

TÚNELES EXCAVADOS CONVENCIONALMENTE: GEOMECÁNICA SOPORTES Y REVESTIMIENTOS La Experiencia Venezolana

Gianfranco Perri



SOCVENOS “Sociedad Venezolana de Obras Subterráneas”



**TÚNELES EXCAVADOS CONVENCIONALMENTE:
GEOMECÁNICA SOPORTES Y REVESTIMIENTOS
La Experiencia Venezolana**

Gianfranco Perri

El Presente del Tunnelling en Venezuela *camina sobre rieles*

EL METRO DE CARACAS (15 Km de Túneles)

EL METRO DE VALENCIA (10 Km de Túneles)

EL METRO DE LOS TEQUES (6 Km de Túneles)

EL FERROCARRIL

CARACAS – CÚA (22 Km de Túneles)

LA ENCRUCIJADA–PTO. CABELLO (33 Km de Túneles)

El Tunnelling en Venezuela *ahora está andando sobre rieles*

EL METRO DE CARACAS (5 + 5 Km de TBM Túneles)

EL METRO DE VALENCIA (6 + 5 Km de TBM Túneles)

EL METRO DE LOS TEQUES (6 + 5 Km de Túneles)

LOS FERROCARRILES:

CARACAS – CÚA (22 Km de Túneles)

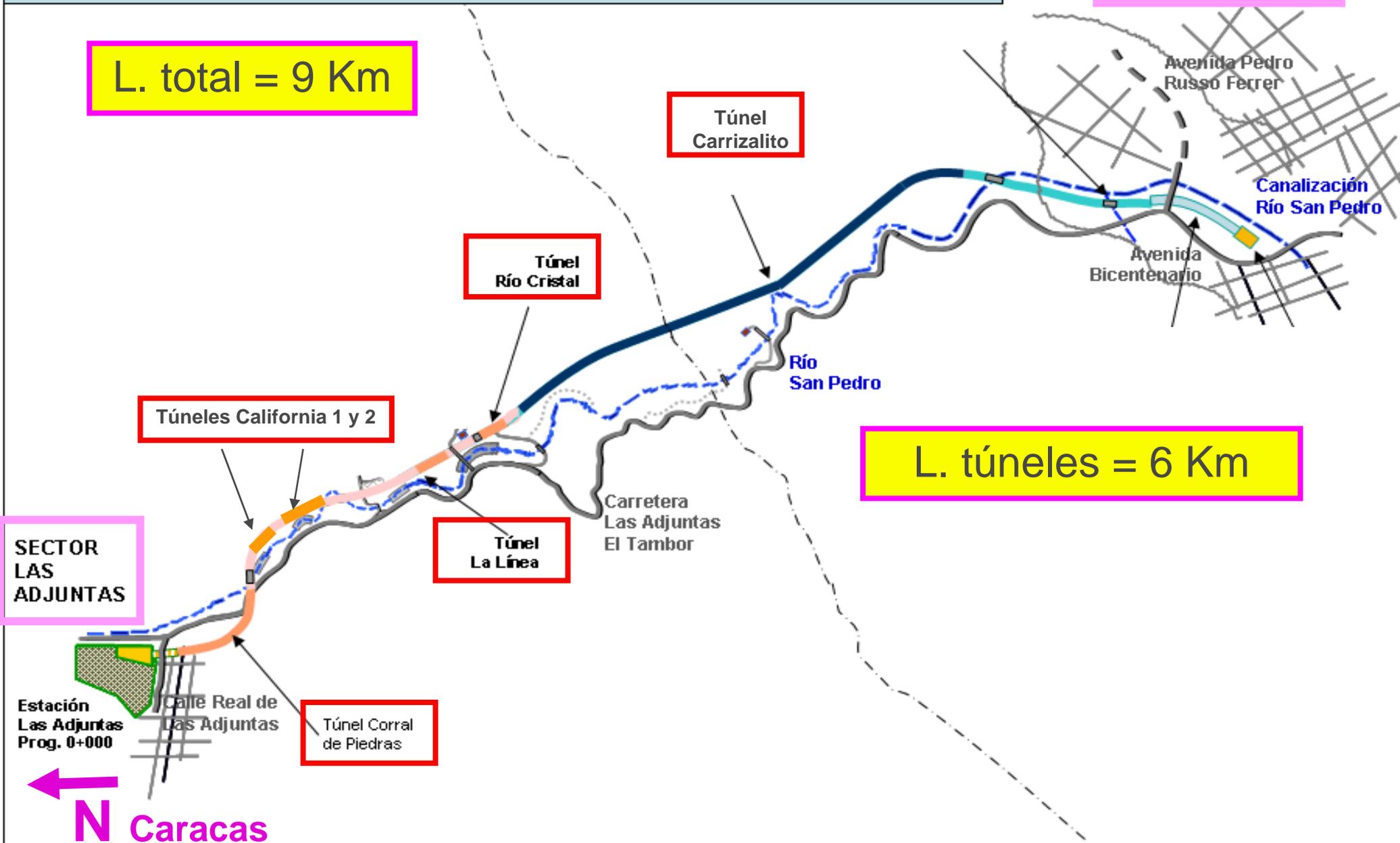
LA ENCRUCIJADA–PTO. CABELLO (33 Km de Túneles)

SAN JUAN D.L.M. – SAN FERNANDO D.A. (15 Km de Túneles)

Línea Metro Las Adjuntas – Los Teques

LOS TEQUES
SECTOR EL TAMBOR

L. total = 9 Km



L. túneles = 6 Km

SECTOR
LAS
ADJUNTAS

Estación
Las Adjuntas
Prog. 0+000

Calle Real de
Las Adjuntas

Túnel Corral
de Piedras

Túnel
La Línea

Carretera
Las Adjuntas
El Tambor

Río
San Pedro

Túnel
Carrizalito

Túnel
Río Cristal

Túneles California 1 y 2

Avenida Pedro
Russo Ferrer

Avenida
Bicentenario

Canalización
Río San Pedro

←
N Caracas

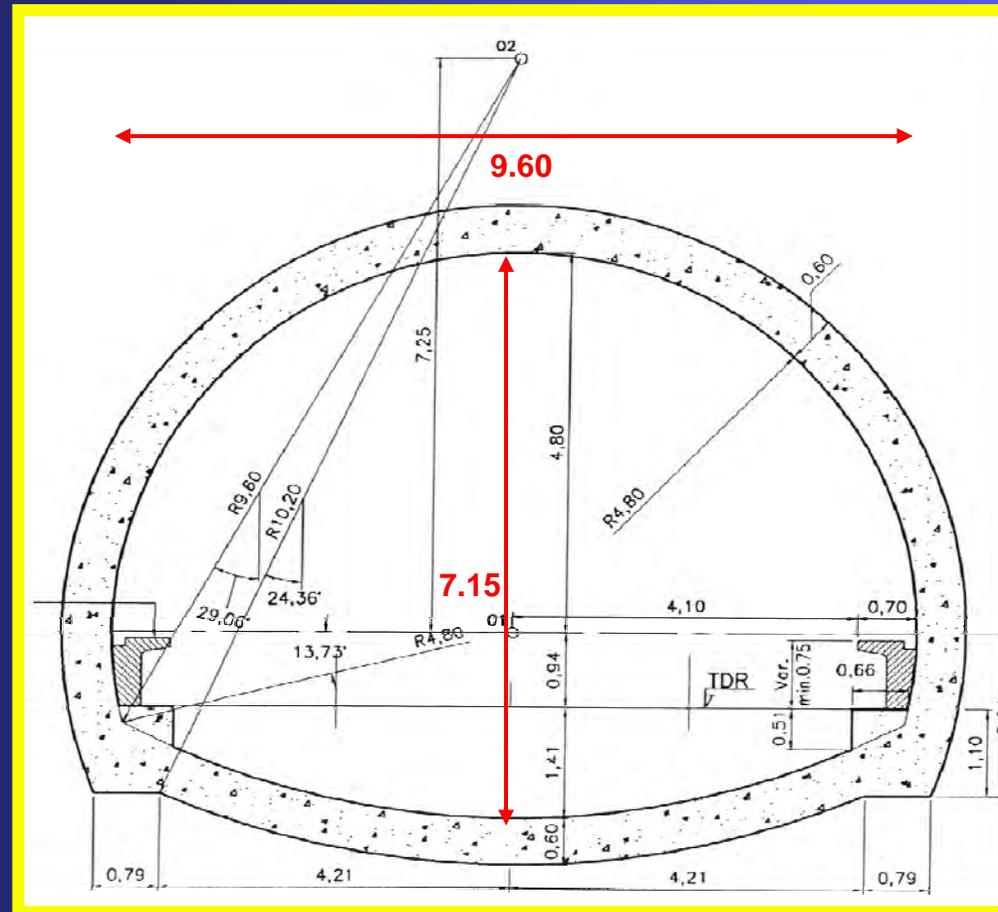
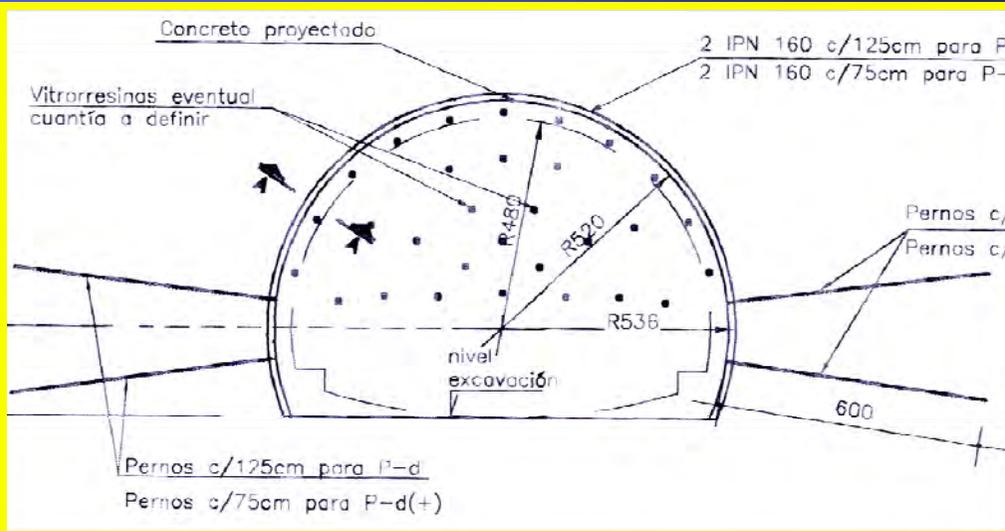
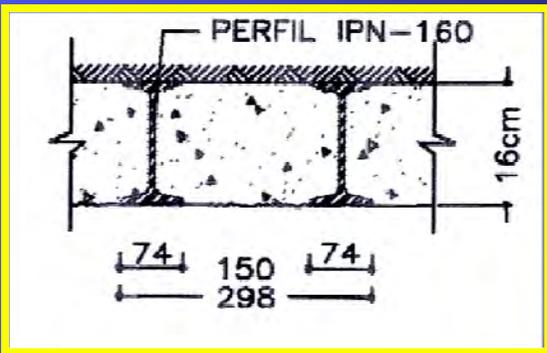
Metro Los Teques

METRO LOS TEQUES (Las Adjuntas - El Tambor) L= 9.000 m

<i>PROYECTO ORIGINAL</i>		<i>PROYECTO MODIFICADO</i>	
<i>Túneles</i>	<i>Longitud</i>	<i>Túneles</i>	<i>Longitud</i>
CORRAL DE PIEDRAS	635 m	CORRAL DE PIEDRAS	1.147 m
		CALIFORNIA 1	265 m
		CALIFORNIA 2	470 m
LA LINEA	224 m	LA LINEA	224 m
RIO CRISTAL	169 m	RIO CRISTAL	169 m
CARRIZALITO 1	735 m	CARRIZALITO	3.560 m
CARRIZALITO 2	118 m		
ZENDA	334 m		
LA ESPERANZA	200 m		
TOTAL Túneles	2.416 m	TOTAL Túneles	5.835 m

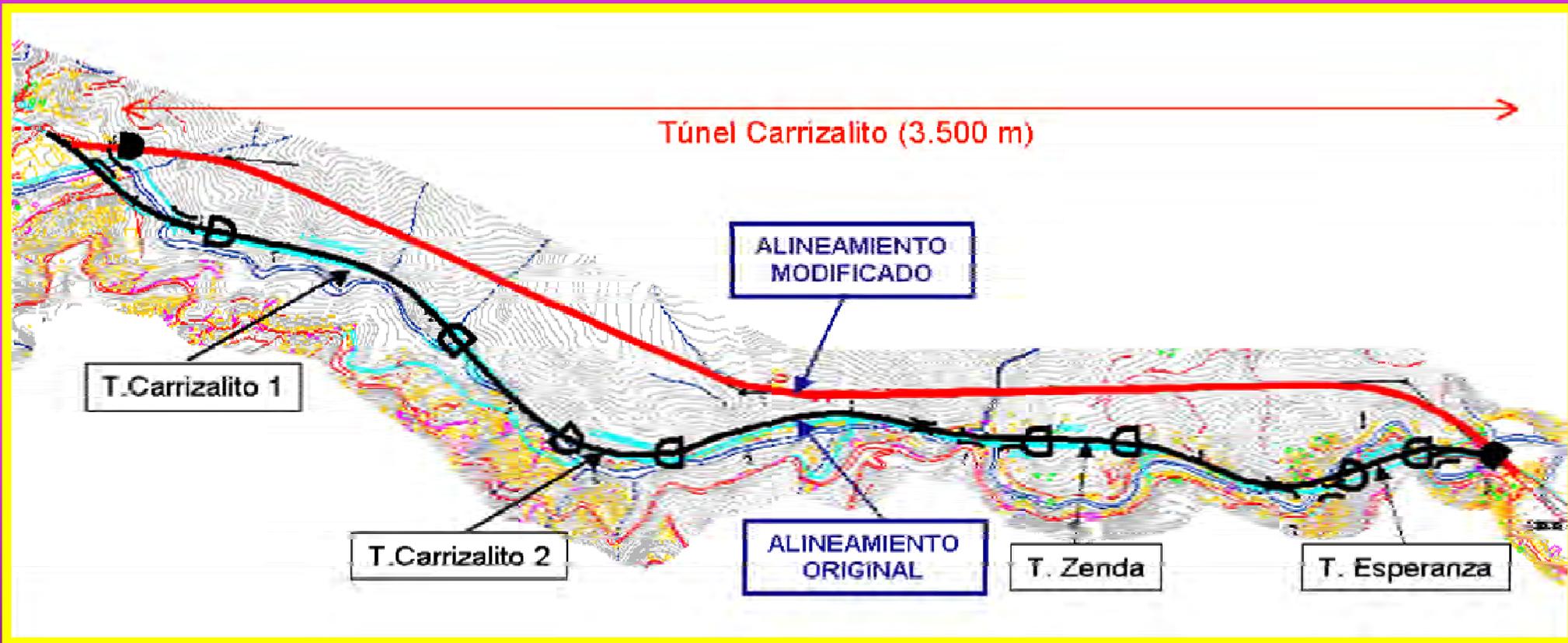
Metro Los Teques

Soporte Primario y Revestimiento



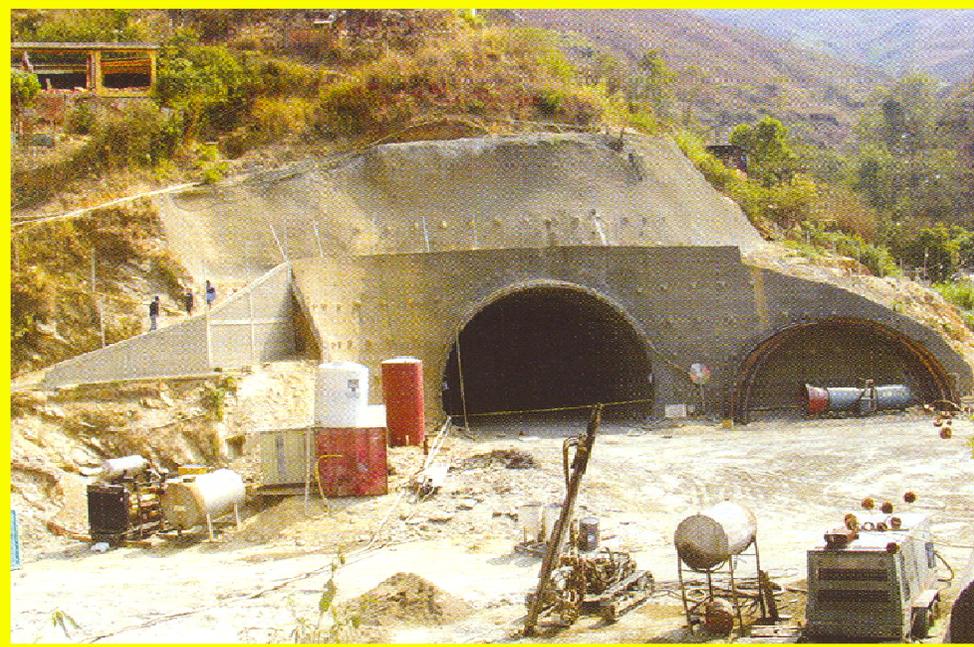
Metro Los Teques

Túnel Carrizalito



Metro Los Teques

Portales de entrada y de salida del Túnel Carrizalito



Metro Los Teques

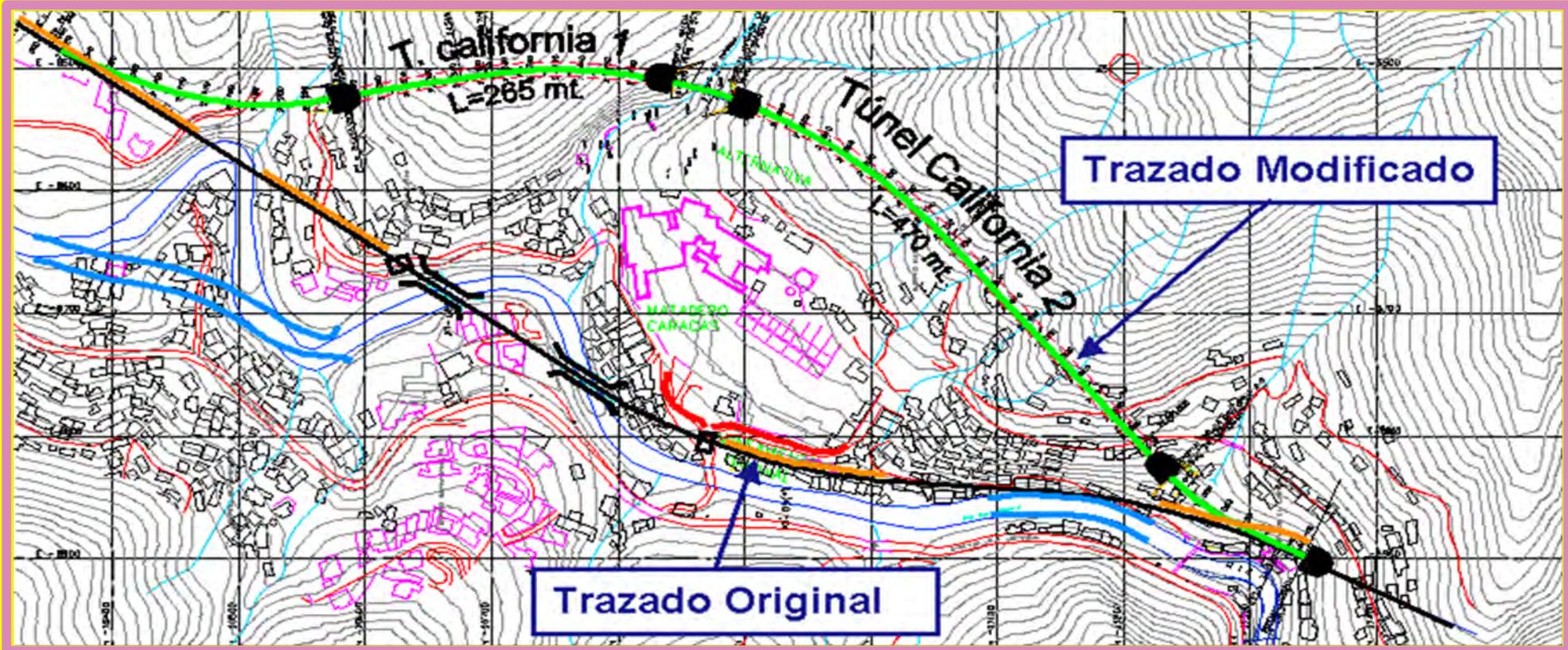
Portales externo e interno de la Ventana Carrizalito





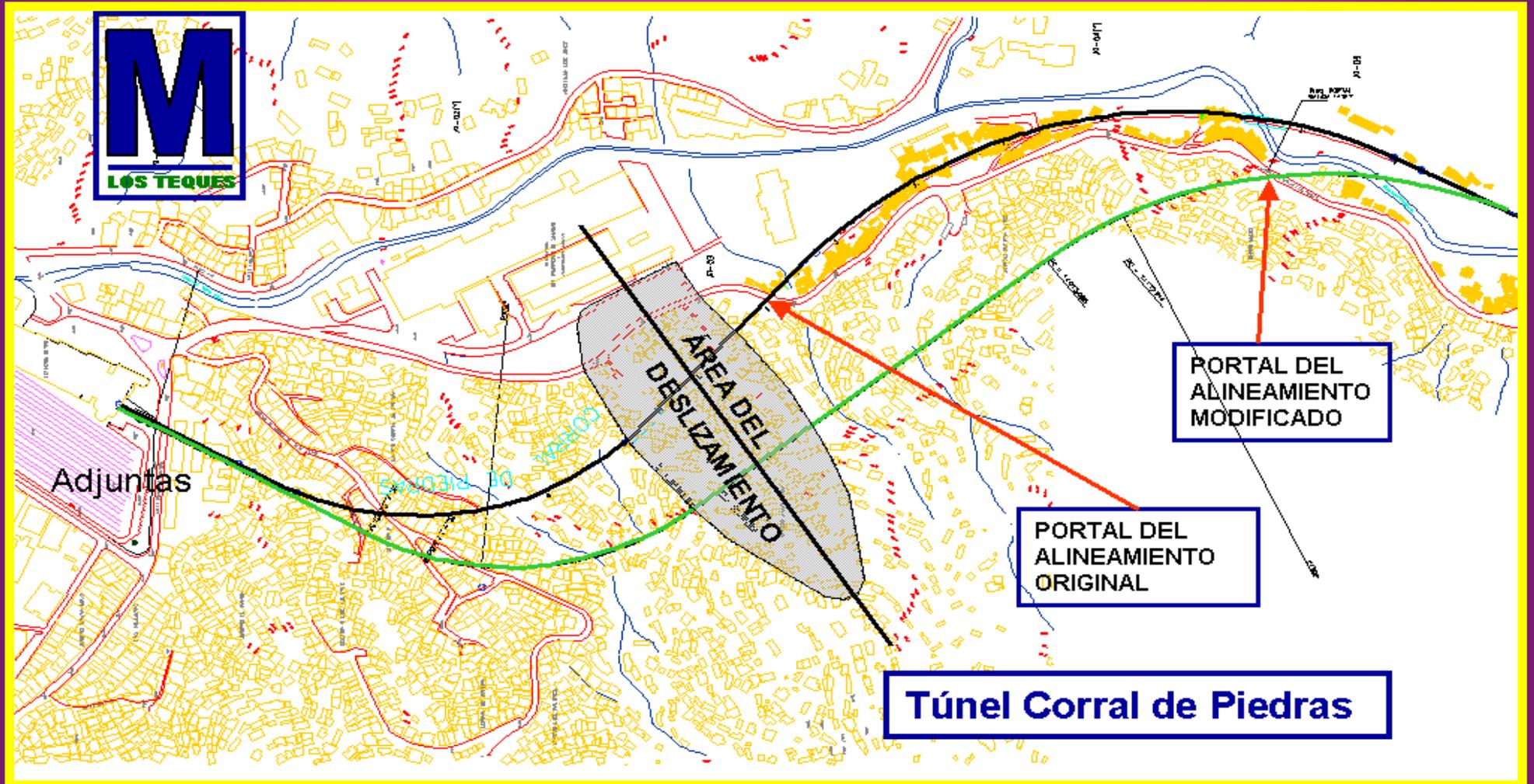
Metro Los Teques

Túneles California



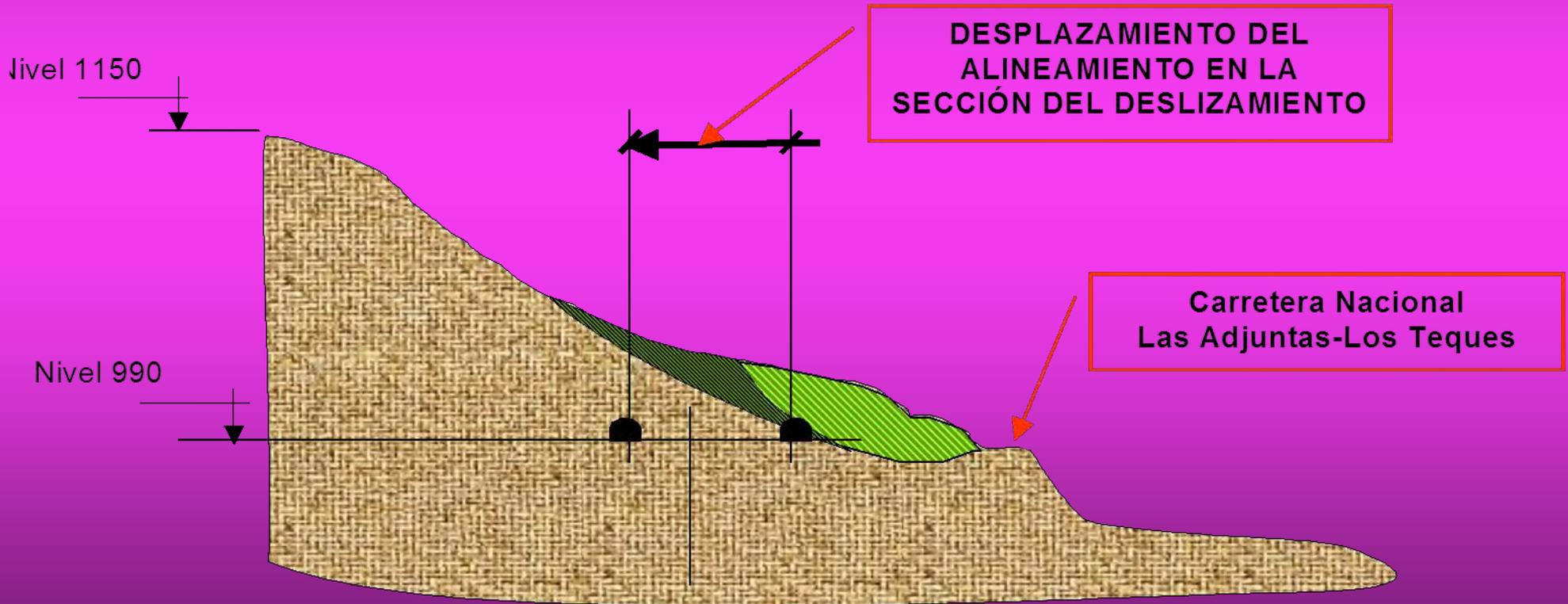
Metro Los Teques

Túnel Corral de Piedras



Metro Los Teques

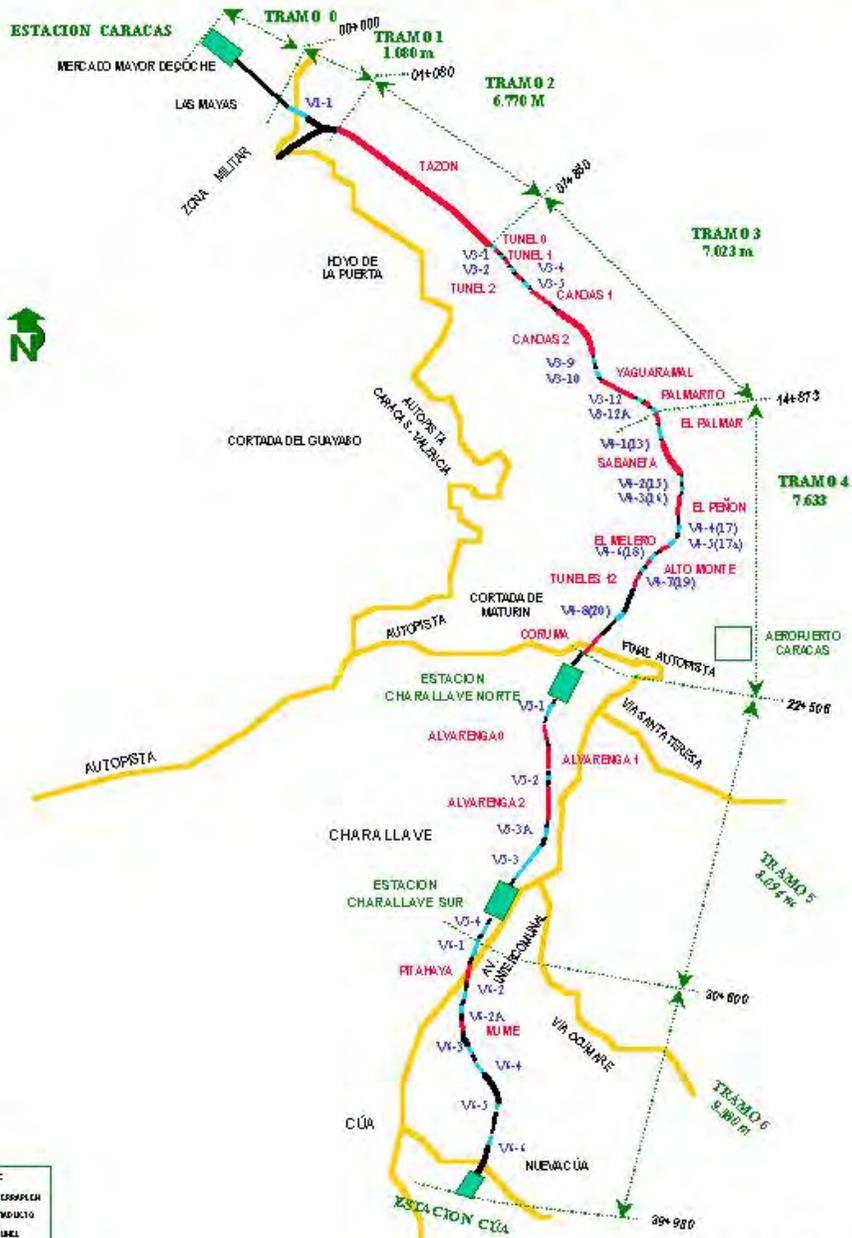
Túnel Corral de Piedras - Deslizamiento de Aguachina



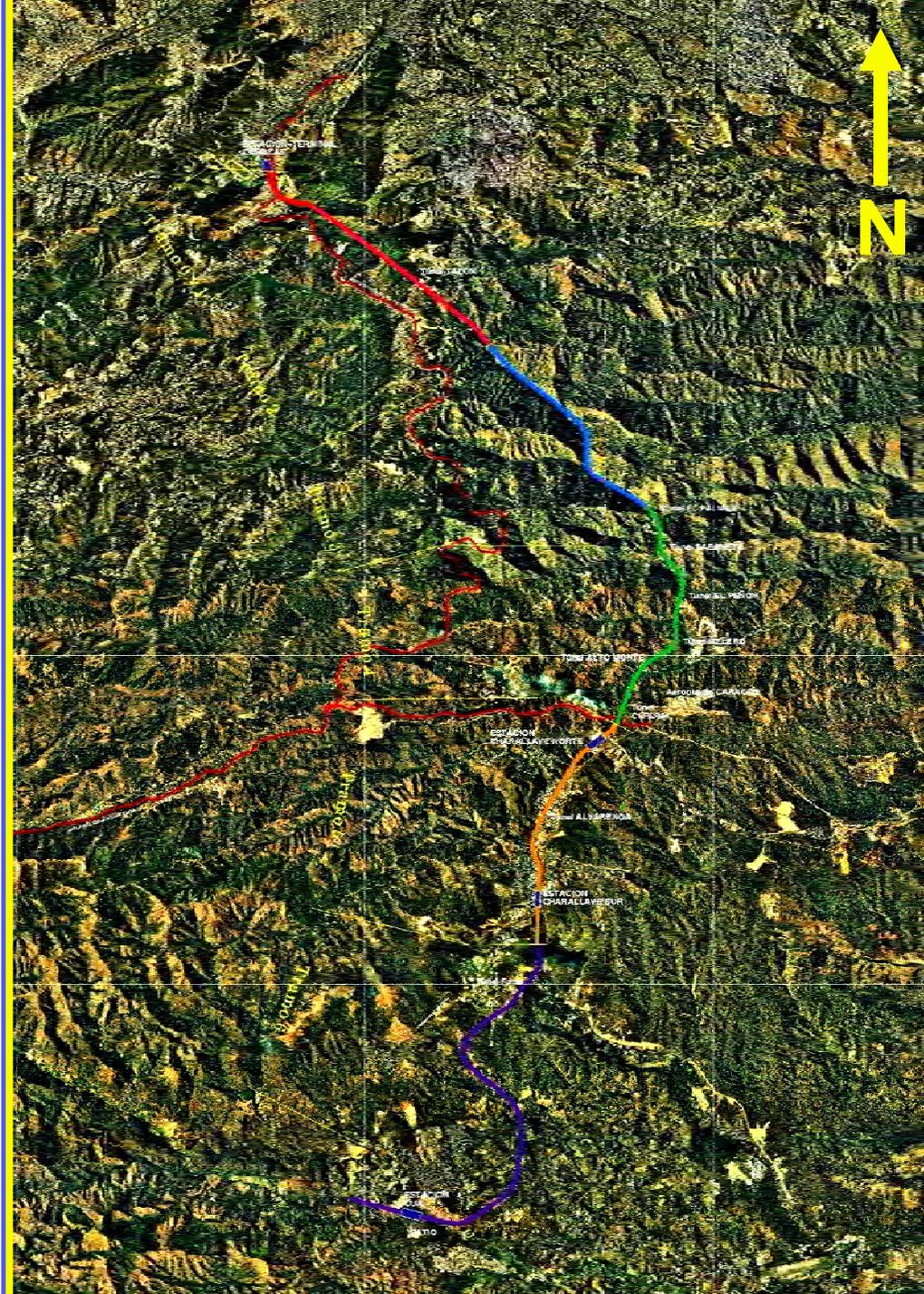


Sistema Ferroviario Región Central

Primera Etapa: Caracas - Tuy Medio



Actualización Octubre 1998

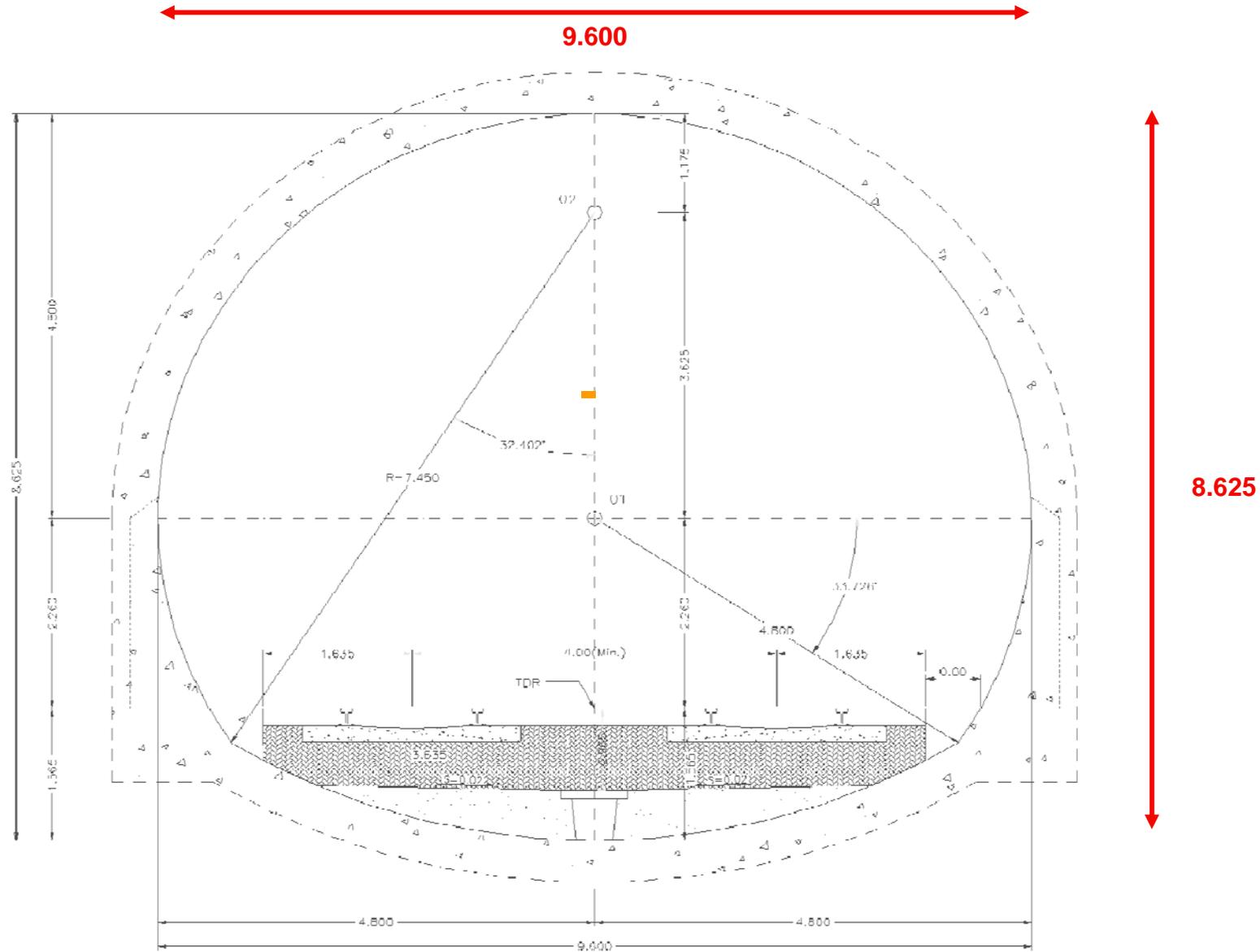


Ferrocarril Caracas-Cúa: 25 Túneles para casi 22 Km

TÚNEL	PROGRESIVA INICIAL	PROGRESIVA FINAL	LONGITUD (m)
TRINCHERA RINCONADA	0+241 y 0+690	0+472 y 0+861	231+169
TÚNEL LA RINCONADA	0+472	0+690	218
TÚNEL LAS MAYAS	0+861	1+429	568
TÚNEL TAZON	1+080	7+845	6765
TUNEL 0	8+400	8+455	55
TÚNEL 1	8+738	8+965	227
TÚNEL 2	9+296	9+452	156
CANOAS 1	9+575	10+815	1240
CANOAS 2	10+958	12+596	1638
LA LOMA	12+694	12+805	111
YAGUARAMAL	12+934	14+554	1620
PALMARITO	14+671	14+741	70
PALMAR	14+956	15+301	345
SABANETA	15+613	17+042	1429
PEÑON	17+420	18+158	738
MELERO	18+859	19+763	904
ALTO MONTE	20+121	20+404	283
TÚNEL 12 NORTE	20+690	20+793	103
TÚNEL 12 SUR	20+814	20+943	127
CORUMA	21+530	22+500	970
ALVARENGA 0	24+619	24+801	182
ALVARENGA 1	24+868	25+234	366
ALVARENGA 2	25+327	26+496	1169
PITAHAYA	31+890	32+455	565
MUME	34+280	34+500	220

Ferrocarril Caracas-Cúa

SECCIÓN ESTANDAR



Ferrocarril Caracas-Cúa



Ferrocarril Puerto Cabello – La Encrucijada de Cagua



14
Túneles

33 Km



Ferrocarril Puerto Cabello-Cagua: 14 Túneles para más de 33 Km



TÚNEL	PROGRESIVA INICIAL	PROGRESIVA FINAL	LONGITUD (m)
Túnel Marroncito	1+463,202	3+732,754	2 2 6 9
Túnel Sanchón	4+209,392	6+873,920	2 6 6 4
Túnel Pequeño	7+254,947	7+607,127	3 5 2
Túnel Pastora	7+951,850	8+865,141	9 1 3
Túnel Corona	9+061,432.	14+140,100	5 0 7 8
Túnel San Pablo	14+397,406	20+590,000	6 1 9 2
Túnel Guaremal	20+853,000	23+836,880	2 9 8 3
Túnel Bárbula	24+094,436	31+890,000	7 7 9 5
Túnel Montaserino	36+263,404	37+545,000	1 2 8 1
Túnel San Diego	49+315,649	49+619,871	3 0 4
Túnel Guacara	55+640,000	56+284,000	6 4 4
Túnel San Joaquín	70+057,000	70+592,124	5 3 5
Túnel Cabrera	84+125,000	84+978,170	8 5 3
Túnel Tapatapa	86+546,000	87+677,180	1 1 3 1

Ferrocarril La Encrucijada – Puerto Cabello



Ferrocarril San Juan de los morros – San Fernando de Apure



Ferrocarril San Juan de los morros – San Fernando de Apure

10 Túneles para más de 15 Km

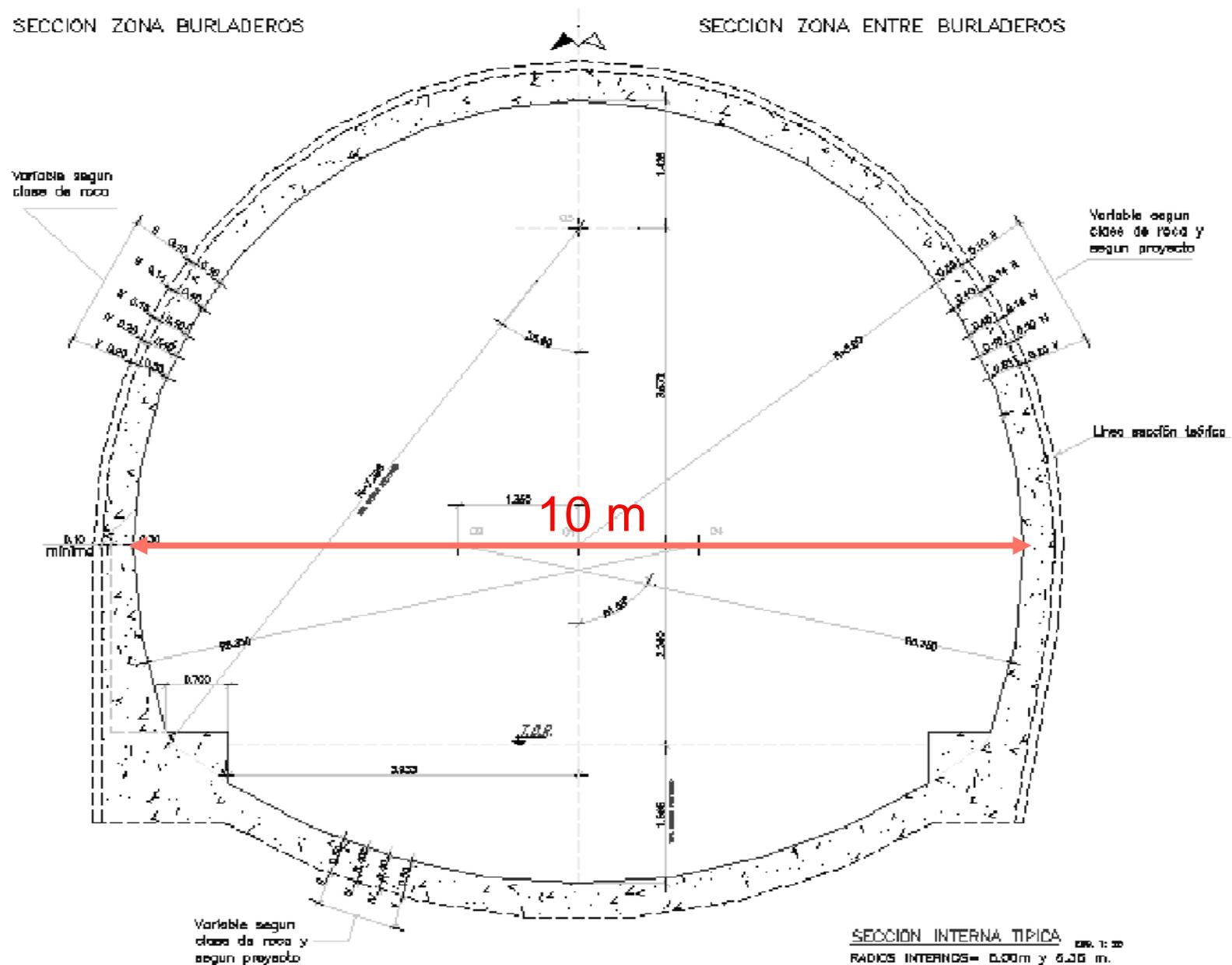
<i>Túnel</i>	<i>Progresivas (Km+m)</i>	<i>Longitud (m)</i>	<i>Cobertura max (m)</i>
Túnel San Juan	2+300 – 8+600	6.300	150
Túnel Intermedio	18+347 – 19+697	1.350	50
Túnel Florida	21+200 – 22+930	1.730	50
Túnel Uverito	22+100 – 23+800	1.700	250
Túnel El Toco	24+200 - 24+800	600	50
Túnel Loma Linda	25+200 – 26+100	900	50
Túnel Caruata	26+500 – 27+000	500	50
Túnel Guatacarazo	32+300 – 33+200	900	100
Túnel Corocito	35+700 – 36+500	800	100
Túnel Mamoncito	38+450 – 39+700	1.250	100

Ferrocarril San Juan de los morros – San Fernando de Apure

SECCIÓN ESTANDAR

SECCIÓN ZONA BURLADEROS

SECCIÓN ZONA ENTRE BURLADEROS



GEOMECÁNICA SOPORTES Y REVESTIMIENTOS

- **Caracterización Geológica Geofísica y Geomecánica**
- **Estima de la Clase de Comportamiento de la Excavación**
 - * En función de la geo-macro-estructura del macizo rocoso
 - * En función de los niveles geo-tensionales relativos
- **Pre-selección del Soporte (* En función de la C.d.C.)**
- **Determinación de las cargas a esperar sobre el soporte**
 - * En función del comportamiento geo-estático y geo-mecánico
- **Dimensionado del soporte (* En función de las cargas)**
- **Seguimiento y Monitoreo durante la Excavación**
- **Dimensionado del revestimiento**

CLASE DE COMPORTAMIENTO DE LA EXCAVACIÓN

POSIBLES CONDICIONES GEOESTATICAS DURANTE LA EXCAVACION DE UN TUNEL

I

a/b

A

II

c
d

B
C

III

e
f

D
E

I Comportamiento a frente estable o, de tipo lapídeo

La concentración de esfuerzos en el terreno al frente y al contorno de la cavidad no supera la resistencia del medio.

Los fenómenos de deformación evolucionan en campo elástico, son inmediatos y de orden centimétrico.

El frente de excavación es globalmente estable y se pueden producir solamente inestabilidades localizadas de caída de bloques aislados debido a desfavorables circunstancias geométricas y estructurales del terreno.

Las intervenciones de protección o estabilización están principalmente dirigidas a evitar eventuales desprendimientos localizados del terreno.

II Comportamiento a frente estable a corto plazo, o de tipo cohesivo

La concentración de esfuerzos al frente y al contorno de la cavidad, supera el límite del campo elástico del medio.

Los fenómenos de deformación evolucionan en campo elástico-plástico, son algo diferidos en el tiempo, son de orden decimétrico y no condicionan la estabilidad ya que el terreno está aún en condición de movilizar resistencia suficiente.

*Los fenómenos de inestabilidad, bajo la forma de desprendimientos localizados presentes en el frente y contorno de la cavidad, dejan en general el tiempo de actuar después de un relativamente limitado alejamiento del frente, mediante **intervenciones tradicionales de contención radial** aunque, en raras circunstancias, puede resultar necesario recurrir al empleo de algunas acciones de pre-consolidación y/o de pre-contención.*

III

Comportamiento a frente inestable, o de tipo incoherente

La concentración de esfuerzos al frente y al contorno de la cavidad, supera la resistencia del medio.

Los fenómenos de deformación resultan inaceptables ya que evolucionan rápidamente hacia la ruptura dando lugar a graves manifestaciones de inestabilidad hasta la caída del frente y el colapso de la cavidad, sin dejar el tiempo de actuar con intervenciones de contención radial.

*Se requieren por lo tanto siempre **intervenciones de pre-consolidación y/o pre-contención** a monte del frente de excavación.*

I Intervenciones de protección

- * *Concreto proyectado*
- * *Pernos aislados*

II Intervenciones tradicionales de contención radial

- * *Concreto proyectado y Pernos sistemáticos*
- * *Concreto proyectado y Costillas (eventualmente con Pernos)*

III Intervenciones de pre-consolidación y/o pre-contención

- * *Concreto proyectado costillas y pernos*
- * *Vidrioresinas de consolidación del núcleo*
- * *Pernos en avance*
- * *Arco troncocónico de micropilotes o, de jet grouting*
- * *Arco troncocónico en pre-corte de concreto*
- * *Solera temporal (eventualmente a media sección)*
- *

TÍPICOS SOPORTES EMPLEADOS EN VENEZUELA para túneles de aproximadamente 10m de diámetro

<i>TIPO DE SOPORTE</i>	<i>Concreto Proyectado Fibroreforzado</i>	<i>Costillas Metálicas</i>	<i>Pernos Metálicos 20 t</i>
SP-a	10 cm ($f_{eq} \geq 1$ MPa)	-	eventuales
SP-b	14 cm ($f_{eq} = 1-1.25$ MPa)	2 IPN140 @ 150 cm	2 x 4 m @ par de costillas
		o, alternamente 7 pernos x 4m @ 150 cm (sin costillas)	
SP-c	16 cm ($f_{eq} = 1-1.25$ MPa)	2 IPN160 @ 125 cm	4 x 6 m @ par de costillas
		o, alternamente 11 pernos x 6m @ 125 cm (sin costillas)	
SP-d	20 cm ($f_{eq} = 1-1.25$ MPa)	2 IPN200 @ 100 cm	6 x 6 m @ par de costillas
		o, alternamente 15 pernos x 6m @ 100 cm (sin costillas)	
SP-e	20 cm ($f_{eq} = 1.25-1.5$ MPa)	2 IPN200 @ 075 cm	10 x 6 m @ par de costillas

Clase de Comportamiento " A "



Clase de Comportamiento "A"



21 6 2005



Clase de Comportamiento " A "



Clase de Comportamiento " B "



Clase de Comportamiento “ B ”



Clase de Comportamiento " B "

12 4 2005



Clase de Comportamiento " C "



Clase de Comportamiento " C "



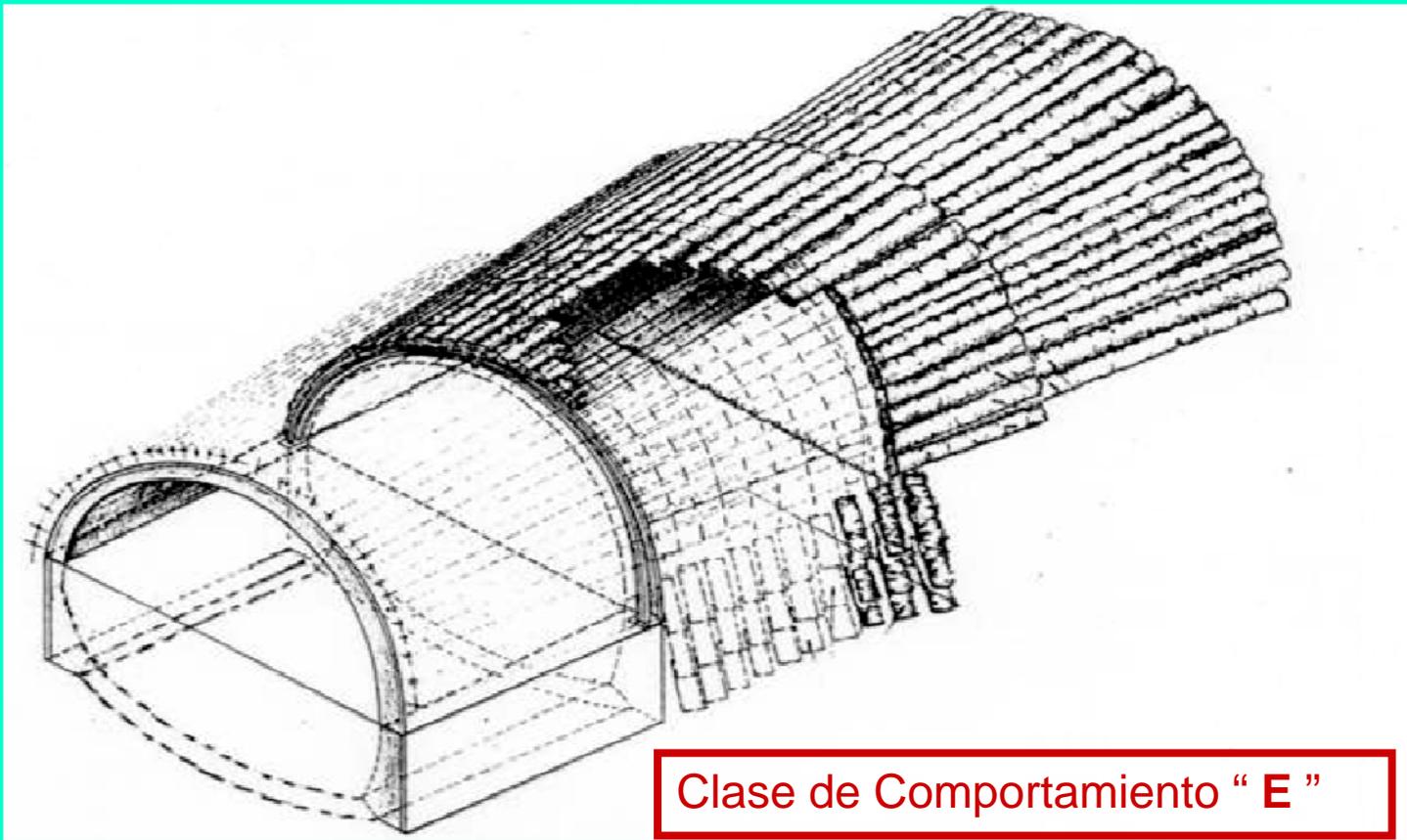
Clase de Comportamiento " D "



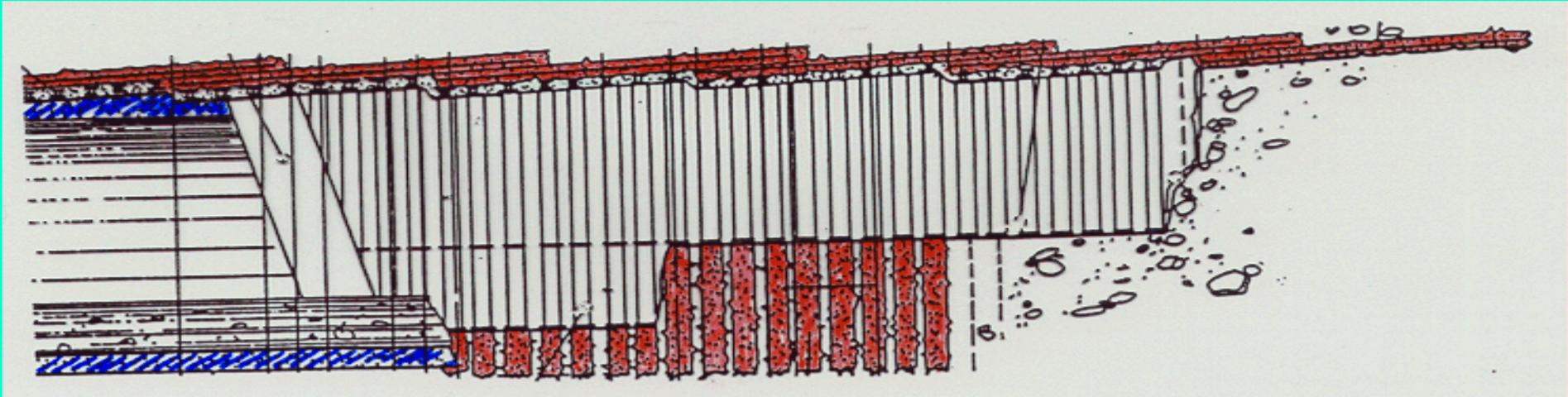
Clase de Comportamiento " D "

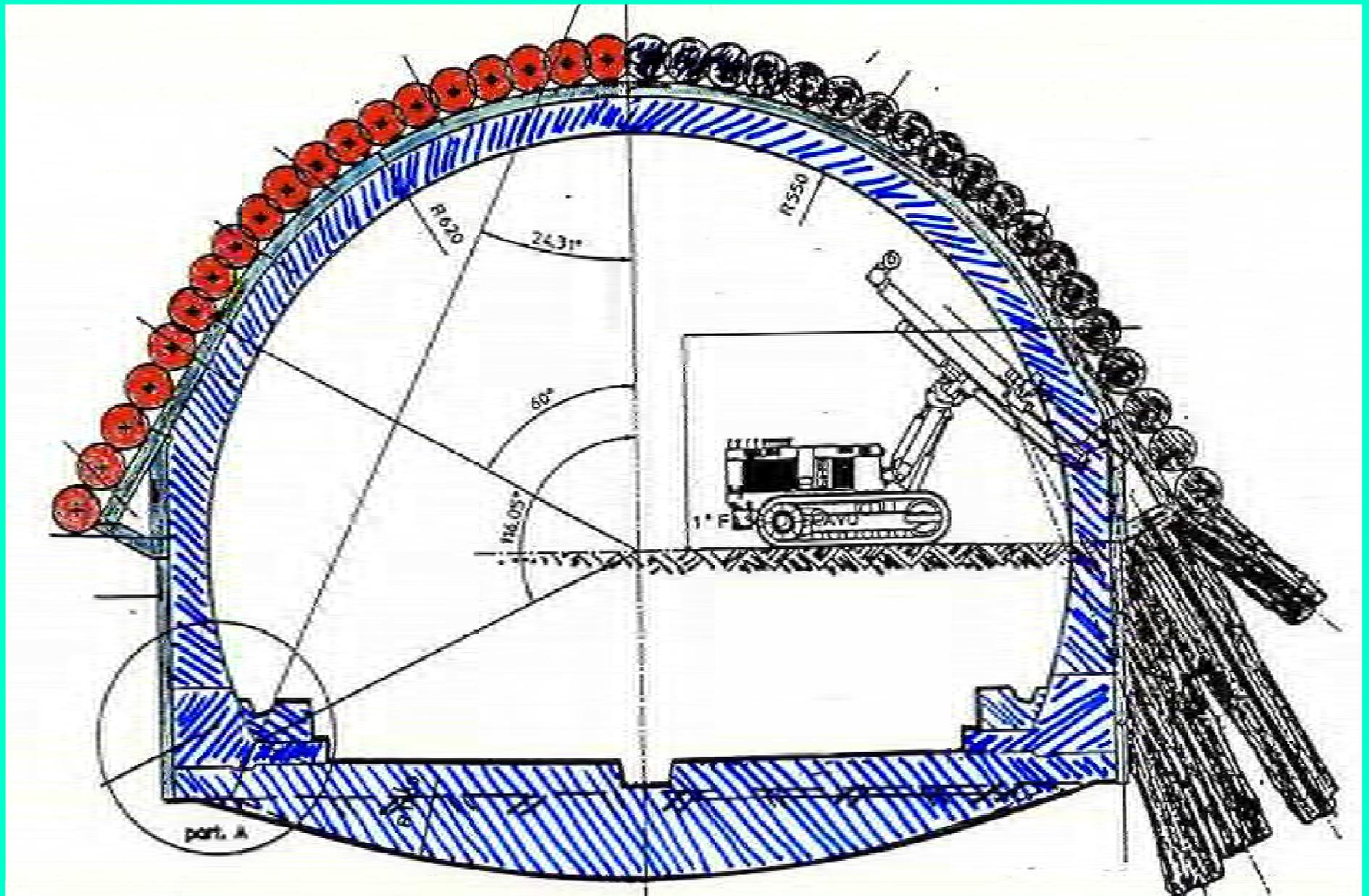
Clase de Comportamiento “ D ”





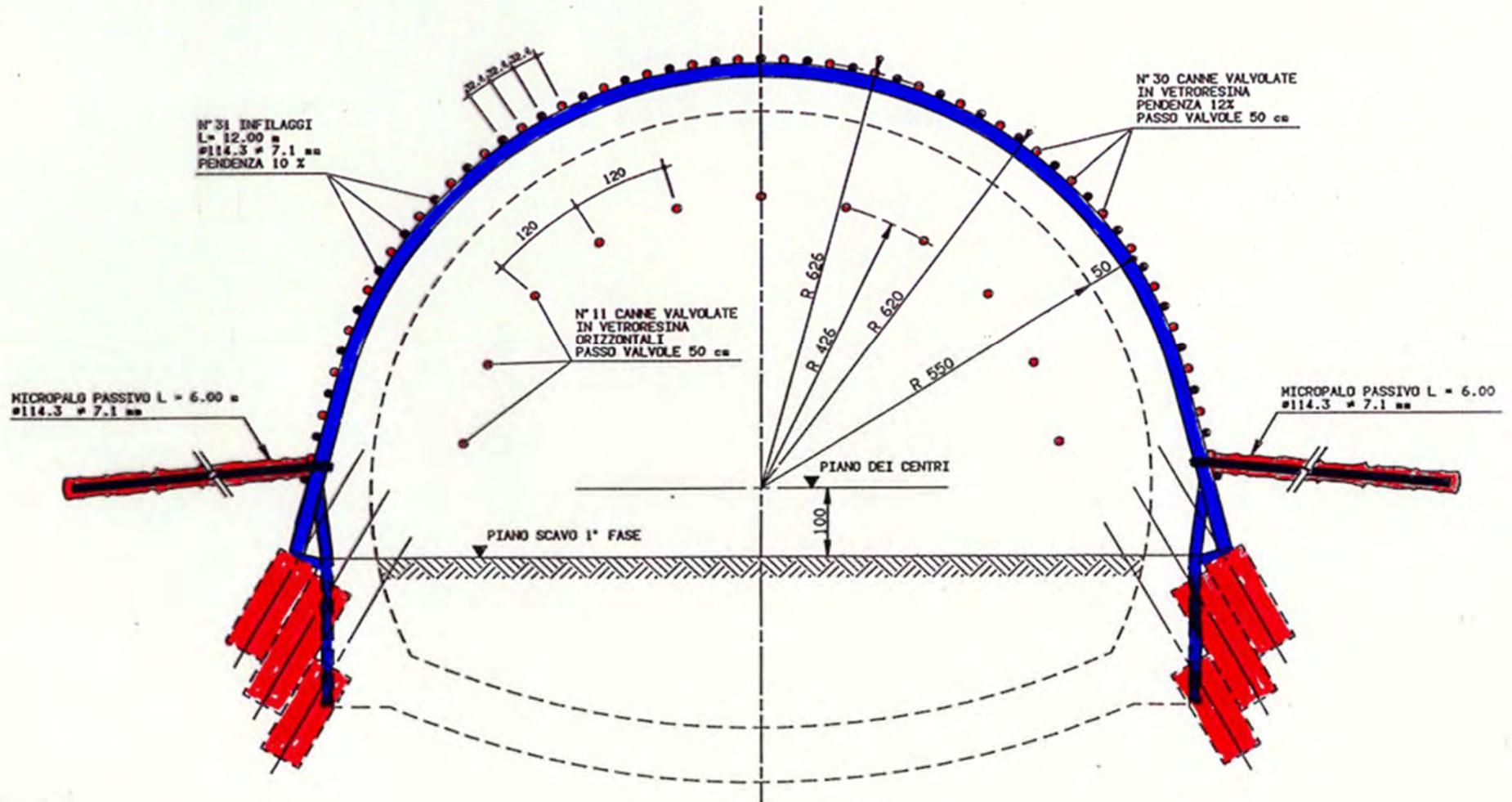
Clase de Comportamiento " E "



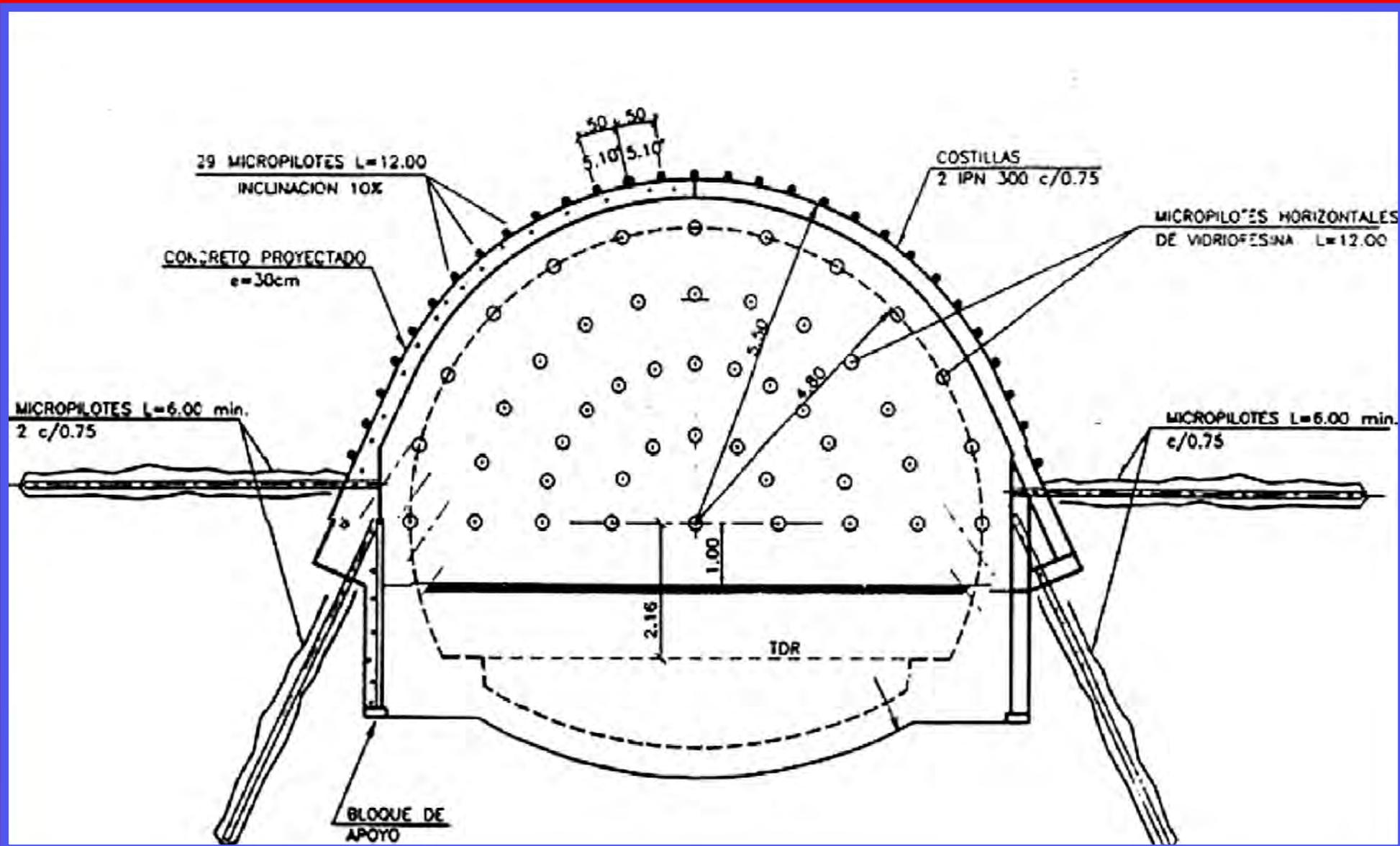


Clase de Comportamiento " E "

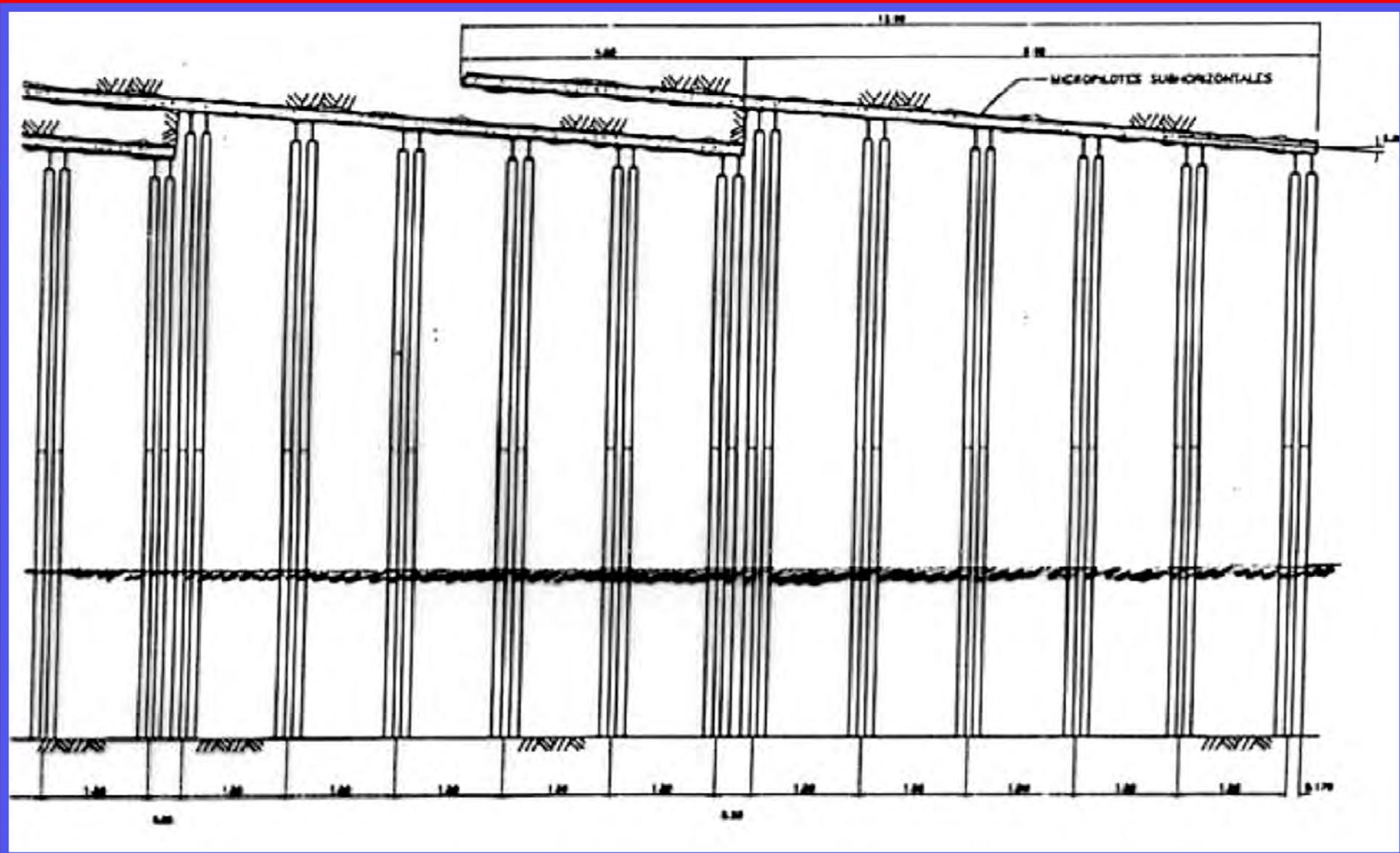
CONSOLIDAMENTO DELLA CALOTTA CON INFILAGGI
SEZIONE DEL FRONTE (INIZIO VOLATA)



Clase de Comportamiento " E "



Clase de Comportamiento " E "



Clase de Comportamiento " E "















Clase de Comportamiento “ E ”

Clase de Comportamiento “ dudoso ”



12 7 2005

I Intervenciones de protección

- * *Concreto proyectado*
- * *Pernos aislados*

II Intervenciones tradicionales de contención radial

- * *Concreto proyectado y Pernos sistemáticos*
- * *Concreto proyectado y Costillas (eventualmente con Pernos)*

III Intervenciones de pre-consolidación y/o pre-contención

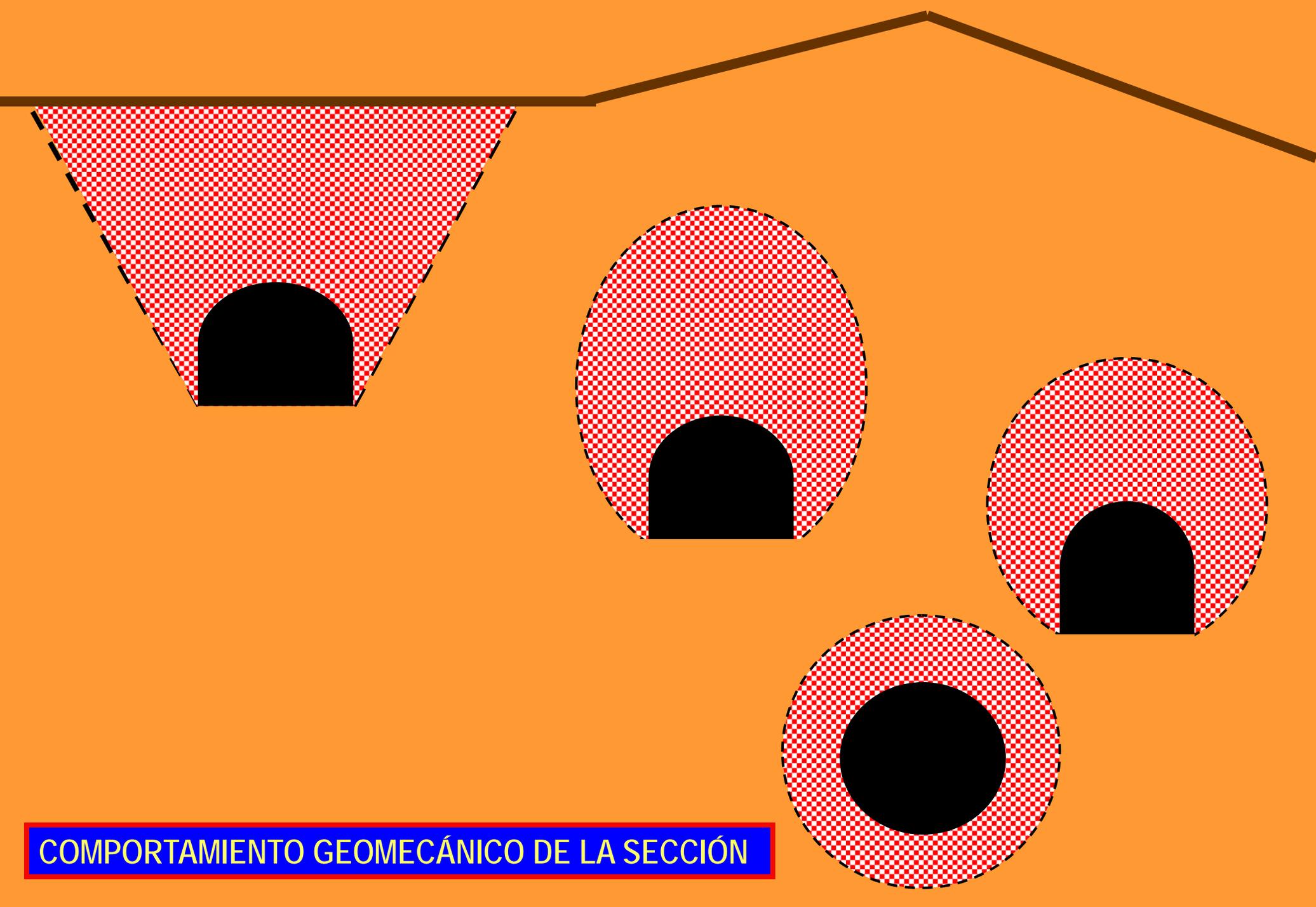
- * *Concreto proyectado costillas y pernos*
- * *Vidrioresinas de consolidación del núcleo*
- * *Pernos en avance*
- * *Arco troncocónico de micropilotes o, de jet grouting*
- * *Arco troncocónico en pre-corte de concreto*
- * *Solera temporal (eventualmente a media sección)*
- *

TÍPICOS SOPORTES EMPLEADOS EN VENEZUELA para túneles de aproximadamente 10m de diámetro

<i>TIPO DE SOPORTE</i>	<i>Concreto Proyectado Fibroreforzado</i>	<i>Costillas Metálicas</i>	<i>Pernos Metálicos 20 t</i>
SP-a	10 cm ($f_{eq} \geq 1$ MPa)	-	eventuales
SP-b	14 cm ($f_{eq} = 1-1.25$ MPa)	2 IPN140 @ 150 cm	2 x 4 m @ par de costillas
		o, alternamente 7 pernos x 4m @ 150 cm (sin costillas)	
SP-c	16 cm ($f_{eq} = 1-1.25$ MPa)	2 IPN160 @ 125 cm	4 x 6 m @ par de costillas
		o, alternamente 11 pernos x 6m @ 125 cm (sin costillas)	
SP-d	20 cm ($f_{eq} = 1-1.25$ MPa)	2 IPN200 @ 100 cm	6 x 6 m @ par de costillas
		o, alternamente 15 pernos x 6m @ 100 cm (sin costillas)	
SP-e	20 cm ($f_{eq} = 1.25-1.5$ MPa)	2 IPN200 @ 075 cm	10 x 6 m @ par de costillas

GEOMECÁNICA SOPORTES Y REVESTIMIENTOS

- Caracterización Geológica Geofísica y Geomecánica
- **Estima de la Clase de Comportamiento de la Excavación**
 - * En función de la geo-macro-estructura del macizo rocoso
 - * En función de los niveles geo-tensionales relativos
- **Pre-selección del Soporte (* En función de la C.d.C.)**
- Determinación de las cargas a esperar sobre el soporte
 - * En función del comportamiento geo-estático y geo-mecánico
- Dimensionado del soporte (* En función de las cargas)
- Seguimiento y Monitoreo durante la Excavación
- Dimensionado del revestimiento



COMPORTAMIENTO GEOMECÁNICO DE LA SECCIÓN

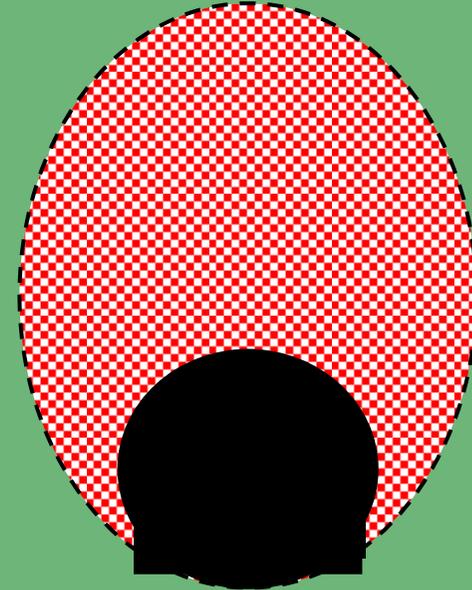
α de Terzaghi

RMR de Bieniawski

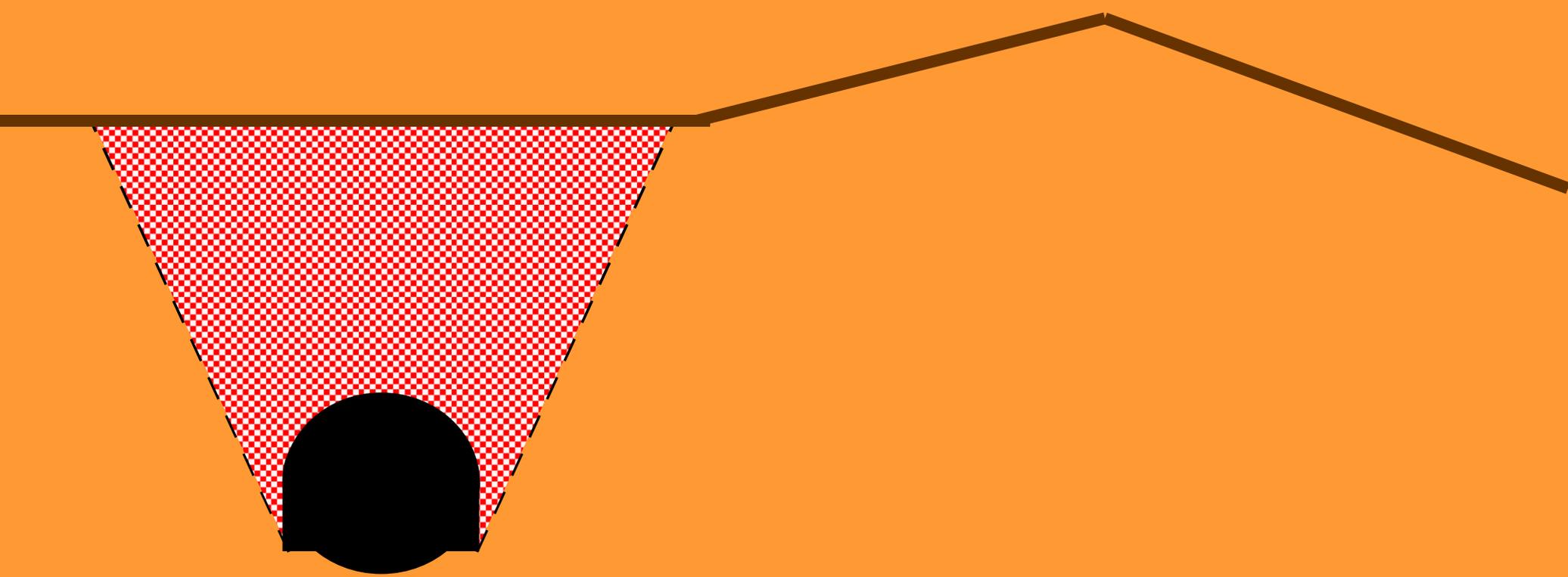
Q^* de Barton

RMi de Palmstron

GSI de Hoek

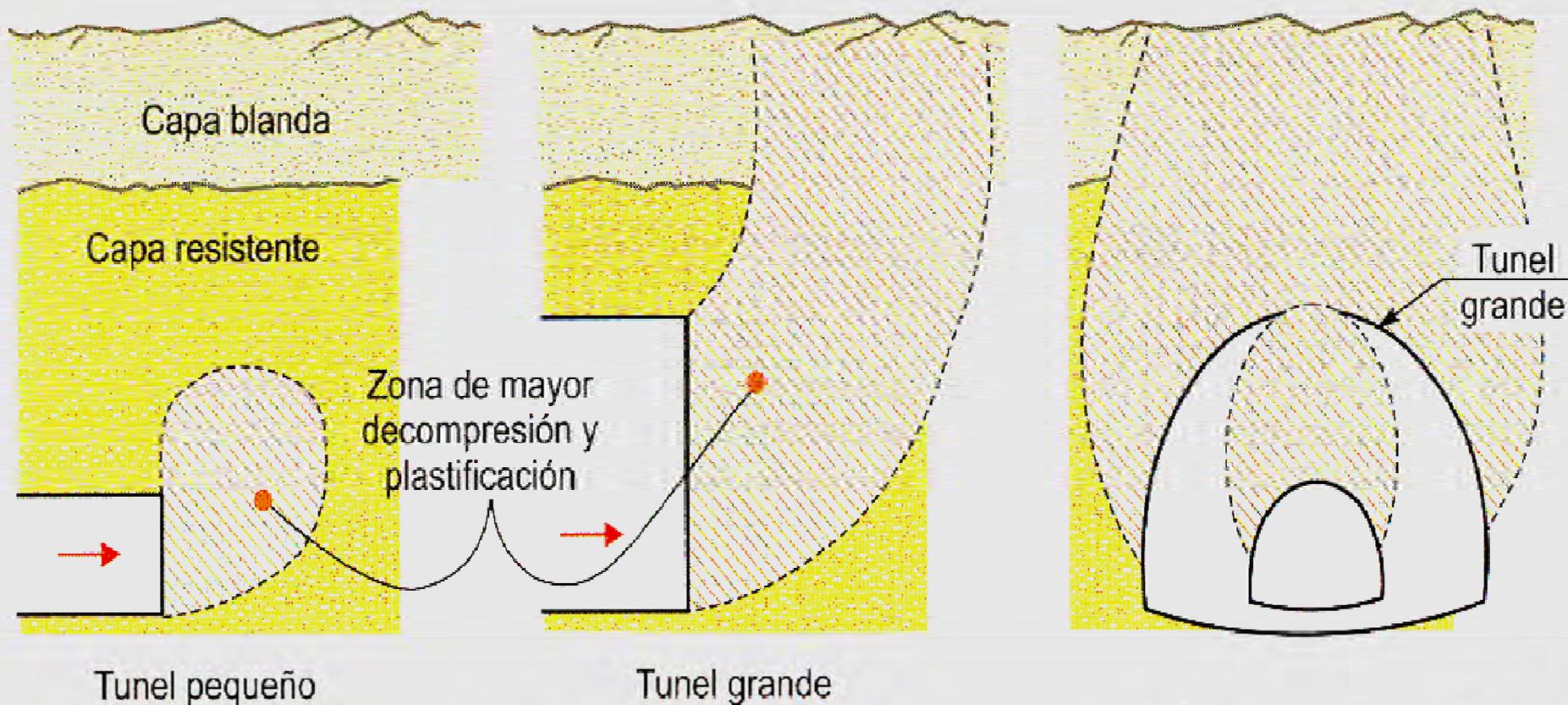


Comportamiento Geomecánico de las Secciones Intermedias



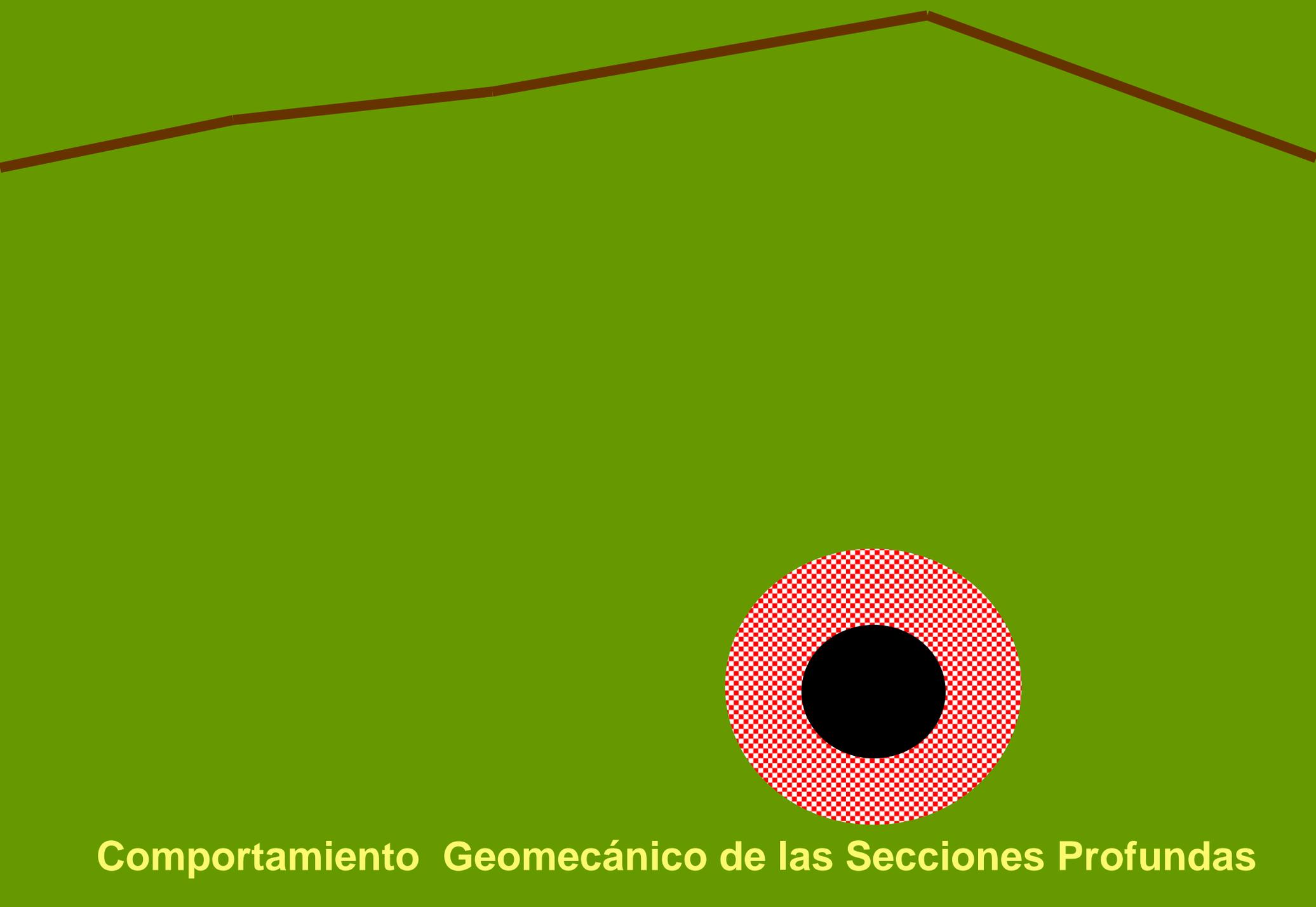
Comportamiento Geomecánico de las Secciones Superficiales

Comportamiento Geomecánico de las Secciones Superficiales



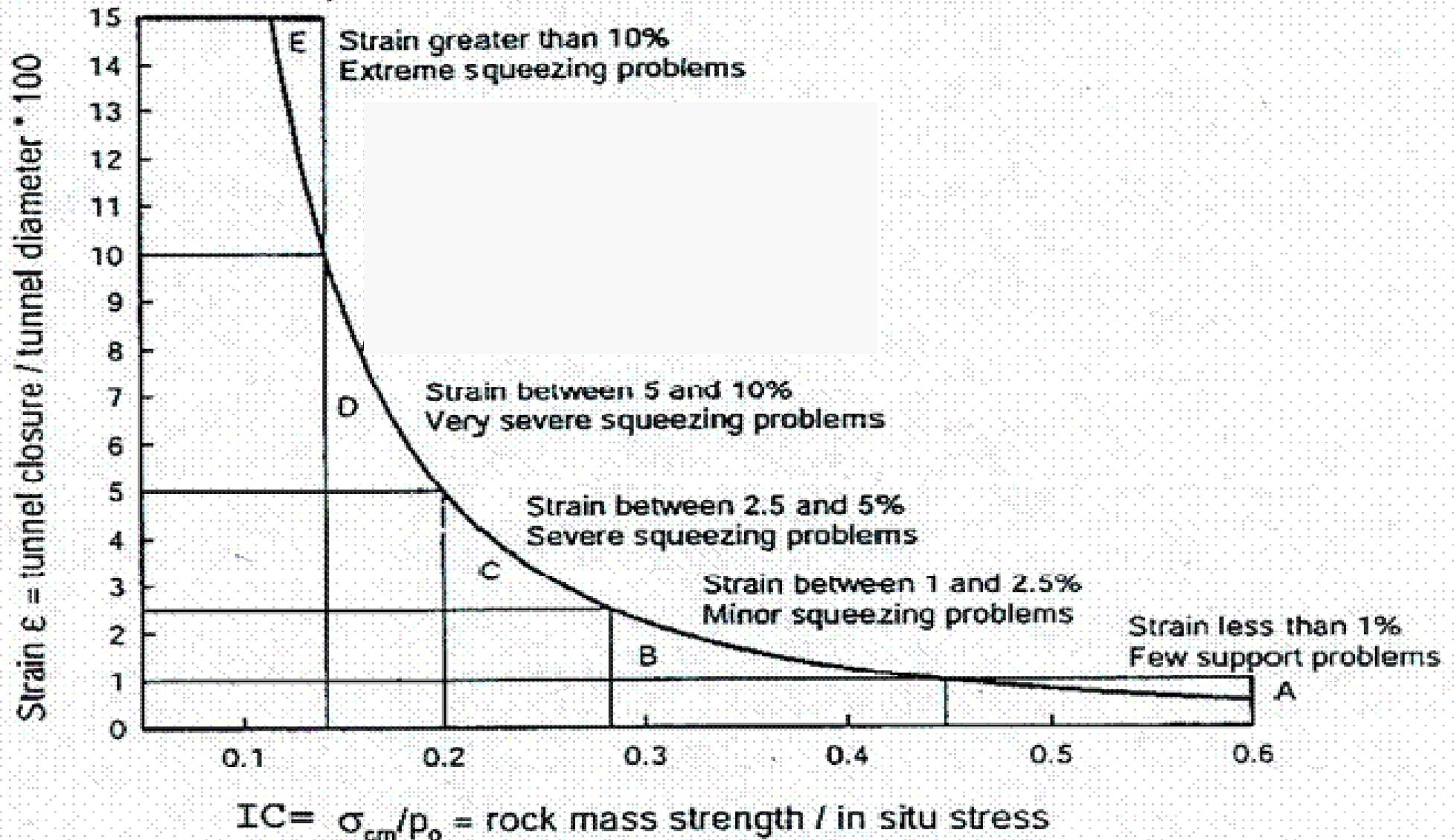
a) Sección longitudinal

b) Sección transversal



Comportamiento Geomecánico de las Secciones Profundas

Comportamiento Geomecánico de las Secciones Profundas



$$IC = \sigma_{cm} / \gamma H = (0.0034 m^{0.8}) \sigma_{ci} [1.029 + 0.025 e^{-0.1 m}] GSI / \gamma H$$

Clases de Comportamiento de la Excavación

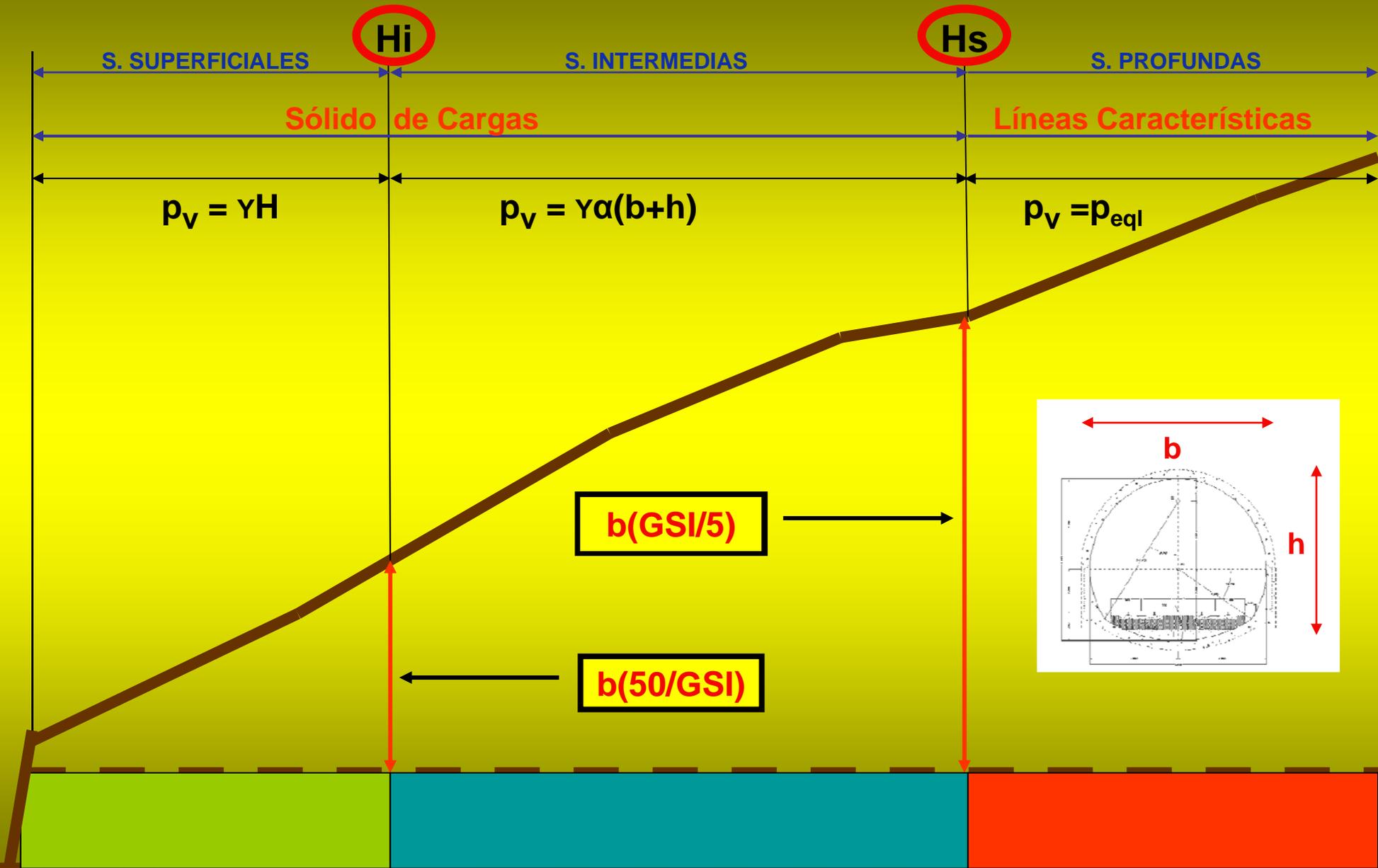
<i>Lunardi</i>		I	II		III	
<i>Hoek y Marinos</i>		A	B	C	D	E
<i>Russo y Otros</i>		a-b	c	d	e	f
Secciones Profundas	<i>Convergencia</i>	$\varepsilon < 1\%$ $\delta < 0.5\%$	$(1\% < \varepsilon < 2.5\%)$ $\delta < 0.5\%$	$(2.5\% < \varepsilon < 5\%)$ $(0.5\% < \delta < 1\%)$	$(5\% < \varepsilon < 10\%)$ $\delta > 1\%$	$\varepsilon > 10\%$ $\delta > 1\%$
	<i>Índice de Competencia</i>	$IC > 0.45$	$(0.45 > IC > 0.3)$	$(0.3 > IC > 0.2)$	$(0.2 > IC > 0.15)$	$IC < 0.15$
	<i>Radio Plástico</i>	$Rp/Ro = 1$	$(1 < Rp/Ro < 2)$	$(2 < Rp/Ro < 4)$	$Rp/Ro > 4$	$Rp/Ro >> 4$
Secciones Intermedias	GSI <i>(RMR-Q-RSR-Rmi)</i>	$GSI > 70$	$70 > GSI > 50$	$50 > GSI > 25$	$25 > GSI > 15$	$GSI < 15$
Secciones Superficiales	<i>(GSI-RMR-Q-RSR-Rmi)</i> <i>Geometría Sección</i> <i>Estabilidad Frente</i>	GSI > 50			GSI < 50	

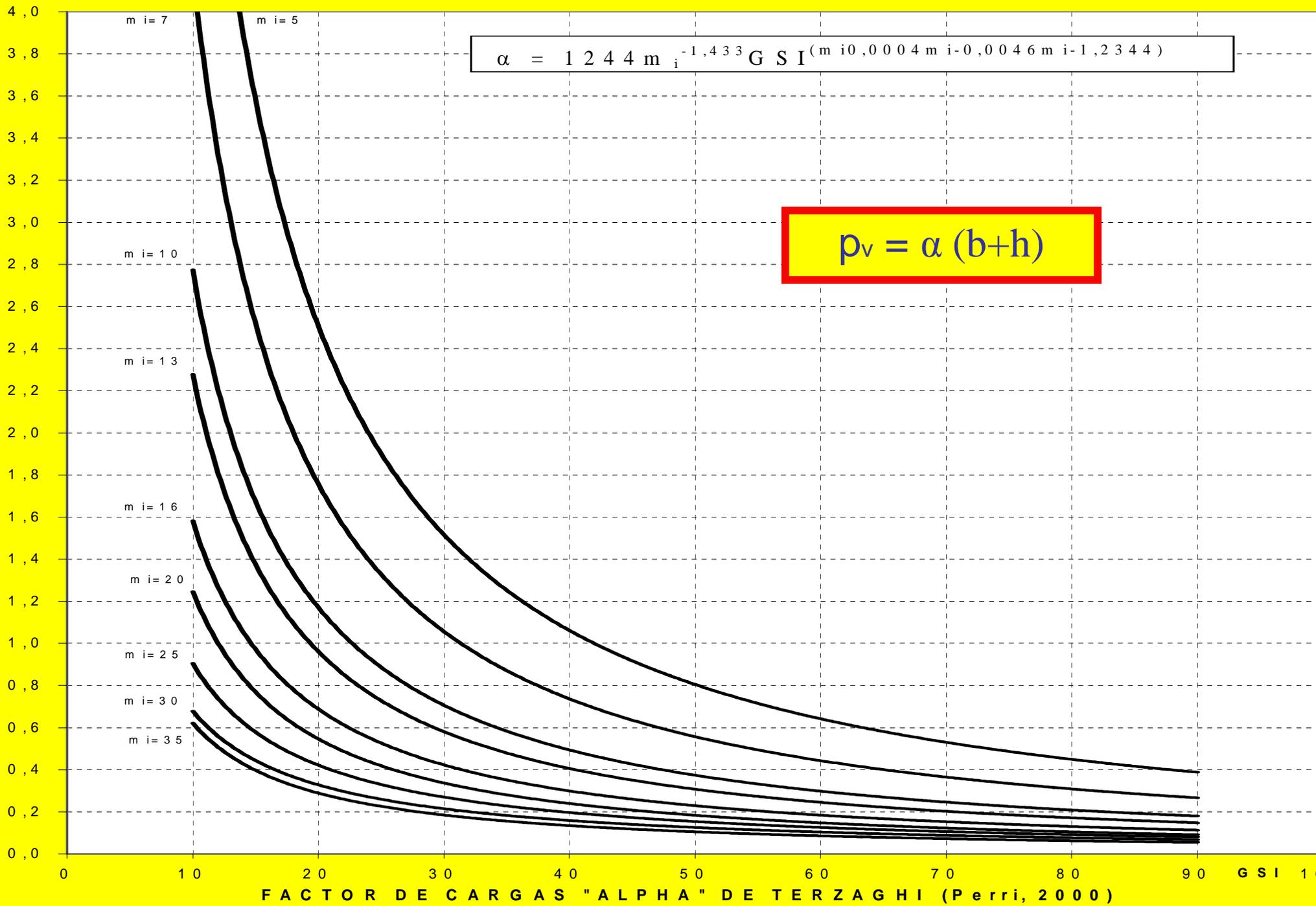
CLASE	COMPORTAMIENTO	COBERTURA		PRESELECCIÓN DEL SOPORTE <i>(Túnel de apr. 10 m de diámetro)</i>
		ALTA IC	BAJA GSI	
A	<p>Estabilidad al frente Estabilidad en la cavidad Eventuales inestabilidades (cinematismos de bloques)</p> <p>$FS_f > 2.5$ $FS_c > 2.5$ $\epsilon < 1\%$ $\epsilon_o < 0.5\%$ $(R_p/R_o = 1)$</p>	> 0.45	> 60	<p>Concreto proyectado (5-10 cm) + Pernos L = 4 m (eventuales)</p>
B	<p>Estabilidad al frente Cavidad algo inestable</p> <p>$FS_f \approx 2$ $FS_c \approx 1$ $1\% < \epsilon < 2.5\%$ $\epsilon_o \leq 0.5\%$ $(1 < R_p/R_o < 2)$</p>	0.3 - 0.45	40 - 60	<p>Concreto proyectado (10-15 cm) + Pernos (L = 4 - 6 m) (densidad 0.25/m²) o, Costillas livianas @ 1.5 m</p>
C	<p>Frente próximo al equilibrio Cavidad inestable</p> <p>$FS_f \approx 1$ $FS_c < 1$ $2.5\% < \epsilon < 5\%$ $0.5\% < \epsilon_o < 1\%$ $(2 < R_p/R_o < 4)$</p>	0.2 - 0.3	30 - 50	<p>Concreto proyectado (15-20 cm) + Pernos (L = 6 m) (densidad 0.5/m²) o, Costillas medianas @ 1 m + Refuerzo del frente (eventual)</p>
D	<p>Frente inestable Cavidad inestable (grandes deformaciones)</p> <p>$FS_f < 1$ $FS_c \ll 1$ $5\% < \epsilon < 10\%$ $\epsilon_o > 1\%$ $(R_p/R_o > 4)$</p>	0.15 - 0.2	20 - 40	<p>Concreto proyectado (20-25 cm) + Costillas pesadas @ 1 m o, Pernos (L = 6-9 m) (densidad 1/m²) + Refuerzo del frente y extradós + Pernos de integración (eventuales)</p>
E	<p>Inestabilidad generalizada (macizo muy débil y/o zona de fallas)</p> <p>$FS_f \ll 1$ $FS_c \ll 1$ $\epsilon > 10\%$ $\epsilon_o \gg 1\%$ $(R_p/R_o \gg 4)$</p>	< 0.15	< 20	<p>Concreto proyectado (20-30 cm) + Costillas muy pesadas @ 1 m + Refuerzo del frente y extradós + Pernos de integración + Pre-sopORTE (eventual)</p>

GEOMECÁNICA SOPORTES Y REVESTIMIENTOS

- Caracterización Geológica Geofísica y Geomecánica
- Estima de la Clase de Comportamiento de la Excavación
 - * En función de la geo-macro-estructura del macizo rocoso
 - * En función de los niveles geo-tensionales relativos
- Pre-selección del Soporte (* En función de la C.d.C.)
- **Determinación de las cargas a esperar sobre el soporte**
 - * **En función del comportamiento geo-estático y geo-mecánico**
- **Dimensionado del soporte (* En función de las cargas)**
- Seguimiento y Monitoreo durante la Excavación
- Dimensionado del revestimiento

CARGAS SOBRE EL SOPORTE Vs LA COBERTURA (H) Y EL TIPO DE ROCAS (α -GSI)



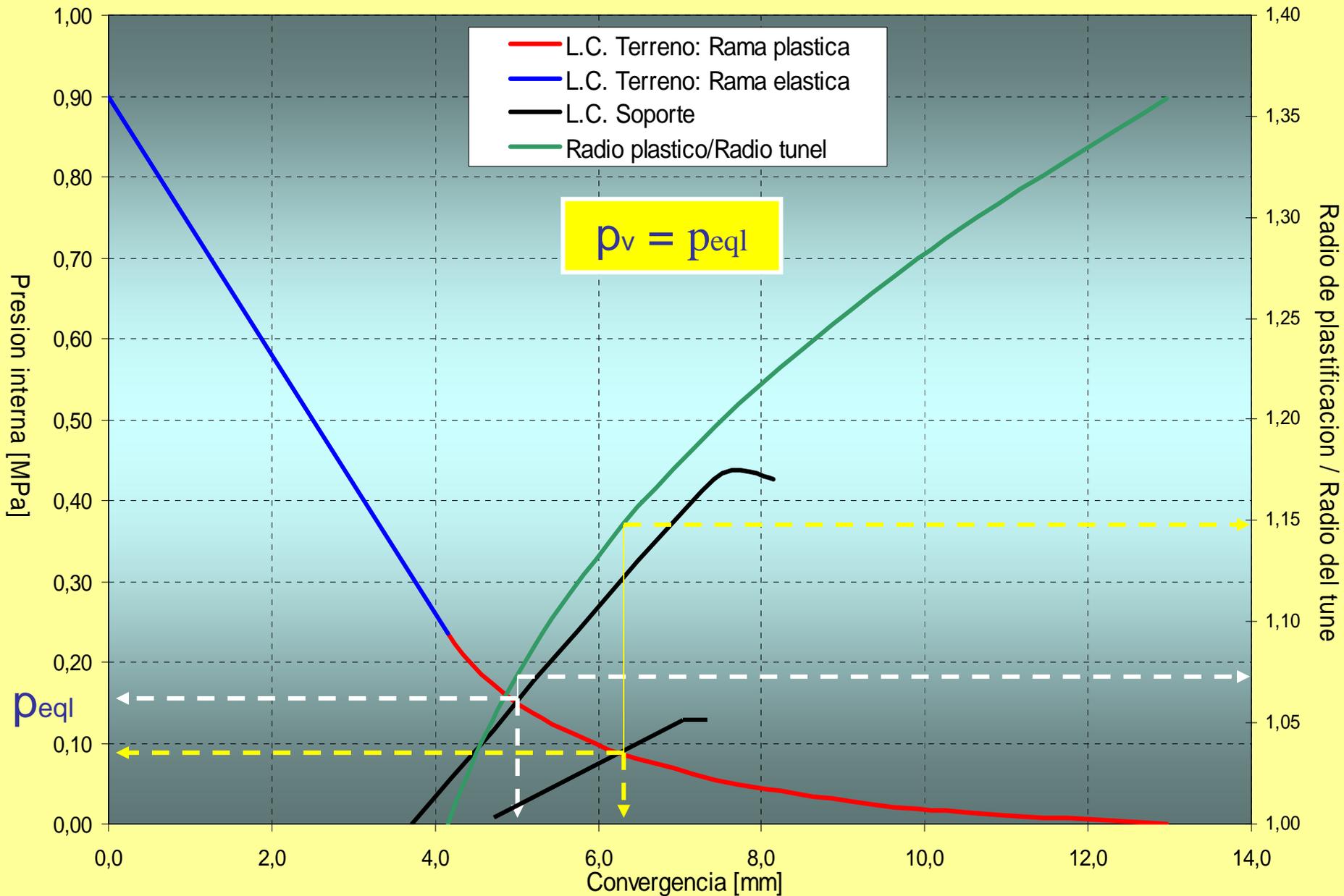


$$\alpha = 1.244 m_i^{-1.433} G S I^{(m_i 0,0004 m_i - 0,0046 m_i - 1,2344)}$$

$$\rho_v = \alpha (b+h)$$

FACTOR DE CARGAS "ALPHA" DE TERZAGHI (Perri, 2000)

Curvas de Interaccion Soporte - Terreno y Extencion de la Plastificacion



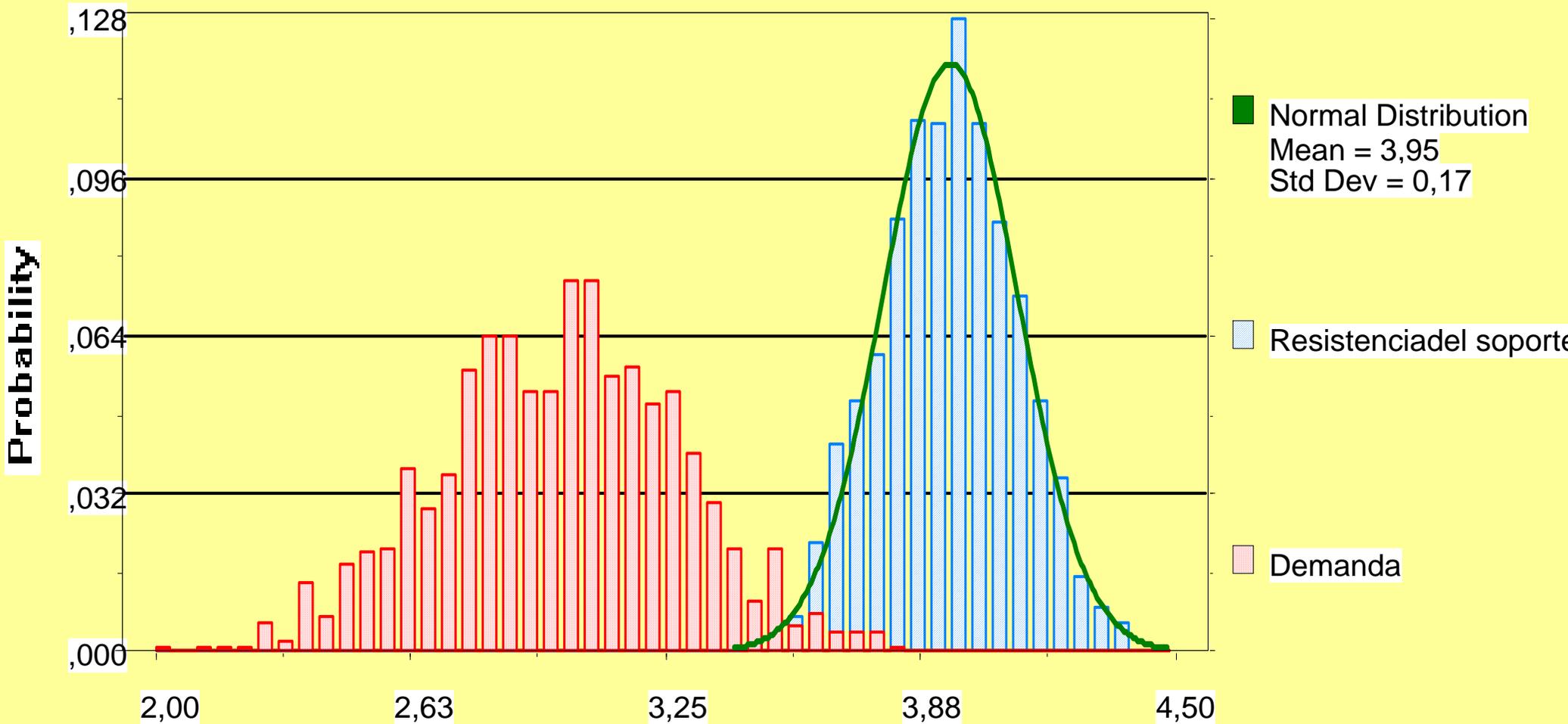
RESISTENCIA O CAPACIDAD DE CONTRASTE DE SOPORTES para túneles de aproximadamente 10m de diámetro

<i>Tipo de Soporte</i>	<i>Concreto Proyectado</i>	<i>Costillas Metálicas</i>	<i>Pernos Metálicos 20 t</i>	<i>Capacidad (Kg/cm²)</i>
SP-a	10 cm	-	eventuales	1,5
SP-b	14 cm	2 IPN140 @ 150 cm	2 x 4 m @ par de costillas	2,5
		o, alternamente 7 pernos x 4m @ 150 cm (sin costillas)		
SP-c	16 cm	2 IPN160 @ 125 cm	4 x 6 m @ par de costillas	3,5
		o, alternamente 11 pernos x 6m @ 125 cm (sin costillas)		
SP-d	20 cm	2 IPN200 @ 100 cm	6 x 6 m @ par de costillas	4,5
		o, alternamente 15 pernos x 6m @ 100 cm (sin costillas)		
SP-e	20 cm	2 IPN200 @ 075 cm	10 x 6 m @ par de costillas	6,5

DEMANDA (carga) Vs CAPACIDAD (resistencia) DEL SOPORTE

Overlay Chart

Capacidad vs. Demanda



Margen de Seguridad (**MS**=C-D), Probabilidad de Falla (**Pf**%) y Factor de Seguridad (**FS**)

MACIZOS ROCOSOS FRESCOS A POCO METEORIZADOS	Cobertura	Hmax=50 m	Hmax=100m	Hmax=200m	Hmax=300m	Hmax=375m
Filitas	GSI= 10-25	MS=1,1 (Pd-1) Pf = 2,2 % FS = 1,4	MS=1,1 (Pf-2) Pf = 0,6 % FS = 1,2	-	-	-
Esquistos	GSI = 25-40	MS=1,1 (Pc-1) Pf = 0,0 % FS = 1,6	MS=1,3 (Pc-1) Pf = 0,9 % FS = 1,3	MS=1,9 (Pf-6) Pf = 2,3% FS = 1,2	-	-
Marmoles	GSI = 40-60	MS=0,5 (P-a/b) Pf = 0,0% FS = 1,5	MS=1,1 (Pc-1) Pf = 0,0% FS = 1,3	MS=1,3 (Pf-1) pf = 0,9 % FS = 1,3	MS=1,2 (Pf-4) Pf = 6,0% FS = 1,2	MS=2,9 (Pf-6) Pf = 0,0% FS = 1,4
Cuarcitas-Anfibolitas	GSI = 40-60	MS=0,5 (P-a/b) Pf = 0,0% FS = 1,5	MS=0,5 (P-a/b) Pf = 0,0% FS = 1,5	MS=1,1 (Pc-1) pf = 0,0 % FS = 1,6	MS=1,1 (Pd-1) Pf = 2,2% FS = 1,4	MS=1,3 (Pf-1) Pf = 0,9% Fs = 1,3
Gneises-Granitos	GSI = 50-70	MS=0,5 (P-a/b) Pf = 0,0% FS = 1,5	MS=0,5 (P-a/b) Pf = 0,0% FS = 1,5	MS=0,5 (P-a/b) Pf = 0,0% FS = 1,5	MS=1,3 (Pc-2) Pf = 0,0% FS = 2,3	MS=1,1 (Pc-1) Pf = 0,0% FS = 1,6
MACIZOS ROCOSOS SUPERFICIALES	Cobertura	Hmax=10m	Hmax=20m	Hmax=30m	Hmax=40m	Hmax=55m
MUY METEORIZADOS	GSI ≤ 25	MS=1,2 (Pc-1) Pf = 0,1% FS = 1,6	MS=1,5 Pf-1) Pf = 2,4% FS = 1,4	MS=1,8 (Pf-5) Pf = 2,1% FS = 1,3	MS=1,2 (Pf-6) Pf = 12,5% FS = 1,1	-
Y METEORIZADOS	GSI >> 25	MS=1,3 (Pd-1) Pf = 0,0% FS = 1,5	MS=1,3 (Pd-1) Pf = 0,0% FS = 1,5	MS=1,3 (Pd-1) Pf = 0,0% FS = 1,5	-	-

SECCIÒN EQUIVALENTE A FLEXIÒN: ARMADA Vs. FIBRO-REFORZADA

$$M_m = 0.9 S_m \sigma_{y'} d/2$$

$$M_f = f_{eq} 1000 d^2/6$$

$$M_m = M_f$$

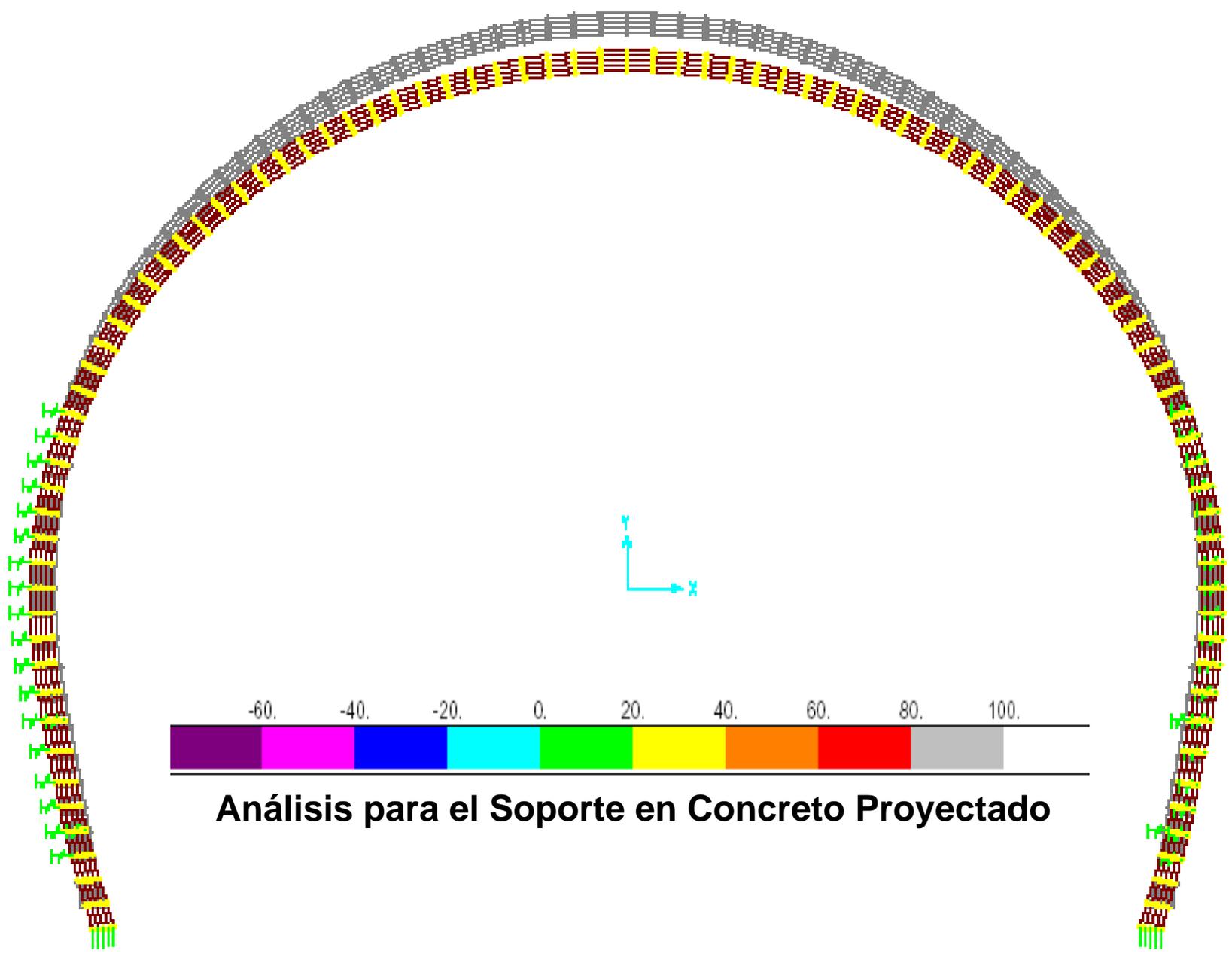
$$f_{eq} = 0.0027 S_m \sigma_{y'}/d$$

$$d = 0.0027 S_m \sigma_{y'}/f_{eq}$$

RESISTENCIAS DEL CONCRETO PROYECTADO REFORZADO CON FIBRAS METÁLICAS

		CONCRETO e = 10cm		CONCRETO e = 14cm		CONCRETO e = 16cm		CONCRETO e = 20cm	
		Malla (4/100)	Fibras (0.75x30)	Malla (4/100)	Fibras (0.75x30)	Malla (4/100)	Fibras (0.75x30)	Malla (4/100)	Fibras (0.75x30)
A) Cálculo de la resistencia equivalente requerida									
mm	Espesor (h) de la sección de concreto proyectado	100		140		160		200	
N/mm ²	Resistencia a tracción de la malla electrosoldada	414		414		414		414	
mm	Diametro de la malla electrosoldada	4		4		4		4	
mm	Lado de la malla electrosoldada	100		100		100		100	
mm ²	Area (As) de la malla en la sección de 1 metro de base	125.7		125.7		125.7		125.7	
kg/m ²	Peso de la malla/m ²	1.97		1.97		1.97		1.97	
kg/m ³	Peso de la malla/m ³	19.7		14.1		12.3		9.9	
mm	Espesor util (d) de la sección de concreto con malla	50		70		80		100	
Nmm	Momento Resistente a Flexión del concreto con malla	2,341,115		3,277,561		3,745,784		4,682,230	
Nmm	Momento Resistente a Flexión del concreto con fibras		2,341,115		3,277,561		3,745,784		4,682,230
mm	Espesor (h) de la sección de concreto con fibras		100		140		160		200
N/mm ²	Resistencia equivalente f_{eq} requerida del concreto con fibras		1.40		1.00		0.88		0.70

		CONCRETO e = 10cm		CONCRETO e = 14cm		CONCRETO e = 16cm		CONCRETO e = 20cm	
		Malla (4/100)	Fibras (0.75x30)	Malla (4/100)	Fibras (0.75x30)	Malla (4/100)	Fibras (0.75x30)	Malla (4/100)	Fibras (0.75x30)
B) Determinación preliminar de la dosificación fibras									
N/mm ²	Resistencia equivalente f_{eq} mínima requerida		1.40		1.00		0.88		0.70
N/mm ²	Resistencia teórica por flexión f_r del concreto base (C 24/30)		3.40		3.40		3.40		3.40
%	Ductilidad mínima requerida para el concreto con fibras		41		30		26		21
kg/m ³	Dosificación referencial empirica Vs ductilidad requerida		27		23		22		20
%	Rebote de las solas fibras		10		10		10		10
kg/m ³	Dosificación recomendada ($\rho \geq 25$)		30		25		25		25



Análisis para el Soporte en Concreto Projectado

Ferrocarril Puerto Cabello – La Encrucijada

MÁXIMAS TRACCIONES EN SOPORTES PRIMARIOS (Kg/cm²)

CASO Cargas	<i>Terreno Más Rígido</i>	<i>Terreno Menos Rígido</i>	<i>Menor Presión Lateral</i>		SOPORTE Tipo
	Tracción en Hastiales		Tracción Hastiales	Tracción Bóveda	
	<i>(Kg/cm²)</i>	<i>(Kg/cm²)</i>	<i>(Kg/cm²)</i>	<i>(Kg/cm²)</i>	
1	0.80	0.94	2.50	2.10	P-c
2	0.55	0.56	2.00	1.30	P-c
3	2.50	2.53	8.20	3.30	P-d
4	1.30	1.50	5.70	2.60	P-d
5	0.45	0.51	2.30	1.50	P-d
6	0.35	0.41	1.50	0.90	P-c
7	1.10	1.54	7.30	4.10	P-e
8	2.80	2.80	9.00	3.70	P-d
9	0.20	1.30	2.40	1.50	P-e
10	1.10	2.90	3.90	2.20	P-d

ENSAYOS DE VIGA SOBRE CONCRETO PROYECTADO FIBRO-REFORZADO

<i>Fibra FS3 (30/0.75)</i>		<i>Concreto C24/30</i>			<i>Dos. 30 Kg/m³</i>
<i>Ensayo</i>	<i>f_{ir} (MPa)</i>	<i>D_o</i>	<i>D₁</i>	<i>D_o x D₁</i>	<i>f_{eq} (MPa)</i>
<i>Viga 4</i>	3.3647	0.70	0.69	0.48	1.63
<i>Viga 6</i>	3.6140	0.75	0.66	0.49	1.78
<i>Viga 7</i>	2.2316	0.85	0.55	0.47	1.04
<i>Viga 8</i>	2.7779	0.64	0.66	0.42	1.18
<i>Viga 9</i>	2.5218	0.72	0.74	0.53	1.35
<i>Viga 10</i>	2.6043	0.75	0.78	0.58	1.52
<i>Viga 11</i>	2.9640	0.76	0.83	0.63	1.86
<i>Viga 12</i>	3.3916	0.78	0.83	0.65	2.20
<i>Viga 13</i>	2.9491	0.75	0.73	0.55	1.62
<i>Viga 14</i>	3.5628	0.77	0.82	0.63	2.25
<i>Viga1</i>	3.4203	0.75	0.69	0.52	1.77
<i>Viga2</i>	3.3610	0.82	0.44	0.36	1.21
<i>Viga3</i>	3.7265	0.87	0.51	0.44	1.65
<i>Viga4</i>	3.5866	0.72	0.69	0.50	1.80
<i>Viga5</i>	2.9803	0.72	0.74	0.53	1.58
<i>Viga6</i>	2.6753	0.74	0.69	0.51	1.36
<i>Viga7</i>	3.1778	0.80	0.75	0.60	1.89
<i>Viga8</i>	2.9311	0.84	0.50	0.42	1.24
<i>Viga9</i>	2.3570	0.79	0.74	0.59	1.38
<i>Viga10</i>	2.6480	0.79	0.60	0.47	1.25
<i>Viga11</i>	2.6939	0.75	0.57	0.43	1.16
<i>Viga12</i>	3.2441	0.66	0.68	0.45	1.46
	f_{itm} (MPa)	D_{om}	D_{1m}	(D_o x D₁)_m	f_{eqm} (MPa)
	3.0356	0.76	0.68	0.51	1.55

TABLA 10. Resultados de ensayos a flexión sobre vigas de concreto fibroreforzado

ENSAYOS DE VIGA SOBRE CONCRETO PROYECTADO FIBRO-REFORZADO

Fibra F S3 (30/0.75)		Concreto C24/30			Dos. 25 Kg/m ³	
Muestra	f_{tr} (MPa)	$D_0 \times D_1$	$f_{(0-0.6)}$ (MPa)	$f_{(0.6-3)}$ (MPa)	Dosificación (Kg/m ³)	f_{eqm} (MPa)
Sanchon_Prueb_1A	4,5	0,3111	3,01	1,40	25	1,72
Sanchon_Prueb_1B	3,7	0,2620	2,47	0,97	25	1,27
Sanchon_Prueb_1C	4,3	0,3665	3,58	1,66	25	2,04
Sanchon_Prueb_4A	4,2	0,4074	3,89	1,71	25	2,15
Sanchon_Prueb_4B	2,6	0,3458	1,95	0,90	25	1,11
Sanchon_Prueb_4C	3,0	0,4418	2,21	1,33	25	1,50
Corona_Prueb_3A	3,5	0,3517	2,52	1,23	25	1,49
Corona_Prueb_3B	2,7	0,6726	1,04	1,82	25	1,66
Corona_Prueb_3C	2,8	0,3482	1,32	0,97	25	1,04
Pila 4-2 27-8-04	2,8	0,3881	1,97	1,08	30	1,26
Pila 4-4 27-8-04	2,6	0,4187	1,61	1,08	30	1,19
Pila 1-2A 01-9-04	2,8	0,4339	1,78	1,21	30	1,33
Pila 1-2B 01-9-04	3,1	0,4181	1,29	1,30	30	1,30
Pila 1-2C 01-9-04	2,5	0,5683	1,83	1,42	30	1,50
Promedio	3,22	0,39	2,44	1,33	25	1,47

SELECCIÓN DEL SOPORTE Vs. COBERTURA - GSI - IC para túneles de aproximadamente 10m de diámetro

<i>COBERTURAS $\leq H_i$</i>		<i>H_i < COBERTURAS $\leq H_s$</i>		<i>COBERTURAS $> H_s$</i>	
GSI ≤ 20	SP-e	GSI ≤ 20	SP-e	IC ≤ 0.15	SP-e
20 < GSI ≤ 40	SP-e	20 < GSI ≤ 40	SP-d	0.15 < IC ≤ 0.20	SP-d
30 < GSI ≤ 50	SP-d	30 < GSI ≤ 50	SP-c	0.20 < IC ≤ 0.30	SP-c
40 < GSI ≤ 60	SP-c	40 < GSI ≤ 60	SP-b	0.30 < IC ≤ 0.45	SP-b
GSI > 60	SP-c	GSI > 60	SP-a	IC > 0.45	SP-a

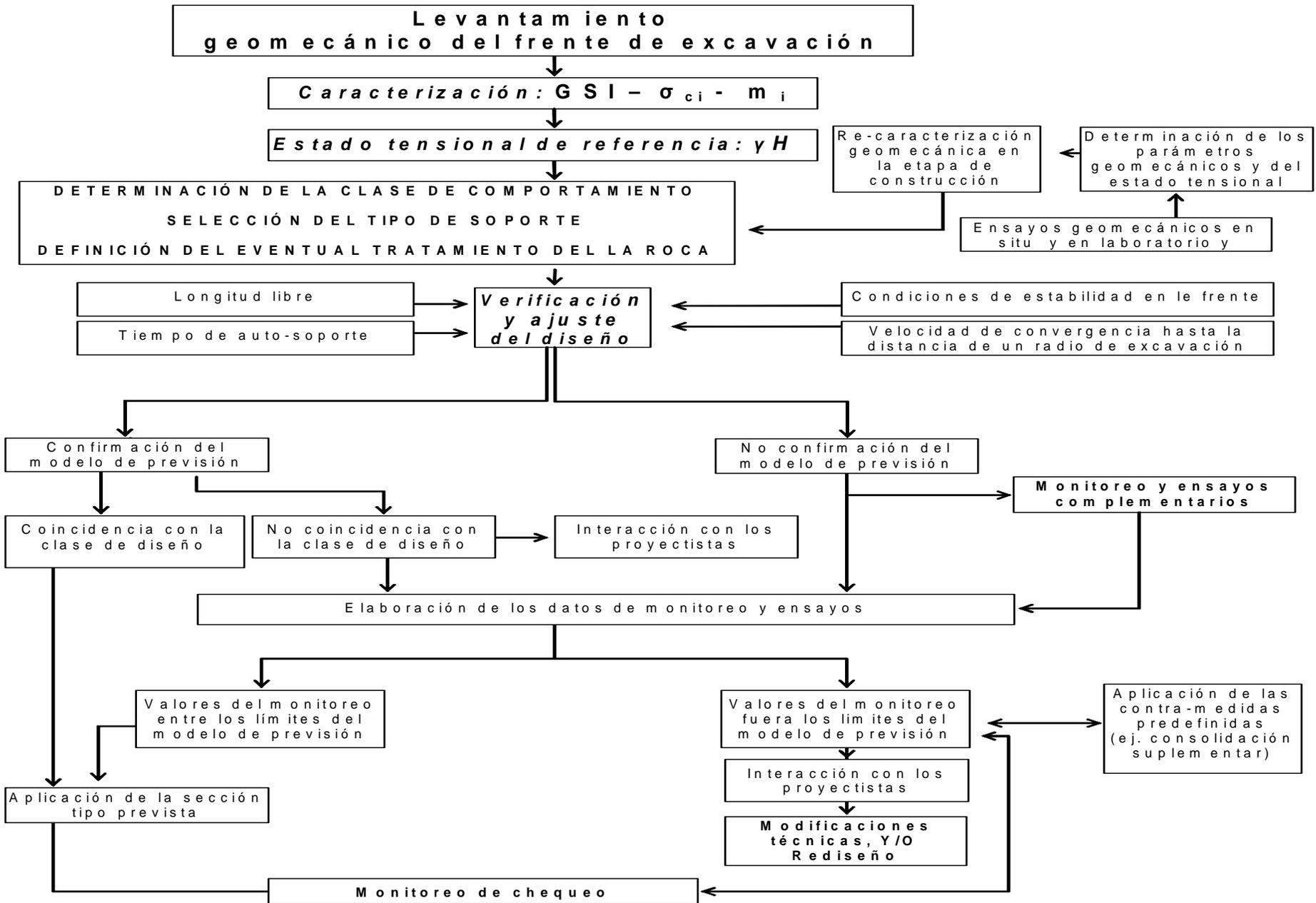
SELECCIÓN DEL SOPORTE Vs. COBERTURA y GSI para túneles de aproximadamente 10m de diámetro

Cobertura: Geomecánica del Terreno:	H (m) 5-10	H (m) 10-20	H (m) 20-100	H (m) 100-150	H (m) 150-250	H (m) 250-500
$GSI \leq 20$	SP-e	SP-e	SP-e	SP-e	SP-e	SP-e
$20 < GSI < 40$	SP-e	SP-d	SP-d	SP-d	SP-d	SP-e
$30 < GSI < 50$	SP-d	SP-c	SP-c	SP-c	SP-c	SP-d
$40 < GSI \leq 60$	SP-c	SP-b	SP-a	SP-a	SP-b	SP-c
$GSI > 60$	SP-c	SP-b	SP-a	SP-a	SP-a	SP-a

GEOMECÁNICA SOPORTES Y REVESTIMIENTOS

- **Caracterización Geológica Geofísica y Geomecánica**
- **Estima de la Clase de Comportamiento de la Excavación**
 - * En función de la geo-macro-estructura del macizo rocoso
 - * En función de los niveles geo-tensionales relativos
- **Pre-selección del Soporte (* En función de la C.d.C.)**
- **Determinación de las cargas a esperar sobre el soporte**
 - * En función del comportamiento geo-estático y geo-mecánico
- **Dimensionado del soporte (* En función de las cargas)**
- **Seguimiento y Monitoreo durante la Excavación**
- **Dimensionado del revestimiento**

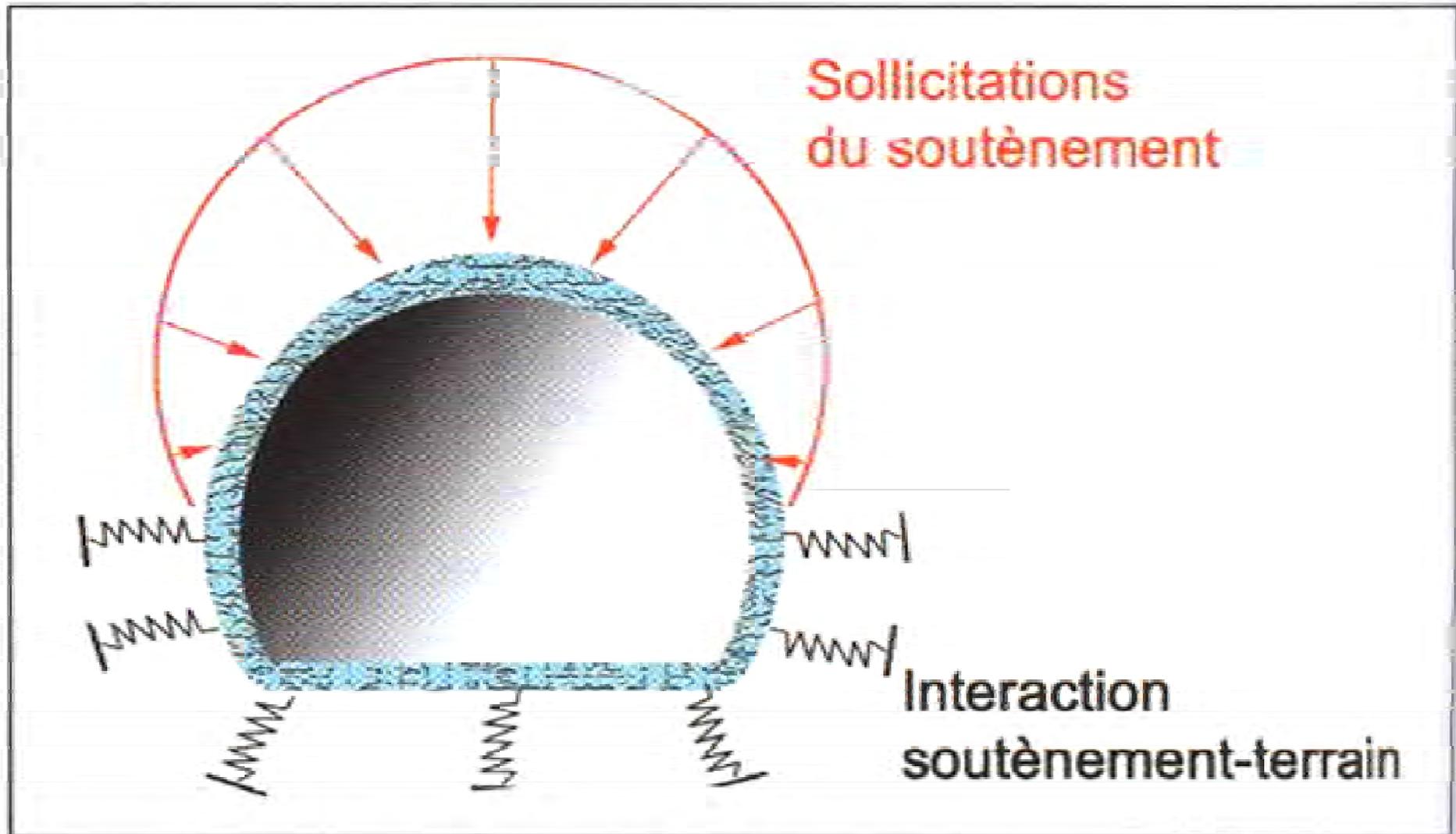
RETROALIMENTACIÓN DEL DISEÑO DURANTE LA CONSTRUCCIÓN



ACCIONES PARA ESTABILIZAR LA CAVIDAD Vs CONVERGENCIA y GSI

<i>Convergencia Radial ε (cm)</i>	<i>Acciones a Implementar</i>
<i>Nivel de Advertencia ($\geq 1,5$)</i>	Intensificación del monitoreo
<i>Nivel de Atención ($\geq 3,0$)</i>	Intensificación del monitoreo con 20 – 40 Vidrioresinas (si GSI ≤ 30)
<i>Nivel de Alarma 1 (= 4,5)</i>	8 – 15 Pernos con 20 – 50 Vidrioresinas (si GSI ≤ 30)
<i>Nivel de Alarma 2 (> 4,5)</i>	Acciones del Nivel de Alarma 1 con solera primaria de concreto
<i>Nivel de Alarma 3 (>> 4,5)</i>	Acciones del Nivel de Alarma 2 con pre-soporte de micropilotes

DISEÑO DEL REVESTIMIENTO DEFINITIVO

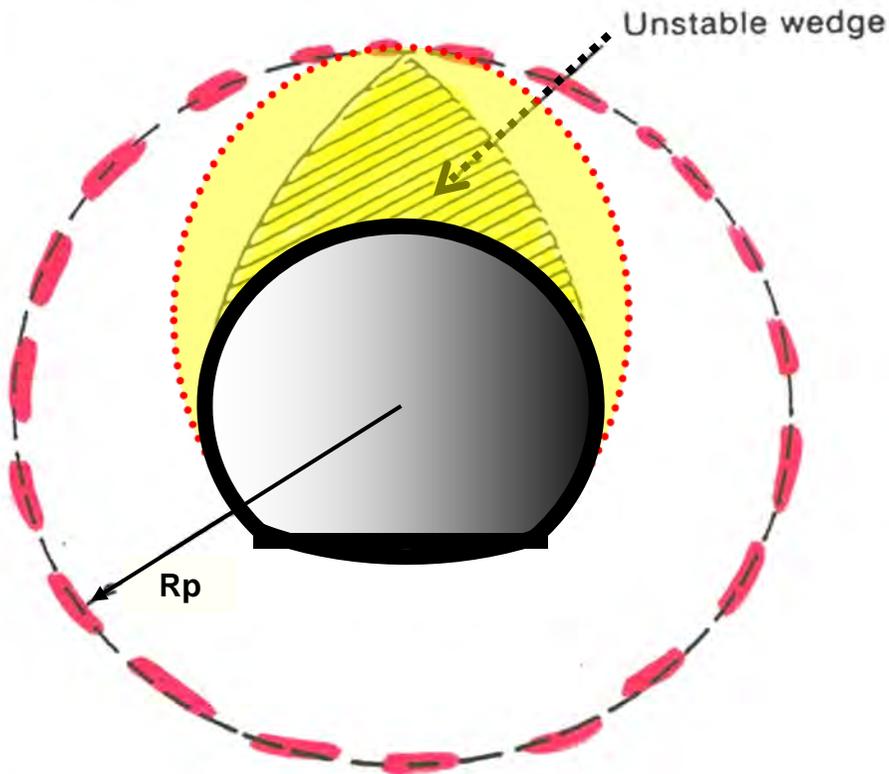


- Principle of hyperstatic reactions method

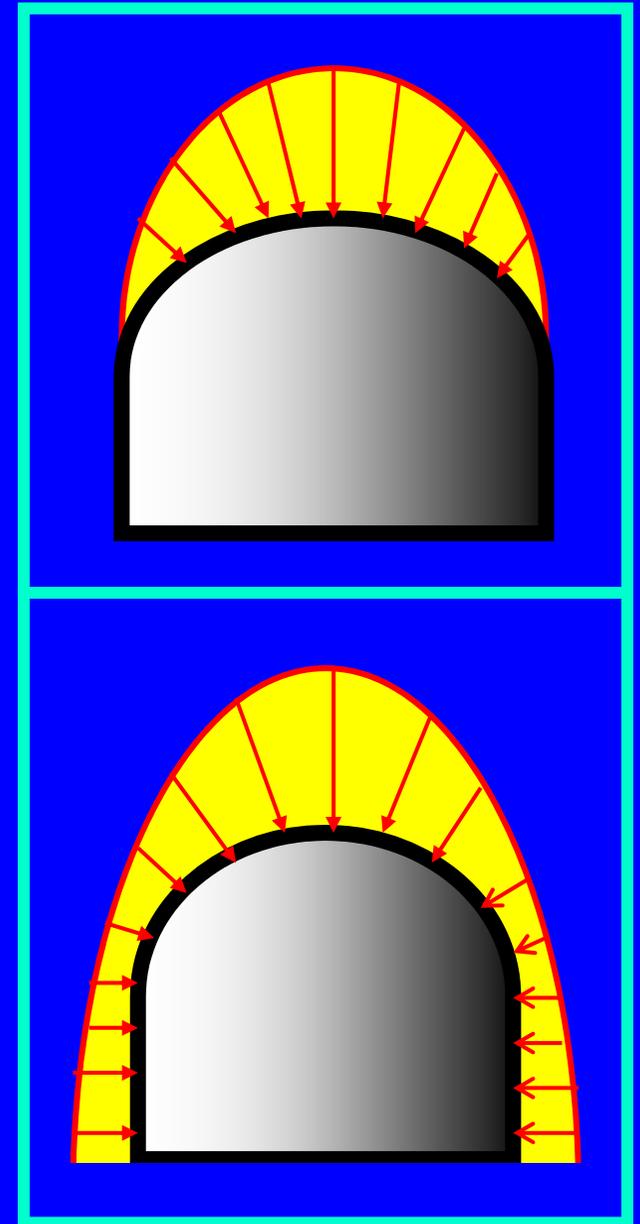
CARGAS DE DISEÑO PARA EL REVESTIMIENTO DEFINITIVO

Gravity effect

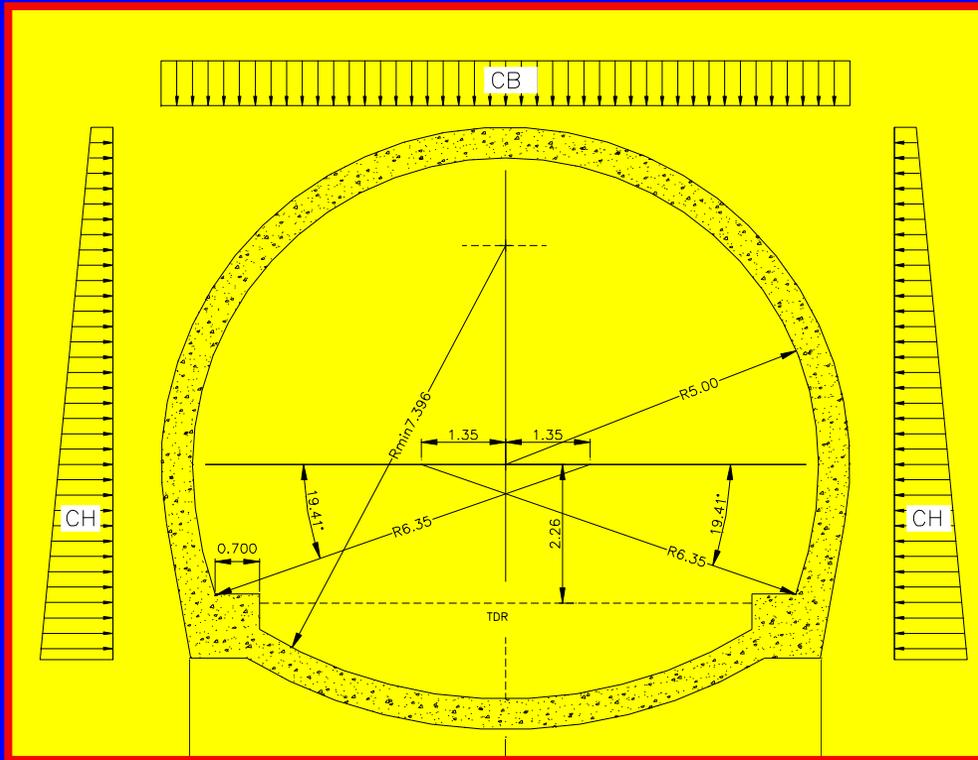
Decompression is accompanied by the formation of an unstable zone above the crown which might eventually collapse



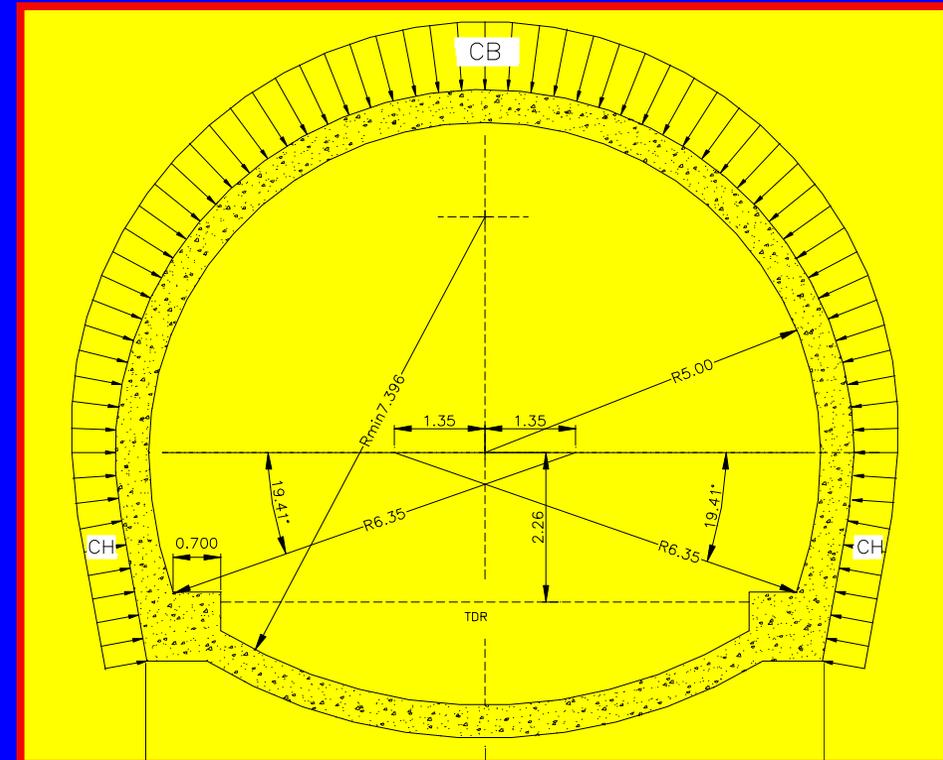
- Gravity effect on decompressed zone



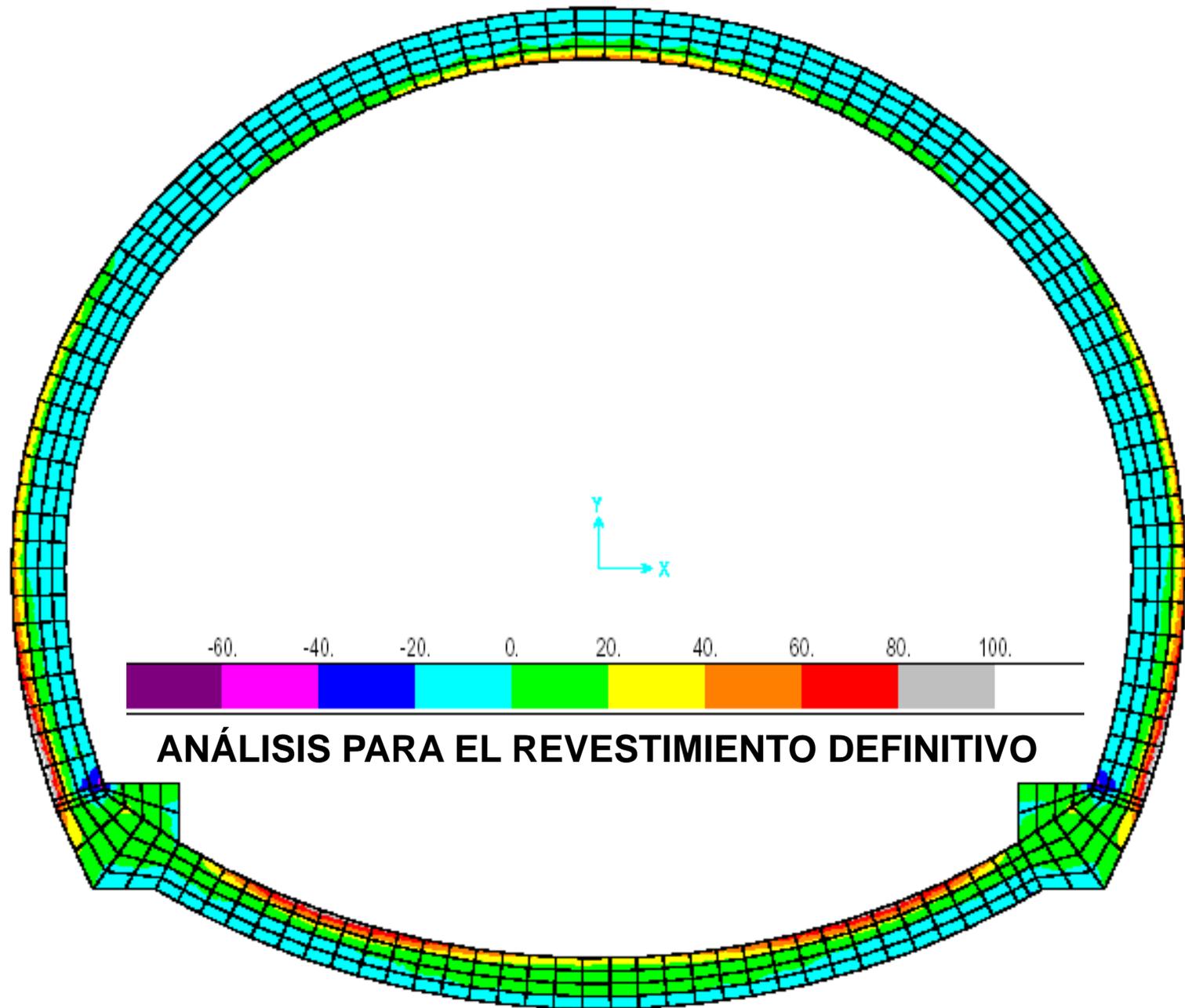
CARGAS DE DISEÑO PARA EL REVESTIMIENTO DEFINITIVO



Esquema de Cargas
Coberturas Moderadas
 $CB=\gamma H$ $CB=\gamma\alpha(b+Ht)$



Esquema de Cargas
Coberturas Elevadas
 $CB=\gamma(R_p-R)$



RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS DEL REVESTIMIENTO DEFINITIVO

Máximas Tracciones en Bóveda y Hastiales (MPa)

Revestimientos	Bajas Coberturas ($\leq H_s$)		Altas Coberturas ($> H_s$)	
	Terrenos Menos Rígidos	Terrenos Más Rígidos	Terrenos Menos Rígidos	Terrenos Más Rígidos
RF (30 cm)	1.54	0.18	0.19	0.06
RF (40 cm)	22.1	4.49	3.27	0.37
RF (50 cm)	27.63	4.66	5.54	0.42

REVESTIMIENTO DEFINITIVO EN CONCRETO FIBROREFORZADO

COBERTURAS $\leq H_i$		$H_i <$ COBERTURAS $\leq H_s$		COBERTURAS $> H_s$	
GSI ≤ 20 RF armado					
$20 < \text{GSI} \leq 40$	RF armado	$20 < \text{GSI} \leq 40$	RF (50 cm)	$0.20 < \text{IC} \leq 0.30$	RF (40 cm)
$40 < \text{GSI} \leq 60$	RF (50 cm)	$40 < \text{GSI} \leq 60$	RF (40 cm)	$0.30 < \text{IC} \leq 0.45$	RF (40 cm)
$\text{GSI} > 60$	RF (40 cm)	$\text{GSI} > 60$	RF (30 cm)	$\text{IC} > 0.45$	RF (30 cm)

CARACTERÍSTICAS DEL CONCRETO FIBROREFORZADO VACIADO EN SITIO

RF armado

RF (50 cm)

$f_{eq} \geq 5 \text{ MPa}$

RF (40 cm)

$f_{eq} \geq 4 \text{ MPa}$

RF (30 cm)

$f_{eq} \geq 2 \text{ MPa}$