



CONSTRUCCIÓN DE LUMBRERAS Y TÚNELES EN SUELOS Y ROCAS



Ing. Andrés A. Moreno y Fernández

Mayo, 2006



CONSTRUCCIÓN DE LUMBRERAS Y TÚNELES EN SUELOS Y ROCAS

1. INTRODUCCIÓN	<u>3</u>
2. CLASIFICACIÓN DE SUELOS Y ROCAS	<u>7</u>
3. ÁREAS DE ESPECIAL PREOCUPACIÓN EN LAS INVESTIGACIONES GEOTÉCNICAS	<u>11</u>
4. METODOLOGÍA DE DISEÑO EN INGENIERÍA DE ROCAS Z.T. BIENIAWSKI	<u>14</u>
5. DISEÑO CONCEPTUAL	<u>16</u>
6. SISTEMAS DE SOPORTE	<u>17</u>
7. BOMBEOS, INYECCIONES Y TRATAMIENTOS	<u>21</u>
8. PRINCIPALES MÉTODOS CONSTRUCTIVOS	<u>22</u>
9. LICITACIÓN DE UN PROYECTO SUBTERRÁNEO	<u>68</u>
10. CONSTRUCCIÓN DEL PROYECTO	<u>70</u>
11. COMENTARIOS FINALES	<u>73</u>
12. REFERENCIAS	<u>76</u>
ANEXOS	
Lista de Verificación del Reporte GBR	<u>79</u>
Cláusula Estándar de Condiciones Diferentes del Sitio (DSC)	<u>83</u>



INTRODUCCIÓN

Urbanización Mundial

ITA. Shanghai, 2004

En 1950 10% de la población vivía en ciudades En 2000 60% de la población vivía en ciudades
La población mundial crece 60 millones al año

Para el futuro se piensa que se estabilizará en 85%

Para 2025, 10% de la población vivirá en 26 megaciudades (18 en Asia)

Túneles para Transporte para los próximos 10 años

Austria, Suiza y Alemania	800 km
Francia e Italia	350 km
España y Portugal	500 km
Noruega, Suecia y Finlandia	500 km
Reino Unido	250 km
Holanda y Bélgica	100 km
Norteamérica	650 km
Sudamérica	500 km
Japón	2,500 km
China	10,000 km
	$\Sigma = 16,150$ km



Clasificación de Lumberas

1. Definiciones

NOMBRE

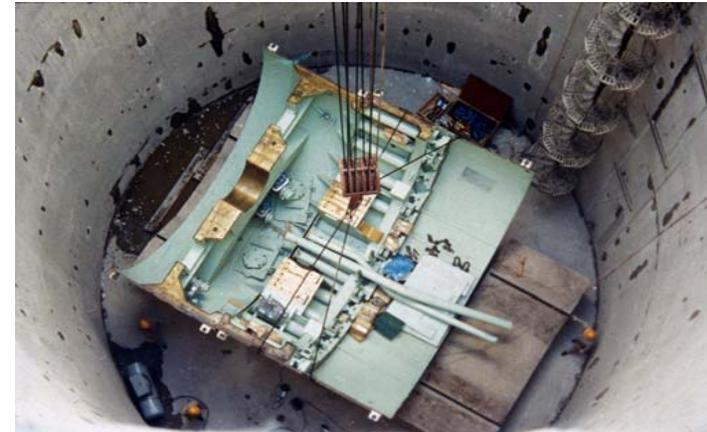
Tiro
Lumberas
Rama Inclinada

FORMA

Rectangular
Circular
Cualquier forma

MATERIAL

Suelos
Rocas
Frentes Mixtos



2. Clasificaciones

ACCESO

- A desarrollos mineros
- A frentes en túneles subterráneos largos
- A casa de máquinas en proyectos hidráulicos

VENTILACIÓN

- Casa de máquinas
- A túneles largos (carreteros y ferrocarrileros)

OTROS

- Cables
- Elevadores de personal
- Facilidades de construcción



Clasificación de los Túneles

a. Según su servicio:

- Carreteros
- Ferrocarrileros
- Metro
- Acueductos y drenajes
- Cavernas

b. Según su localización:

- Bajo el agua
- De montaña
- Túneles con poco techo

c. Según la geología:

- Túneles en roca
- Túneles en suelos
- Túneles con frentes mixtos





Restricciones

El cliente puede fijar restricciones como:

- a. Asentamientos máximos permisibles en superficie
- b. Desvío máximo en elevación y en línea
- c. Infiltración máxima permitida
- d. Inspecciones y mantenimiento restringidos durante la operación del túnel
- e. Ingreso máximo permitido de gases tóxicos o explosivos o de hidrocarburos
- f. Máxima pérdida de presión y gasto en conductos a presión, etc.





CLASIFICACIÓN DE SUELOS DEL TUNELERO

Karl Terzaghi, 1950

Modificado por Ronald E. Heuer, 1974

Clasificación	Comportamiento	Suelos Típicos
1. FIRME	El túnel puede excavarse sin soporte inicial y el revestimiento definitivo puede construirse antes de que el suelo empiece a moverse.	Lo es arriba del nivel freático, arcillas duras, margas, arenas y gravas cementadas que no estén sobre esforzadas.
2. GRANEO Lento (Raveling) Rápido	Se empiezan a desprenderse del techo y paredes, trozos o laminillas de material, cierto tiempo después de que el material quedó expuesto, debido al aflojamiento o al sobre esfuerzo y a la fractura frágil (el suelo se separa o se rompe a lo largo de distintas superficies). En el graneado rápido, el proceso empieza en pocos minutos.	Suelos residuales o arenas con pequeñas cantidades de cementante. Arriba del nivel freático son de graneado lento y bajo el NAF son de graneado rápido. Arcillas firmes fisuradas pueden presentar graneado lento o rápido, dependiendo del grado de sobre esfuerzo.
3. EXTRUSIVO (Squeezing)	El terreno fluye plásticamente hacia el interior del túnel, sin ninguna fractura o pérdida de continuidad y sin ningún aumento perceptible del contenido de agua. Ductil, fluye debido al sobre esfuerzo.	Suelos sin resistencia friccionante. El grado de extrusión depende del grado de sobre esfuerzo. Ocurre en arcillas muy blandas y hasta de consistencia media, a poca y a mediana profundidad. A gran profundidad, arcillas de duras a firmes, pueden presentar una combinación de graneado y extrusión.



4. DE CORRIDA (Running)	Los materiales granulares sin cohesión, son inestables con una pendiente mayor a su ángulo de reposo (30 – 35°). Cuando son expuestos a pendientes mayores, los materiales corren como si fuera azúcar o arena de duna.	Materiales granulares, limpios y secos. Cuando existe una cohesión aparente por la presencia de humedad o una cementación débil, que permite que en un tiempo breve, el material sea estable, a esto, se le conoce como corrida cohesiva.
5. FLUYENTE (Flowing)	Una mezcla viscosa de suelo y agua fluye hacia el túnel. El material puede ingresar al túnel por el frente, el piso, la clave o por las paredes del túnel. Puede fluir grandes distancias y en ocasiones invadir completamente el túnel.	Bajo el nivel freático: Limos, arenas o gravas, que no contengan arcillas que les puedan dar cohesión y plasticidad. Se puede presentar en arcillas altamente sensitivas cuando se rompe su estructura.
6. EXPANSIVO (Swelling)	El suelo absorbe agua, incrementa su volumen y se expande lentamente hacia el túnel.	Arcillas altamente preconsolidadas con índices de plasticidad mayores de 30. Generalmente con contenidos significativos de montmorilonita.



Clasificación de Rocas

*Karl Terzaghi. Rocktunneling
with steel supports, 1946*

Rock load H_p , in feet of rock on roof of support in tunnel
with width B (ft) and height H_t (ft) at depth of more than $1.5 (B + H_t)$.

Rock Condition	Rock Load H_p in feet	Remarks
1. Hard and intact	zero	Light lining, required only if spalling or popping occurs.
2. Hard stratified or schistose	0 to 0.5 B	Light support.
3. Massive, moderately jointed	0 to 0.25 B	Load may change erratically from point to point.
4. Moderately blocky and seamy	0.25 B to 0.35 $(B + H_t)$	No side pressure.
5. Very blocky and seamy	(0.35 to 1.10) $(B + H_t)$	Little or no side pressure.
6. Completely crushed but chemically intact	1.10 $(B + H_t)$	Considerable side pressure. Softening effect of seepage towards bottom of tunnel requires either continuous support for lower ends of ribs or circular ribs
7. Squeezing rock, moderate depth	(1.10 to 2.10) $(B + H_t)$	Heavy side pressure, invert struts required.
8. Squeezing rock, great depth	(2.10 to 4.50) $(B + H_t)$	Circular ribs are recommended.
9. Swelling rock	Up to 250 ft. irrespective of value of $(B + H_t)$	Circular ribs required. In extreme cases use yielding support.



Classification system	Originator	Work done/remarks	Application																				
Rock loads	Terzaghi classified rocks into six groups	Stratified, intact, moderately jointed, blocky, crushed, squeezing and swelling rocks	Tunnelling with steel supports																				
Rock quality designation (RQD) index	Deere proposed a relationship to calculate the RQD	Based on core recovery during drilling from a drill hole, RQD is calculated: <table border="1"> <thead> <tr> <th>RQD (%)</th> <th>Classification</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>90-100</td> <td>Excellent</td> </tr> <tr> <td>75-90</td> <td>Good</td> </tr> <tr> <td>50-75</td> <td>Fair</td> </tr> <tr> <td>25-50</td> <td>Poor</td> </tr> <tr> <td><25</td> <td>Very poor</td> </tr> </tbody> </table>	RQD (%)	Classification	90-100	Excellent	75-90	Good	50-75	Fair	25-50	Poor	<25	Very poor	Core logging, tunnelling								
RQD (%)	Classification																						
90-100	Excellent																						
75-90	Good																						
50-75	Fair																						
25-50	Poor																						
<25	Very poor																						
Rock structure rating (RSR) concept	Wickham <i>et al.</i> considered geological and construction parameters	Geological parameters: rock mass, joint pattern, dip and strike, discontinuities, faults, shears and folds, groundwater, rock material properties, weathering or alteration Construction parameters: direction of drive, size of tunnel, method of excavation	Tunnelling																				
Rock mass rating (RMR) concept	Bieniawski (modified by many others) divided rock mass into six groups and gave the ratings as shown in column (3)	Parameters (range values) 1. uniaxial compressive strength (0 to 15) 2. rock quality designation (3 to 20) 3. spacing of discontinuities (5 to 20) 4. condition of discontinuities (0 to 30) 5. groundwater condition (0 to 15) 6. orientation of discontinuities (0 to 60)	Mining and tunnelling																				
Rock mass quality (Q) system	Barton <i>et al.</i> designated the rock mass quality as given in column (3)	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Rock mass quality Q</th> <th>Behaviour of rock mass in tunnelling</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1000 ← 400</td> <td>Exceptionally good</td> </tr> <tr> <td>400 ← 100</td> <td>Extremely good</td> </tr> <tr> <td>100 ← 40</td> <td>Very good</td> </tr> <tr> <td>40 ← 10</td> <td>Good</td> </tr> <tr> <td>10 ← 4</td> <td>Fair</td> </tr> <tr> <td>4 ← 1</td> <td>Poor</td> </tr> <tr> <td>1 ← 0.1</td> <td>Very poor</td> </tr> <tr> <td>0.1 ← 0.01</td> <td>Extremely poor</td> </tr> <tr> <td>0.01 ← 0.001</td> <td>Exceptionally poor</td> </tr> </tbody> </table>	Rock mass quality Q	Behaviour of rock mass in tunnelling	1000 ← 400	Exceptionally good	400 ← 100	Extremely good	100 ← 40	Very good	40 ← 10	Good	10 ← 4	Fair	4 ← 1	Poor	1 ← 0.1	Very poor	0.1 ← 0.01	Extremely poor	0.01 ← 0.001	Exceptionally poor	Tunnels, chambers
Rock mass quality Q	Behaviour of rock mass in tunnelling																						
1000 ← 400	Exceptionally good																						
400 ← 100	Extremely good																						
100 ← 40	Very good																						
40 ← 10	Good																						
10 ← 4	Fair																						
4 ← 1	Poor																						
1 ← 0.1	Very poor																						
0.1 ← 0.01	Extremely poor																						
0.01 ← 0.001	Exceptionally poor																						

Resumen de los Principales Sistemas de Clasificación de la Masa de Roca

R. Tatiya. Civil Excavations and Tunneling, 2005.

ÁREAS DE ESPECIAL PREOCUPACIÓN EN LAS INVESTIGACIONES GEOTÉCNICAS



K. Terzaghi, 1939.



ÁREAS DE ESPECIAL PREOCUPACIÓN EN LAS INVESTIGACIONES GEOTÉCNICAS

T.D. O'Rourke, 1984

Planeación y Diseño

Selección del túnel Alineamiento y perfil

- Condiciones generales del subsuelo
- Principales discontinuidades, contactos, discordancias
- Edificios adyacentes e instalaciones subterráneas

Predicción del comportamiento del terreno dentro del túnel

- Como suelo o como roca
- Cargas del subsuelo, estabilidad y deformación
- Permeabilidad, filtraciones del agua subterránea
- Juntas, "slickensides", zonas de cortante o cizallamiento y fallas

Selección de la sección del túnel y del revestimiento

- Rigidez relativa entre el revestimiento y el subsuelo
- Estabilidad de la clave, cubeta y paredes
- Efecto de la estructura *in-situ* en la forma de la excavación
- Orientación relativa de túnel con respecto a los esfuerzos *in-situ*

Decisión entre resistir o drenar el agua

- Cantidad y calidad del agua subterránea
- Impermeabilidad – membranas especiales, a prueba de filtraciones
- Corrosión, precipitantes, taponamientos por finos



Métodos Constructivos

T.D. O'Rourke, 1984

Excavación y manejo del lodo

- Variaciones en las estructuras *in-situ* y dureza de la roca, obstrucciones y cementación en suelos blandos
- Efecto de la mezcla con agua, contaminación, lixiviados

Estabilización del subsuelo

- Estabilidad inherente y tiempo de sostenimiento
- Permeabilidad y adaptabilidad para inyección y congelamiento
- Potencial de fugas en el aire comprimido

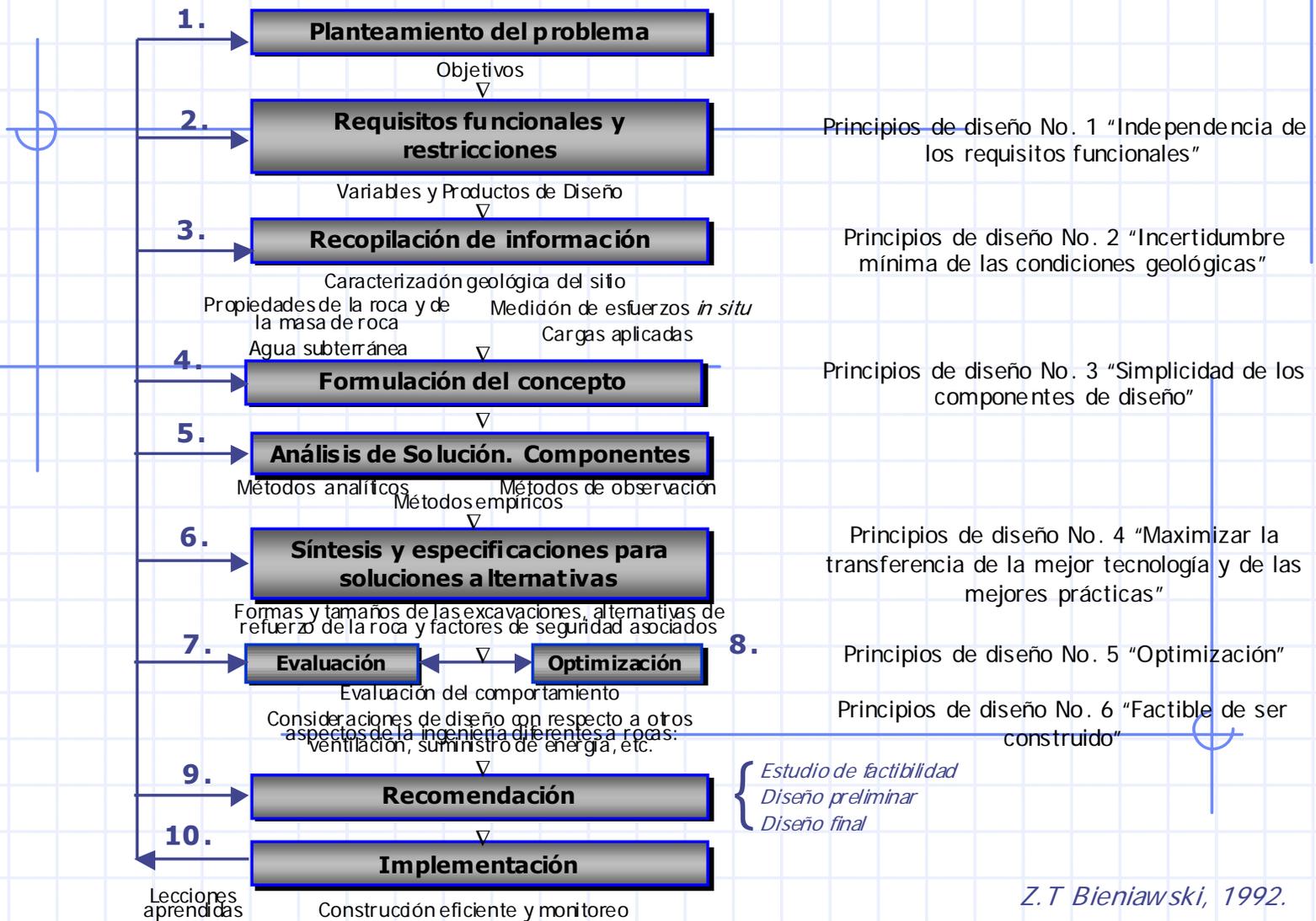
METODOLOGÍA DE DISEÑO EN INGENIERÍA DE ROCAS

Z.T. Bieniawski



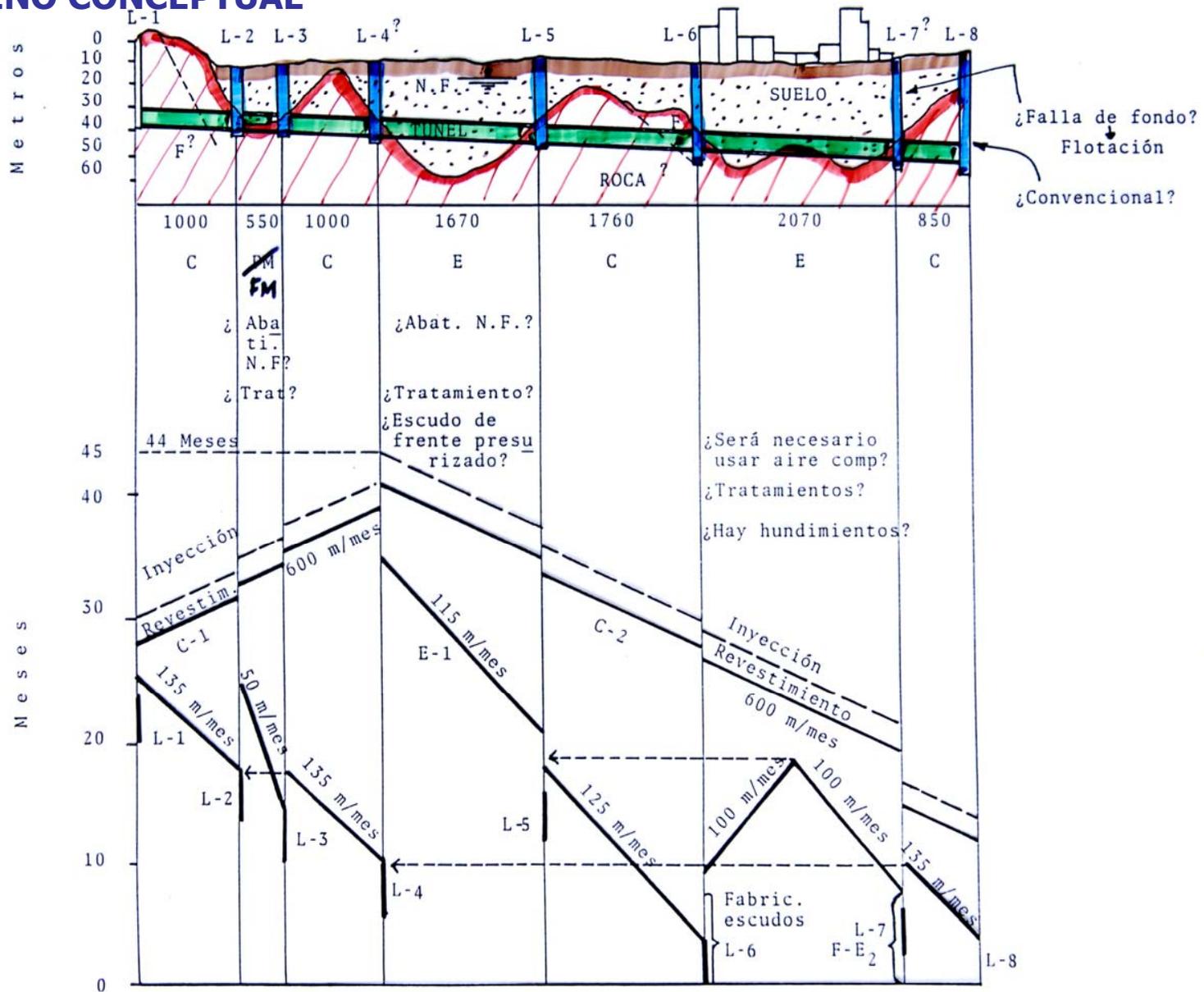


METODOLOGÍA PARA LA INGENIERÍA DE ROCAS





DISEÑO CONCEPTUAL





SISTEMAS DE SOPORTE

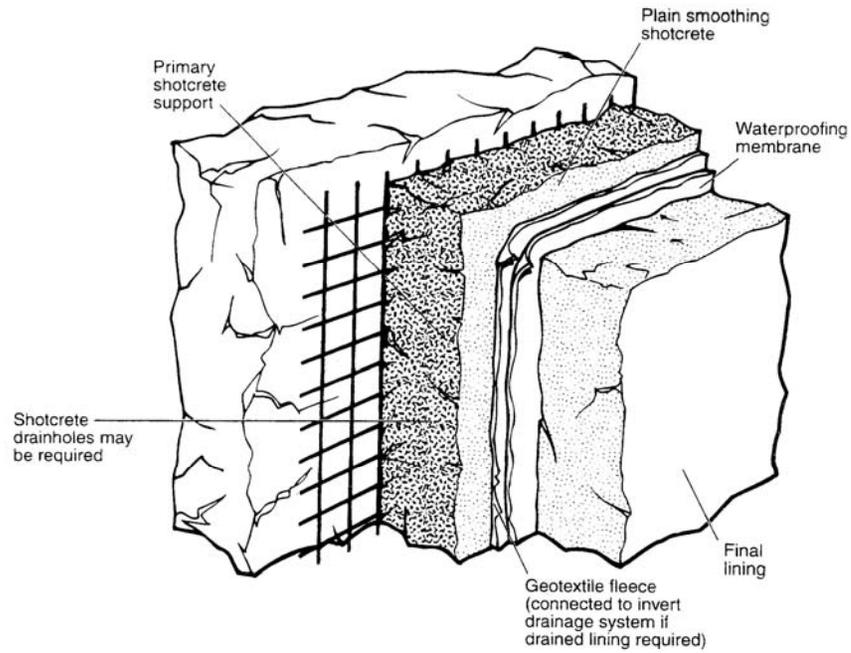
- a. Marcos metálicos y retaque de madera
- b. Anclas con cuña o concha de expansión
inyectadas barras metálicas o varillas de refuerzo
cables de acero
de fibra de vidrio
- c. Concreto lanzado: vía seca con fibras metálicas
 vía húmeda sin fibras plásticas
- d. Charolas metálicas *
- e. Dovelas de concreto * sin y con expansión
 sin y con conectores
 sellos entre segmentos
- f. Revestimiento definitivo de concreto hidráulico + simple ó armado
- g. Tubos de concreto ó metálicos hincados +

* *Requiere inyección de contacto (arena colocada neumáticamente) o*

+ *mezcla estable de inyección agua-cemento.*



CONCRETO LANZADO

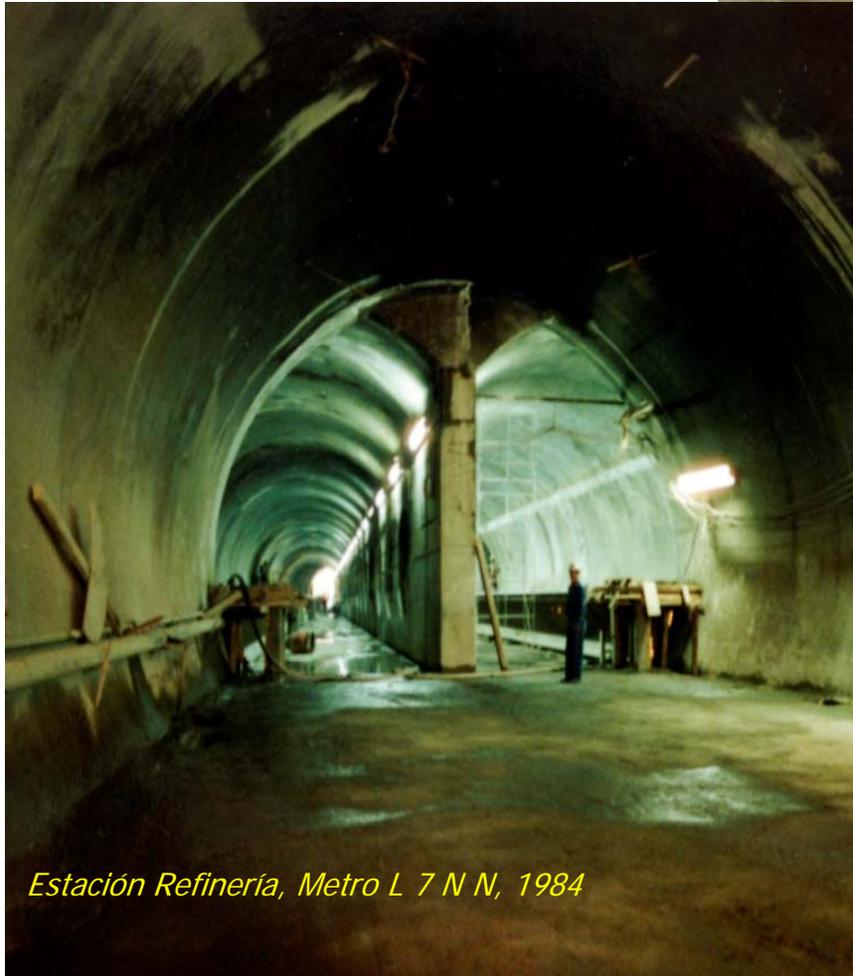


ICE Sprayed concrete linings (NATM) for tunnels in soft ground. 1996.





REVESTIMIENTO DEFINITIVO



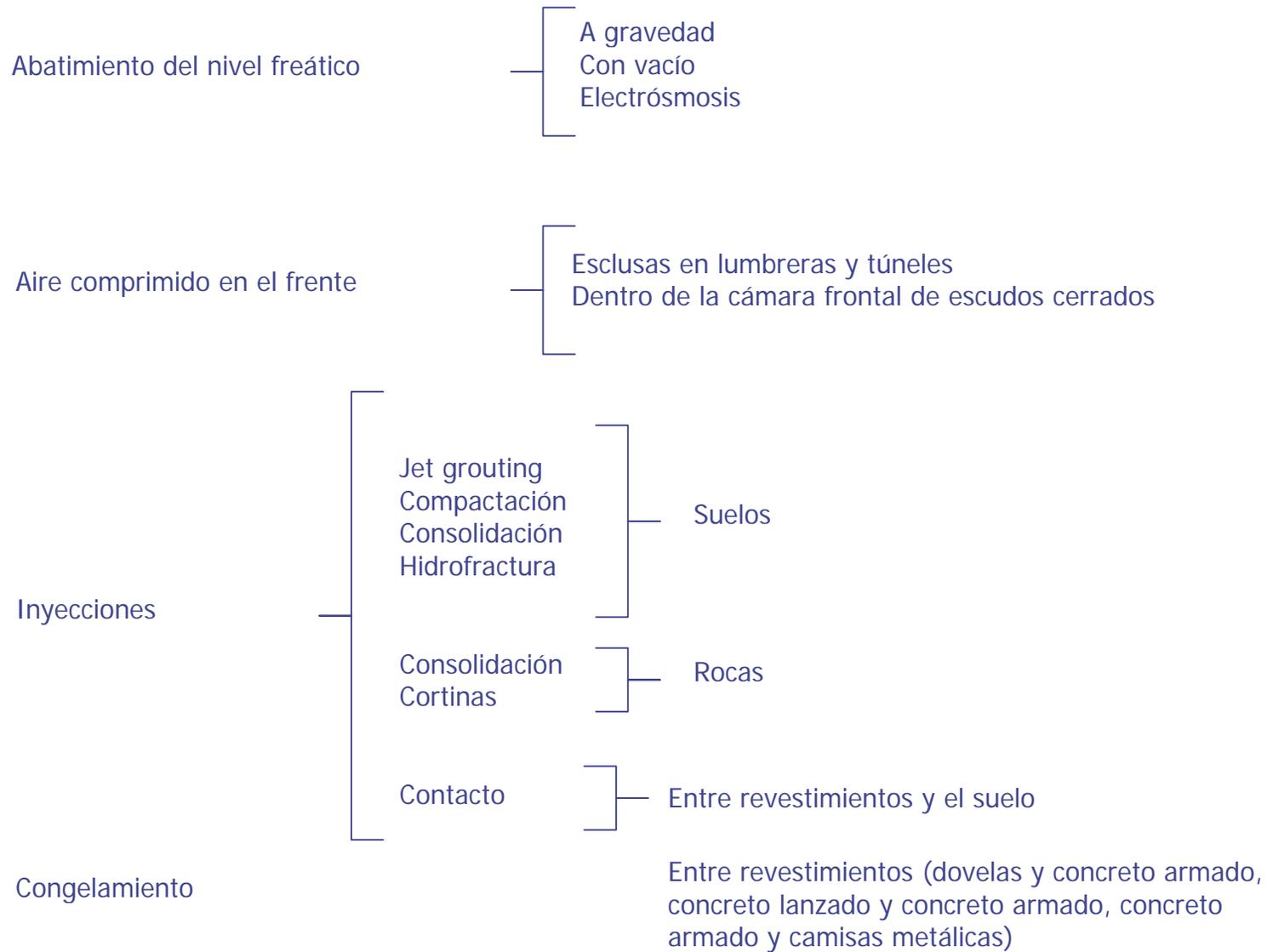
Estación Refinería, Metro L 7 N N, 1984



Drenaje Profundo. Interceptor Oriente, 1974. Carlos Prieto



BOMBEOS, INYECCIONES Y TRATAMIENTOS

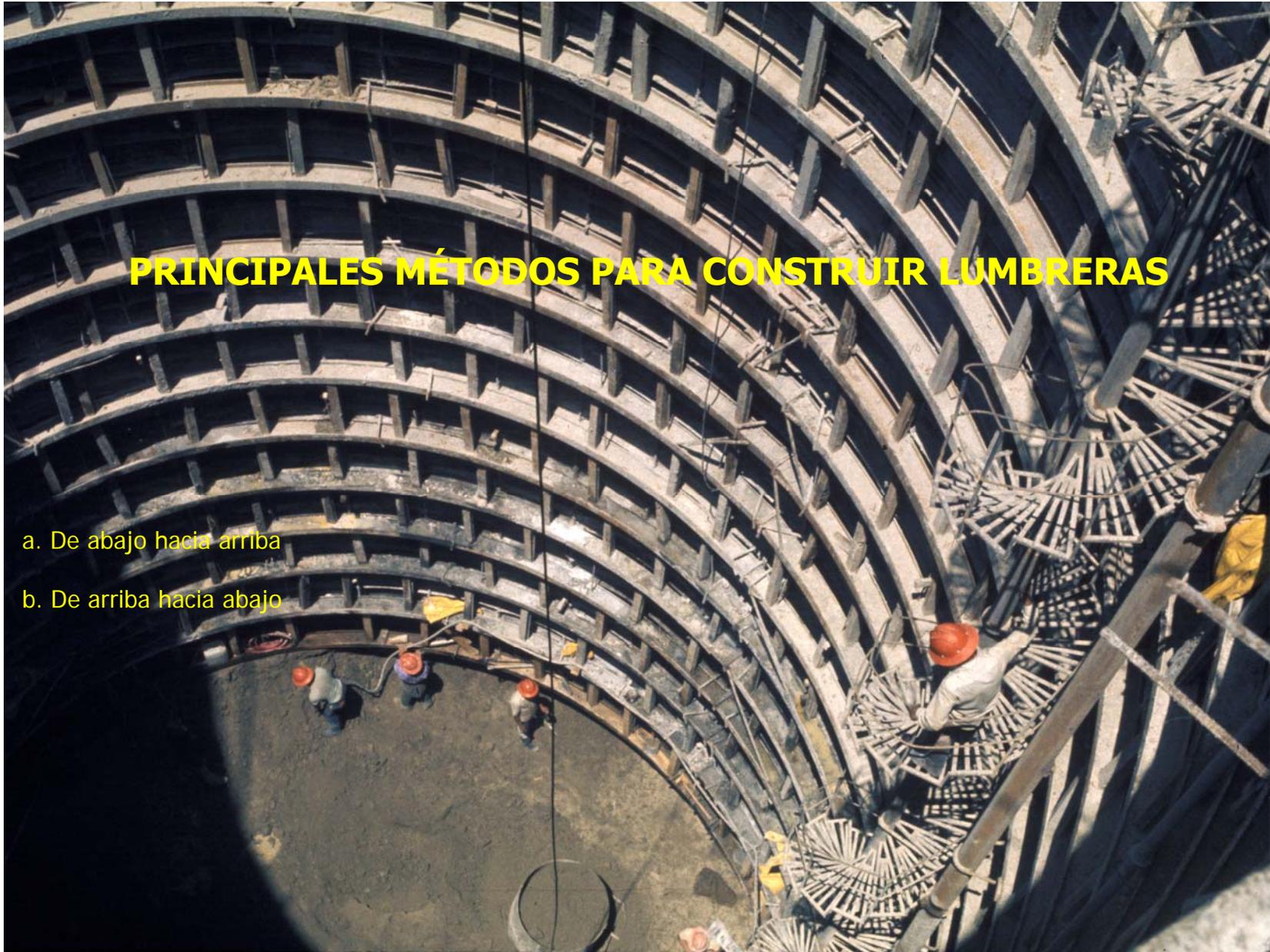


PRINCIPALES MÉTODOS CONSTRUCTIVOS



PRINCIPALES MÉTODOS PARA CONSTRUIR LUMBRERAS

- a. De abajo hacia arriba
- b. De arriba hacia abajo





Suelos

1. Generalmente se ejecutan de arriba hacia abajo.
2. Las lumbreras en suelos pueden tener dos clases de fallas:
Por extrusión o flujo plástico en las paredes y por falla de fondo.
3. Los métodos constructivos serán diseñados teniendo en cuenta esas posibilidades de fallas.

a. En suelos duros

Excavación por partes con:

- Marcos de acero y retaque de madera
- Concreto lanzado
- Con dovelas y/o charolas metálicas

b. En suelos blandos o sueltos

- Tablestacas- Metálicas
 - Concreto
 - Viguetas y madera
 - Muros colados *in situ*
 - Pilotes secantes



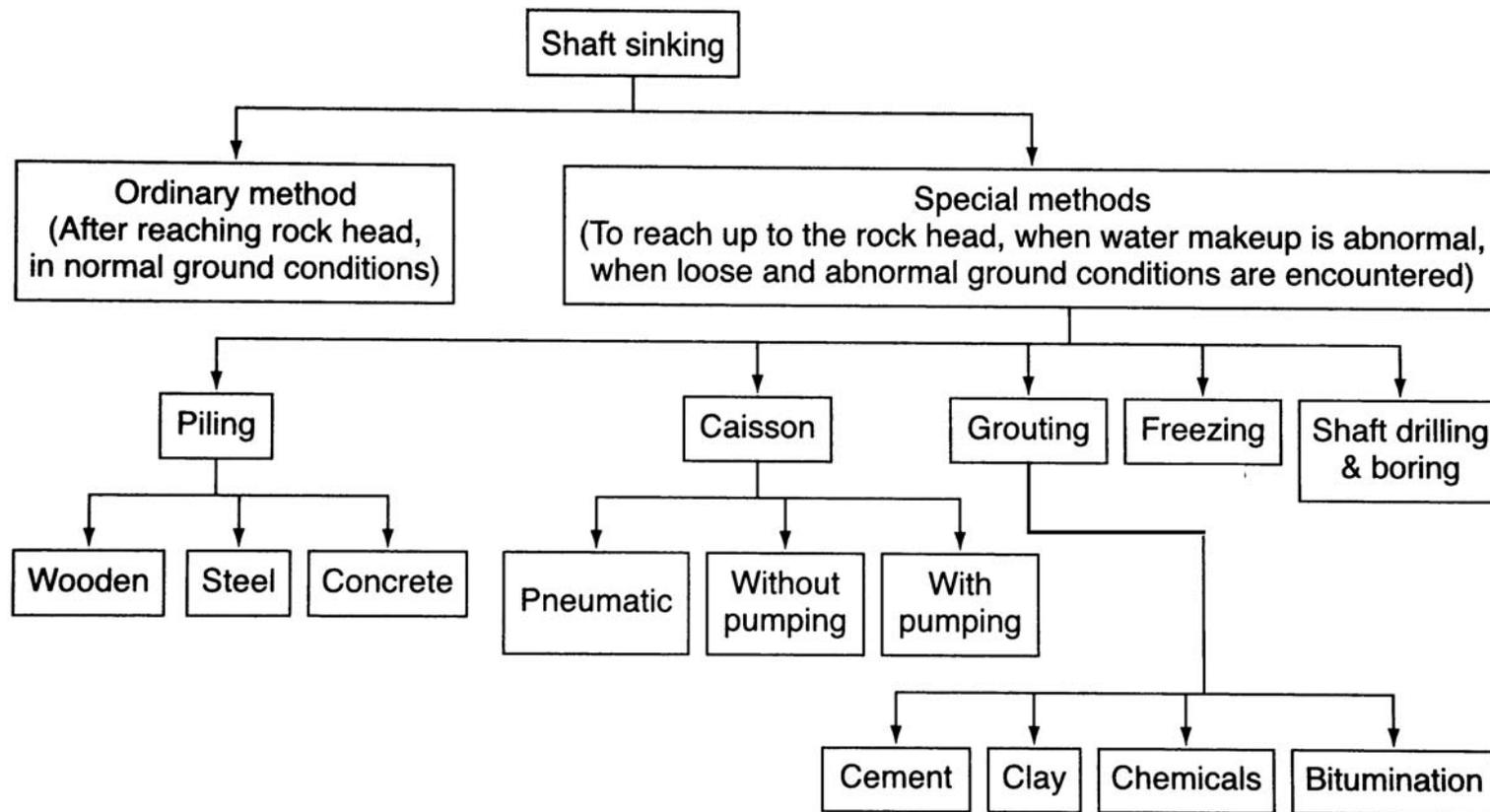
c. En suelos blandos o sueltos

- Inyecciones y tratamientos especiales
- Jet grouting
- Pozo indio o hincadas
- Congelamiento
- Lumbreras de anillos
- Lumbreras flotadas

***Lumbrera flotada.
Conexión con túnel
perforado con escudo***

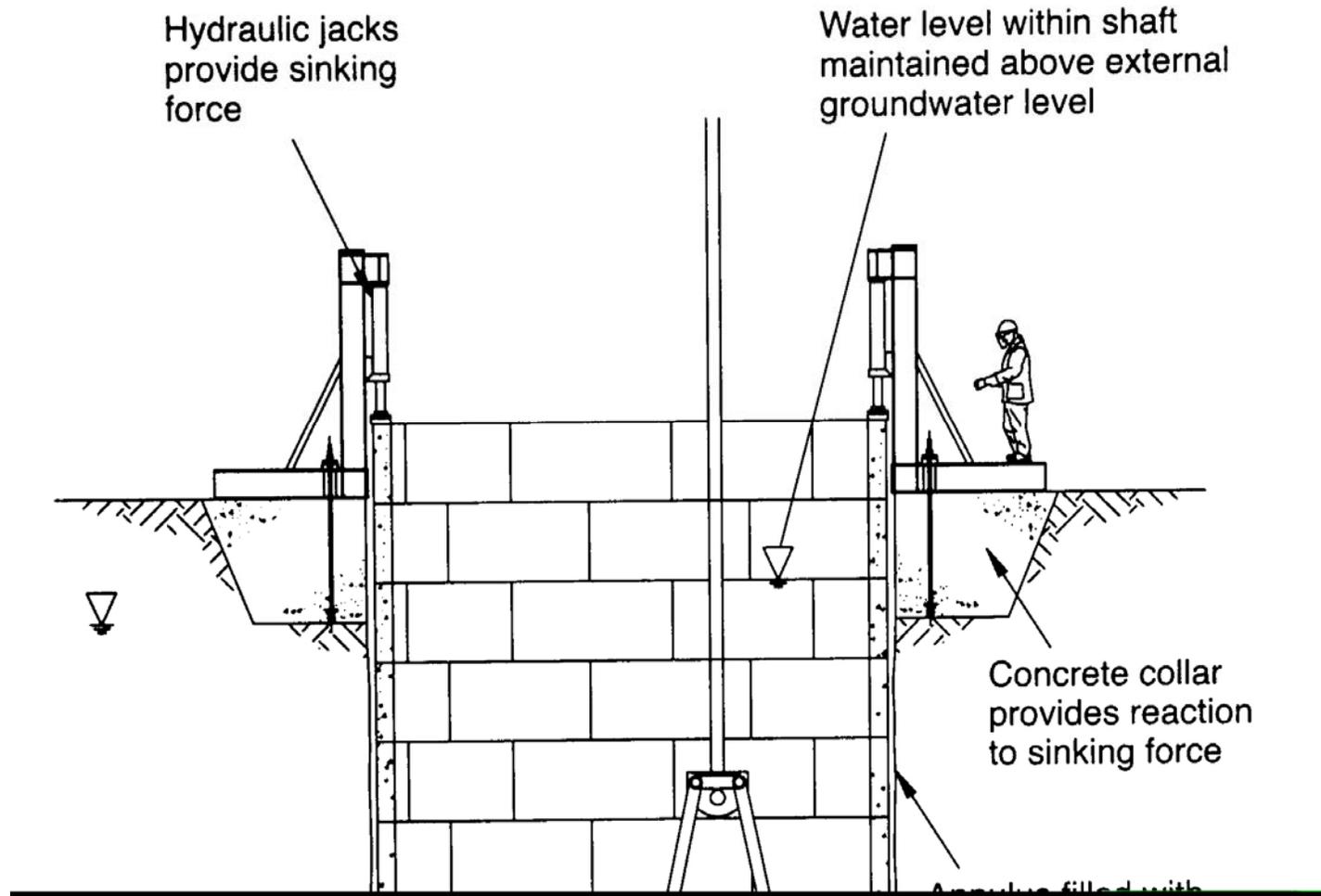


Construcción de Lumbreras en suelos y frentes mixtos



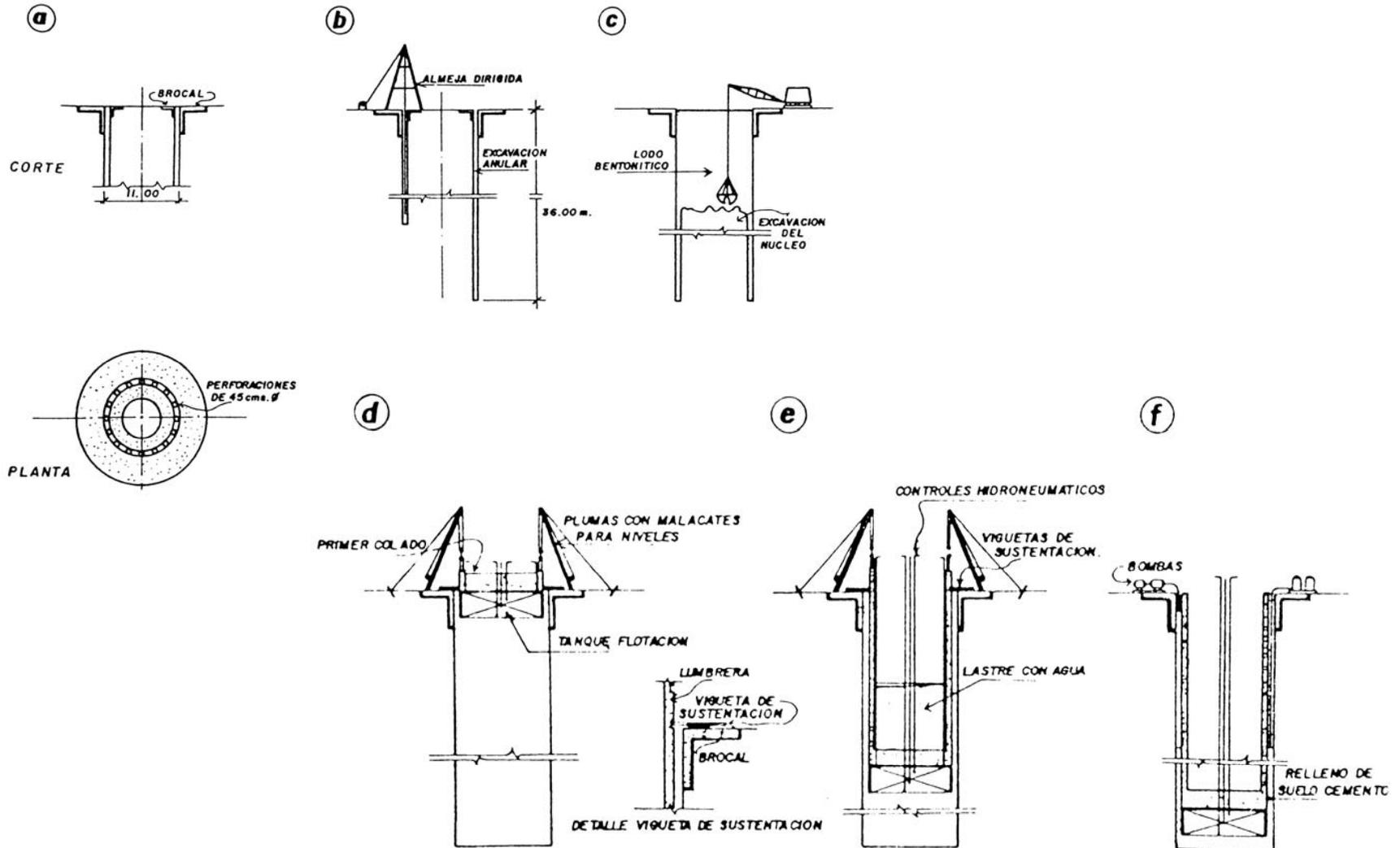
Shaft-sinking methods/techniques

Construcción de Lumbreras en suelos granulares



British Tunnelling Society, 2004. Ref. No. 38.

Construcción de Lumbreras Flotadas en suelos blandos

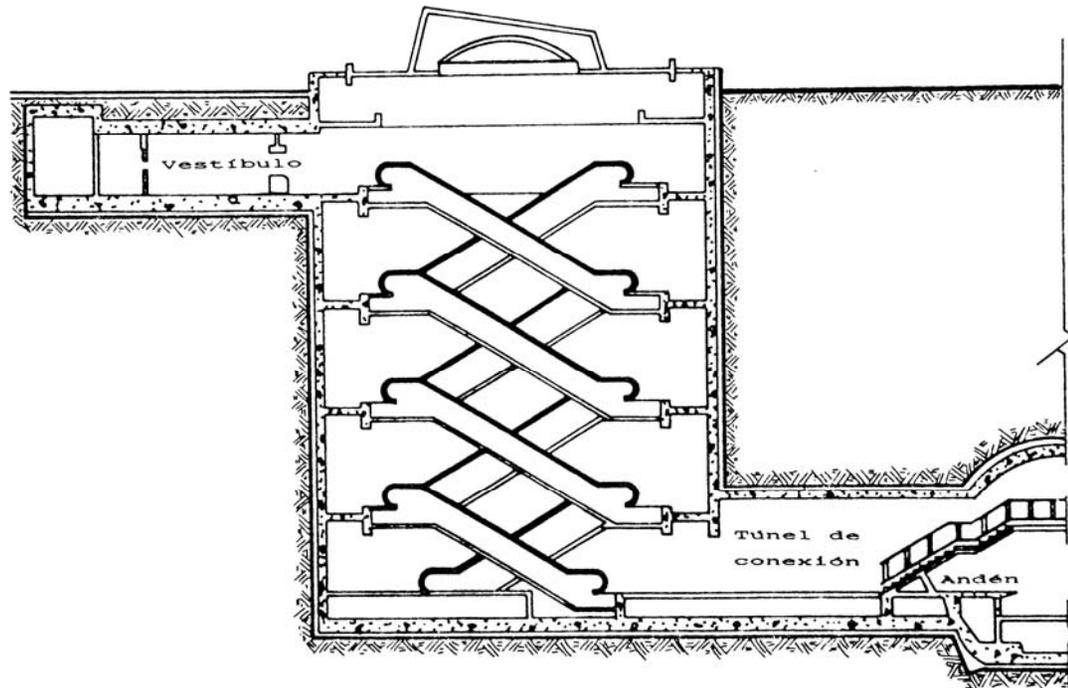
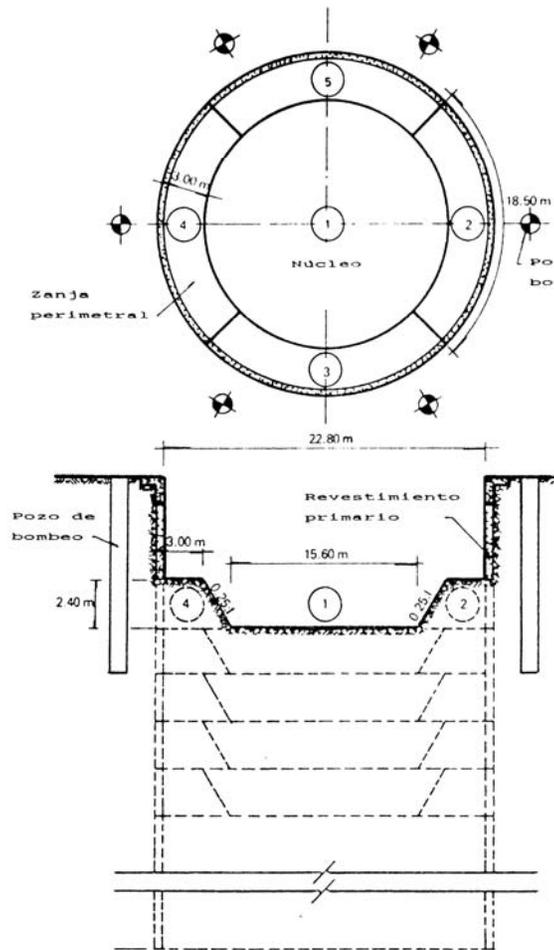


A. Moreno, 1988. Ref. No. 14.

En Suelos Blandos: lumbreras flotadas

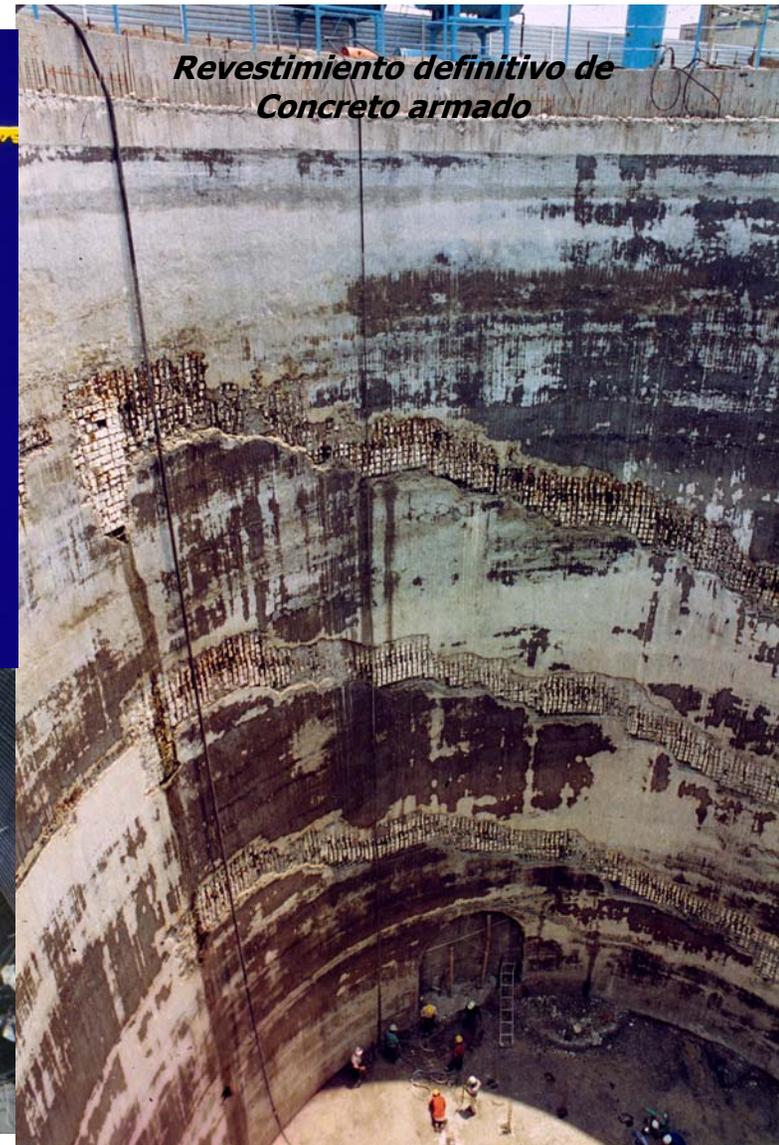
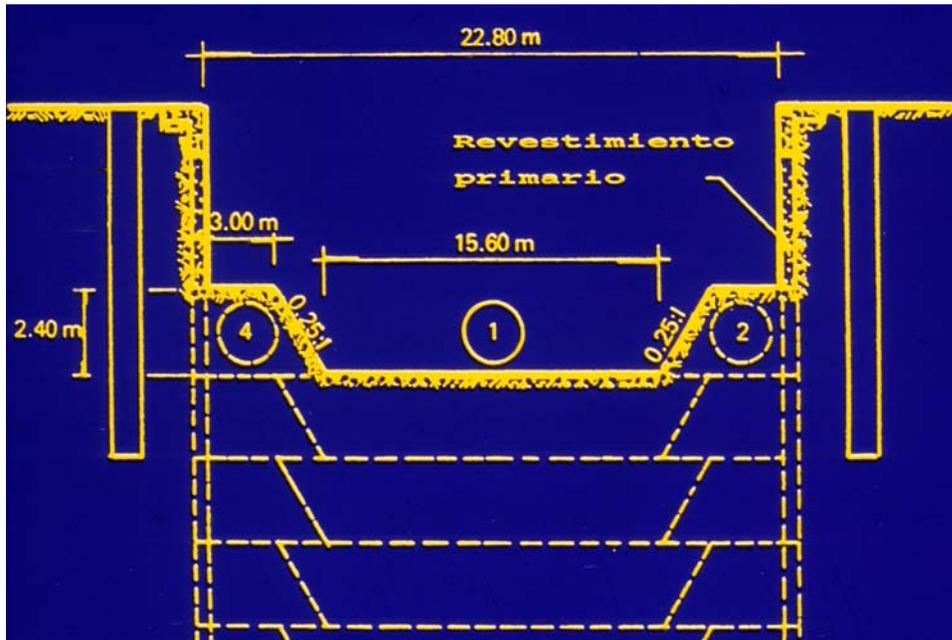


Construcción de Lumbreras en suelos duros



A. Moreno, 1991. AI.

En Suelos Duros





Lumbreras en Roca

Se pueden construir de arriba-abajo o de abajo hacia arriba.

1. Para perforar, de arriba-abajo, son las estructuras más complicadas, hay que trabajar contra la gravedad y contra el nivel freático.
2. Para perforar de abajo hacia arriba, para tener acceso a horizontes inferiores, por ejemplo en los desarrollos mineros, o en los proyectos hidroeléctricos en las ramas a presión, o lumbreras de cables y/o de ventilación.
3. La excavación puede hacerse con:
 - a. Ayuda de explosivos
 - b. Por medios mecánicos
 - c. Por combinación de los anteriores





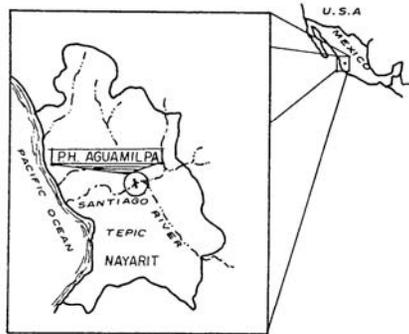
Roca

4. En las lumbreras de pequeño diámetro, menor de 6.0 m, generalmente se utilizan las máquinas llamadas contrapoceras, cuyos diámetros pueden variar entre 0.6 y 6.0 m. Se pueden hacer de arriba hacia abajo y viceversa. La manera más eficiente, es barrenar de arriba hacia abajo al túnel o caverna por conectar y hacer la ampliación de abajo hacia arriba con la contrapocera.

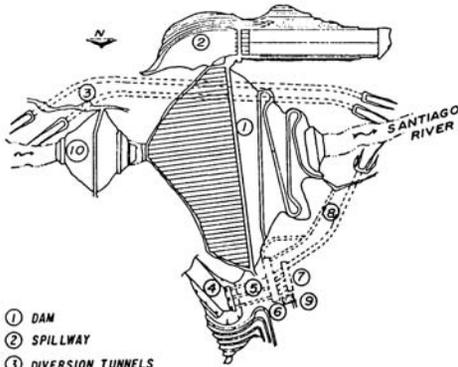
5. En lumbreras de gran diámetro, mayor de 6.0 m, se pueden utilizar métodos convencionales y/o uso combinado de contrapoceras con ampliación o topes integrales.

6. Los revestimientos en las lumbreras dependen de:
 - Calidad de la roca y de las solicitaciones de carga
 - Del uso de la lumbrera (los conductos a presión en ocasiones llevan concreto hidráulico, anclas y camisa de acero)
 - Del nivel freático

Construcción de Lumbreras en rocas



Aguamilpa hidroelectric project location

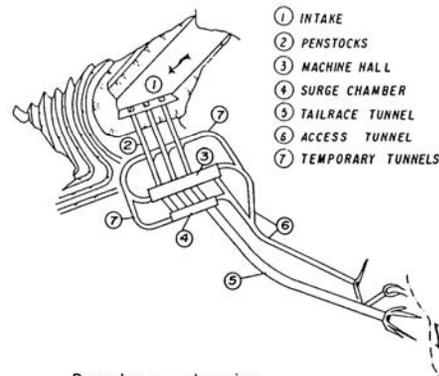


- ① DAM
- ② SPILLWAY
- ③ DIVERSION TUNNELS
- ④ INTAKE
- ⑤ PENSTOCKS
- ⑥ MACHINE HALL
- ⑦ SURGE CHAMBER
- ⑧ TAILRACE
- ⑨ SWITCHYARD
- ⑩ UPSTREAM COFFERDAM

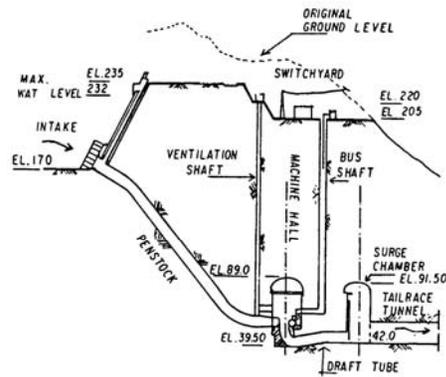
Aguamilpa hidroelectric project-plan view

PROJECT ORGANIZATION

To carry out the challenging task of constructing this vast hidroelectric project



Powerhouse - plan view



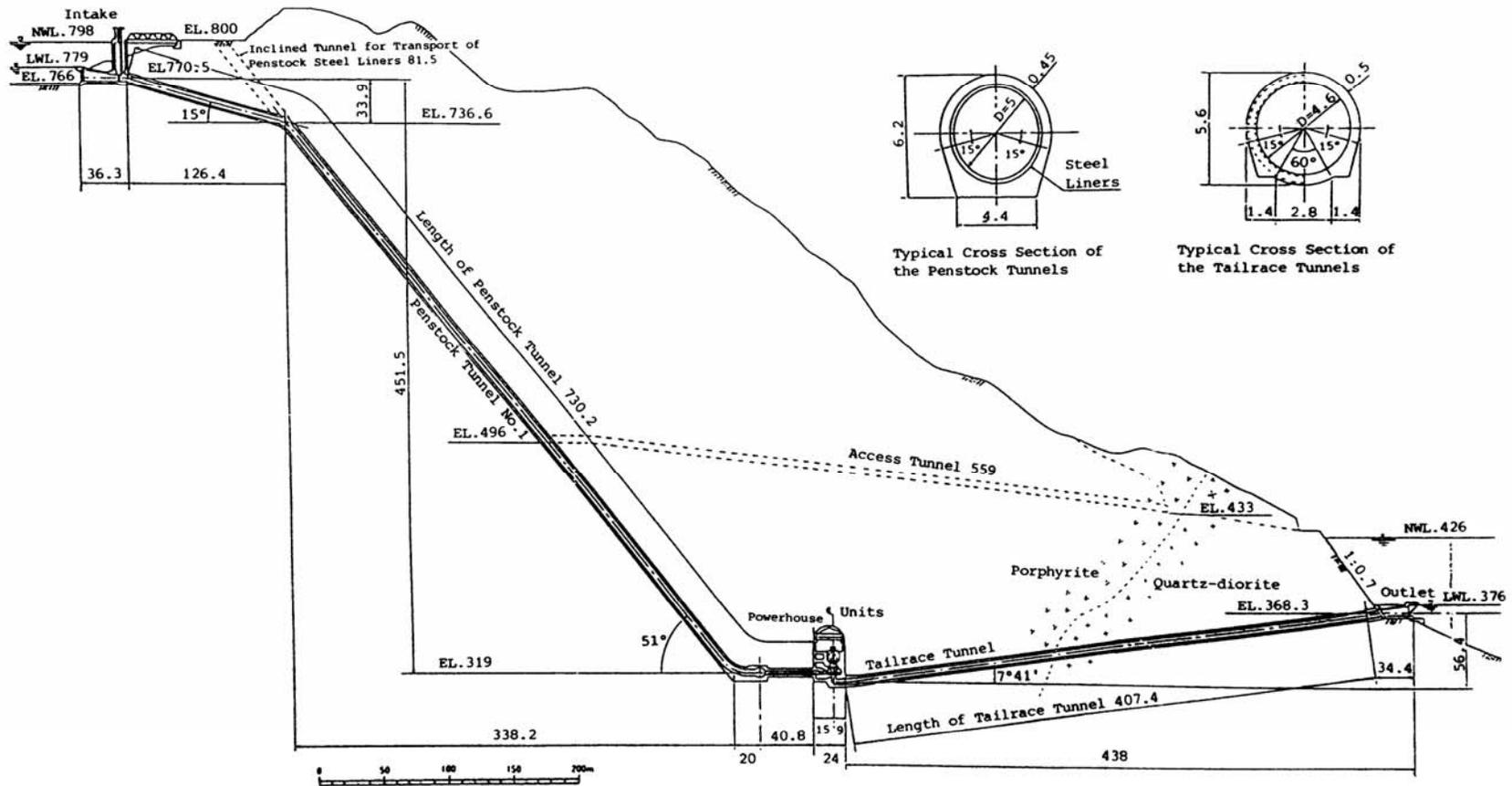
Aguamilpa powerhouse





Construcción de Ramas inclinadas en rocas

F. Méndez, 1992. Ref. No. 18

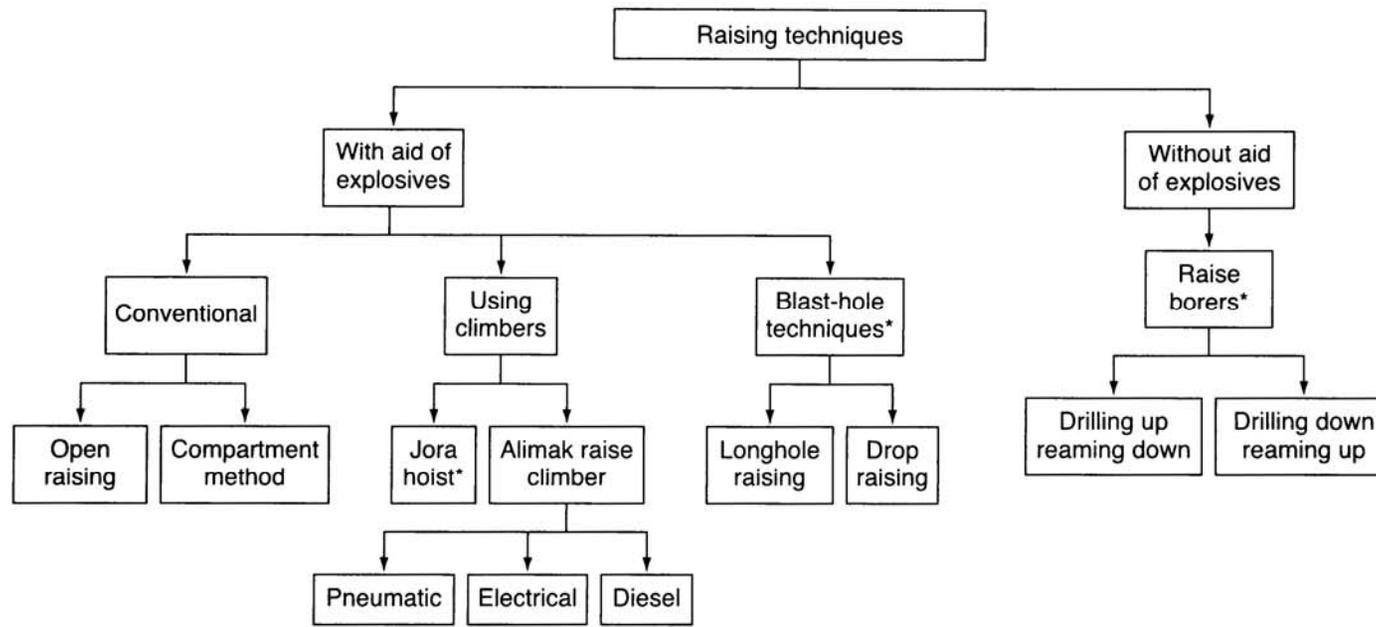


Section on center line of waterways

Ohkawachi Underground Power Plant. (Pumped storage type electric power generating station) JAPAN.

T. Fukuola, 1992.

Construcción de Lumbreras en rocas

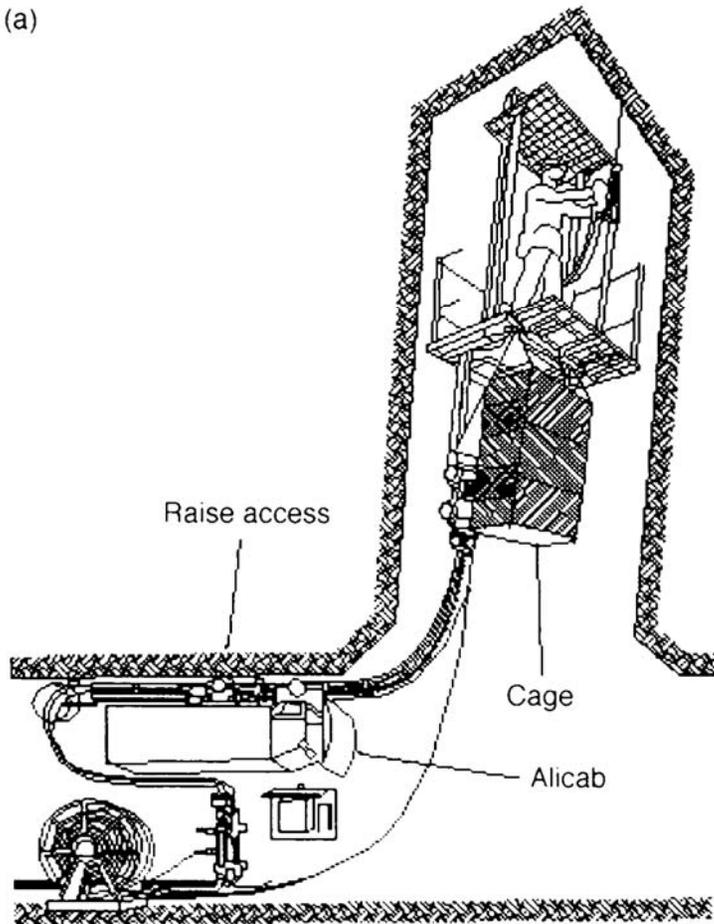


*Two levels/horizons must be available

Classification of vertical/steeply inclined raise driving techniques based on the rock fragmentation mechanism and availability of access to the intended raise site at the time of its drivage

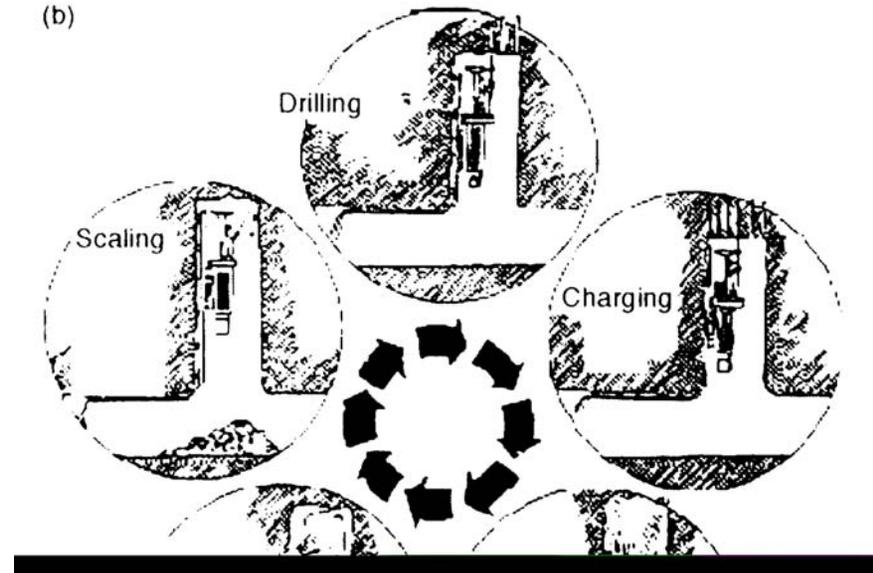
Construcción de Lumbreras en rocas

(a)

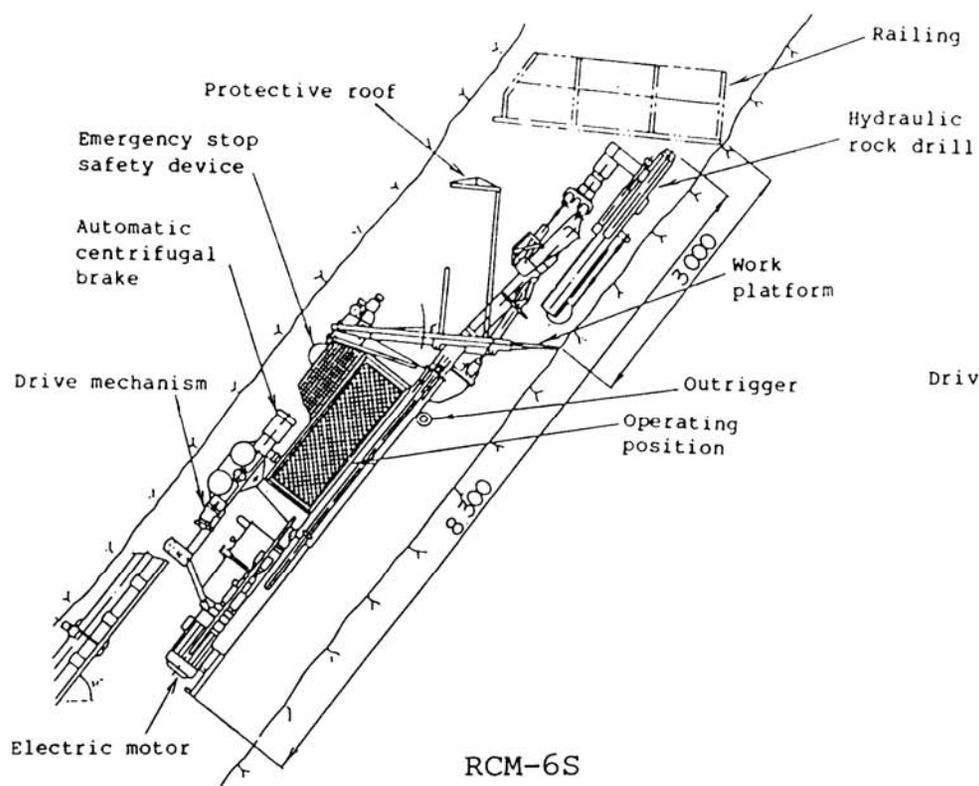


Alimak raise climber

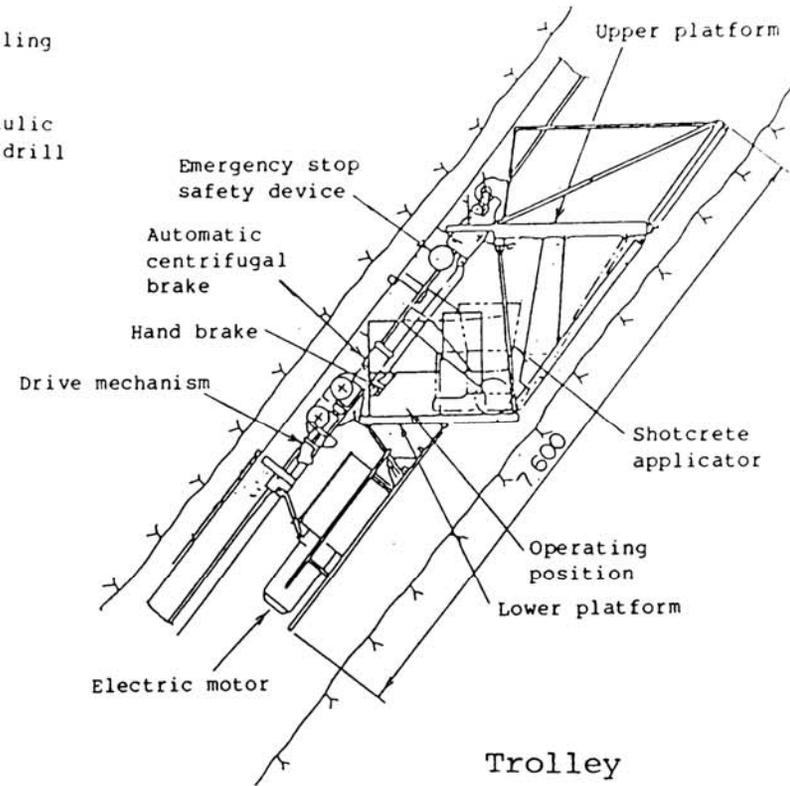
(b)



Construcción de Lumbreras en rocas

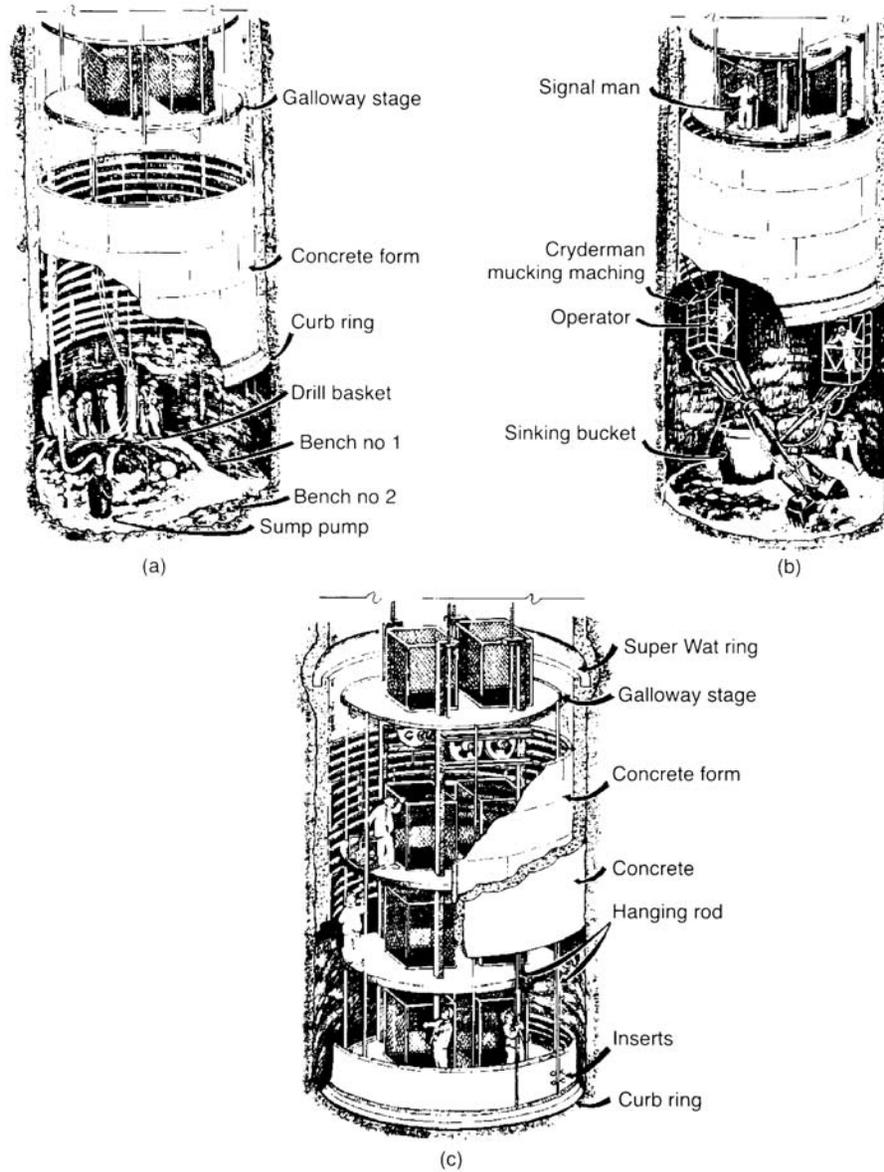


New climber



Trolley

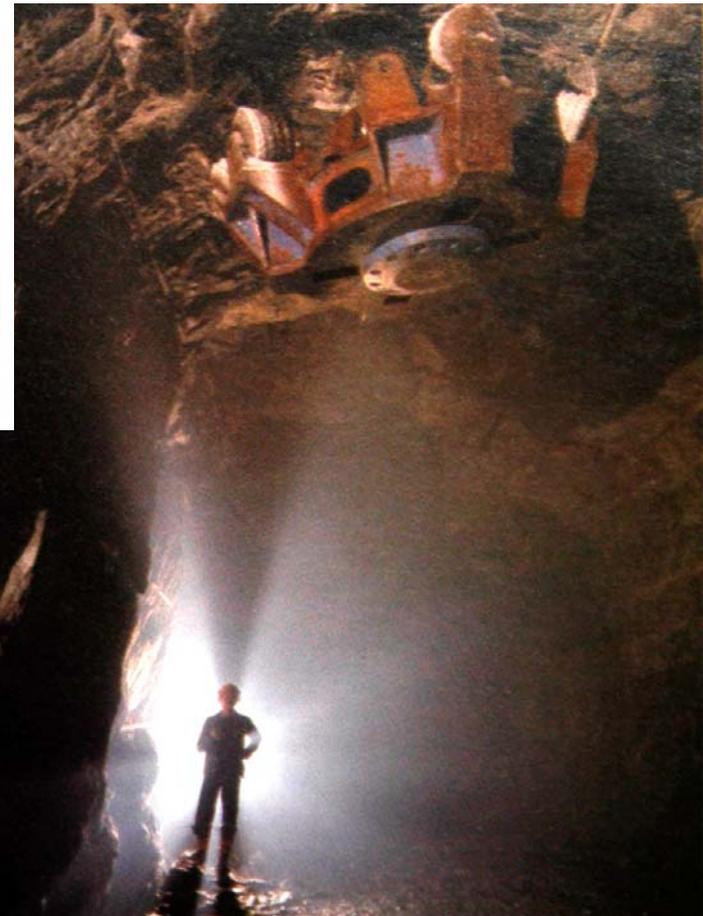
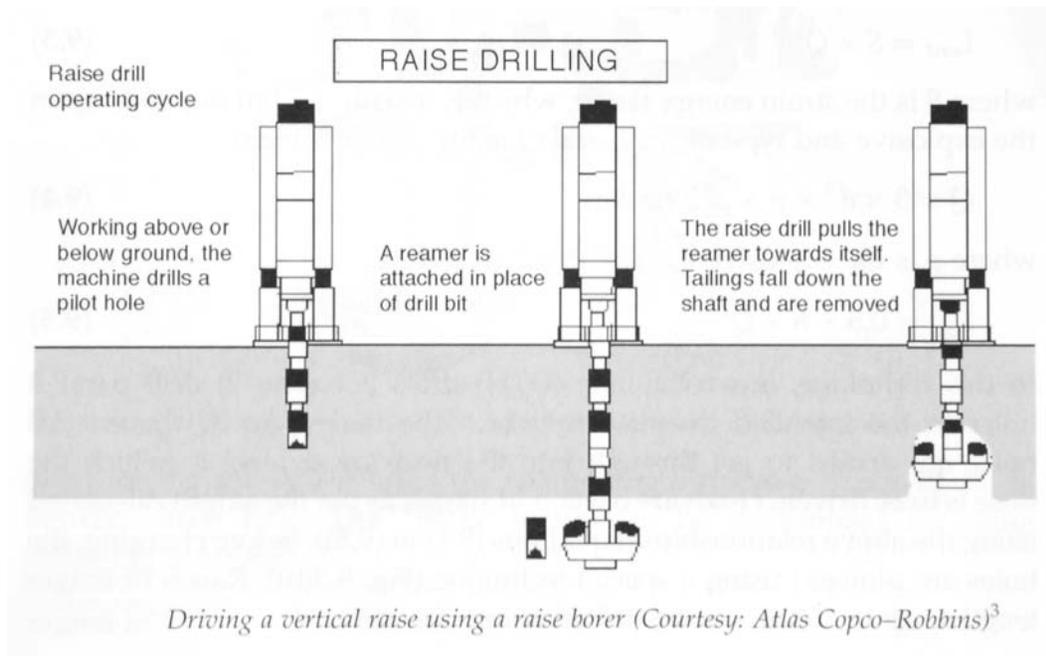
Construcción de Lumbreras en rocas



R. Tatiya, 2005. Ref. No. 39.

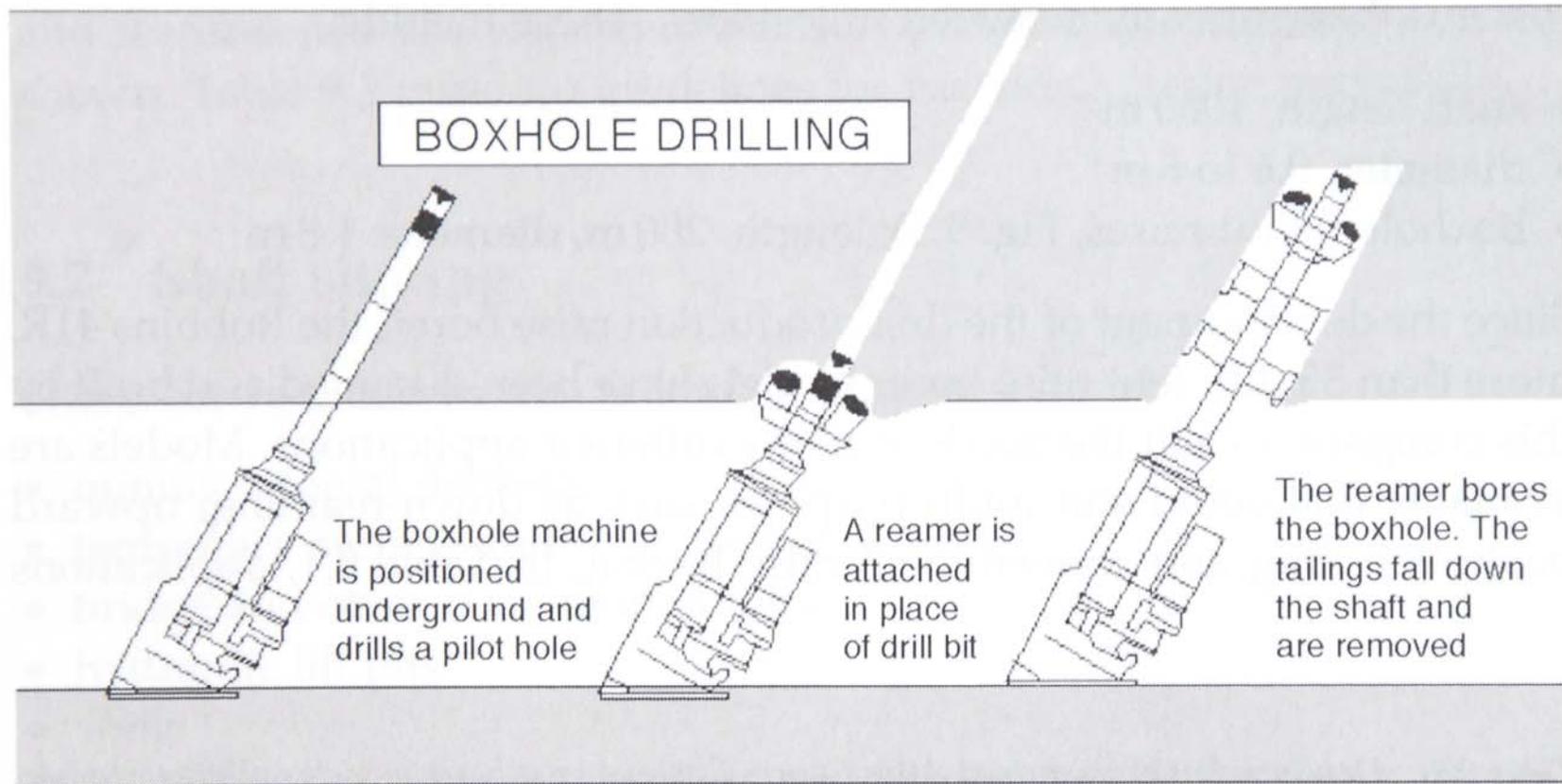
(a) Drilling using benching technique;³ (b) mucking using a Cryderman mucker; (c) supporting using concrete. Note arrangements made

Construcción de Lumbreras en rocas



R. Tatiya, 2005. Ref. No. 39.

Construcción de Lumbreras en rocas



Driving inclined raise (boxhole) using a raise borer (Courtesy: Atlas Copco–Robbins)³

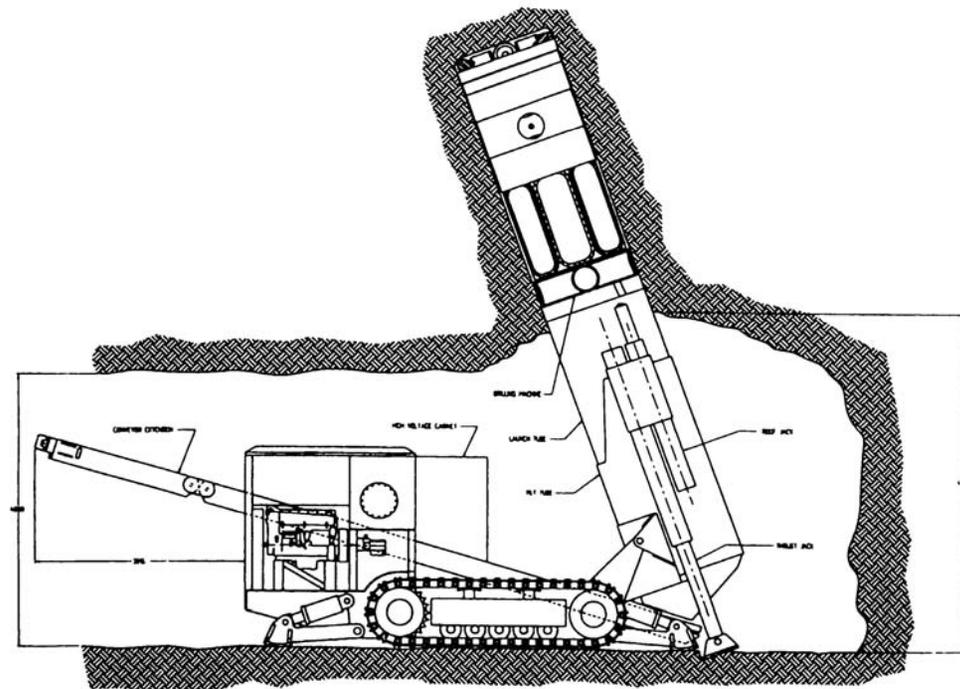


Construcción de Lumbreras en rocas

Model **BorPak 1500**

Specifications

Diameter	1.5 m (4.92 ft)
Cutters	Carbide disc cutters
Cutterhead RPM	18 @ 60 Hz, 15 @ 50 Hz
Maximum Thrust	2500 kN (560,000 lbs)
Boring Torque	84,000 Nm (62,000 ft-lb) @ 60 Hz 101,000 Nm (74,000 ft-lb) @ 50 Hz
Boring Stroke	0.5 m (1.64 ft)
Power, Rotation	156 kW (210 HP)
Power, Hydraulic pump	30 kW (40 HP)
Machine size (tramping)	L 7.5 x W 2.5 x H 3.0 m (24.6 x 8.2 x 9.8 ft)
Weight, total	58,000 kg (128,000 lbs)
carrier	35,000 kg (77,000 lbs)
boring machine	23,000 kg (51,000 lbs)
Min. collaring height	5.0 m (16.4 ft) at vertical boring



R. Tatiya, 2005. Ref. No. 39.



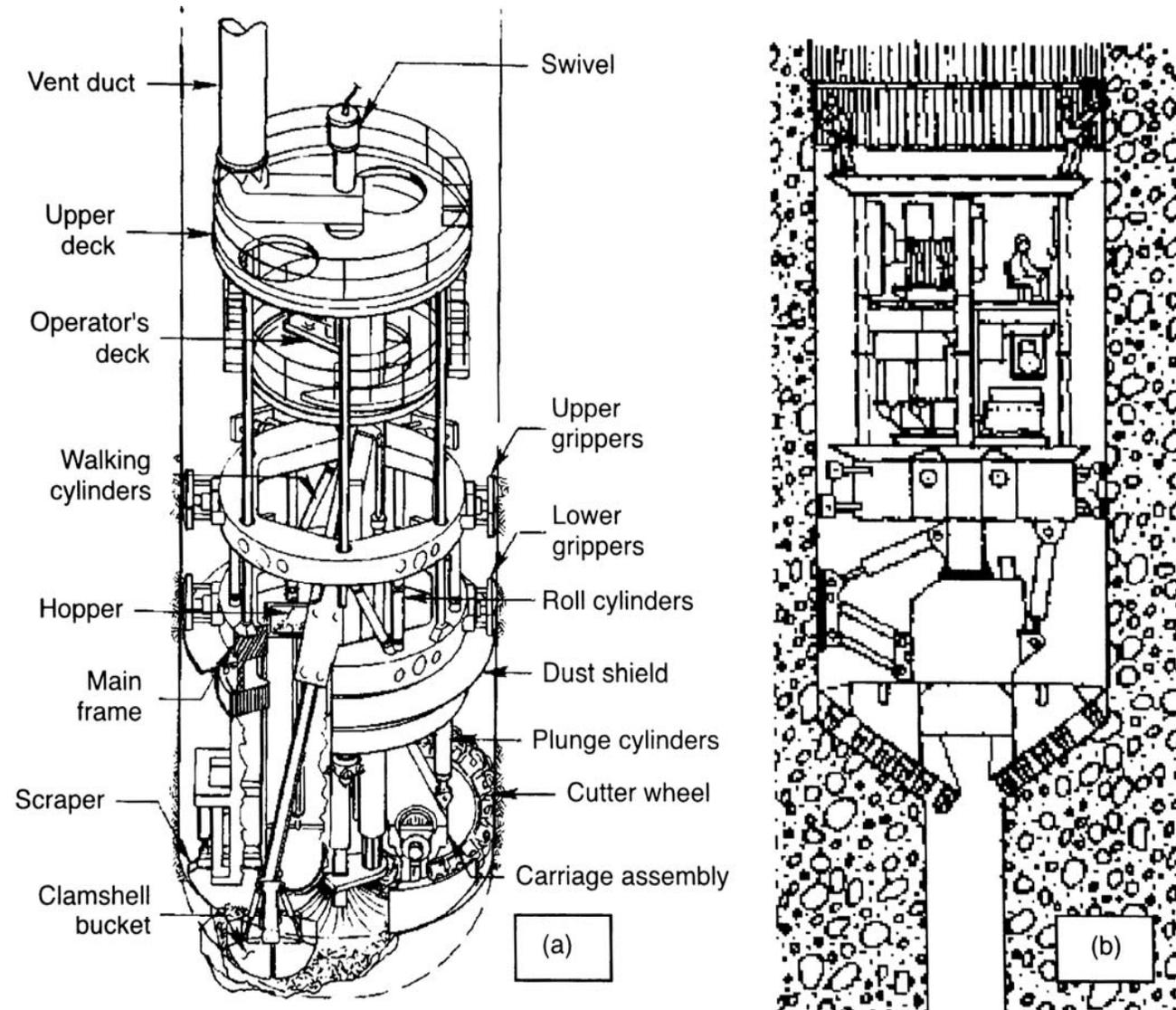
Construcción de Lumbreras con "Contrapoceras"

Development of important Atlas Copco–Robbins raise borer models with their important features

Robbins models	Diameter		Depth		Features	Applications
	Nominal: m	Range: m	Nominal: m	Max: m		
34RH	1.2	0.6–1.5	340	610	Low profile, small diameter raise drill	Slot raises, backfilling and narrow-vein mining
44RH	1.5	1.0–1.8	250	610	Small diameter raise drill with higher torque and thrust	Smaller diameter raises
53RH	1.8	1.2–2.4	490	650	Low profile and medium-size diameter raise drill	Boring ore passes and ventilation shafts
73RM	2.4	1.8–3.1	490	650	Any raise boring application. Fig. 9.6	Raises ranging from 1.8 to 3.1 m in diameter
83RM	4.0	2.4–5.0	500	1010	Large diameter and high torque raise drill	Reaming shafts and raises from 2.4 up to 5.0 m in diameter
97RL	4.0	2.4–5.0	600	1010	A high power and low profile raise drill	For mines and civil sites with size and weight restrictions
123RM	5.0	3.1–6.0	920	1100	Most powerful raise-boring machine available in the Atlas Copco–Robbins Raise Boring series	Very large diameter raises, ranging from 3.1 up to 6.0 m

R. Tatiya, 2005. Ref. No. 39.

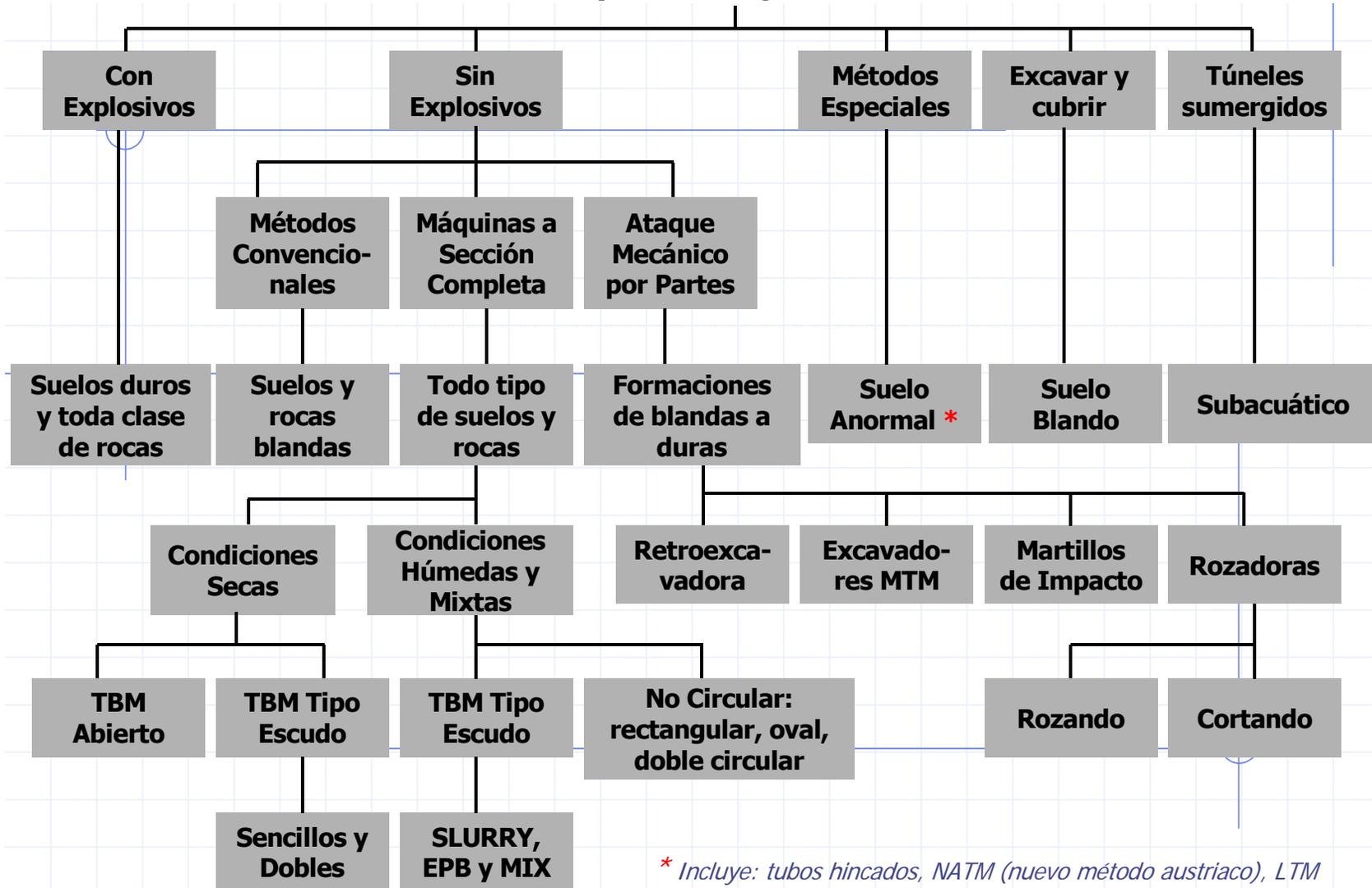
Construcción de Lumbreras en rocas



R. Tatiya, 2005. Ref. No. 39.

Shaft boring using: (a) an SBM; (b) a 'V' mole¹¹

Técnicas y Métodos para Tunelear

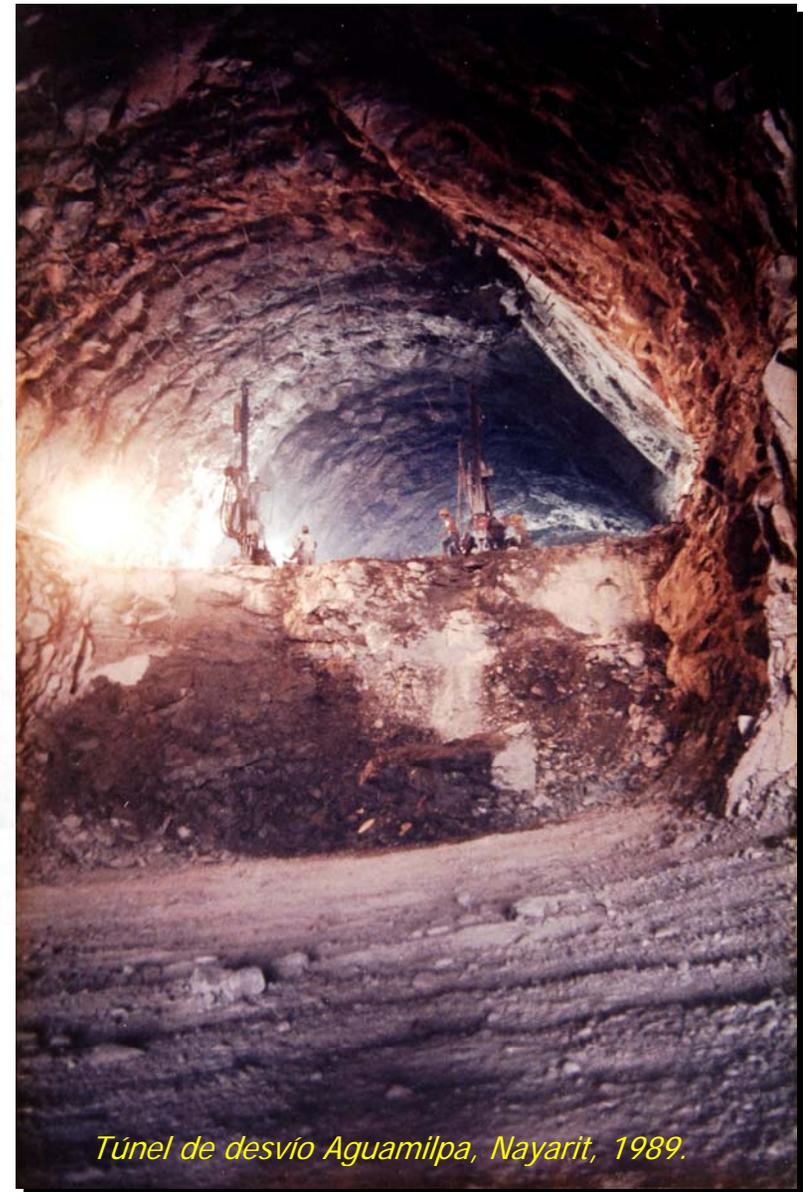
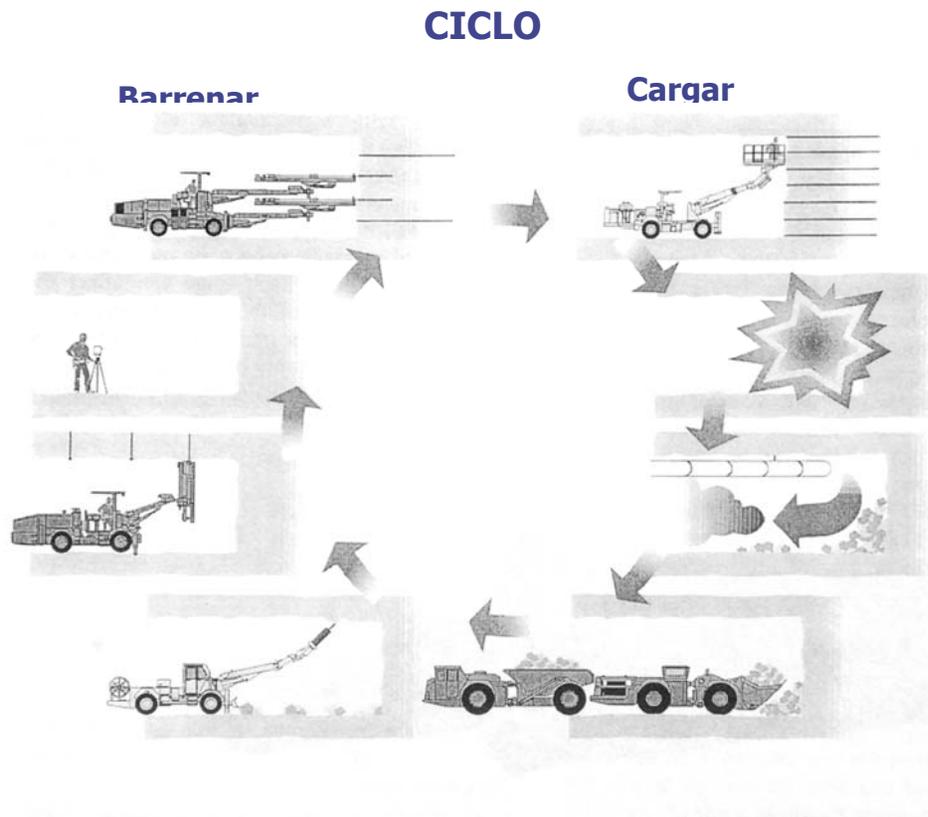


* Incluye: tubos hincados, NATM (nuevo método austriaco), LTM (método LEE), MTM (minero multiherramienta), ADECO-RS (Analysis of controlled deformations in rock and soils), minitúneles, etc.

R. Tatiya, 2005. Ref. No. 39.

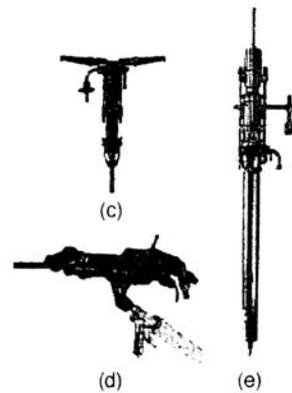
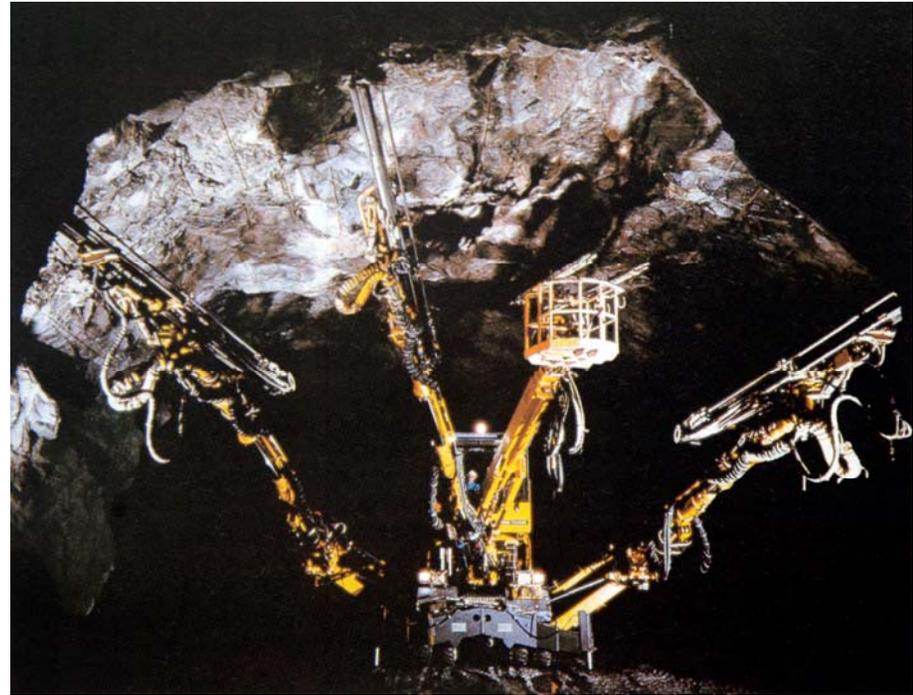
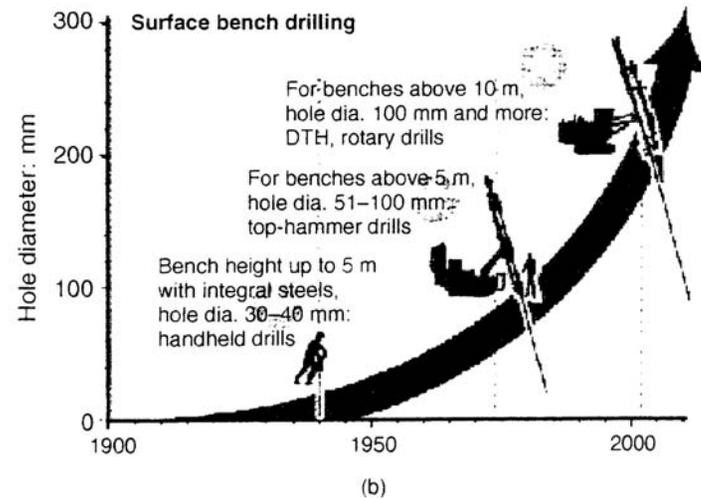
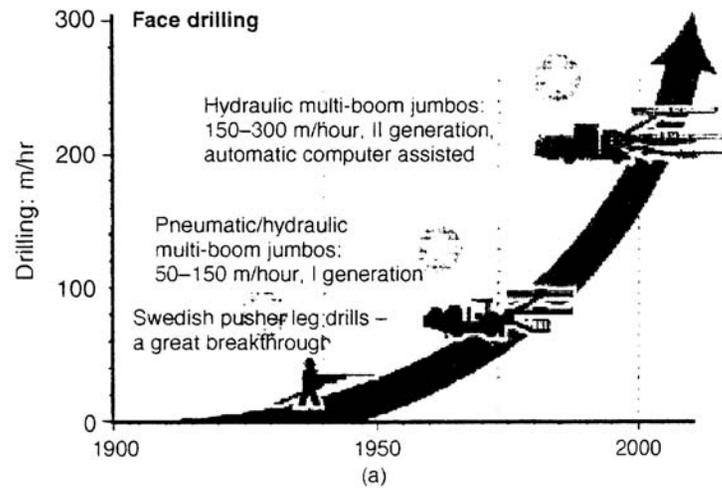


MÉTODO CONVENCIONAL CON EXPLOSIVOS y ANCLAS



Túnel de desvío Aguamilpa, Nayarit, 1989.

AVANCES EN LA TECNOLOGÍA DE BARRENACIÓN EN ROCA



R. Tatiya. Civil Excavations and Tunneling, 2005

Escudo Abierto y Excavación con Rompedoras



Escudo Túnel Tacubaya y Revestimiento Único, 1970. AMF.



Técnicas y Métodos Constructivos



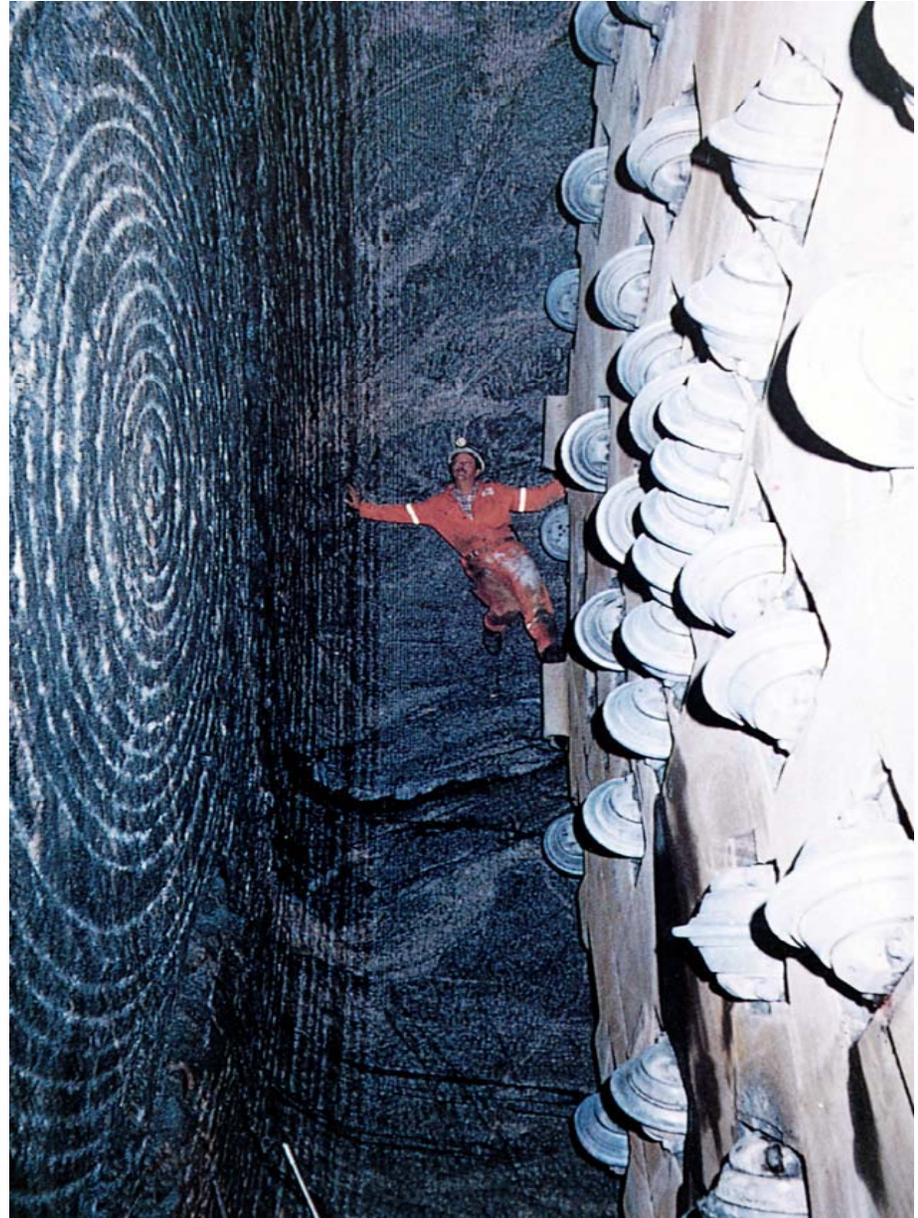
TBM ABIERTO PARA ROCA DURA.

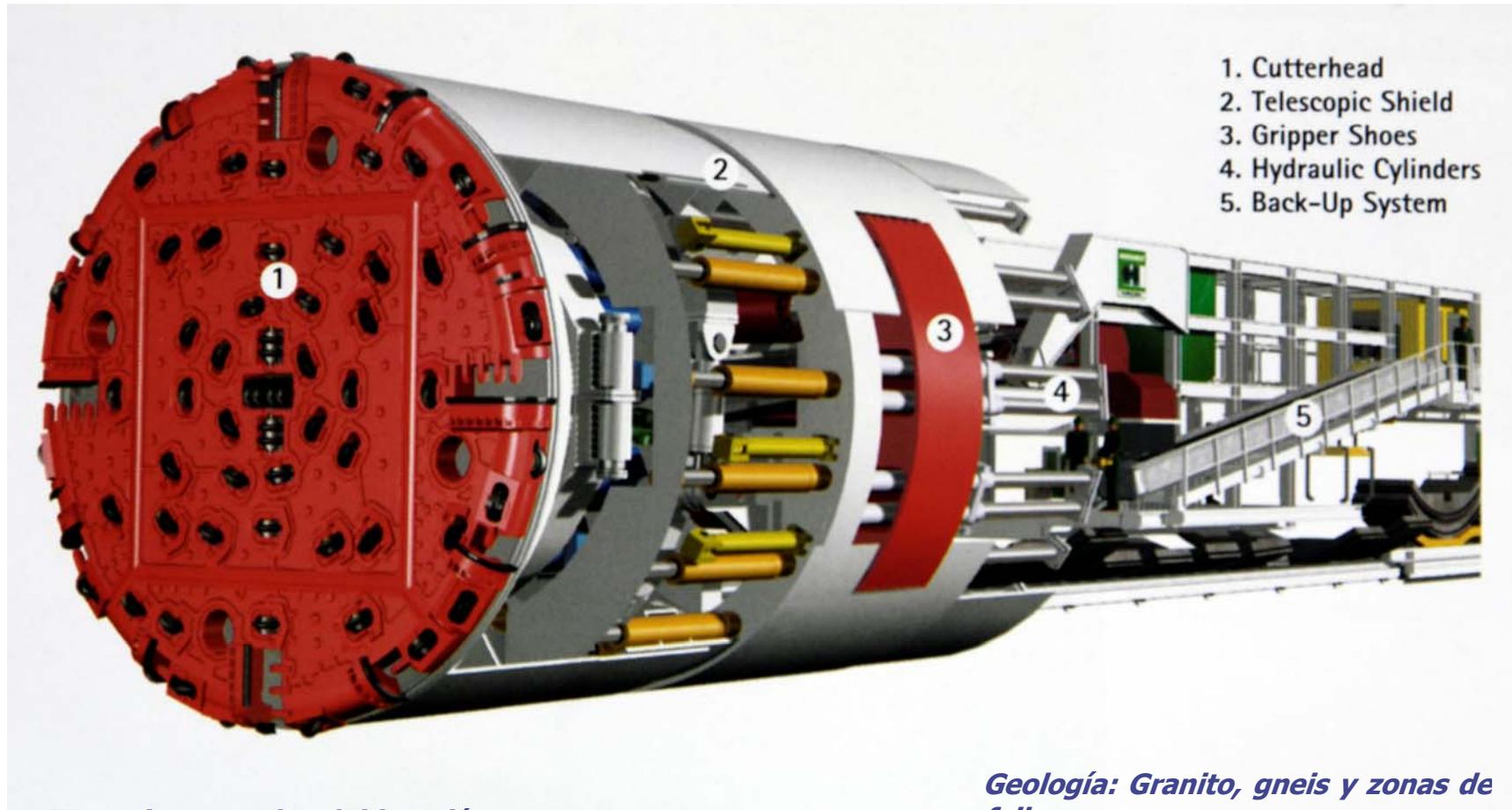
HERRENKNECHT news, 2003



Técnicas y Métodos Constructivos

TBM ABIERTO PARA ROCA DURA.

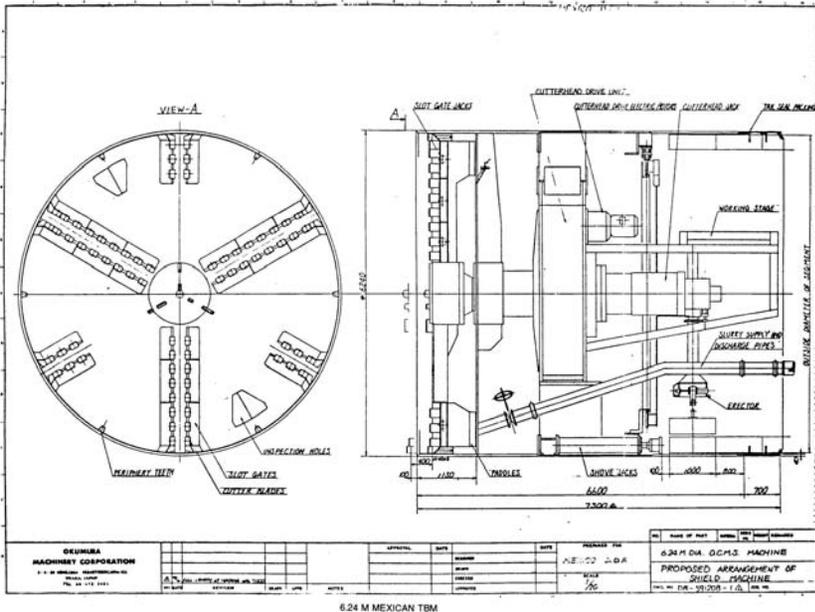




TBM, tipo escudo, doble. Diámetro 9.51 m. Túnel Ferrocarrilero en la Sierra de Guadarrama, España.

HERRENKNECHT news, 2003

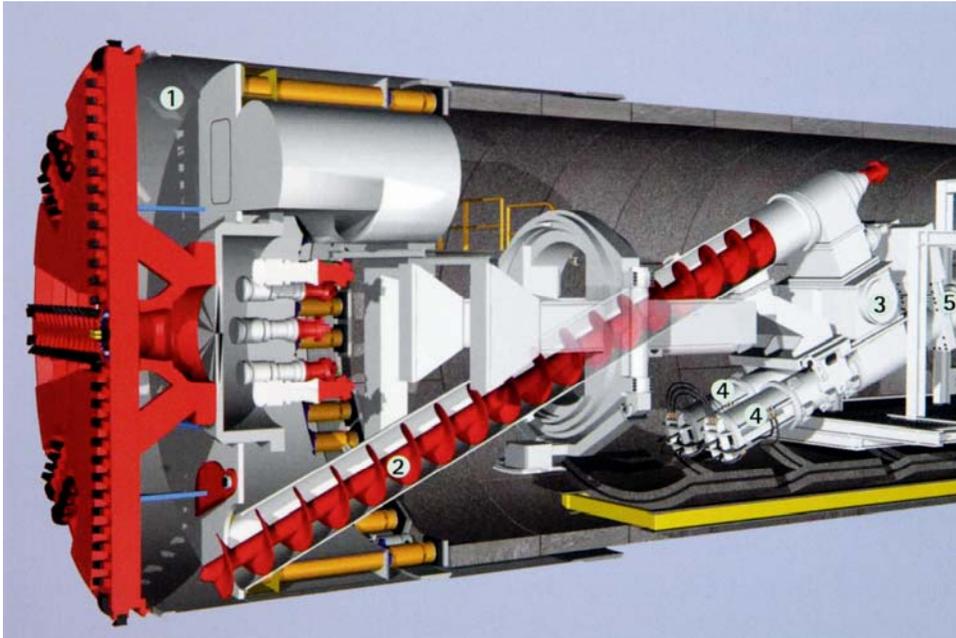
Técnicas y Métodos Constructivos



***Escudo de Frente Presurizado
(Slurry Shield), Drenaje Profundo,
1985-2005.***



Técnicas y Métodos Constructivos

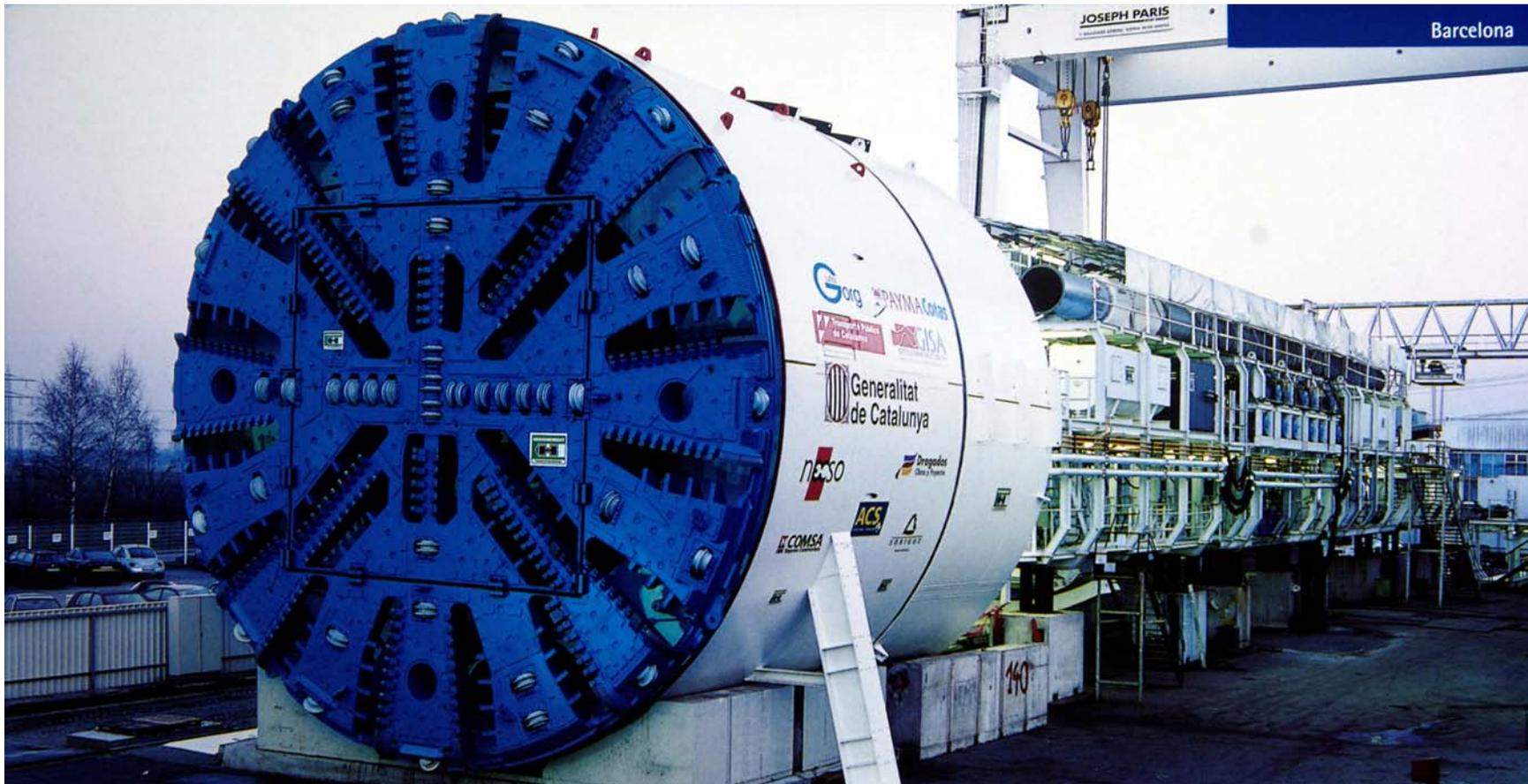


TBM, TIPO EPB, PARA SUELO BLANDO.



Diámetro 9.75 m. Holanda, 2000.

HERRENKNECHT news, 2003



TBM, tipo escudo EPB. Diámetro 12.06 m. Metro Barcelona, España.

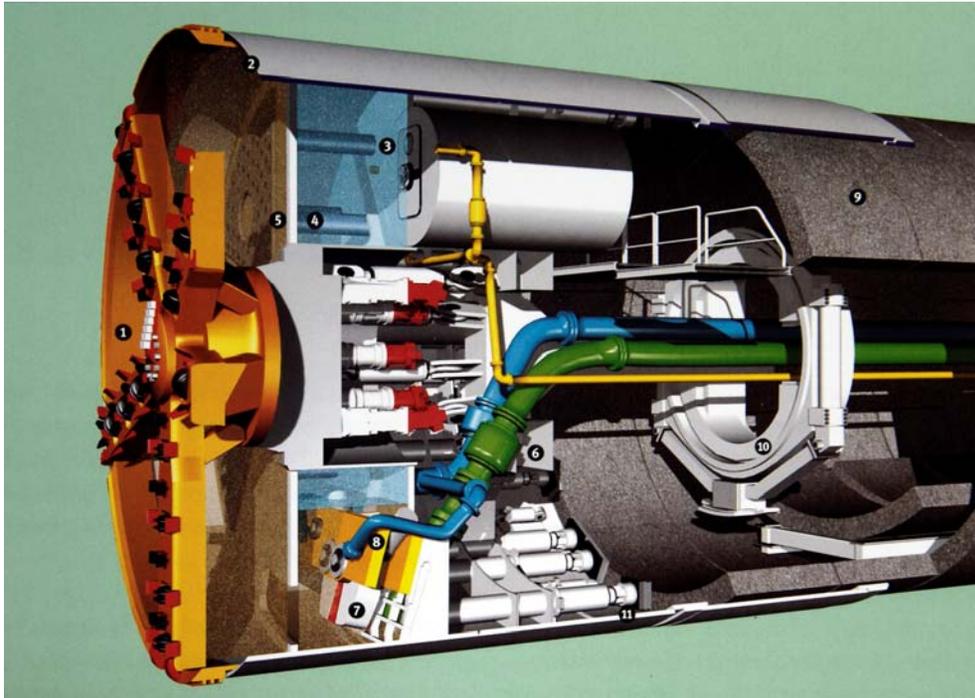
Geología: Granodiorita, arena, arcilla, grava y grava con boleos.

HERRENKNECHT news, 2003

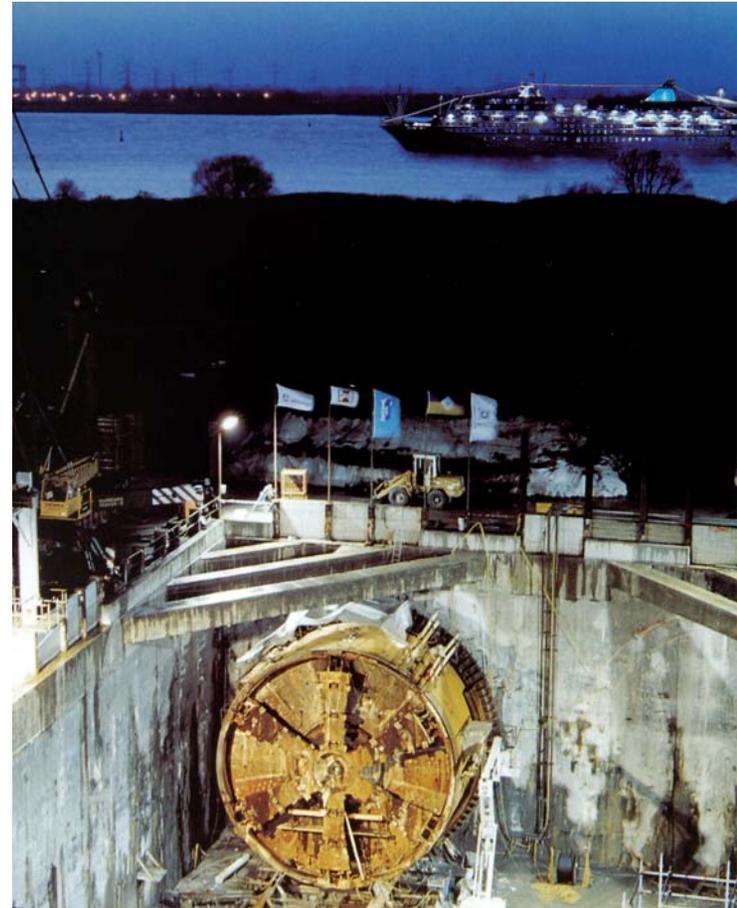


Escudo de Frente Presurizado Doble





TBM tipo Mixshield System.



TBM tipo Mixshield System. Diámetro 9.79 m. Holanda, 2000.

HERRENKNECHT news, 2003



Nuevo Método Austriaco de Tunelear - NATM

Antecedentes

- En 1964, el austriaco Rabcewicz publicó en la revista *Water Power* su artículo llamado "THE NEW AUSTRIAN TUNNELING METHOD".
- Originalmente el NATM estuvo concebido como una serie de técnicas para construir túneles en roca dura. Posteriormente se han tenido modificaciones para utilizarse en suelos blandos.
- En 1993, Kovari y otros ingenieros, dudan y desafían el Método NATM.

Nuevo Método Austriaco de Tunelear - NATM

Filosofía del NATM

- ◆ La resistencia del subsuelo en la periferia del túnel, debe ser deliberadamente movilizada hasta el máximo posible.
- ◆ La resistencia del subsuelo es alcanzada al permitir al subsuelo deformarse. El soporte inicial o primario deberá contar con características de carga-deformación apropiadas al subsuelo. El revestimiento definitivo se deberá colocar al final. Se deberá colocar instrumentación para medir deformaciones y cargas sobre el sistema de soporte. Cuando el túnel se comporta adecuadamente, eventualmente puede modificarse la secuencia de la excavación y las características del sistema de soporte.



Nuevo Método Austriaco de Tunelear - NATM

Técnicas del NATM

- El túnel es excavado y soportado secuencialmente, pudiéndose variar la secuencia de las áreas.
- El soporte primario es concreto lanzado con alguno o con todo lo siguiente:
 - Malla de acero
 - Arcos de acero (generalmente vigas tipo celosía)
 - Refuerzos del subsuelo [anclas y banderillas (spiling)]
- El revestimiento definitivo es usualmente concreto colado en el sitio (tratado por separado para efectos de diseño).

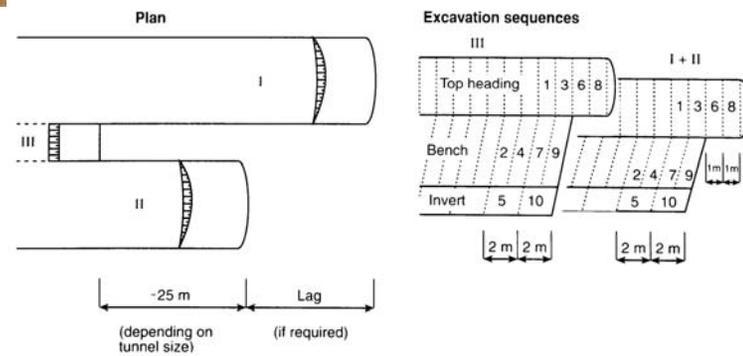
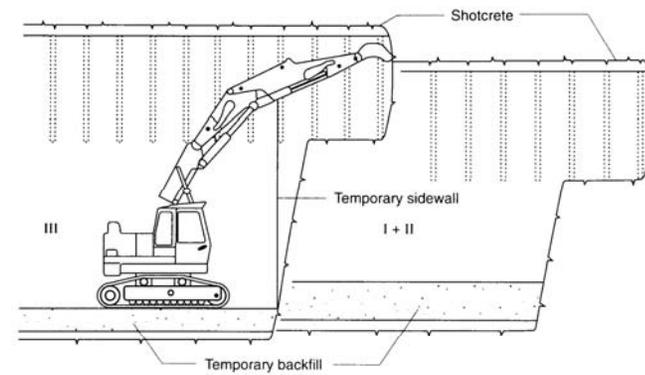
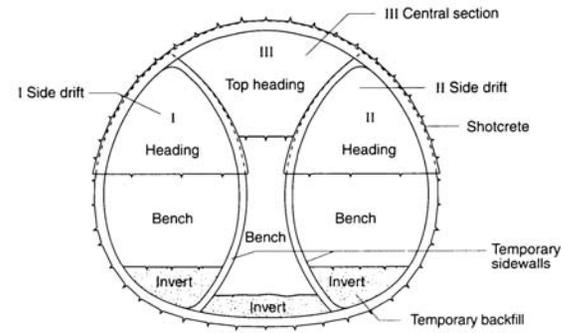
Nuevo Método Austriaco de Tunelear - NATM

El NATM en Suelos Blandos

- Para mantener la estabilidad de la excavación, el revestimiento primario debe colocarse tan pronto como sea posible.
- En túneles urbanos, para minimizar los asentamientos superficiales se deberá:
 - - La excavación debe ser corta en términos de dimensión y tiempo.
 - - Se deberá colocar el sistema de soporte primario de inmediato y terminando el anillo de concreto lanzado.
- Los puntos a. y b. de la Filosofía del NATM no son aplicables.



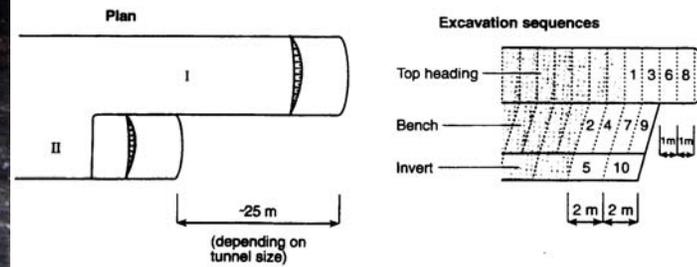
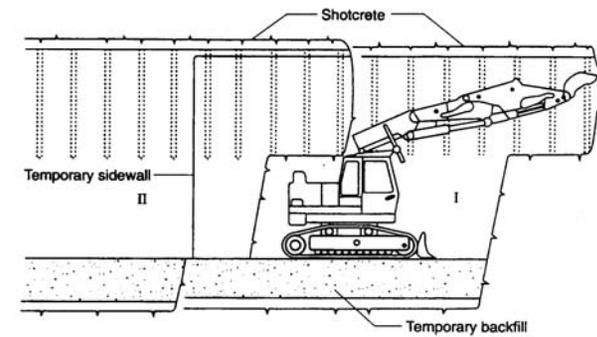
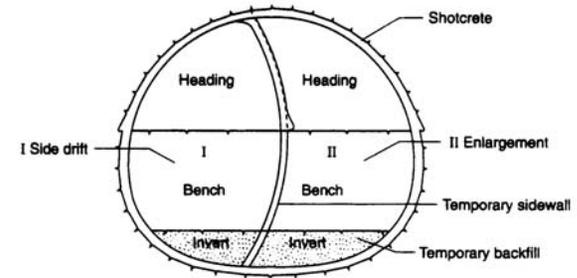
Técnicas y Métodos Constructivos NATM Tipo 1



ICE. 1997. Ref. No. 23

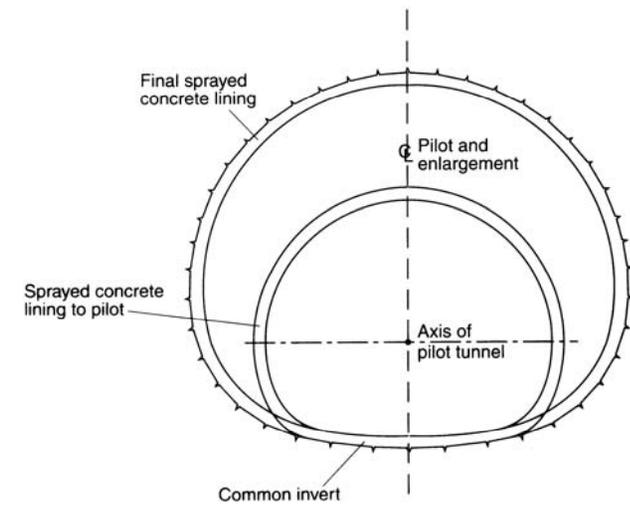
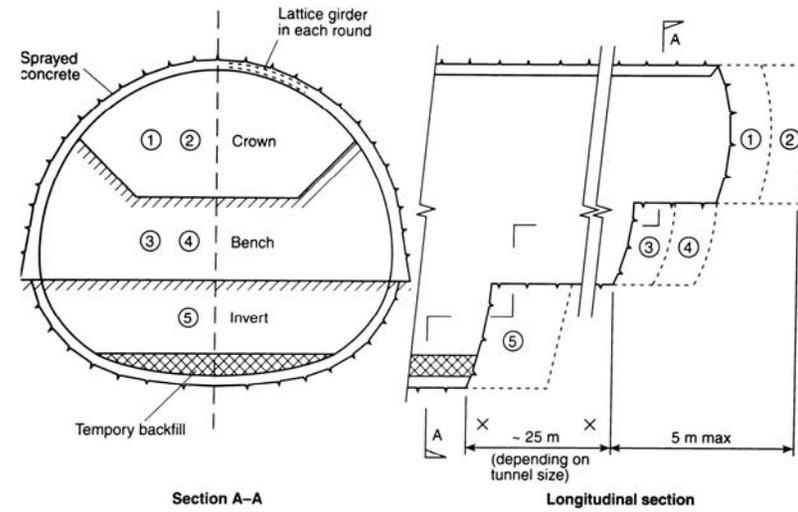
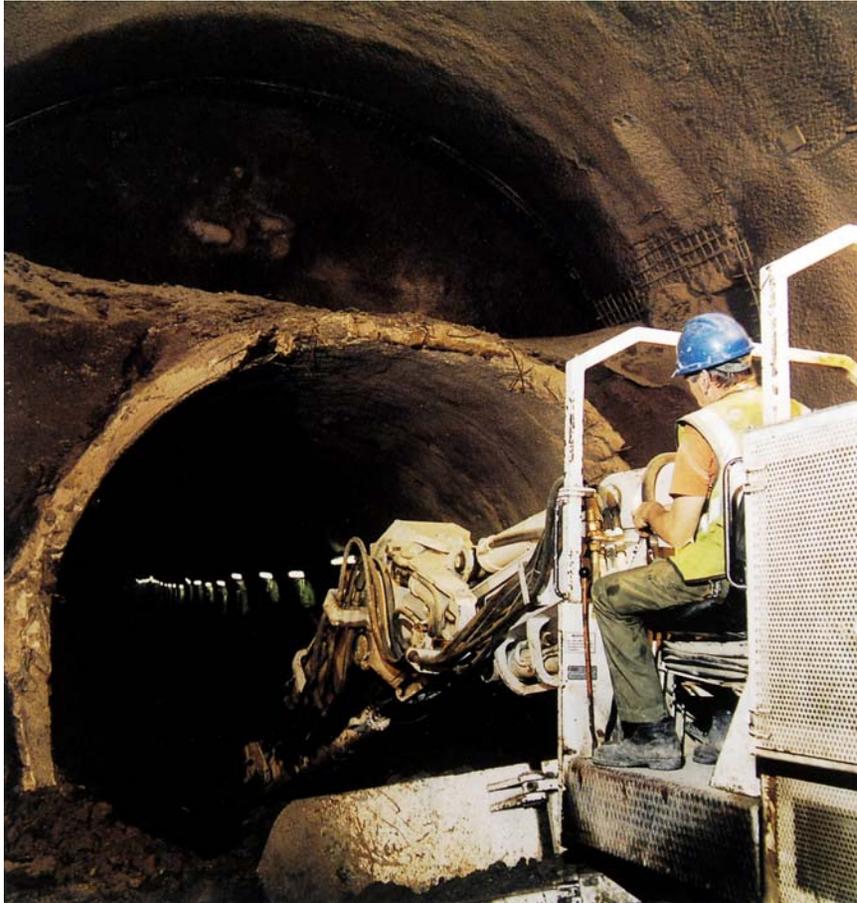


Técnicas y Métodos Constructivos. NATM Tipo 2



ICE. 1997. Ref. No. 23

Técnicas y Métodos Constructivos. NATM Tipos 3 y 4

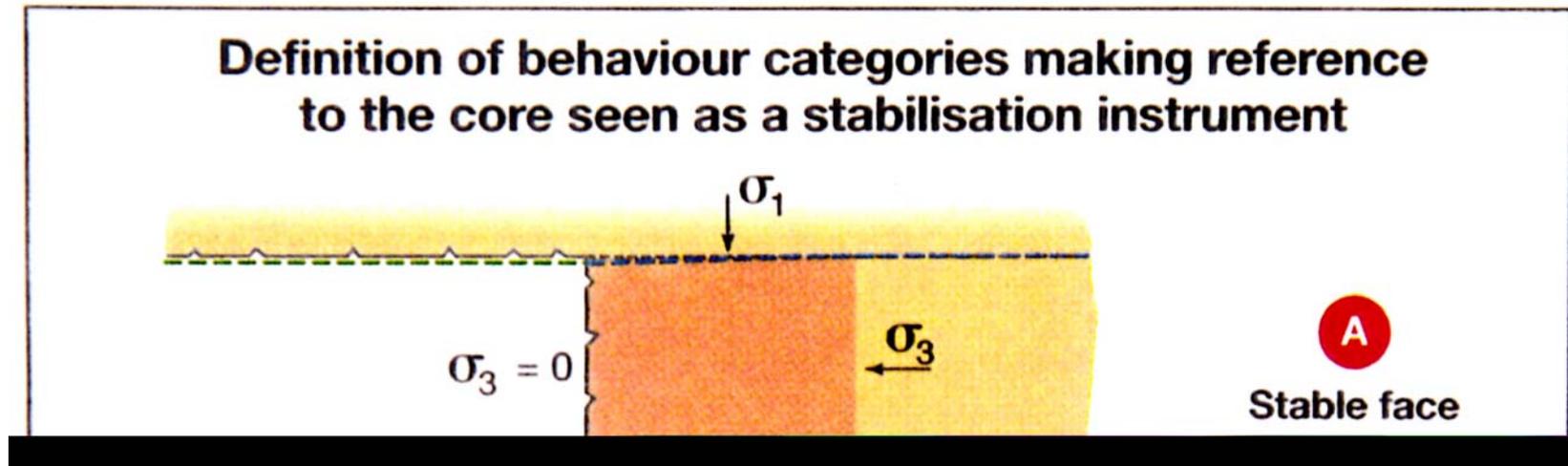


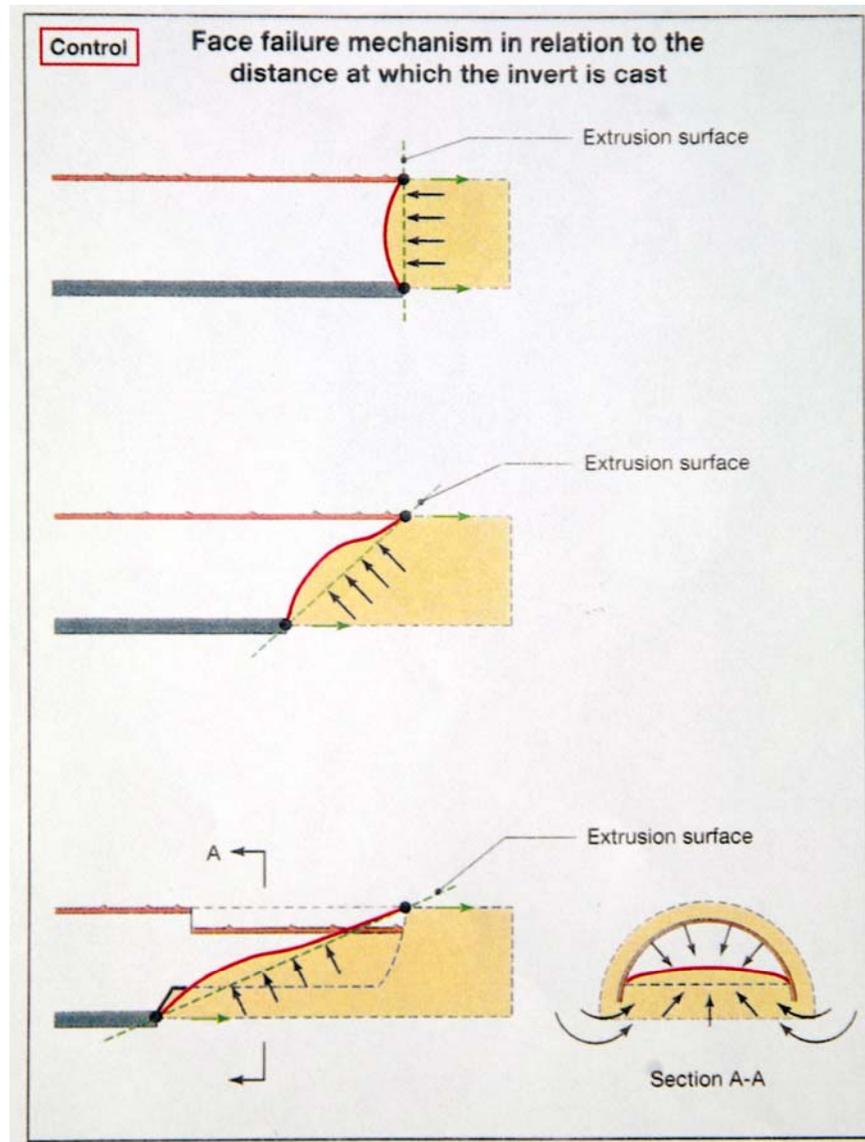
ICE. 1997. Ref. No. 23



Procedimiento Italiano por Lunardi

*P.Lunardi. Tunnels & tunneling
International. May, 2000.*







Procedimiento Italiano por Lunardi

P.Lunardi. Tunnels & tunneling International. May, 2000.

FASES

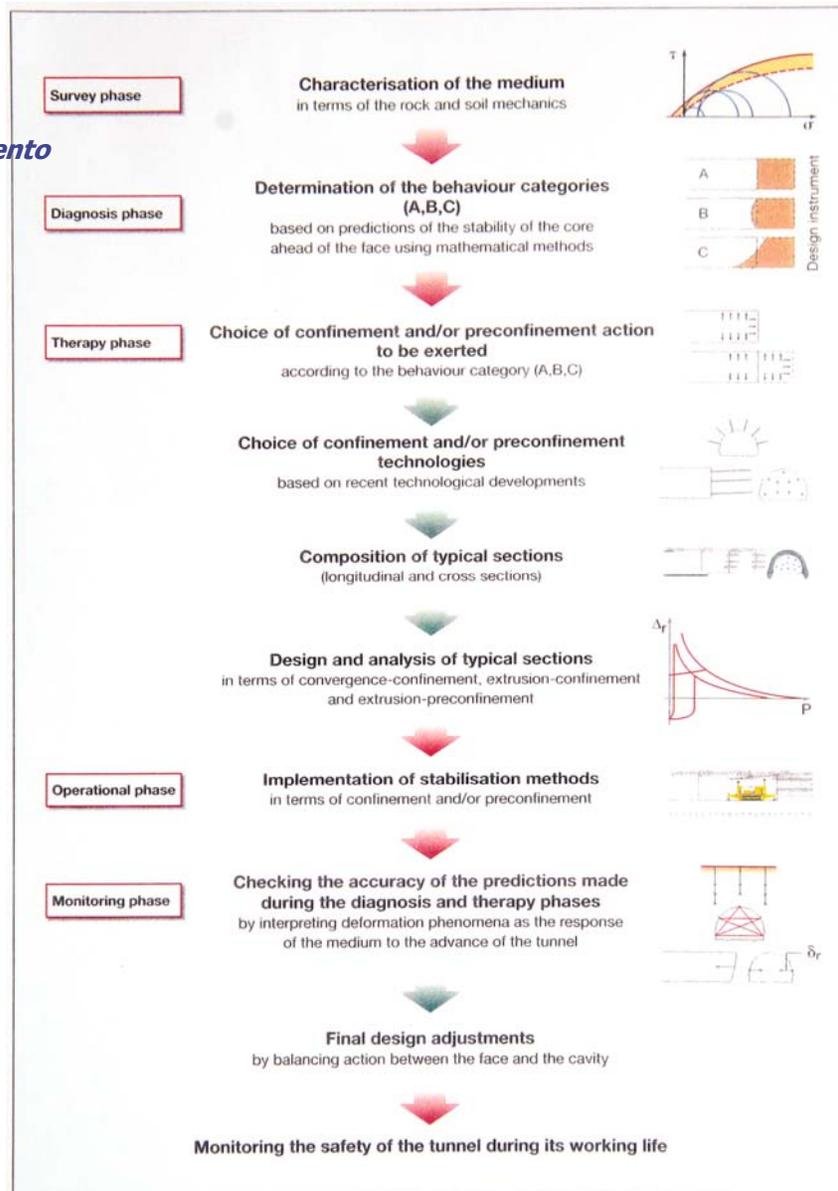
Reconocimiento

Diagnosis

Terapia

Operacional

Monitoreo



Caracterización del Medio

Determinación de las categorías de comportamiento

Selección de confinamiento o preconfinamiento de acciones que deben ser ejecutadas (A, B, C)

Selección de tecnologías de confinamiento y/o preconfinamiento

Composición de secciones típicas

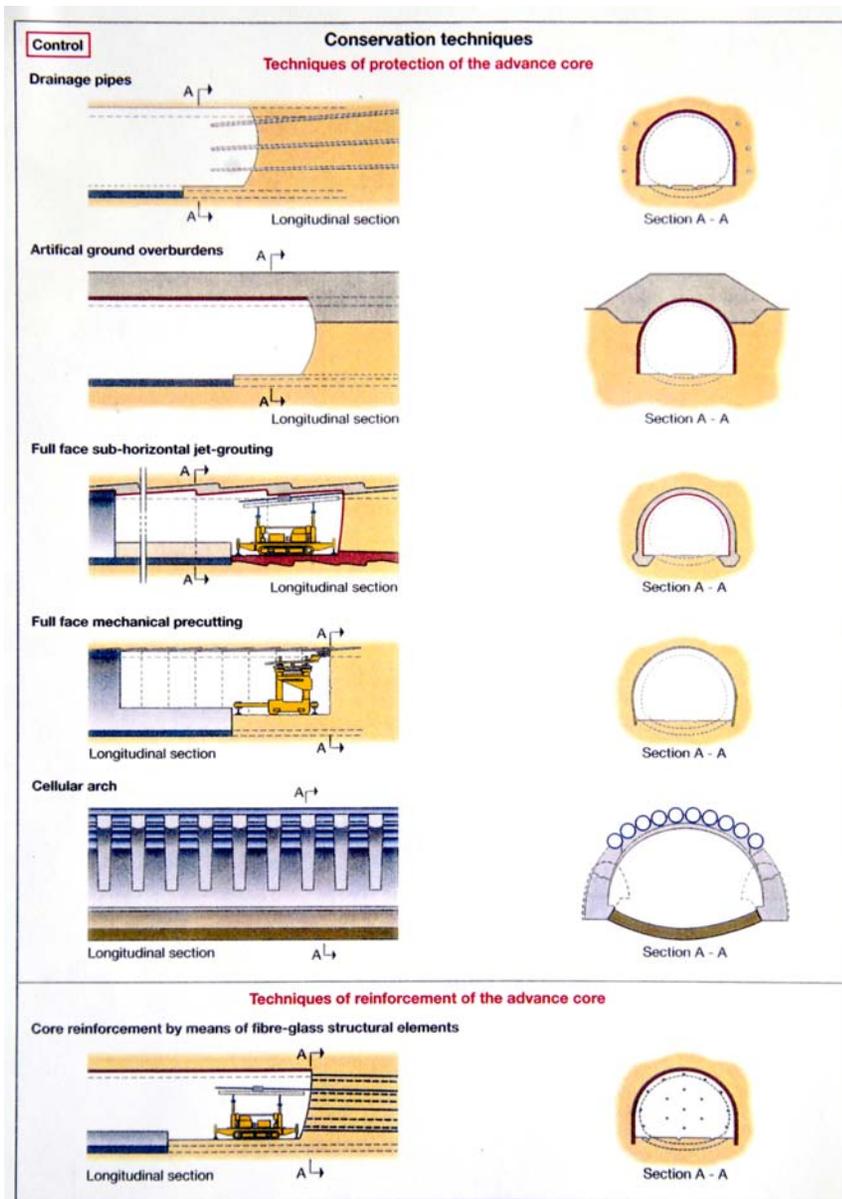
Diseño y análisis de secciones típicas

Implementación de métodos de estabilización

Verificación de la precisión de las predicciones hechas durante las fases de diagnóstico y terapia

Ajustes finales al diseño

Monitoreo de la seguridad del túnel durante su vida útil



PREPROTECCIÓN DE LA SECCIÓN

Tubos de drenaje

Clave artificial

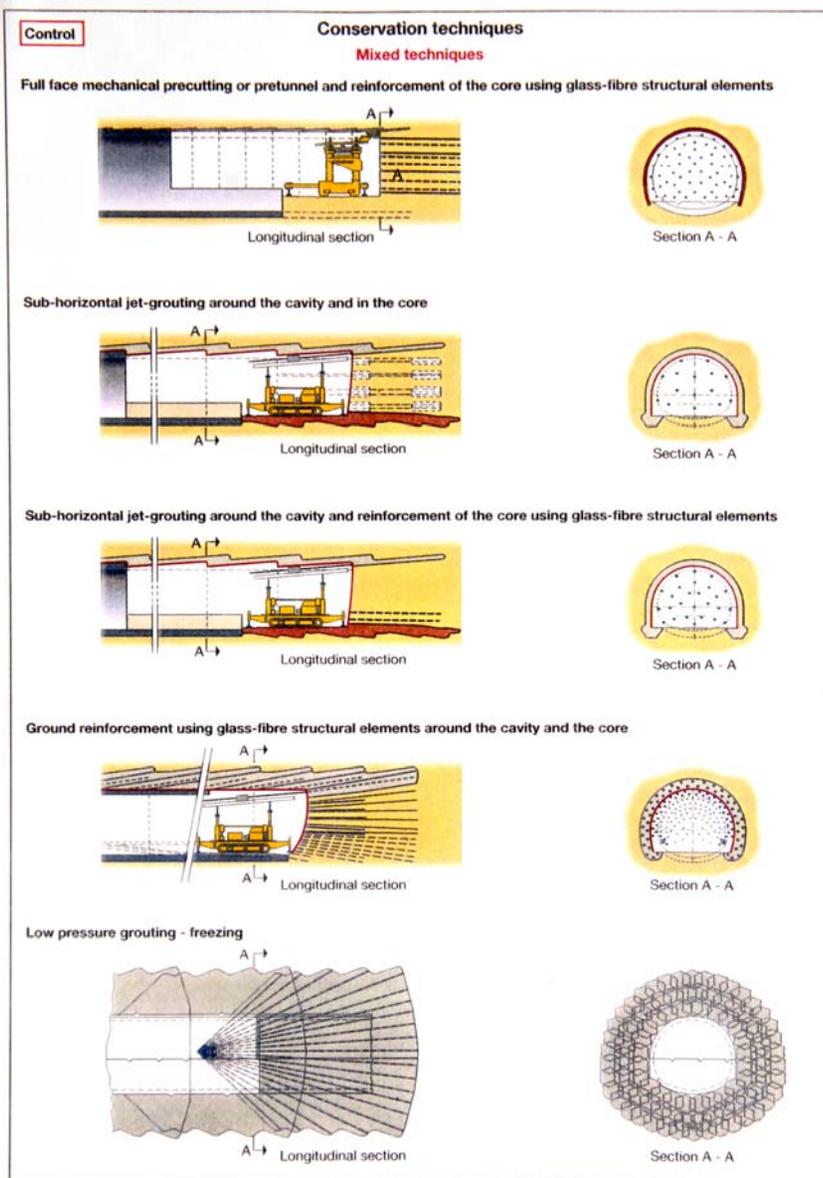
Jet-grouting alrededor de la sección

Precorte mecánico en clave y paredes

Arcos celulares

REFUERZO DE LA SECCIÓN POR EXCAVAR

Anclas de fibra de vidrio



TÉCNICAS MIXTAS

Precorte y anclas de fibra de vidrio

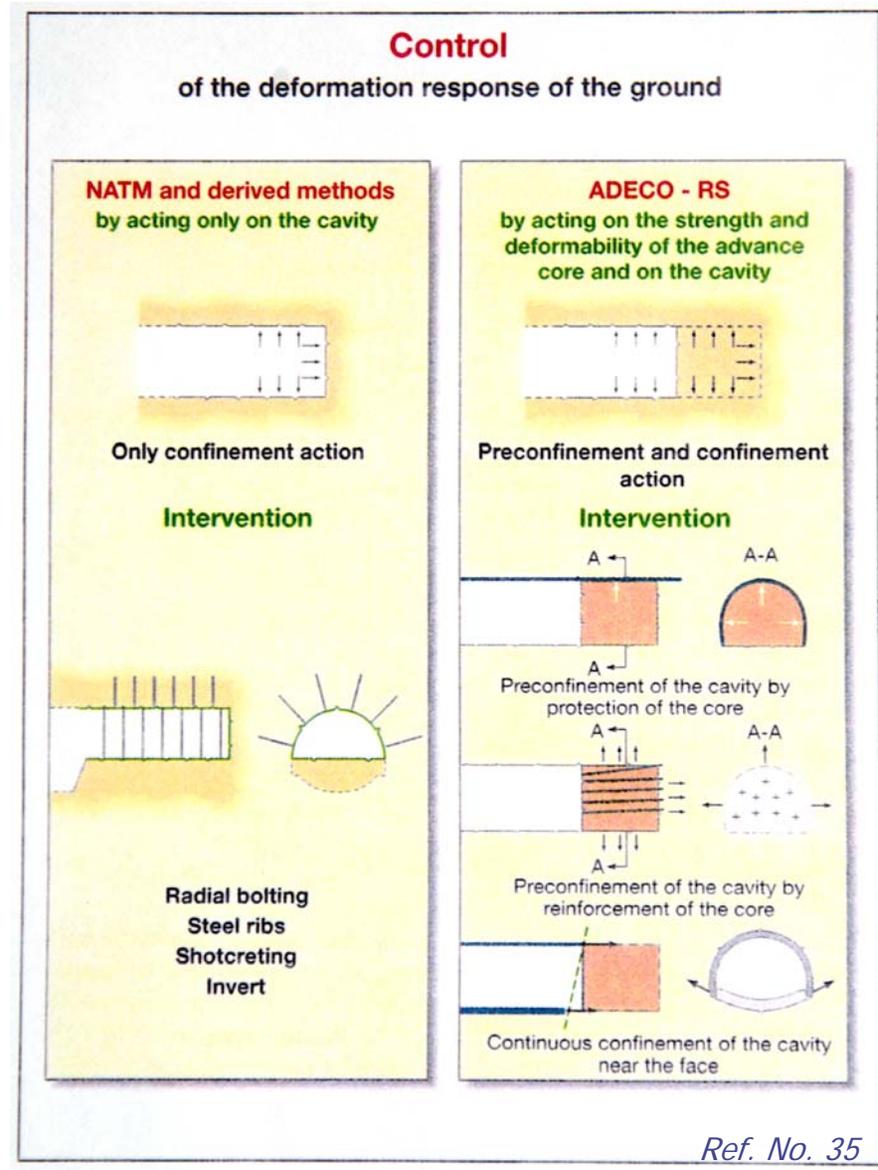
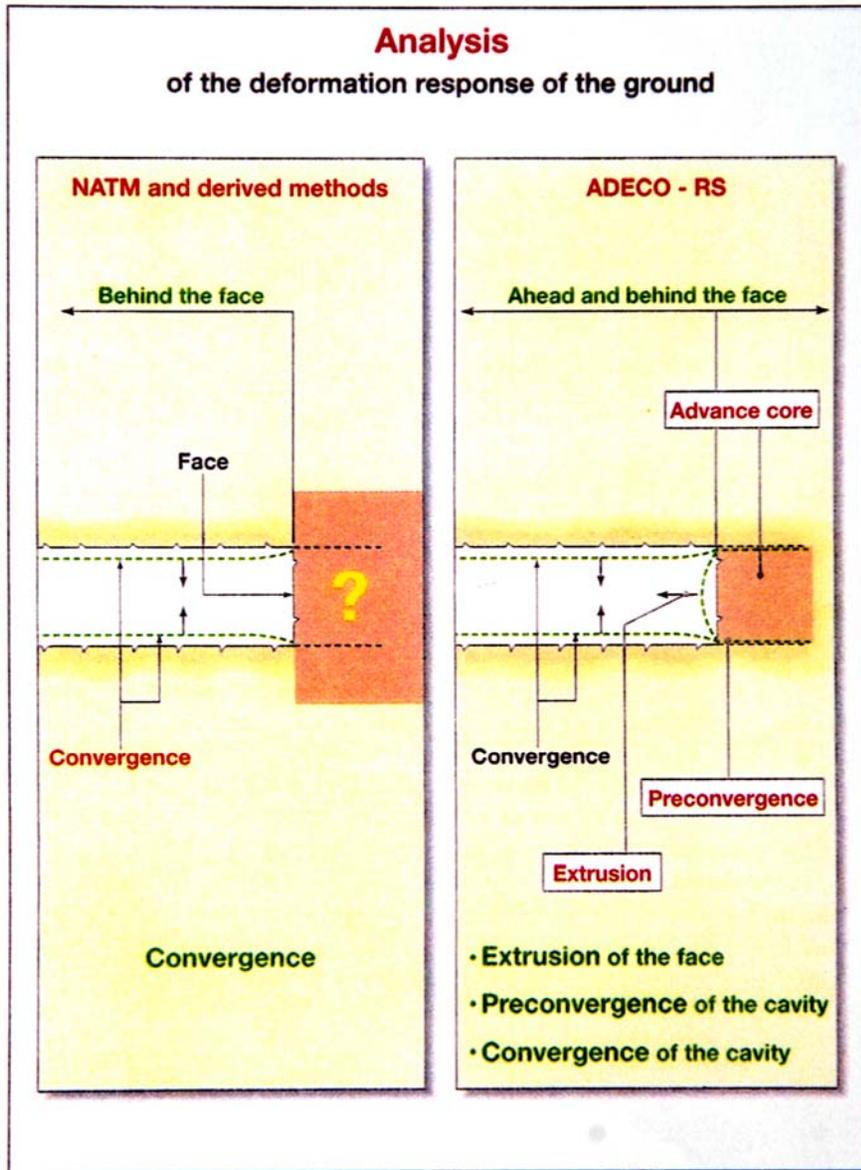
Jet-grouting alrededor de la sección y en el frente

Jet-grouting alrededor de la sección y anclas de fibra de vidrio en el frente

Reforzamiento alrededor de la sección y del frente utilizando anclas de fibra de vidrio

Inyección a baja presión - congelamiento

Diferencias entre el NATM y el ADECO - RS





LICITACIÓN DE UN PROYECTO SUBTERRÁNEO

- Debe ser un traje a la medida del proyecto.
- El dueño debe tomarse su tiempo para caracterizar adecuadamente el sitio y decidir que riesgos quiere tomar y que riesgos pasar al contratista.
- El contratista debe entender los riesgos y las obligaciones del proyecto.
- El GBR* es fundamental para ayudar en el proceso.
- El contratista tendrá que completar el proyecto y estudiar sus alternativas constructivas y estimar los rendimientos con las condiciones geotécnicas anticipadas.
- Para acotar los riesgos conviene establecer estándares mínimos de rendimiento que deberán incorporarse en las especificaciones y que servirán para la administración del proyecto.
- Los dueños de los proyectos se pasan años estudiando y entendiendo sus proyectos, en cambio los contratistas en cuestión de semanas, necesitan presentar su oferta. Parece razonable incorporar a los contratistas en las etapas tempranas de la planeación, diseño y presupuestación de una obra subterránea.
- Seleccionar a los contratistas capaces y preparados debe ser una situación ***sine qua non***.

* *Geotechnical Baseline Report*



REPORTE GEOTÉCNICO DE REFERENCIA

1. En el Mundo, la construcción subterránea ha sido un campo fértil para las reclamaciones.
2. En 1997, la Sociedad Norteamericana de Ingenieros Civiles (ASCE) emitió un documento muy importante llamado Geotechnical Baseline Reports for Underground Construction, producto de 3 reuniones en Las Vegas, Washington y Los Angeles.
3. Se presentan la filosofía y recomendaciones para los preparación de reportes geotécnicos interpretativos para que se integren en las Bases de Licitación (BDL).
4. El principal objetivo es presentar en las BDL y en el Contrato de Obra, las condiciones geotécnicas que se anticipa estarán presentes durante la construcción de la obra subterránea.
5. Esto se le conoce contractualmente como la Línea Base o de Referencia. Los riesgos asociados con condiciones menos adversas a la Línea Base serán absorbidos por el contratista y los mayores serán absorbidos por el Dueño de la Obra.
6. También incluye la presentación de las condiciones geotécnicas que servirán de base para el diseño de los componentes subterráneos.
7. Propone una cláusula contractual para considerar las condiciones diferentes del sitio (DSC).
8. Se presenta el GBR *checklist*. *Lista de Verificación del Reporte GBR Anexo No. 1*



CONSTRUCCIÓN DEL PROYECTO



Construcción de un Proyecto Subterráneo

1. Existen cuatro metas simultáneas

- Construir el proyecto con:
- a. Calidad
 - b. Oportunidad
 - c. Con el presupuesto asignado
 - d. Con seguridad y respeto al medio ambiente

2. Es indispensable formar un equipo de trabajo entre:

- a. el propietario
- b. el diseñador
- c. el contratista
- d. el supervisor o gerencia de proyecto
- e. los asesores



Los cuales van a convivir con una obra lineal, variable y complicada

3. Las herramientas de trabajo son:

- a. El programa general (de picos)
- b. Los programas por frentes
- c. El proyecto autorizado
- d. Los procedimientos constructivos aceptados
 - las normas
 - las especificaciones
- e. El presupuesto y flujo autorizados
- f. Los recursos asignados
 - personal
 - equipos
 - materiales
- g. Las restricciones acordadas



4. Verificaciones sistemáticas durante la construcción del proyecto

- a. Trazo (línea y nivel)
- b. Movimientos y deformaciones
 - geometría del túnel (transversal y longitudinal)
 - vecindad (en superficie y a estructuras vecinas)
- c. Afectación del nivel freático
 - variaciones en la presión de poro
 - mediciones de las filtraciones hacia el túnel
- d. Clasificación de suelo y/o rocas y su comparación con la estratigrafía esperada
- e. Control y verificación de los procedimientos constructivos
 - de excavación
 - sistemas de soporte (marcos de acero o de concreto lanzado, charolas, dovelas, anclas, etc.)
- f. Otros aspectos importantes
 - alumbrado y fuerza eléctrica - seguridad
 - ventilación - tiraderos
 - aire comprimido - capacitación
 - vía y sistemas de transporte de personal
- g. Vigilancia de los aspectos ecológicos
 - lixiviados
 - tiraderos y calidad de la rezaga
 - ruido
 - control de vibraciones
 - humos

5. Lectura e interpretación de resultados de los instrumentos instalados

Comparando los parámetros observados contra los teóricos.

COMENTARIOS FINALES



Metro Ciudad de México. Línea 7 Norte - Norte, 1984. AMF



1. Conocer a lo largo de un túnel, las características de las formaciones por atravesar y la interrelación con el agua subterránea, constituye el principal reto geotécnico de un proyecto subterráneo.
Entre menor sea el número de incertidumbres geotécnicas, menor será el riesgo durante el periodo de construcción.
El cliente tiene que estar convencido de la importancia de la Geotécnia y debe proporcionar el presupuesto y el tiempo razonables que permitan hacerla completa y de buena calidad.

Jack K. Lemley dice:

“Una investigación geotécnica pobre o una interpretación aplicada por gente inexperta y mal calificada, combinadas con malas decisiones políticas y económicas, no producen problemas pequeños sino que producen fallas mayores”

2. La ejecución de las obras subterráneas requiere que exista una comunión entre la teoría, la tecnología y las mejores prácticas constructivas.
3. Hacer realidad la construcción de lumbreras y túneles implica verificar cotidianamente las hipótesis consideradas en el proyecto para ratificarlas o rectificarlas.
4. La metodología de diseño propuesta por Bieniawski es una herramienta que permite arribar a decisiones racionales y técnicamente cimentadas.
5. En las obras subterráneas se requiere que exista una comunicación franca y respetuosa entre todos los actores: Propietario, proyectista, contratistas, supervisores y asesores. Esta relación debe empezar desde las etapas tempranas de la ejecución de la Geotécnia y del estudio de alternativas constructivas.
6. En concordancia con las incertidumbres geológicas y geotécnicas, y a los riesgos involucrados, parece razonable y necesario adoptar la práctica internacional de incluir en las bases de licitación, el documento denominado



“Geotechnical Baseline Report for Underground Construction” (GBR), que puede traducirse como *“Reporte Geotécnico de Referencia”* e incluir en el contrato de obra, una cláusula de condiciones diferentes del sitio.

7. La tecnología de la excavación de obras subterráneas ha evolucionado notablemente en los últimos 25 años. La velocidad de perforación y los rendimientos de los métodos convencionales en roca se han triplicado. El polémico método austriaco sigue siendo usado en muchos países, aunque se han presentado 2 o 3 fallas, la última en la Ciudad de Barcelona; la cual habrá que estudiar con detenimiento. El método de Lunardi está siendo usado intensamente en Europa; representa una buena opción para solucionar muchos de los problemas que ocurren en la construcción de túneles carreteros con frentes mixtos o rocas fracturadas.
La evolución de los métodos mecánicos, permite hoy perforar túneles en cualquier clase de suelo, rocas o mezclas.
8. México es un país extenso y montañoso que requiere una infinidad de proyectos subterráneos. Veamos con optimismo el futuro cercano y aprovechemos nuestra vocación tunelera, nuestra pujante comunidad geotécnica y los desarrollos tecnológicos disponibles.

Ing. Andrés Antonio Moreno y Fernández

México, D.F., mayo de 2006.



REFERENCIAS

1. Proctor and White. Rock tunneling with steel supports. Commercial Shearing & Stamping Company. 1968.
2. Proctor and White. Earth tunneling with steel supports. Commercial Shearing, Inc. Youngstown, Ohio, 1977.
3. P. Powers. Construction Dewatering. John Wiley & Sons. 1981.
4. Andrés Moreno F. Construcción del túnel Tacubaya con escudo abierto de 9.14 m de diámetro. Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, AC. Túneles en suelos blandos y firmes. 1981.
5. John O. Bickel/T.R. Kuesel. Tunnel Engineering Handbook. Van Nostrand Reinhold Company. New York. 1982.
6. T.D. O'Rourke. Guidelines for tunnel lining design. ASCE. 1984.
7. Andrés Moreno F. Construcción de Túneles Carreteros. Reunión Conjunta AMITOS, AMIVTAC, SMIE, SMMS, SMMR. Septiembre 1985.
8. Edward J. Cording. Constraints on Tunneling Technology. Tunneling and Underground Transport. Macro Engineering Research Group and the Center for Advanced Engineering Study of the Massachusetts Institute of Technology. Elsevier. 1985.
9. Andrés Moreno F. Túneles con frentes mixtos. Curso Victor Hardy 85. AMITOS 1985.
10. T.R. Stacey/C.H. Page. Practical Handbook for Underground Rock Mechanics. Trans Tech Publications. Federal Republic of Germany. 1986.
11. Bengt Stillborg. Professional Users Handbook for Rock Bolting. Trans Tech Publications. 1986.
12. Jesús Alberro. Líneas características y estabilidad de las arcillas del Valle de México. Simposio Internacional de Ingeniería Geotécnica de Suelos Blandos. SMMS. 1987.
13. Laureano Cornejo A. Excavación mecánica de túneles. Editorial Rueda. Madrid. 1988.
14. Andrés Moreno F. La excavación de lumbreras y túneles en las arcillas blandas de la Ciudad de México. Memorias del Congreso Internacional sobre los Túneles y el Agua. Madrid, 1988. A.A. Balkema/Rotterdam/Brookfield.



15. B.N. Whittaker, R.C. Frith. Tunnelling. The Institution of Mining and Metallurgy. London, U.K., 1990.
16. Z.T. Bieniawski. Design methodology in rock engineering. A.A. Balkema/Rotterdam/Brookfield. 1992.
17. S.R. Herrera, L. Cañete, J.A. Bahena. Hidroeléctrica Aguamilpa, Aspectos mecánicos de rocas. Hacia nuevos mundos en túneles. AMITOS – ITA. Acapulco. 1992.
18. F. Méndez. Aguamilpa powerhouse an outstanding undertaking. Hacia nuevos mundos en túneles. AMITOS – ITA. Acapulco. 1992.
19. Keiichi Fujita & Osamu Kusakabe. Underground Construction in Soft Ground. Proceedings of the International Symposium on Underground Construction in Soft Ground. New Delhi, India. 1994.
20. E. Hoek, P.K. Kaiser, W.F. Bawden. Support of Underground Excavations in Hard Rock. A.A. Balkema/Rotterdam/Brookfield/, 1995.
21. A. Haack. Comparison between conventional tunnel driving method and TBM drives. Tunnel Boring Machines. A.A. Balkema/Rotterdam/Brookfield. 1996.
22. Christian Kutzner. Grouting of Rock and Soil. A.A. Balkema/Rotterdam/Brookfield. 1996.
23. The Institution of Civil Engineers. Sprayed concrete linings (NATM) for tunnel in soft ground. Thomas Telford Limited. London, 1997.
24. Enrique Taméz G., J.L. Rangel, E. Holguín. Diseño geotécnico de túneles. TGC Geotécnia, S.A. de C.V. 1997.
25. V. Schaefer. Ground improvement, ground reinforcement, ground treatment. Geotechnical Special Publication # 69. GEO Institute. ASCE. 1997.
26. Randall J. Essex. Geotechnical Baseline Reports for Underground Construction. ASCE. 1997.
27. R.W. Hem, R.G. Clough, G.R. Teets. Clarifying grouting requirements associated with soil and rock liners. North American Tunneling 98. A.A. Balkema/Rotterdam/Brookfield/, 1998.
28. T. Franzón, Sven-Gunnar Bergdahl and Annica Nordmark. Underground Construction in Modern Infrastructure. A.A. Balkema/Rotterdam/Brookfield. Stockholm, Sweden. 1998.



29. Marco D. Boscardin. Jacked tunnel design and construction. ASCE. GEO Institute. 1998. Geotechnical Special Publication # 87.
30. American Society of Civil Engineers. Big Digs Around the World. Geotechnical Special Publication # 86. GEO Institute ASCE. 1998.
31. G. Fernández. Geo-Engineering for underground facilities. GEO Institute. ASCE. 1999.
32. Richard E. Goodman. Karl Terzaghi. The Engineer as an Artist. ASCE Press. 1999.
33. Shoji Kuwahara. Recomendations and Guidelines for Tunnel Boring Machines. International Tunneling Association (ITA). September 2000. Working Group No. 14.
34. Andrés Moreno F. Reflexiones sobre la planeación de túneles y su relación con la geotécnia. XX Reunión Nacional de Mecánica de Suelos. SMMS. Oaxaca, 2000.
35. Pietro Lunardi. The design and construction of tunnels using the approach based on the analysis of controlled deformation in rock and soils. Tunnels and Tunnelling International. Special Supplement. May, 2000.
36. Nick Barton. Are long TBM tunnels faster by TBM? 2001 RETC Proceedings.
37. Charles W.W. Ng., Noel Simons, Bruce Menzies. Soil Structure Engineering of Deep Foundations, Excavations and Tunnels. Thomas Telford Limited 2004. London, U.K.
38. The British Tunneling Society (BTS) & The Institution of Civil Engineers (ICE). Tunnel lining design guide. Thomas Telford Limited 2004. London, U.K.
39. Ratan Tatiya. Civil Excavations and tunneling. Thomas Telford Limited 2005. London, U.K.
40. Robin Hall. Fire Engineering for UK Highway Tunnels. Tunnels and Tunnelling International. July, 2005.
41. BTS. ICE. Closed-Face Tunnelling Machines and Ground Stability. A Guideline for Best Practice. 2005.



LISTA DE VERIFICACIÓN DEL REPORTE GBR

ANEXO No. 1

Introducción

- Nombre del proyecto
- Propietario del proyecto
- Equipo de diseño (y junta de revisión del diseño, so hubiera)
- Objeto del reporte; organización del reporte
Jerarquía de este documento con relación al GDR

Descripción del proyecto

- Localización del proyecto
- Tipo y propósito del proyecto
- Resumen de las características clave del proyecto (dimensiones, longitudes, secciones transversales, formas, orientaciones, sistemas de soporte, tipos de revestimiento, secuencias requeridas de construcción)
- Referencias a planos del contrato específicos – evitar repetir figuras de otros documentos contractuales en el Reporte GBR

Fuentes e información geológica

- Referencia al GDR
- Otros reportes geotécnicos disponibles
- Procedencia histórica de estas fuentes



Marco del proyecto geológico

- Breve reseña general de la distribución geológica y del agua subterránea, con referencias cruzadas al texto, mapas y figuras del GDR
- Breve reseña general de la exploración del sitio y programas de prueba – evitar la repetición innecesaria del texto del GDR
- Condiciones de la infraestructura superficial y de las condiciones topográficas y ambientales que afecten el plan general del proyecto
- Cortes y afloramientos típicos
- perfil geológico a lo largo del (los) alineamiento(s) del túnel, mostrando la estratigrafía generalizada y de las unidades roca/suelo, así como el registro de la ubicación de los sondeos, profundidades y orientaciones

Experiencia constructiva previa (puntos clave en el GBR, si están detallados en el GDR)

- Proyectos cercanos relevantes
- Características relevantes de los proyectos anteriores, enfocándose en los métodos de excavación, comportamiento del suelo, condiciones del agua subterránea, y métodos de soporte del terreno.
- Resumen de los problemas durante la construcción y la forma en que se resolvieron (con calificativos conforme sea apropiado)
- Proyectos cercanos cuyas condiciones y circunstancias puedan ser mal interpretadas y el porqué

Caracterización del terreno

- Características físicas y ocurrencias de cada unidad de roca o suelo distinguible, incluyendo rellenos, suelos naturales y lecho de roca
- Resultados de laboratorio y pruebas de campo presentadas en histograma (u otro formato adecuado), agrupados de acuerdo con cada unidad de roca o suelo distinguible; referencia a los resúmenes tabulares contenidos en el GDR



- Rangos y valores para fines de la línea de referencia; explicaciones del porqué las distribuciones del histograma (u otras presentaciones) debieran considerarse representativas del rango de propiedades encontradas, y en caso contrario, porqué no; exposición razonada para seleccionar los valores y rangos de referencia
- Estados de referencia de las diferentes longitudes o porcentajes de cada tipo de suelo pertinente a encontrarse durante la excavación; referencias cruzadas con la información contenida en los planos o especificaciones
- Valores de la permeabilidad de la masa del terreno, incluyendo mediciones directas e indirectas de los valores de permeabilidad, con referencia a resúmenes tabulares contenidos en el GDR; bases para la ocurrencia potencial de grandes flujos internos localizados, no indicados por los valores de permeabilidad de la masa del terreno; exposición razonada para seleccionar los volúmenes de referencia; volúmenes de referencia
- Para proyectos con TBM, las interpretaciones de las propiedades de la masa de roca que serán relevantes para los estimados de atacabilidad de la roca y desgaste de los cortadores, para cada uno de los tipos de roca distinguibles, incluyendo los resultados de pruebas del comportamiento de la roca y los resultados de los análisis petrográficos (no los estimados de valores de penetración, ni los estimados de los valores de avance)

Consideraciones de diseño

- Descripción del (los) sistema(s) de clasificación del terreno, utilizados para fines de diseño, incluyendo la nomenclatura del comportamiento del terreno
- Criterios y metodologías usadas para el diseño del soporte del terreno sistema de estabilización del terreno, incluyendo la distribución de cargas
- Criterios y bases para el diseño de los revestimientos finales
- Consideraciones del comportamiento ambiental, tales como limitaciones en asentamientos y disminución de los niveles de las aguas freáticas
- La manera en que los diferentes requisitos de soporte han sido desarrollados para los diferentes tipos de terreno, y el protocolo a seguir en campo para la determinación de los tipos de soporte para fines de pago; referencia a las especificaciones para las descripciones detalladas de métodos y secuencias
- La necesidad y el razonamiento para la implementación de la instrumentación para la medición del comportamiento del terreno, incluida en los planos y especificaciones



Consideraciones de construcción

- Comportamiento anticipado del terreno en respuesta a las operaciones de la construcción dentro de cada unidad de suelo y roca
- Secuencias requeridas de construcción
- Dificultades específicas de la construcción que se hayan anticipado
- Razonamiento para los requisitos contenidos en las especificaciones que van a restringir los medios y métodos considerados por el contratista o a prescribir medios y métodos específicos (por ejemplo, el uso requerido de escudos de suelo balanceado o de lodos)
- El razonamiento para los estimados de referencia de los caudales de agua subterránea a encontrarse durante la construcción, con valores numéricos en el Reporte GBR y referencias cruzadas en las especificaciones, o valores numéricos en las especificaciones y con el GBR; para los túneles en roca, niveles de referencia de caudales de agua subterránea por frente y caudales acumulativos para ser bombeados al portal o lumbrera
- El razonamiento y sustento de las técnicas de mejoramiento del terreno y del manejo y control del agua subterránea incluidos en el Contrato
- Fuentes de demora, tales como flujo de aguas freáticas, zonas de cortante y fallas, boleos, gases nocivos, suelos o aguas contaminadas, agua caliente y roca caliente, etc.



CLÁUSULA ESTÁNDAR DE CONDICIONES DIFERENTES DEL SITIO (DSC)

1. El Contratista deberá, con prontitud y antes de que tales condiciones se disturben, dar un aviso por escrito al Oficial Contratante de (1) las condiciones físicas subsuperficiales o latentes en el sitio que difieran materialmente de aquellas indicadas en este contrato, o (2) las condiciones físicas desconocidas en el sitio, de naturaleza no común, que difieran materialmente de las encontradas comúnmente y generalmente reconocidas como inherentes en función al carácter previsto en el contrato.
2. El Oficial Contratante investigará las condiciones del sitio con prontitud después de recibir el aviso. Si las condiciones materialmente difieren y ocasionan un incremento o decremento en el costo del Contratista o del tiempo requerido para realizar cualquier parte del trabajo al amparo del presente contrato, sea o no cambiado como resultado de las condiciones, se hará un ajuste equitativo por medio de esta cláusula y el contrato se modificará por escrito en consecuencia. REPORTE GEOTÉCNICO DE REFERENCIA