

Sociedad Colombiana de Geotecnia
VII SIMPOSIO COLOMBIANO DE GEOTECNIA

Manizales 21- 24 Septiembre 2010



Túnel de acceso a la Mina El Placer
El Dorado – Venezuela
Metodología probabilística de diseño del soporte

Gianfranco Perri

www.gianfrancoperri.com

Lima, Perú 2-4 Diciembre 2010



***Túnel de acceso a la Mina El Placer
El Dorado – Venezuela***

Metodología probabilística de diseño del soporte

GIANFRANCO PERRI

www.gianfrancoperri.com



**INSTITUTO
DE INGENIEROS
DE MINAS
DEL PERÚ**

Túnel de acceso a la Mina El Placer-El Dorado-Venezuela

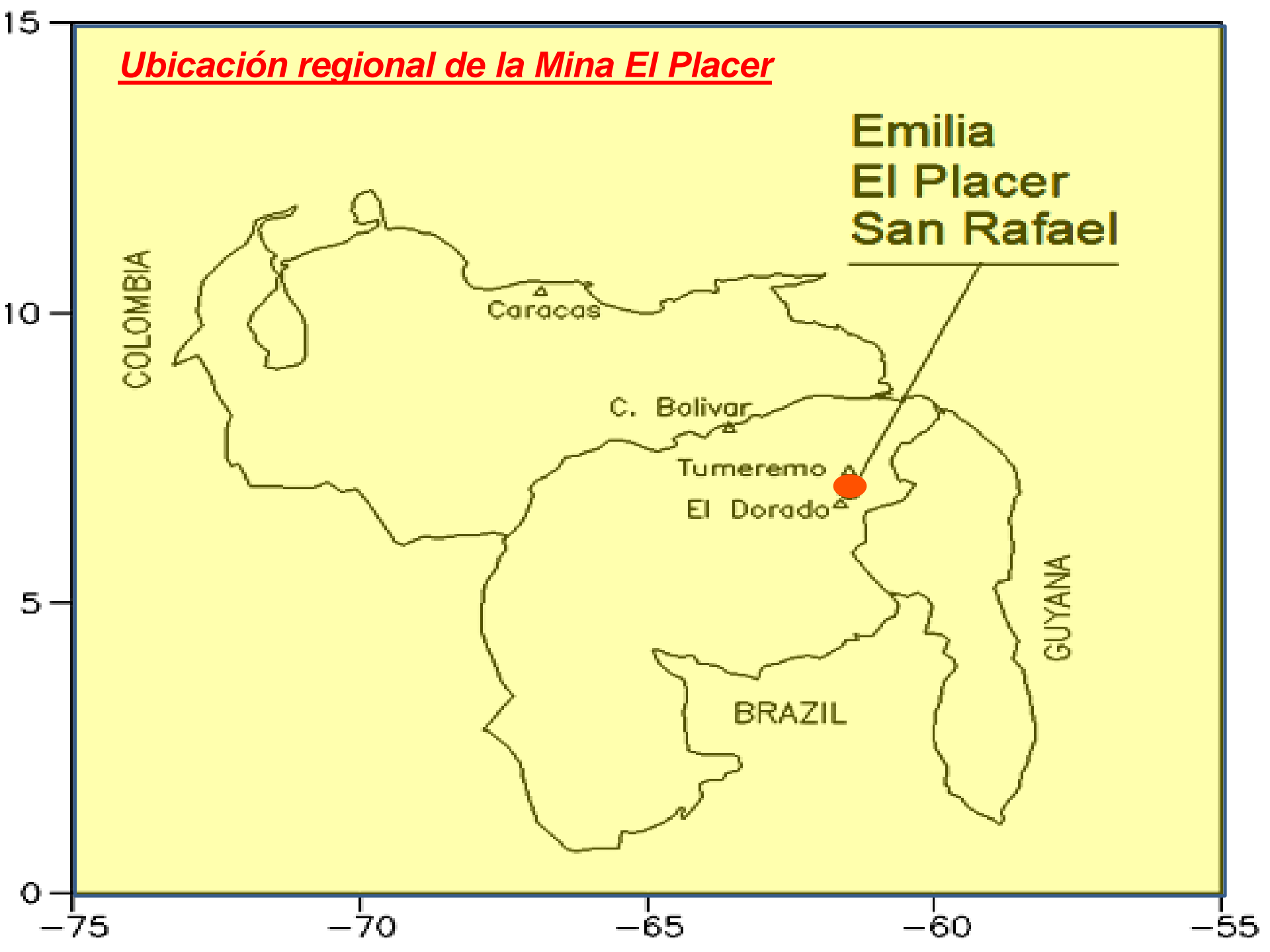
Metodología probabilística de diseño del soporte

OBJETIVOS:

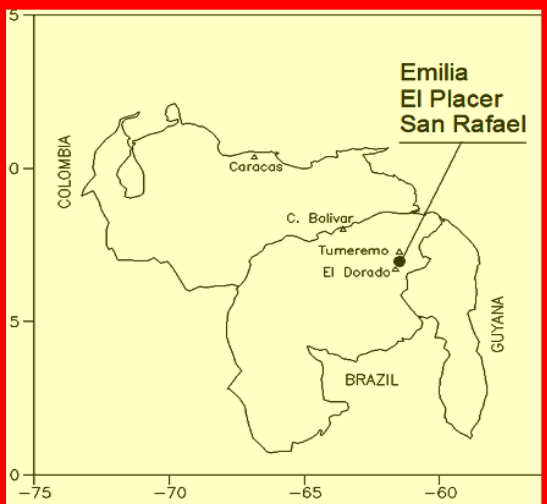
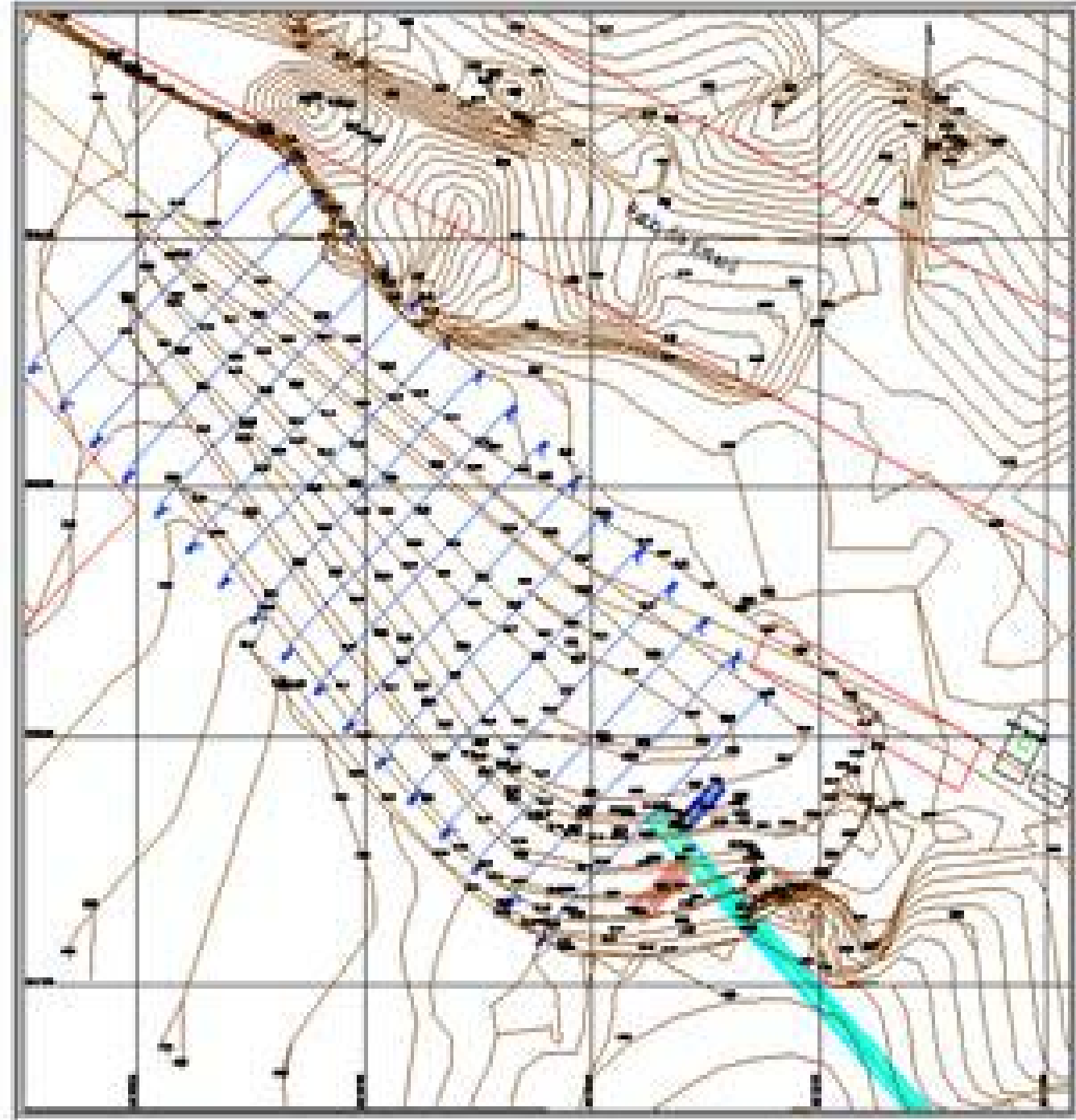
Utilizar, a manera de ejemplo, el diseño del soporte para un túnel minero de acceso al subterráneo, para señalar dos principios :

- ❖ ***Las metodologías geotécnicas típicas de las obras civiles pueden y deben ser aplicadas también en las obras mineras.***
- ❖ ***Las metodologías probabilísticas se prestan muy bien al diseño de los soportes de túneles, y presentan ventajas comparativas conceptuales muy importantes respecto a las metodologías determinísticas, sean numéricas o sean analíticas, o gráficas, etc.***

Ubicación regional de la Mina El Placer



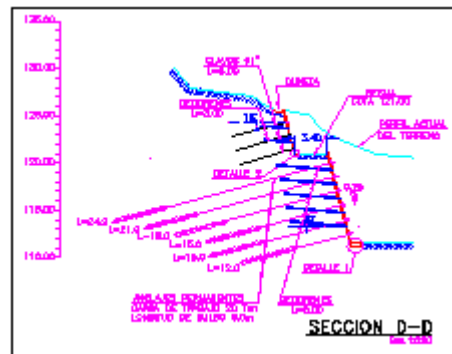
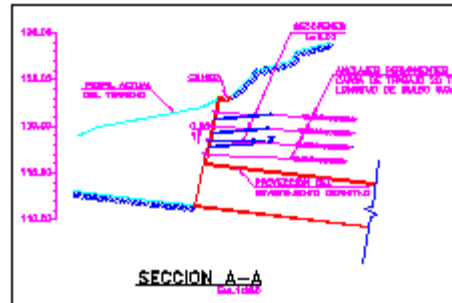
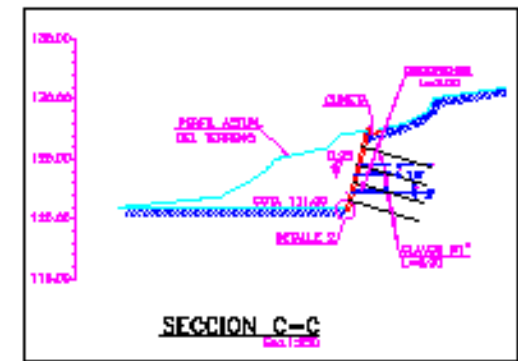
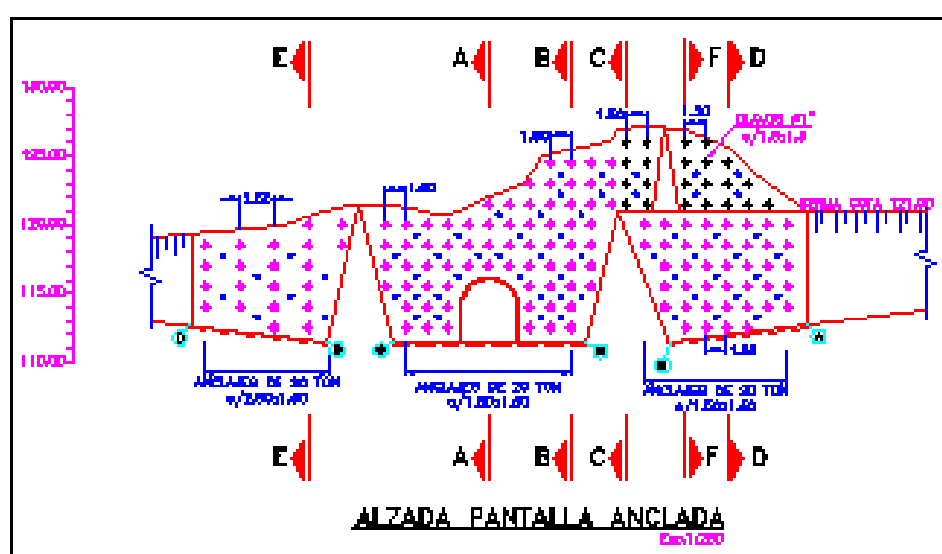
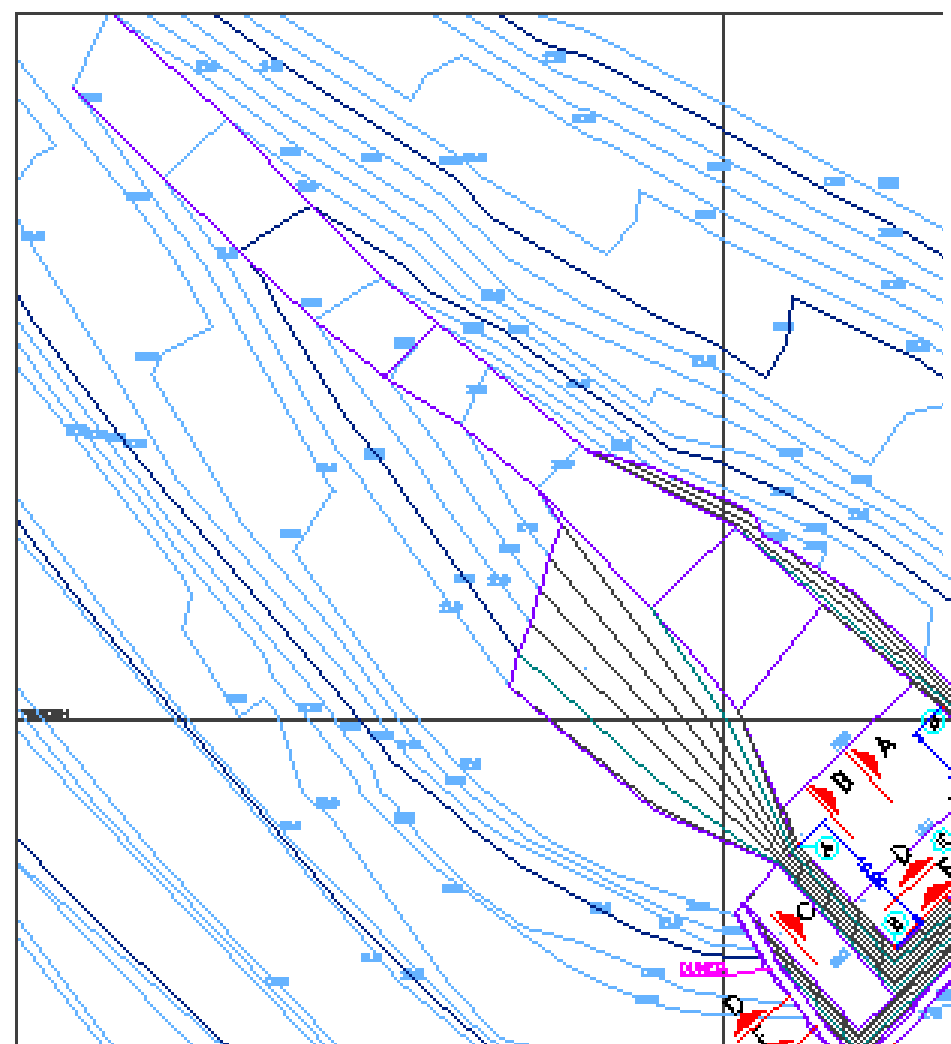
**SITUACIÓN
TOPOGRAFICA
DEL "BOX CUT"
AL MOMENTO
DEL PROYECTO
DE ACCEDER AL
SUBTERRANEO**

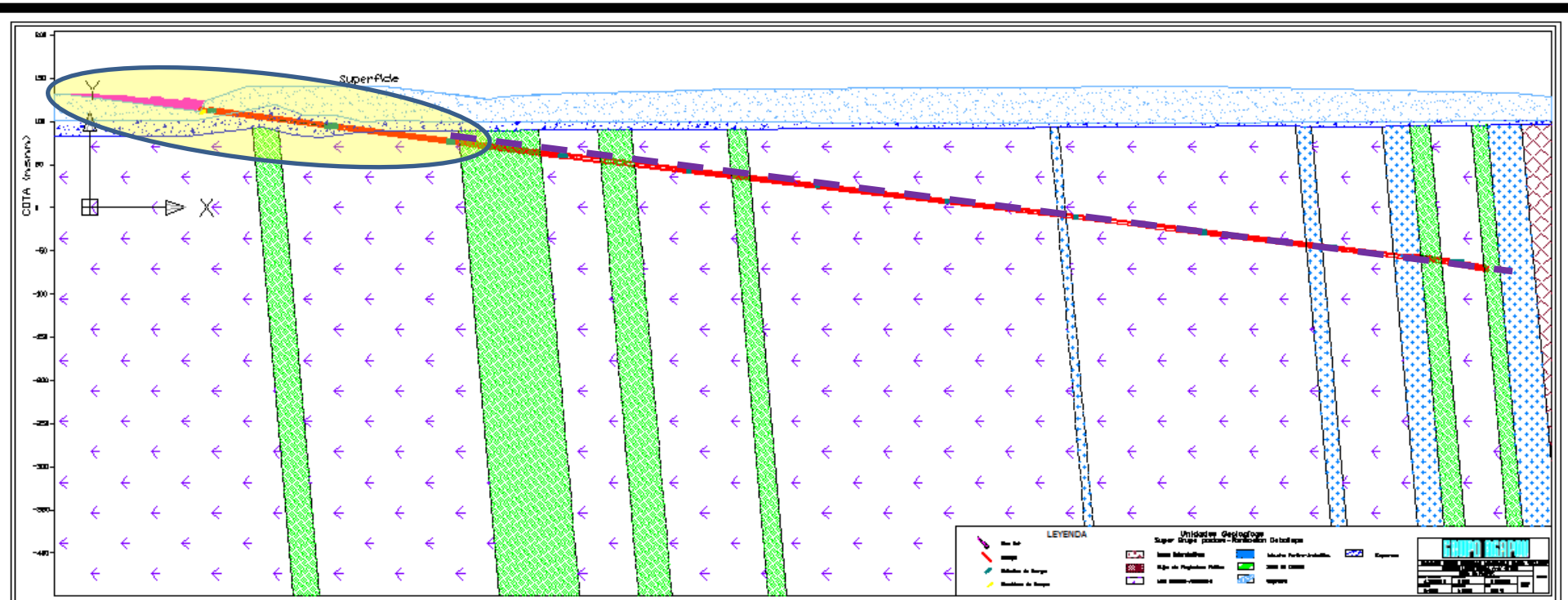
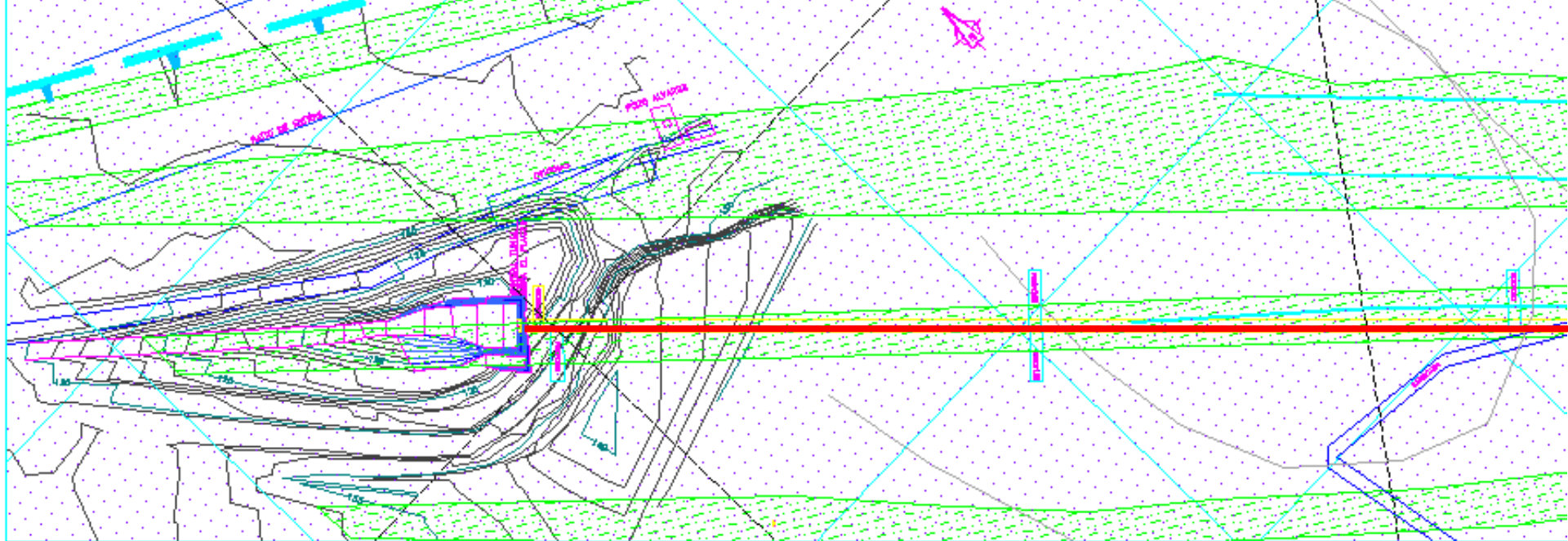


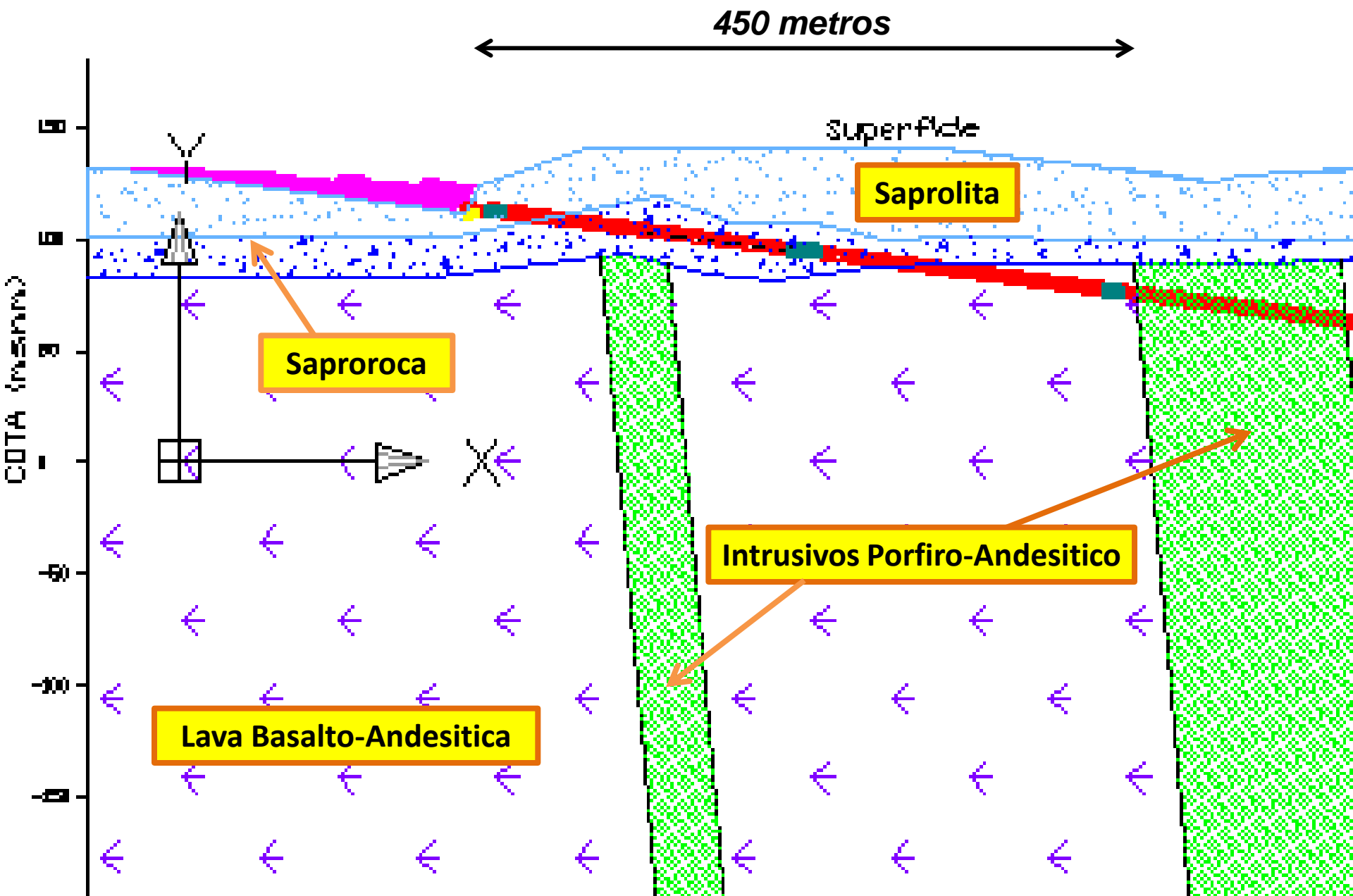
VISTA GENERAL DEL CUT BOX AL MOMENTO DEL PROYECTO DE ACCESO AL SUBTERRÁNEO



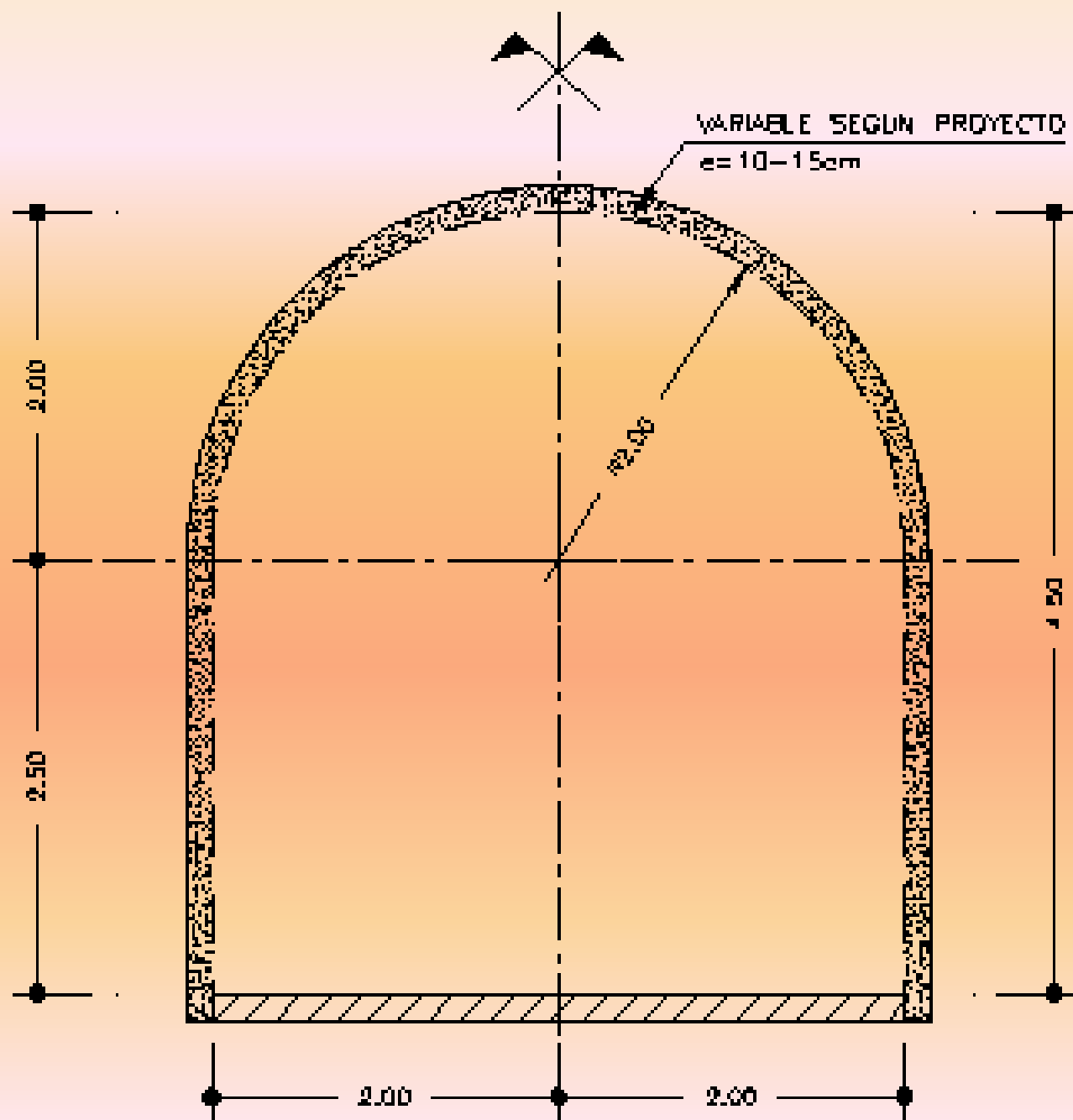




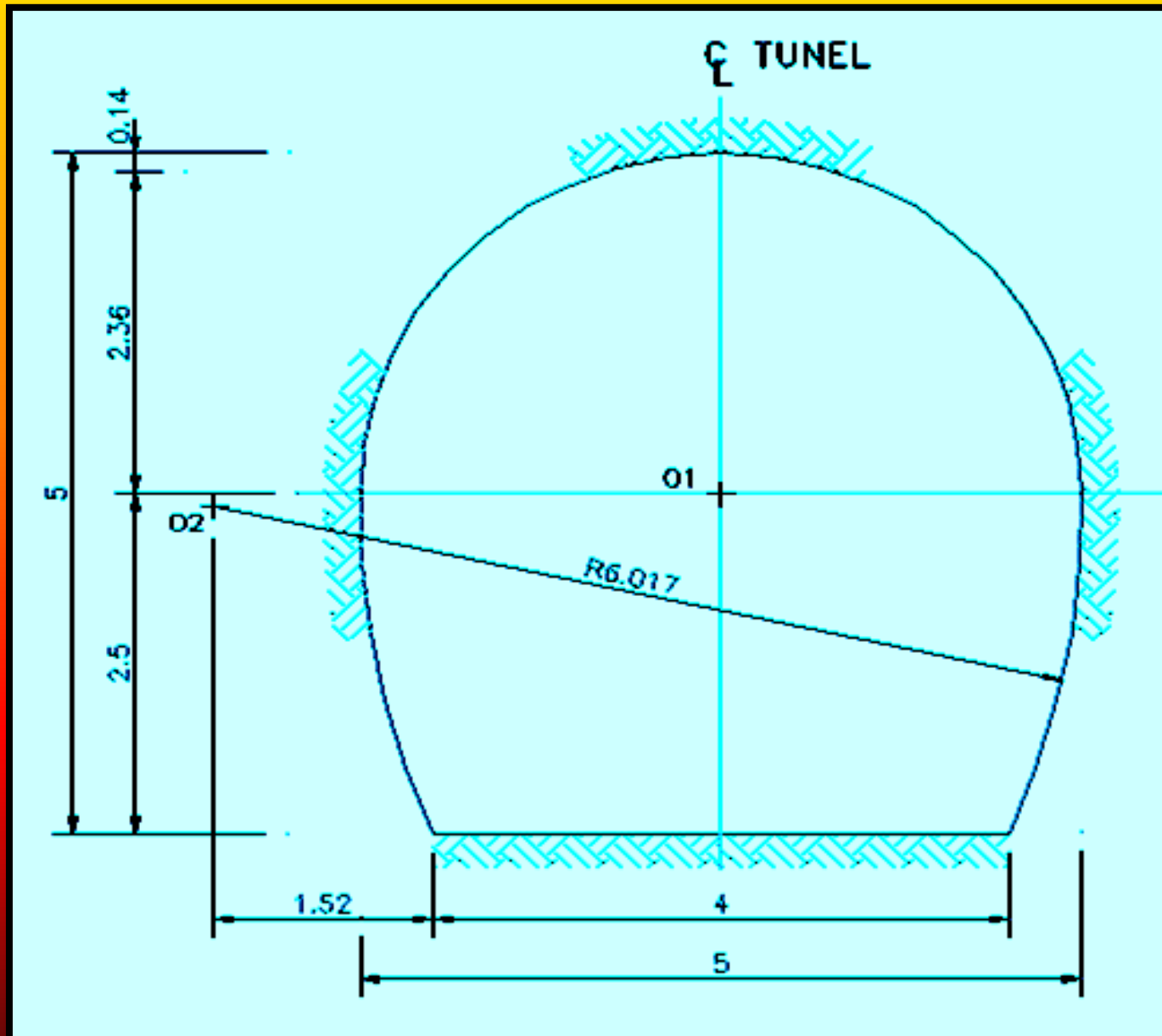




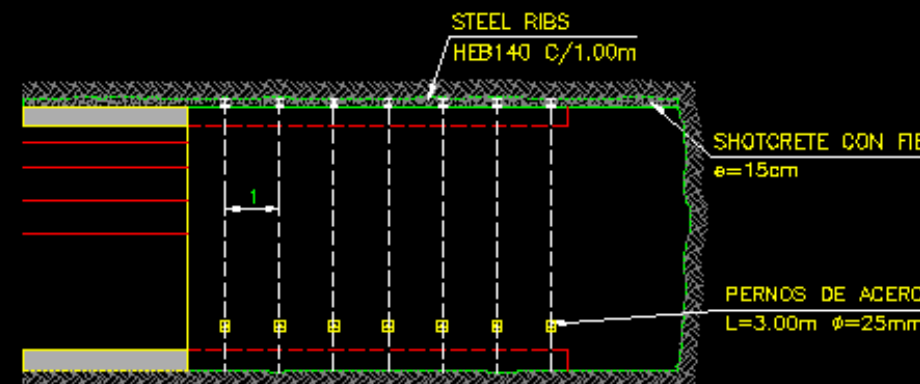
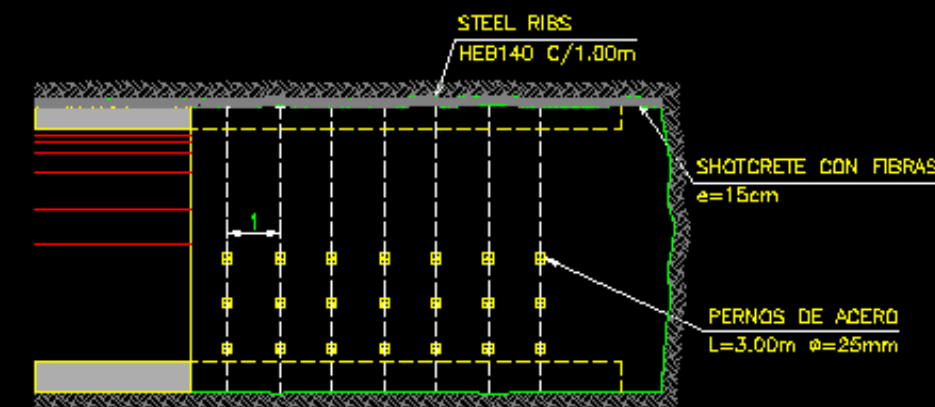
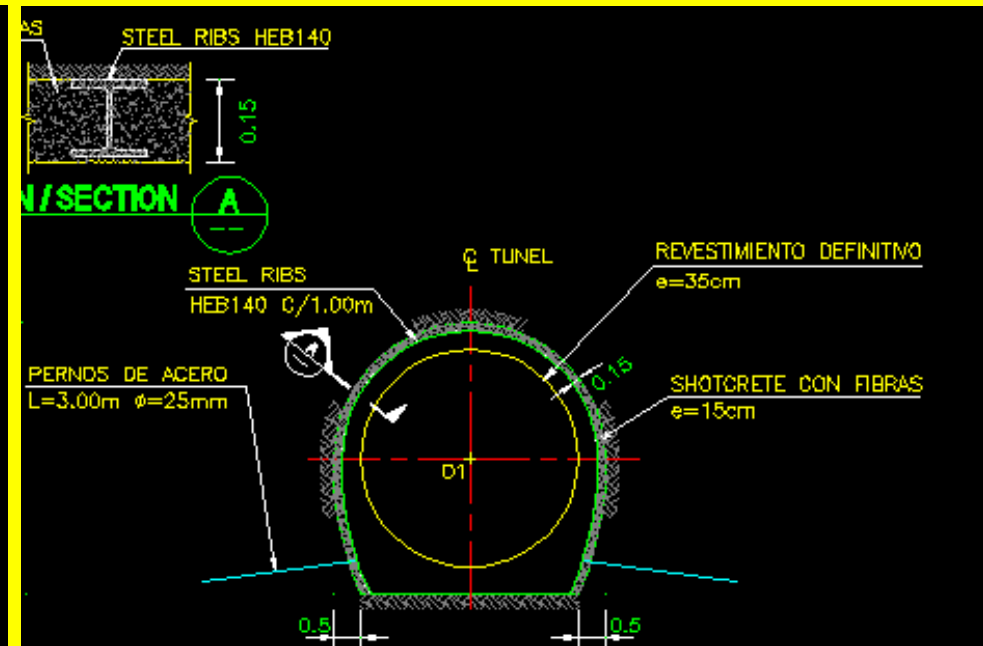
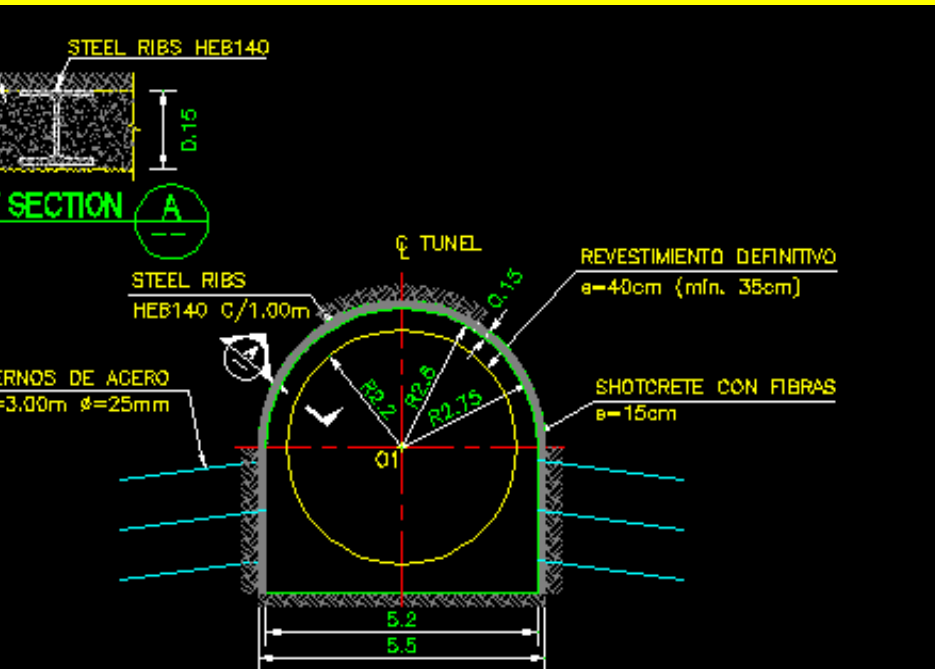
GEOMETRÍA DE LA SECCIÓN PRE-ESTABLECIDA PARA EL ACCESO AL SUBTERRÁNEO



GEOMETRÍA DE LA SECCIÓN RECOMENDADA PARA EL ACCESO AL SUBTERRÁNEO



INFLUENCIA DE LA FORMA SOBRE EL SOPORTE



CARACTERIZACIÓN GEOMECÁNICA DE LOS TERRENOS A EXCAVAR

Propiedades independientes

TIPO DE TERRENO	GSI (Min. - Med. - Max.)	m_i (Min. - Med. - Max.)	σ_{ci} (MPa) (Min. - Med. - Max.)
GG5 Sapolita <i>Roca muy meteorizada</i>	(20 -25- 30)	(7 -8- 9)	(5 -7- 10)
GG4 - GG3 Saporoca <i>Roca meteorizada blanda y muy fracturada</i>	(30 -35- 40)	(15 -17- 20)	(25 -38- 50)
GG2 Roca Andesítica <i>Roca fresca dura y poco fracturada</i>	(40 -50- 60)	(20 -22- 25)	(50 -60- 70)

Rock Type:

General ▼

GSI Selection:

31

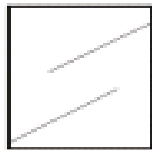
OK

SURFACE CONDITIONS

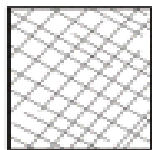
VERY GOOD GOOD FAIR POOR VERY POOR

STRUCTURE

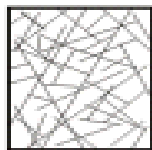
DECREASING SURFACE QUALITY →



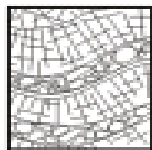
INTACT OR MASSIVE - intact rock specimens or massive in situ rock with few widely spaced discontinuities



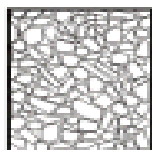
BLOCKY - well interlocked undisturbed rock mass consisting of cubical blocks formed by three intersecting discontinuity sets



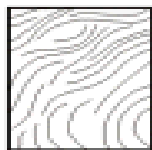
VERY BLOCKY- interlocked, partially disturbed mass with multi-faceted angular blocks formed by 4 or more joint sets



BLOCKY/DISTURBED/SEAMY - folded with angular blocks formed by many intersecting discontinuity sets. Persistence of bedding planes or schistosity

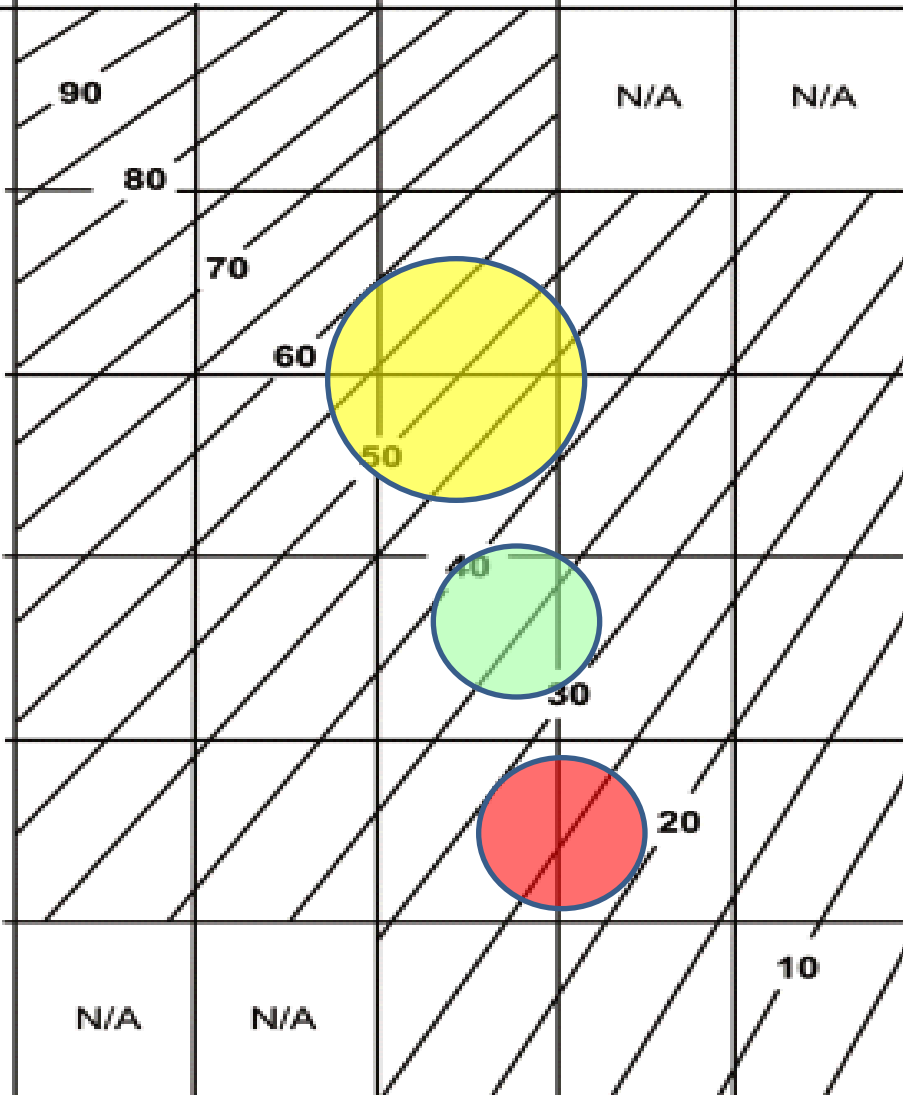


DISINTEGRATED - poorly interlocked, heavily broken rock mass with mixture of angular and rounded rock pieces



LAMINATED/SHEARED - Lack of blockiness due to close spacing of weak schistosity or shear planes

DECREASING INTERLOCKING OF ROCK PIECES ↓



Rock type	Class	Group	Texture			
			Coarse	Medium	Fine	Very fine
SEDIMENTARY	Clastic		Conglomerates (21 ± 3) Breccias (19 ± 5)	Sandstones 17 ± 4	Siltstones 7 ± 2 Greywackes (18 ± 3)	Claystones 4 ± 2 Shales (6 ± 2) Marls (7 ± 2)
		Non-Clastic	Carbonates	Crystalline Limestone (12 ± 3)	Sparitic Limestones (10 ± 2)	Micritic Limestones (9 ± 2)
	Evaporites			Gypsum 8 ± 2	Anhydrite 12 ± 2	
	Organic					Chalk 7 ± 2
METAMORPHIC	Non Foliated		Marble 9 ± 3	Hornfels (19 ± 4) Metasandstone (19 ± 3)	Quartzites 20 ± 3	
	Slightly foliated		Migmatite (29 ± 3)	Amphibolites 26 ± 6		
	Foliated*		Gneiss 28 ± 5	Schists 12 ± 3	Phyllites (7 ± 3)	Slates 7 ± 4
IGNEOUS	Plutonic	Light	Granite 32 ± 3 Granodiorite (29 ± 3)	Diorite 25 ± 5		
		Dark	Gabbro 27 ± 3 Norite 20 ± 5	Dolerite (16 ± 5)		
	Hypabyssal			Porphyries (20 ± 5)	Diabase (15 ± 5)	Peridotite (25 ± 5)
	Volcanic	Lava		Rhyolite (25 ± 5) Andesite 25 ± 5	Dacite (25 ± 3) Basalt (25 ± 5)	Obsidian (19 ± 3)
		Pyroclastic		Agglomerate (19 ± 3)	Breccia (19 ± 5)	Tuff (13 ± 5)

Caracterización Estadística del GG5 – SAPROLITA

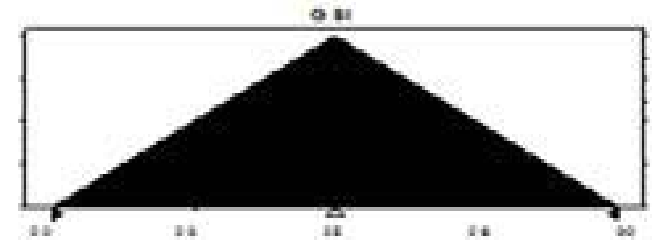
Assumption: GSI

Cell: D16

Triangular distribution with parameters:

Minimum	20
Likeliest	25
Maximum	30

Selected range is from 20 to 30
Mean value in simulation was 25



Assumption: Parámetro "mi"

Cell: D12

Triangular distribution with parameters:

Minimum	7
Likeliest	8
Maximum	9

Selected range is from 7 to 9
Mean value in simulation was 8



Assumption: Comp. Uniax. Material Rocoso (MPa)

Cell: D11

Triangular distribution with parameters:

Minimum	5,00
Likeliest	7,50
Maximum	10,00

Selected range is from 5,00 to 10,00
Mean value in simulation was 7,52





ANGULO DE FRICCION DEL MACIZO ROCOSO (Hoek & Brown, 1997)

c / Co

0,20
0,18
0,16
0,14
0,12
0,10
0,08
0,06
0,04
0,02
0,00

$$c/Co = (0.0058 + 0.0004 m_i) \exp[GSI(0.0455 - 0.0073 \ln(m_i))]$$

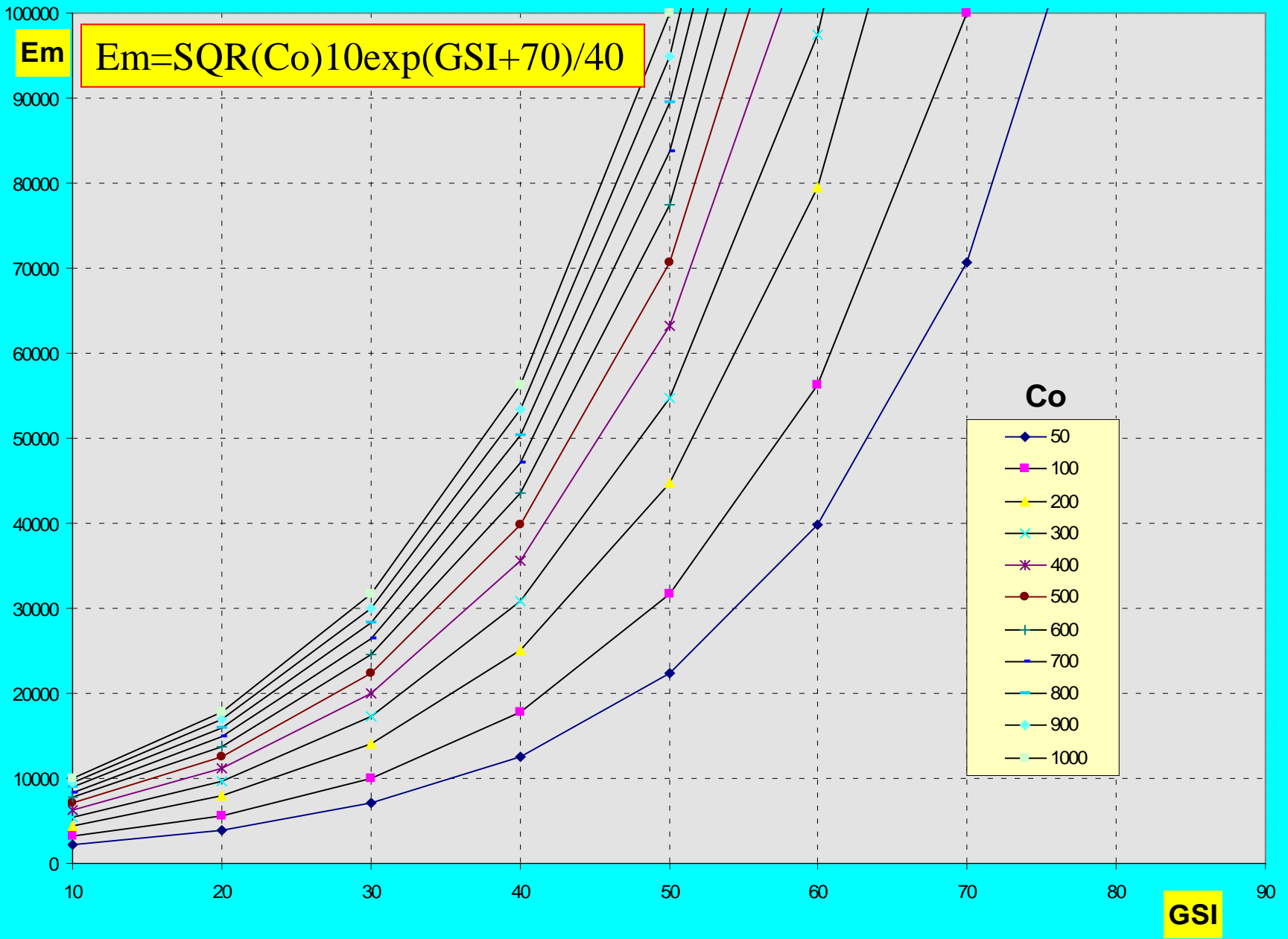
- mi=5
- mi=7
- mi=10
- mi=13
- mi=16
- mi=20
- mi=25
- mi=30
- mi=35

$$c/Co = 0.013e^{0.026GSI}$$

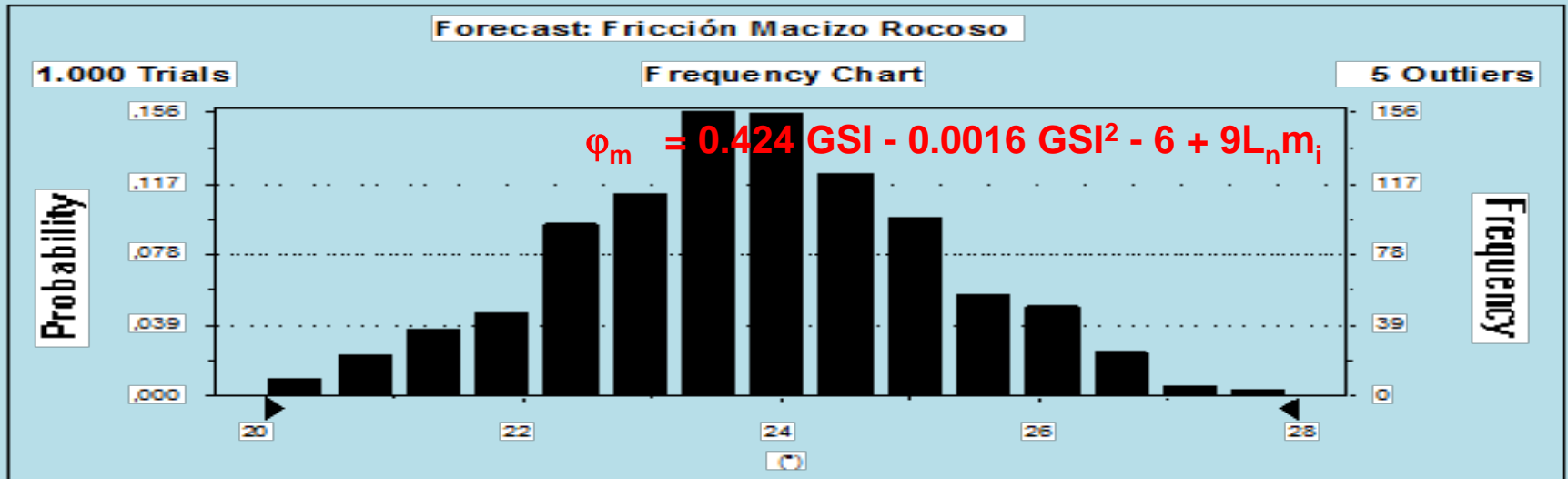
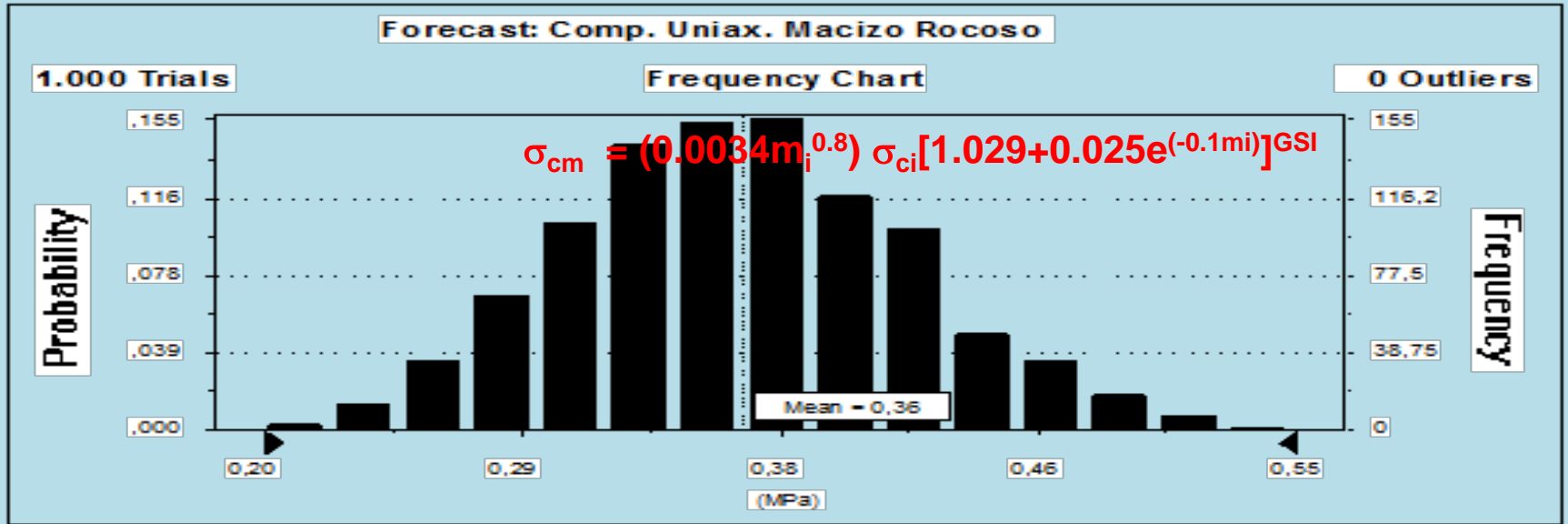
0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 GSI 100

COHESION DEL MACIZO ROCOSO (Hoek & Brown, 1997)

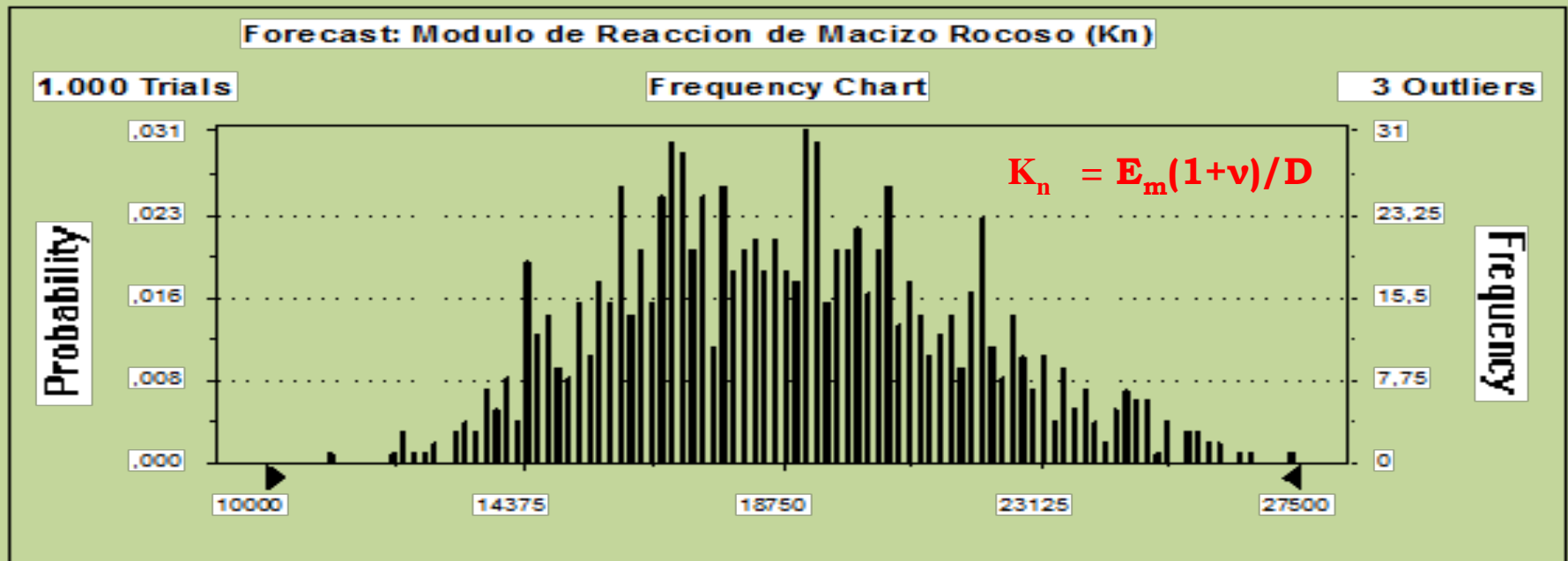
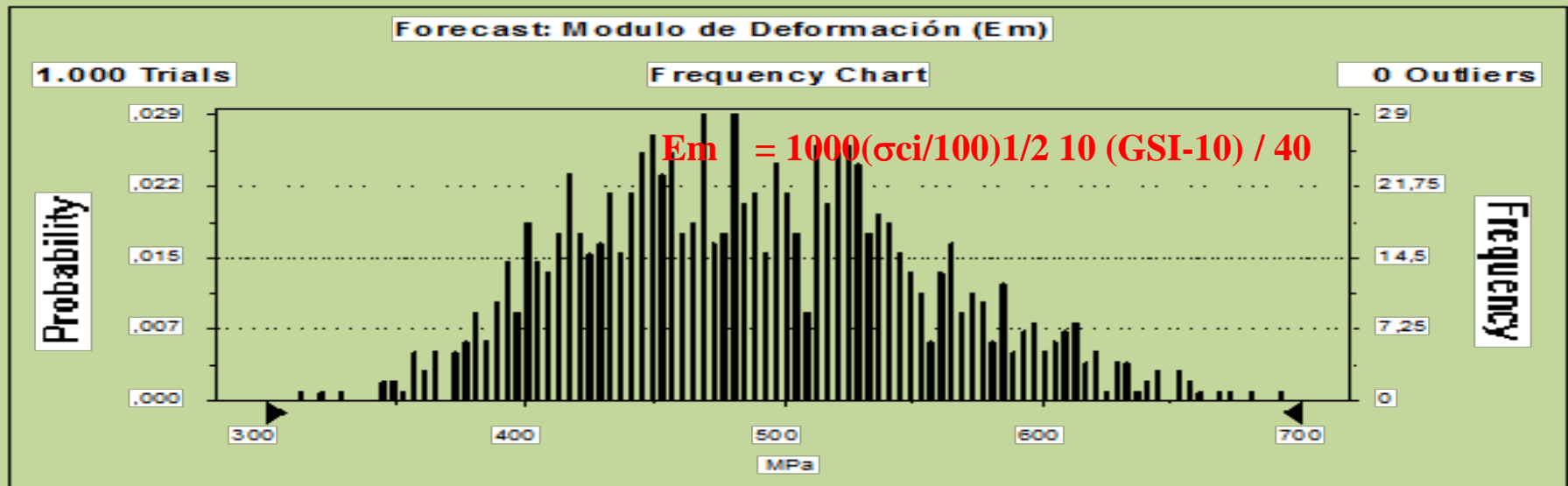
MODULO DEL MACIZO (Em) en Kg/cm2 SEGUN GSI y Co (Kg/cm2)



Determinación Estadística de las Propiedades Geomecánicas del Macizo Rocos



Determinación Estadística de las Propiedades Geomecánicas del Macizo Rocosó

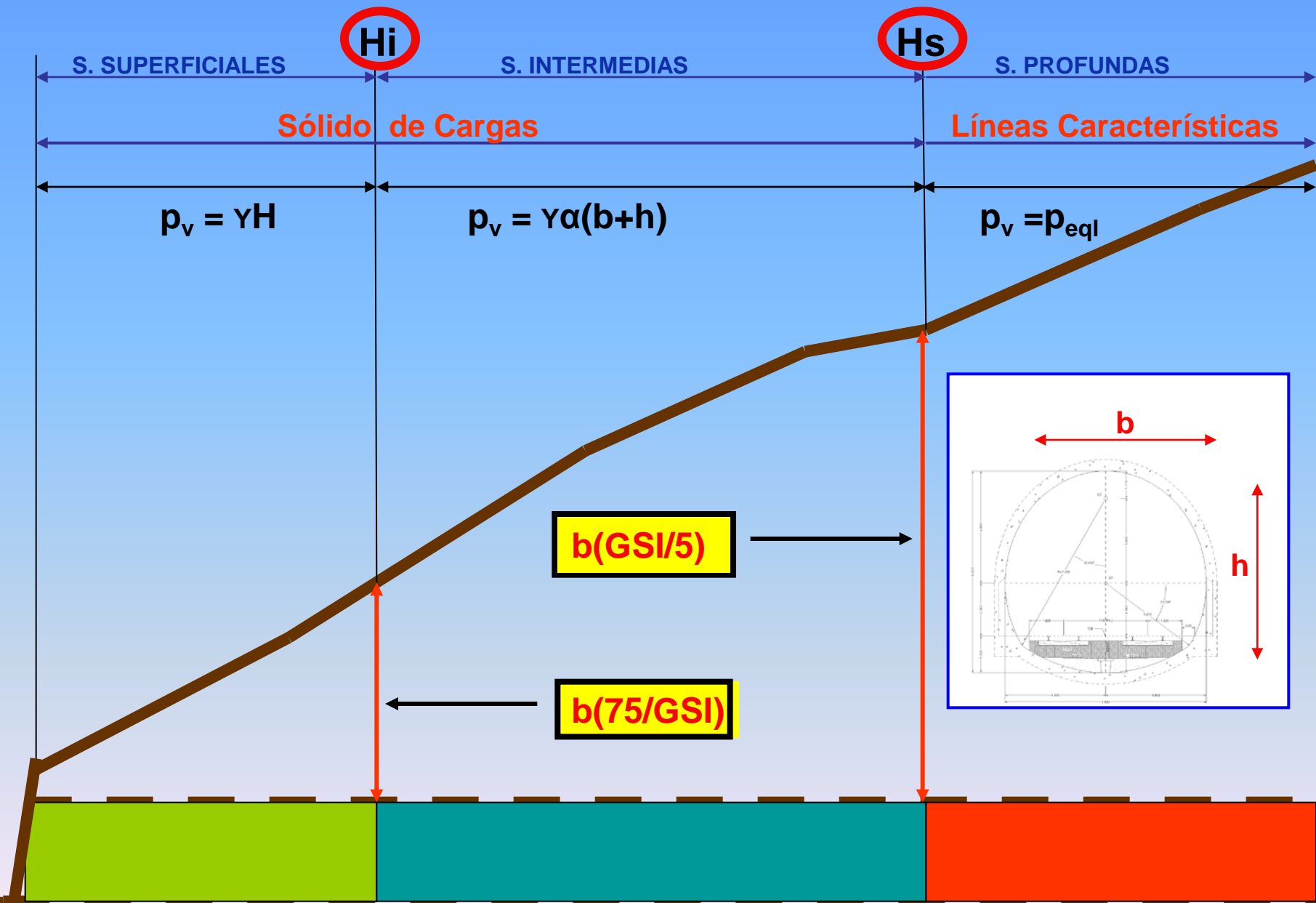


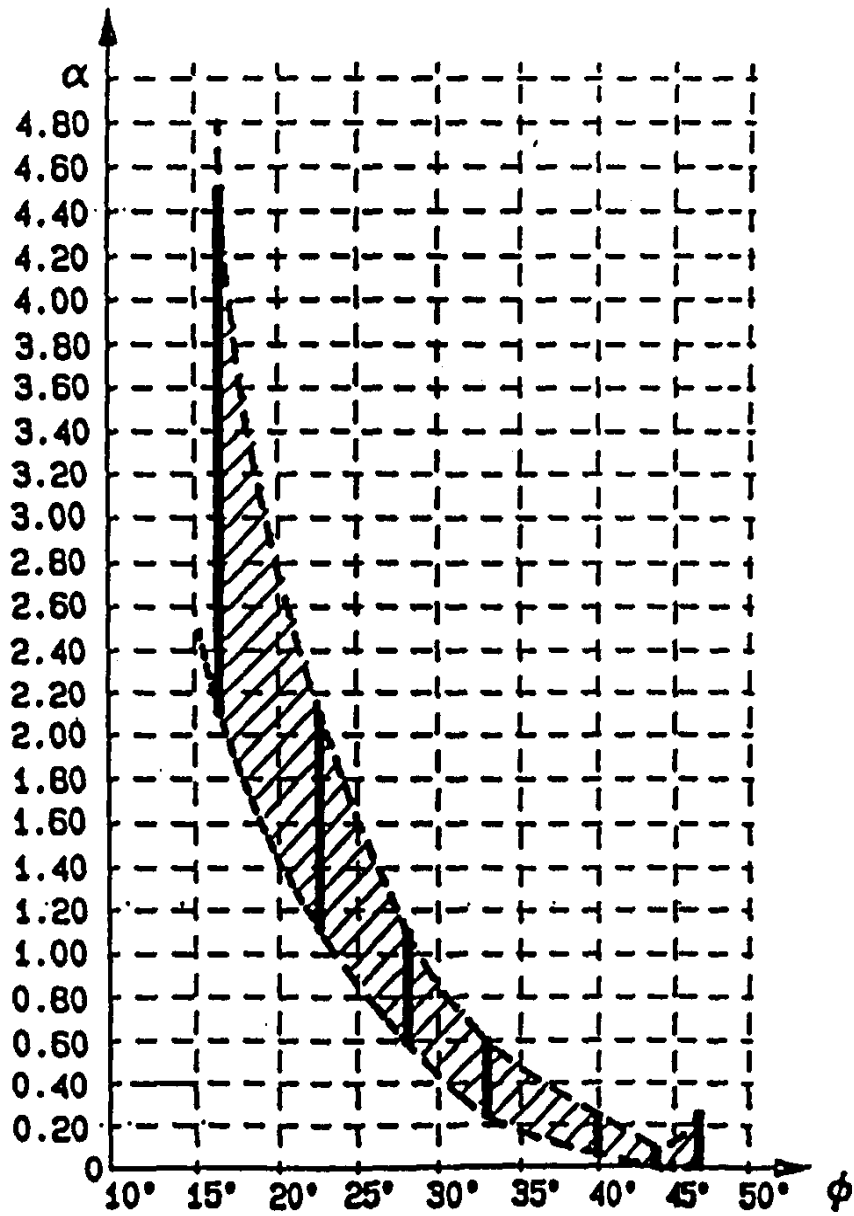
CARACTERIZACIÓN GEOMECÁNICA DE LOS TERRENOS A EXCAVAR

Propiedades derivadas

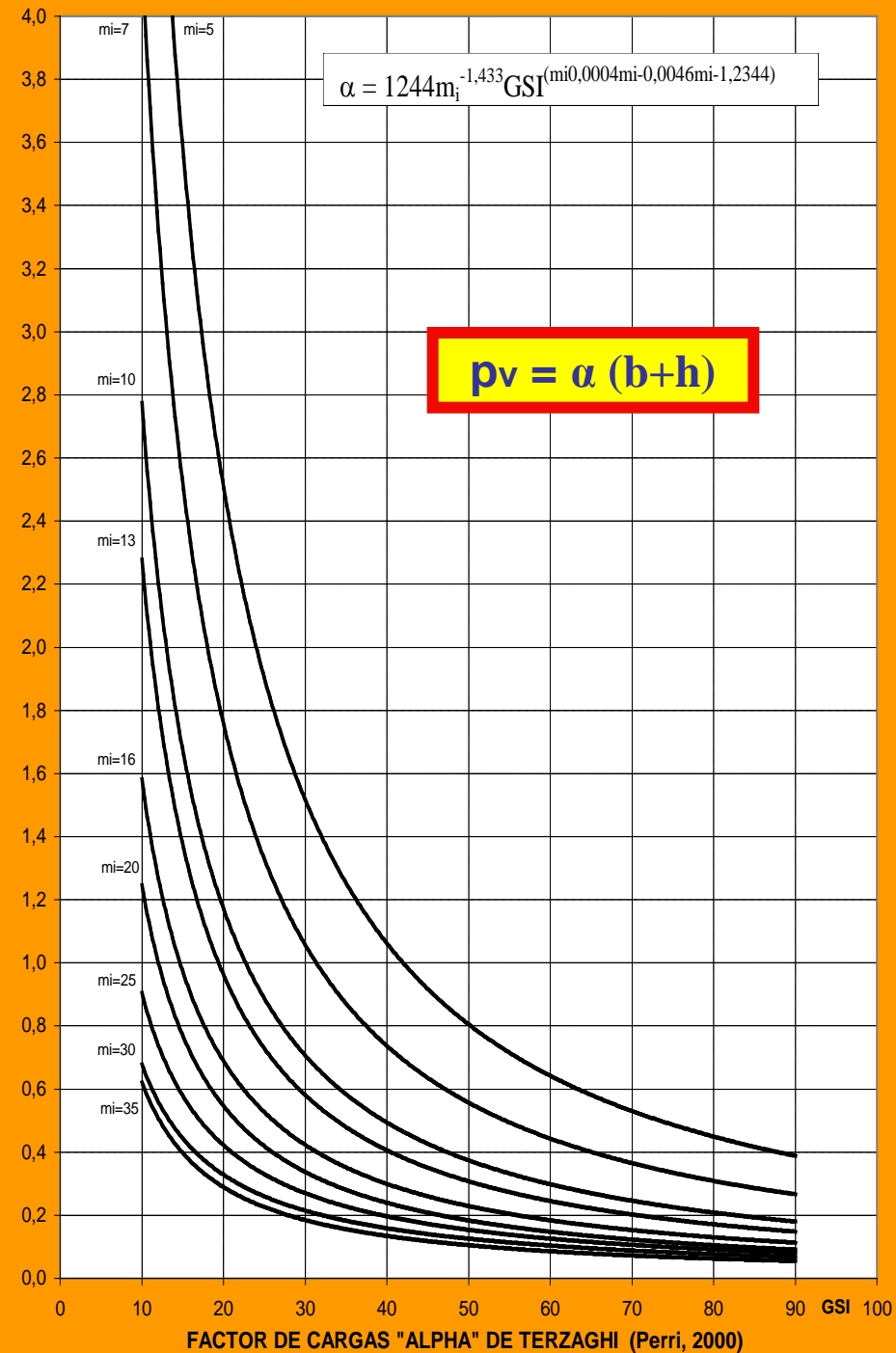
TIPO DE TERRENO	Φ_m [Med. - Des.]	σ_{cm} (MPa) [Med. - Des.]	E_m (MPa) [Med. - Des.]	K_n (t/m ³) [Med. - Des.]
GG5 Sapolita <i>Roca muy meteorizada</i>	24 ($\delta=1$)	0,36 ($\delta=0,06$)	489 ($\delta=67$)	18889 ($\delta=2958$)
GG4 - GG3 Saproroca <i>Roca meteorizada blanda y muy fracturada</i>	34 ($\delta=2$)	3,99 ($\delta=0,61$)	1299 ($\delta=177$)	50283 ($\delta=7672$)
GG2 Roca Andesítica <i>Roca fresca dura y poco fracturada</i>	49 ($\delta=2$)	11,78 ($\delta=1,74$)	3966 ($\delta=955$)	153943 ($\delta=39126$)

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

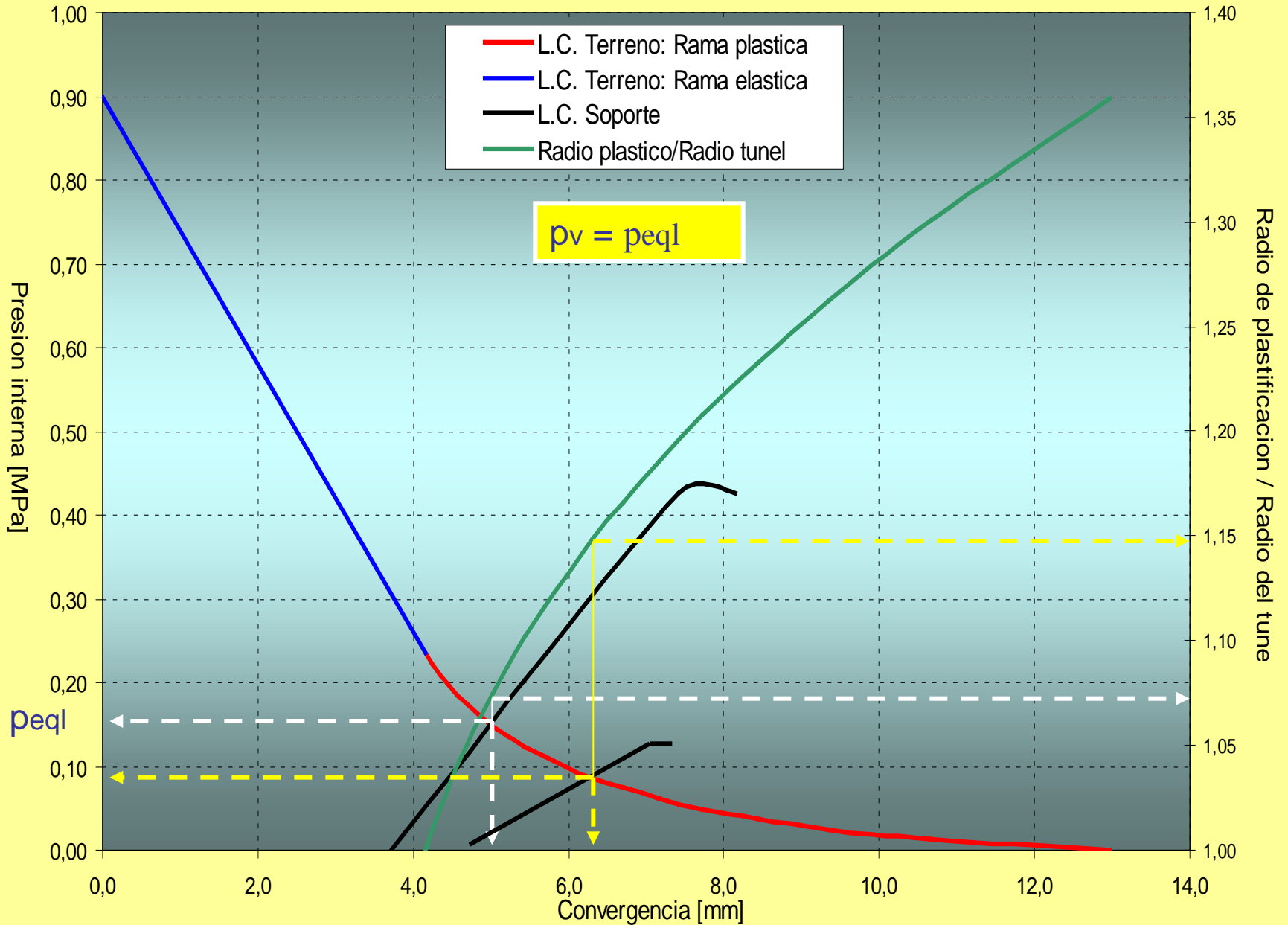




1: Método Terzaghi-Deere AFTES



Curvas de Interaccion Soporte - Terreno y Extencion de la Plastificacion



DEMANDAS (Cargas) DE DISEÑO A LO LARGO DEL TÚNEL

Cobertura (m)	5 – 15	15 – 25	25 – 40	40 – 50	50 – 70
Progresivas (m)	0 – 18	18 – 30	30 – 135	135 – 330	330 – 450
$20 \leq \text{GSI} \leq 30$	2,9 Kg/cm² (desv.0,6)		1,2 Kg/cm² (desv. 0,3)	1,6 Kg/cm² (desv. 0,4)	---
$30 < \text{GSI} \leq 40$	---	---	0,9 Kg/cm² (desv. 0,1)	1,3 Kg/cm² (desv. 0,2)	---
$40 < \text{GSI} \leq 60$	---	---	---	0,8 Kg/cm² (desv. 0,2)	1,5 Kg/cm² (desv. 0,3)

Crystal Ball Report

Forecast: Carga sobre el soporte

Cell

Summary:

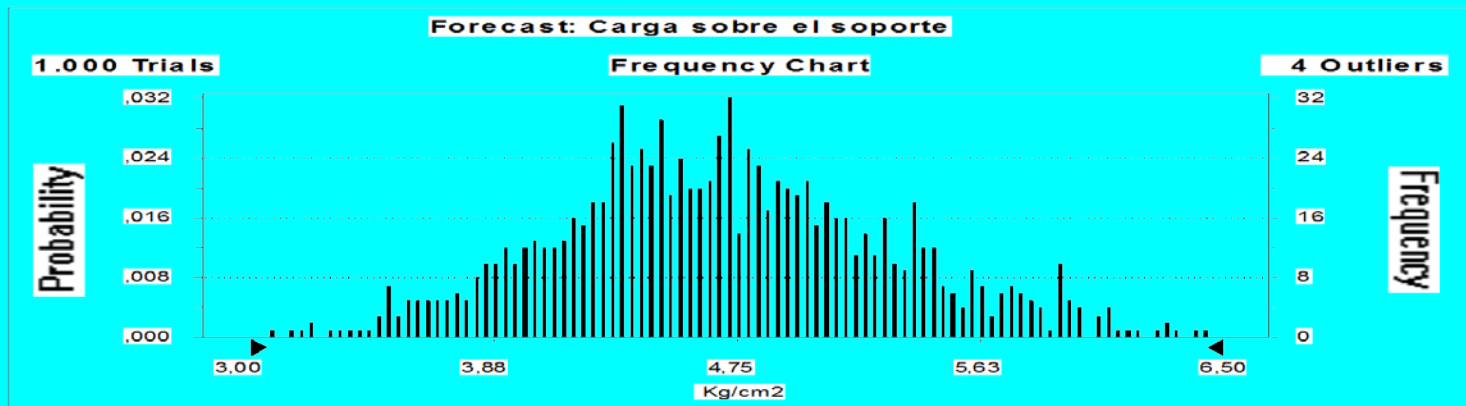
Display Range is from 3,00 to 6,50 Kg/cm²

Entire Range is from 3,09 to 6,62 Kg/cm²

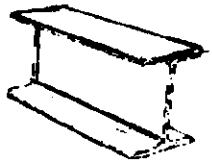
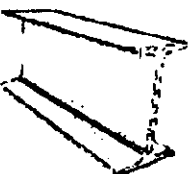
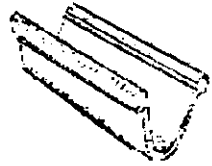
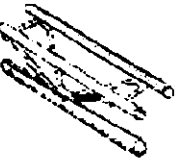

After 1.000 Trials, the Std. Error of the Mean is 0,02

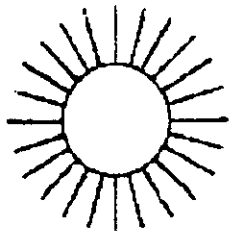
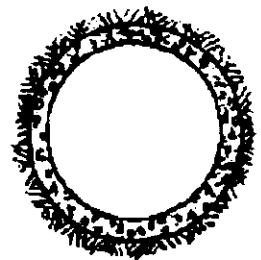
Statistics:

	Value
Trials	1000
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

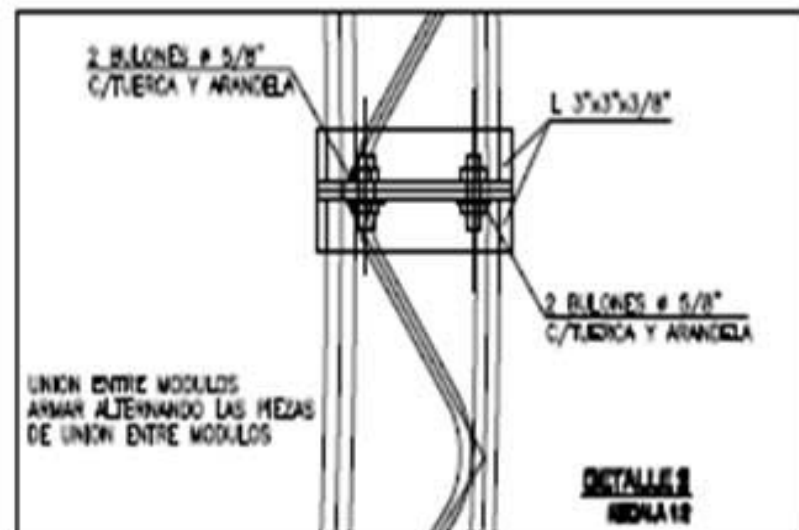
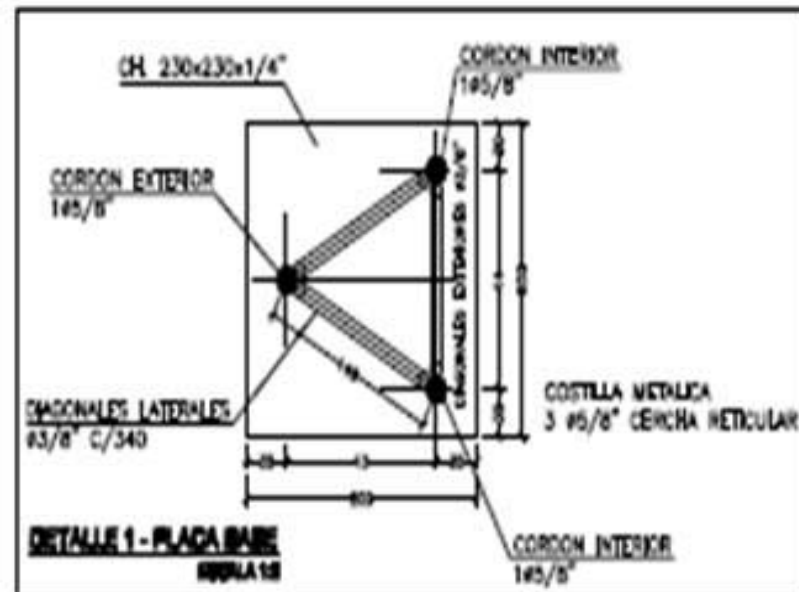
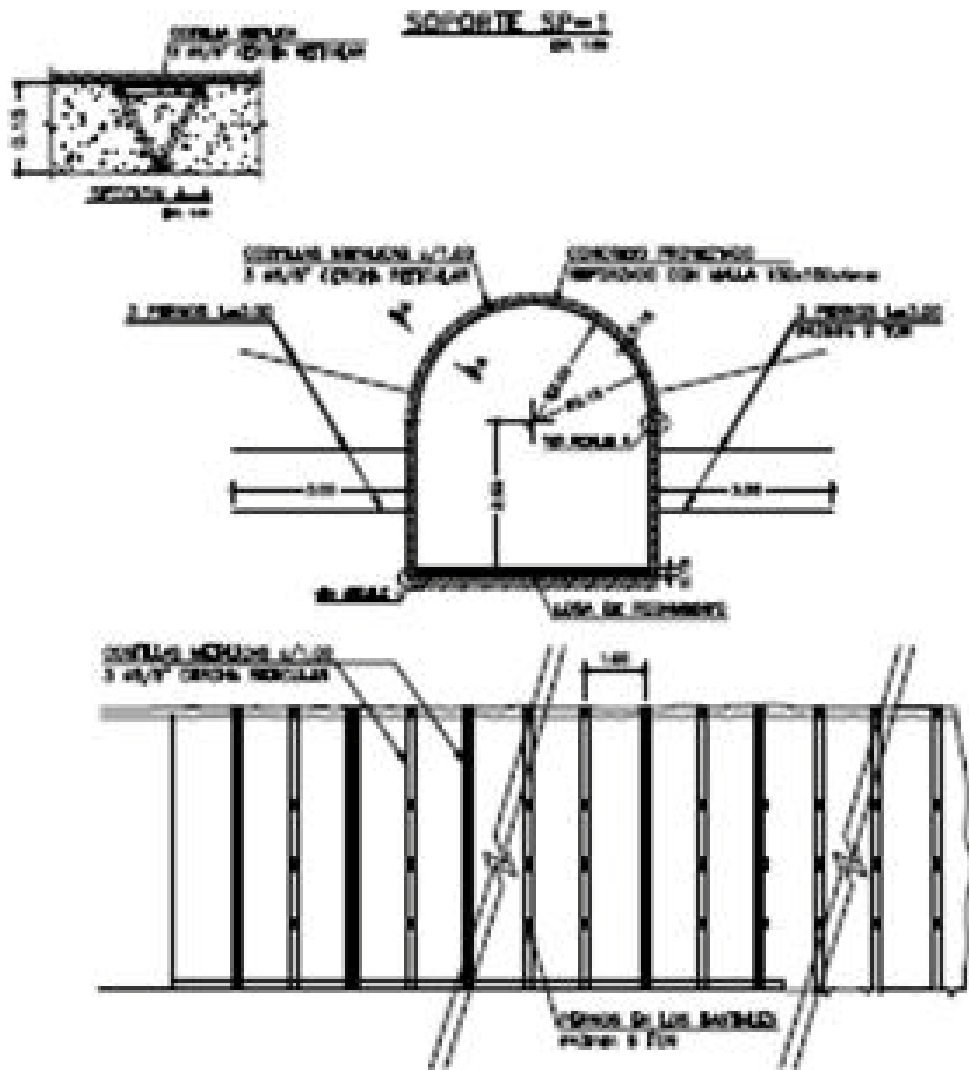


CAPACIDAD Y RIGIDEZ DE SOPORTES TIPICOS

Support type	Flange width - mm	Section depth - mm	Weight - kg/m	Curve number	Maximum support pressure $p_{i\max}$ (MPa) and average maximum strain $s_{\max,av}$ for a tunnel of diameter D (m) and a support spacing of s (m)
 Wide flange rib	305	305	97	1	$p_{i\max} = 19.9D^{-1.23}/s$
	203	203	67	2	$p_{i\max} = 13.2D^{-1.3}/s$
	150	150	32	3	$p_{i\max} = 7.0D^{-1.4}/s$ $s_{\max,av} = 0.30\%$
 I section rib	203	254	82	4	$p_{i\max} = 17.6D^{-1.29}/s$
	152	203	52	5	$p_{i\max} = 11.1D^{-1.33}/s$ $s_{\max,av} = 0.26\%$
 TH section rib	171	138	38	6	$p_{i\max} = 15.5D^{-1.24}/s$
	124	108	21	7	$p_{i\max} = 8.8D^{-1.27}/s$ $s_{\max,av} = 0.55\%$
 3 bar lattice girder	220	190	19	8	$p_{i\max} = 8.6D^{-1.03}/s$ $s_{\max,av} = 1.35\%$
	140	130	18		
 4 bar lattice girder	220	280	29	9	$p_{i\max} = 18.3D^{-1.02}/s$ $s_{\max,av} = 1.30\%$
	140	200	26		

Support type				Curve number	Maximum support pressure $p_{i\max}$ (MPa) for a tunnel of diameter D (metres)	
	Thickness - mm	Age - days	UCS - MPa			
 Grouted rockbolts or cables spaced on a $s \times s$ metre grid. Maximum average strain is approximately 0.2%, excluding setting strain for faceplates and anchors and fibre-glass rods and cables.	34 mm rockbolt			10	$p_{i\max} = 0.354/s^2$	
	25 mm rockbolt			11	$p_{i\max} = 0.267/s^2$	
	19 mm rockbolt			12	$p_{i\max} = 0.184/s^2$	
	17 mm rockbolt			13	$p_{i\max} = 0.10/s^2$	
	SS39 Split set			14	$p_{i\max} = 0.05/s^2$	
	EXX Swellex			15	$p_{i\max} = 0.1/s^2$	
	20mm rebar			16	$p_{i\max} = 0.17/s^2$	
	22mm fibreglass			17	$p_{i\max} = 0.26/s^2$	
	Plain cable			18	$p_{i\max} = 0.15/s^2$	
	Birdcage cable			19	$p_{i\max} = 0.30/s^2$	
	 Shotcrete or concrete lining. Maximum average strain ($s_{\max,av}$) is approximately 0.1%.	1m	28	35	20	$p_{i\max} = 57.8D^{-0.92}$
		300	28	35	21	$p_{i\max} = 19.1D^{-0.92}$
		150	28	35	22	$p_{i\max} = 10.6D^{-0.97}$
		100	28	35	23	$p_{i\max} = 7.3D^{-0.98}$
		50	28	35	24	$p_{i\max} = 3.8D^{-0.99}$
		50	3	11	25	$p_{i\max} = 1.1D^{-0.97}$
		50	0.5	6	26	$p_{i\max} = 0.6D^{-1.0}$

TIPOLOGÍA DE LOS SOPORTES SELECCIONADOS



ESTRUCTURA DE SOPORTES PARA TÚNELES

	DATOS	CÁLCULOS
Radio equivalente de la excavación (R):	R cm	
Espesor del concreto proyectado (e)	e cm	
Resistencia del concreto proyectado (f'c)	f'c Kg/cm ²	
Módulo de deformación del concreto proyectado (Ec)	15000 * SQRT(f'c) Kg/cm ²	
Módulo de Poisson del concreto proyectado (v)	v	
Coefficiente (de escala) β	0,85	
Rigidez del anillo de concreto proyectado (Kc)		$E_c * e * (1 - v^2) * R^3$ Kg/cm ³
Resistencia cedente del anillo de concreto proyectado (Rc)		$0,5β * f'c * (1 - (R - e) / (R + e)) * R^2$ Kg/cm ²
Desplazamiento cedente (radial)		R_c / K_c cm
Desplazamiento radial último (0.3%R)		0,003R cm
Sección del marco de costillas (Ac)	Ac cm ²	
Inercia del marco metálico (Ic)	Ic cm ⁴	
Tensión cedente del acero del marco (f'y)	f'y Kg/cm ²	
Módulo de deformación del acero (Ea)	Ea Kg/cm ²	
Separación entre marcos (Sc)	Sc cm	
Rigidez del anillo del marco (Km)		$E_a * A_c / S_c * R^3$ Kg/cm ³
Resistencia cedente del anillo del marco de acero (Rm)		$f' y * A_c / S_c * R$ Kg/cm ²
Desplazamiento cedente (radial)		R_m / K_m cm
Resistencia al pandeo libre (Rp)		$3E_a * I_c / S_c * R^3$ Kg/cm ²
Desplazamiento radial correspondiente al pandeo		R_p / K_m cm
Carga de falla de los pernos (Tp)	Tp Kg	
Longitud de los pernos (Lp)	Lp cm	
Sección de los pernos (Ap)	Ap cm ²	
Módulo de deformación de los pernos (Ep)	Ep Kg/cm ²	
Separación transversal entre pernos (St)	St cm	
Separación longitudinal entre pernos (Sl)	Sl cm	
Flexibilidad experimental de los pernos (Q)	Q cm/Kg	
Rigidez del anillo de pernos (Kp)		$1 / S_t * S_l * (L_p / (A_p * E_p) - Q)$ Kg/cm ³
Resistencia cedente del anillo de pernos (Rp)		$T_p / S_t * S_l$ Kg/cm ²
Desplazamiento de falla (radial)		R_p / K_p cm
Factor de forma para la rigidez del anillo de soporte (FF)	(1,0 - 1,6)	
Rigidez teórica del anillo de soporte combinado (Ka)		$K_c + K_m + K_p$ Kg/cm ³
Rigidez efectiva del soporte (Ks)		K_a / FF Kg/cm ³
Resistencia teórica del anillo de soporte combinado (Ra)		$R_c + R_m + R_p$ Kg/cm ²
Deformación máxima admisible para el soporte (δ*)	(δ*) cm	
Resistencia efectiva del soporte (Rs)		$K_s * (δ^*)$ Kg/cm ²
Eficiencia del anillo de soporte combinado (EF)		R_s / R_a
(δ*) Valor menor entre los máximos admisibles para evitar: cedencia o ruptura (concreto), cedencia o pandeo (costillas), y falla (pernos)		

CALCULO ESTRUCTURAL DEL SOPORTE

FERROCARRIL LA ENCRUCIJADA-PUERTO CABELLO

TUNELES LA CABRERA Y TAPATAPA

SOPORTES BÁSICOS CON PERNOS ADICIONALES

Soporte TIPO: **P-c***

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

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

CARACTERÍSTICAS DE LOS SOPORTES SELECCIONADOS

Tipo	Concreto Proyectado (F'c=150 Kg/cm ²) (± 10%)	Costillas Metálicas (f'y = 4200 Kg/cm ²)	Pernos Metálicos (D= 43mm-9 toneladas)	Capacidad (Kg/cm ²)	Rigidez (Kg/cm ² /cm)
SP-1	15 cm (± 3)	Cercha 3 φ 5/8" @ 1 m	6 de 3 m @ costilla	5,0 (δ=1,0)	44 (δ=5,5)
SP-2	5 a 10 cm	----	localizados de 3 m	3,0 (δ=0,7)	27 (δ=3,5)
SP-3	----	----	eventuales de 3 m	----	----

CAPACIDAD ESTRUCTURAL DEL SOPORTE

Crystal Ball Report

Forecast: P-c: Resistencia efectiva del soporte

Summary:

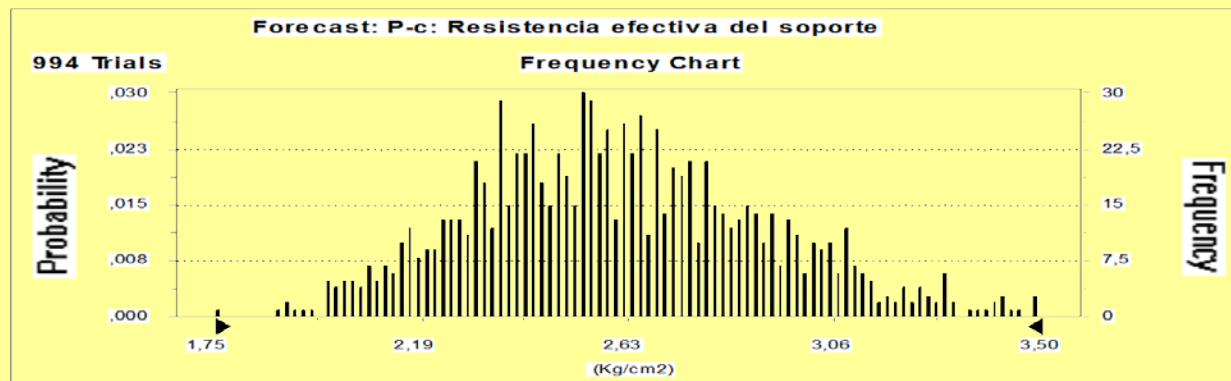
Display Range is from 1,75 to 3,50 (Kg/cm²)

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

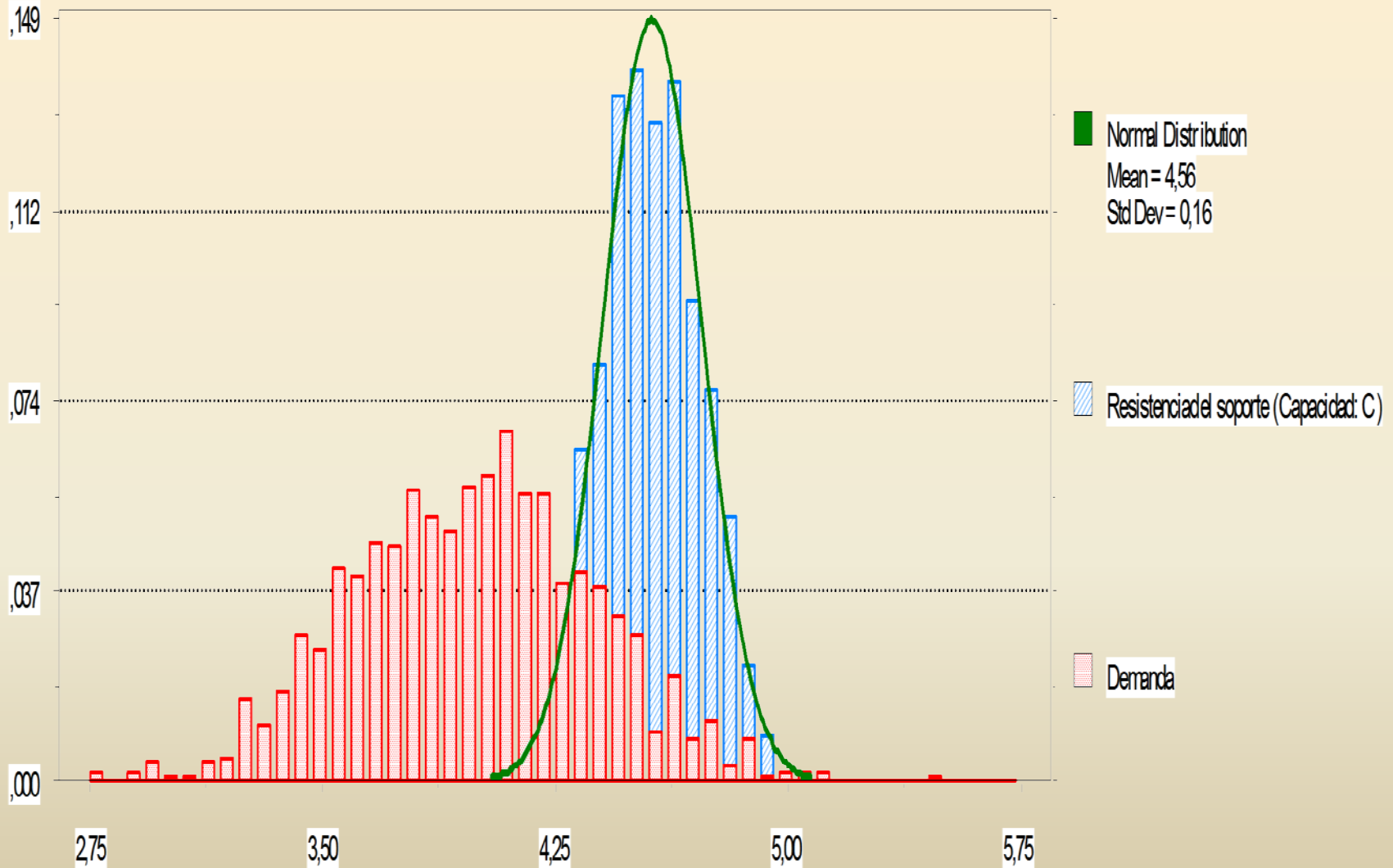


DEMANDAS (Cargas) DE DISEÑO A LO LARGO DEL TÚNEL

Cobertura (m)	5 – 15	15 – 25	25 – 40	40 – 50	50 – 70
Progresivas (m)	0 – 18	18 – 30	30 – 135	135 – 330	330 – 450
$20 \leq \text{GSI} \leq 30$	2,9 Kg/cm² (desv.0,6)		1,2 Kg/cm² (desv. 0,3)	1,6 Kg/cm² (desv. 0,4)	---
$30 < \text{GSI} \leq 40$	---	---	0,9 Kg/cm² (desv. 0,1)	1,3 Kg/cm² (desv. 0,2)	---
$40 < \text{GSI} \leq 60$	---	---	---	0,8 Kg/cm² (desv. 0,2)	1,5 Kg/cm² (desv. 0,3)

Overlay Chart

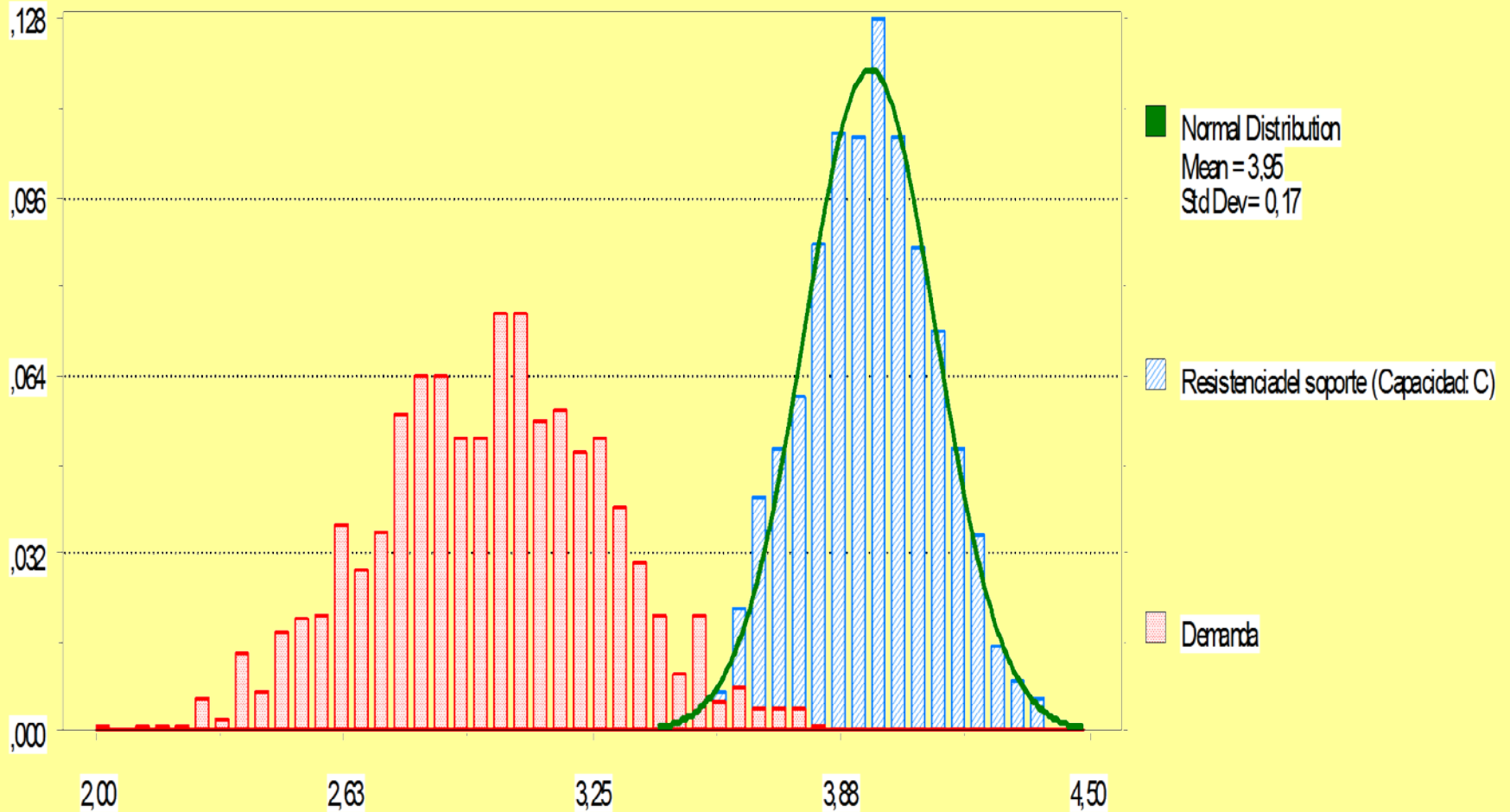
Capacidad vs. Demanda



DEMANDA (carga) Vs. CAPACIDAD (resistencia) DEL SOPORTE

Overlay Chart

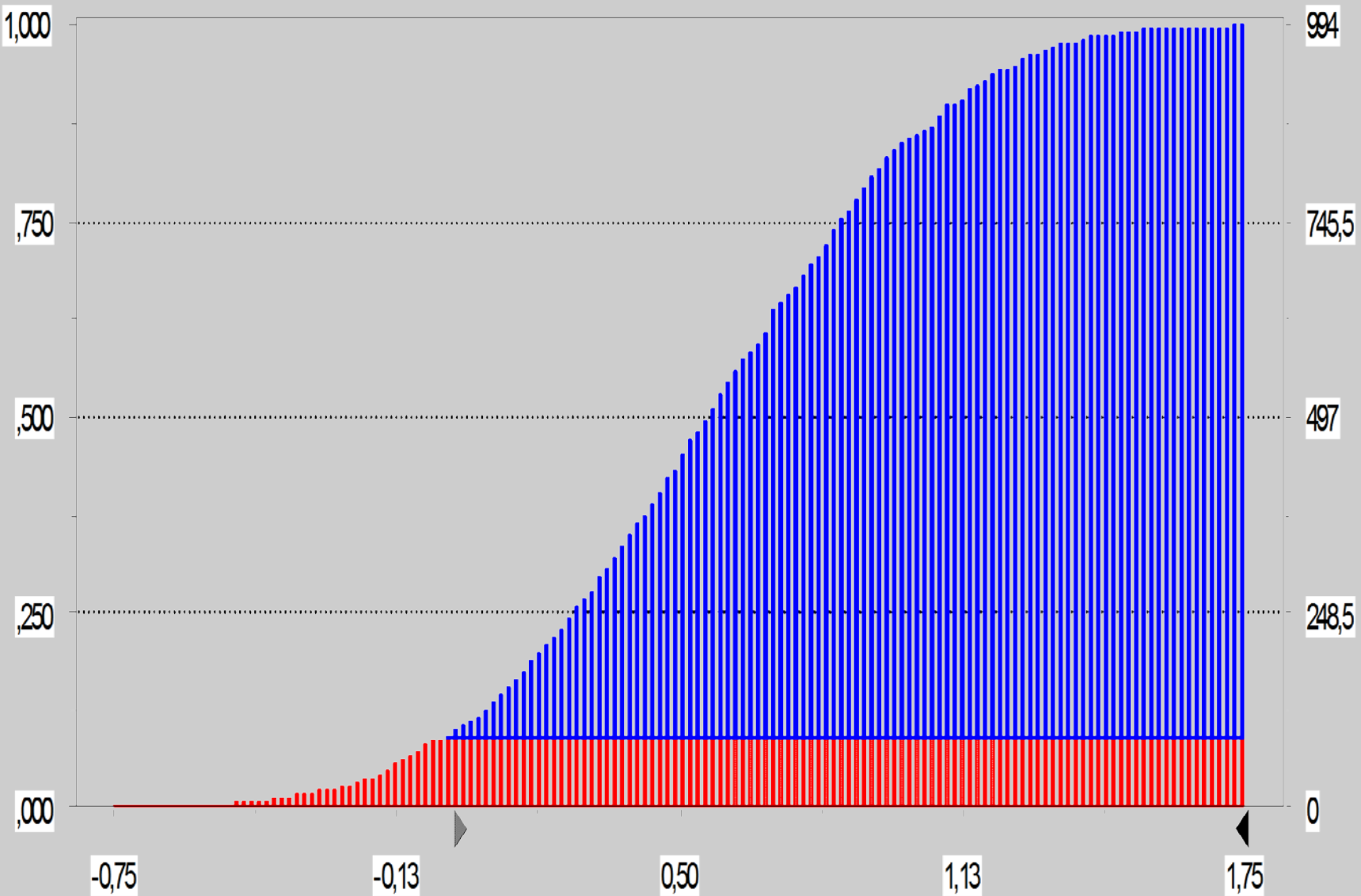
Capacidad vs. Demanda



Forecast: C-D

Cumulative Chart

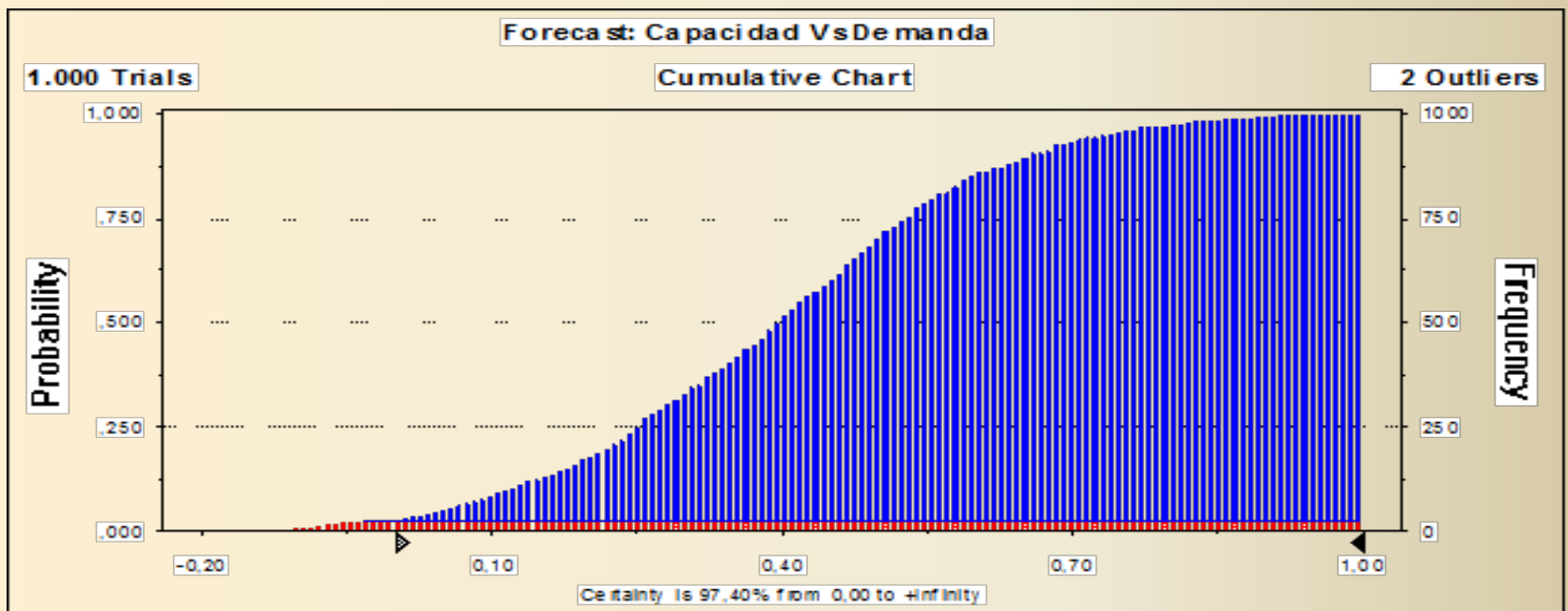
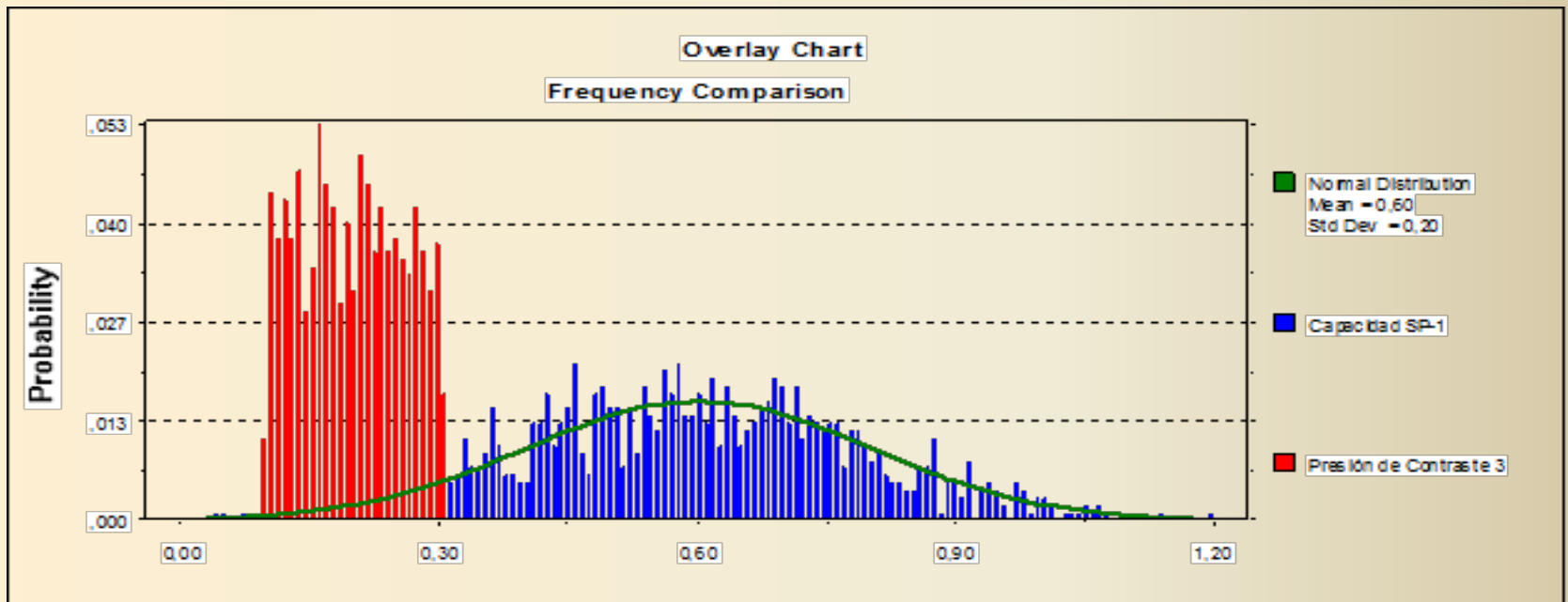
994 Trials

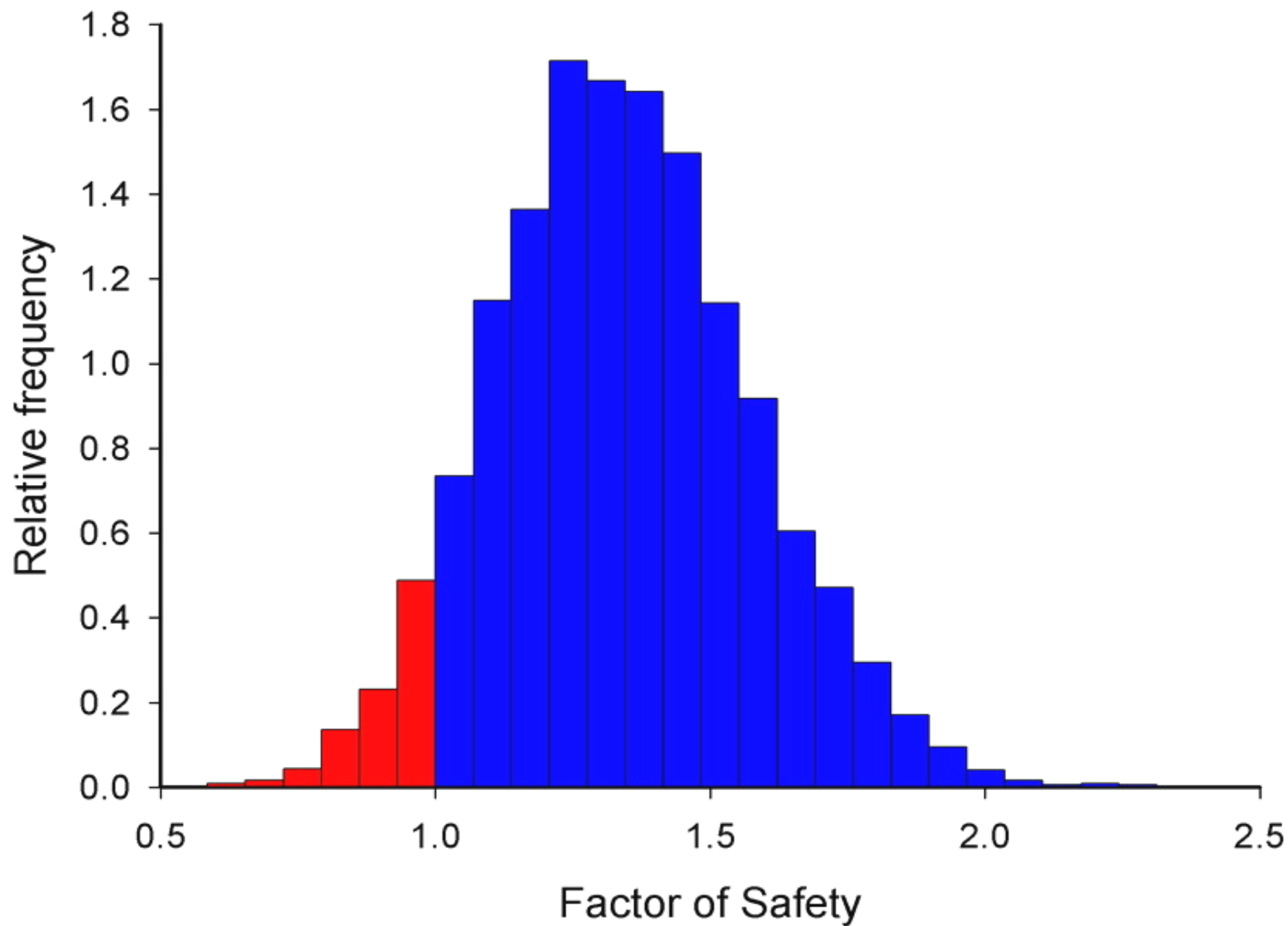


Certainty is 90,85% from 0,00 to 1,75

Probability

Frequency

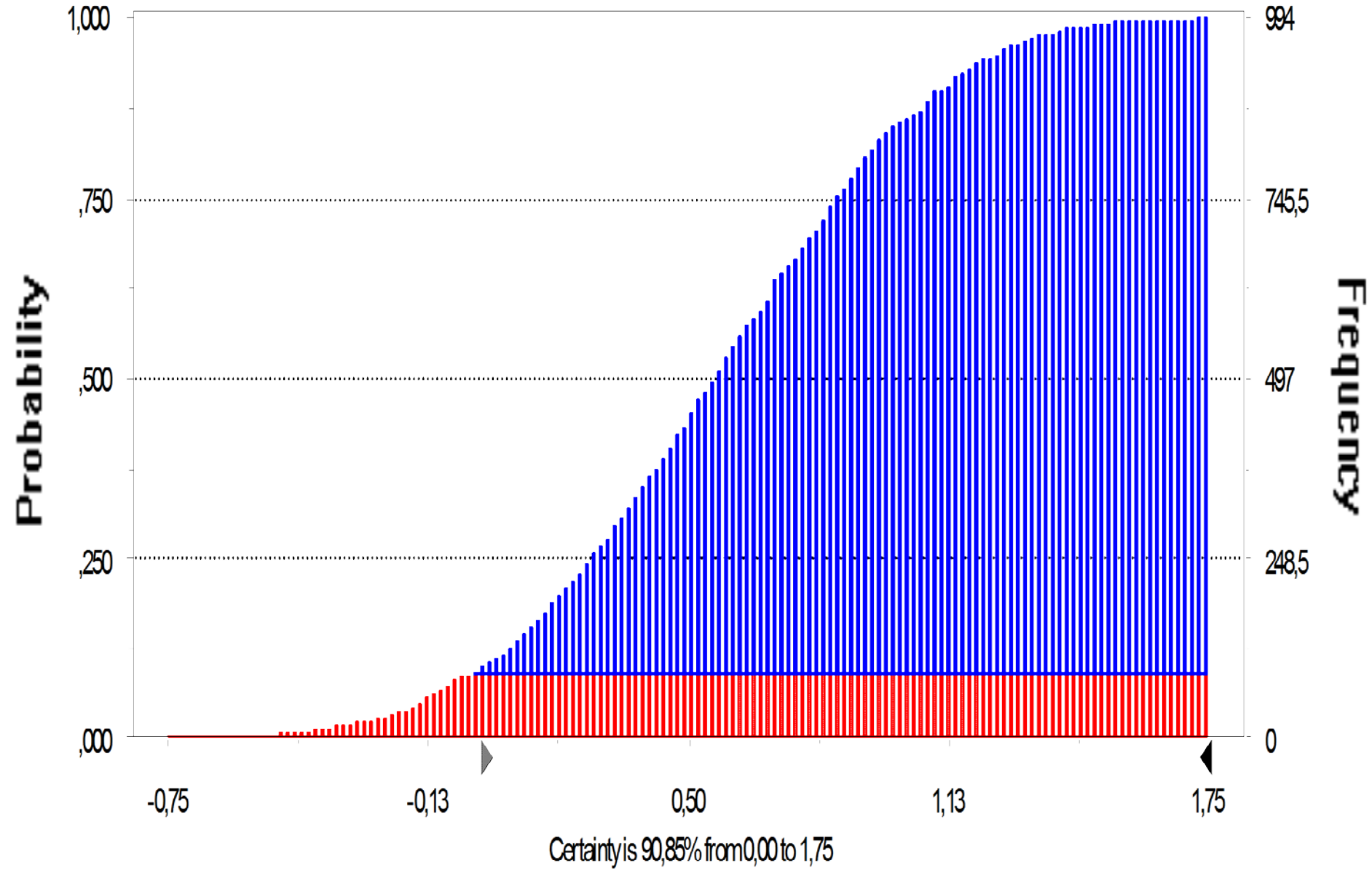


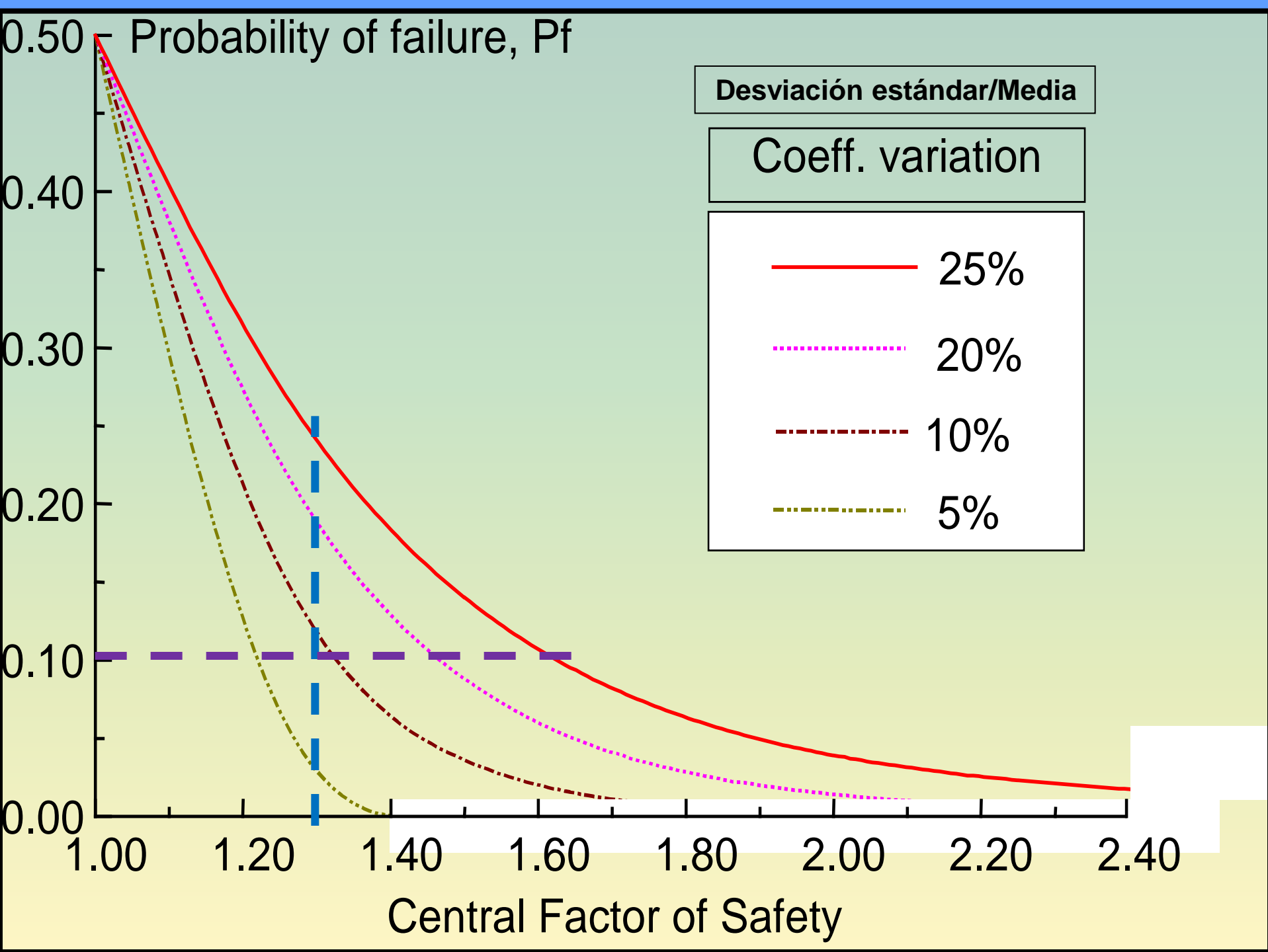


Forecast: C-D

Cumulative Chart

994 Trials





Fs Vs. Pf

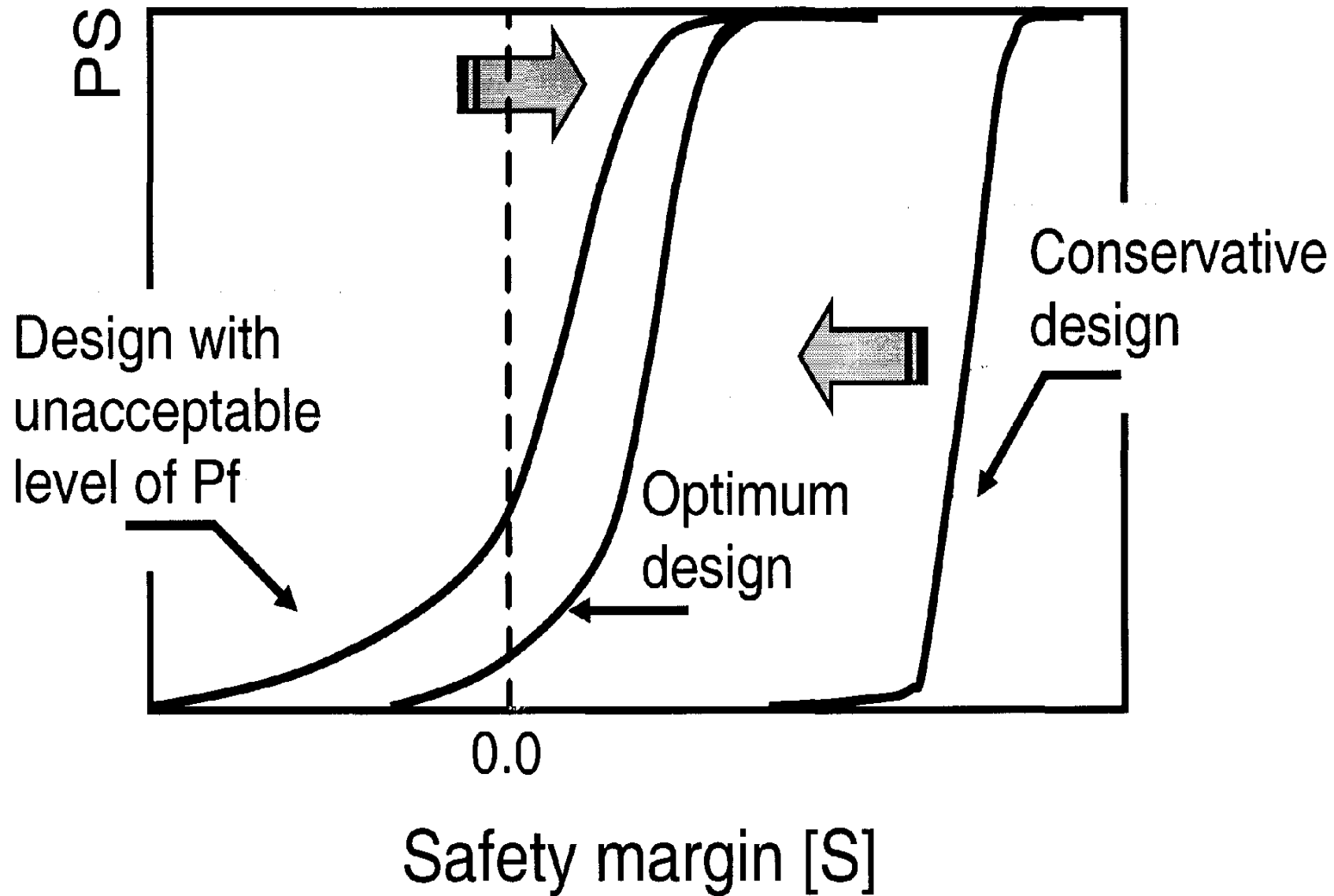
No hay dudas que constituye un salto cualitativo importante y positivo el pasar del concepto

“Factor de Seguridad”

al concepto

“Probabilidad de Falla”,

aunque debe reconocerse que “el impacto emocional” de proponer al público no especialista que existe siempre un riesgo finito (aunque pequeño) de falla asociado al diseño de un talud, es tal que dificulta la propuesta de reemplazar el factor de seguridad estándar con la probabilidad de falla o con el índice de confiabilidad de un talud” (Hoek, 1998).



SELECCIÓN DEL SOPORTE DE DISEÑO

Coberturas (m)	5 – 15	15 – 25	25 – 40	40 – 50	50 – 70
<i>Progresivas (m)</i>	0 – 18	18 – 30	30 – 135	135 – 330	330 – 450
$20 \leq \text{GSI} \leq 30$	SP-1	SP-1	SP-2		
$30 < \text{GSI} \leq 40$			SP-2	SP-2	
$40 < \text{GSI} \leq 60$				SP-2	SP-1

Margen de Seguridad (C-D) Probabilidad de Falla (p%) y Factor (FS)

Coberturas (m)	5 – 15	15 – 25	25 – 40	40 – 50	50 – 70
Progresivas (m)	0 – 18	18 – 30	30 – 135	135 – 330	330 – 450
$20 \leq \text{GSI} \leq 30$	5,0 – 2,9 $p = 1,5 \%$ FS = 1,7	5,0 – 2,1 $p = 0,9 \%$ FS = 2,4	3,0 – 1,6 $p = 0,6 \%$ FS = 1,9	---	---
$30 < \text{GSI} \leq 40$	---	---	3,0 – 0,9 $p = 0,4 \%$ FS = 3,3	3,0 – 1,3 $p = 0,7 \%$ FS = 2,3	---
$40 < \text{GSI} \leq 60$	---	---	---	3,0 – 0,8 $p = 0,5 \%$ FS = 3,7	5,0 – 1,9 $p = 0,4 \%$ FS = 2,6

Túnel de acceso a la Mina El Placer-El Dorado-Venezuela
Metodología probabilística de diseño del soporte

GRACIAS POR LA ATENCIÓN
y
UN SENTIDO AGRADECIMIENTO POR LA GRAN HOSPITALIDAD:

- ❖ **A LA SOCIEDAD COLOMBIANA DE GEOTECNIA**
- ❖ **A LA UNIVERSIDAD NACIONAL - MANIZALES**
- ❖ **A LOS AMIGOS JUAN MONTERO Y ALVARO GONZALES**
- ❖ **A TODOS LOS AMABLES COLEGAS COLOMBIANOS**