



DISEÑO DE VOLADURAS A CIELO ABIERTO

Ing. César Ayabaca P.



VOLADURAS A CIELO ABIERTO

- ✓ Muy utilizadas en explotación minera de canteras de caliza para la industria del cemento, algunas minas de materiales de construcción y en minas de otros minerales.
- ✓ En Obras civiles muchos tipos de trabajos involucran el uso de explosivos como carreteras, presas, polductos, y canales de riego.



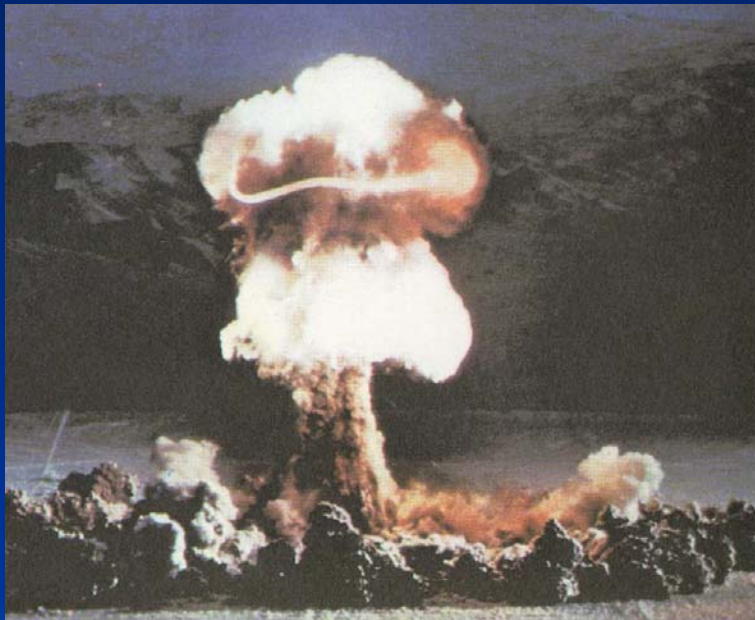
EXPLOTACION MINERA A CIELO ABIERTO



CARRETERA BAÑOS PUYO



EXPLOSION



1 kiloton = energía liberada
por 1.000 tn de TNT

1 tn de TNT libera 4000
veces mas energía que
la necesaria para
levantar un auto de 1 tn
a 100m.

Detonación nuclear
libera de 1000
1'000.000 veces mayor
energía que una
detonación química.

DEFLAGRACION

- Es una reacción química que se mueve rápidamente a través del material explosivo y libera calor o flama vigorosamente la reacción se mueve demasiado lenta para producir ondas de choque significativas y fracturación de la roca. Ejemplo encendido de una mecha de seguridad. Una VOD de 1000 m/s es límite entre detonación y deflagración.

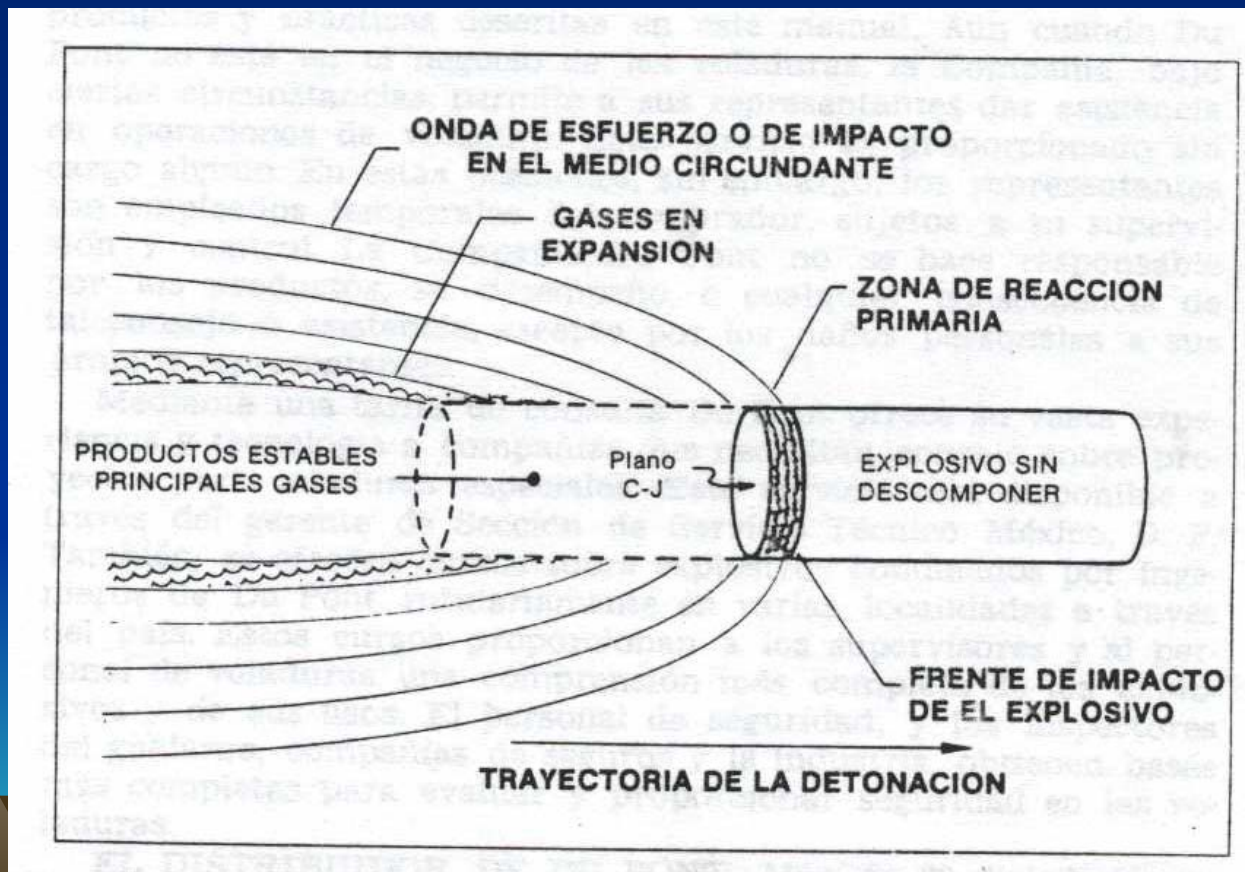


DETONACION

- En una detonación la reacción química se mueve a través del material explosivo a una velocidad mayor que aquella del sonido a través del mismo material. Se forma una onda de choque supersónica a través del explosivo. Los gases tienen temperaturas de 3000 a 7000 F y presiones altas de rango de 20 a 100 Kbars 100.000 atmósferas o 1.5 millones de libras/pul². Estos gases se expanden rápidamente, producen onda de choque en el medio circundante.

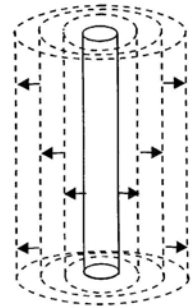


- Zona de reacción primaria es el área en la cual empieza la descomposición química y es limitada por el plano de Chapman-Jouquet.



FASES DE ROTURA EN UN TALADRO CON "CARA LIBRE"

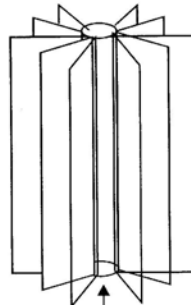
1. EXPANSIÓN



Expansión del taladro por los gases a alta presión

2. ROTURA RADIAL

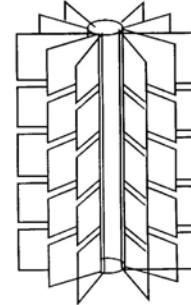
Grietas radiales en la superficie



Planos de rotura paralelos al eje del taladro (verticales)

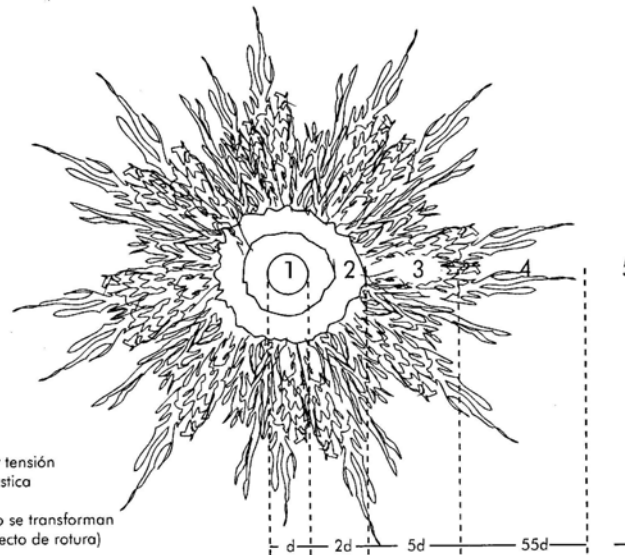
3. ROTURA FLEXURAL

Plano de rotura horizontal desde la cara libre



Planos de rotura transversales al eje del taladro

ROTURA RADIAL COMO EFECTO DE LA TRANSFERENCIA DE LA ONDA DE DETONACIÓN A LAS PAREDES DEL TALADRO, COMO CONSECUENCIA DEL IMPACTO Y DEL GRADO DE CONFINAMIENTO



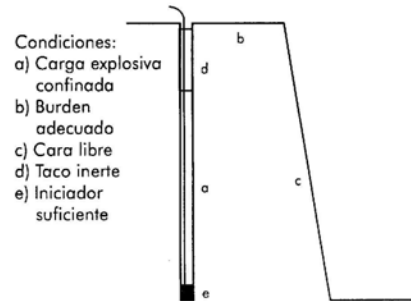
1. Diámetro del taladro
2. Zona pulverizada
3. Zona altamente triturada
4. Zona de fisuramiento por tensión
5. Zona de deformación elástica

(Las vibraciones por impacto se transforman en ondas sísmicas, ya sin efecto de rotura)

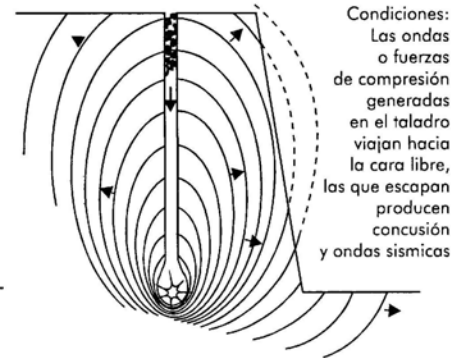
d $2d$ $5d$ $55d$

FASES DE LA MECÁNICA DE ROTURA DE UN TALADRO CON CARA LIBRE

1. COLUMNA EXPLOSIVA

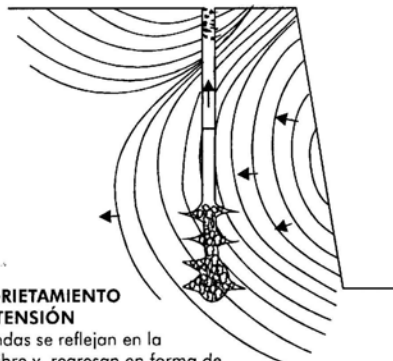


2. PROPAGACIÓN DE LA ONDA DE CHOQUE



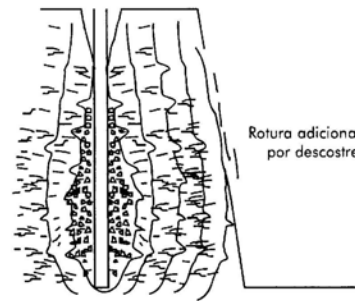
3. AGRIETAMIENTO POR TENSIÓN

Las ondas se reflejan en la cara libre y regresan en forma de fuerzas de tensión que agrietan a la roca. Se nota ya la expansión de los gases



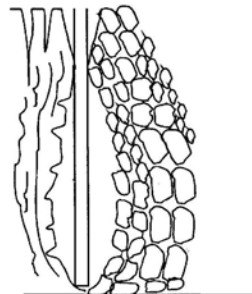
4. ROTURA DE EXPANSIÓN

Los gases a alta presión se expanden rápidamente penetrando en las grietas de tensión iniciando la rotura radial y el desplazamiento de la roca



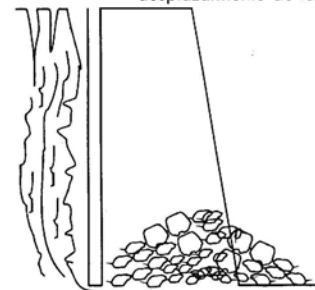
5. EXPANSIÓN MÁXIMA (Rotura flexural)

Los gases presionan al cuerpo de roca entre el taladro y la cara libre, doblándola y creando planos de rotura horizontales adicionales



6. FASE FINAL: FORMACIÓN DE LA PILA DE ESCOMBROS

Los gases en contact con el medio ambiente pierden fuerza y el material triturado cae al pie de la nueva cara libre



DISEÑO DE VOLADURAS

- *Tipo de roca y condiciones geológicas.*
- *Propiedades físico-mecánicas de la roca.*
- *Volumen de roca a ser volada.*
- *Trabajos de perforación.*
- *Tipo de explosivo y propiedades.*
- *Sistema de iniciación.*
- *Parámetros dimensionales de la voladura.*



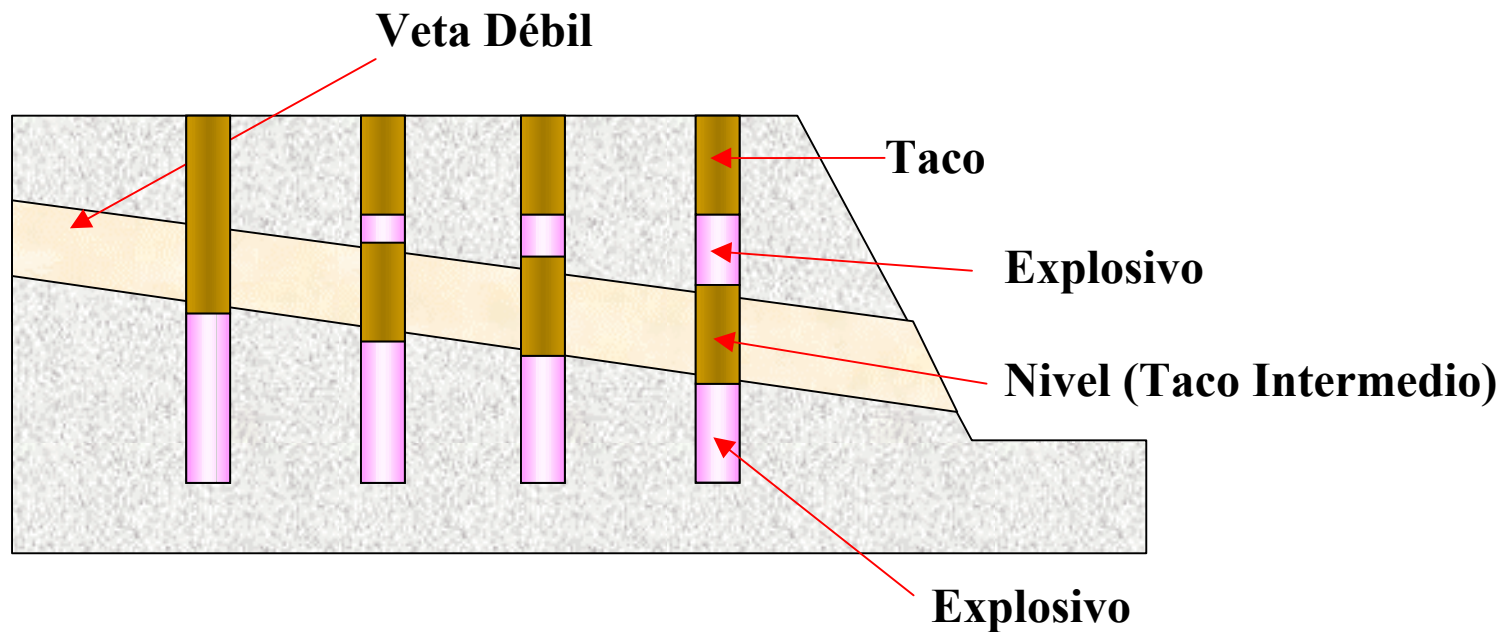
TIPO DE ROCA Y CONDICIONES GEOLÓGICAS

- Estratificación y bandeamiento
- Esquistocidad
- Fracturamiento
- Fallas
- Contactos
- Azimut de buzamiento



- ***Condiciones Geológicas :***

- Estructuras:

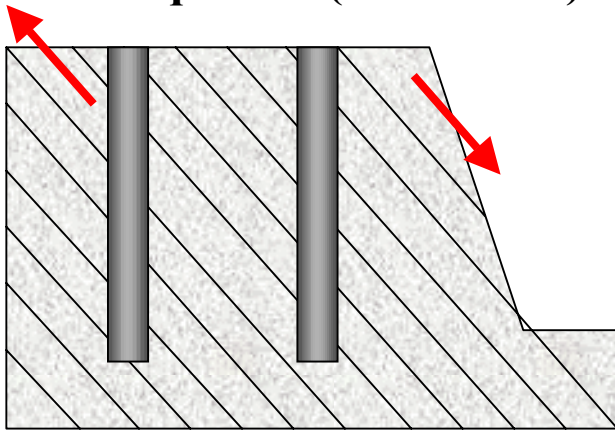


• *Condiciones Geológicas :*

–Estructuras:

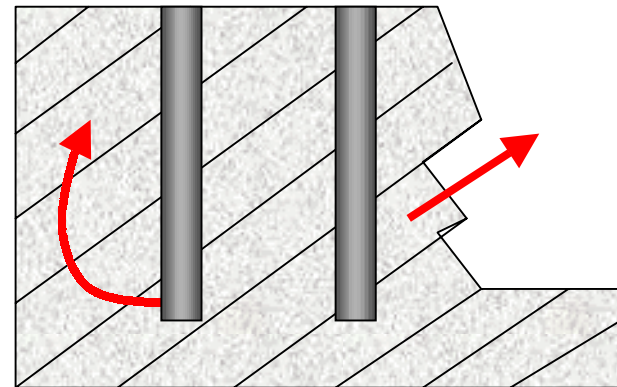
Estratos o Fracturas hacia el tajo:

- Paredes Inestables
- Sobrequebre (Backbreak) excesivo



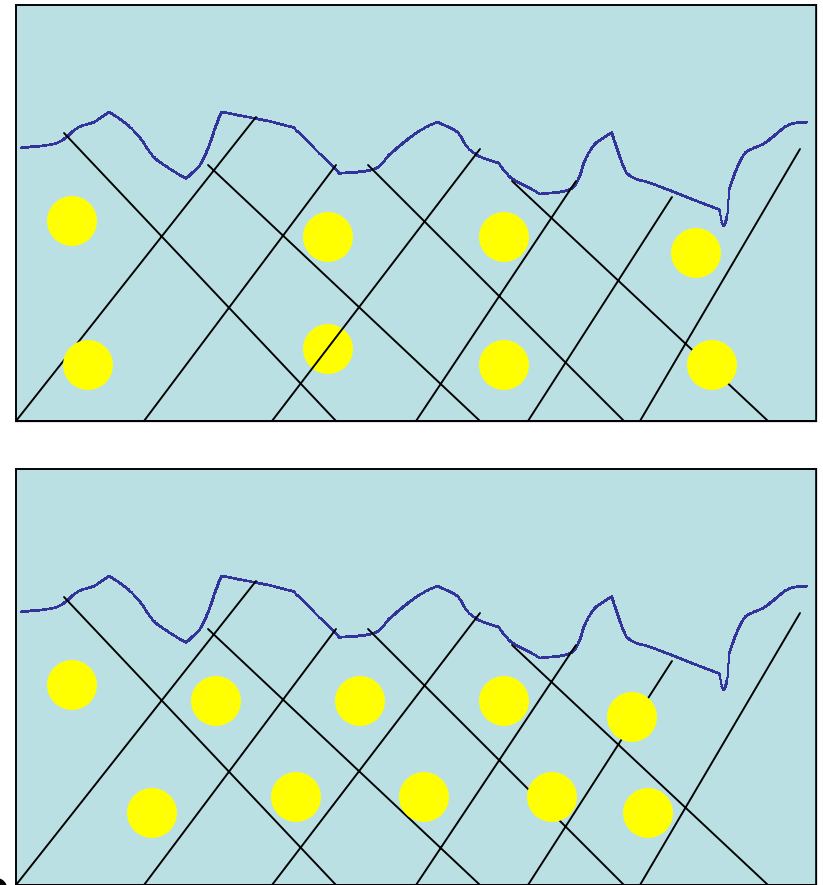
Estratos inclinados hacia masa rocosa:

- Pata sin romper
- Potencial para sobresaliente



Efectos de la Geología

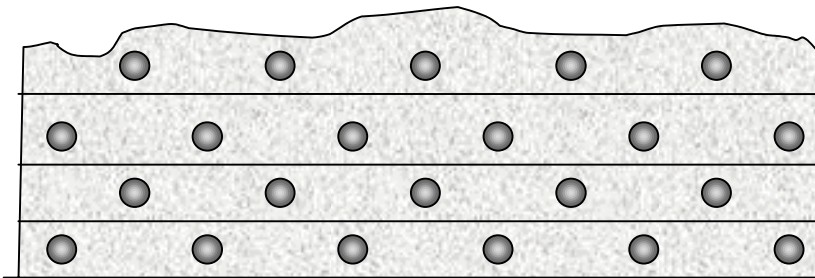
- **La Fragmentación será controlada por las fracturas existentes.**
- **Los patrones de perforación más pequeños minimizan los efectos adversos de las grietas y fracturas.**
- **Tener presente que patrones de perforación mejoran o empeoran la distribución de la energía.**



- ***Condiciones Geológicas :***
 - Estructuras Cont.

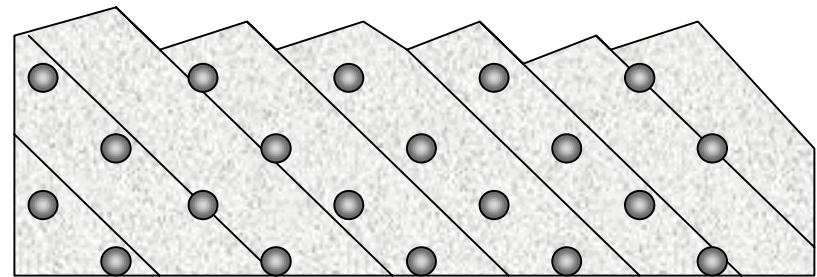
Juntas paralelas a cara libre:

- Buen control de talud
- Puede ser mejor orientación para control de talud.



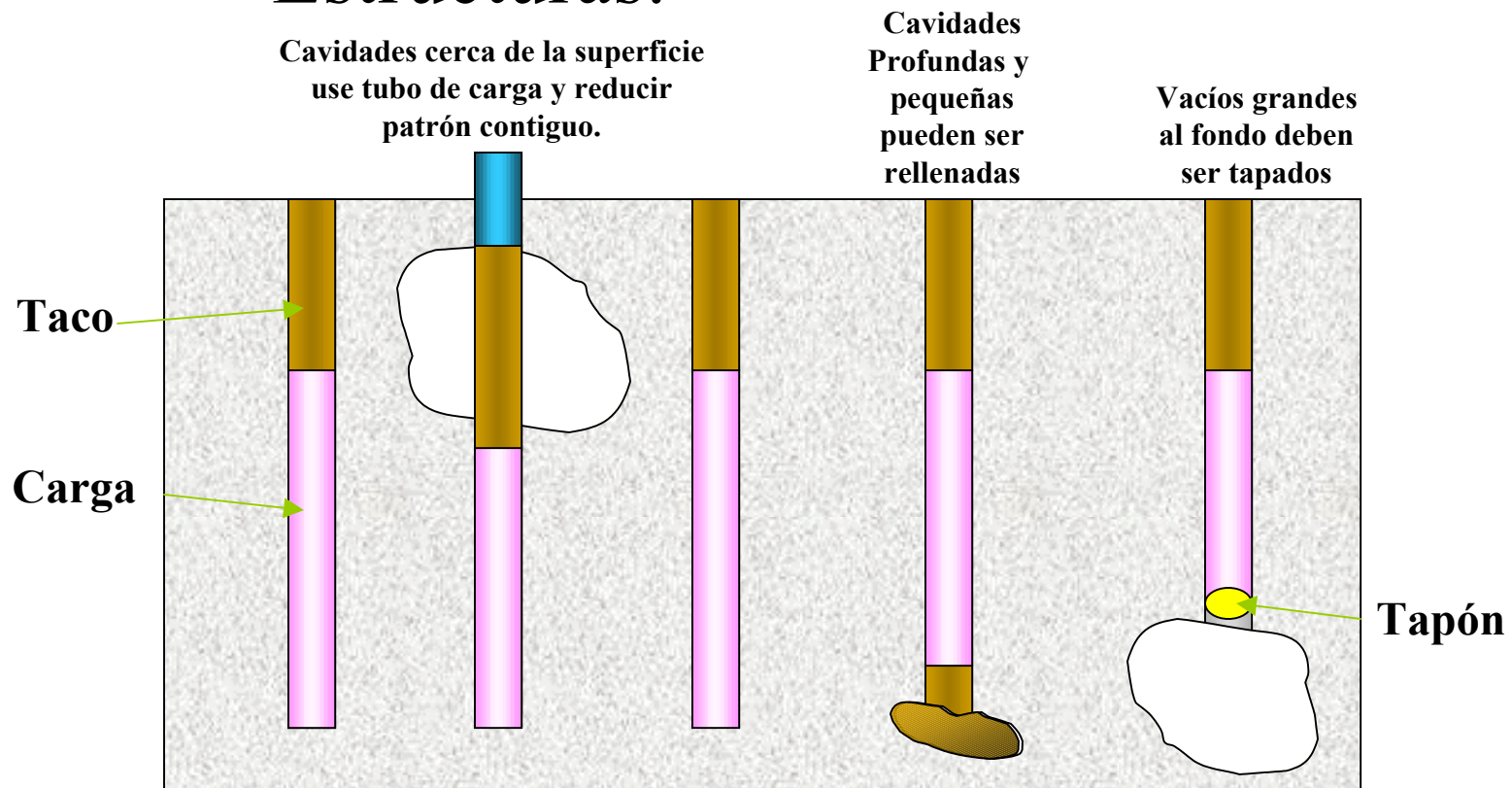
Juntas anguladas a cara libre:

- Cara libre blocosa
- Quebrado al final excesivo



• *Factores Geológicos :*

–Estructuras:



PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS DE LA ROCA

- Resistencia a la compresión
- Resistencia a la tensión
- Frecuencia sísmica



FRECUENCIA SISMICA

CLASE DE FORMACION	VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN DE LA ONDA SISMICA LONGITUDINAL (m/s)
CAPA METEORIZADA	300 – 900
ALUVINES MODERNOS	350 – 1500
ARCILLAS	1000 – 2000
MARGAS	1400 – 4500
CONGLOMERADOS	2500 – 5000
CALIZAS	4000 – 6000
DOLOMITAS	5000 – 6000
SAL	4500 – 6500
YESO	3000 – 44000
ANHIDRITA	3000 – 6000
GNEIS	3100 – 5400
CUSRCITAS	5100 – 6100
GRANITOS	4000 – 6000
GABROS	6700 – 7300
DUNITAS	7900 – 8400
DIABASAS	5800 – 7100

FRECUANCIA SISMICA

CLASE DE FORMACION	VELOCIDAD SISMICA (m/s)
DURA	> 4000
MEDIA	2000 – 4000
BLANDA	< 2000

VELOCIDAD SISMICA Y CONSUMO ESPECIFICO DE EXPLOSIVOS

POTENCIA DEL TRACTOR kw	VELOCIDAD SISMICA (m/s)	CONSUMO ESPECIFICO kg ANFO/m ³
575	3.000	0,230
343	2.500	0,130
250	2.000	0,130
160	1.200	0, 080

VOLUMEN DE ROCA PARA LA VOLADURA

- Comprende al área superficial delimitada por el largo de frente, el ancho, y multiplicado por la altura del banco, se obtiene el volumen de roca a ser volado.
- El volumen de roca a producirse por voladura estará en dependencia del régimen de trabajos de explotación que requiere la cantera para cumplir la producción establecida. Considerando en todo momento la maquinaria a ser utilizada.



TRABAJOS DE PERFORACION

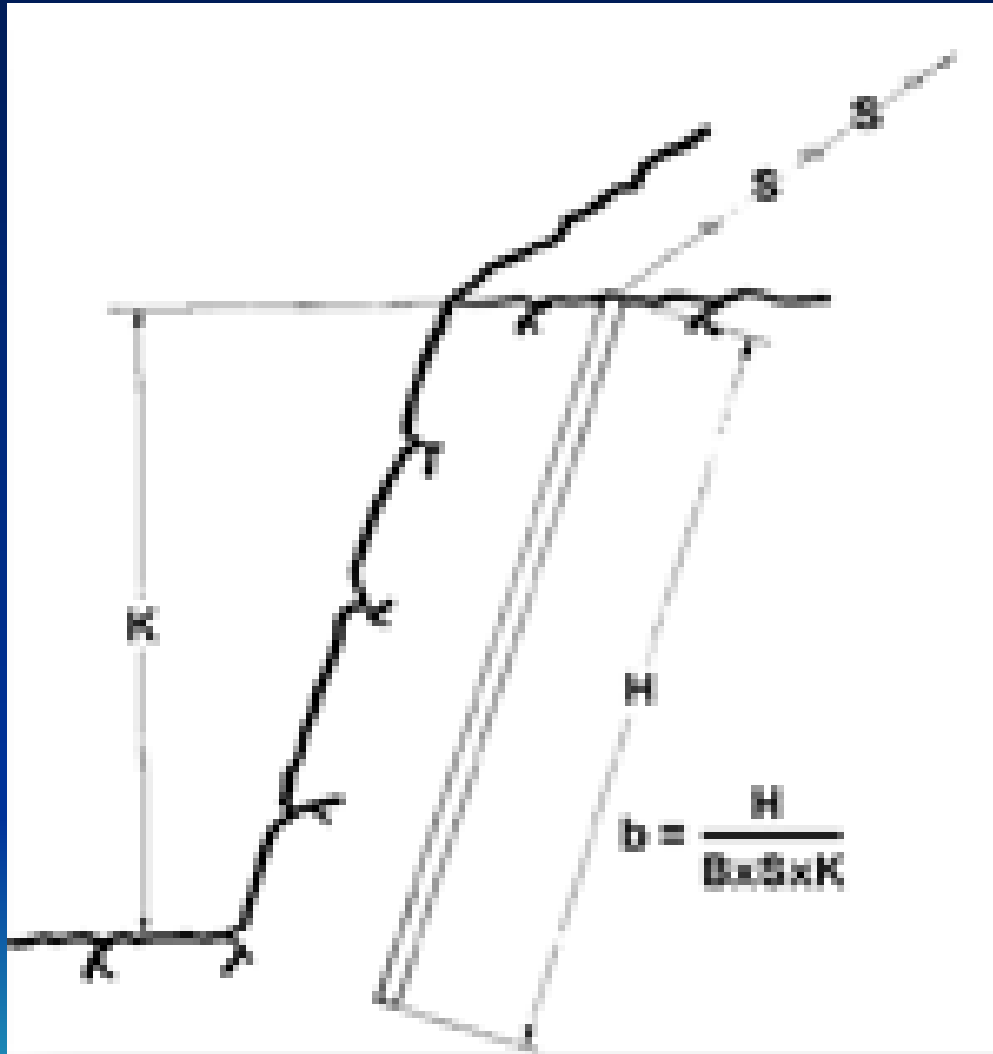
La perforación es la primera operación en la preparación de la voladura.

Para lo cual se deben tomar en cuenta las condiciones de perforación:

- Diámetro de perforación
- Longitud de perforación
- Rectitud
- Estabilidad



PERFORACION ESPECIFICA

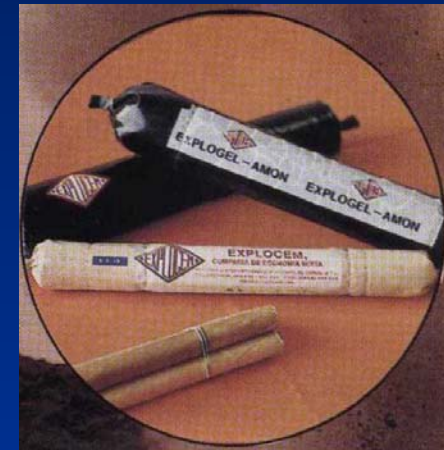


Es el número de metros que se tiene que perforar por cada metro cúbico de roca volada.

EXPLOSIVOS

DINAMITAS

- Eplogel I
- Explogel III
- Explogel Amon

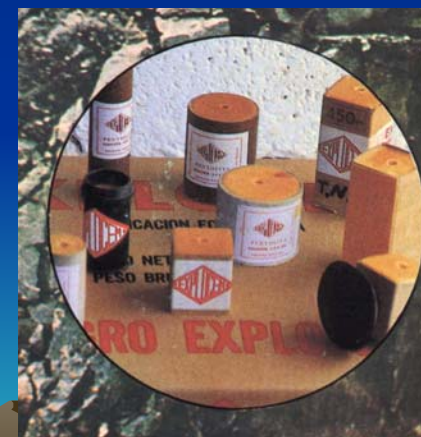


PENTOLITAS

- Booster de iniciación
- Pentolita Sísmica
- Cargas diédricas



PENTRITA + TNT



AGENTES DE VOLADURA

EMULSIONES

- Emelgrel 3000
- Emulsen 910
- Emulsen 720



NITRATO DE
AMONIO +
HIDROCARBURO +
EMULSIFICANTE



ANFOS

- Anfo normal
- Anfo Alumizado



NITRATO DE
AMONIO + DIESEL



ACCESORIOS DE VOLADURA

CORDON DETONANTE

- Cordón detonante de 5 gr.
- Cordón detonante de 10 gr.



PENTRITA



MECHA DE SEGURIDAD



POLVORA NEGRA



FULMINANTES

- Fulminantes N° 8
- Fulminantes eléctricos
- Fulminantes no eléctricos



PENT

AZIDA DE PLOMO

HMX

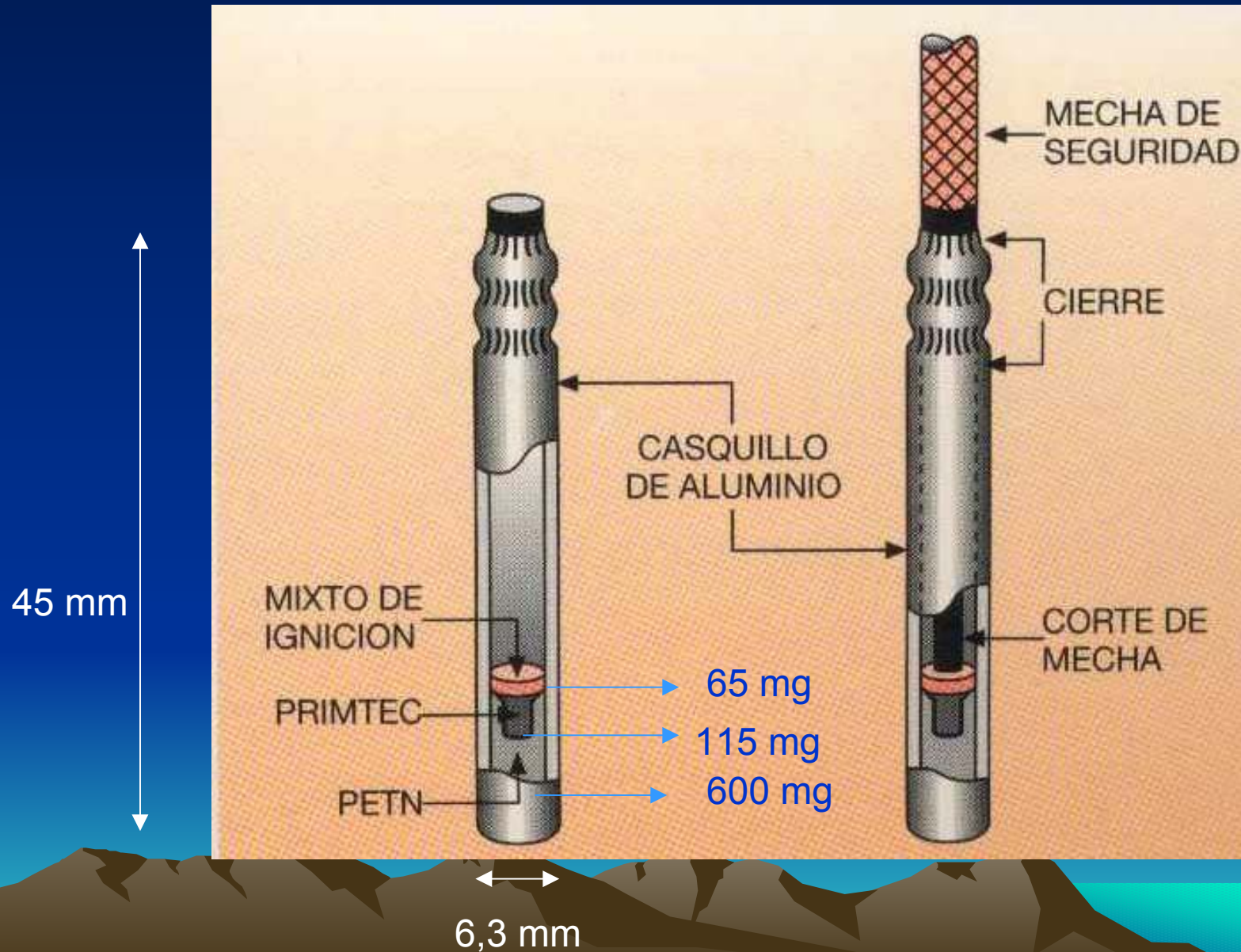


METODOS DE INICIACION

- Iniciación con mecha de seguridad
- Iniciación con cordón detonante
- Iniciación no eléctrica
- Iniciación eléctrica



INICIACION CON FULMINANTE Y MECHA



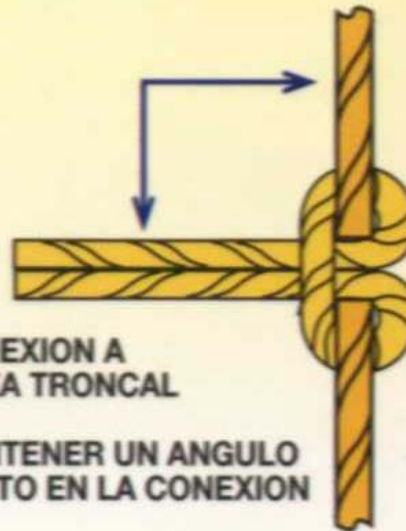
INICIACION CON CORDON DETONANTE

TIPOS DE NUDOS DE CORDON DETONANTE

- UNION DE CORDON
- MANTENER EL ANGULO EXTENDIDO

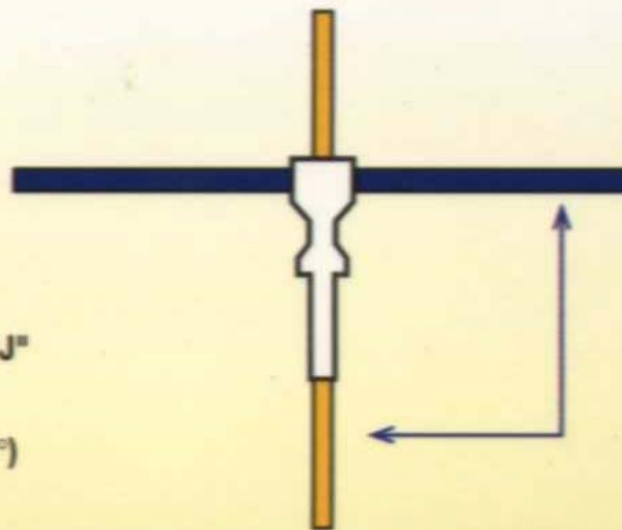


- CONEXION A LINEA TRONCAL
- MANTENER UN ANGULO RECTO EN LA CONEXION



CONEXION CORRECTA DE TUBO A CORDON

- UTILIZAR EL CONECTOR "J"
- MANTENER LA PERPENDICULARIDAD (90°)



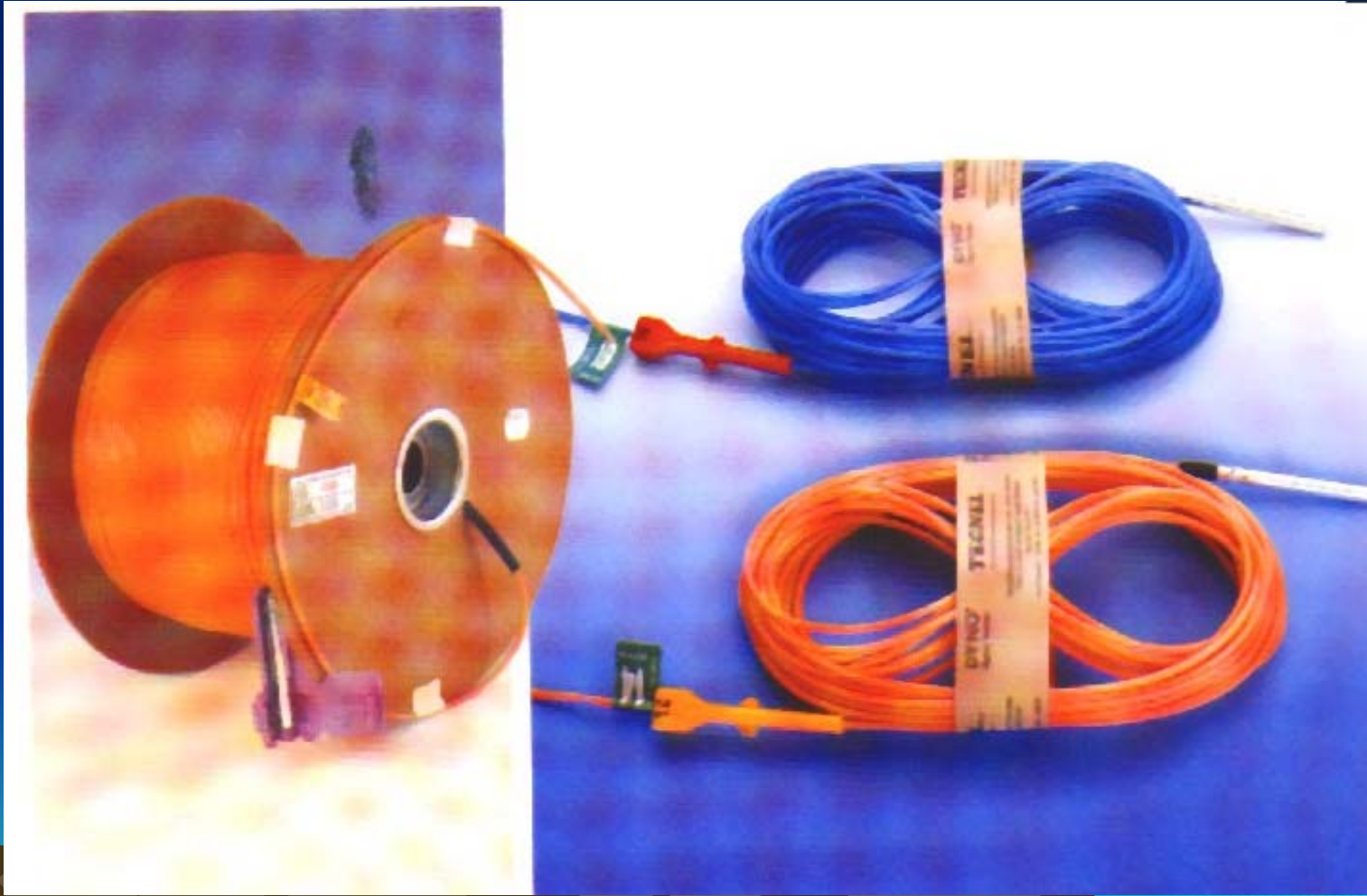
CONEXION DE HUESO DE PERRO



**TABLA DE TIEMPOS PARA CONECTOR
PARA CORDON DETONANTE**
(Conector Bisagra paralelo)

RETARDO (MS)	COLOR DEL CONECTOR
5	VIOLETA
9	VIOLETA
17	ROJO
25	ROJO
35	AMARILLO
42	NEGRO
65	NARANJA
75	NARANJA
100	AZUL
130	AZUL
150	AZUL
200	VERDE
250	VERDE
300	VERDE

SISTEMA DE INICIACION NO ELECTRICA



SERIE DE MILISEGUNDO (MS)

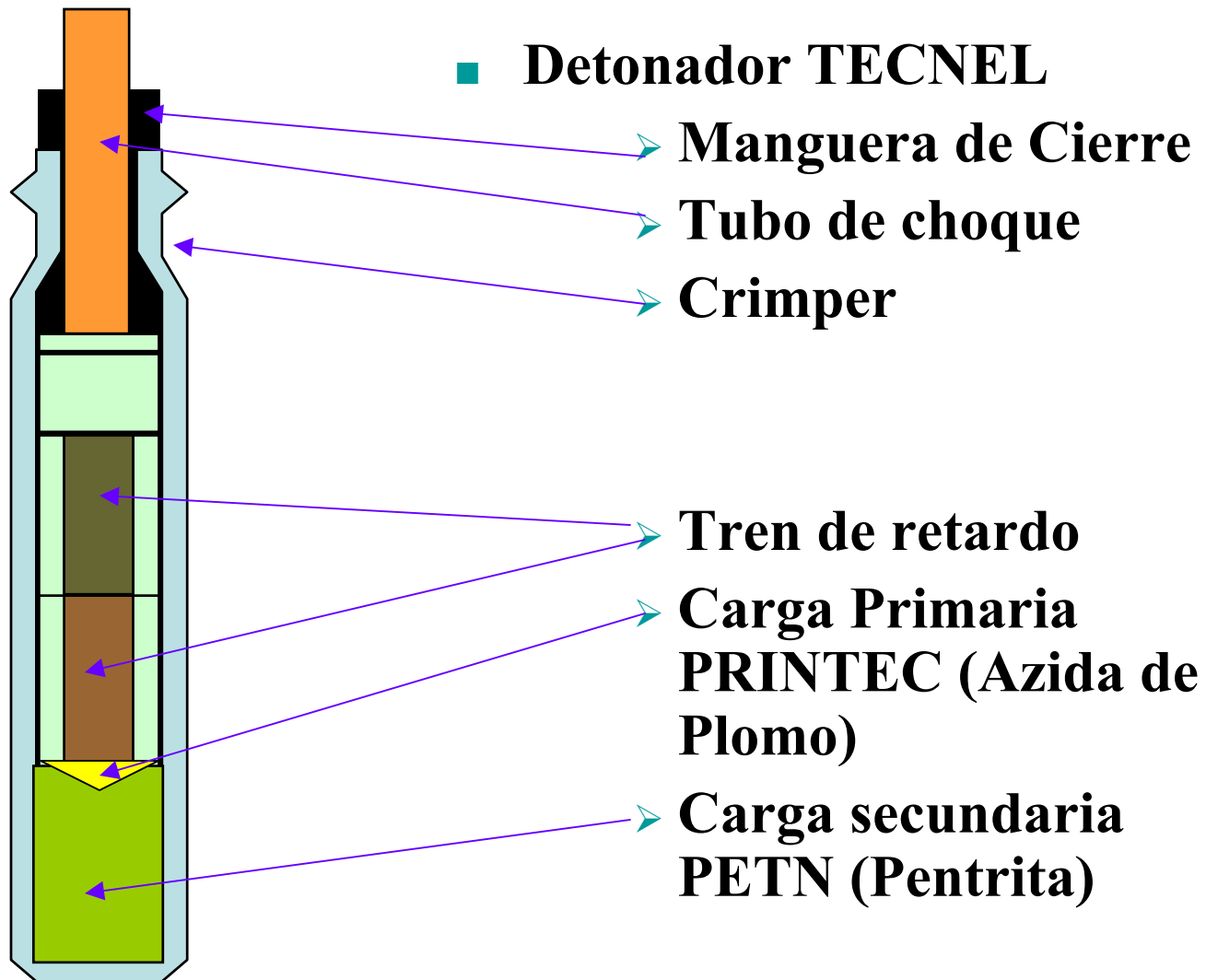
N° DE RETARDO	SERIE MS (Milisegundos)	N° DE RETARDO	SERIE MS (Milisegundos)	N° DE RETARDO	SERIE MS (Milisegundos)
0	4	10	300	20	1100
1	25	11	350	21	1200
2	50	12	400	22	1300
3	75	13	450	23	1400
4	100	14	500	24	1500
5	125	15	600	25	1600
6	150	16	700	26	1700
7	175	17	800	27	1800
8	200	18	900	28	1925
9	250	19	1000	29	2050

SERIE DE RETARDOS

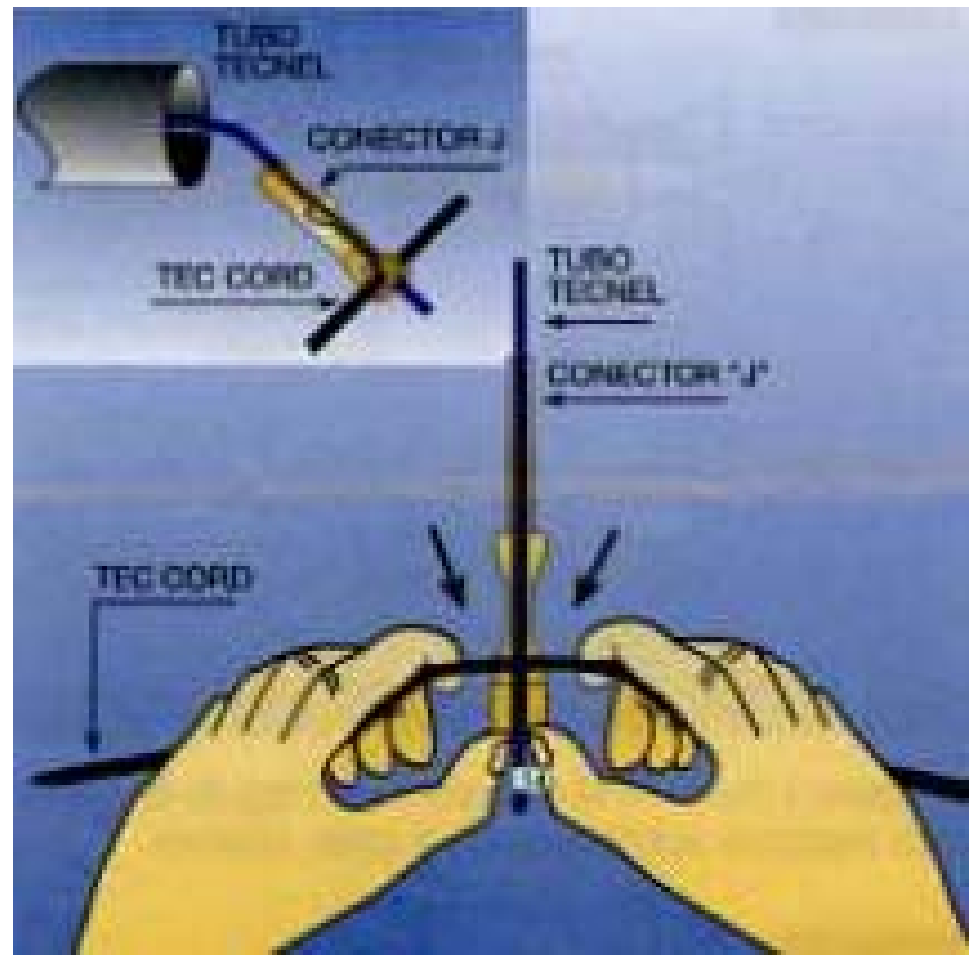
LP

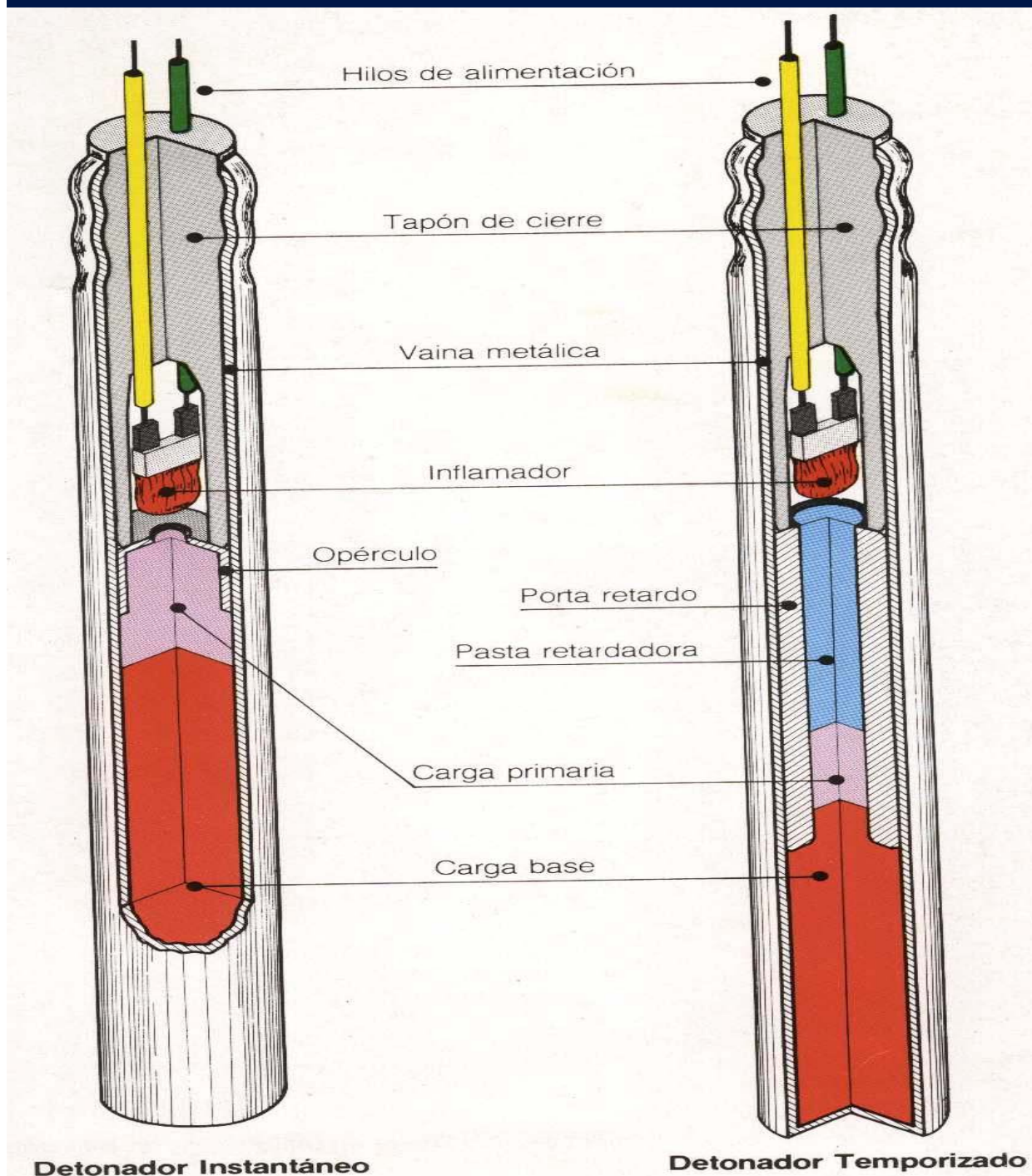
N° DE RETARDO	SERIE LP (Milisegundos)	N° DE RETARDO	SERIE LP (Milisegundos)
0	5	10	4.600
1	200	11	5.500
2	400	12	6.400
3	600	13	7.450
4	1.000	14	8.500
5	1.400	15	9.600
6	1.800	16	10.700
7	2.400		
8	3.000		
9	3.800		

SISTEMA NO-ELECTRICO



USOS DEL TECNEL





INICIACION ELECTRICA

DETONADORES ELECTRICOS

*Inflamador electro
pirotécnico* va
alojado en un
dispositivo
antiestático y
soldado a dos
alambres
conductores.

Carga Primaria:
Nitruro de plomo.

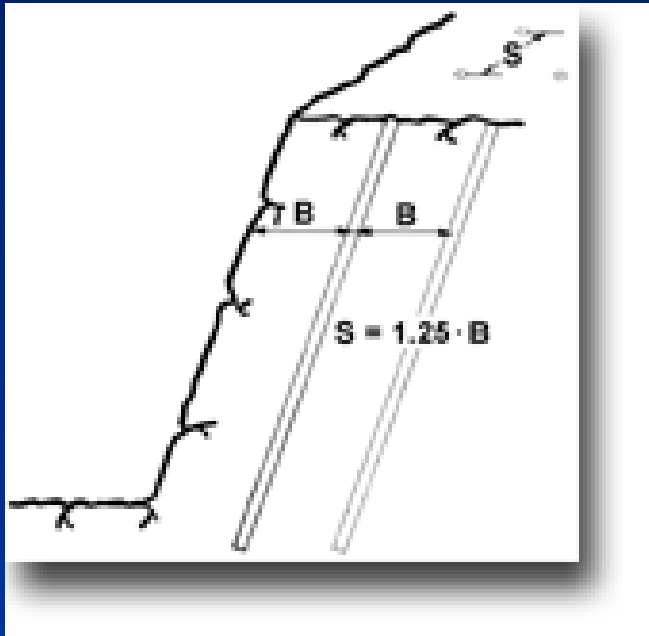
Carga Base:
Pentrita.

PARAMETROS DE VOLADURA

DATOS DEL PROYECTO	
Tipo de roca	Caliza
Densidad de la roca	2,3 g / cm ³
Volumen de roca	10000,0 m ³
PERFORACION	
Diámetro de perforación	3 pulgadas = 7,62 cm = 76,2 mm
EXPLOSIVOS	
Booster pentolita de 450 g	1,6 g / cm ³
Anfo normal	0,88 g / cm ³
ACCESORIOS	
Cordón detonante 5 g	
Fulminantes no eléctricos ms	
Fulminantes N° 8	



BORDO Y ESPACIAMIENTO



✓ **B = BURDEN, BORDO O PIEDRA.**

$$B = 0,012 \left(\left(\frac{2d_x}{d_{ro}} \right) + 1,5 \right) D_e$$

B = m

d_{ex} = Densidad explosivo g/cm³

d_{ro} = Densidad de la roca g/cm³

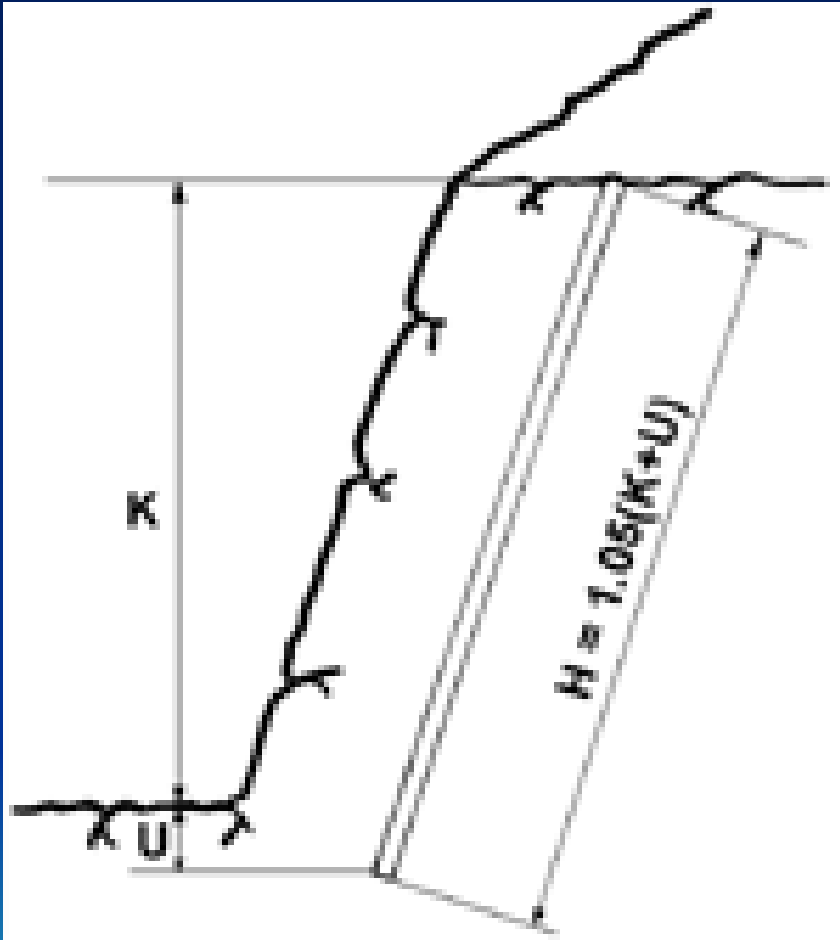
D_e = Diámetro del explosivo (mm)

✓ **S = ESPACIAMIENTO**

$$S = 1,4 \times B$$

Se aplica para bancos altos y con retardos.

LONGITUD DE PERFORACIÓN



- $H = (k + U) / \text{Cos } i$

H = longitud de perforación (m)

K = altura del banco (m)

Se aplica la relación de rigidez óptima en la que:

$$K / B \geq 4$$

$$K = 4 \times B$$

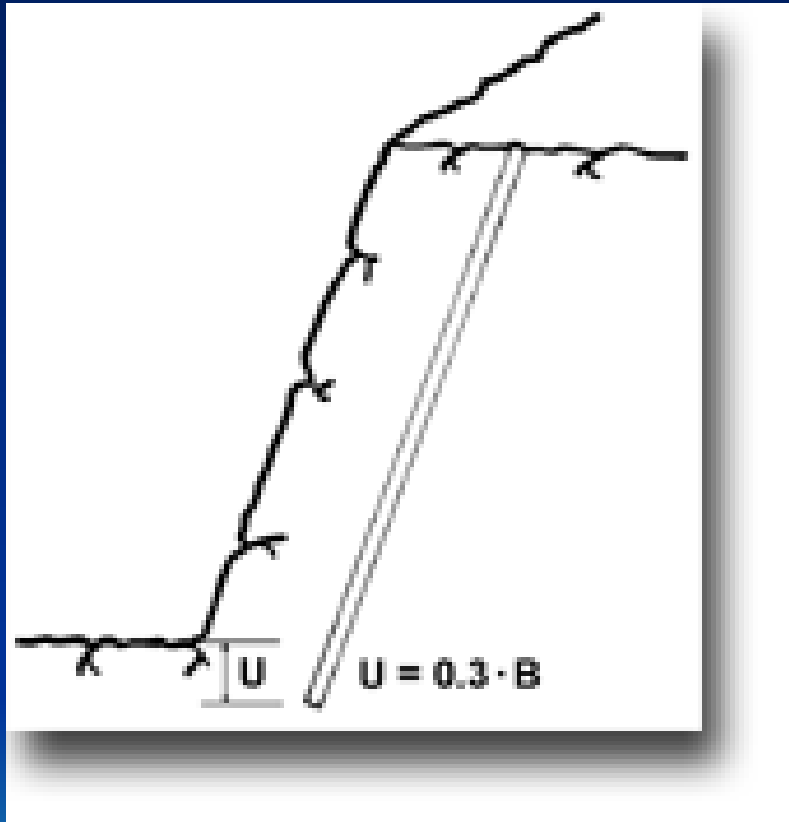
U = Sobre perforación (m)

RELACION DE RIGIDEZ

- Se define como la relación entre la altura del banco y la distancia del bordo.

Relación de Rigidez	1	2	3	4
Fragmentación	Pobre	Regular	Buena	Excelente
Sobrepresión de aire	Severa	Regular	Buena	Excelente
Roca en vuelo	Severa	Regular	Buena	Excelente
Vibración del terreno	Severa	Regular	Buena	Excelente
Comentarios	Rompimiento trasero severo y problemas de piso. No se dispare vuelva a diseñar	Rediseñe si es posible	Buen control y fragmentación	No hay mayores beneficios con el incremento de la relación de rigidez arriba de cuatro

SOBRE-PERFORACION



Es la profundidad a la cual se perfora el barreno por debajo del nivel del piso. Para asegurarse que el rompimiento ocurra a nivel.

$$U = 0,3 \times B$$

U = Sobreperforación (m)

B = Burden (m)

FORMULARIO

PARAMETRO	KONYA		KONYA	TECNICA SUECA	
BORDO	$B = 0,012 \left(\left(\frac{2dx}{dro} \right) + 1,5 \right) De$		$B = 8 \times 10^{-3} De \left[\frac{Prv}{Dro} \right]^{1/3}$ <p>Prv = Potencia relativa en volumen Dro = Densidad de la roca g/ cm3]</p>	B= 45 x De	
ESPACIAMIENTO	$1,4 \times B$ <p>Iniciación retardada y bancos altos</p>	$\frac{L + 2 B}{3}$ <p>Iniciación instantánea y bancos bajos</p>	$2B$ <p>Iniciación instantánea y bancos altos</p>	$\frac{L + 7 B}{8}$ <p>Iniciación retardada y bancos bajos</p>	1,25 x B
SOBRE BARRENACION	0,3 x B		Los barrenos por lo general no rompen la profundidad total, por lo que es necesario perforar mas allá del nivel del piso o cota a la cual se quiere llegar.	0,3 x B	

FORMULARIO

PARAMETRO	KONYA		TECNICA SUECA
MODULO DE RIGIDEZ	H / B		
LONG. TACO	0,7 x B	<p>El taco es un material inerte y sirve para el confinamiento de los gases de la explosión, controla la sobrepresión y la roca en vuelo. Si las distancias de los tacos son excesivas , se obtendrá una fragmentación muy pobre en la parte superior del banco y el rompimiento posterior a la última fila se incrementará.</p> <p>La longitud del taco es igual a la longitud del Bordo solamente cuando se utiliza polvo muy fino como material de retacado.</p>	B
Material del Taco	De (mm) ----- 20	<p>El material más común utilizado para el taco son las astillas de la perforación, sin embargo este material no es recomendado puesto que el polvo de barrenación muy fino no se mantendrá en el barreno durante la detonación. En cambio el material muy grueso tiene la tendencia a dejar huecos de aire que también pueden ser expulsados fácilmente.</p>	

CONCENTRACIÓN LINEAL DE CARGA

$$Qbk = 0,078539 \times d \times De^2$$

Qbk = Concentración de carga (kg / m)

d = densidad del explosivo (gr/cm³)

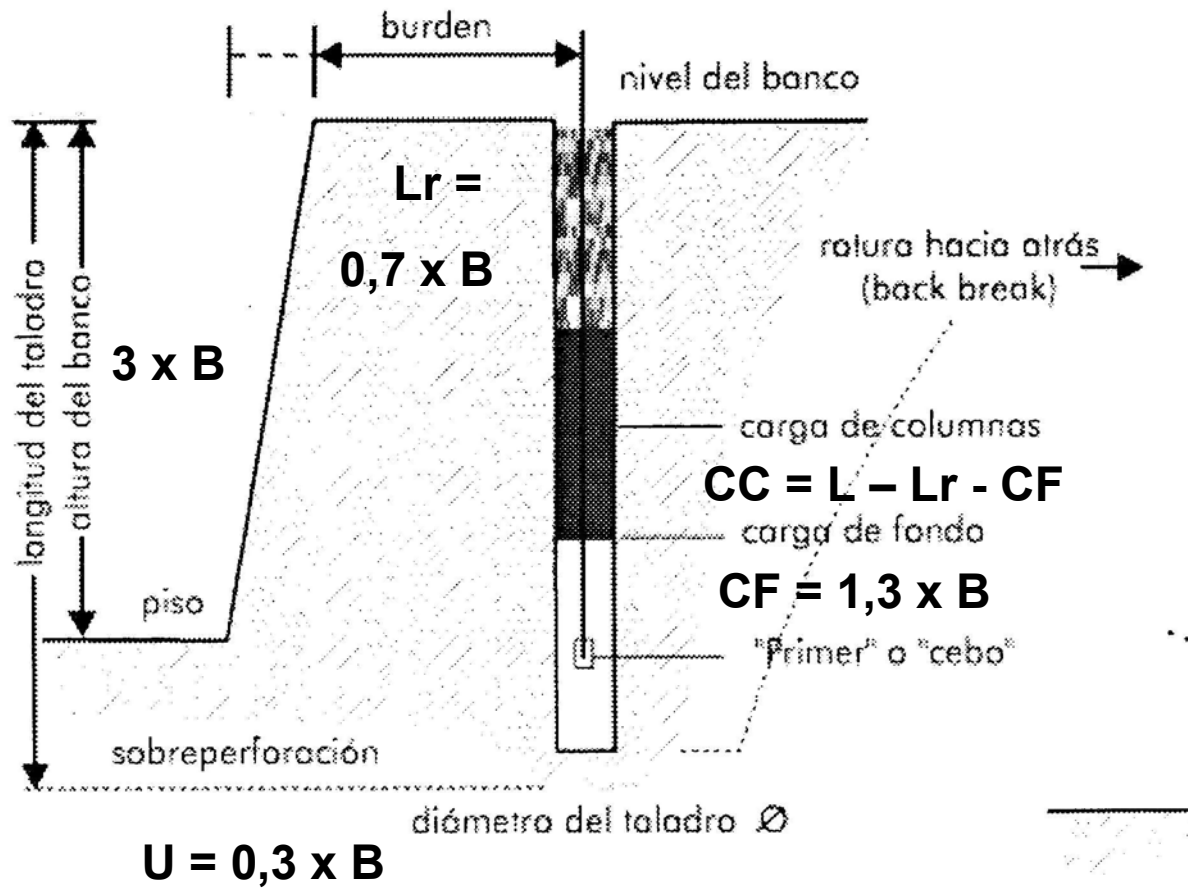
De = diámetro del explosivo (cm)



CONCENTRACION LINEAL DE CARGA (kg/m)

Diámetro barreno			Anfo normal	Anfo Al	Emulsen 910	Emulsen 720	Emulgrel 3000	Nuevo Explogel III	Explogel I	Explogel Amon	unidades
Pulgadas	mm	cm	0,88	0,89	1,17	1,17	1,21	1,33	1,37	1,39	gr/cm ³
1	25,40	2,54	0,45	0,45	0,59	0,59	0,61	0,67	0,69	0,70	kg/m
2	50,80	5,08	1,78	1,80	2,37	2,37	2,45	2,70	2,78	2,82	kg/m
3	76,20	7,62	4,01	4,06	5,34	5,34	5,52	6,07	6,25	6,34	kg/m
4	101,60	10,16	7,13	7,22	9,49	9,49	9,81	10,78	11,11	11,27	kg/m
5	127,00	12,70	11,15	11,27	14,82	14,82	15,33	16,85	17,35	17,61	kg/m
6	152,40	15,24	16,05	16,23	21,34	21,34	22,07	24,26	24,99	25,36	kg/m
7	177,80	17,78	21,85	22,10	29,05	29,05	30,04	33,02	34,02	34,51	kg/m
8	203,20	20,32	28,54	28,86	37,94	37,94	39,24	43,13	44,43	45,08	kg/m
8 1/8	206,38	20,64	29,44	29,77	39,14	39,14	40,48	44,49	45,83	46,50	kg/m
8 1/4	209,55	20,96	30,35	30,69	40,35	40,35	41,73	45,87	47,25	47,94	kg/m
8 3/8	212,73	21,27	31,28	31,63	41,58	41,58	43,00	47,27	48,69	49,40	kg/m

ESQUEMA DE CARGA



Tiempos de retardo

–*Diseño básico de Tiempos de Retardo:*

- Selección de retardos :
 - Retardo entre filas
 - Retardo entre pozos

RETARDOS DE BARRENO A BARRENO

$$t_h = T_h \times S$$

t_h = Retardo barreno a barreno (ms)

T_h = Constante de retardo barreno a barreno

S = Espaciamiento (m)

Roca	Constante T_h (ms/m)
Arenas, margas, Carbón	6,5
Algunas calizas y esquistos	5,5
Calizas compactas y mármoles, algunos granitos y basaltos, cuarcita y algunas gneis.	4,5
Feldespato porfíricos, gneis compactos y mica, magnetitas.	3,5

CALCULO DE RETARDO ENTRE FILAS

$$t_R = T_R \times B$$

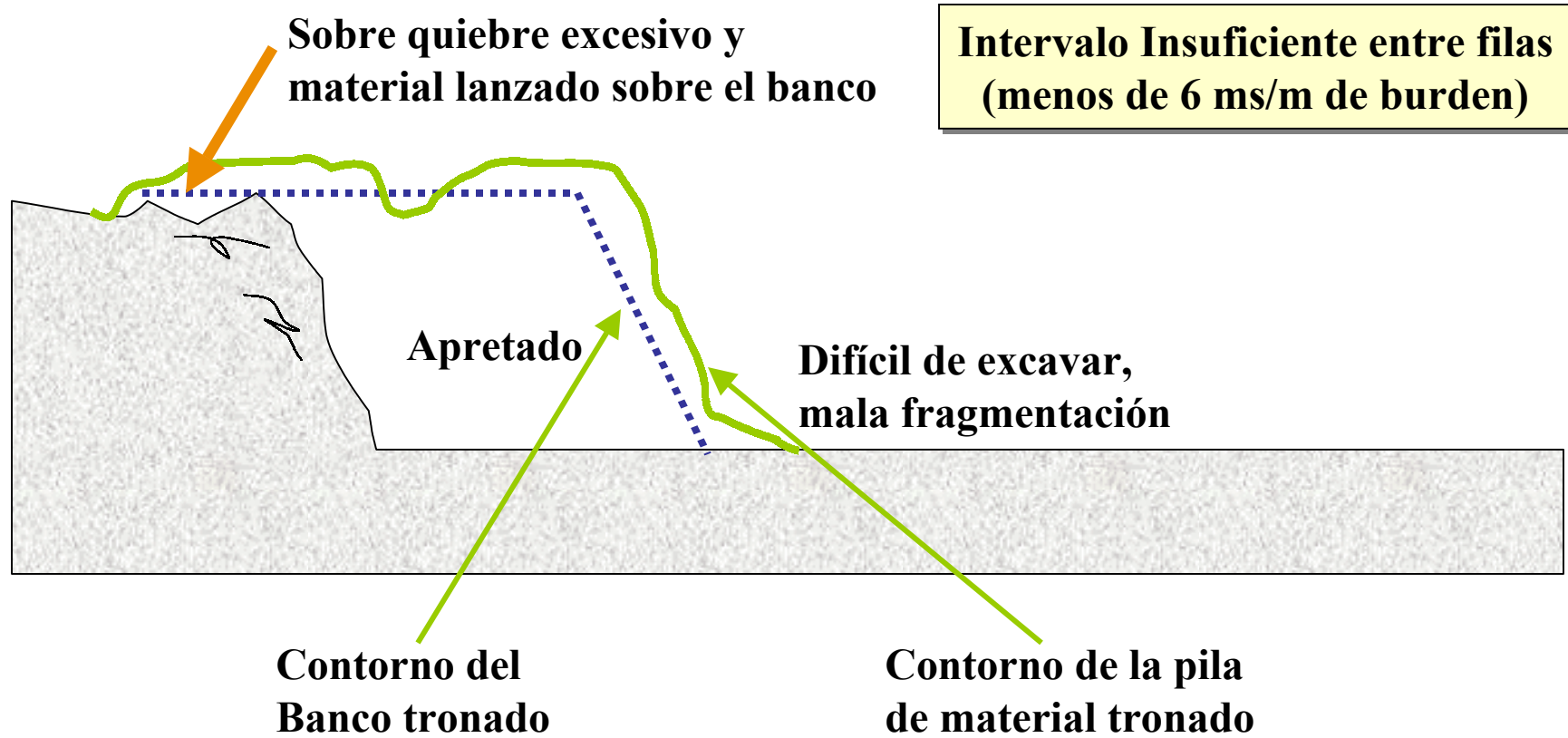
t_R = Retardo entre filas (ms)

T_R = Factor de tiempo entre filas (ms / m)

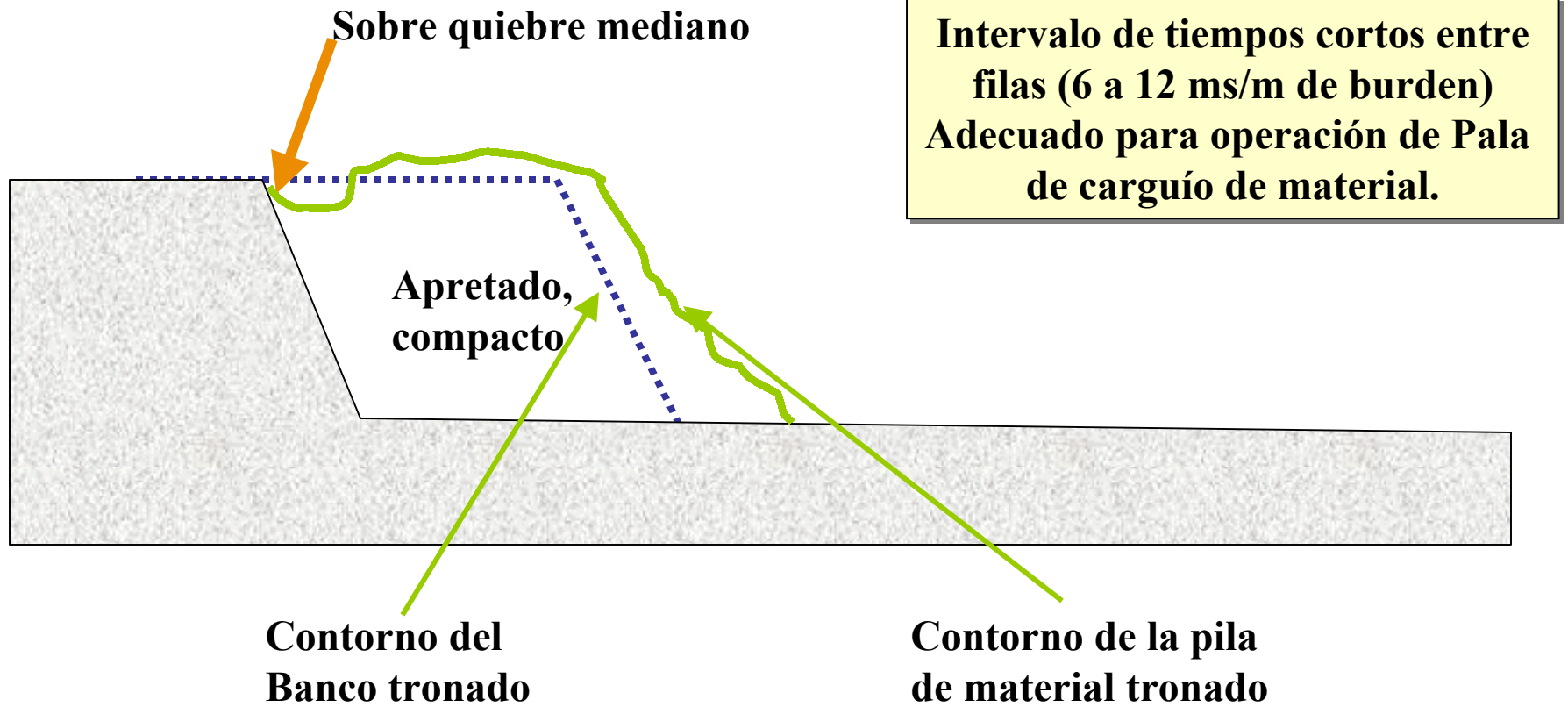
B = Bordo (m)

Constante T_R (ms/m)	Resultado
6,5	Violencia, sobrepresión de aire excesiva, rompimiento trasero, etc.
8,0	Pila de material alta cercana a la cara sobrepresión y rompimiento moderados.
11,5	Altura de pila promedio, sobrepresión y rompimiento promedio.
16,5	Pila de material disperso con rompimiento trasero mínimo.

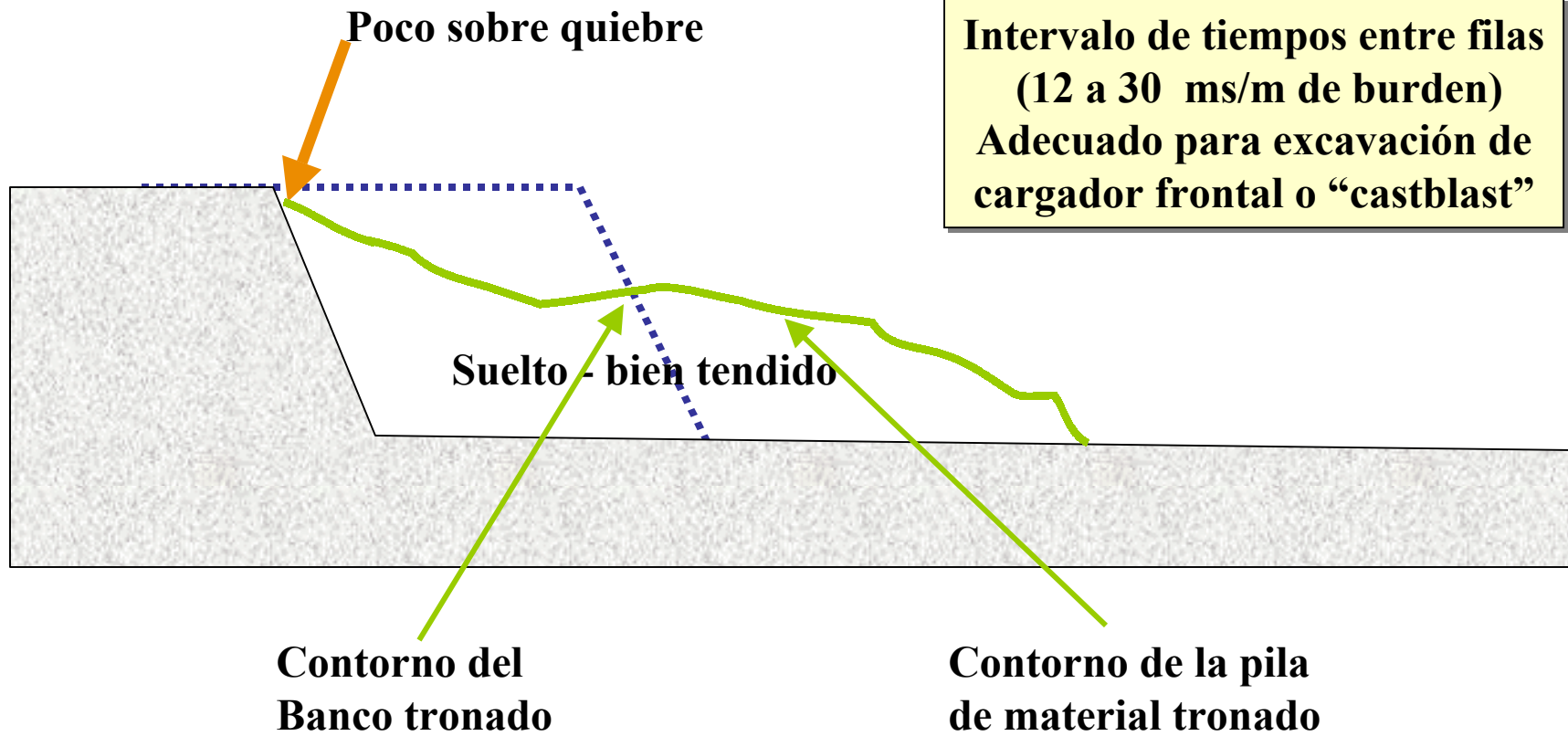
Tiempos de retardo

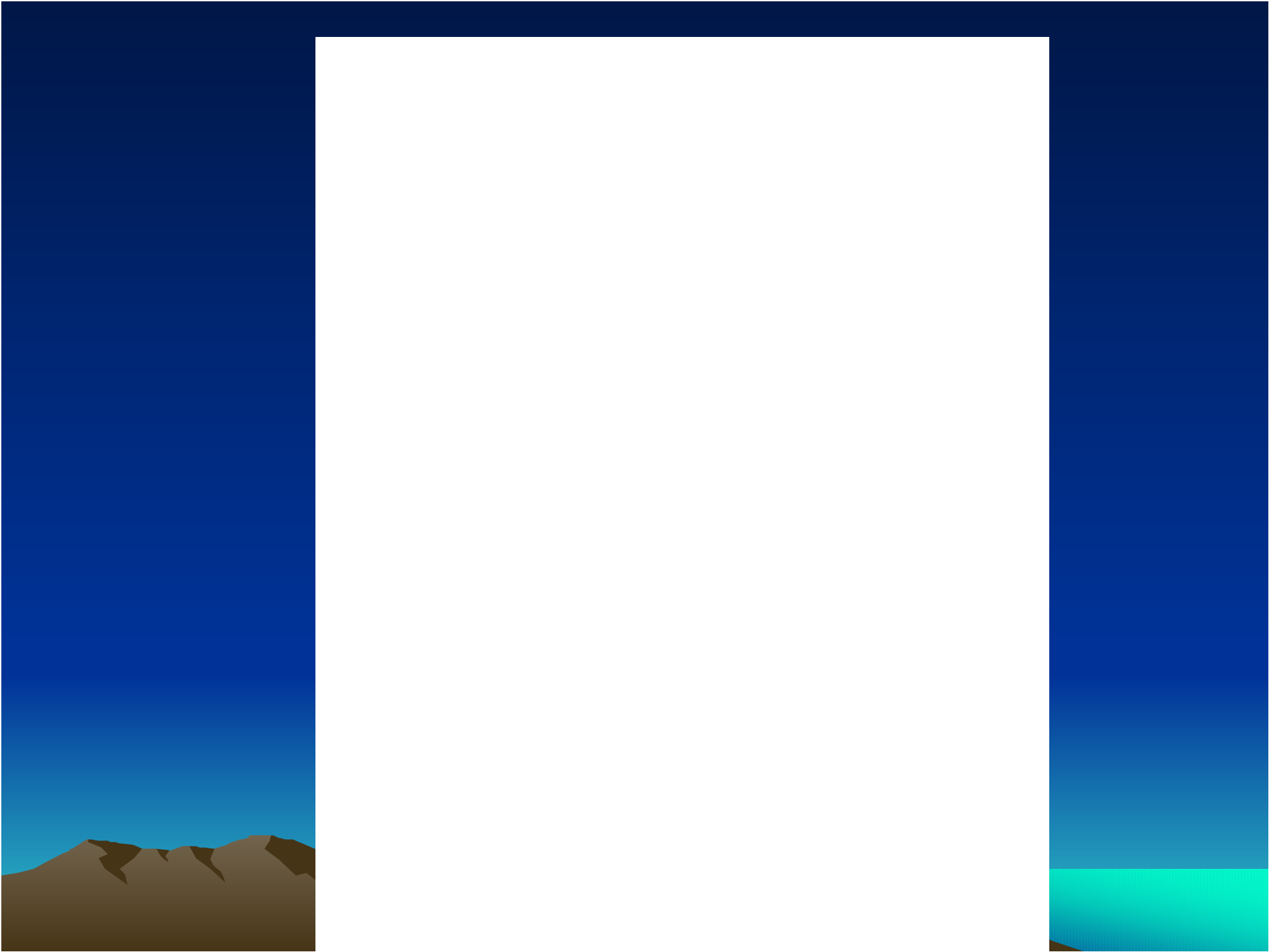


Tiempos de retardo



Tiempos de retardo









PM 3:30:59