RESISTENCIA DE MACIZOS ROCOSOS Y TENSIONES QUE SE DESARROLLAN ALREDEDOR DE UNA EXCAVACIÓN

Profesora Norly Belandria
Grupo de Investigación en Geología Aplicada (GIGA)
Facultad de Ingeniería, Escuela de Geológica
Departamento Geomecánica

TENSIONES EN TORNO A EXCAVACIONES

A la hora de plantear la construcción de un túnel, necesitamos conocer el estado de tensiones al que se encuentra sometido el terreno objeto de la excavación. Hemos de tener en cuenta que la construcción de un túnel, modifica el estado de tensiones, de manera que se genera un desequilibrio en el momento de abrir la excavación y que dicho desequilibrio puede provocar que el terreno colapse entorno al túnel.

Profesora Norly Belandria
Grupo de Investigación en Geología Aplicada (GIGA)
Facultad de Ingeniería, Escuela de Geológica
Departamento Geomecánica

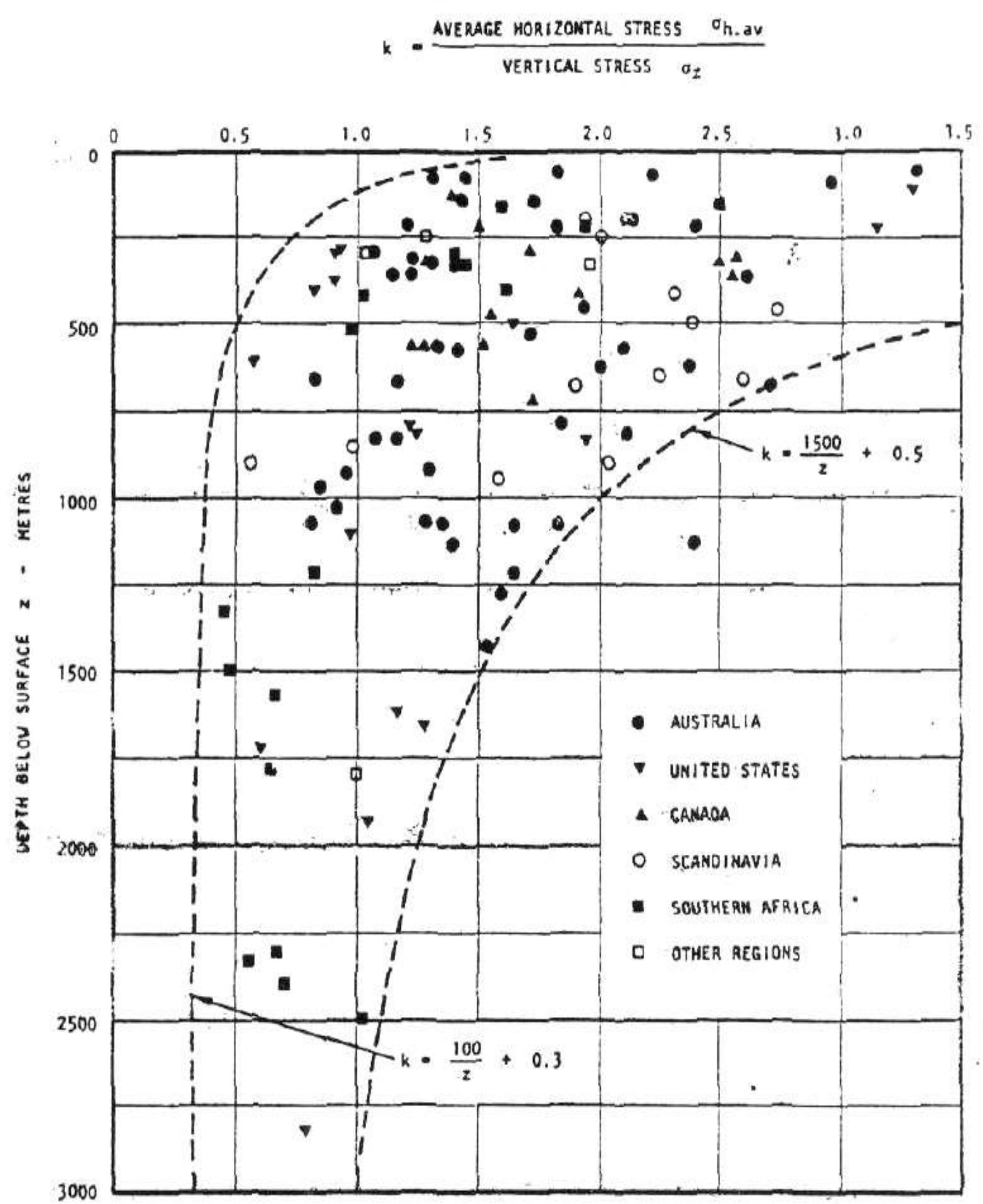
ESTADO DE TENSIONES NATURALES:

$$\frac{\sigma_h}{\sigma_v} = \left(\frac{v}{1-v} \right)$$

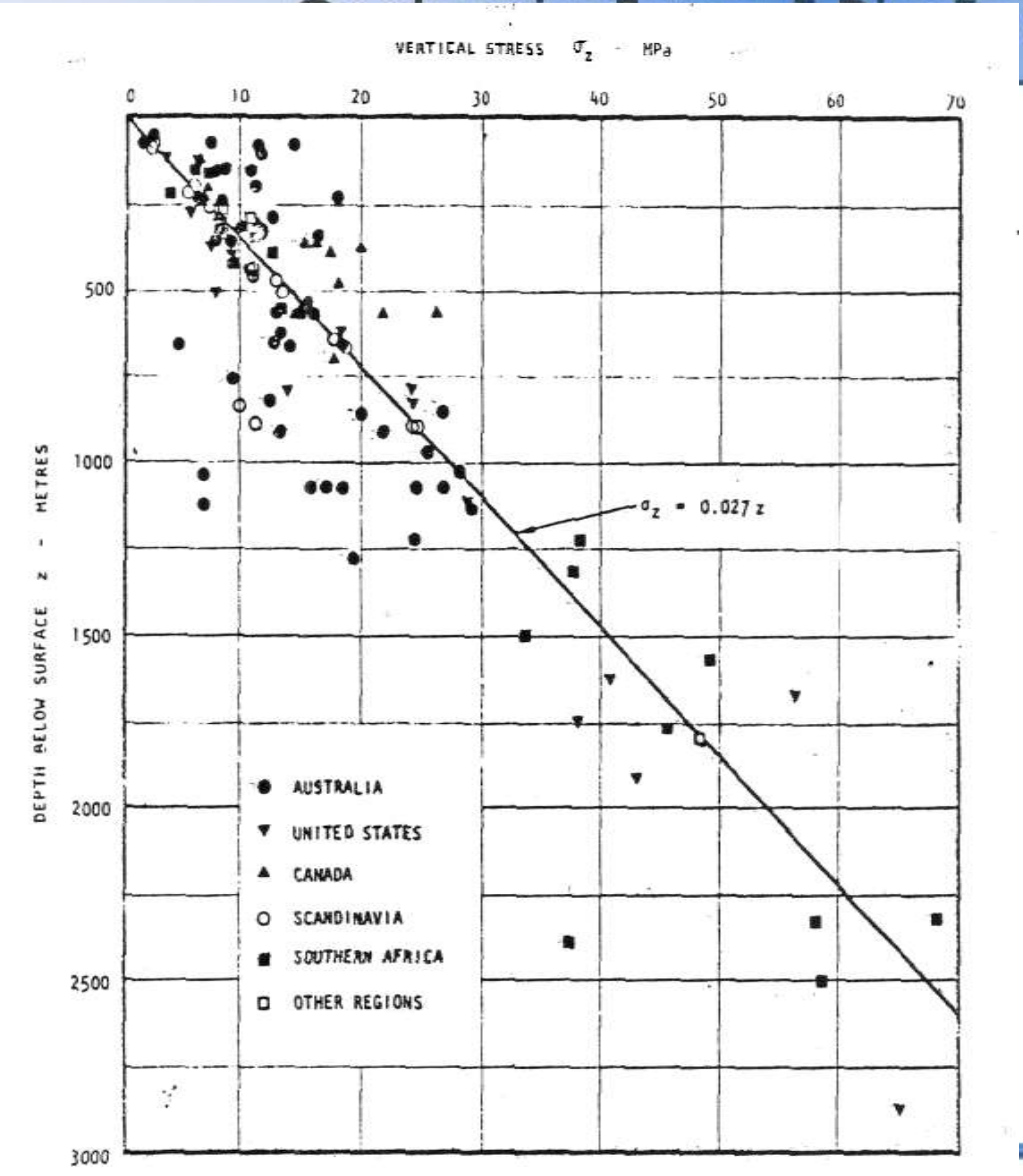
$$\sigma_h = K_o \sigma_v$$

el coeficiente K (que nos permite hallar σh a partir de σv) es notablemente mayor en zonas someras (< 500 m) que en zonas profundas.
En las primeras, K puede oscilar desde algo menos de la unidad hasta 3 o 3.5 veces (hecho que sorprende para rocas).

Por otro lado, dicha figura ratifica el hecho de que al incrementarse la profundidad el rango de valores que puede adquirir K se estrecha reduciéndose a valores que se mueven entre 0.5 y 1. (estado de tensiones hidrostático).



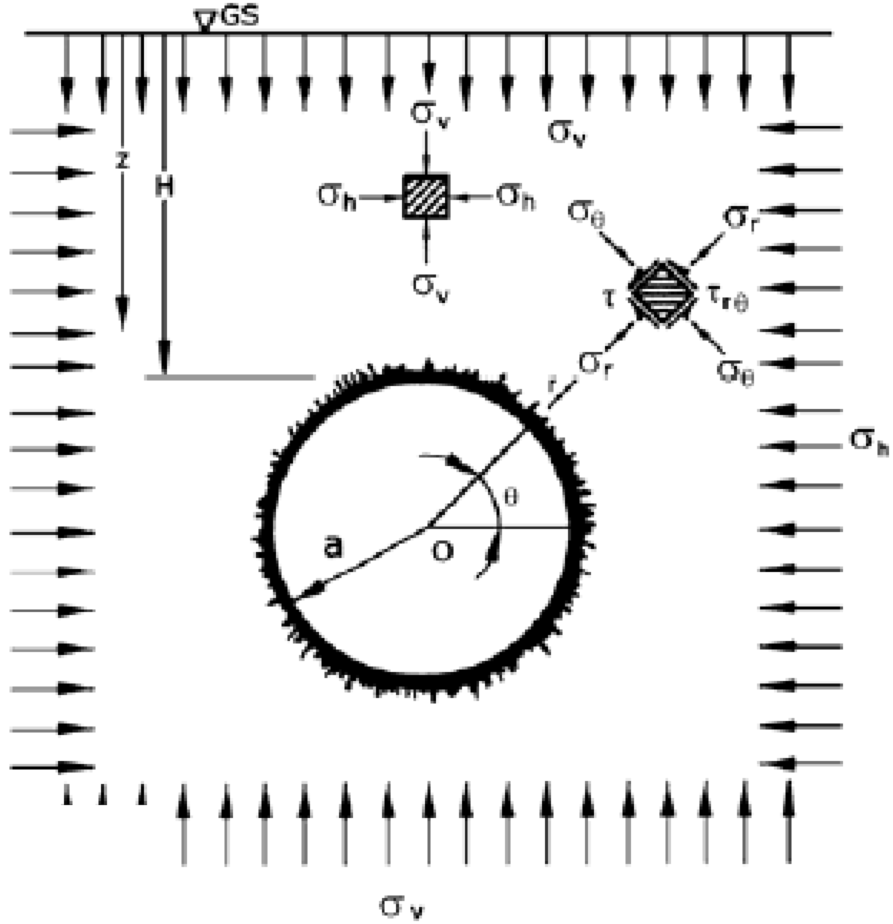
Variación de K con la profundidad (Hoek & Brown)



Tensión vertical frente a profundidad (Hoek & Brown)

Distribución de tensiones sobre una excavación circular subterránea en un medio elástico.

El problema de hallar el estado de tensiones entorno a una cavidad abierta de forma artificial como es un túnel, ha hecho que sean numerosos los autores interesados en encontrar soluciones ha dicho problema. De todas las posibilidades que presenta este reto, la más sencilla de todas, y que simplifica enormemente los cálculos es la de resolver este problema analíticamente suponiendo medio elástico e isótropo, túnel profundo, de sección circular y en deformación plana.



$\sigma_h = K \cdot \sigma_v$

σ_r = Tensión radial.

σ_θ = Tensión tangencial.

$\tau_{r\theta}$ = Tensión de corte.

a = R = Radio de la cavidad subterránea.

(r, θ) = Coordenadas polares.

r = Distancia radial desde el centro de la excavación.

θ = Ángulo que forma el radio vector con la horizontal.

Distribución de tensiones sobre una excavación circular subterránea en un medio elástico.

$$\sigma_r = \frac{1}{2}(\sigma_v + \sigma_h)\left(1 - \frac{a^2}{r^2}\right) - \frac{1}{2}(\sigma_v - \sigma_h)\left(1 - \frac{4a^2}{r^2} + \frac{3a^4}{r^4}\right)\cos 2\theta$$

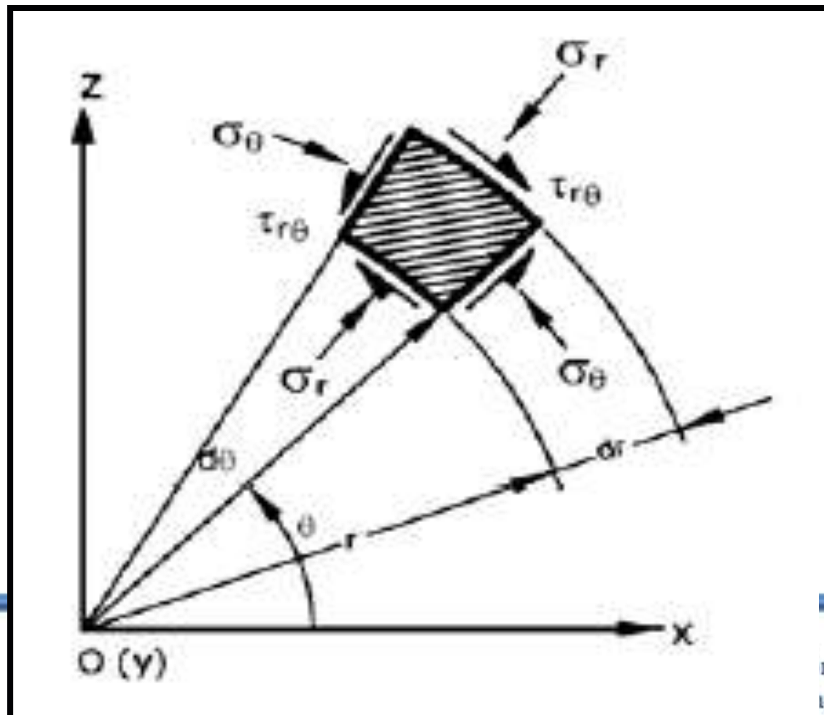
$$\sigma_\theta = \frac{1}{2}(\sigma_v + \sigma_h)\left(1 + \frac{a^2}{r^2}\right) + \frac{1}{2}(\sigma_v - \sigma_h)\left(1 + \frac{3a^4}{r^4}\right)\cos 2\theta$$

$$\tau_{r\theta} = \frac{1}{2}(\sigma_v - \sigma_h)\left(1 + \frac{2a^2}{r^2} - \frac{3a^4}{r^4}\right) sen 2\theta$$

Para:

$$\boxed{\sigma_h = K\sigma_v}$$

$$\begin{cases} \sigma_r = \dfrac{\sigma_v}{2}\left[\left(1+K\right)\left(1-\dfrac{a^2}{r^2}\right)-\left(1-K\right)\left(1-4\dfrac{a^2}{r^2}+\dfrac{3a^4}{r^4}\right)\cos 2\theta\right] \\ \sigma_\theta = \dfrac{\sigma_v}{2}\left[\left(1+K\right)\left(1+\dfrac{a^2}{r^2}\right)+\left(1-K\right)\left(1+\dfrac{3a^4}{r^4}\right)\cos 2\theta\right] \\ \tau_{r\theta} = \dfrac{\sigma_v}{2}\left[\left(1-K\right)\left(1+\dfrac{2a^2}{r^2}-\dfrac{3a^4}{r^4}\right)\operatorname{sen} 2\theta\right] \end{cases}$$



Profesora Norly Belandria
en Geología Aplicada (GIGA)
enieria, Escuela de Geológica
Departamento Geomecánica

Si r = a; (En la periferia de la excavación)

$$\sigma_r = 0$$

$$\tau_{r\theta} = 0$$

$$\boxed{\sigma_\theta = \sigma_v\left[(1+K)+(2-2K)\cos 2\theta\right]}$$

Para θ = 0º cos(0º)=1

$$\boxed{\sigma_{\theta(hastial)} = (3-K)\sigma_v}$$

Para θ = 90º cos(180º)= -1

$$\boxed{\sigma_{\theta(clave)} = (3K-1)\sigma_v}$$

Hoek y Brown proponen las siguiente ecuación:

$$\sigma_{\theta(hastial)} = (B-K)\sigma_v \qquad K = \frac{\sigma_v}{\sigma_h} \quad (coeficiente\ de\ reparto\ de\ tensiones)$$

$$\sigma_{\theta(clave)} = (A \cdot K - 1)\sigma_v$$

Profesora Norly Belandria
Grupo de Investigación en Geología Aplicada (GIGA)
Facultad de Ingeniería, Escuela de Geológica
Departamento Geomecánica

Para **K = 1**, y **r = a**

(periferia de la excavación)

$$\sigma_\theta = 2\sigma_v$$ (esfuerzo principal mayor en clave y hastiales)

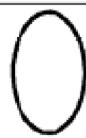
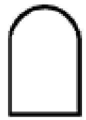
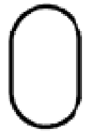
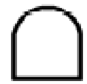
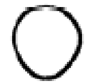
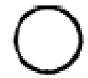
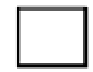
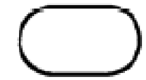
$$\sigma_r = 0$$ (esfuerzo principal mayor)

$$\tau_{r\theta} = 0$$

El valor de K que hace que la tensión circunferencial sea nula y por tanto, que marca el límite entre las tensiones de tracción y compresión. Ese valor no es otro que K = 1/3.
De esta manera se deduce que:

- Si K > 0.33 entonces: σ_θ siempre será de compresión en todo el contorno
- Si K < 0.33 aparecen tracciones.

Valores de las constantes A y B para distintas geometrías de la excavación.

VALORES DE LAS CONSTANTES A Y B									
									
A	5,0	4,0	3,9	3,2	3,1	3,0	2,0	1,9	1,8
B	2,0	1,5	1,8	2,3	2,7	3,0	5,0	1,9	3,9

σ_v = TENSIÓN VERTICAL DEBIDA AL PESO DE LA COLUMNA DE ROCA

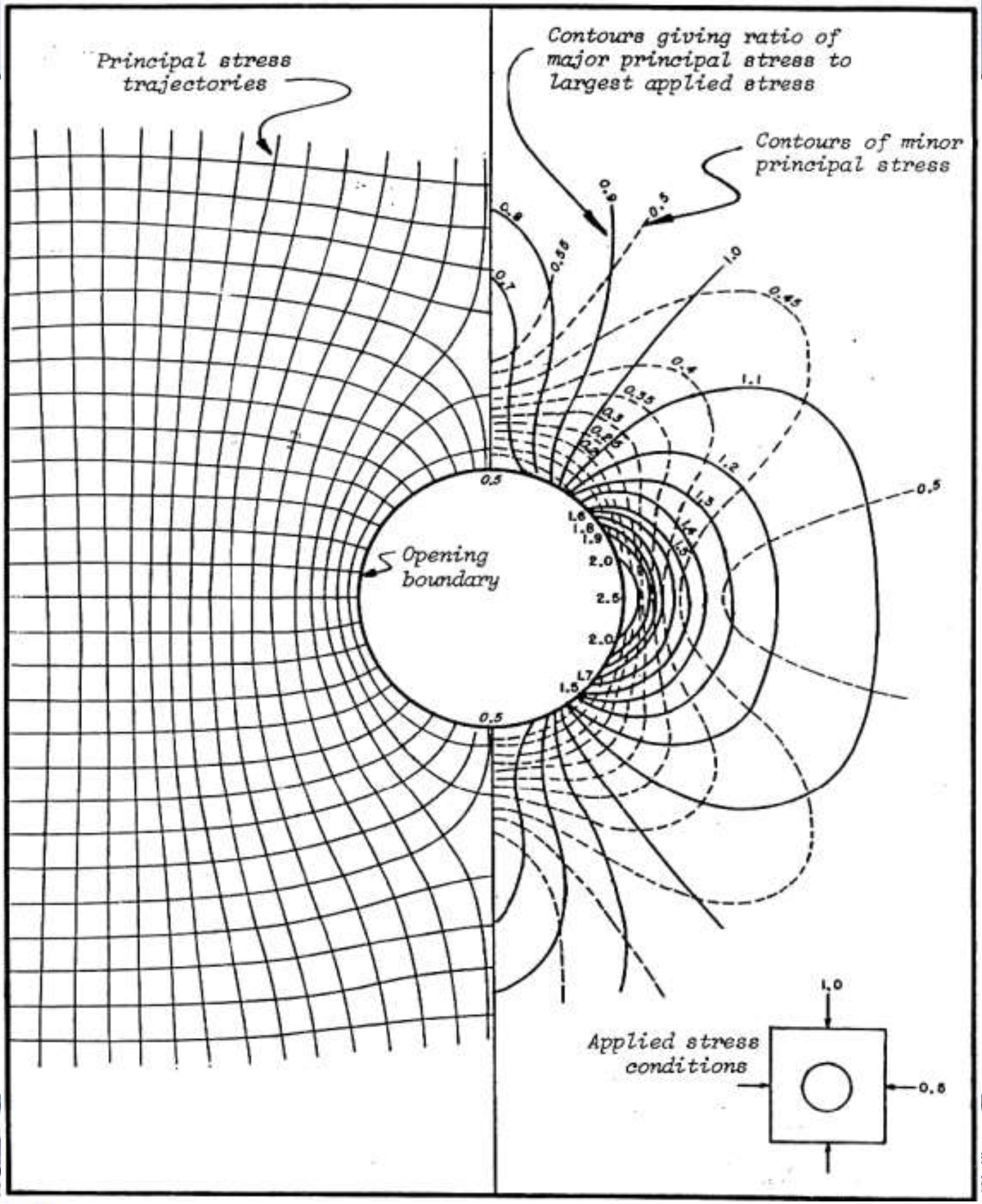
σ_h = TENSIÓN HORIZONTAL

σ_θ (CLAVE) = TENSIÓN TANGENCIAL = $(A \cdot K - 1)\ \sigma_v$

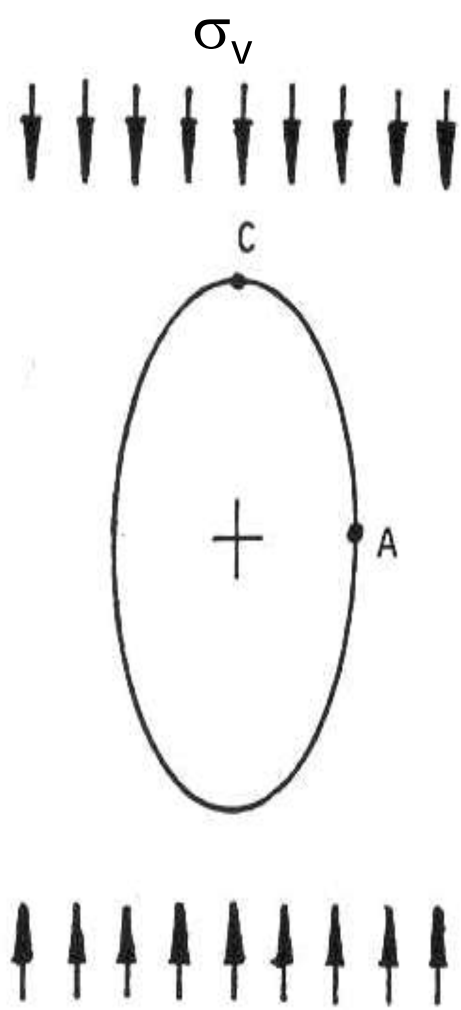
σ_θ (HASTIAL) = $(B - K)\ \sigma_v$

$K = \dfrac{\sigma_h}{\sigma_v}$ = COEFICIENTE DE REPARTO DE TENSIONES

En los ejemplos que se exponen a continuación, se puede apreciar para el caso elástico cómo mejoran o empeoran los estados de tensiones al adaptar la geometría del túnel.



Estado de tensiones principales y líneas de corriente entorno a una cavidad circular excavada en medio elástico para K = 0,5. Las líneas de trazo continuo representan las tensiones principales mayores y las de trazo discontinuo las menores (Hoek & Brown)



<u>Geometría elipse eje ppal mayor en el eje vertical:</u>

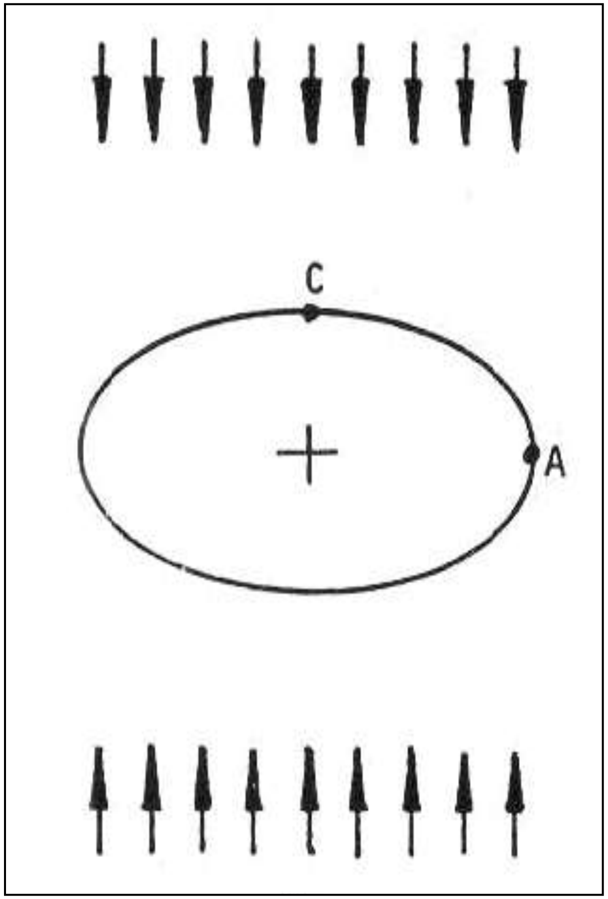
Para K=0;

$\sigma_c = \sigma_\theta$ (clave) = - σ_v
$\sigma_A = \sigma_\theta$ (hastíales) = $2\sigma_v$

<u>Para geometría circular:</u>

K=0
$\sigma_c = \sigma_\theta$ (clave) = - σ_v
$\sigma_A = \sigma_\theta$ (hastíales) = $3\sigma_v$

σ_v



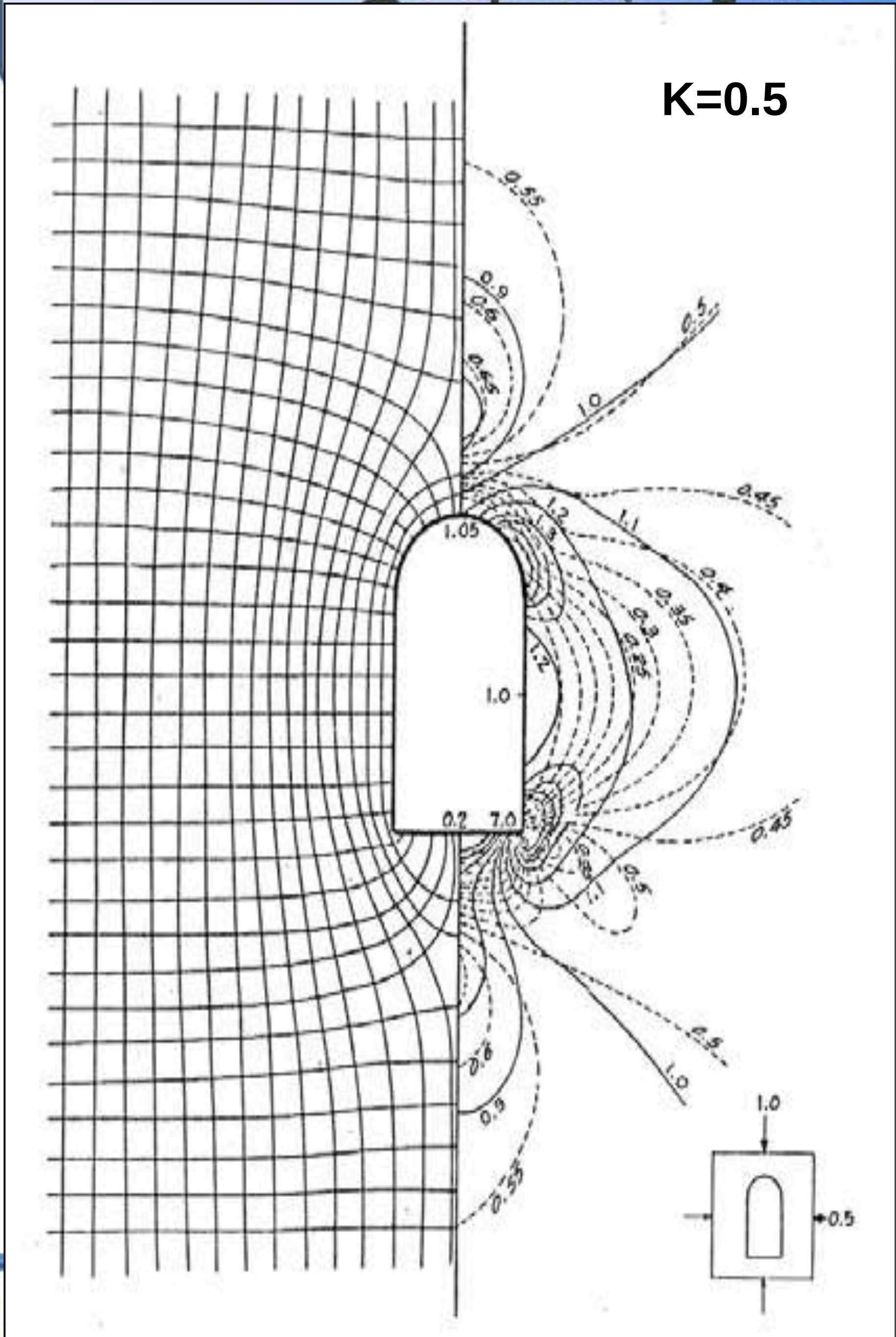
Geometría elipse eje ppal mayor en el eje horizontal:

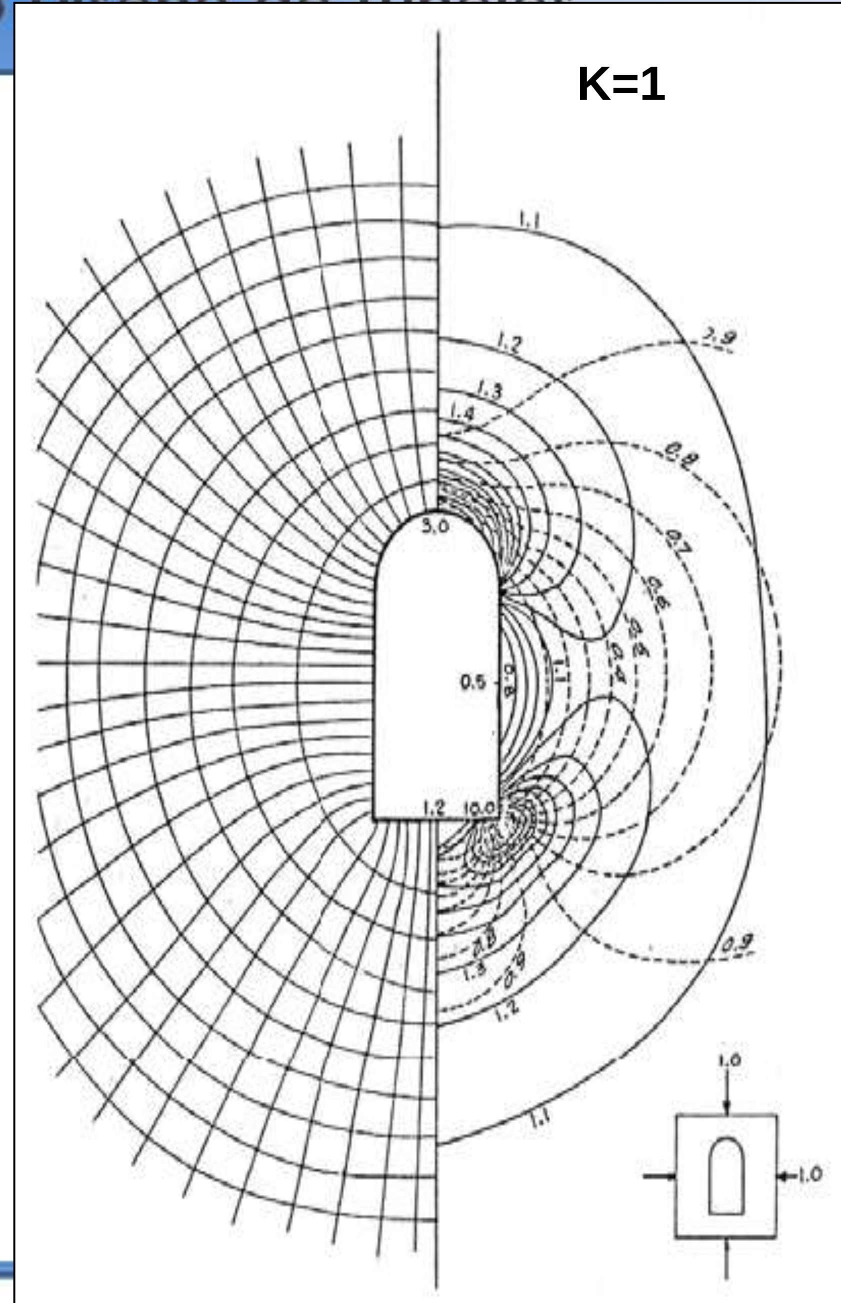
$\sigma_c = \sigma_\theta$ (clave) = - σ_v
$\sigma_A = \sigma_\theta$ (hastíales) = $2\sigma_v$

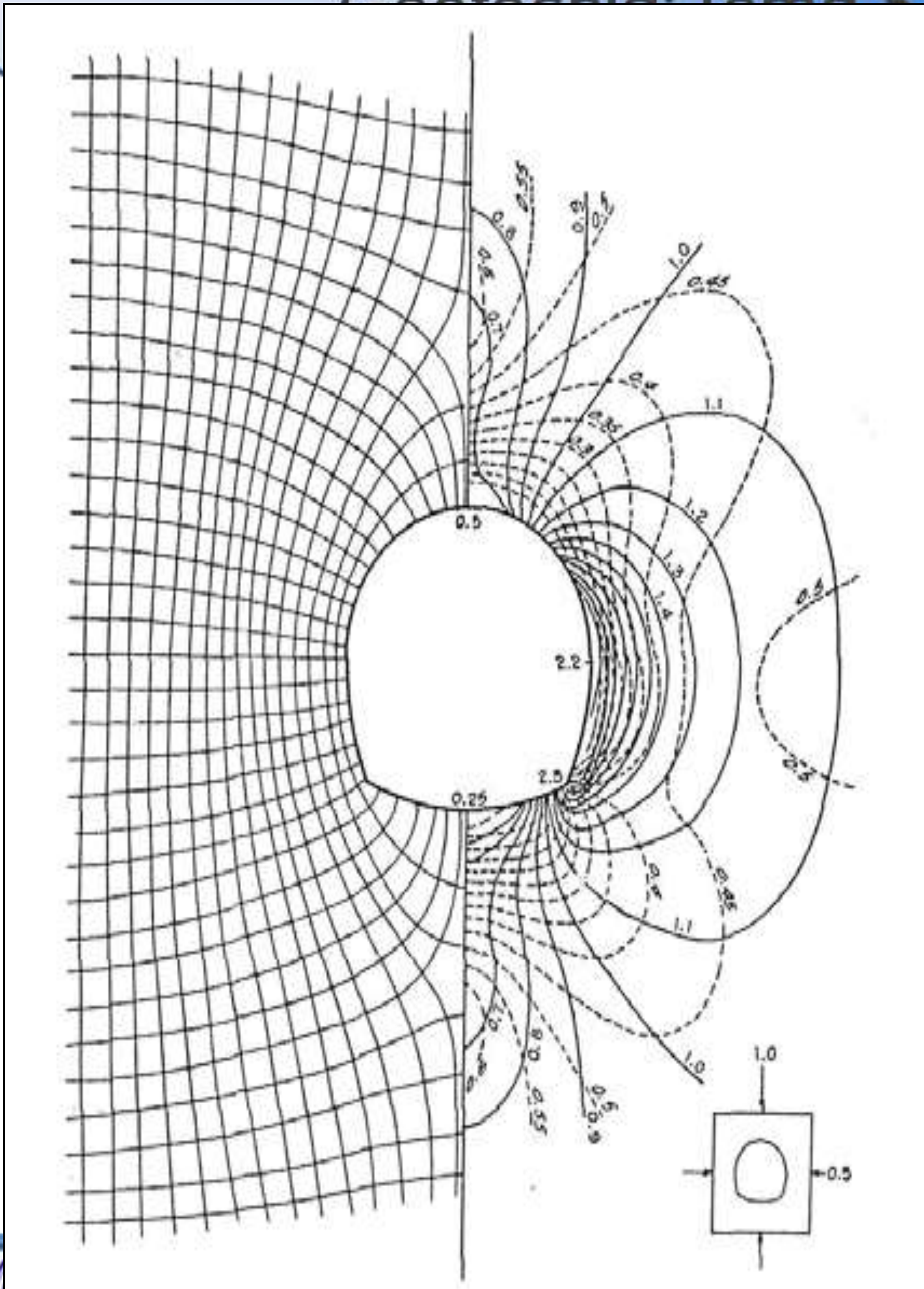
Para geometría circular:

K=0
$\sigma_c = \sigma_\theta$ (clave) = - σ_v
$\sigma_A = \sigma_\theta$ (hastíales) = $3\sigma_v$

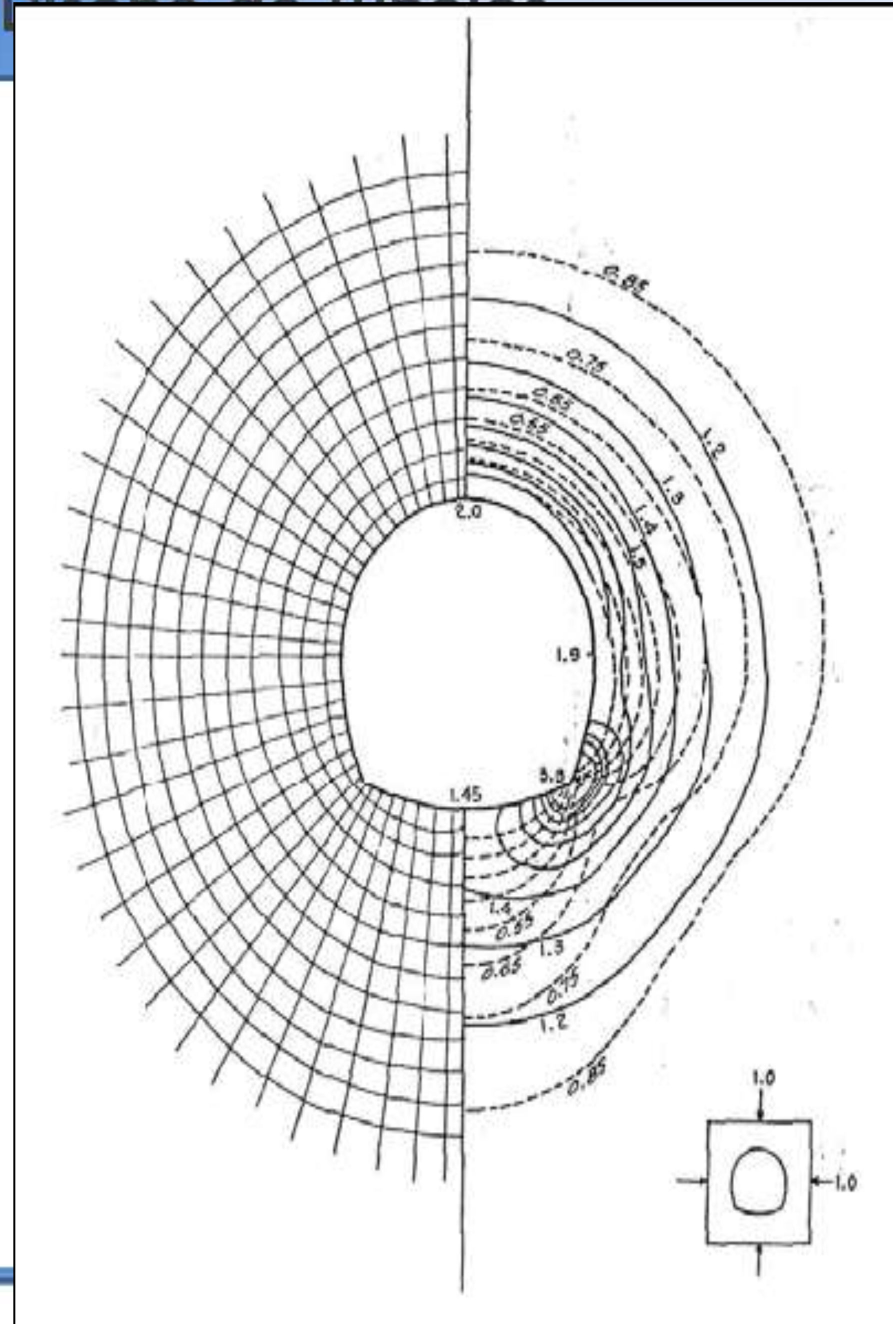
Profesora Norly Belandria
Grupo de Investigación en Geología Aplicada (GIGA)
Facultad de Ingeniería, Escuela de Geológica
Departamento Geomecánica


K=0.5
1.05
1.0
0.2
7.0
1.0
0.5


K=1
3.0
0.5
1.2
10.0
1.0
1.0

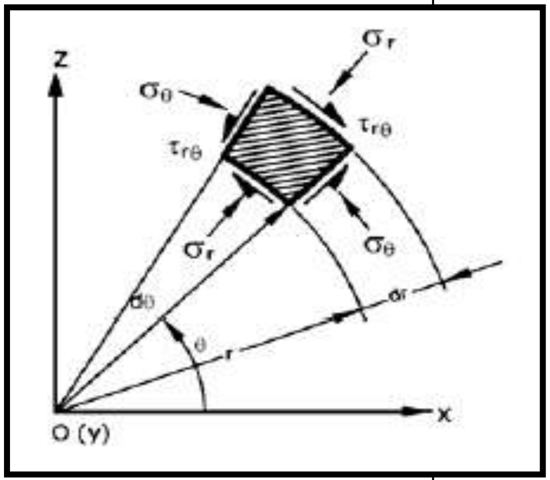


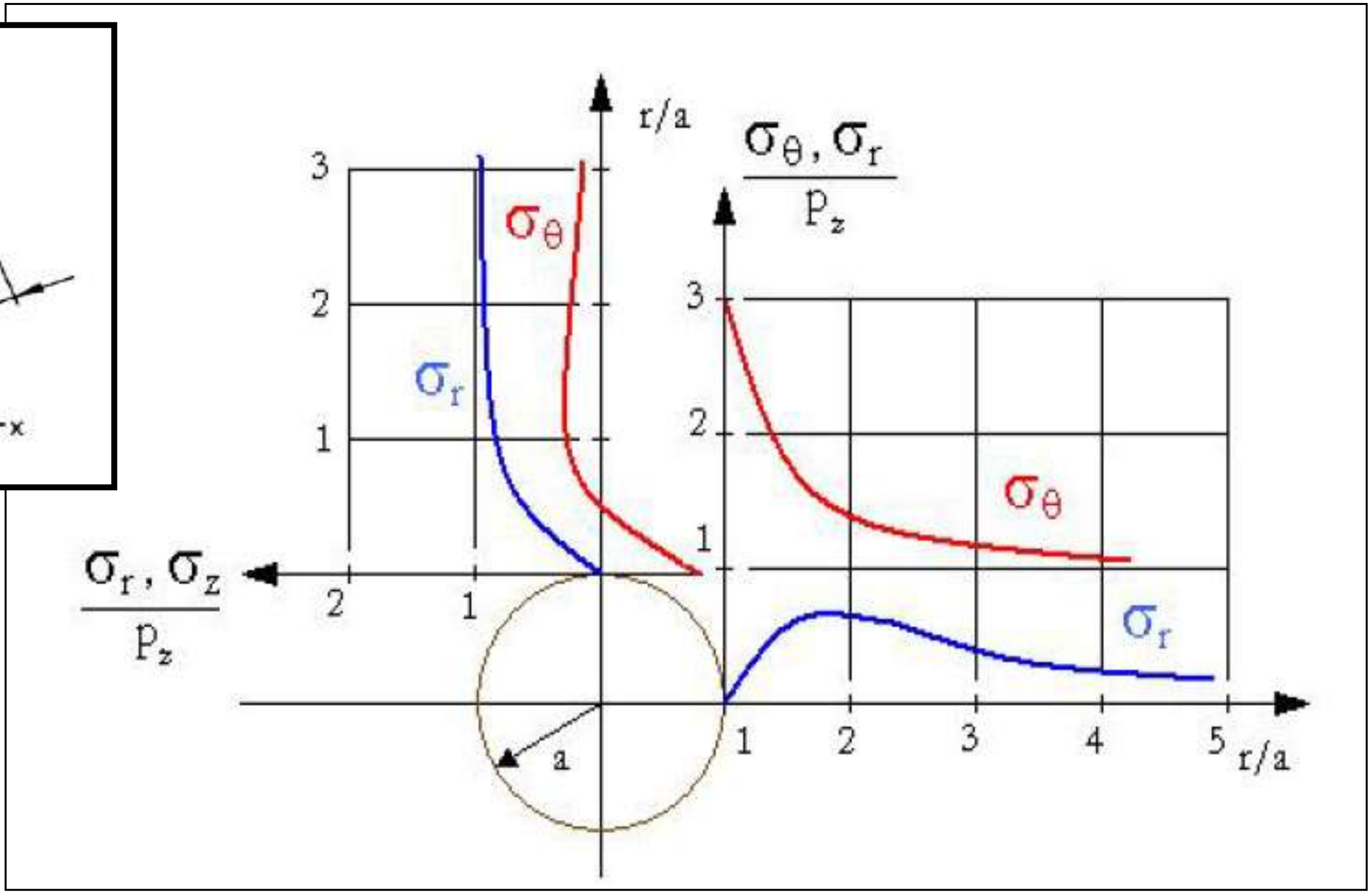
0.5
2.2
2.5
0.25
1.1
1.2
1.3
1.4
1.0
0.5



2.0
1.9
1.45
0.85
0.75
1.2
1.3
1.4
1.0
1.0

Representación del estado de tensiones en clave y hastial derecho para el túnel, siendo K = 0





Profesora Norly Belandria
Grupo de Investigación en Geología Aplicada (GIGA)
Facultad de Ingeniería, Escuela de Geológica

RESISTENCIA DEL MACIZO ROCOSO.

Criterio de Rotura Hoek y Brown:

$$\boxed{\frac{\sigma_1}{\sigma_c} = \frac{\sigma_3}{\sigma_c} + \sqrt{m\frac{\sigma_3}{\sigma_c} + s}}$$

σ_1 = esfuerzo principal mayor en la falla

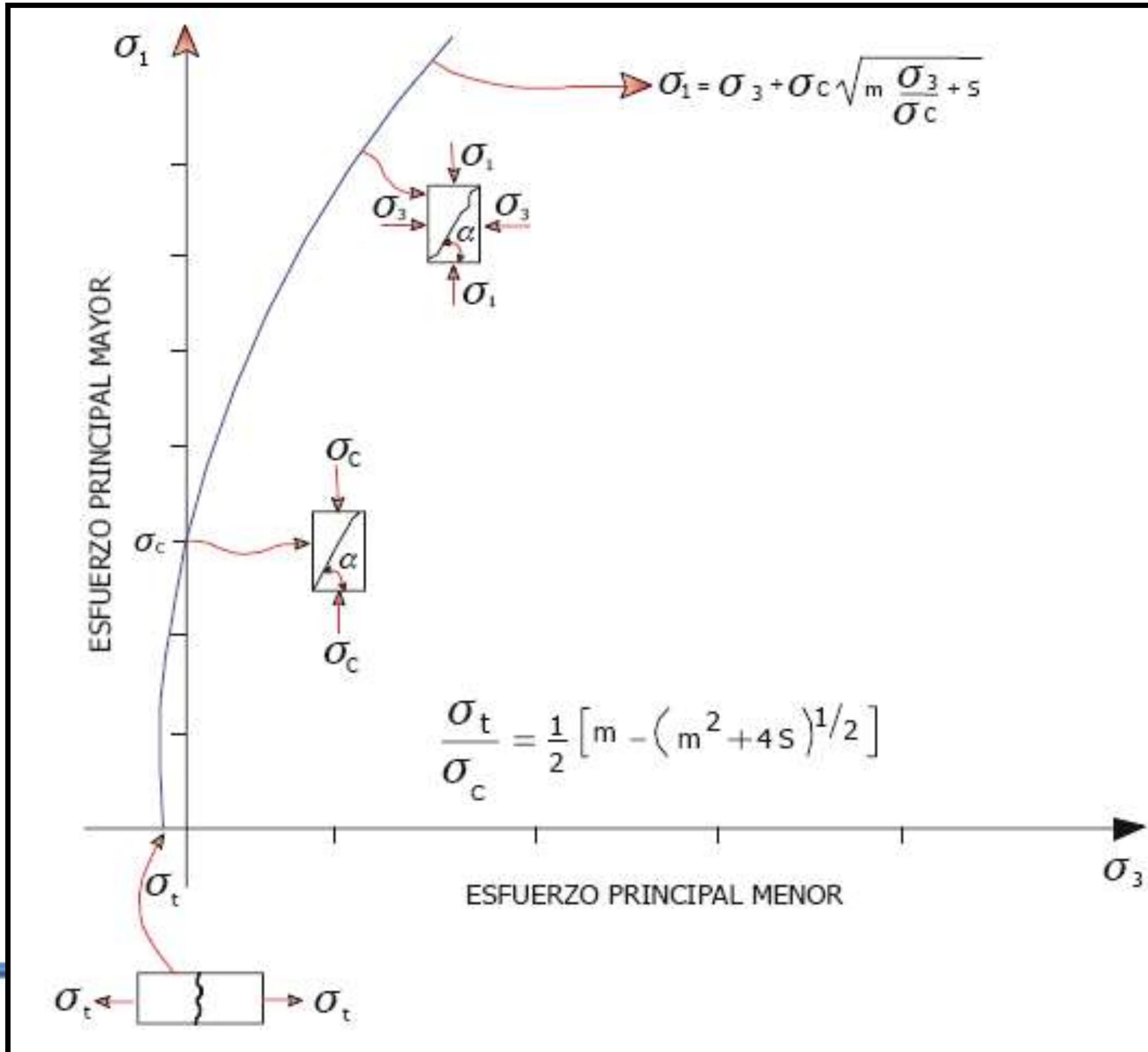
σ_3= esfuerzo principal menor en la falla

σ_c = resistencia a la compresión simple de la roca “intacta”

m, s = constantes que dependen de las propiedades de la roca

Profesora Norly Belandria
Grupo de Investigación en Geología Aplicada (GIGA)
Facultad de Ingeniería, Escuela de Geológica
Departamento Geomecánica

RESISTENCIA DEL MACIZO ROCOSO.



RESISTENCIA DEL MACIZO ROCOSO.

$$s = \exp\left[\frac{RMR - 100}{6I_s}\right] \quad \therefore \quad I_s \begin{cases} 1 & \Rightarrow \quad roca \quad perturbada. \\ 1{,}5 & \Rightarrow \quad roca \quad no \quad perturbada. \end{cases}$$

$$m = m_i \exp\left[\frac{RMR - 100}{14\mathrm{I_m}}\right] \quad \therefore \quad \mathrm{I_m} \begin{cases} 1 & \Rightarrow \quad roca \quad perturbada. \\ 2 & \Rightarrow \quad roca \quad no \quad perturbada. \end{cases}$$

$$s = \exp\left[\frac{GSI - 100}{9}\right]$$

$$m = m_i \exp\left[\frac{GSI - 100}{28}\right]$$

GSI: Clasificación geomecánica HoeK y Brown

m_i: constante que depende de las propiedades de la matriz rocosa

RESISTENCIA DEL MACIZO ROCOSO.

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_c} = \left(m \frac{\sigma_3}{\sigma_c} + s \right)^a$$

$$m = m_i \exp\left(\frac{GSI - 100}{28 - 14D} \right)$$

$$s = \exp\left(\frac{GSI - 100}{9 - 3D} \right)$$

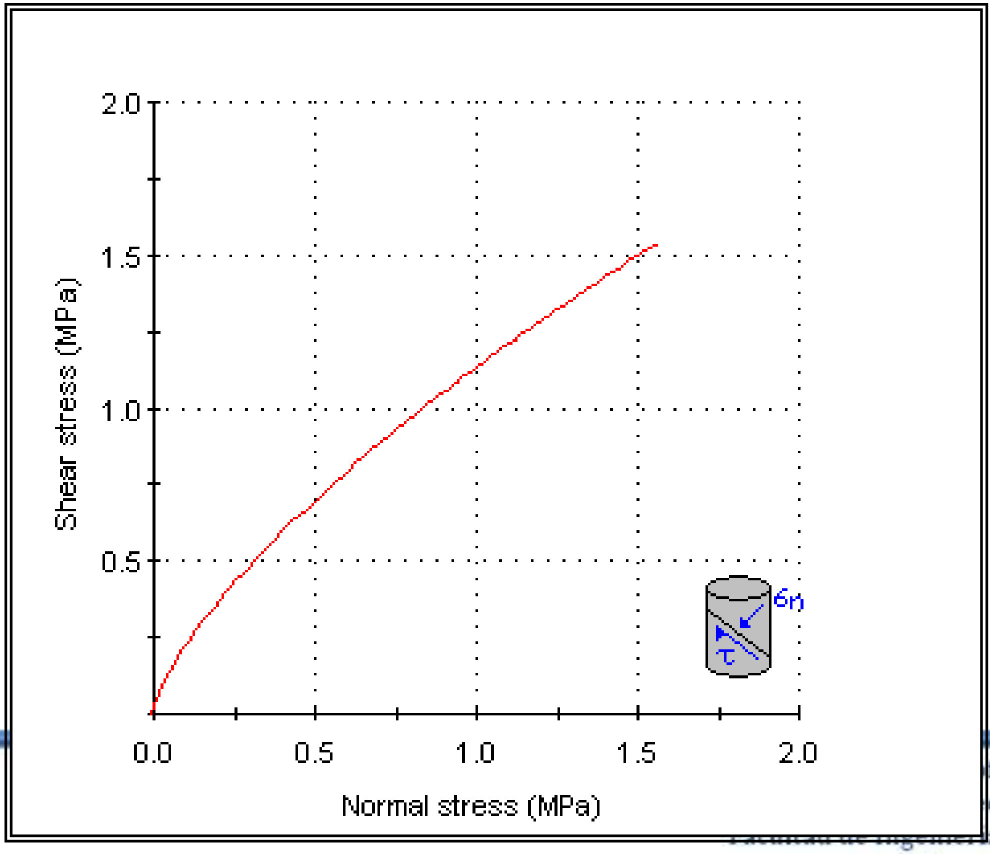
$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6}\left(e^{-GSI/15} - e^{-20/3} \right)$$

Resistencia al corte = $\tau_{\alpha} = \frac{m}{8}\,\sigma_c\left[\frac{1 - \text{sen}\,\phi_i}{\tan\phi_i}\right]$

Tensión normal= $\sigma_n = \frac{m}{8}\,\sigma_c\left[\frac{1}{2\,\text{sen}^2\phi_i} + \text{sen}\,\phi_i\right] - \sigma_c\left[\frac{3\cdot m}{16} + \frac{s}{m}\right]$

Según Úcar (1986)

ϕ_i = ángulo de fricción interna instantáneo



fesora Norly Belandria
ología Aplicada (GIGA)
a, Escuela de Geológica

Envolvente de rotura obtenida por Kumar:

$$\frac{\tau_f}{\sigma_c} = \left(\frac{ma}{2}\right)^{\left(\frac{a}{1-a}\right)} \left(\frac{1-sen\phi_i}{sen\phi_i}\right)^{\left(\frac{a}{1-a}\right)} \left(\frac{\cos\phi_i}{2}\right)$$

$$\frac{\sigma_{nn}}{\sigma_c} = \frac{1}{m}\left(\frac{ma}{2}\right)^{\left(\frac{1}{1-a}\right)} \left(\frac{1-sen\phi_i}{sen\phi_i}\right)^{\left(\frac{1}{1-a}\right)} \left(1+\frac{sen\phi_i}{a}\right) - \frac{s}{m}$$

Sin embargo, Hoek y Brown [25], proponen algunas ecuaciones para estimar la resistencia a la compresión simple de la masa rocosa, de la cohesión y del ángulo de fricción interna del macizo rocoso, tal como se expresa a continuación:

$$\sigma_{cm} = \sigma_c \cdot 0{,}025 \cdot e^{0{,}031 GSI}$$

$$c = \sigma_c \cdot 0{,}0013 \cdot e^{0{,}026 GSI}$$

$$\phi = 0{,}424 \cdot GSI - 0{,}0016 GSI^2 - 5 + \log m_i$$

Para chequear con las anteriores (Propuestas años antes que las anteriores)

Donde:

σ_{cm} : Resistencia a la compresión simple de la masa rocosa

GSI : Indice de calidad geomecánica de la masa rocosa

C,ϕ : Parámetros de resistencia de Mohr-Coulomb

e : Base del logaritmo neperiano