por unidad de peso.



Efecto de red.



4.5 TIPOS DE FIBRAS.

La característica que define el desempeño de un concreto lanzado reforzado con fibras es la tenacidad o la capacidad de absorción de energía; existen diferentes normas y especificaciones para la medición de estas características; dependiendo del método elegido, las mediciones pueden variar significativamente, lo más adecuado para medir el desempeño de un concreto lanzado es utilizar los métodos de panel cuadrado del EFNARC o el panel redondo de Bernard.

Las fibras de acero y macro sintéticas pueden ser utilizadas para el refuerzo del soporte de aberturas subterráneas en minas, ambas darán una cierta tenacidad al concreto dependiendo de su dosificación y características.

Es importante que los especificadores tomen en cuenta cual es la tenacidad o capacidad de absorción de energía que se requiere para cada necesidad de soporte, para que de esta manera se pueda determinar qué tipo de fibra, de que características y con qué dosificación se debe especificar el CLRF.

Es importante resaltar que el uso de las fibras macro sintéticas es recomendado únicamente para casos de soporte no permanente como en minas, en casos de soporte permanente como túneles o estabilización de taludes es recomendable solo el uso de fibras de acero.

En situaciones en las que la deflexión debe ser limitada (5 a 40 mm) y se requiere que la abertura de la grieta no sea grande, es más recomendable el uso de fibras de acero dada su gran capacidad de absorción de energía en estas situaciones.

Más aún, el uso de fibras de acero de alto desempeño será más eficiente que si se usan fibras de bajo desempeño.

Cuando se permite que existan grandes deformaciones en el soporte (80 mm), y que la abertura de la fisura pueda ser considerable, el uso de fibras macro sintéticas será más eficiente.



La estabilidad del sistema ocurre cuando la presión del suelo y la resistencia del revestimiento se encuentran.

Una fibra de acero de bajo costo y bajo desempeño no incrementa la capacidad de carga del revestimiento aunque tiene el potencial de hacerlo a grandes deformaciones; una fibra de acero de alto desempeño incrementa la capacidad de carga del revestimiento desde bajas deformaciones y tiene la capacidad de seguir resistiendo carga en altas deformaciones.

La fibra macro sintética tomará las cargas a deflexiones mayores.

Fibras de vidrio.

La fibra de vidrio está disponible en longitudes continuas o en trozos.

Se utilizan longitudes de fibra de hasta 35 mm en aplicaciones de rociado y las longitudes de 25 mm en aplicaciones de premezclado.



Fibras de vidrio.

Usos.

Es adecuado para usarse en técnicas de rociado directo y procesos de premezclado; ha sido usado como reemplazo para fibras de asbesto en hojas planas, tubos y en una variedad de productos prefabricados.



Uso de fibras de vidrio en la construcción del portal de salida del túnel. El uso de estas fibras permite que la tuneladora excave sin mayores dificultades.

Fibra de acero.

Las fibras de acero se han usado en el concreto desde los primeros años del siglo XX.

Las primeras fibras eran redondas, lisas y el alambre era cortado en pedazos a las longitudes requeridas.

El concreto lanzado reforzado con fibras de acero (CLRFA), es un concreto que contiene fibras de acero discontinuo, las cuales son proyectadas neumáticamente a altas velocidades a determinada superficie.

Las fibras de acero se añaden al concreto lanzado para mejorar la capacidad de absorción de energía y resistencia al impacto así como proveer ductilidad.



Esta última propiedad es la habilidad que tendrá el concreto lanzado de continuar resistiendo cargas después de que su matriz se ha fracturado.

Es evidente que las propiedades anteriores, son de gran importancia para los sistemas de soporte diseñados para las condiciones especiales a que están sometidas las excavaciones en minas, túneles y lumbreras.

La longitud de la fibra debe de ser por lo menos dos veces el tamaño máximo del agregado con el fin de ligar el espacio cementante entre uno y otro, y proveer la suficiente adherencia de las fibras de acero a la matriz de concreto.

Entre menor sea el diámetro de la fibra de acero el número de fibras por unidad de peso se incrementa y la longitud de la red de fibras se incrementa.

El espaciamiento entre fibras se reduce en tanto la fibra sea más delgada por lo que el reforzamiento se hace más eficiente. Siempre se debe de buscar tener una longitud de refuerzo por metro cúbico nunca inferior a 10,000 ml de fibras de acero.

Los esfuerzos de tensión inducidos al concreto lanzado son transferidos a las fibras de acero mediante la adherencia entre ambos materiales; sin embargo la adherencia se puede mejorar notoriamente mediante los anclajes mecánicos que proveen las diferentes formas de las fibras, las cuales se recomiendan sean extremos doblados o aplanados aunque existen las de forma ondulada.

Por otra parte, para que se logre una eficiente transferencia de cargas se requiere que las fibras de acero tengan una alta resistencia a la tensión para evitar que estas se rompan.

La alta capacidad de resistencia de cargas de las fibras de acero una vez fracturada la matriz de concreto, garantizará el grado de ductilidad.

El uso de recubrimientos finales de larga vida construidos con concretos lanzados de alta resistencia en obras subterráneas, ha ampliado la necesidad de desarrollar fibras de acero de alta resistencia a la tensión.



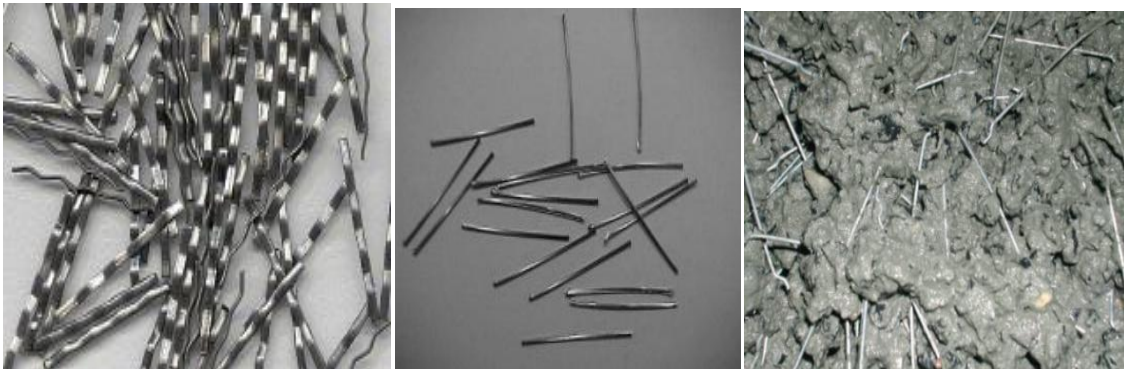
Cada fibra de acero dependiendo de su forma y tamaño tendrá un efecto diferente en el comportamiento y calidad del concreto lanzado.

La dosificación requerida de fibras de acero para cumplir con los requerimientos estructurales y de diseño está necesariamente relacionado con el desempeño de esta.

Para una misma matriz de concreto la cantidad de absorción de energía es influenciada significativamente por el tipo de fibra (Ej. Relación de aspecto longitud / diámetro) y dosificación.

Entre mayor sea la relación de aspecto y la dosificación, mejor será el desempeño del CLRFA.

Otra gran ventaja del CLRFA es su composición homogénea. Como tal, es capaz de resistir esfuerzos de tensión y de cortante en cada parte de la sección transversal. Más aún, al poder efectuar una la aplicación inmediata del recubrimiento de consolidación, se provee de una adecuada protección contra la caída de rocas.



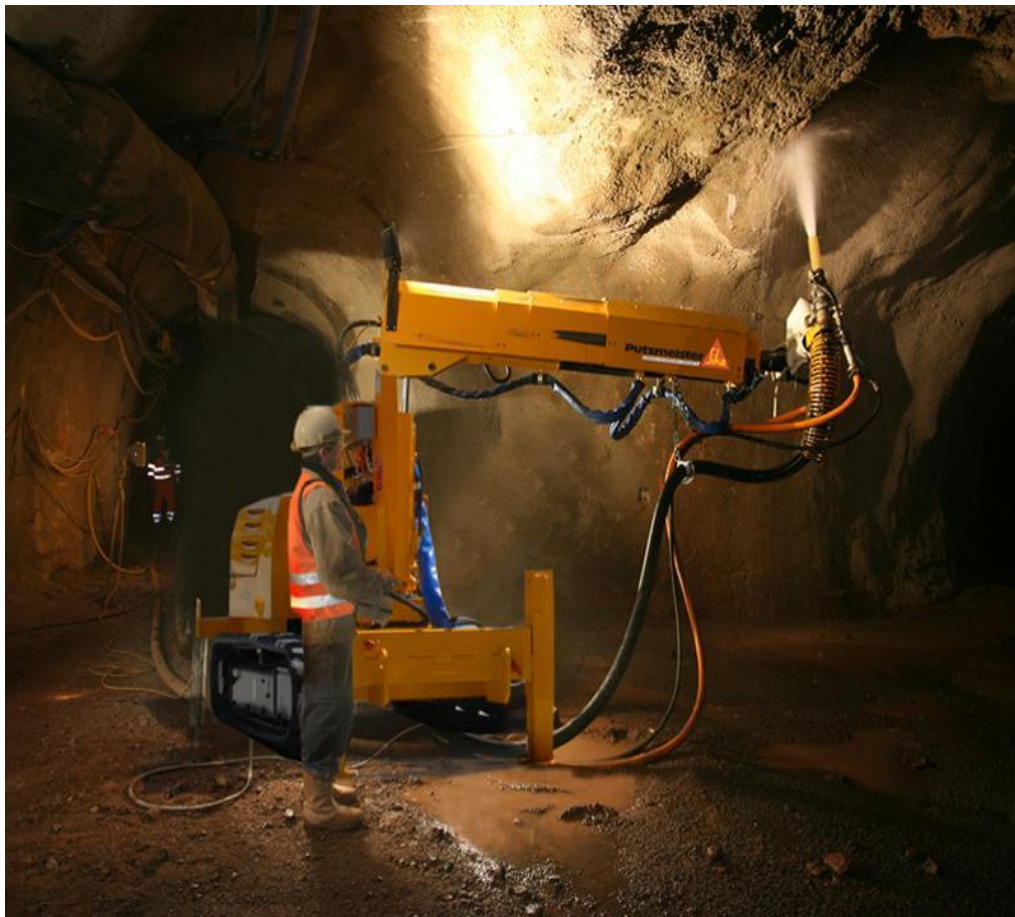
Formas típicas de las fibras de acero.

Usos.

- Pisos comerciales e industriales, sobre terreno.
- Revestimiento de túneles y estabilidad de taludes.



- Muros de contención.
- En el sector minero, para el sostenimiento de excavaciones.
- Pavimentos continuos sin juntas.
- Elementos premoldeados.
- Cimentación de maquinas.
- Pistas de carreteo y aterrizaje

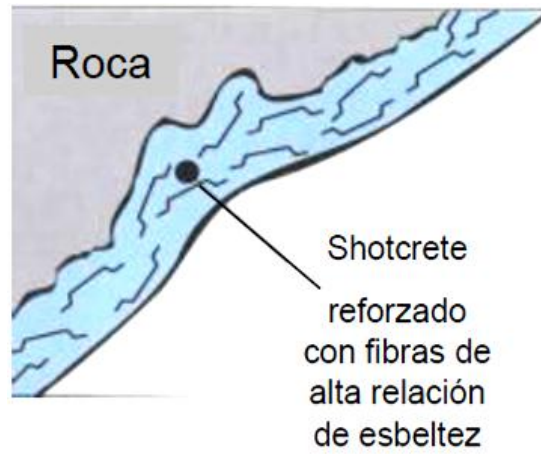


Concreto lazado con fibras de acero para estabilizar la clave de un túnel.



Ventajas del revestimiento empleando concreto lanzado reforzado con fibras de acero.

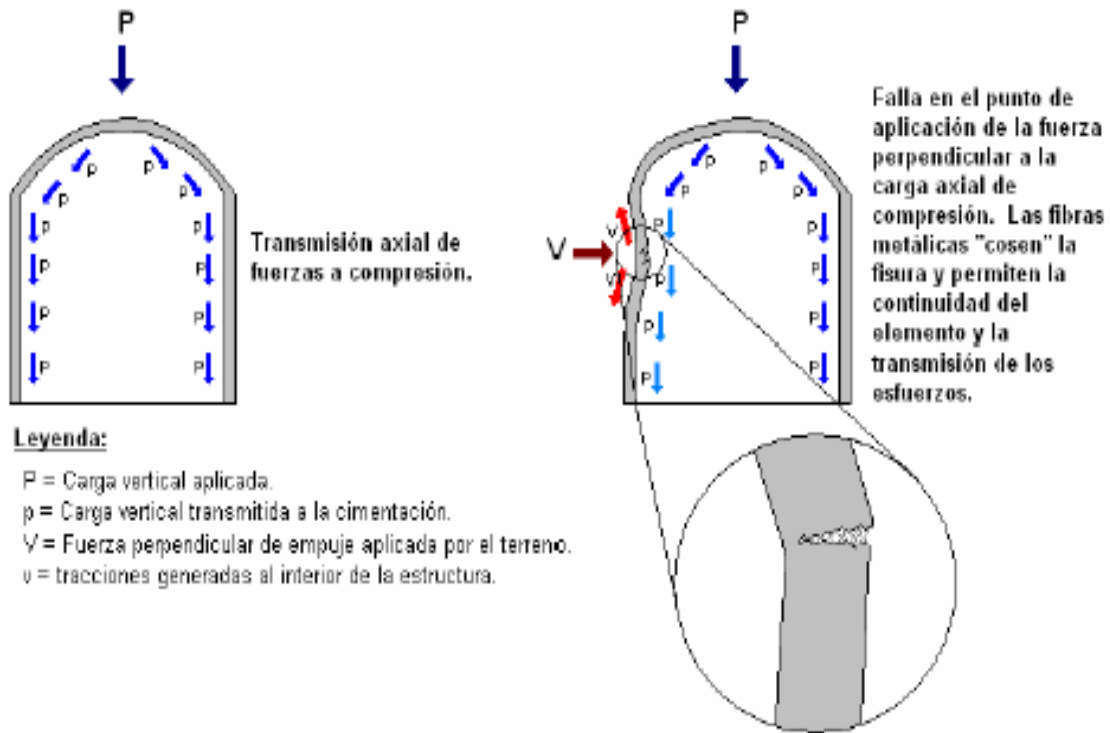
- Refuerzo homogéneo
- Puede aplicarse rápidamente
- Un refuerzo de espesor uniforme se traduce en menos volumen de concreto lanzado.
- Se requiere un fuerte vínculo a la superficie para hacer la obra subterránea autoestable.
- Hace del concreto un material más dúctil.
- Incrementa el esfuerzo a la tensión.
- Incrementa la resistencia a la fatiga.
- Reduce los agrietamientos.
- Aumenta el tiempo de vida del concreto.
- Mantiene las mismas propiedades en todo el concreto.
- Las fibras se distribuyen uniformemente en toda la masa de concreto y en todas las direcciones.
- Al usar fibras de acero en conjunto con el armado tradicional se obtienen resultados excepcionales en el comportamiento bajo cargas sísmicas.



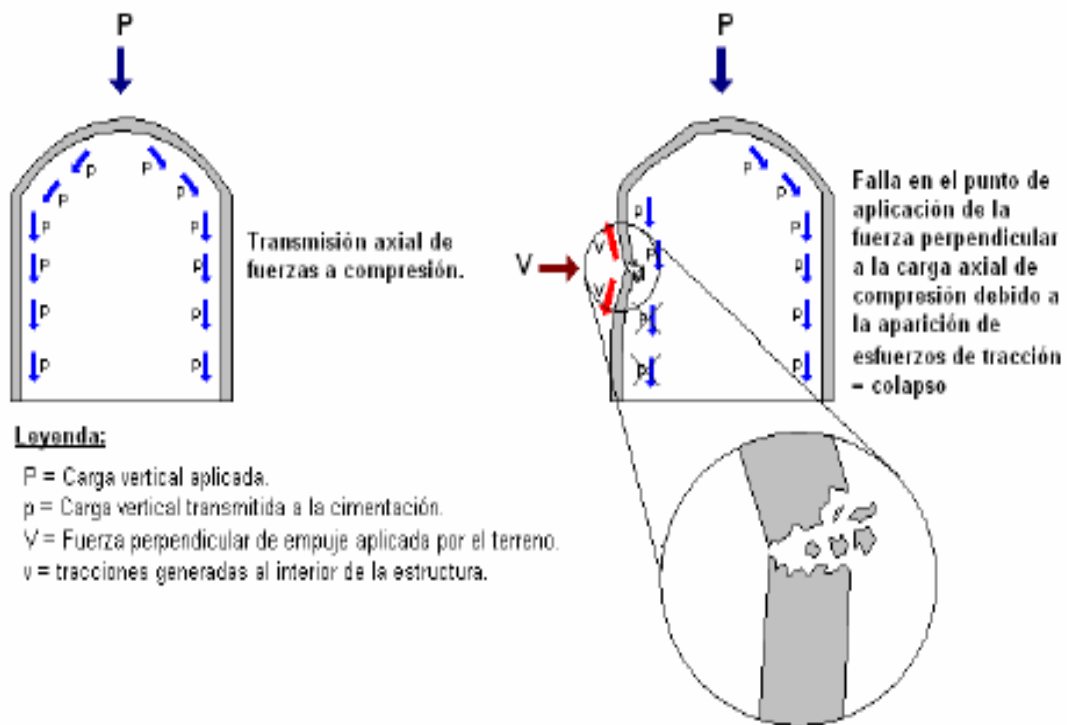
Volumen de fibra de Acero (35 a 50 kg/m³)

Se usan para:

- Refuerzo en conjunto con la malla de acero
- Tenacidad (Soportar carga después de la rotura)
- Aumentar la resistencia al impacto
- Refuerzo secundario para fisuramiento por contracción



Concreto Lanzado con fibras.



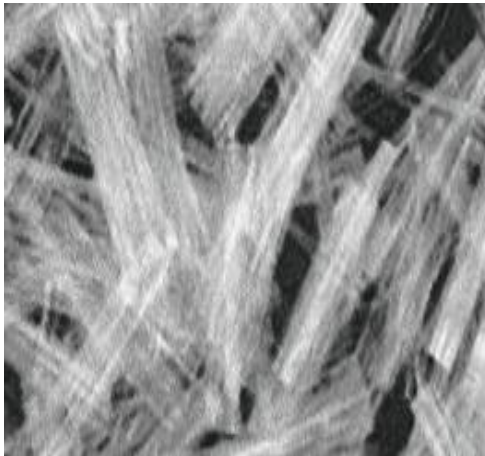
Concreto Lanzado sin fibras.



Fibras sintéticas.

Las fibras sintéticas son artificiales; resultan de la investigación y desarrollo en las industrias petroquímicas y textiles.

El concreto lanzado reforzado con fibras sintéticas (CLRFSn), es un concreto rociado que contiene fibras de plástico discontinuas que son proyectadas neumáticamente a altas velocidades a una superficie.



Fibras de Polipropileno.



Fibras de Monofilamento.

Usos.

El concreto lanzado con fibras sintéticas se emplea principalmente para acabados, también es ideal para usarse en el colado de dovelas, ya que se disminuyen los agrietamientos. Tiene mayor resistencia al fuego.

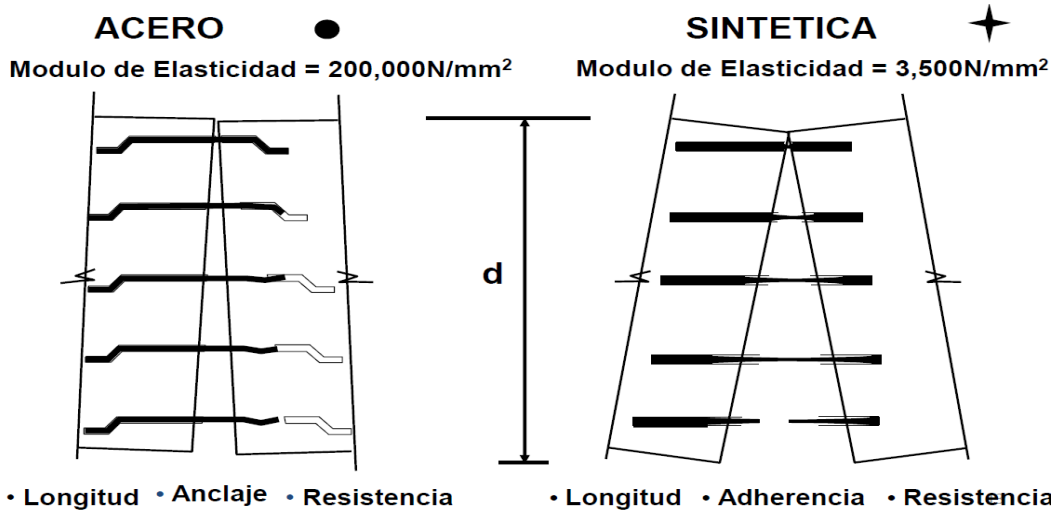
Ventajas del revestimiento empleando concreto lanzado reforzado con fibras de sintéticas.

- Incremento de la resistencia a fisuras por contracción plástica en shotcrete / concreto recién aplicado.



- Mejorar la reología, resistencia al enrollamiento, desprendimiento, y lograr mejor acabado del shotcrete fresco.
- Pequeñas mejoras en la resistencia al impacto y otras propiedades.
- Volumen bajo (0.1 a 0.3% en volumen) de 1 a 3 kg/m³ de fibras sintéticas.
- Menor desgaste de equipos y mangueras.

Diferencias entre el uso del concreto lanzado con fibras de acero y fibras sintéticas.



Fibras de acero.



Fibras sintéticas.



4.6 PROCEDIMIENTO DE LANZADO Y MÉTODOS DE COLOCACIÓN.

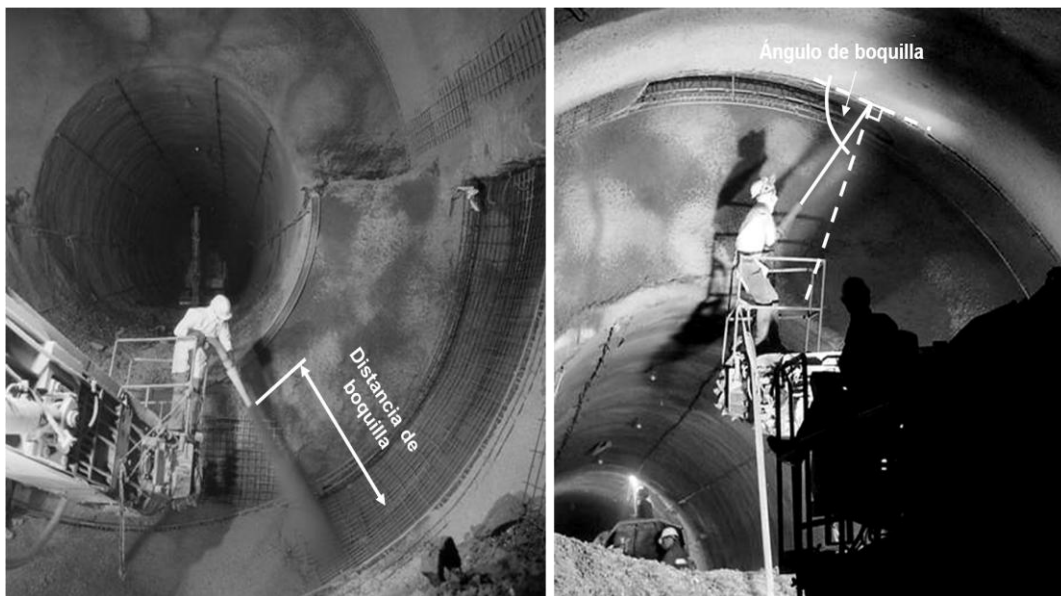
Vía seca (cuando se le añade el agua en la boquilla).

Se mezcla el cementante (cemento + adiciones) con la arena para luego impulsarlo a través de la manguera a la boquilla del equipo, en donde se combinará con el agua y los aditivos líquidos, los cuales llegan por una manguera independiente, para ser finalmente proyectada hacia la superficie mediante el uso de aire comprimido.

Vía húmeda (cuando el agua se le añade a la mezcla antes de entrar por la manguera).

Consiste en mezclar la arena, el cementante y el agua antes de ser impulsados a través de la manguera del equipo, de tal forma que cuando la mezcla llega a la boquilla de la máquina, esta ya se encuentra lista para ser proyectada.

El concreto conducido a través de tubería de acero y que no se proyecta ni transporta a altas velocidades se conoce como concreto bombeado.



Recomendaciones básicas para un buen lanzamiento.

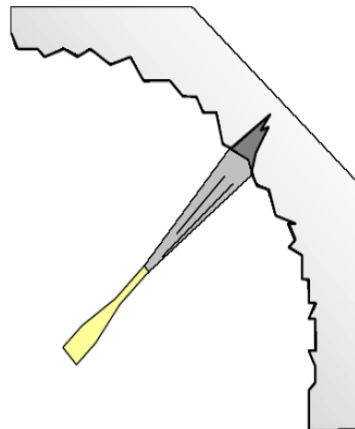
1. Limpieza.

- Piedras sueltas
- Polvo



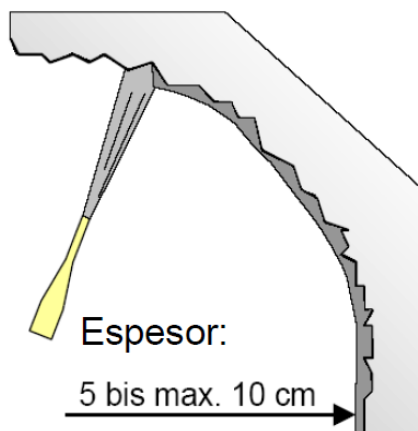
2. Rellenar grandes cavidades.

- Grietas
- Hendiduras



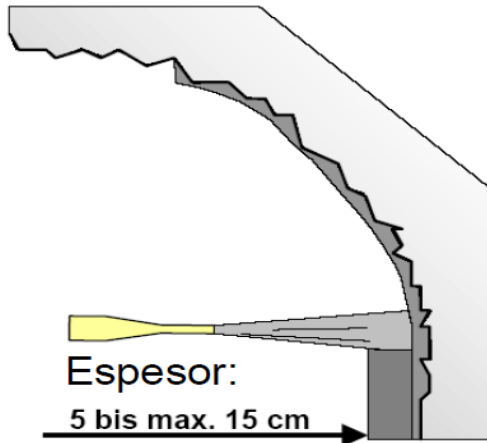
3. Capa de adherencia.

Mejora la adherencia entre el substrato y la capa principal.

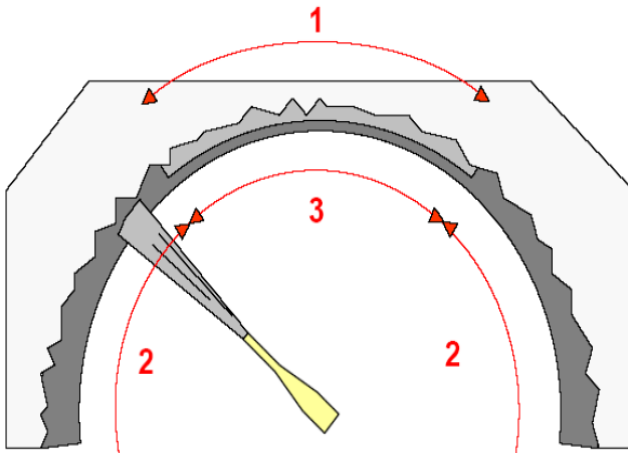




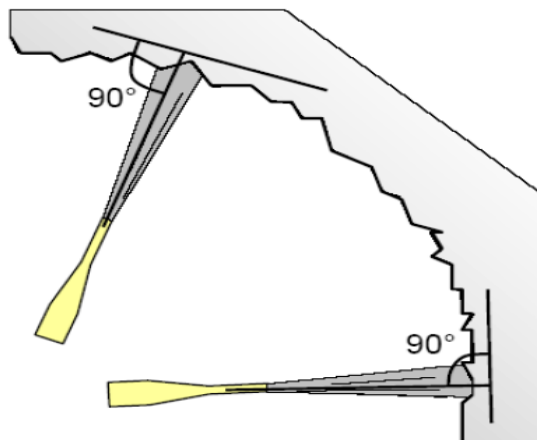
4. Capa principal (mayor espesor).



5. Pasos de aplicación.

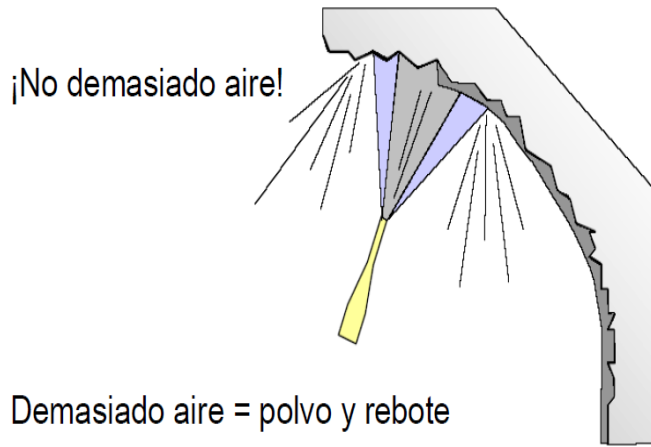


6. Ángulo de aplicación.





7. Aplicación de aire.



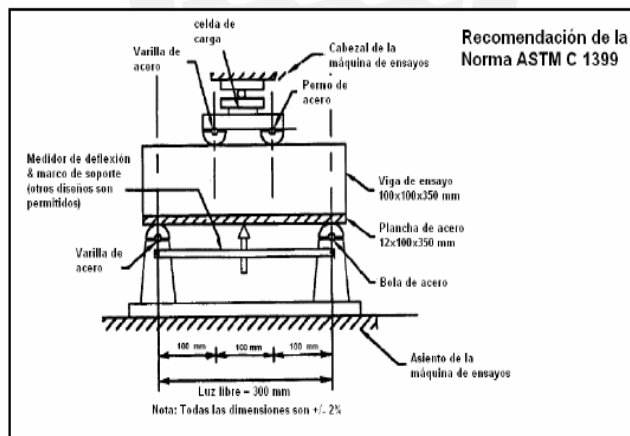
4.7 PRUEBAS DE CALIDAD EN EL CONCRETO LANZADO.

Ensayo de vigas prismáticas.

El ensayo de vigas requiere una Prensa estándar, equipada con cabezales para rotura a tres luces y un sistema de registro simultáneo de fuerza aplicada y deflexión Central.

Los testigos prismáticos (vigas) tendrán las siguientes dimensiones: 100 mm de ancho, 350 mm de largo y 100 mm de espesor.

Para la elaboración de las vigas prismáticas, se moldearon paneles rectangulares de 600x600 mm dichos paneles se moldearon paralelamente a los paneles circulares.



Vigas elaboradas con concreto lanzado con fibras.

Ensayo de paneles circulares

Además de los dispositivos de medición mencionados en el caso anterior, se requiere contar con un marco de reacción que acomode al espécimen de ensayo y que permita la ejecución del mismo



Los testigos a ensayar tendrán las siguientes dimensiones: 800 +10 mm de diámetro y 75 -5/+15 mm de espesor. La desviación estándar de un total de 10 mediciones será menor a 3 mm.

Cada material o mezcla a ensayar deberá contar con al menos tres especímenes. Cada muestra consistirá de al menos 2 ensayos exitosos, considerando bajo dicha condición a aquellos especímenes que presenten al menos tres fallas radiales. Aquellos paneles que muestren una única falla a través del diámetro serán descartados.



Ensayo de paneles circulares.



V. ESTABILIZACIÓN DEL TERRENO EMPLEANDO SISTEMAS DE PARAGUAS.

5.1 DEFINICIÓN.

Un paraguas es un conjunto de elementos lineales subhorizontales perforados en el terreno, inyectados que forman una pre bóveda resistente en la cavidad a excavar para evitar daños estructurales durante la excavación.



Sistema de paraguas a base tubería para fortificar el terreno durante la excavación.



5.2 CONCEPTOS GENERALES.

Un paraguas se compone de un número determinado de anclas colocadas normalmente siguiendo el perfil de la bóveda del túnel, a una distancia dada de esta, y a una distancia determinada por las necesidades del terreno.



El uso de los paraguas asegura el terreno en el portal de entrada del túnel y durante todo el proceso de excavación.

- El diámetro de armadura es totalmente independiente al diámetro de la perforación
- La desviación vertical de la perforación debido al peso de la herramienta de perforación y de la armadura dependen de las condiciones del terreno. (la desviación será aprox. del 3%)
- El Angulo de la perforación será de 3 a 5 grados. (permitiendo el traslape entre paraguas consecutivos para garantizar la estabilidad del terreno)



5.3 CLASIFICACIÓN.

Se puede realizar la siguiente clasificación en función de 3 criterios básicos:

Armadura.

- Pesado.
 - Tubería galvanizada, perfiles HH
- Ligero.
 - Varilla lisa, varilla corrugada.

Geometría.

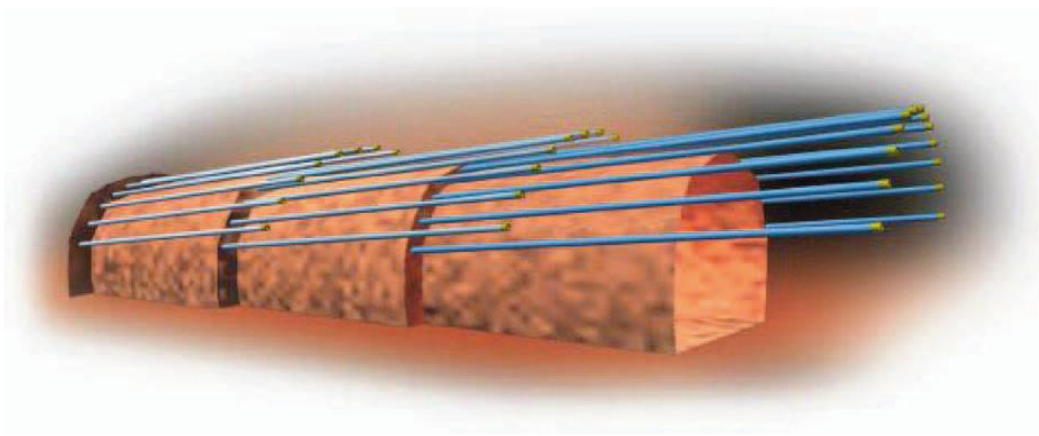
- Cilíndrico.
 - Recto, desviado.
- Triconico.

Posición.

- Exterior.
- Interior.

Paraguas pesados.

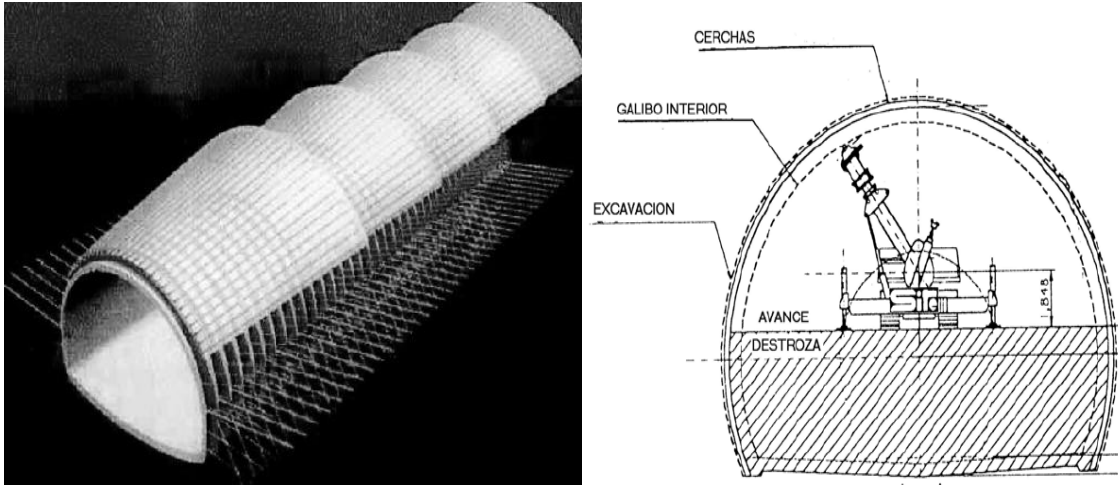
Son aquellos que se realizan en diámetros de 2” hasta 6”



Representación de un sistema de paraguas a base de tubería galvanizada.

Paraguas ligeros.

Son aquellos que se realizan en diámetros de $\frac{3}{4}$ " hasta $1\frac{1}{2}$ "



Paraguas ligeros, también se pueden emplear sistemas de anclas para la fortificación del terreno.

Paraguas exterior.

Utilizado para fortificar el portal de acceso al túnel.



Empleo de "jumbo" para introducir las tuberías que formaran el sistema de paraguas.

Paraguas interior.

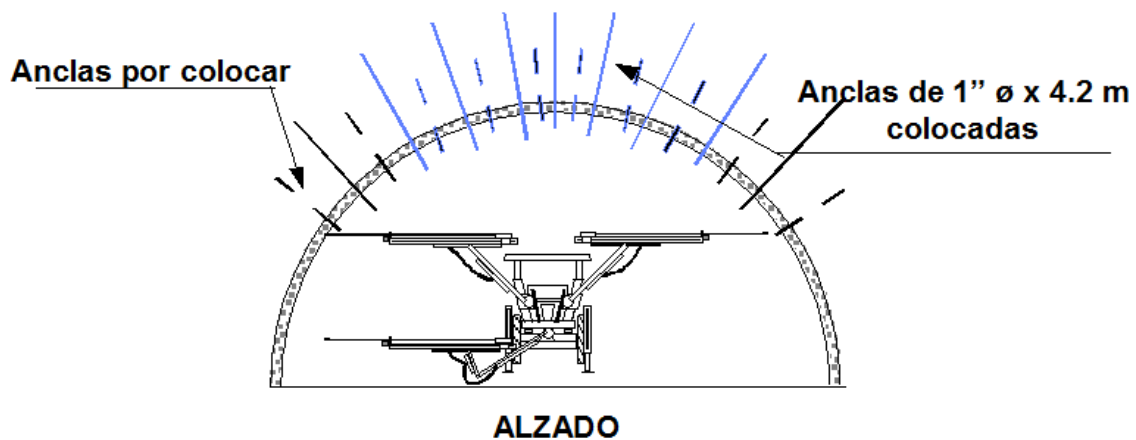
Utilizado para fortificar el terreno y realizar un avance más de excavación.



Sistema de paraguas a base de tubería.

Anclaje sistemático.

Utilizado para fortificar el portal de acceso al túnel



Representación de la ejecución de un sistema de anclaje.



5.4 CAMPOS DE APLICACIÓN.

El sistema de paraguas se puede aplicar en:

- Túneles en terrenos poco competentes
- Sostenimiento del frente de túnel antes de la excavación
- Excavación en fallas geológicas
- Roca fracturada
- Terreno arenoso o de gravas

Para la construcción de infraestructura subterránea en terrenos de pobres condiciones, la ingeniería actual de diseño de túneles ha desarrollado un sistema de estabilización y protección de techo y frente denominada paraguas, que proporciona al terreno un aumento de sus propiedades de resistencia y deformabilidad.

Los paraguas presentan una alta adaptación a las variaciones de las condiciones geológicas y geotécnicas del terreno.

Se instalan de una forma muy sencilla gracias al tipo de maquinaria empleada en su colocación y los operarios que los instalan no requieren formación específica que no sea la propia del manejo del jumbo de perforación.

La colocación de paraguas en túneles esta especialmente recomendada como sostenimiento provisional, en terrenos blandos, terrenos con zonas de falla y túneles con terrenos susceptibles al colapso.

Tipos de uniones.

Los tipos de uniones en los paraguas va de acuerdo a su longitud y son dos tipos: Roscada, Soldadura.



- **Soldadura :**
 - Entre el tubo de inicio y los subsecuentes dependiendo de la longitud

- **Roscada :**
 - En la tubería que se acopla esta se efectúa mediante roscas macho/ hembra. La rosca especialmente recomendada en la colocación de paraguas en túneles debido a las condiciones ambientales que dificultaría realizar la soldadura.



Tubería roscada para dar continuidad a la estructura.

Perfil estratigráfico.

Antes de iniciar con la excavación de un túnel se debe conocer los estudios Geológicos, Geotécnicos así como el perfil estratigráfico, para estar preparados para cualquier imponderable.



Estratigrafía del terreno.

5.5 FASES DE EJECUCIÓN DE UN PARAGUAS.

Las fases de ejecución de un paraguas son:

- Trazo del frente en la clave del túnel
- Posicionamiento y estabilización del equipo/ maquina en el frente de trabajo
- Perforación de los barrenos y colocación simultanea de la armadura
- Inyección de lechada de cemento
- Avance de la excavación en una longitud igual a la del paraguas ejecutado menos el traslape entre paraguas



Trazo.



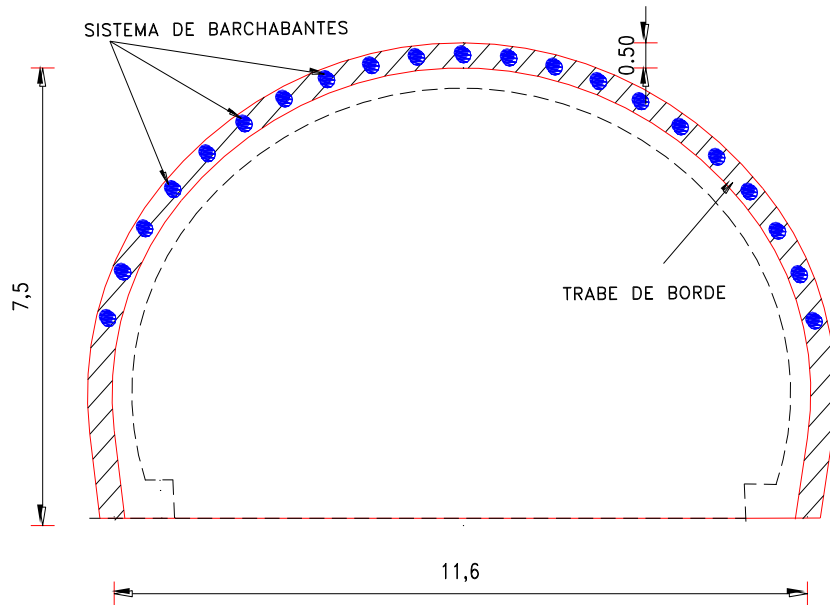
Perforación.



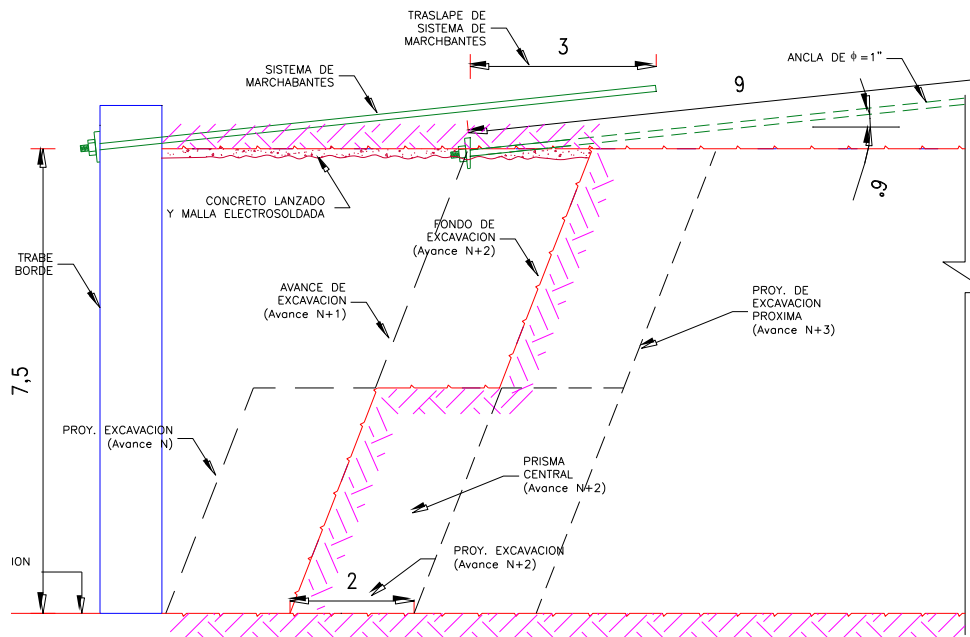
Perforación.



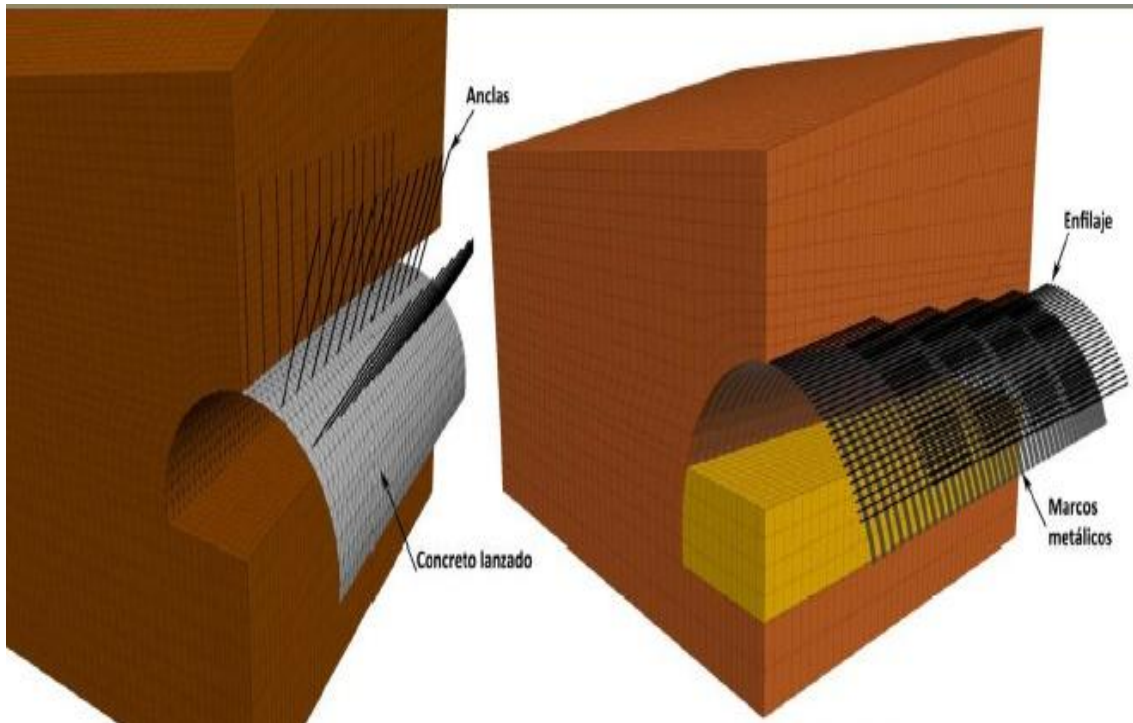
Inyección.



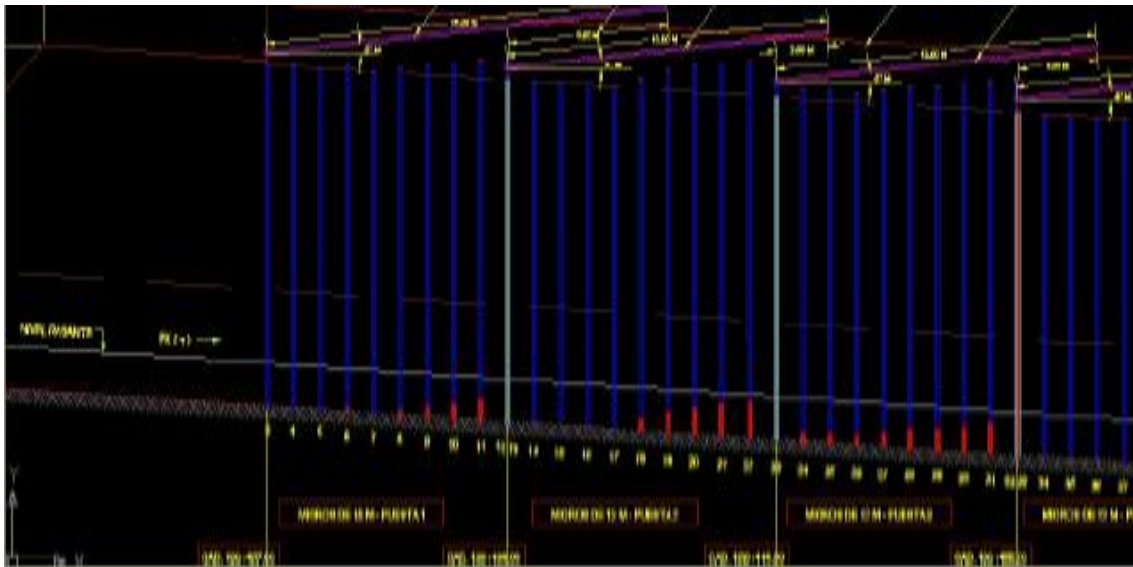
Colocación de tubería.



Excavación y enfilaje.



Estabilización del terreno mediante sistema de anclaje y de paraguas, fortificados con concreto lanzado y marcos metálicos.



El traslape mínimo en un sistema de paraguas es de 1/3 del largo de la tubería.



Excavación de túneles empleando el método convencional



- Cada paraguas consta de 35 tubos de 3.5" de diámetro
- Se colocan 15 paraguas de 12m de largo cada uno
- Se avanza 9m con cada paraguas y se dejan 3m de traslape



5.6 EQUIPOS DE PERFORACIÓN.

Equipo y herramienta utilizada para perforar con jumbo

- Jumbo
- Martillo de Fondo
- Broca con punta de Diamante
- Barras de Perforación



Jumbo.



Brocas.



Tubería roscada.



5.7 CRITERIOS GENERALES DE PERFORACION E INYECCION.

- **En roca competente**
 - Perforación: Rotopercusión con martillo de fondo
 - Inyección: Por el interior de la armadura se obtura la boca del barreno dejando dos conductos, uno para la inyección y otro para la purga y control de llenado.

- **En suelos**
 - Perforación: Rotación con Broca
 - Inyección: Por el interior de la armadura se obtura la boca del barreno dejando dos conductos, uno para la inyección y otro para la purga y control de llenado.

- **Suelos arenosos o rellenos**
 - Perforación: Rotación con broca y tubería de perforación no recuperable (Dividal)
 - Inyección: Mediante obturador simple o doble

- **En roca muy meteorizada y disgregada**
 - Perforación: Rotación con broca con martillo de fondo
 - Inyección : Mediante obturador simple o doble

Inyección de paraguas.

Se realiza mediante un cabezal de inyección con llave de paso y testigo, la lechada recorre el interior del tubo hasta el fondo de la perforación y retorna por el espacio libre, entre el tubo y el barreno se obstruye con espuma o material que resista la presión de la inyección.



Inyección del paraguas.

Equipo utilizado para inyección de anclas.

- Agitador
- Bomba Moyno
- Manguera de Para inyección de 3/4"
- Equipo de Inyección



Bomba especializada para la inyección de anclas.



5.8 POSIBLES INCONVENIENTES EN LA INSTALACIÓN DE PARAGUAS.

Los problemas que pueden presentarse en la colocación de paraguas son ajenos al sistema de colocación pero influyen poderosamente en el resultado:

- **Rotura de la soldadura**

- Soldadura incorrecta por electrodo inadecuado.
- Soldadura incorrecta por exceso de electrodo.
- Mala alineación de las armaduras durante el proceso de soldadura.
- Superficie de contacto entre tramo y tramo
- Soldadura insuficiente.

- **Rotura de la armadura**

- Roscado de la armadura de baja calidad
- Roscado de la armadura de espesor inapropiado.
- Calidad del acero baja.
- Rigidez excesiva.

- **Insuficiente limpieza del Equipo de perforación**

- Obstrucción en los barrenos
- Insuficiencia en la cantidad de fluido de barrido.
- Problemas en el martillo.
- Malas condiciones de los botones de la broca.



VI. MEDICIÓN Y CONTROL DE TÚNELES.

6.1 INTRODUCCIÓN.

Durante la construcción de un túnel, es importante tener las medidas de medición y control que presenta el terreno que estamos excavando, así como su influencia ante otras estructuras existentes, este término comúnmente se le llama Instrumentación y no es otra cosa que llevar las nivelaciones en la superficie y convergencias en el interior del túnel.

La instrumentación y monitoreo en campo es un elemento indispensable en la construcción de túneles.

La instrumentación en tiempo real en las grandes obras civiles es ya en nuestra actividad una realidad aplicada a muchos proyectos.

La mitigación del riesgo, el control y el conocimiento de los movimientos asociados, hacen de la instrumentación automática una herramienta muy potente en la actualidad.

Cuando se trata de túneles de gran diámetro en suelos heterogéneos y en un ambiente urbano caracterizado por la presencia de estructuras sensibles, viviendas o edificios históricos es de obligada necesidad un control exhaustivo, automático y en tiempo real.

La ejecución de un túnel necesita de un sistema de monitores que permita tener un conocimiento suficiente del modo en que el terreno, estructuras e instalaciones responden a las operaciones que se están realizando.

Esta necesidad es más determinante cuando el túnel se construye en entorno urbano, debido a la cantidad de viviendas y servicios que pueden verse afectados.



Los resultados de las mediciones obtenidas y correctamente interpretadas, permiten vigilar la seguridad de las obras, sus posibles afecciones y contrastar con la realidad las hipótesis del proyecto.

Es importante que el sistema de monitores cuente con una buena organización para realizar una interpretación clara y rápida de los datos recibidos y transmitir rápidamente sus conclusiones a los centros de decisión.

Los criterios de diseño se definen en el proyecto constructivo de la obra. No obstante, debido a las recomendaciones que son exigidas por la dirección de obra y las de los diferentes asesores de la obra, es necesario que se contemplen algunas variaciones en la propuesta de diseño.

Es necesario que se consideren ciertos parámetros de medición para evaluar los efectos del túnel sobre el entorno, como:

- Movimientos del terreno en superficie según los tres ejes (X, Y y Z).
- Movimientos verticales del terreno en profundidad.
- Desplazamiento horizontal del terreno en profundidad.
- Movimientos en edificaciones y estructuras próximas.
- Control de vibraciones, ruido y ambiental

Objetivos:

- Vigilar la integridad de las estructuras adyacentes.
- Garantizar la estabilidad del revestimiento.
- Mejorar las condiciones de seguridad.
- Verificar el comportamiento estructural con respecto a los criterios de seguridad y de utilización, principalmente durante la construcción, pero, en algunos casos, también durante la vida en servicio.



- La cuantificación de la respuesta estructural de un método específico de construcción y la verificación de la efectividad de las medidas específicas de soporte.
- La comparación de las predicciones teóricas con el comportamiento real de la estructura y la investigación de los parámetros de los materiales del terreno.
- Verificar la afectación de la seguridad y el servicio de las estructuras y equipamientos adyacentes como resultado de la construcción del túnel.
- Describir los criterios de diseño de la instrumentación.
- Ubicar los dispositivos de instrumentación en las estructuras y en el terreno.
- Proponer una frecuencia de lectura de la instrumentación.
- Establecer unos umbrales de aviso y alarma en función del cálculo de movimientos estimados.

Debido a su calidad, los datos del monitoreo pueden ser usados, también, para resolver disputas entre socios contractuales o entre cliente y terceras partes. Por esta razón un objetivo adicional es:

- Documentar la evidencia relacionada con la construcción del túnel y sus efectos en las construcciones adyacentes.

La instrumentación también puede ayudar para darle un impulso al estado del arte de la tecnología en particular en el contexto geotécnico (Por Ej.: construcción de sistemas urbanos de transporte subterráneo).

Los resultados del monitoreo a menudo proporcionan información valiosa con respecto a los patrones de deformación del terreno y a los mecanismos de falla,



contribuyendo así a la optimización del proyecto en términos de seguridad, tiempo de construcción y costos.

Los resultados de las mediciones de campo pueden ser usados para evaluar el comportamiento estructural con respecto a los requerimientos de seguridad y puesta en servicio. En tales casos, la determinación de un comportamiento aceptable debe incluir los valores umbral de los parámetros indicadores clave.

Los resultados del monitoreo deben evaluarse en combinación con otras observaciones con el fin de decidir si se requieren o no medidas correctivas.

Debe analizarse de inmediato cuando se estén presentando desviaciones de las deformaciones con respecto a un comportamiento pasado, por ejemplo un aceleramiento inesperado dentro de una gran cantidad de mediciones, sin construcciones en proceso en los alrededores de la sección objeto de monitoreo.

La aplicación de estos procedimientos sólo es posible en el caso del comportamiento estructural dúctil.

La toma de decisiones basada en mediciones es imposible cuando el comportamiento estructural es frágil (Por ejemplo estallido de rocas o inestabilidad del frente del túnel), en la medida que las predicciones de los valores de deformación, muy cerca del colapso, son poco fiables.

La planeación de un programa de monitoreo debe incluir los siguientes pasos:

- Predicción del mecanismo que controla el comportamiento.
- Selección de los parámetros que deben ser monitoreados.
- Predicción de la magnitud de los cambios.
- Selección de la instrumentación y de su precisión.
- Plan de instalación de los instrumentos.
- Redundancia de la instrumentación.
- Plan de recolección de datos.



- Procesamiento de los datos.
- Interpretación y plan de informe.

Parámetros a medir:

Las mediciones físicas más importantes a ser monitoreadas pueden dividirse en los siguientes grupos:

- Asentamiento en el terreno.
- Deformación de las estructuras vecinas.
- Estrés en el revestimiento.
- Deformaciones (desplazamientos, deformaciones, cambios en la inclinación y en la curvatura).
- Esfuerzos (esfuerzos de contacto, esfuerzos límite sobre una viga, estado de los esfuerzos) y fuerzas sobre los elementos estructurales (fuerza en los pernos, cargas normales sobre elementos a compresión o sobre los arcos de acero).
- Niveles piezométricos.
- Temperaturas.
- Observaciones geotécnicas del macizo rocoso (tipo de roca, meteorización, clasificación geotécnica, resistencia del macizo rocoso, zonas de debilidad, foliación, etc.).
- Observaciones hidrogeológicas (cambios en el nivel freático, cambio del nivel del agua en pozos, verificación de la conexión del agua del subsuelo entre la zona cerca de la superficie y en profundidad, calidad del agua, composición química).
- Cantidad de agua que se infiltra en el túnel.



- Mediciones geofísicas (indican fallas en un macizo rocoso homogéneo).
- Mediciones sísmicas y acústicas (en caso de excavaciones con perforación y voladuras).

El método de monitoreo más común es la medida de desplazamientos, por ejemplo la convergencia de la excavación subterránea o el asentamiento de la superficie del terreno.

Los desplazamientos tienen la ventaja de que en un sentido matemático, representan cantidades integradas y, básicamente, no se ven afectadas por efectos locales.

Esfuerzos, deformaciones o cambios de curvatura, por otra parte, son cantidades diferenciales, cuya validez está limitada a regiones localizadas (efecto de escala). Por esta razón es necesario hacer observaciones en muchos puntos sucesivos para obtener, así, una distribución sobre un área suficientemente grande.

En algunos casos, por ejemplo durante la construcción de excavaciones subterráneas en rocas que se hinchan o en presencia de condiciones de agua subterránea complicadas, las mediciones de esfuerzos de contacto o de la presión del agua subterránea pueden ser muy sensibles e importantes.

Con la selección de los parámetros a ser monitoreados también se hace la selección del tipo de instrumentos.

La sensibilidad del instrumento y el rango requerido están dados por la predicción del máximo cambio en la magnitud bajo medición.

Sin embargo, la exactitud depende no solo de la sensibilidad, sino también del principio de medición que usa el instrumento. Adicionalmente, los instrumentos con una escala amplia normalmente tienen una baja resolución y precisión.

Finalmente, al seleccionar el instrumento, debe evaluarse tanto el costo, como su disponibilidad, durabilidad, y los requerimientos de mantenimiento y de calibración.



La localización del monitoreo es determinada por el mecanismo o comportamiento previsto de la estructura. Por ejemplo, debe establecerse si son más apropiadas las mediciones puntuales o si se debe medir a lo largo de perfiles o sobre superficies. Para definir la localización de la instrumentación se deben identificar las zonas de interés primario y las áreas críticas, en las cuales es necesario instalar instrumentación adicional para poder recolectar información relevante o significativa.

La distribución y el espaciamiento entre grupos de instrumentos dependerán de factores tales como la estratigrafía, nivel de detalle y grado de redundancia requerido, así como de la localización del túnel con respecto a otras estructuras cercanas.

El plan de recolección de datos incluye detalles acerca de la frecuencia de las lecturas, transmisión de datos y almacenamiento de los mismos.

Las lecturas deben ser registradas a intervalos o continuamente (en tiempo real), dependiendo de las etapas específicas de la construcción o eventos en el tiempo.

Adicionalmente, el plan debe incluir la toma de datos, análisis, interpretación y evaluación de la respuesta de la estructura.



6.2 INSTRUMENTACIÓN Y EQUIPOS.

En este momento se dispone de una gran variedad de aparatos de medida, por lo que pueden controlarse la mayoría de las variables implicadas en el proceso constructivo.

Sistemas de iluminación:

- De los instrumentos: los equipos van provistos de sistemas de iluminación adaptables, aunque no son necesarios siempre.
- De las galerías: sistemas de iluminación de mina que mejoren la visibilidad del punto de mira.
- Teodolitos de mina: usados únicamente en mina ya que se han diseñado íntegramente para ello; en túnel se puede usar la instrumentación convencional. El gran problema de la medición en galerías es el estacionamiento del instrumento, por lo cual, se puede disponer colgado del techo o apoyado sobre barras metálicas en los hastiales.
- Teodolito giroscópico: o también denominado “inercial”, permite de forma directa y puntual la determinación de la dirección del Norte Geográfico con un grado de precisión suficiente para la mayoría de los trabajos, ya que en galerías es fundamental la correcta orientación con respecto al exterior de la mina a través de un pozo.

Estacionamientos especiales:

En ocasiones es necesario efectuar el estacionamiento del instrumental sobre aparejos diversos que permiten, no sólo situar el aparato de forma atípica, sino



también, posicionarlo con unas determinadas coordenadas espaciales, si se diera el caso. Para ello existen los siguientes aparatos:

- Consolas y plataformas de ajuste: son pequeñas plataformas con brazo articulado que permiten la fijación del aparato en cualquier punto del muro o de la pared rocosa.
- Plataforma de ajuste: cuando interesa colocar un instrumento a una determinada cota se utiliza una plataforma que permite variar la altura del instrumento.
- Mesas de centraje: en ciertas ocasiones, no sólo interesa fijar la cota, sino también las coordenadas X e Y, por lo cual se utilizan estas mesas que son de gran utilidad durante el replanteo.
- Regletas de centraje o ajuste: cuando es necesario efectuar la transferencia de un punto P señalado en planta sobre la rasante de excavación a la clave de la bóveda o cuando hemos de transferir un punto cualquiera sobre la vertical del mismo, es de gran utilidad estas regletas, que dotadas de patillas de anclaje y de dos carros deslizantes uno sobre otro en direcciones perpendiculares, permiten situar con toda exactitud la posición de la marca de referencia del punto transferido.
- Emisores láser: se utilizan para conocer el direccionamiento de la obra tanto en planta como en alzado.
- Plomadas cenit-nadir: sirven para efectuar la transferencia de puntos a lo largo de una visual vertical cenit-nadir.
- Plomadas de gravedad (mecánicas): se usan en trabajos de baja a media precisión y están basadas en un peso colgado a través de un hilo que pasa por el centro del instrumento. Su gran problema son las oscilaciones, actualmente están prácticamente en desuso.



- Plomadas ópticas: para trabajos de alta a muy alta precisión, ya que, para distancias cortas tienen un elevado grado de precisión.
- Oculares acodados: en las tareas de replanteo de un túnel, en muchas ocasiones, debido a la angostura de la galería o las características del estacionamiento que no permite las observaciones para una posición normal del operador, es necesaria la utilización de oculares acodados a fin de poder efectuar lecturas cenitales cercanas a la vertical. También permiten utilizar el taquímetro como plomada cenit-nadir.
- Miras especiales industriales: son miras adaptadas a trabajos en lugares angostos y de poco gálibo. Son de menor longitud que las convencionales y van provista de regatones para su estacionamiento sobre diferentes tipos de señales.
- Perfilómetros: serie de instrumentos especialmente diseñados para la obtención de los perfiles transversales de una galería de túnel.
- Instrumentación especial para el control de deformaciones: son instrumentos diseñados para conocer con un alto grado de fiabilidad las posibles deformaciones que se pueden producir en una galería; se conocen como hilos invar y se basan en un hilo sometido a tensión constante que gracias a un medidor permite conocer con gran rapidez y precisión las variaciones de convergencia entre dos puntos prefijados.
- Señalización de puntos: se utiliza pintura fluorescente, clavos o, en trabajos de gran importancia, hitos de concreto.
- Otro material: como reglas de medición expedita, que permiten medir longitudes entre elementos de obra a fin de controles someros; prismas pentagonales, que permiten la obtención de visuales perpendiculares; medios auxiliares, como pueden ser:



- Elementos para escritura y marcado por fricción en las señales
- Elementos varios de señalización
- Tablas, tablonés, listones
- Punteros de acero
- Granetes
- Cinceles
- Macetas, mazos
- Clavos de acero
- Yeso, cementos, morteros, concreto para fijado y protección de señales
- Cuerdas de línea, cables
- Radioteléfonos
- Maquinaria de obras públicas
- Escaleras de mano, andamios.

Existen además otros muchos equipos de medida de uso poco frecuente como:

- Medidores de resistividad o conductividad.
- Acelerómetros.
- Líneas de asientos, tasómetros.
- Detectores de gases.



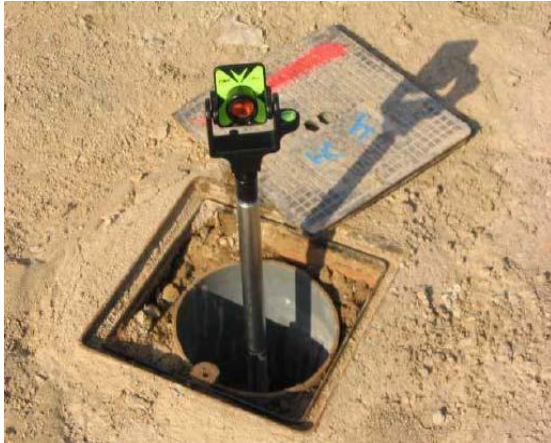
Recientemente se está investigando en aplicaciones de la fibra óptica para detectar, de forma continua, variaciones en los estados tensionales de sostenimientos u otros elementos de los túneles.

Por supuesto cada aparato tiene su campo de aplicación, su rango de medida, su precisión y su fiabilidad. En este sentido es muy importante la calidad de la instalación. Una instalación deficiente puede hacer que las medidas sean inaprovechables o, lo que es peor, lleven a conclusiones erróneas. Siempre se ha dicho que es preferible no tener medidas a tener una medida errónea.



Equipos principalmente utilizados en instrumentación y resultados que proporcionan.

FUNCION	APARATO O EQUIPO	UTILIZACION	OBSERVACIONES
Medición de desplazamientos	Hitos de nivelación	Asientos terreno	Defectos de apoyo en terreno compresible
	Regletas o clavos	Asientos en estructuras	
	Dianas, prismas, etc.	Control topográfico	Errores por ángulo visual y distancia
	Cinta de convergencia	Desplazamientos entre puntos a distancia métrica	Errores de 1 mm/10 m o superiores
	Electroniveles	Registro continuo de asientos	Tramos cortos
	Inclinómetros	Desplazamientos o flechas	Problemas de instalación
	Extensómetros	Desplazamientos o asientos relativos entre puntos	
	Fisurómetros o "crack meters", micrómetros, comparadores, transductores de lectura manual o de registro automático, etc.	Medida de apertura de grietas, movimientos entre partes de una estructura, etc.	
	TriVec	Extensómetro múltiple	
Medición de deformaciones	Clinómetros	Inclinación de edificios	
	Extensímetros o straingauges	Medida de deformaciones en elementos estructurales	Problemas de instalación
Medición de fuerzas o tensiones	Fibra óptica	Id.	
	Células de presión total		
	Células de carga en anclajes		
	Células de presión intersticial		
Medición de presión intersticial	Células tipo Osterberg		
	Piezómetros de tubo abierto o de casagrande		
	Piezómetros de cuerda vibrante		
	Manómetros		



Diana taquimétrica y de nivelación.



Cinta de convergencia.



Inclinómetro.



Piezómetro abierto.



Piezómetros de cuerda vibrante.



Células de presión total.



Células de carga en anclajes.



Extensímetro.



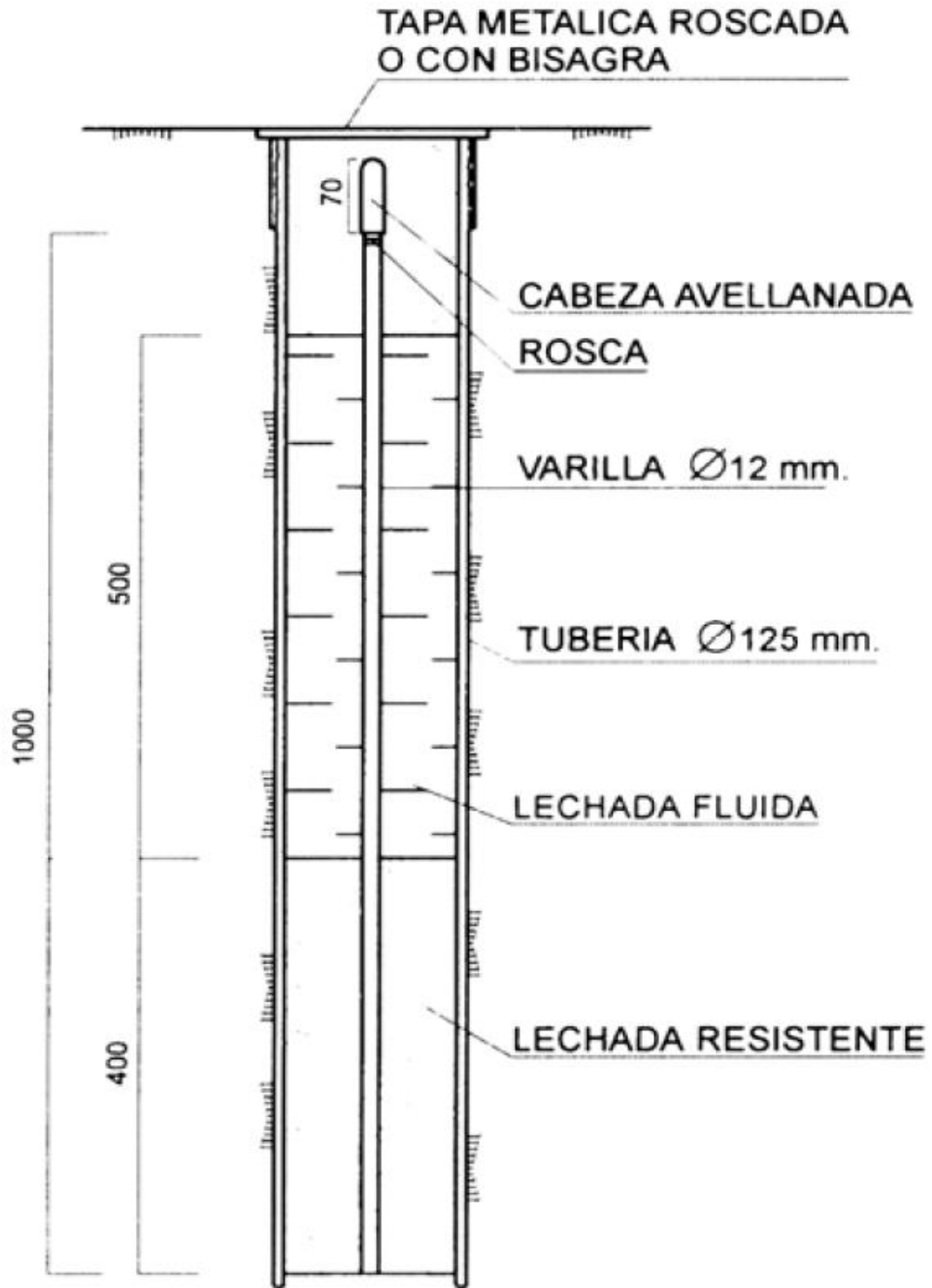
Electronivel.



Fisurómetro.



Teodolito registrador.



Base de referencia



Para poder corregir errores es importante una cierta redundancia o duplicación de las medidas.

También es fundamental, sobre todo en el caso de nivelaciones o medidas topográficas disponer de bases de referencia suficientemente fiables. Con frecuencia se dan por inamovibles bases “flotantes” que hacen inservible la auscultación.

Hay que tener mucho cuidado con el vandalismo, ya que pueden moverse accidentalmente los puntos de medida, confundiendo los desplazamientos reales con los provocados.

La inspección directa de los aparatos de medida debe permitir detectar estas incidencias.

Actualmente el desarrollo tecnológico ha puesto en el mercado una gran oferta de aparatos registradores o sensores que proporcionan una gran cantidad de medidas en tiempo real.

Las señales de los sensores se envían por radio o WiFi a una Estación Central donde se transforman, mediante un software apropiado, en medidas interpretables por un cierto número de usuarios autorizados. El propio sistema compara las medidas con umbrales preestablecidos, generando en su caso, las oportunas alarmas.

Estas Redes de control Automático son lógicamente bastante costosas si bien se argumenta que su mayor coste viene compensado por la reducción de mano de obra en personal de medida y control.

Desgraciadamente no todas las magnitudes se pueden registrar automáticamente en todos los puntos de interés por lo que el personal in situ sigue siendo necesario. Por otra parte es frecuente tener que ampliar los puntos de medida conforme se va comportando la obra.



También hay que tener en cuenta que un exceso de datos puede ser inmanejable e innecesario.

Es absurdo tomar datos cada minuto de un proceso cuya evolución se manifiesta en días o semanas.

En los hospitales no se toma la temperatura a los enfermos cada décima de segundo, aunque podría hacerse.

No es lo mismo hacer el seguimiento de las tensiones en un túnel de dovelas, en donde los movimientos significativos son indetectables en periodos de semanas que el de las subsidencias de edificios en zona urbana, donde hay que detectar el peligro con suficiente antelación.

También está injustificado disponer aparatos registradores, necesariamente fijos, para controlar procesos que van a pasar fugazmente por su tramo de observación.

Un aparato registrador no tiene por qué ser necesariamente más preciso que un aparato de control manual. Aparte de derivas electrónicas, hay otros muchos factores de error. Por ejemplo, los teodolitos registradores se instalan en puntos altos, terrazas de edificios etc. con lo que las medidas adolecen de las dilataciones del propio edificio, muchas veces superiores al rango de movimientos esperables.

Creemos que el registro continuo puede estar indicado en estructuras importantes o monumentales en cuyo entorno se van a hacer operaciones complejas de bastante duración pero no tiene sentido cuando va a pasar una tuneladora a 30 m/día.

De todos modos es importante, para algunas Administraciones, poder decir en los periódicos que “... *preocupados por la seguridad de los vecinos se ha instalado el sistema de auscultación más caro y sofisticado existente en el mercado*”. Se registra hasta el aleteo de las mariposas (por aquello del caos).

La hipótesis se alcanza cuando se dispone de un sistema de seguimiento centralizado, con varios ordenadores y un programa que permite saber lo que



Excavación de túneles empleando el método convencional



pasa en cada punto de la obra, los detalles de la misma, el tipo de terreno, los datos de los edificios, la historia de medidas de cada aparato, etc.



6.3 INSTRUMENTACIÓN EN TÚNELES CONVENCIONALES.

Normalmente la auscultación se limita a la medida de convergencias, aunque pueden incorporarse algunos controles complementarios como:

- Nivelación de clave.
- Extensómetros para definir la zona plastificada en torno al túnel.
- Densímetros o extensímetros en cerchas.

Aunque algunas veces se colocan células de carga en el concreto lanzado las dificultades de colocación hacen que se prefiera instalarlas en el revestimiento definitivo, si bien su utilidad es mucho menor.

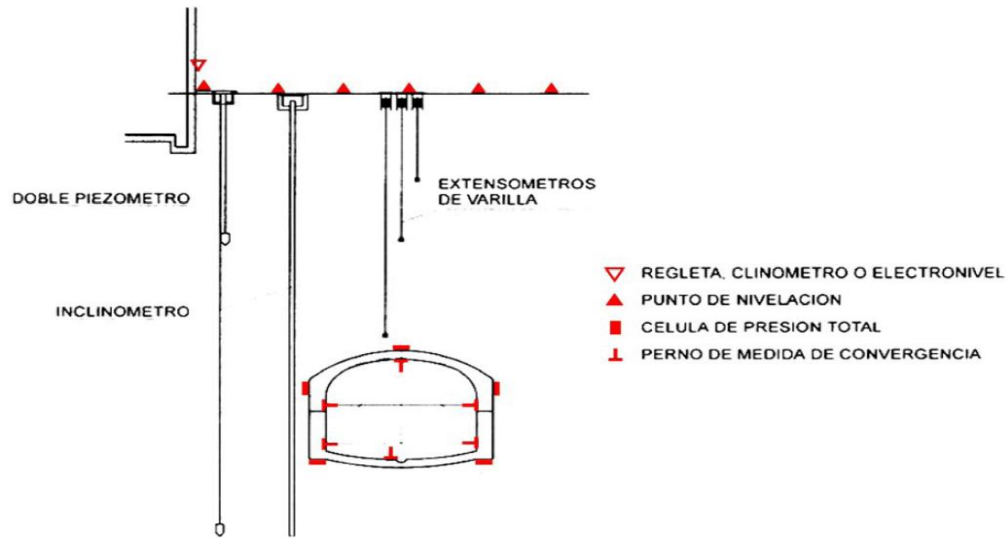
En zonas urbanas donde es importante el control de la subsidencia en superficie se suelen colocar hitos de nivelación sobre el terreno.

Hay que tener cuidado con la instalación de estos hitos ya que si existe tráfico o están colocados sobre rellenos pueden presentar medidas que no tengan nada que ver con las obras subterráneas.

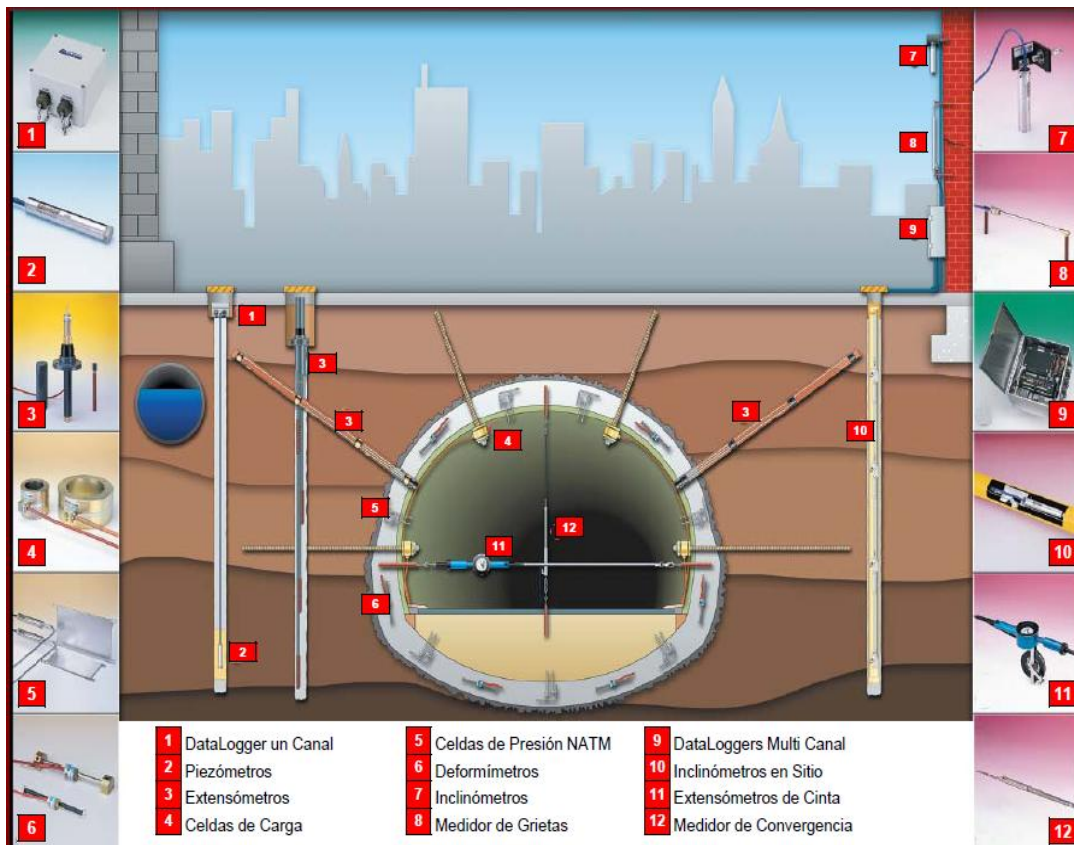
Si la cobertera no es muy grande también se prefiere instalar los extensómetros desde superficie. Ocasionalmente también se colocan inclinómetros a los lados del túnel o entre éste y los edificios.

También es habitual disponer piezómetros a ambos lados del túnel para controlar la afección a los niveles freáticos.

Lógicamente la instrumentación se completa colocando detectores de movimientos (hitos, regletas, clinómetros, etc.) en los edificios o servicios que quedan dentro de la zona de influencia del túnel.



Instrumentación habitual en túneles convencionales-Zona urbana.



Instrumentos de medición.



6.4 CONTROL DE EXCAVACIÓN DE UN TÚNEL.

El control de la excavación de un túnel se debe realizar ineludiblemente por dos razones:

- Es necesario constatar que la sección transversal de la galería cumple con las especificaciones de proyecto.
- Hay que cubicar el volumen de tierras o roca excavados en función de las secciones o perfiles transversales de la galería tras la excavación.

A pesar de lo cuidadosa que pueda ser la excavación después de cada avance la sección transversal del túnel resulta irregular.

Habrán que subsanar estas discrepancias o al menos conocer y evaluar su magnitud para lo cual habrá que conocer los perfiles transversales de la sección del túnel a lo largo de una serie de puntos del eje con el fin último de poder cubicar el volumen de tierras excavado.

Se podrán obtener los perfiles por los siguientes métodos:

- **Por referencia a eje y rasante:**

Para galerías con poco gálibo (menor de 5 m) y se dispone de poca instrumentación. Se trata de medir distancias entre un punto de posicionamiento y las distintas visuales a diferentes puntos tomando como referencia el eje y la rasante del túnel.

- **Por radiación:**

Consiste en radiar puntos definitorios del perfil sobre el plano vertical de la sección transversal que deseamos obtener. Se puede realizar con taquímetro y cinta, con taquímetro y distanciómetro o por sistemas automatizados de los anteriores.



- **Por intersección de visuales:**

En galerías de gran tamaño puede no poderse acceder a los puntos definitivos del perfil, o no se disponga de medios de medida indirecta de distancias, por tanto se opera intersecando los puntos del perfil desde una base de longitud conocida.

- **Con pantómetro de túneles:**

Consisten en un círculo graduado de donde de forma radial y a partir de su centro sale un vástago extensible graduado en distancias. Actualmente obsoleto y desplazado por perfilómetros de túnel.

- **Perfilómetros de túnel:**

Son una serie de aparatos que permiten obtener de forma rápida y precisa las secciones transversales de una galería subterránea.

- **Por fotogrametría:**

Se utilizan medios fotogramétricos. Si en un eje de túnel estacionamos un emisor láser rotatorio en el plano vertical normal a dicho eje, la incidencia de dicho rayo materializará de forma continua el perfil de la galería. Si desde puntos del eje anteriores y posteriores al del emisor de láser fotografiamos con una cámara terrestre la sección del perfil, efectuando la exposición durante un tiempo adecuado, conseguiremos un fotograma al que podremos dar escala midiendo la distancia de la cámara al perfil y colocando una mira en el plano del mismo. Midiendo los datos del fotograma en un monocomparador se obtiene el perfil.



6.5 CONTROL DE LAS DEFORMACIONES DE UN TÚNEL.

El control de las deformaciones de una obra puede ser considerado como una materia específica e independiente, su estudio completo es complejo y extenso, y debería ser tratado de forma monográfica como se realiza en geotecnia.

Para poder evaluar o medir estas deformaciones se utiliza un tipo de instrumentación específica.

Los más sencillos son los extensómetros destinados a medir deformaciones verticales o laterales de la bóveda o de los hastiales de la galería.

En el sector de deformaciones o expansión donde se encuentra la galería aparecen unas tensiones que dan lugar a la convergencia.

Consiste en obtener una serie de datos y medidas que van a permitir evaluar sus deformaciones, constatar el comportamiento del terreno y determinar el tipo de sostenimiento necesario.

Se realiza durante y después de la excavación y revestimiento en su caso. Precisa de los siguientes estudios:

- **Medidas de convergencia:**

Se determinan las variaciones de longitud de cuerdas entre puntos de los hastiales y la bóveda y el movimiento vertical absoluto de un punto situado en la bóveda o clave. Las medidas se realizan con instrumentos de muy alta precisión.

- **Medidas de extensimetría:**

Son una medida puramente geotécnica y se realizan con extensómetros colocados en diferentes argollas, midiendo distancias entre diferentes puntos de un perfil.



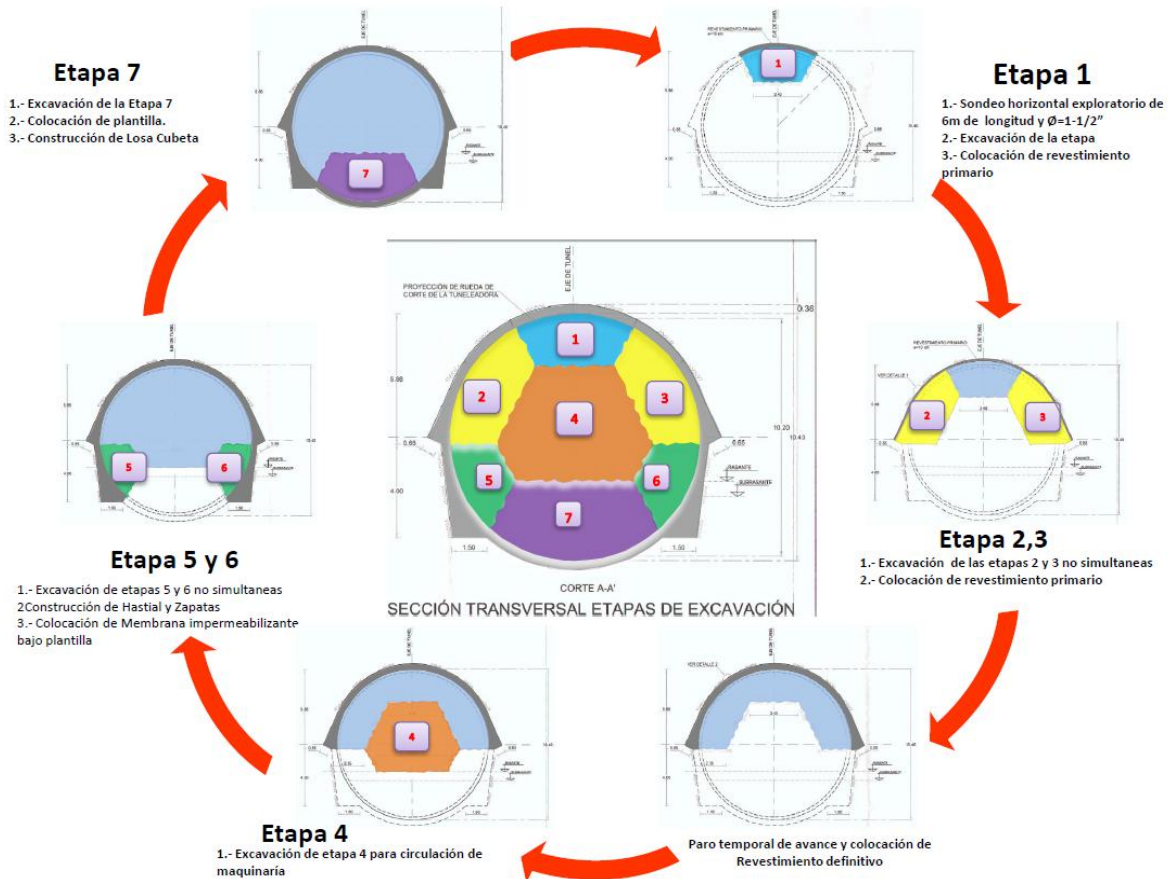
- ***Medidas de las presiones:***

Se realizan en cavidades perforadas en distintos puntos del frente e introduciendo sensores de presión denominados flatjacks.



ANEXO FOTOGRÁFICO.

PROCEDIMIENTO DE EXCAVACIÓN Y REVESTIMIENTO DEL TÚNEL CONVENCIONAL.





ETAPA 1.

Excavación de la parte superior de la clave.



Colocación del revestimiento primario (concreto lanzado).



ETAPA 2 y 3.

Excavación de la parte baja de la clave. *(No simultáneas).*



Colocación del revestimiento primario (concreto lanzado).





PARO TEMPORAL DE AVANCE Y COLOCACIÓN DE REVESTIMIENTO DEFINITIVO.

Habilitado y armado de acero de refuerzo de clave del túnel.





Revestimiento definitivo con concreto lanzado reforzado con fibras de acero.





ETAPA 4.

Excavación del núcleo central.





ETAPA 5 y 6.

Excavación de zapatas. (No simultáneas).



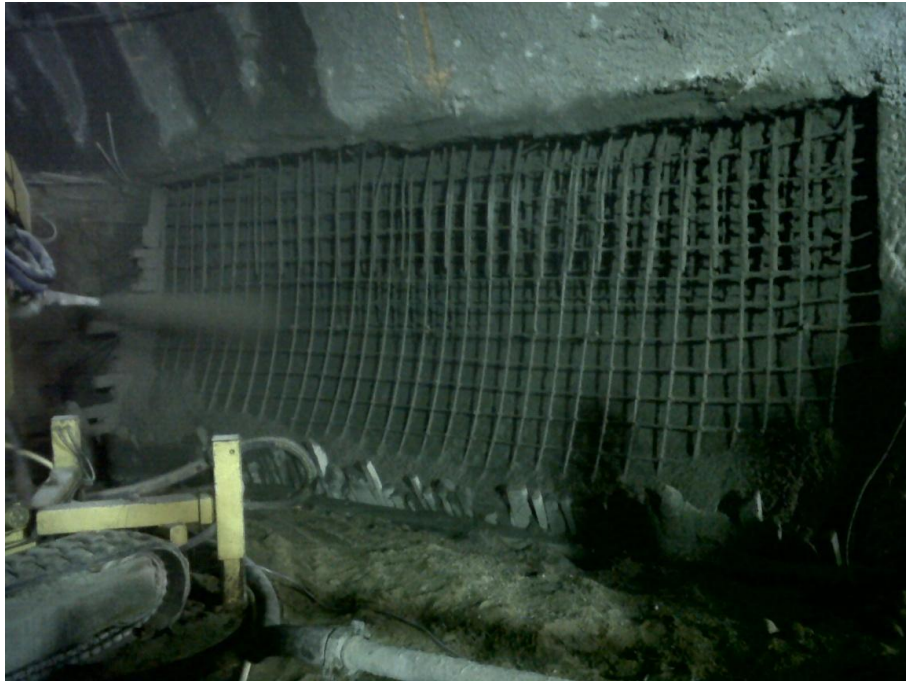


Habilitado y armado de acero de refuerzo en zapatas.





Concreto lanzado reforzado con fibras de acero en zapatas.





ETAPA 7.

Excavación de la parte inferior del túnel (Cubeta).





Habilitado y armado de acero de refuerzo en cubeta.





Colado de cubeta.





CONCLUSIÓN.

Los personajes que aportan toda la teoría en túneles han sido tuneleros que han dedicado tiempo, esfuerzo y empeño al estudio y comportamiento de un túnel y que han trabajado en los suelos blandos y duros, secos y saturados, adquiriendo una experiencia diferente metro a metro a través de los kilómetros que han excavado.

Toda esa experiencia ha traído consigo la evolución de equipos y materiales que mejoran los rendimientos de ejecución y la seguridad del túnel y del personal durante su proceso constructivo y por el tiempo de su vida útil.

En las últimas décadas, los avances tecnológicos en las áreas de ingeniería de túneles nos han permitido disponer de los medios y herramientas para poder construir de manera eficiente, segura y económica, con los obstáculos y dificultades que impone la naturaleza, haciendo cada vez más atractiva la opción subterránea y desplazando los antiguos temores y sensaciones de aventura. Estos avances implican también para su diseño.

El presente trabajo se realizó con el fin de mostrar la importancia y la complejidad en la construcción de túneles empleando el método convencional, además de que los túneles son obras meramente importantes en el desarrollo de un país y de una región en específica, ya que con ellos y dependiendo de la finalidad de la obra podemos beneficiarnos de diferentes maneras, es decir, si son túneles carreteros o ferroviarios se pueden acortar distancias al construirlos sobre el macizo rocoso, lo que ahorra tiempo y dinero en el traslado de un punto a otro, si son túneles de desvío de presas, con estas obras podemos encausar el río en otra dirección y con ello el área estaría libre para trabajar en seco durante la construcción de la cortina de la presa; si es que fueran túneles para la minería, con ellos es fácil tener acceso al área de la explotación de los minerales, etc. Todo ello sin dejar de lado la seguridad, como es una buena iluminación, ventilación y estabilización del terreno durante toda la construcción de la obra.



BIBLIOGRAFÍA.

- ITA Working Group. Report (2009). *General report on conventional tunnelling method.* (No. 2). International Tunnelling and Underground Space Association. France.
- ITA Working Group. Report (1988). *Guidelines for the design of tunnels.* (No. 3). Tunnelling and Underground Space Technology. Great Britain.
- *El sostenimiento de túneles basado en las clasificaciones geomecánicas.*
- Oteo, Carlos. (2010). *Algunas ideas para seleccionar el proceso constructivo en túneles.* (No. 1). Obras Urbanas.
- Sfriso, Alejo. (2010). *Algunos procedimientos constructivos para la ejecución de túneles urbanos.* (No. 1). VS. Consultores SA. Buenos Aires.
- De la Rosa, César. (2011) *Excavación de túneles en suelos.* Curso de Procedimientos de Construcción de Túneles. Ingenieros Civiles Asociados. Ciudad de México.
- Romana, Manuel. (2012). *Cara y cruz del Nuevo Método Austriaco de Construcción de Túneles.* 2° Simposio Internacional sobre túneles y lumbreras en suelos y roca. Ciudad de México.
- Frutos, Carlos. (2012). *Uso de concreto lanzado reforzado con fibras metálicas en túneles.* 2° Simposio Internacional sobre túneles y lumbreras en suelos y roca. Ciudad de México.
- Ángeles, Noé. (2011). *Tecnología y aplicaciones del concreto proyectado.* Curso de túneles y obras subterráneas. AMITOS. Ciudad de México.
- IMCYC. (2007). *Concreto reforzado con fibras.* (No. 13). Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto. Ciudad de México.



- Abril, Esaud. (2009). *Concreto Lanzado "Shotcrete"*. Universidad Alas Peruanas. Perú.
- Corwine, John W. (1984). *Concreto lanzado reforzado con fibras de acero*. (Vol. 37 No. 7). The Construction Specifier.
- Padilla, Pedro. (2011). *Excavación de Túneles Subterráneos en Terrenos Malos Utilizando Paraguas Pesados Ejecutados con Jumbo*. Curso de Procedimientos de Construcción de Túneles. Ingenieros Civiles Asociados. Ciudad de México.
- Schmitter, Juan. (2011). *Instrumentación y mediciones de comportamiento*. Curso de túneles y obras subterráneas. AMITOS. Ciudad de México.
- Lorenzo, Gabriel. *Topografía de túneles*. (No. 1).
- Rodríguez, José. *Auscultación de túneles*. Catedrático de Mecánica del Suelo y cimentaciones de la UPM.