

Asociación Costarricense de Geotecnia
CONGRESO DE INGENIERÍA CIVIL - 2008
San José 17 - 19 Septiembre 2008

TÚNELES CONTRUÍDOS CONVENCIONALMENTE
“CRITERIOS DE DISEÑO”

Gianfranco Perri

GEOMECÁNICA SOPORTES Y REVESTIMIENTOS

- 1. Caracterización Geológica Geofísica y Geomecánica**
- 2. 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
- 3. Pre-selección del Soporte (* En función de la C.d.C.)**
- 4. Determinación de las cargas a esperar sobre el soporte**
 - * En función del comportamiento geo-estático y geo-mecánico
- 5. Dimensionado del soporte (* En función de las cargas)**
- 6. Seguimiento y Monitoreo durante la Excavación**
- 7. Dimensionado del revestimiento**

CLASE DE COMPORTAMIENTO DE LA EXCAVACIÓN

POSIBLES CONDICIONES GEOESTATICAS DURANTE LA EXCAVACION DE UN TÚNEL

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.

Clase de Comportamiento "A"



21 6 2005



Clase de Comportamiento "A"



Clase de Comportamiento " B "

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.*



Clase de Comportamiento "C"



Clase de Comportamiento " D "

III

Comportamiento a frente inestable, o de tipo incoherente

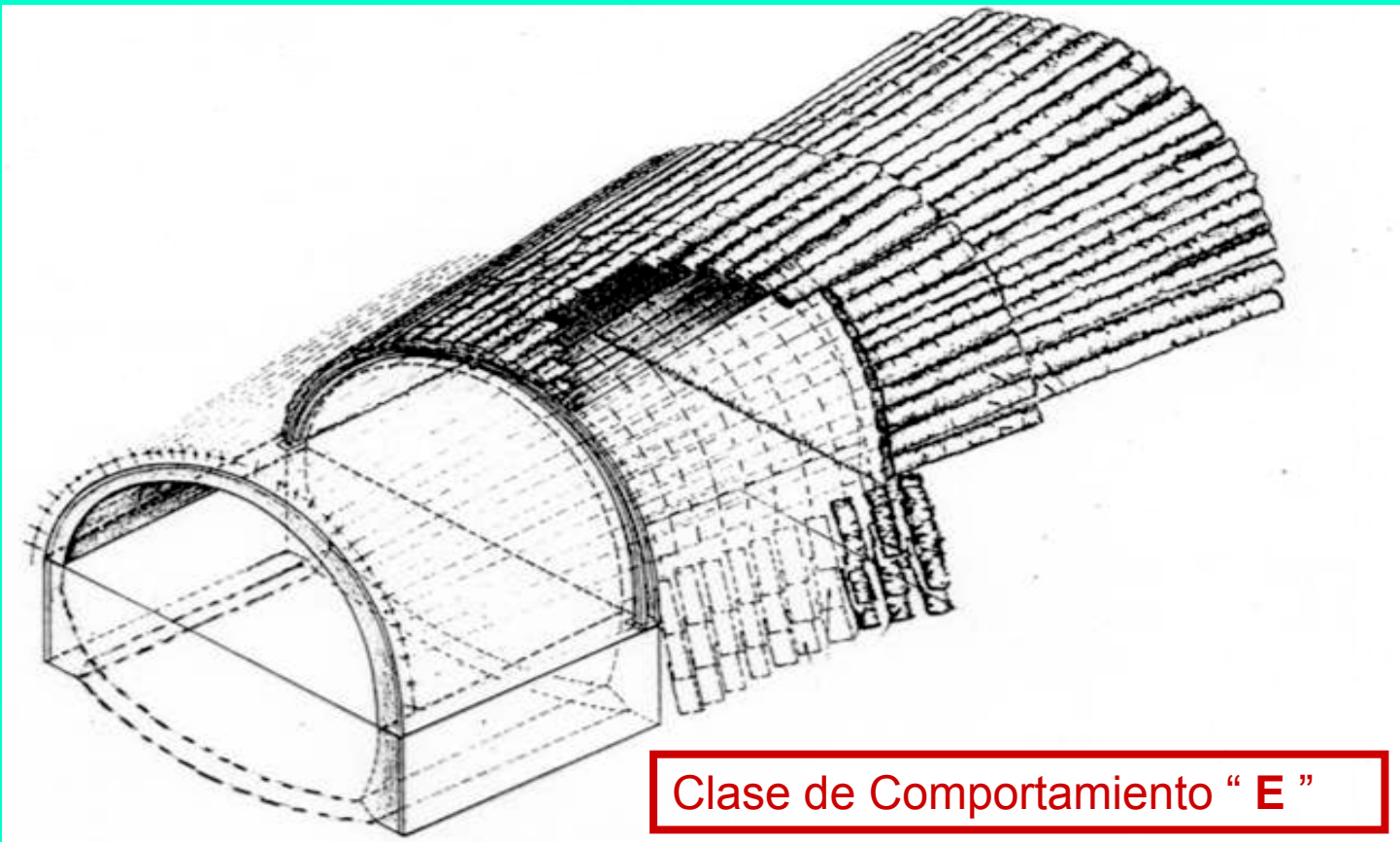
La concentración de esfuerzos al frente y al contorno de la cavidad, supera la resistencia del medio.

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.

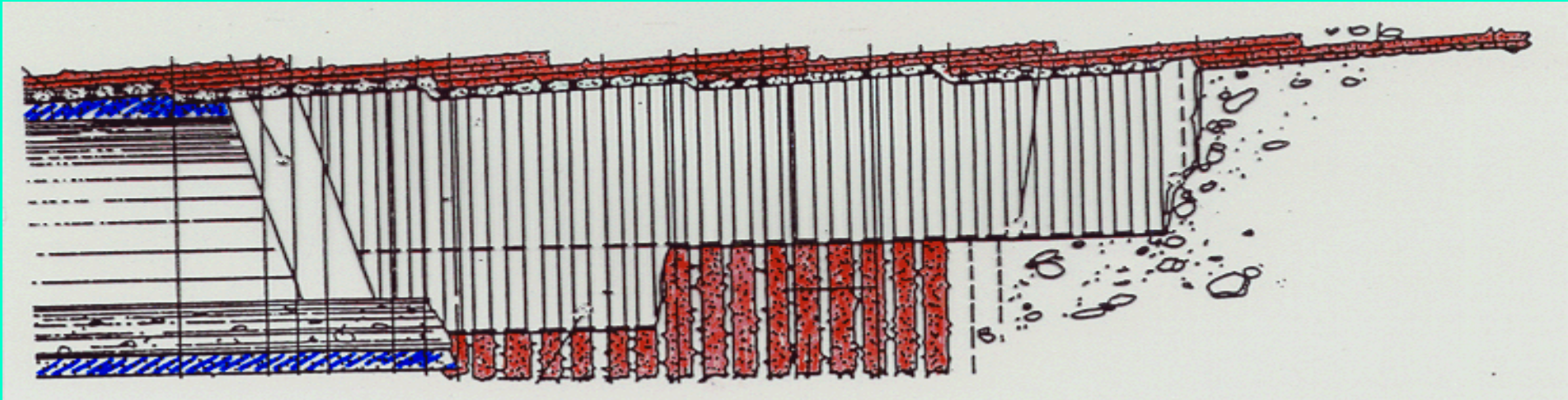
*Se requieren por lo tanto siempre **intervenciones de pre-consolidación y/o pre-contención** a monte del frente de excavación.*

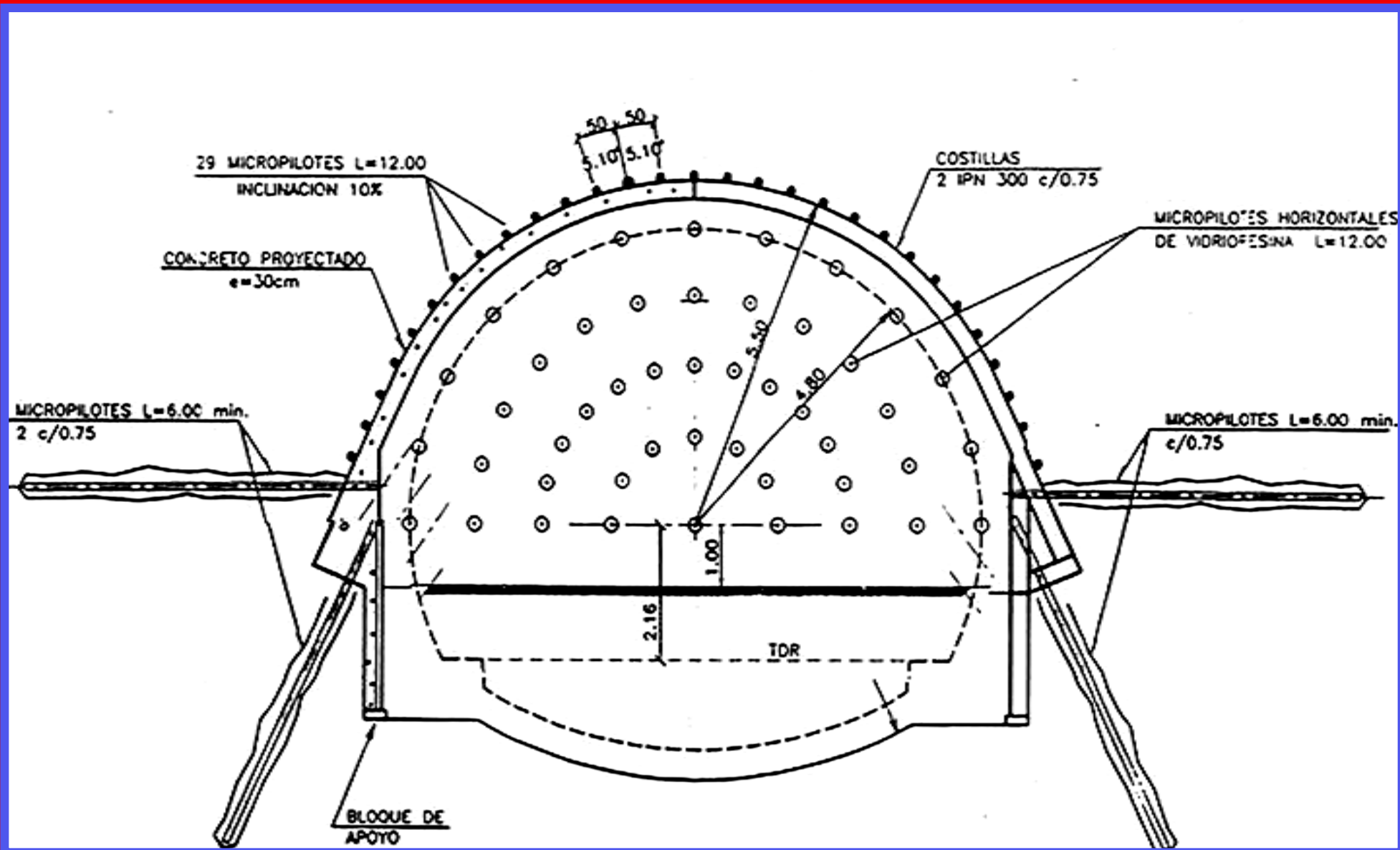
Clase de Comportamiento “ E ”



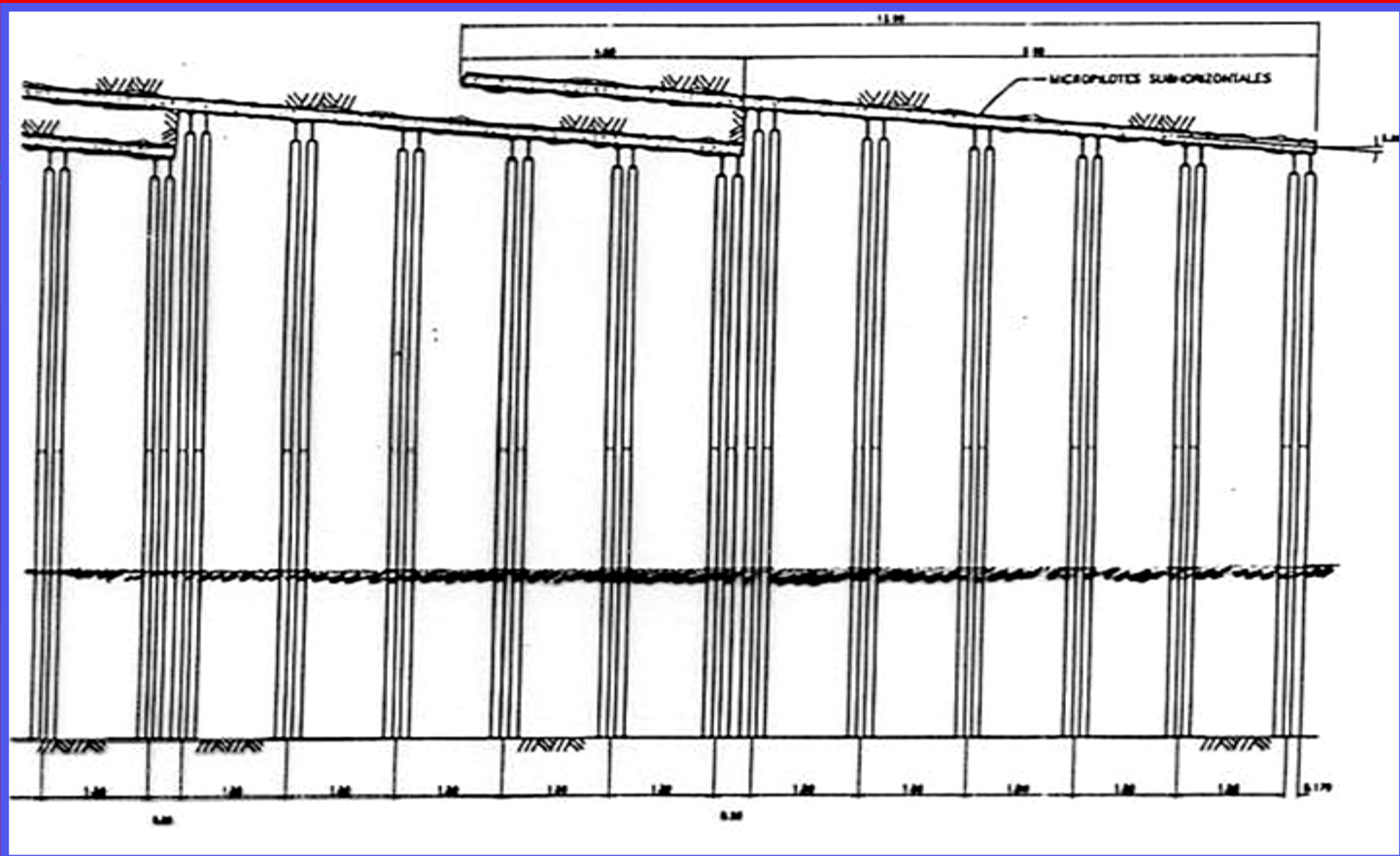


Clase de Comportamiento " E "





Clase de Comportamiento " E "



Clase de Comportamiento " E "















Clase de Comportamiento “ E ”

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)*
- *

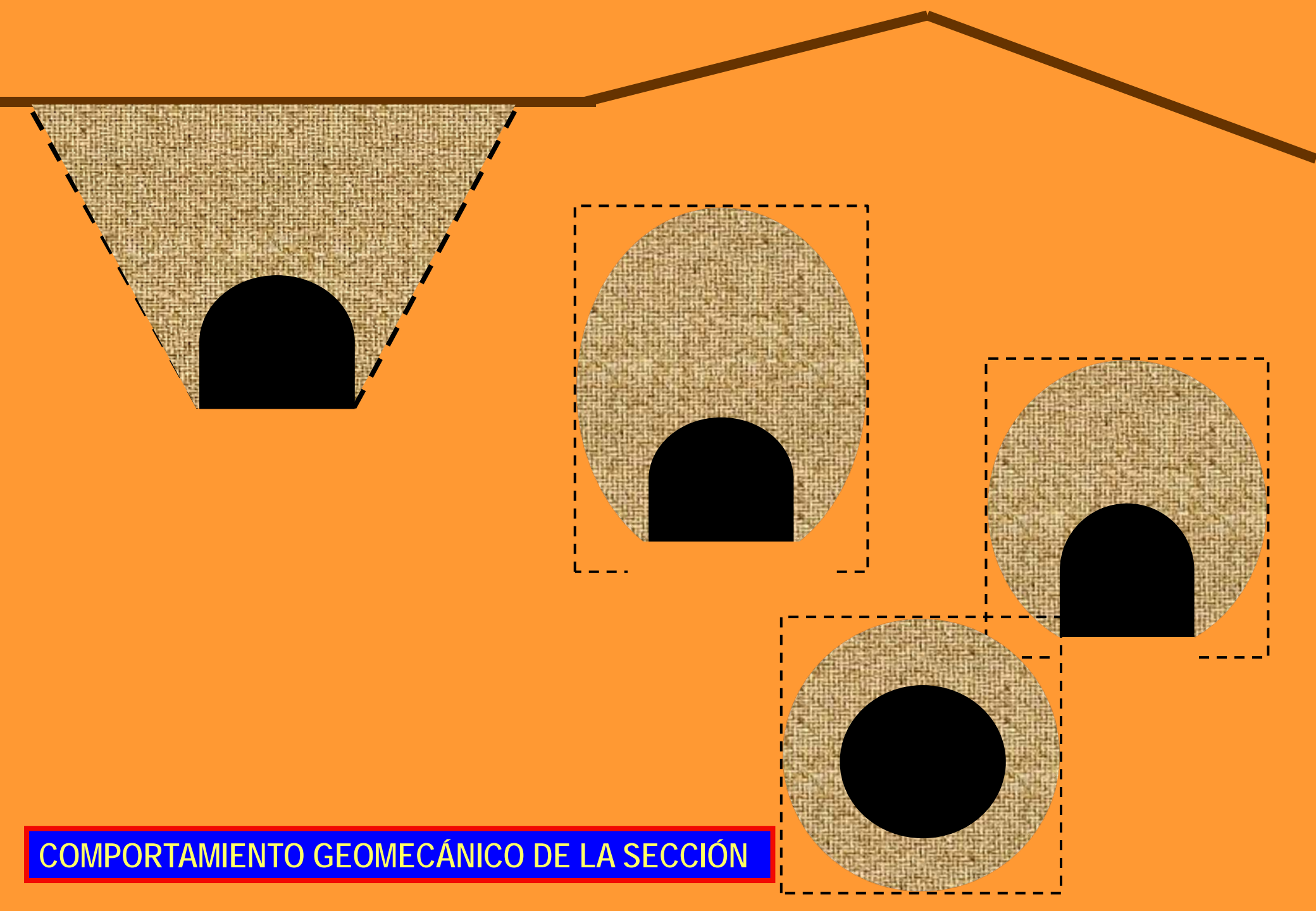
SOPORTES TÍPICOS

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

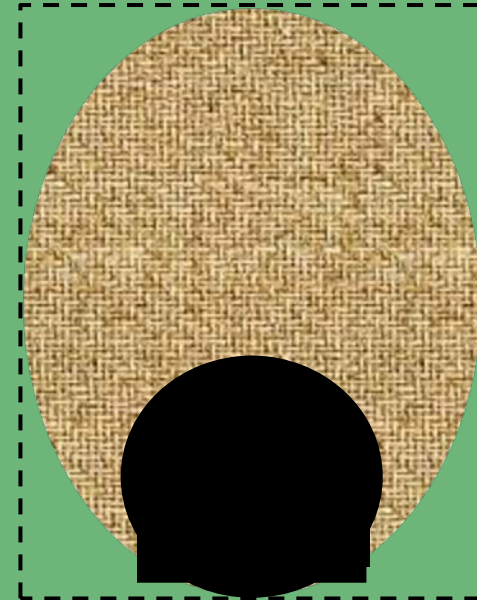
α de Terzaghi

RMR de Bieniawski

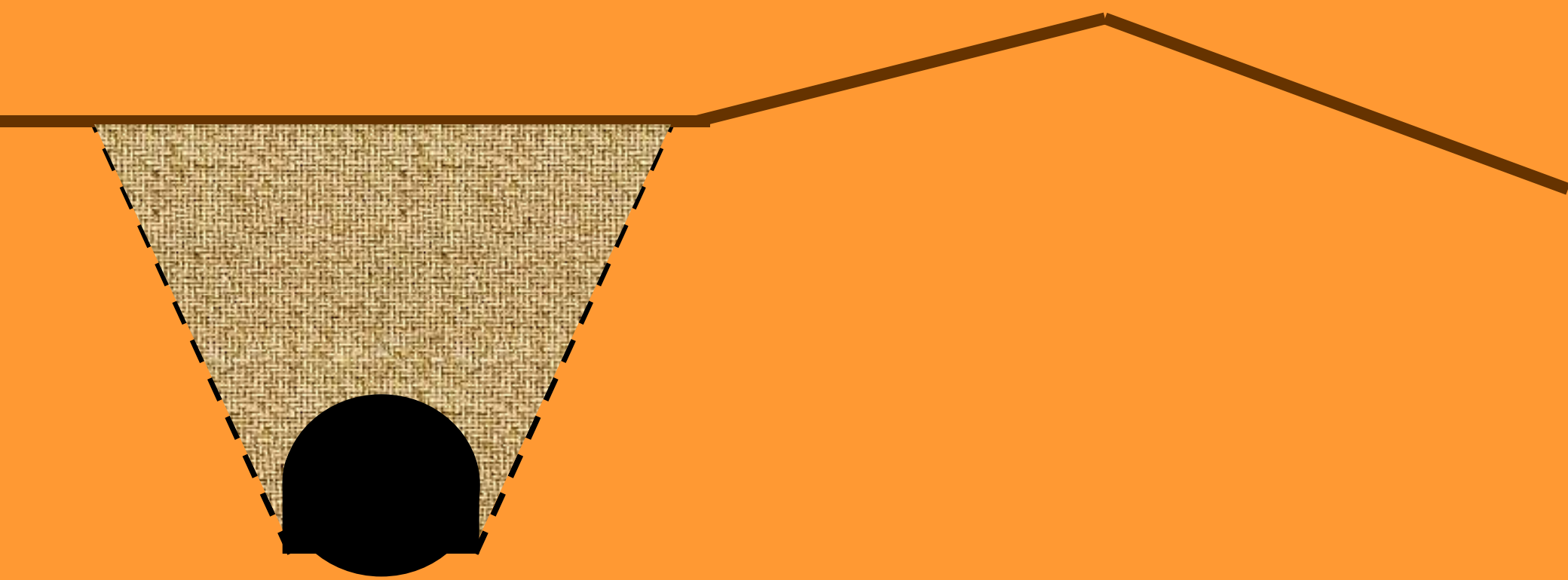
Q^* de Barton

RMi de Palmstron

GSI de Hoek

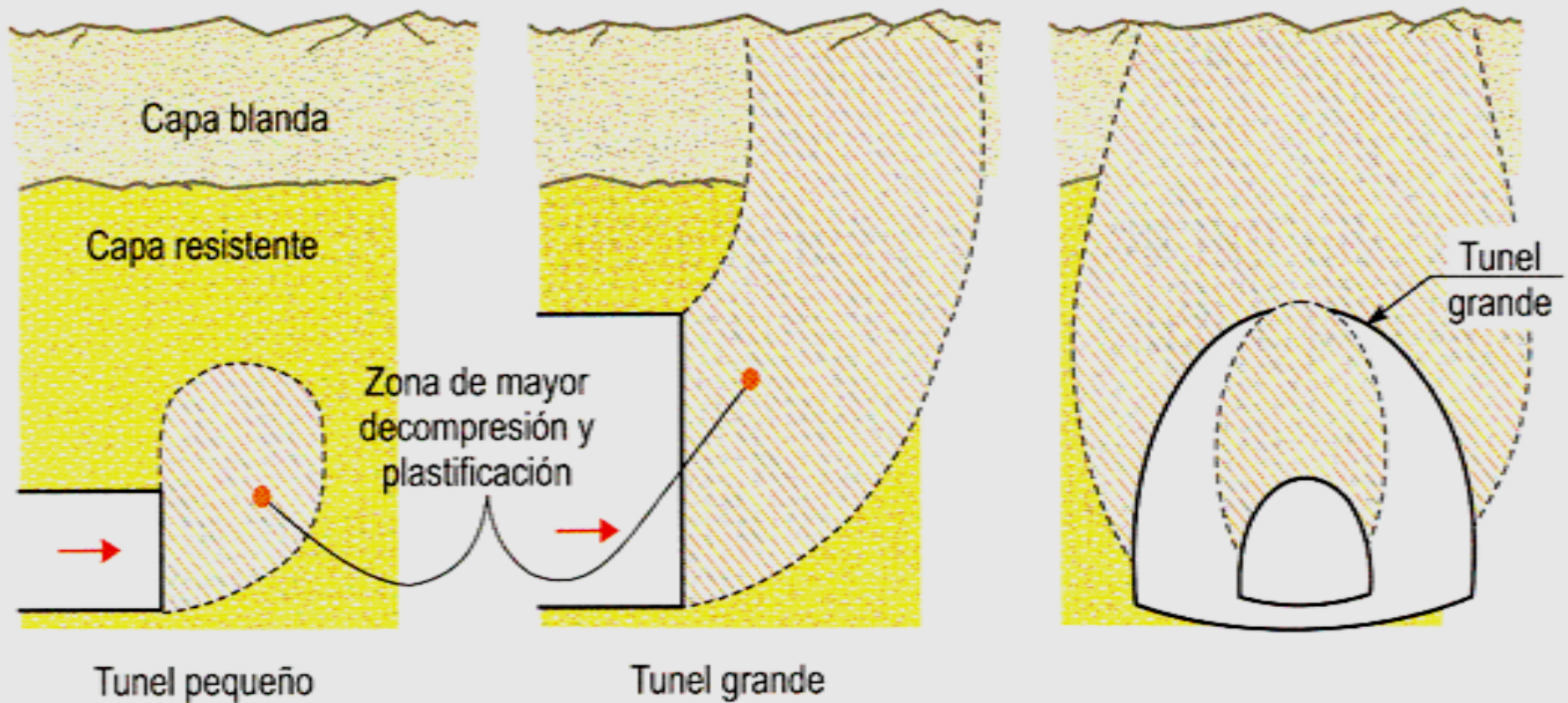


Comportamiento Geomecánico de las Secciones Intermedias



Comportamiento Geomecánico de las Secciones Superficiales

Comportamiento Geomecánico de las Secciones Superficiales

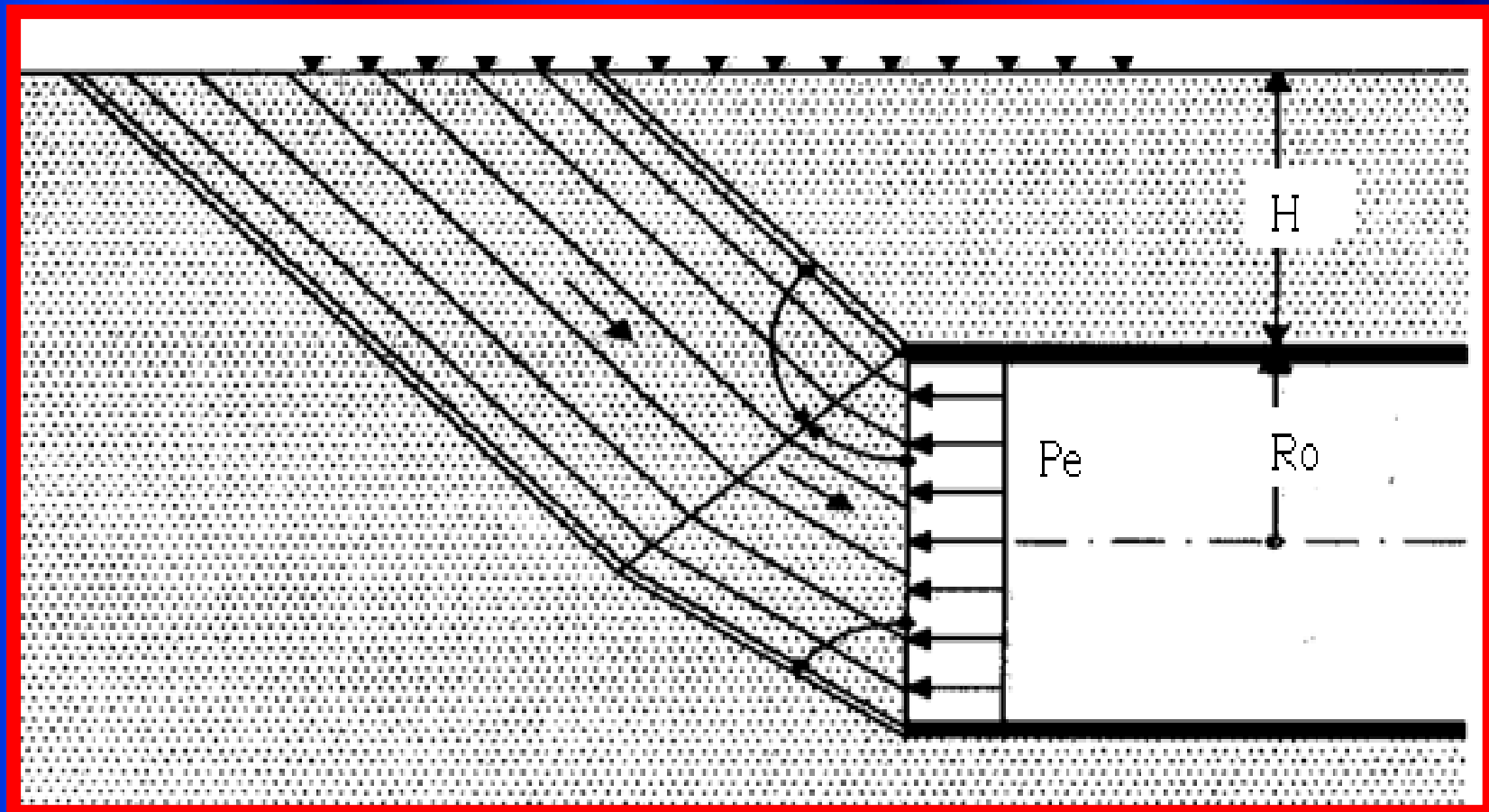


a) Sección longitudinal

b) Sección transversal

Factor de Estabilidad del Frente (N), Peck (1969): $N = (P_o - P_e) / c$

Para $N = 5$ el Frente se encuentra en equilibrio límite: $FSf = 5 c / (P_o - P_e)$



$$P_e = P_o - 5c/FSf = \gamma (H+R_o) - 5 c / FSf$$

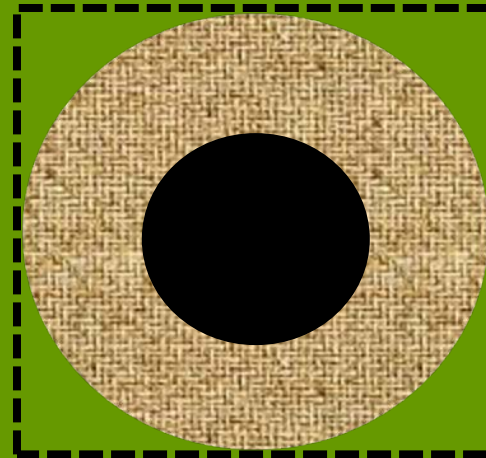
ESTABILIZACIÓN DEL FRENTE DE UN TÚNEL DE 5 m DE RADIO

Presión (t/m²) de estabilización sobre el frente para FSf = 1.25

c (t/m²):	0	2	4	6	8	10
H (m)						
10	30	22	14	6	0	0
15	40	32	24	16	8	0
20	50	42	34	26	18	10
25	60	52	44	36	28	20

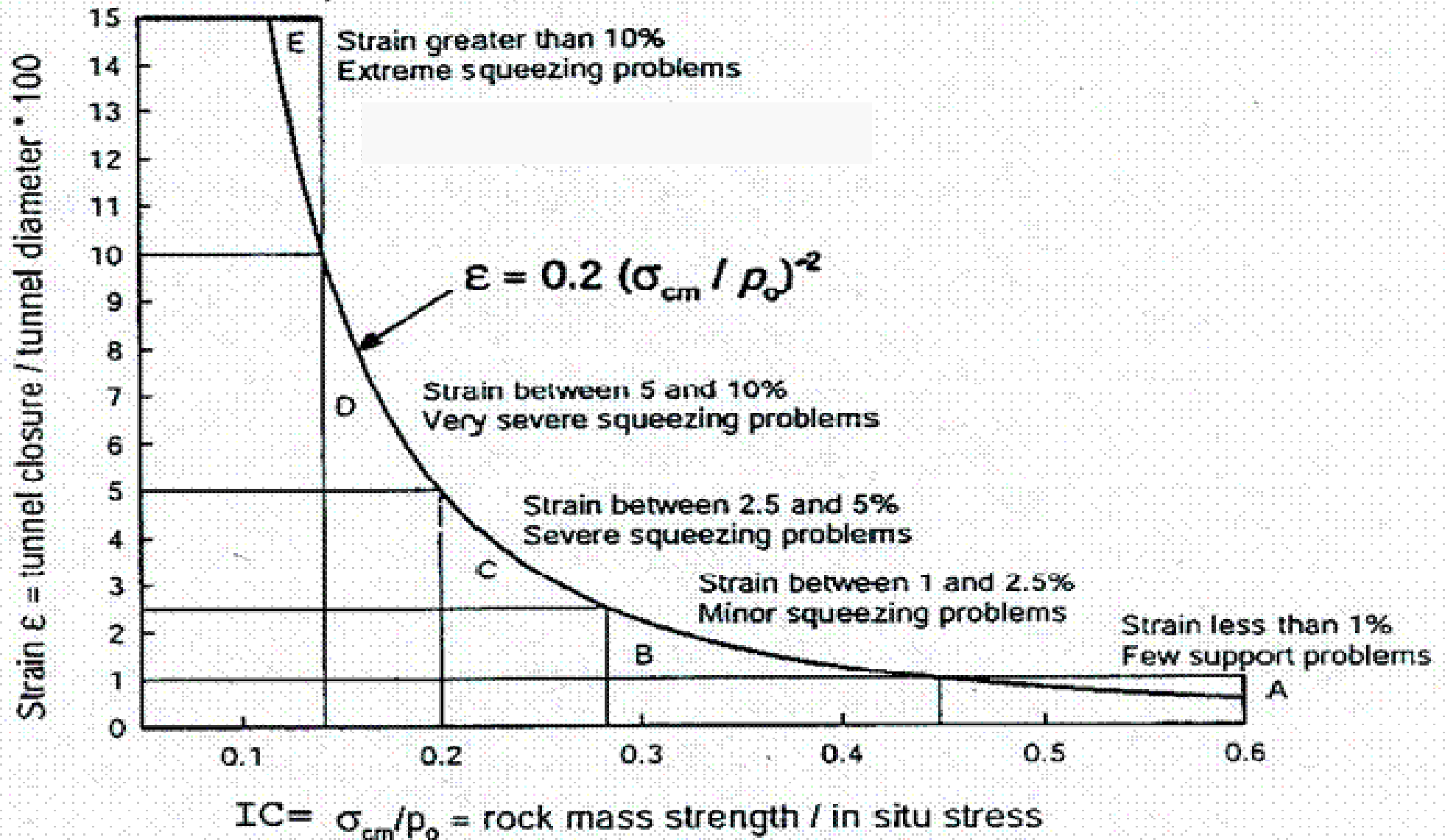
Cuantía de Vidrioresinas sobre el frente para FSf = 1.25

c (t/m²):	0	2	4	6	8	10
H (m)						
10	83	61	39	17	0	0
15	111	89	66	44	22	0
20	138	116	94	72	50	28
25	166	144	122	100	77	55



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

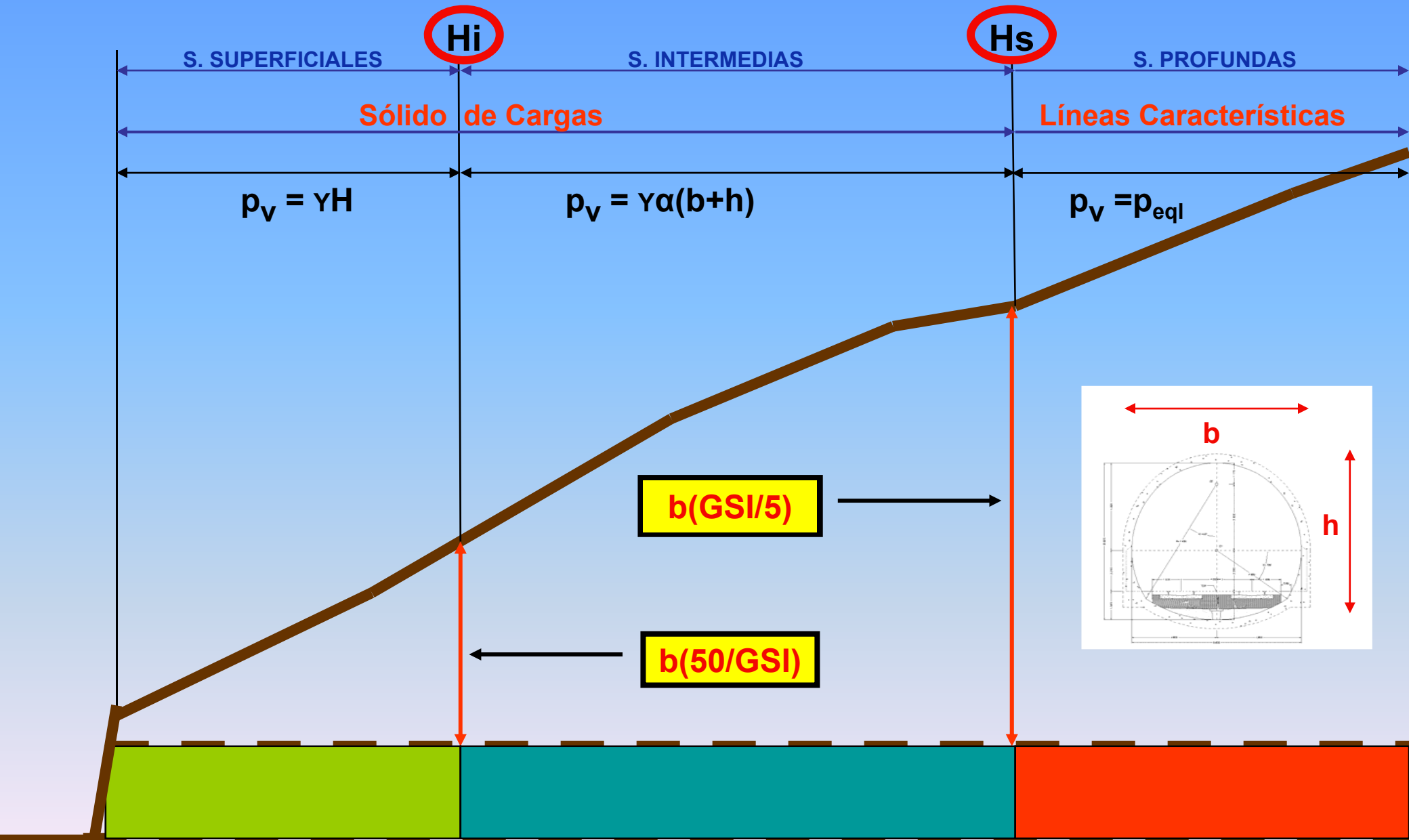
<i>Lunardi</i>		I	II		III	
<i>Hoek y Marinos</i>		A	B	C	D	E
<i>Russo y Otros</i>		a-b	c	d	e	f
Secciones Profundas	<i>Convergencia</i>	$\varepsilon < 1\%$ $\delta < 0.5\%$	$(1\% < \varepsilon < 2.5\%)$ $\delta < 0.5\%$	$(2.5\% < \varepsilon < 5\%)$ $(0.5\% < \delta < 1\%)$	$(5\% < \varepsilon < 10\%)$ $\delta > 1\%$	$\varepsilon > 10\%$ $\delta > 1\%$
	<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	

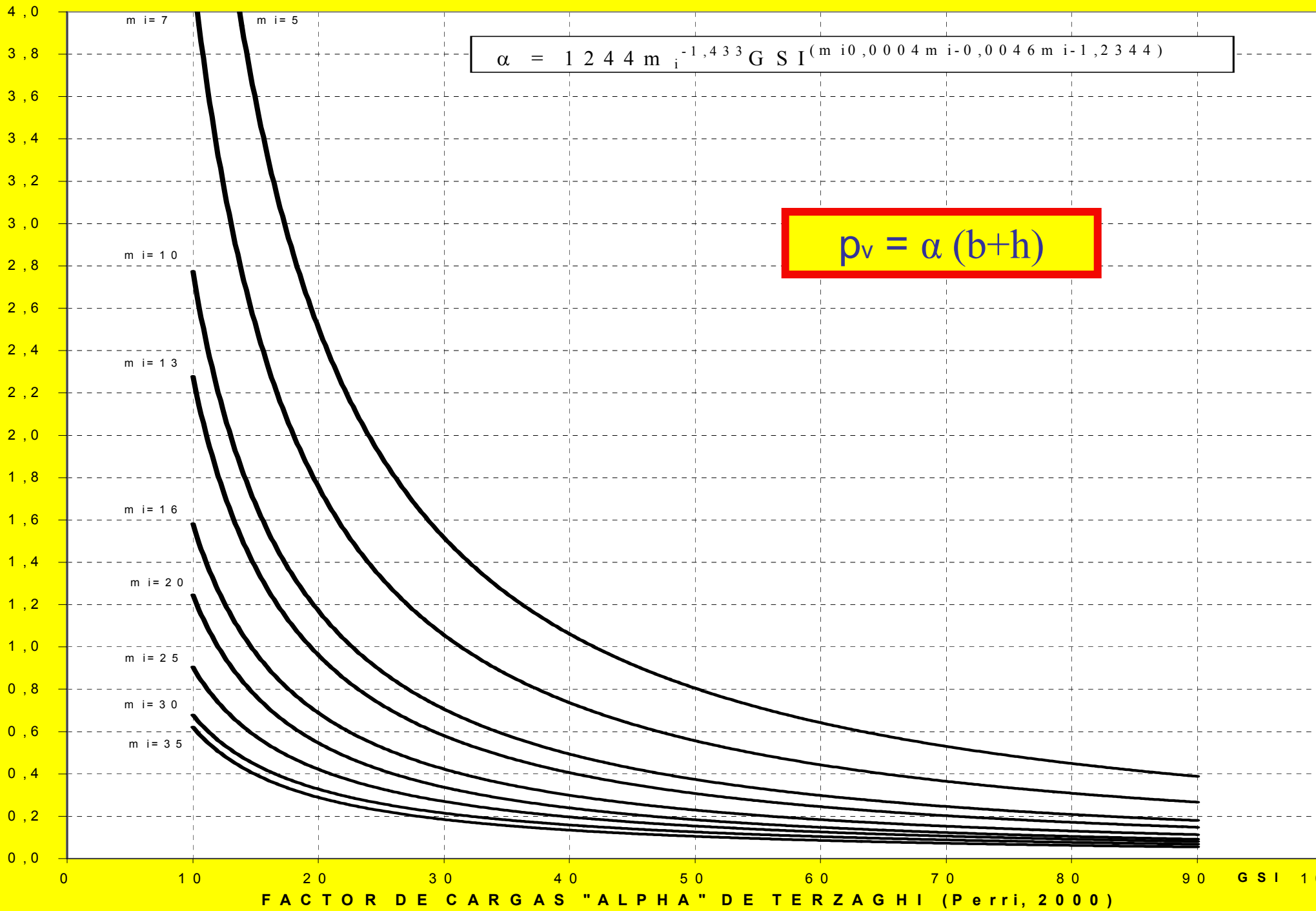
CLASE	COMPORTAMIENTO	COBERTURA		PRESELECCIÓN DEL SOPORTE <i>(Túnel de apr. 10 m de diámetro)</i>
		ALTA IC	BAJA GSI	
A	<p>Estabilidad al frente Estabilidad en la cavidad Eventuales inestabilidades (cinematismos de bloques)</p> <p>$FS_f > 2.5$ $FS_c > 2.5$ $\varepsilon < 1\%$ $\varepsilon_o < 0.5\%$ $(R_p/R_o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





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

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

m i = 7

m i = 5

m i = 10

m i = 13

m i = 16

m i = 20

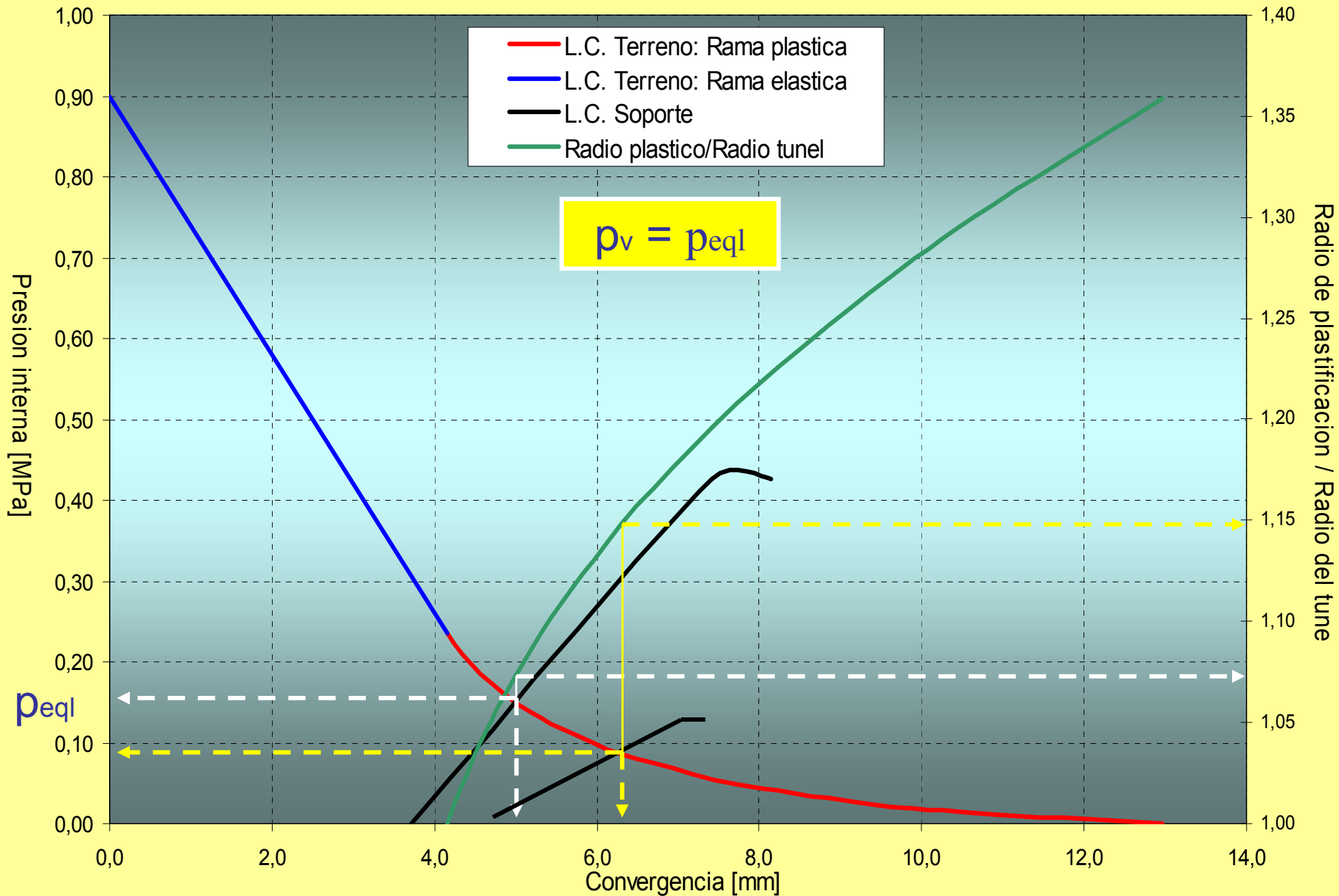
m i = 25

m i = 30

m i = 35

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

Curvas de Interaccion Soporte - Terreno y Extencion de la Plastificacion



ESTRUCTURA DE SOPORTES PARA TÚNELES

	<i>DATA</i>		<i>CÁLCULO</i>	
Rede estabilizada de la excavación (E):	E	no		
Exposición del concreto proyectado (a)	a	no		
Revisión de la excavación proyectada (F_a)	F_a	Aplicar		
Módulo de deformación del concreto proyectado (E_c)	20000000000	Aplicar		
Módulo de Poisson del concreto proyectado (ν)	ν			
Coefficiente de fricción (μ)	0,30			
Ángulo del suelo de concreto proyectado (δ_c)			20°/30°/40°/50°	Aplicar
Revisión crítica del suelo de concreto proyectado (F_{bc})			0,50/0,75/1,00/1,25/1,50	Aplicar
Desplazamiento crítico (milímetros)			100/20	no
Desplazamiento crítico (milímetros (0,2500))			0,0000	no
Sección del muro de mortero (A_m)	A_m	no		
Área del muro mortero (A_m)	A_m	no		
Tensión crítica del muro del muro (F_m)	F_m	Aplicar		
Módulo de deformación del muro (E_m)	E_m	Aplicar		
Separación entre muros (B_m)	B_m	no		
Ángulo del suelo del muro (δ_m)			20°/30°/40°/50°	Aplicar
Revisión crítica del suelo del muro de muro (F_{mc})			0,50/0,75/1,00	Aplicar
Desplazamiento crítico (milímetros)			100/20	no
Revisión al punto B_m (F_q)			20°/30°/40°/50°	Aplicar
Desplazamiento crítico (milímetros) al punto			100/20	no
Casa de falla de los pilares (F_p)	F_p	Ap		
Ángulo del los pilares (δ_p)	δ_p	no		
Sección de los pilares (A_p)	A_p	no		
Módulo de deformación de los pilares (E_p)	E_p	Aplicar		
Separación horizontal entre pilares (B_p)	B_p	no		
Separación longitudinal entre pilares (L_p)	L_p	no		
Flexibilidad experimental de los pilares (Q)	Q	no/0,5		
Ángulo del suelo de pilares (δ_p)			20°/30°/40°/50°/60°	Aplicar
Revisión crítica del suelo de pilares (F_{pc})			0,50/0,75	Aplicar
Desplazamiento de falla (milímetros)			100/20	no
Revisión crítica para la rigidez del suelo de soporte (F_f)	(1,0 - 1,5)			
Ángulo fricción del suelo de soporte estabilizado (δ_s)			10°/15°/20°	Aplicar
Módulo elástico del soporte (E_s)			10000	Aplicar
Revisión crítica del suelo de soporte estabilizado (F_{sc})			10°/15°/20°	Aplicar
Desplazamiento crítico estabilizado para el soporte (F_f)	F_f	no		
Revisión crítica de fricción del soporte (F_{sc})			10°/15°	Aplicar
Ángulo del suelo de soporte estabilizado (δ_f)			10/15	

(*) **Verificar entre los valores mínimos para cada: ancho o espesor (muro), ancho o punto (pilares), y falla (pilares)**

CALCULO ESTRUCTURAL DEL SOPORTE

	DATOS	CÁLCULOS
Radio equivalente de la excavación:	550,00 centímetros	
Espesor del concreto proyectado: Resistencia del concreto proyectado (f'_c) Módulo de deformación del concreto proyectado (E_a) Módulo de Poisson del concreto proyectado (ν) Coeficiente (de escala) Beta 3 Rigidez del anillo de concreto proyectado (K_c) Resistencia cedente del anillo de concreto proyectado Desplazamiento cedente (radial) Desplazamiento radial último (0.3%)	14,00 centímetros 150,00 Kg/cm ² 183711,73 Kg/cm ² 0,17 0,85	8,65 Kg/cm ³ 3,20 Kg/cm ² 0,37 centímetros 1,65 centímetros
Sección del marco metálico Inercia del marco metálico Tensión cedente del acero del marco (f'_y) Módulo de deformación del acero (E_a) Separación entre marcos Rigidez del anillo del marco (K_m) Resistencia cedente del anillo del marco de acero Desplazamiento cedente (radial) Resistencia al pandeo libre Desplazamiento radial correspondiente al pandeo libre	2 IPN140 36,40 cm ² 1144,00 cm ⁴ 2500,00 Kg/cm ² 2100000,00 Kg/cm ² 150,00 centímetros	1,68 Kg/cm ³ 1,10 Kg/cm ² 0,65 centímetros 0,29 Kg/cm ² 0,17 centímetros
Carga cedente de los pernos Longitud del los pernos Sección de los pernos Módulo de deformación de los pernos (E_p) Separación circunferencial entre pernos Separación longitudinal entre pernos Flexibilidad experimental de los pernos (Q) Rigidez del anillo de pernos (K_p) Resistencia cedente del anillo de pernos Desplazamiento cedente (radial)	ϕ 1" 20000,00 Kg 600,00 centímetros 7,00 cm ² 2100000,00 Kg/cm ² 550,00 centímetros 150,00 centímetros 0,00000001 cm/Kg	0,30 Kg/cm ³ 0,24 Kg/cm ² 0,82 centímetros
Rigidez del anillo de soporte combinado Factor de forma para la rigidez (1.0 - 1.6) Rigidez efectiva del soporte (K_s) Presión máxima teórica del anillo de soporte Deformación máxima admisible para el soporte (*) Resistencia efectiva del soporte Factor de forma para la presión (1.0 - 3.6)	1,20	10,63 Kg/cm ³ 8,86 Kg/cm ³ 4,55 Kg/cm ² 0,37 centímetros 3,28 Kg/cm ² 1,39

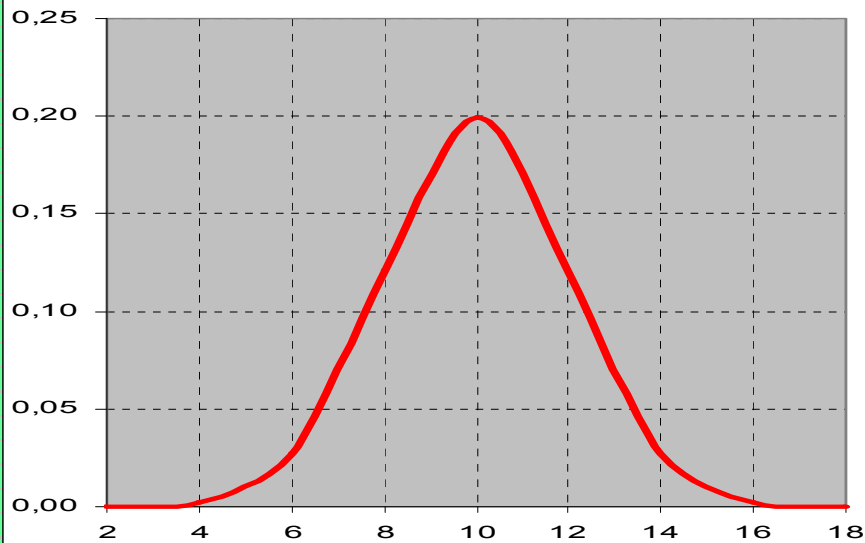
(*) Valor menor entre los máximos admisibles para evitar: cedencia o ruptura, cedencia o pandeo, y falla

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

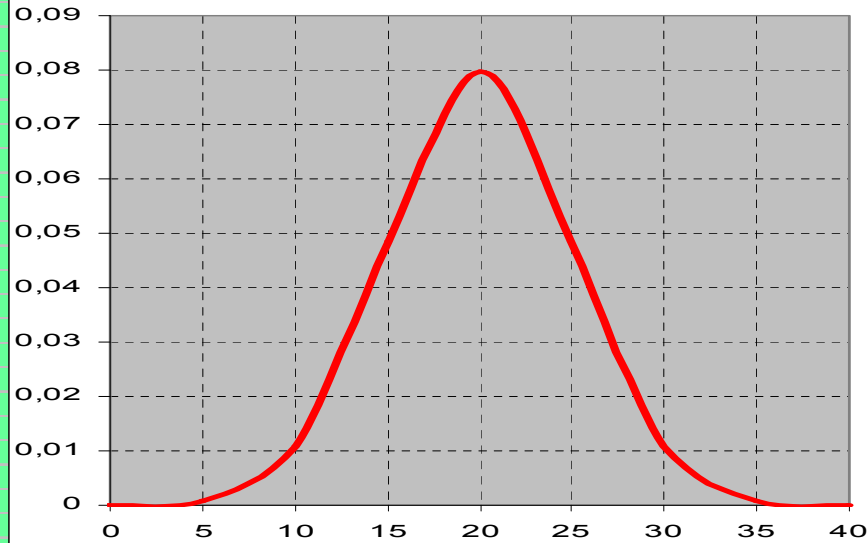
<i>Tipo de Soporte</i>	<i>Concreto Proyectado</i>	<i>Costillas Metálicas</i>	<i>Pernos Metálicos 20 t</i>	<i>Capacidad (Kg/cm²)</i>
SP-a	10 cm	-	eventuales	1,5
SP-b	14 cm	2 IPN140 @ 150 cm	2 x 4 m @ par de costillas	2,5
		o, alternamente 7 pernos x 4m @ 150 cm (sin costillas)		
SP-c	16 cm	2 IPN160 @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

CARACTERISTICAS GEOMECANICAS DEL MATERIAL ROCOSO (de la Roca Intacta)

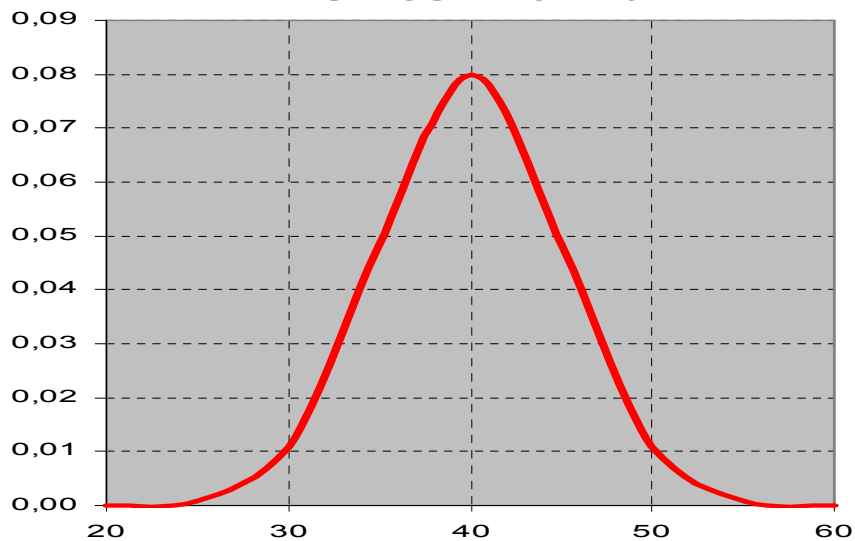
INPUT: $\mu_i = 10 \pm 4$



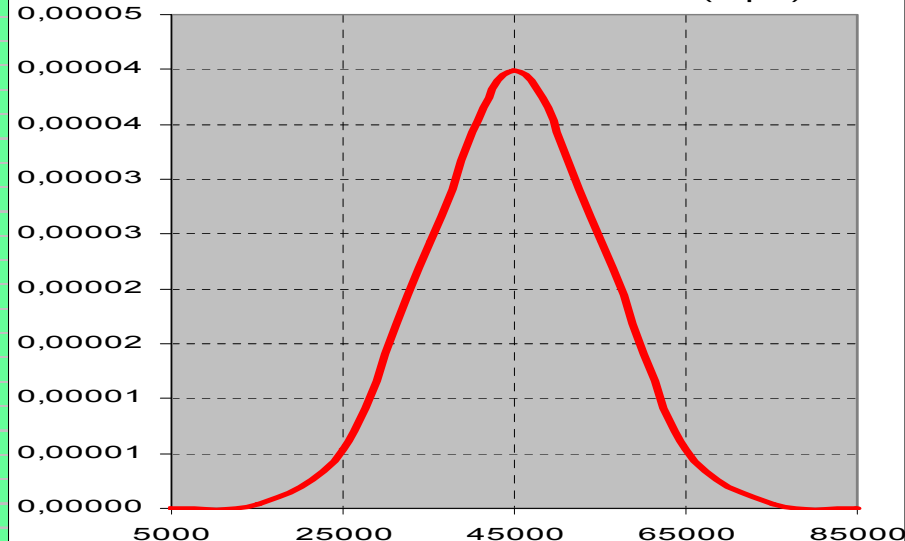
INPUT: $C_o = 20 \pm 10$ (Mpa)



INPUT: $GSI = 40 \pm 10$



INPUT : $E = 45000 \pm 10000$ (Mpa)



Assumptions

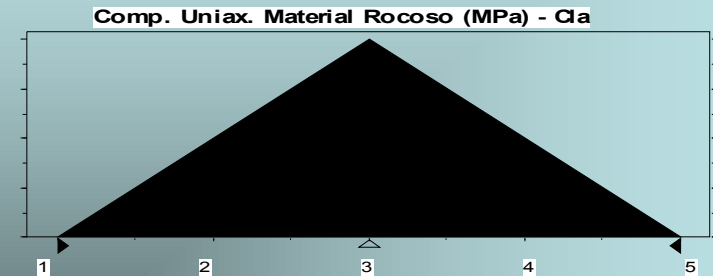
Assumption: Comp. Uniax. Material Rocoso (MPa) - Cla

Cell: E11

Triangular distribution with parameters:

Minimum	1
Likeliest	3
Maximum	5

Selected range is from 1 to 5
Mean value in simulation was 3



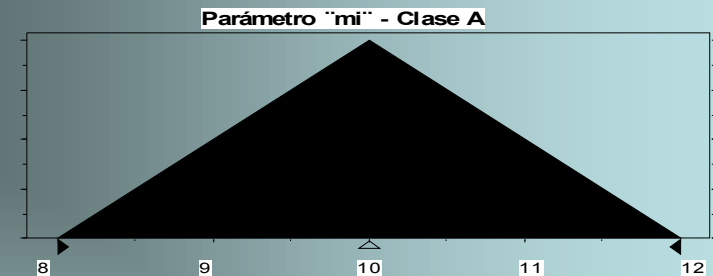
Assumption: Parámetro "mi" - Clase B

Cell: E12

Triangular distribution with parameters:

Minimum	8
Likeliest	10
Maximum	12

Selected range is from 8 to 12
Mean value in simulation was 10



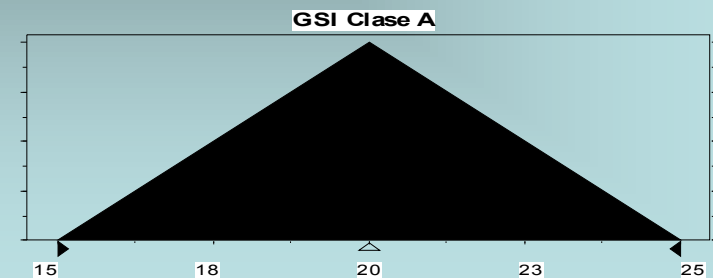
Assumption: GSI Clase B

Cell: E16

Triangular distribution with parameters:

Minimum	15
Likeliest	20
Maximum	25

Selected range is from 15 to 25
Mean value in simulation was 20



Forecast: Fricción Macizo Rocoso - Clase C

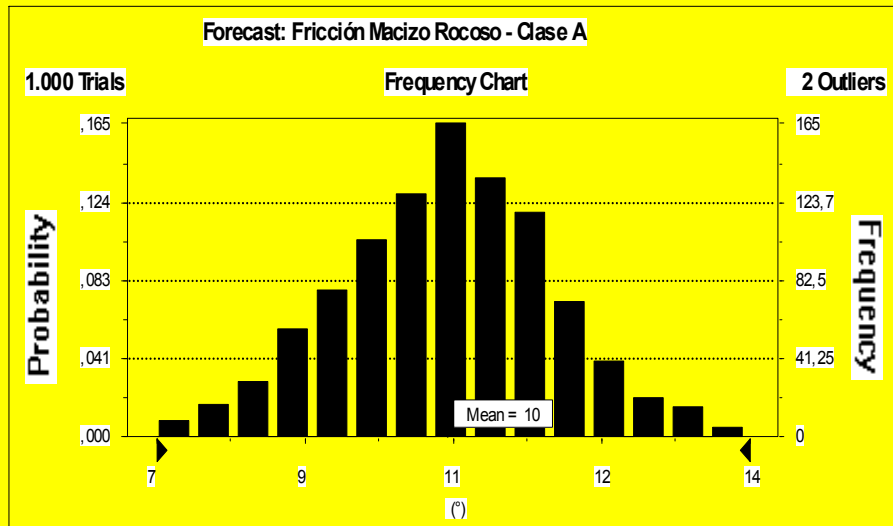
Summary:

Display Range is from 7 to 14 (°)

Entire Range is from 7 to 14 (°)

After 1.000 Trials, the Std. Error of the Mean is 0

Statistics:	Value
Trials	1000
Mean	10
Median	10
Mode	---
Standard Deviation	1
Variance	2
Skewness	-0,10
Kurtosis	2,93
Coeff. of Variability	0,12
Range Minimum	7
Range Maximum	14
Range Width	7
Mean Std. Error	0,04



recast: Modulo de Deformación (Em)

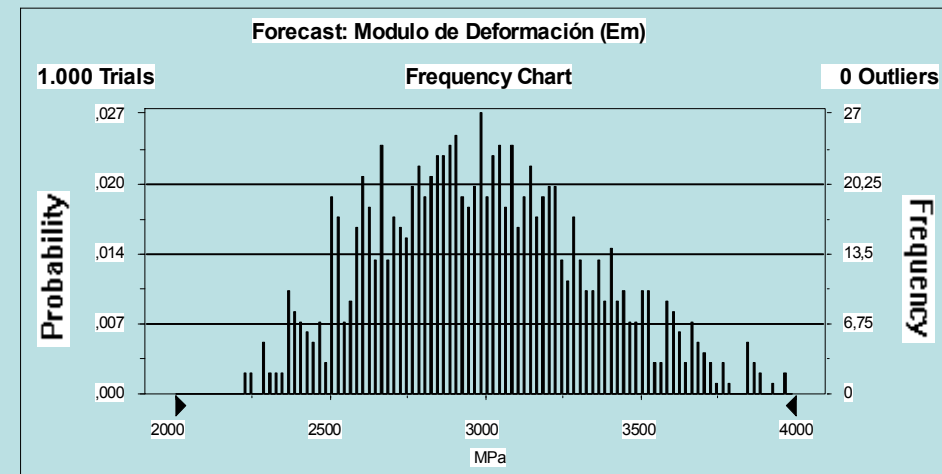
Summary:

Display Range is from 2000 to 4000 MPa

Entire Range is from 2229 to 3980 MPa

After 1.000 Trials, the Std. Error of the Mean is 11

Statistics:	Value
Trials	1000
Mean	2994
Median	2979
Mode	---
Standard Deviation	346
Variance	120019
Skewness	0,27
Kurtosis	2,61
Coeff. of Variability	0,12
Range Minimum	2229
Range Maximum	3980
Range Width	1751
Mean Std. Error	10,96



Forecast: Comp. Uniax. Macizo Rocoso

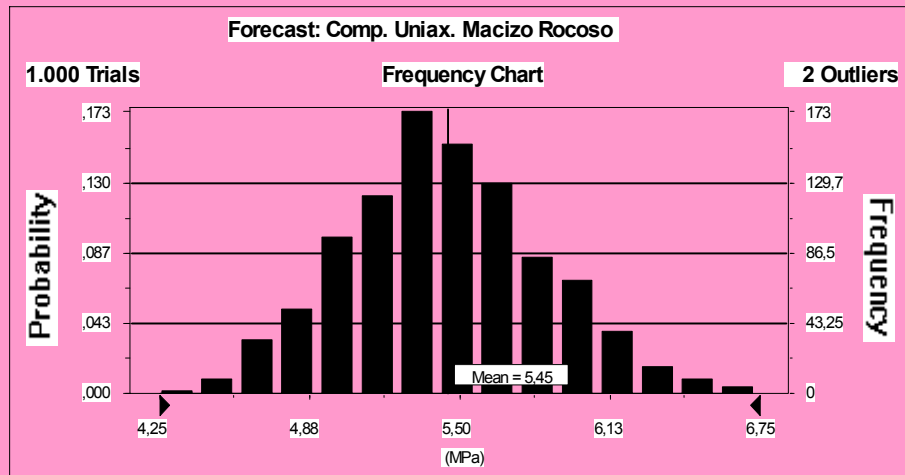
Summary:

Display Range is from 4,25 to 6,75 (MPa)

Entire Range is from 4,28 to 6,86 (MPa)

After 1.000 Trials, the Std. Error of the Mean is 0,01

Statistics:	Value
Trials	1000
Mean	5,45
Median	5,43
Mode	---
Standard Deviation	0,42
Variance	0,18
Skewness	0,23
Kurtosis	2,94
Coeff. of Variability	0,08
Range Minimum	4,28
Range Maximum	6,86
Range Width	2,58
Mean Std. Error	0,01



Forecast: Modulo de Reaccion de Macizo Rocoso (Kn)

Ce

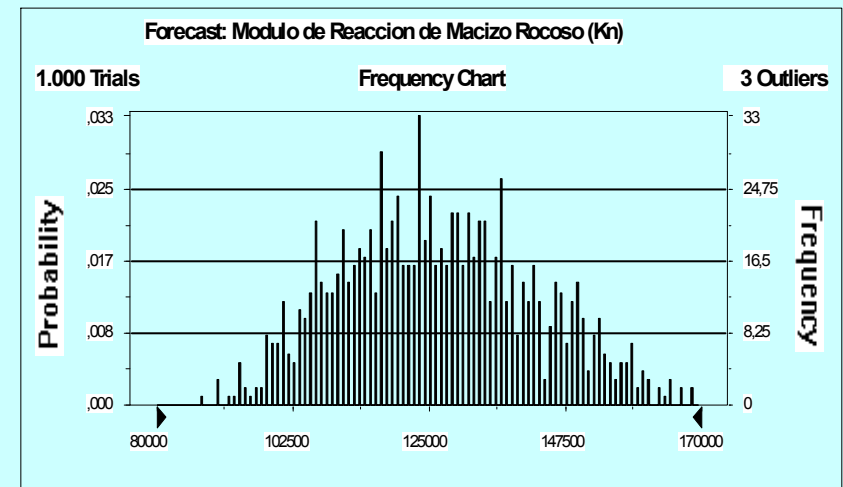
Summary:

Display Range is from 80000 to 170000

Entire Range is from 87595 to 175239

After 1.000 Trials, the Std. Error of the Mean is 511

Statistics:	Value
Trials	1000
Mean	126710
Median	125579
Mode	---
Standard Deviation	16144
Variance	260621736
Skewness	0,23
Kurtosis	2,54
Coeff. of Variability	0,13
Range Minimum	87595
Range Maximum	175239
Range Width	87644
Mean Std. Error	510,51

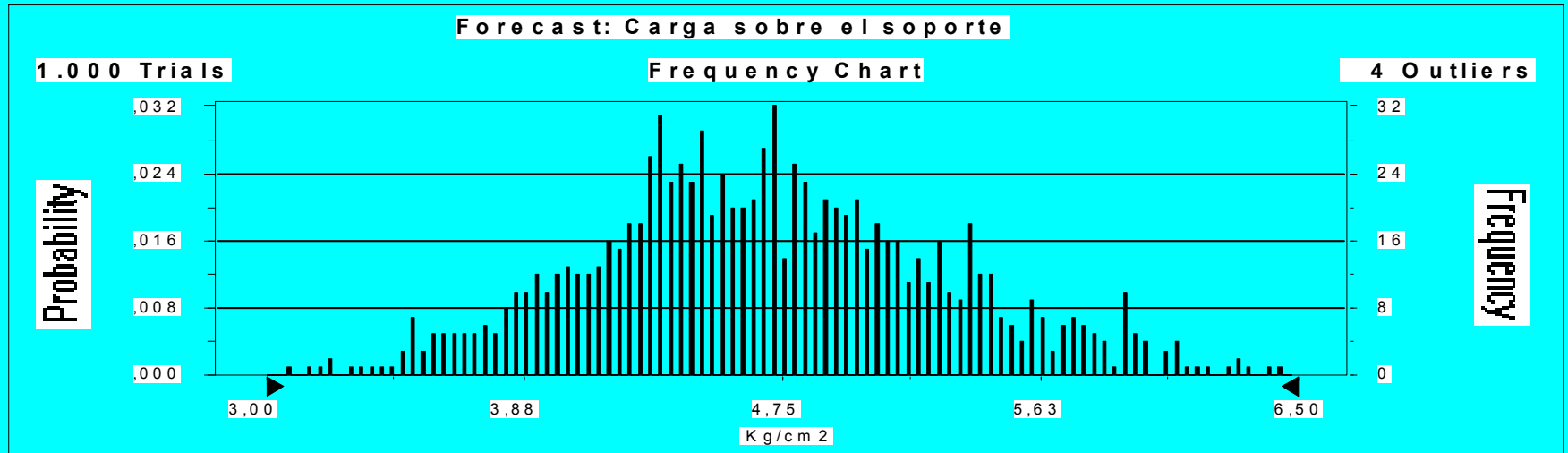


Summary:

Display Range is from 3,00 to 6,50 Kg/cm²
 Entire Range is from 3,09 to 6,62 Kg/cm²
 After 1.000 Trials, the Std. Error of the Mean is 0,02

Statistics:

	<u>Value</u>
Trials	1 000
Mean	4,71
Median	4,68
Mode	---
Standard Deviation	0,61
Variance	0,37
Skewness	0,26
Kurtosis	2,97
Coeff. of Variability	0,13
Range Minimum	3,09
Range Maximum	6,62
Range Width	3,53
Mean Std. Error	0,02



CALCULO ESTRUCTURAL DEL SOPORTE

Forecast: P-c: Resistencia efectiva del soporte

Summary:

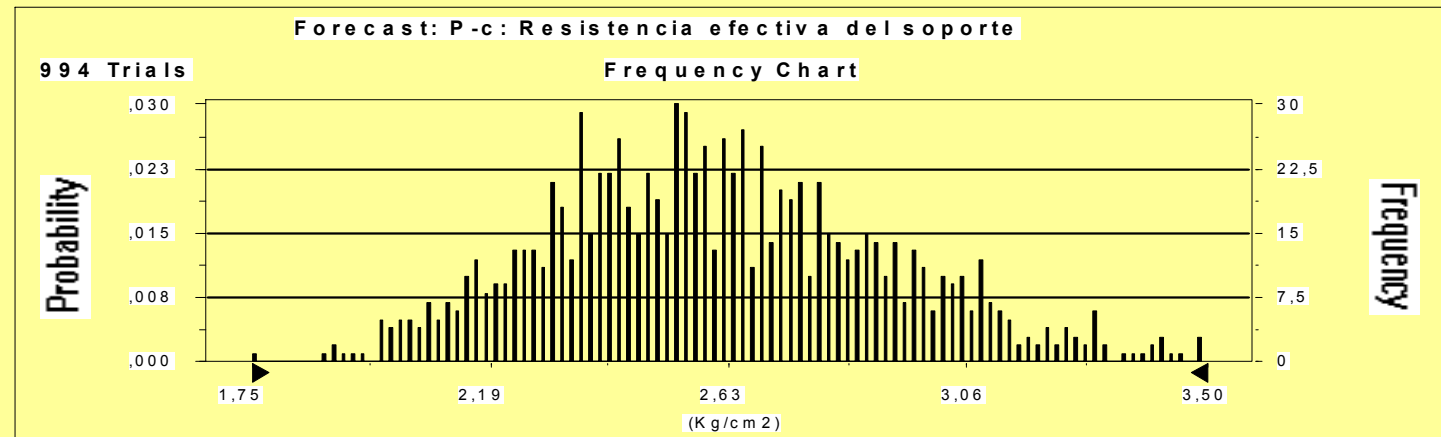
Display Range is from 1,75 to 3,50 (Kg/cm²)

Entire Range is from 1,74 to 3,86 (Kg/cm²)

After 1.000 Trials, the Std. Error of the Mean is 0,01

Statistics for Display Range:

	<u>Value</u>
Trials	994
Mean	2,60
Median	2,58
Mode	---
Standard Deviation	0,31
Variance	0,10
Skewness	0,28
Kurtosis	2,78
Coeff. of Variability	0,12
Range Minimum	1,75
Range Maximum	3,50
Range Width	1,75
Mean Std. Error	0,01



CALCULO ESTRUCTURAL DEL SOPORTE

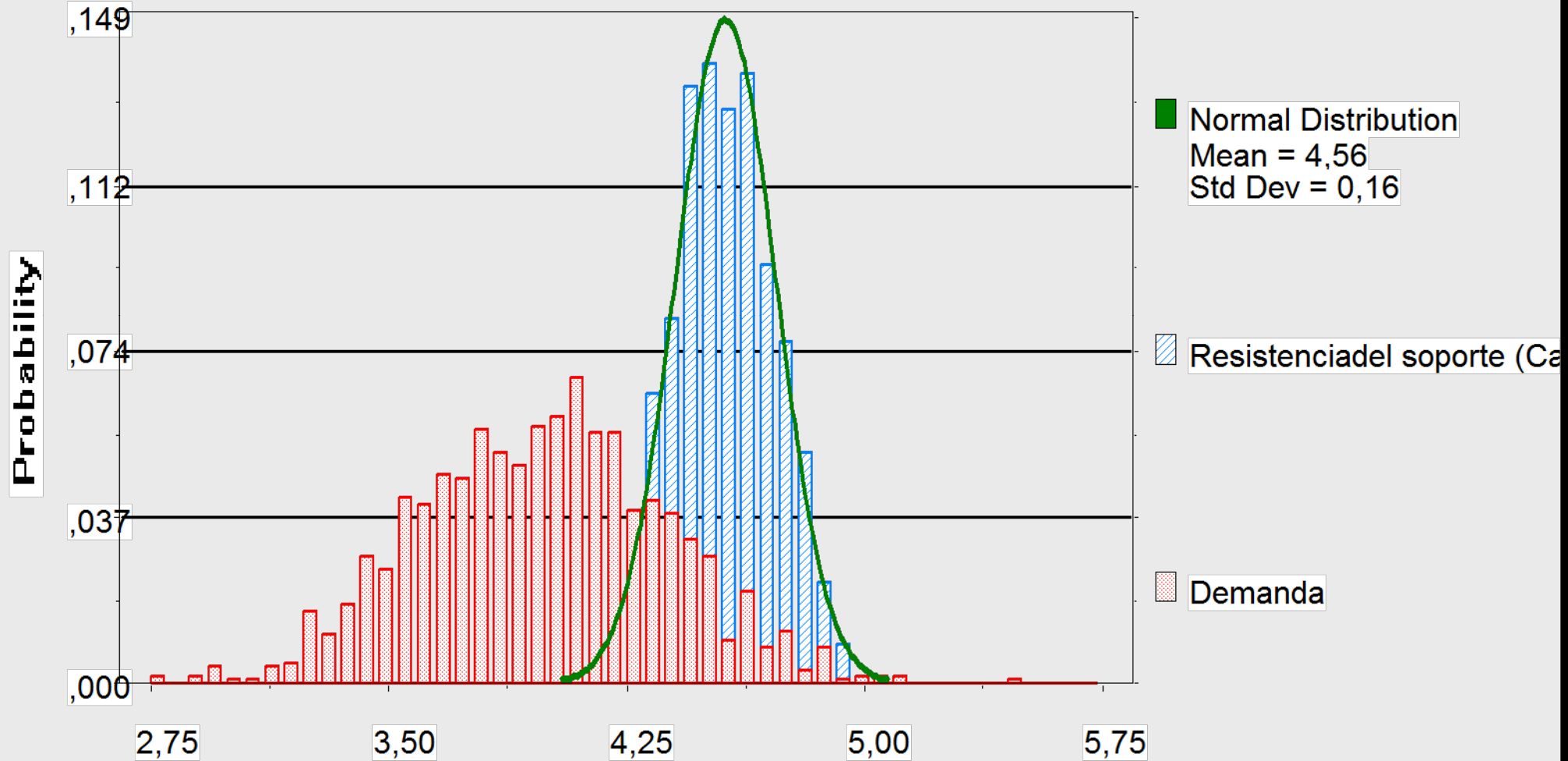
Soportes Primarios: Características estructurales y estadísticas

Clase de Roca	Soporte Primario	Concreto Proyectoado	Costillas Metálicas	Pernos Metálicos (20t)	Capacidad (Kg/cm ²)	Rigidez (Kg/cm ² /cm)
II	P-a/b	10 cm	-	-	1.5 ($\delta=0,16$)	4.0 ($\delta=0,43$)
	P-a/b*	10 cm	-	eventuales	1.5 ($\delta=0,16$)	4.0 ($\delta=0,43$)
	P-c2	10 cm	2 IPN140 @ 150 cm	2 x 4 m @ par de costillas	2.3 ($\delta=0,20$)	6.2 ($\delta=0,55$)
III	P-c1	14 cm	2 IPN140 @ 150 cm	2 x 4 m @ par de costillas	3.1 ($\delta=0,29$)	8.3 ($\delta=0,76$)
	P-d2	14 cm	2 IPN160 @ 125 cm	4 x 6 m @ par de costillas	3.6 ($\delta=0,31$)	9.6 ($\delta=0,83$)
IV-3	P-d1	16 cm	2 IPN160 @ 125 cm	4 x 6 m @ par de costillas	4.1 ($\delta=0,36$)	10.7 ($\delta=0,95$)
IV-2	P-e1	16 cm	2 IPN200 @ 100 cm	4 x 6 m @ par de costillas	4.6 ($\delta=0,35$)	12.3 ($\delta=0,95$)
IV-1	P-f 1	20 cm	2 IPN200 @ 100 cm	4 x 6 m @ par de costillas	5.3 ($\delta=0,44$)	14.4 ($\delta=1,20$)
V	P-f 1*	20 cm	2 IPN200 (H variab.)	Micropilotes (Vert. y Horiz.)	5.3 ($\delta=0,44$)	22.4 ($\delta=1,72$)
	P-f 2	20 cm	2 IPN200 @ 100 cm	7 x 6 m @ par de costillas	6.1 ($\delta=0,27$)	16.9 ($\delta=0,74$)
	P-f 3	20 cm	2 IPN200 @ 100 cm	11 x 6 m @ par de costillas	6.5 ($\delta=0,49$)	17.5 ($\delta=1,31$)
	P-f 4	20 cm	2 IPN200 @ 100 cm	15 x 6 m @ par de costillas	7.2 ($\delta=0,54$)	19.5 ($\delta=1,45$)
	P-f 5	20 cm	2 IPN200 @ 75 cm	15 x 6 m @ par de costillas	8.0 ($\delta=0,53$)	21.5 ($\delta=1,44$)
	P-f 6	20 cm	2 IPN200 @ 50 cm	15 x 6 m @ par de costillas	9.9 ($\delta=0,56$)	26.7 ($\delta=1,51$)

DEMANDA (carga) Vs CAPACIDAD (resistencia) DEL SOPORTE

Overlay Chart

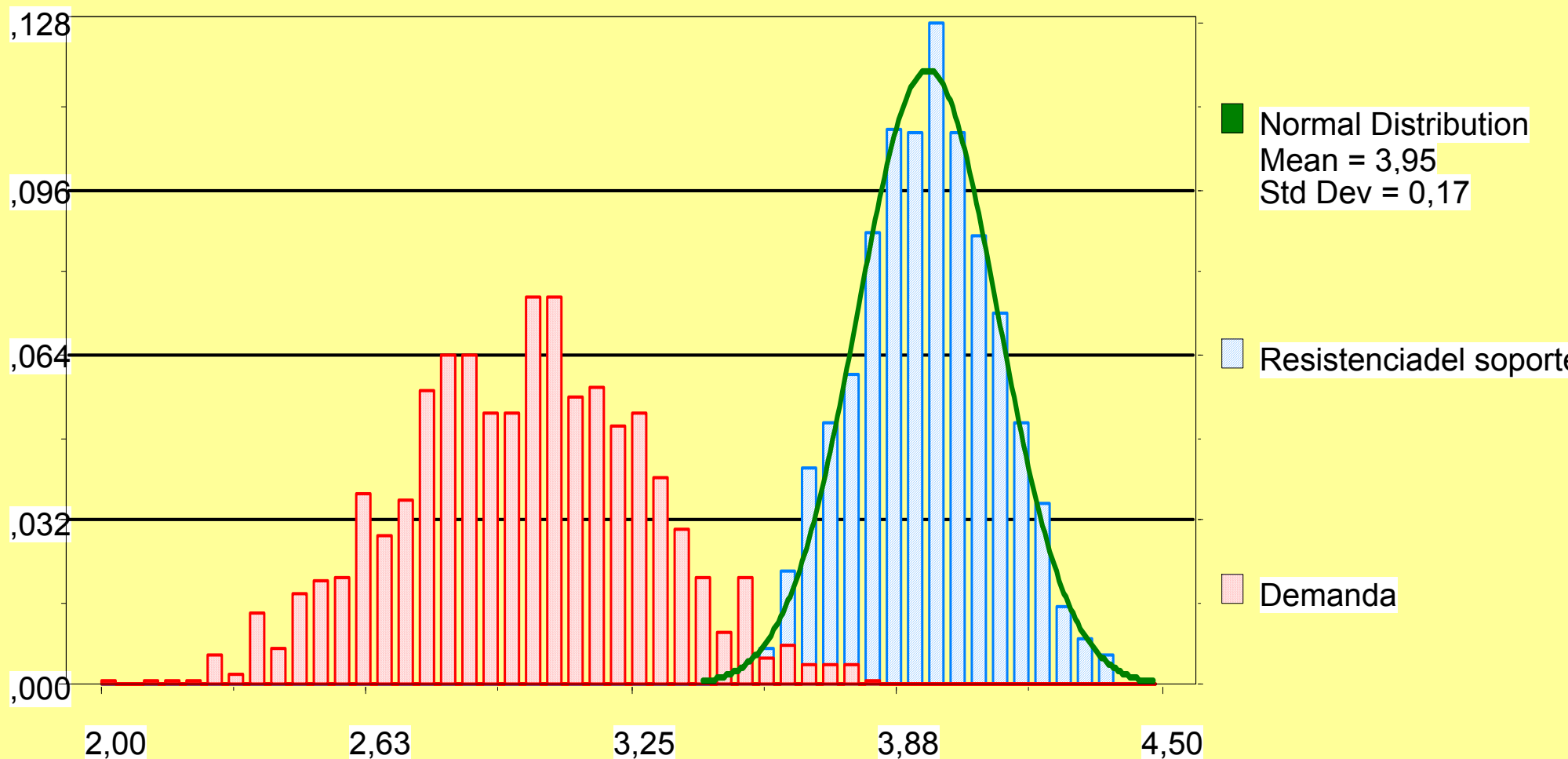
Capacidad vs. Demanda



DEMANDA (carga) Vs CAPACIDAD (resistencia) DEL SOPORTE

Overlay Chart

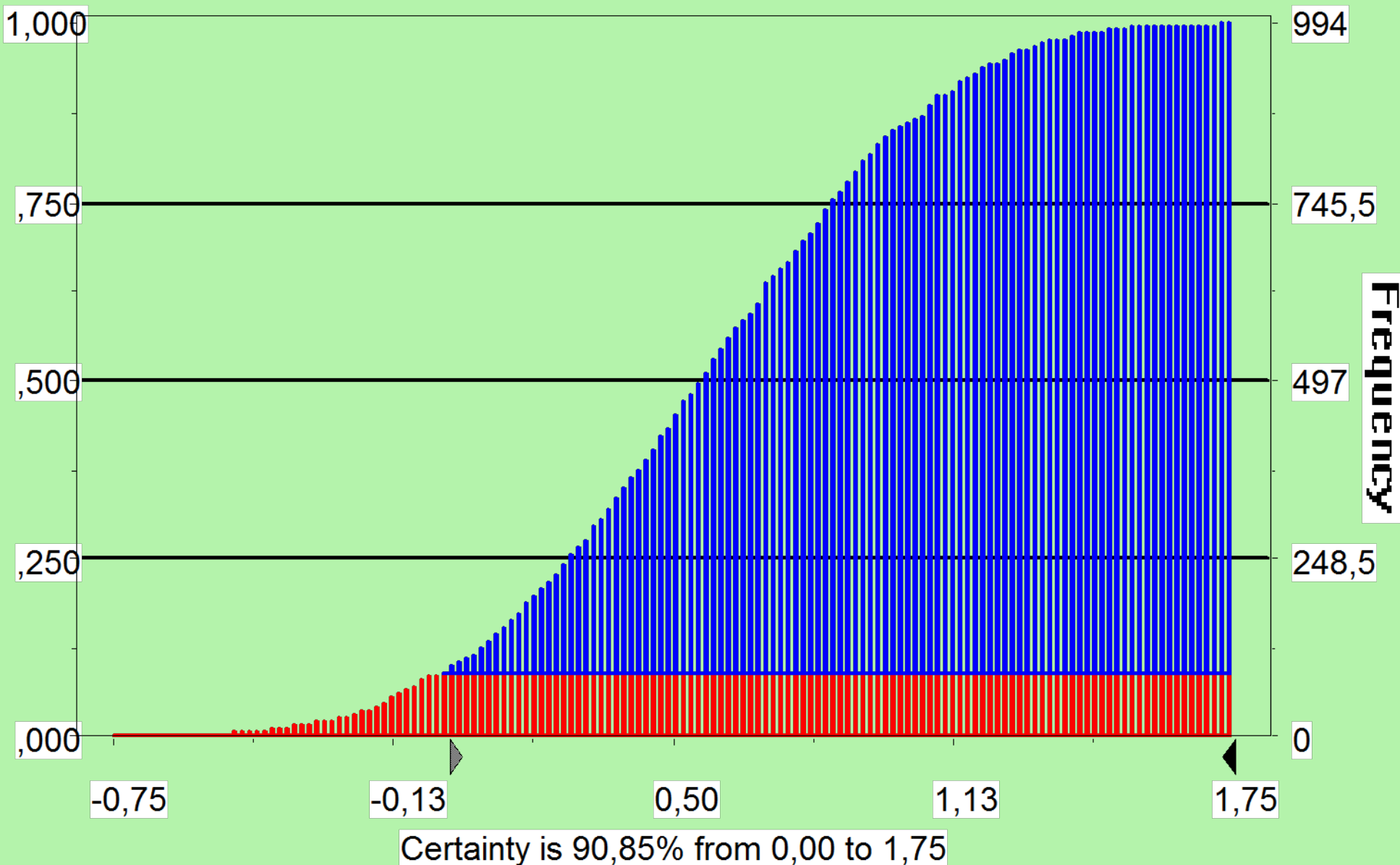
Capacidad vs. Demanda



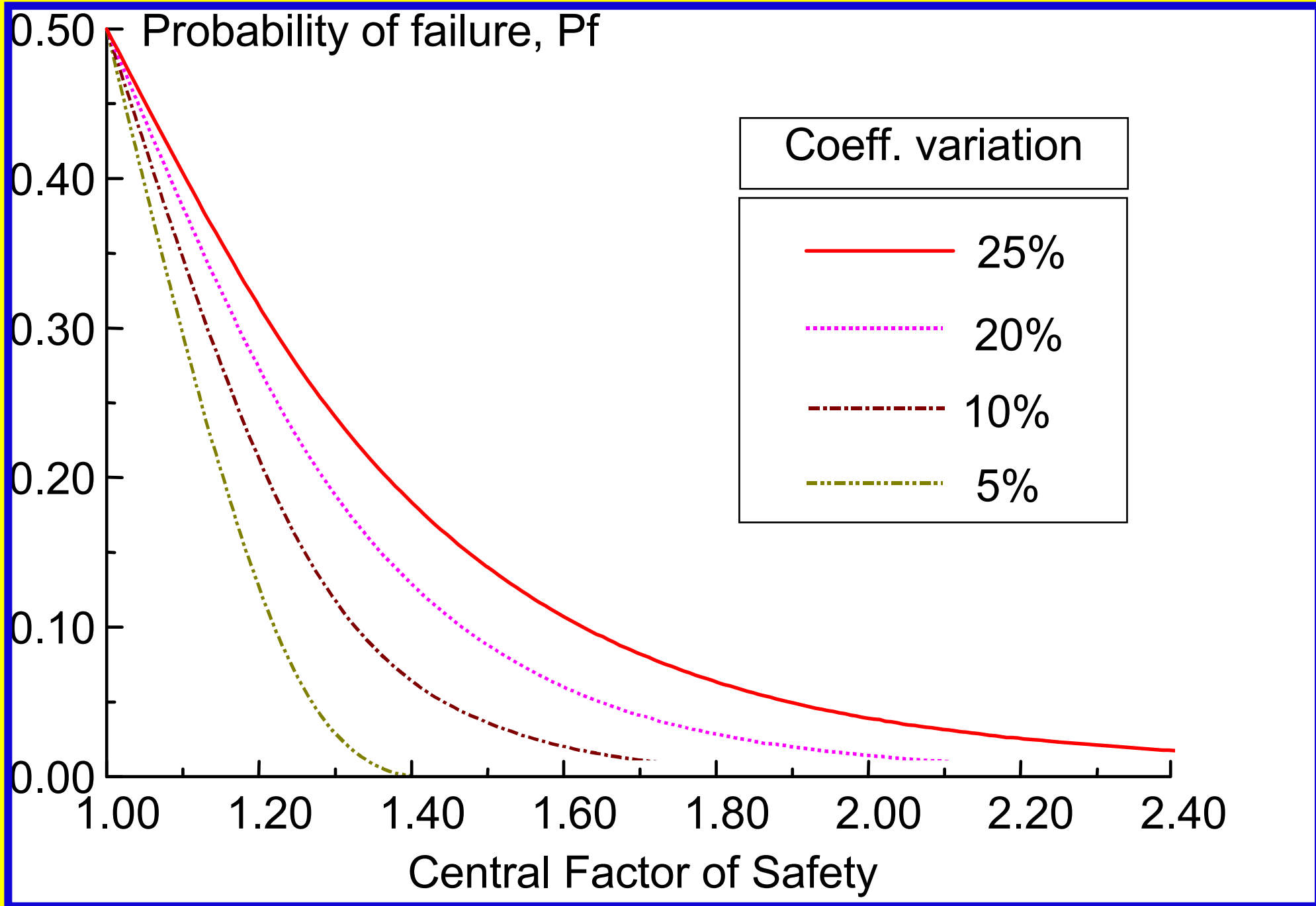
Forecast: C-D

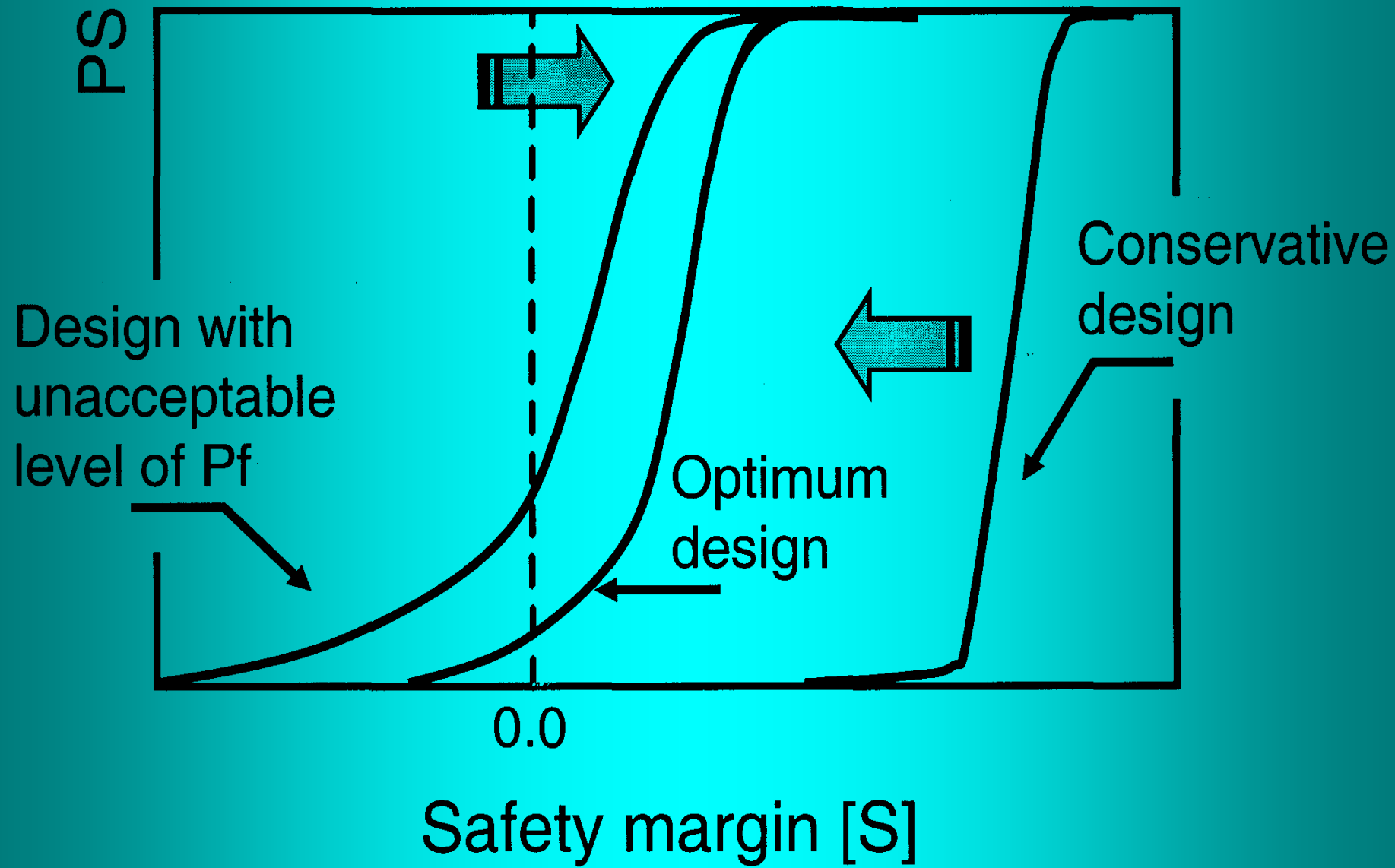
994 Trials

Cumulative Chart



Certainty is 90,85% from 0,00 to 1,75





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	-	-

SOPORTE Vs. COBERTURA - GSI - I C

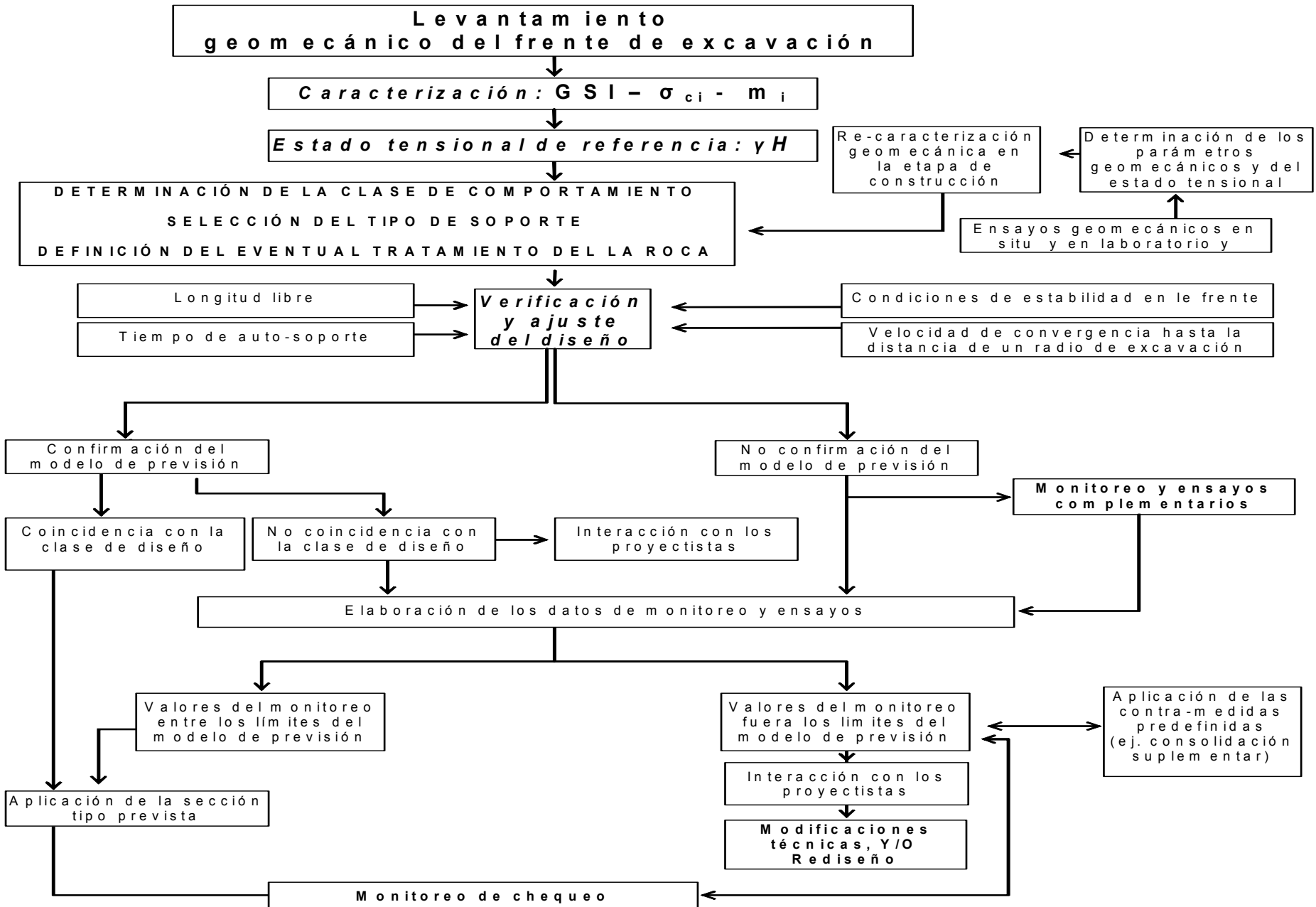
para túneles de aproximadamente 10m de diámetro

<i>COBERTURAS</i> $\leq H_i$		$H_i < \text{COBERTURAS} \leq H_s$		<i>COBERTURAS</i> $> H_s$	
GSI ≤ 20	SP-e	GSI ≤ 20	SP-e	IC ≤ 0.15	SP-e
$20 < \text{GSI} \leq 40$	SP-e	$20 < \text{GSI} \leq 40$	SP-d	$0.15 < \text{IC} \leq 0.20$	SP-d
$30 < \text{GSI} \leq 50$	SP-d	$30 < \text{GSI} \leq 50$	SP-c	$0.20 < \text{IC} \leq 0.30$	SP-c
$40 < \text{GSI} \leq 60$	SP-c	$40 < \text{GSI} \leq 60$	SP-b	$0.30 < \text{IC} \leq 0.45$	SP-b
GSI > 60	SP-c	GSI > 60	SP-a	IC > 0.45	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>	<i>Intensificación del monitoreo</i>
<i>Nivel de Atención ($\geq 3,0$)</i>	<i>Intensificación del monitoreo con 20 – 40 Vidrioresinas (si GSI ≤ 30)</i>
<i>Nivel de Alarma 1 ($= 4,5$)</i>	<i>8 – 15 Pernos con 20 – 50 Vidrioresinas (si GSI ≤ 30)</i>
<i>Nivel de Alarma 2 ($> 4,5$)</i>	<i>Acciones del Nivel de Alarma 1 con solera primaria de concreto</i>
<i>Nivel de Alarma 3 ($>> 4,5$)</i>	<i>Acciones del Nivel de Alarma 2 con pre-soporte de micropilotes</i>

DISEÑO DEL REVESTIMIENTO DEFINITIVO

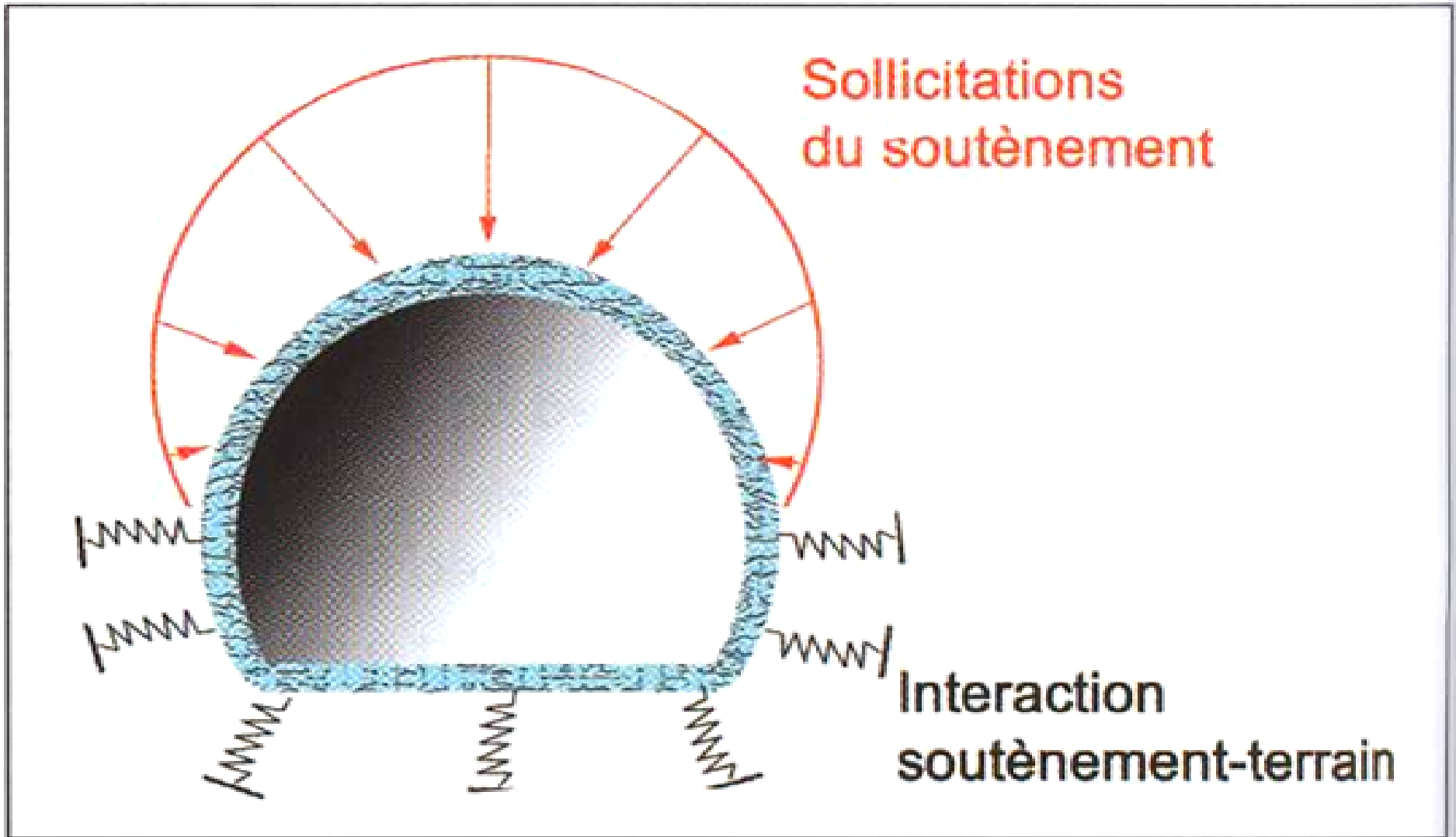
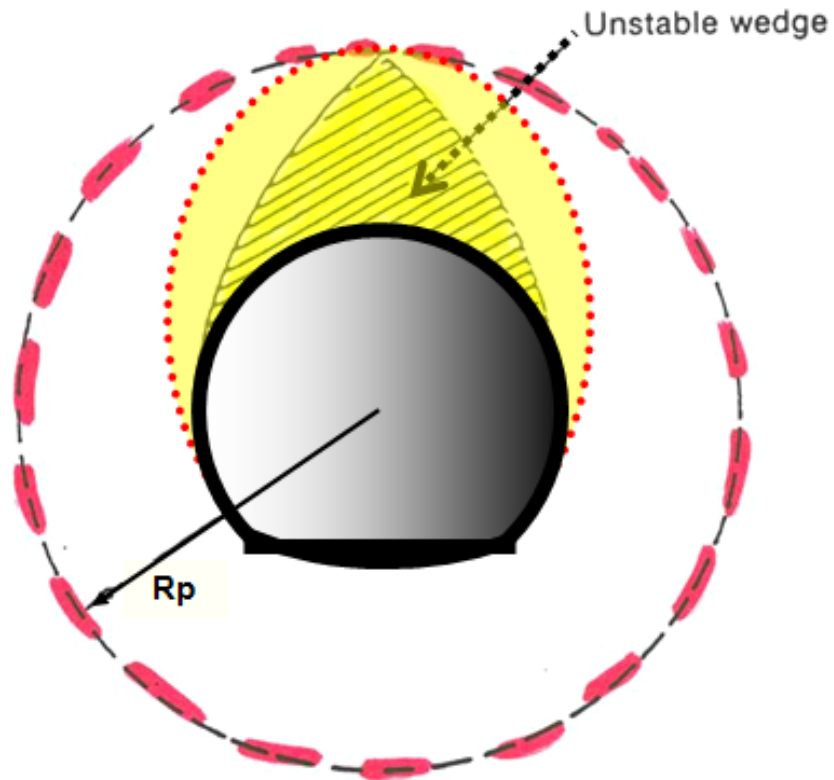


Figure 3 - Principle of hyperstatic reactions method

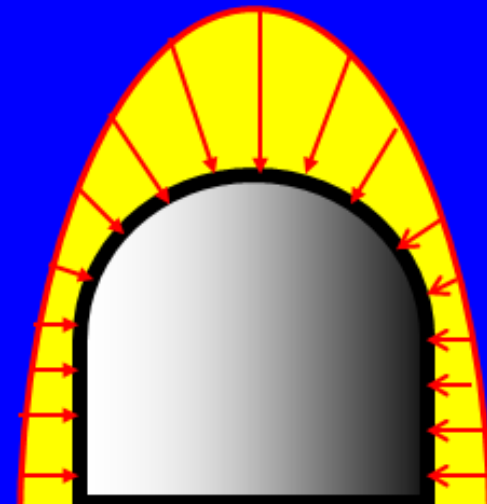
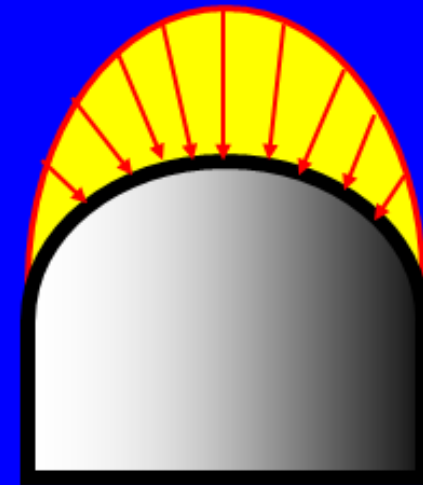
CARGAS DE DISEÑO PARA EL REVESTIMIENTO DEFINITIVO

Gravity effect

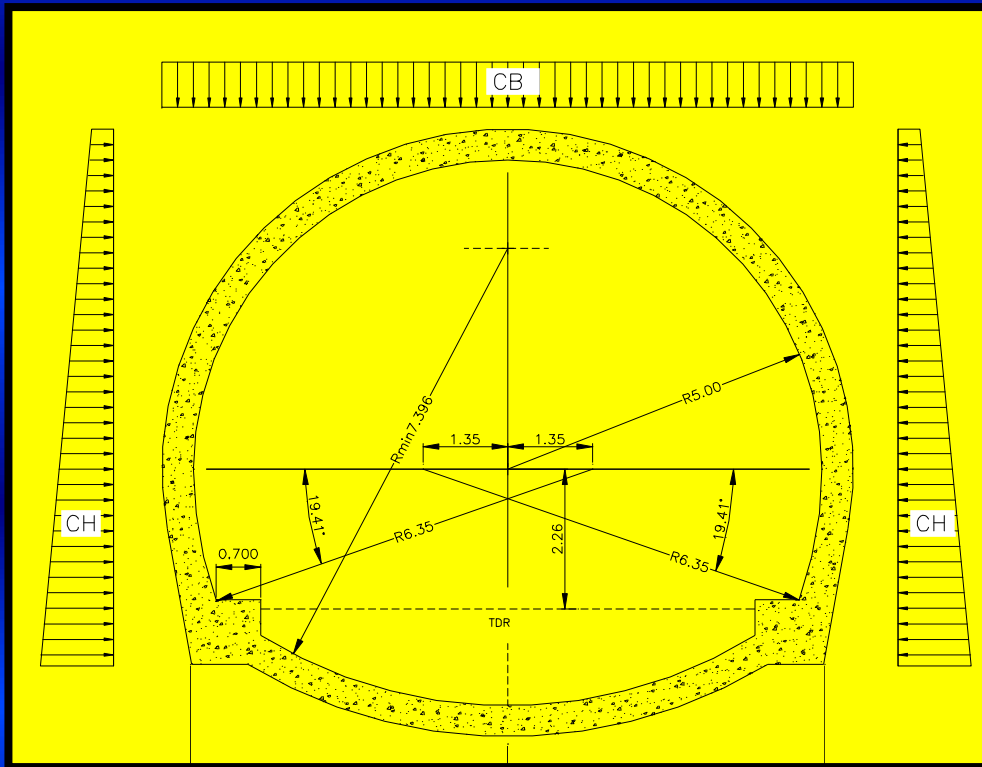
Decompression is accompanied by the formation of an unstable zone above the crown which might eventually collapse



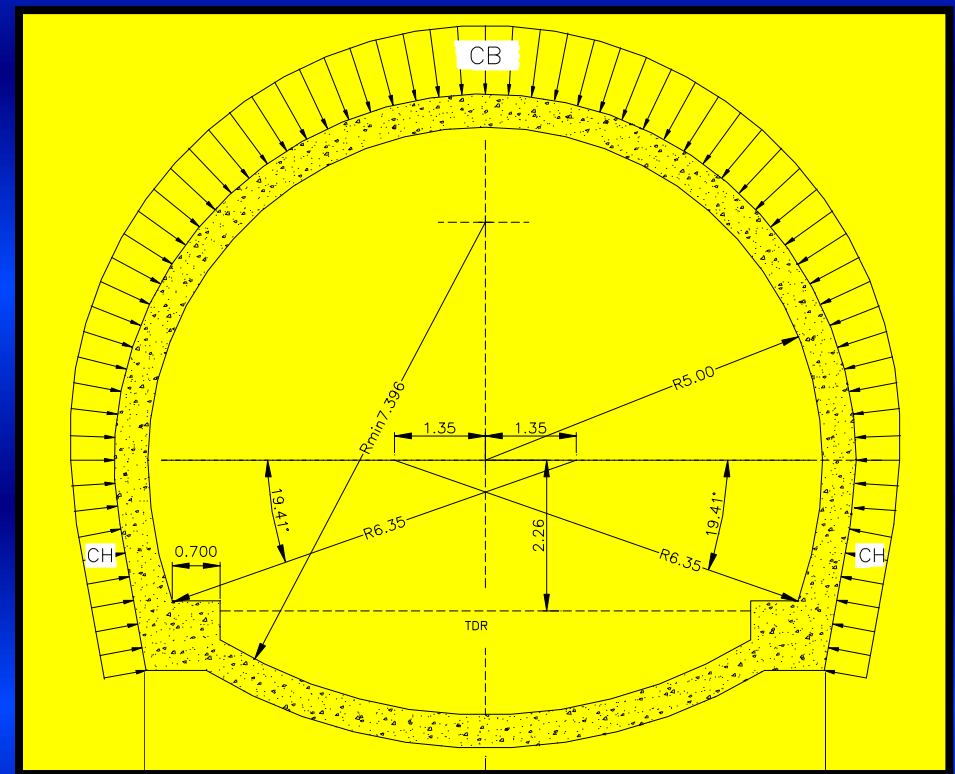
- Gravity effect on decompressed zone



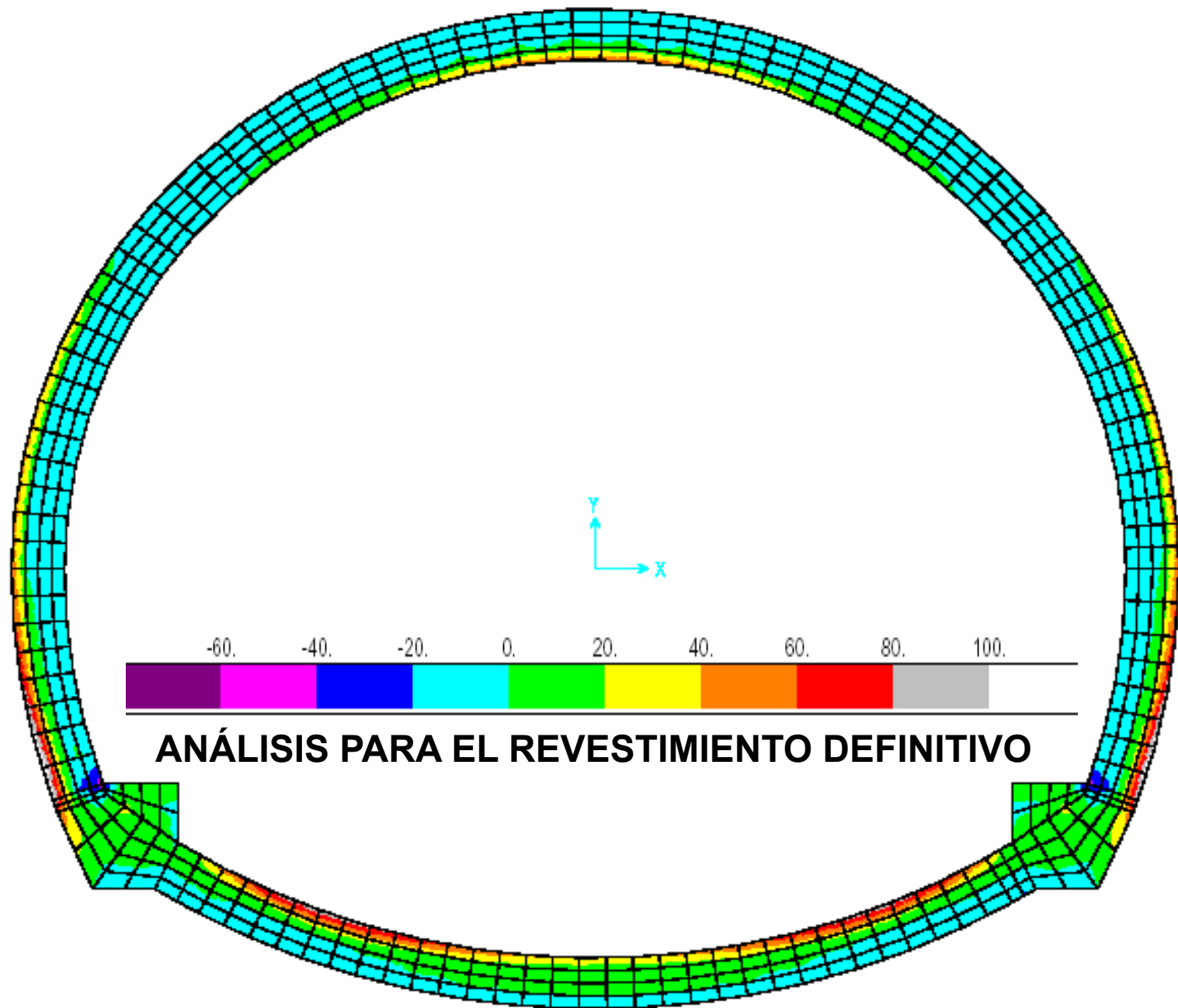
CARGAS DE DISEÑO PARA EL REVESTIMIENTO DEFINITIVO

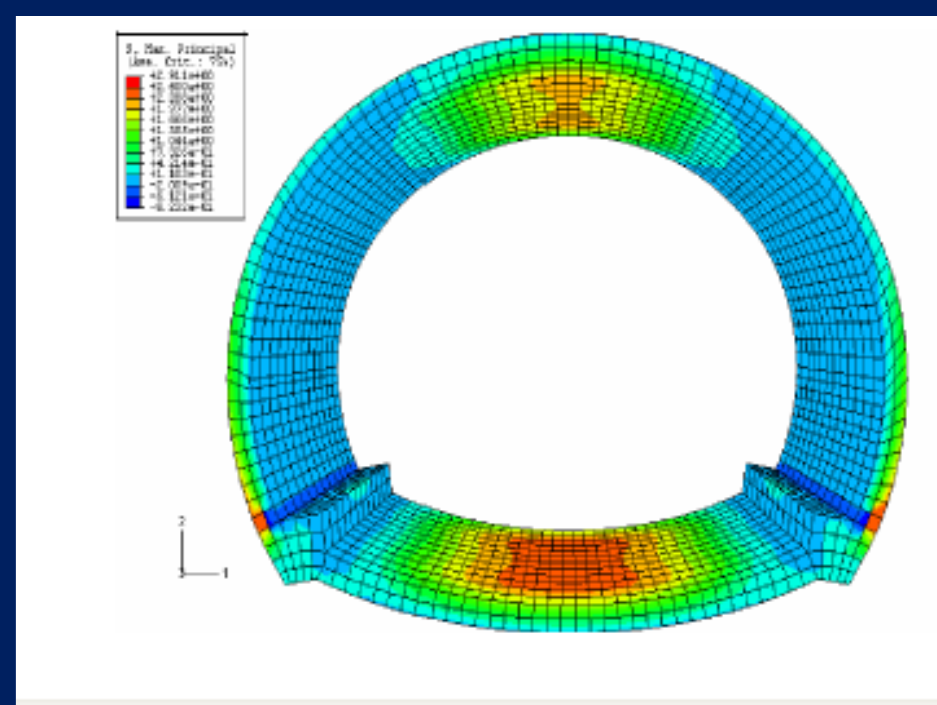
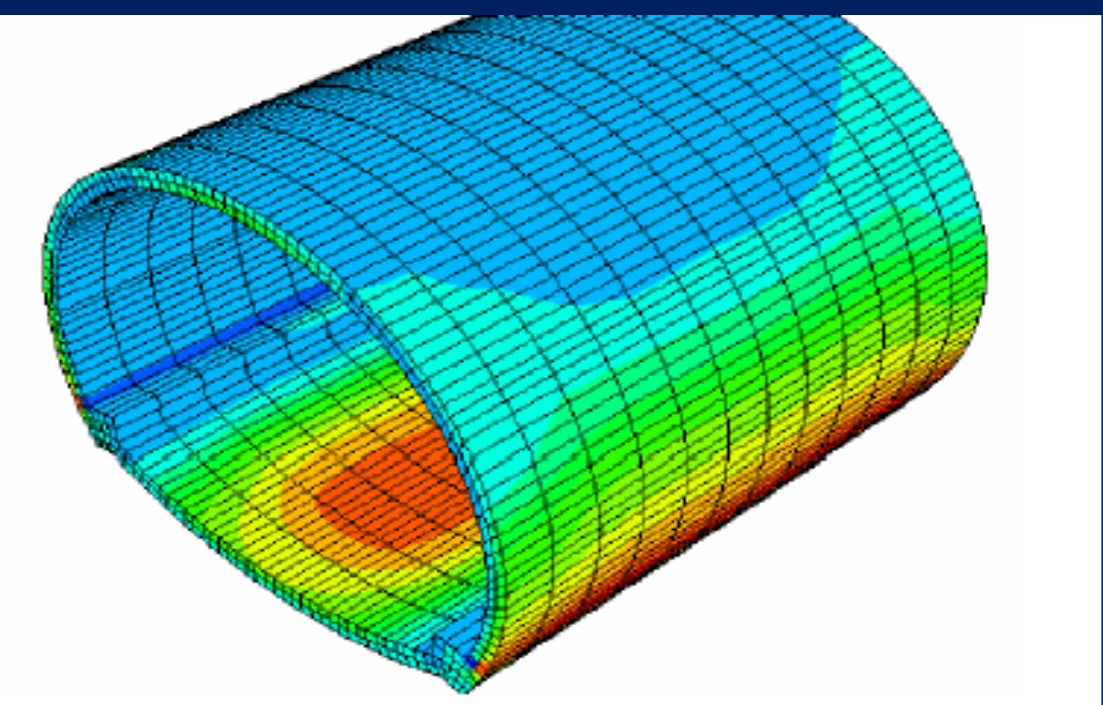
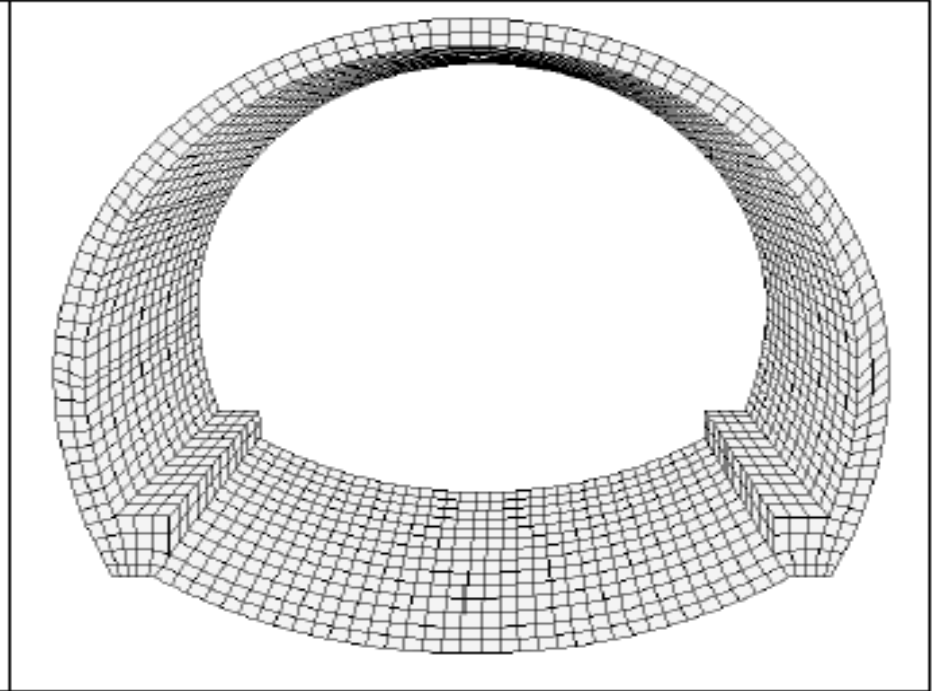
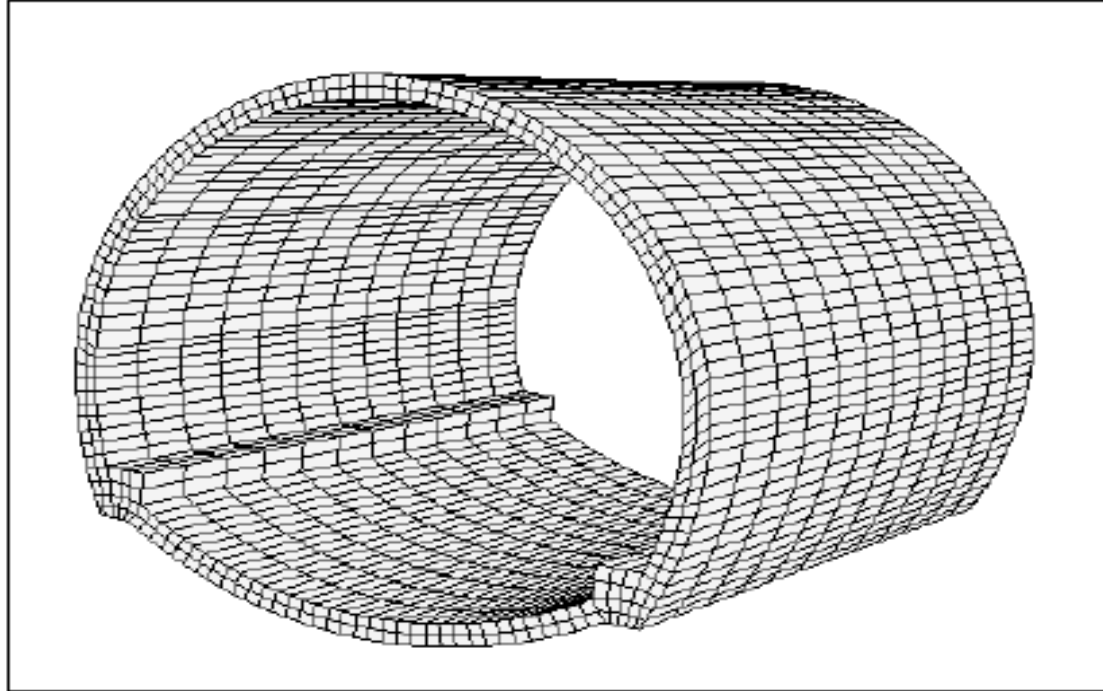


Esquema de Cargas
Coberturas Moderadas
 $CB = \gamma H$ $CB = \gamma \alpha (b + Ht)$



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



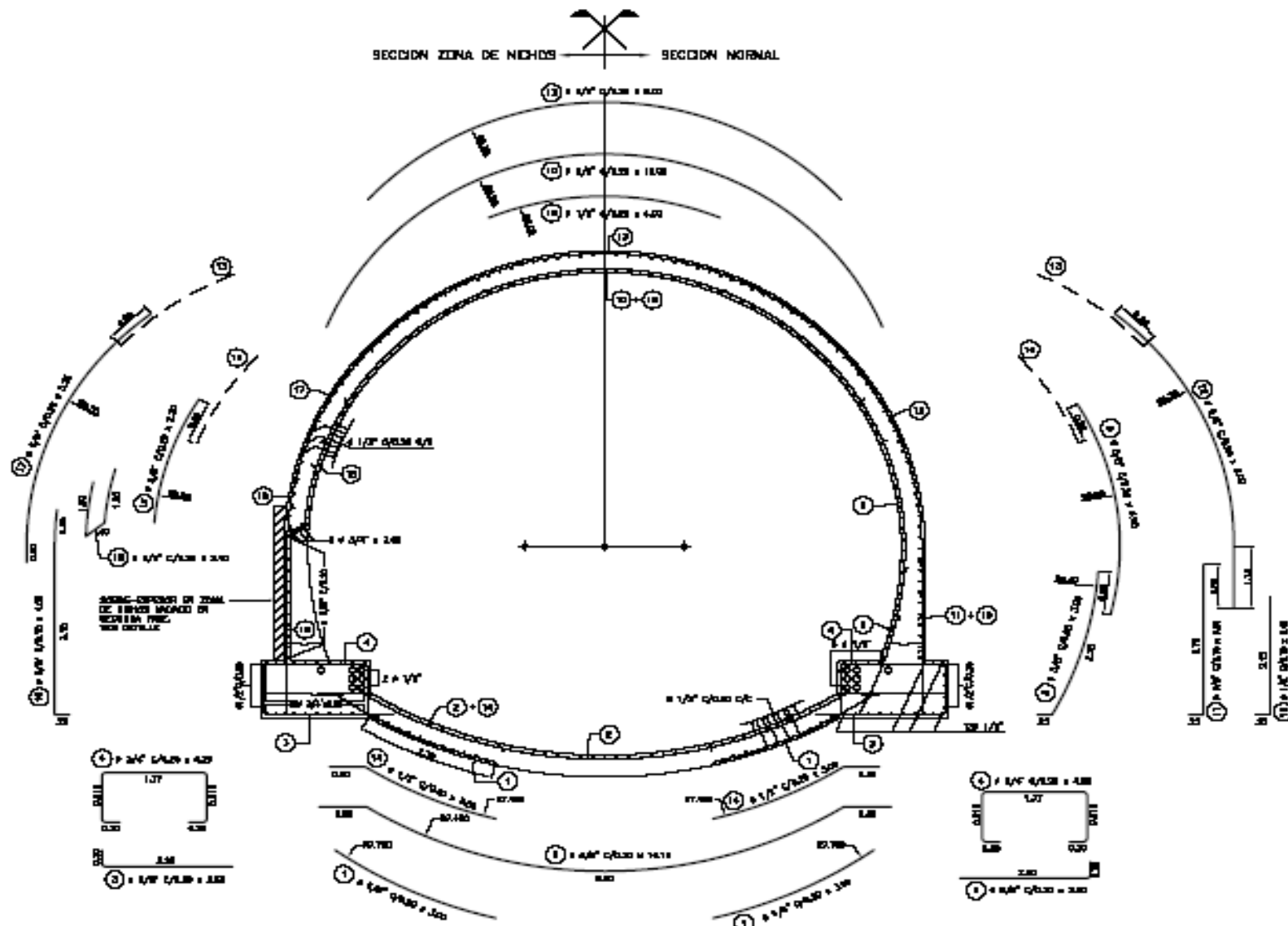


RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS DEL REVESTIMIENTO DEFINITIVO

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
RF1 (30 cm)	1.54	0.18	0.19	0.06
RF2 (40 cm)	22.1	4.49	3.27	0.37
RF2* (50 cm)	27.63	4.66	5.54	0.42

REVESTIMIENTO DEFINITIVO EN CONCRETO ARMADO



REFUERZO TIPICO EN ZONAS DE RELLENO SOBRE CUMBRERA MENOR A 5.00m METROS EBC. 12 00

REVESTIMIENTO DEFINITIVO EN CONCRETO FIBROREFORZADO

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

CARACTERÍSTICAS DEL CONCRETO FIBROREFORZADO VACIADO EN SITIO

RF armado

RF (50 cm)

feq ≥ 5 MPa

RF (40 cm)

feq ≥ 4 MPa

RF (30 cm)

feq ≥ 2 MPa