

**CURVAS DE CONVERGENCIA:
EFECTO DE ALGUNOS MODELOS CONSTITUTIVOS
AVANZADOS**

Isabel Reig
ETSICCP - UPM

Curvas de Convergencia: efecto de algunos modelos constitutivos avanzados

1.- INTRODUCCIÓN

2.- FACTORES QUE INFLUYEN EN LA OBTENCIÓN DE LA CURVA DE CONVERGENCIA DE UN MACIZO ROCOSO

- Criterio de rotura
- Comportamiento post-rotura
- Ley de Fluencia

3.- FORMULACIÓN ANALÍTICA GENERAL: MACIZOS ELASTOPLÁSTICOS

4.- COMPARACIÓN ENTRE SOLUCIONES

BIBLIOGRAFÍA

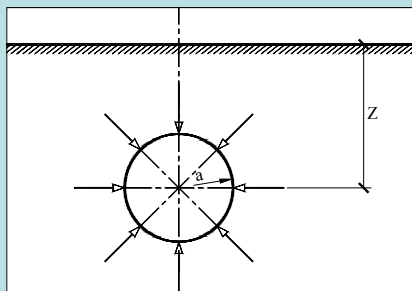
Curvas de Convergencia: efecto de algunos modelos constitutivos avanzados

INTRODUCCIÓN

- El diseño del sostenimiento en túneles es un proceso laborioso y complejo debido:
 - A la dificultad que presenta la caracterización geomecánica del macizo
 - A la imposibilidad de encontrar unos modelos matemáticos capaces de simular toda su complejidad y la de los mecanismos que rigen su respuesta frente a la realización de una excavación subterránea.
- Es importante durante la fase de construcción llevar un control de la auscultación y un seguimiento geológico-geotécnico de la excavación que confirme la validez de los cálculos realizados durante la fase de proyecto.

Curvas de Convergencia: efecto de algunos modelos constitutivos avanzados

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA



Túnel situado a una profundidad $z > 2 \cdot \phi$
Macizo homogéneo, isótropo y continuo

El estado tensional inicial depende:

- De la carga de montaña ($p_o = \gamma \cdot z$)
- Del proceso de génesis
- De la historia geológica

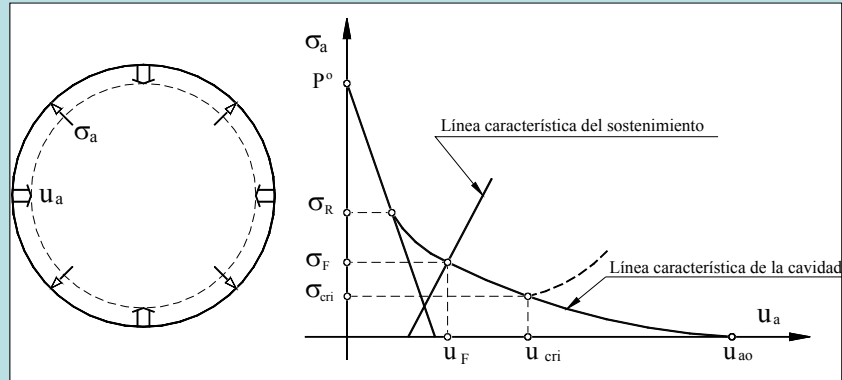
La excavación produce un cambio en el estado tensional que depende:

- Forma y dimensiones de la excavación
- Pérdida de confinamiento

Curvas de Convergencia: efecto de algunos modelos constitutivos avanzados

CURVA CARACTERÍSTICA DEL TERRENO (O DE LA CAVIDAD)

Isotropía → Forma, Material y Carga



Curva Característica del Túnel o Curva de Convergencia del Macizo,
y Curva Característica del Sostenimiento o Curva de Confinamiento

Curvas de Convergencia: efecto de algunos modelos constitutivos avanzados

CURVA CARACTERÍSTICA DEL TÚNEL

➤ Convergencia del túnel:

Movimiento de cierre de la cavidad del túnel debida a la relajación de tensiones.

➤ Curva Característica del Túnel o Curva de Convergencia del Macizo:

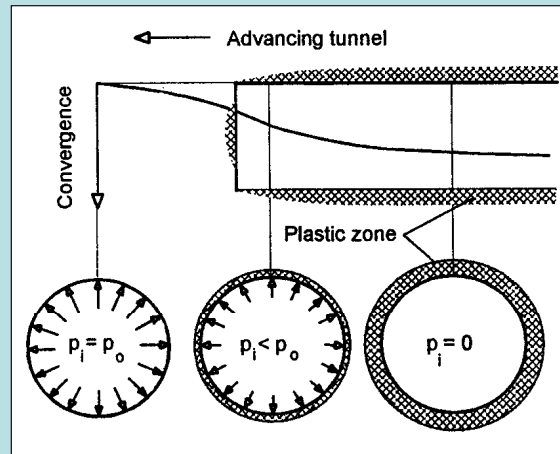
La función que liga la convergencia con la presión de confinamiento de la cavidad.

➤ Línea Característica del Sostenimiento:

La función que liga el movimiento del sostenimiento con la presión del mismo.

Curvas de Convergencia: efecto de algunos modelos constitutivos avanzados

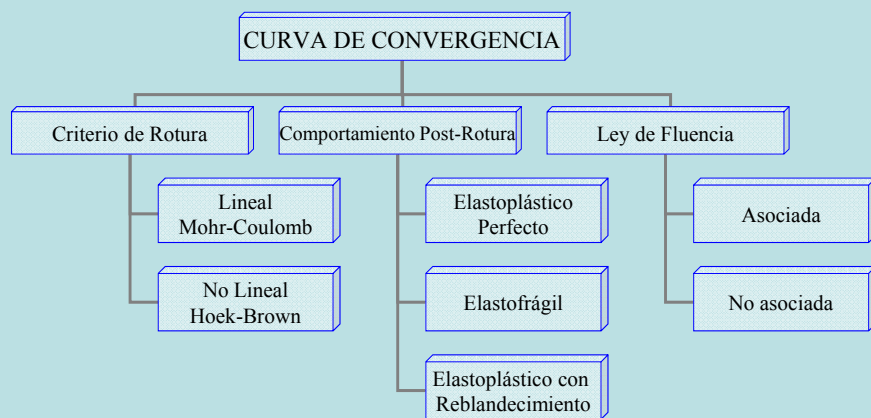
CURVA CARACTERÍSTICA DEL TÚNEL



Comportamiento tridimensional del macizo alrededor del túnel → Deformación Plana

Curvas de Convergencia: efecto de algunos modelos constitutivos avanzados

FACTORES QUE INFLUYEN EN EL CÁLCULO DE LA CURVA CARACTERÍSTICA DEL TÚNEL



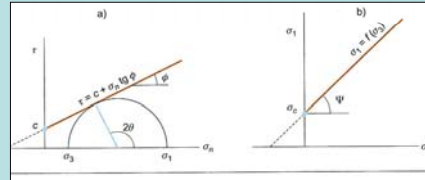
Curvas de Convergencia: efecto de algunos modelos constitutivos avanzados

CRITERIOS DE ROTURA: $q=f(p)$ o $\sigma_1=f(\sigma_3)$

➤ Lineal: MOHR-COULOMB (cohesión y ángulo de rozamiento interno)

$$\sigma'_1 = \frac{1 + \sin \phi'}{1 - \sin \phi'} \cdot \sigma'_3 + \frac{2 \cdot c' \cdot \cos \phi'}{1 - \sin \phi'}$$

$$\tau = c' + \sigma' \cdot \tan \phi'$$

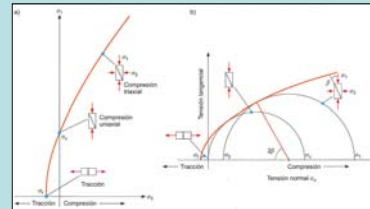


➤ No Lineal: HOEK-BROWN modificado (m_i , GSI , D , σ_{ci})

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} \cdot \left(m_i \cdot \frac{\sigma'_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a$$

$$mb = m_i \cdot e^{\frac{GSI - 100}{28 - 14 \cdot D}}$$

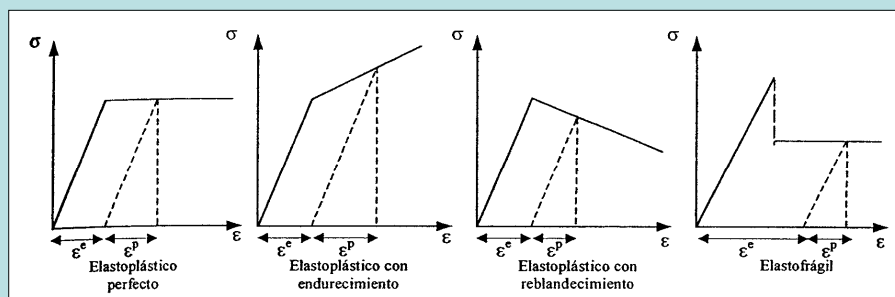
$$s = e^{\frac{GSI - 100}{9 - 3 \cdot D}} \quad a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left(e^{\frac{-GSI}{15}} - e^{\frac{-20}{3}} \right)$$



Curvas de Convergencia: efecto de algunos modelos constitutivos avanzados

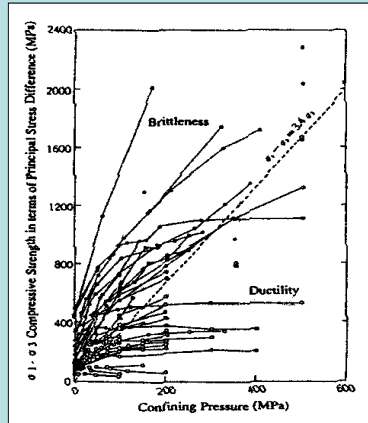
COMPORTAMIENTO POST-ROTURA

➤ Tanto las tensiones como los desplazamientos que se generan durante la excavación de un túnel dependen, fuertemente, del comportamiento tenso-deformacional del macizo y difieren considerablemente según sea frágil, dúctil o elástico.

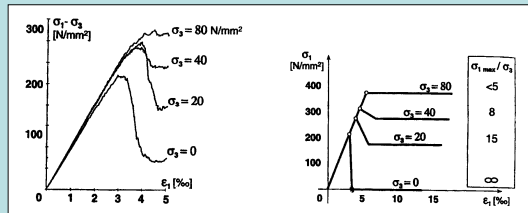


Comportamiento Post-Rotura de los macizos rocosos

Curvas de Convergencia: efecto de algunos modelos constitutivos avanzados

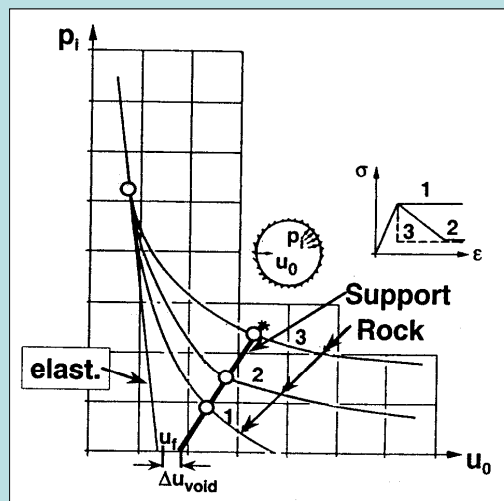


Ensayos de Laboratorio
Transición Frágil-Dúctil (Shigeki 1978)



Simulación Numérica PFC2D
Potyondy et al (1996)

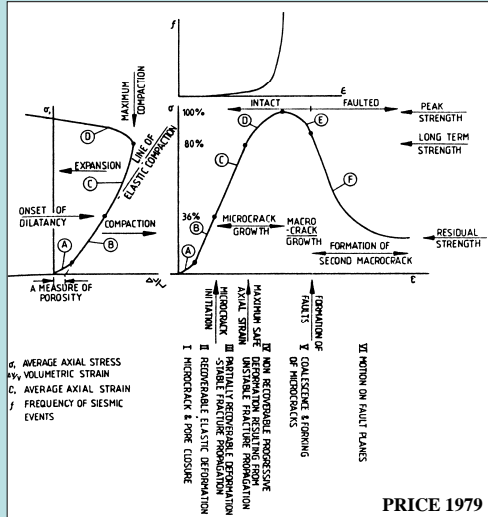
Curvas de Convergencia: efecto de algunos modelos constitutivos avanzados



Curvas características de la cavidad y del sostenimiento para un macizo elástico, elastoplástico perfecto (1), elastoplástico con reblandecimiento (2) y elastofrágil (3). (Egger, 2000)

Curvas de Convergencia: efecto de algunos modelos constitutivos avanzados

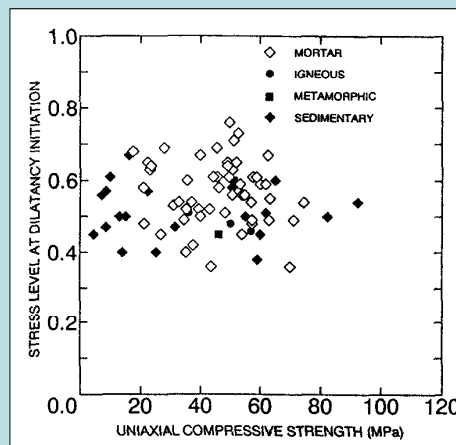
LEY DE FLUENCIA: Análisis de la deformación de la roca (Ensayo σ_c)



- Etapa elástica (I):
 - A: cierre de microfisuras (anelástico)
 - B: deformación elástica recuperable
- Etapa elástoplástica con endurecimiento hasta σ_{pico} (II):
 - C: propagación estable de fisuras
 - D: propagación inestable de fisuras
 - E: estructura interna de la roca está completamente destruida
- Etapa elástoplástica con reblandecimiento limitada por la $\sigma_{residual}$ (III):
 - F: se forman macrofisuras continuas por unión de microfisuras que han crecido
- Etapa elástoplástica residual (IV):
 - Las macrofisuras deslizan (mecanismo de deformación predominante es la fricción).

Curvas de Convergencia: efecto de algunos modelos constitutivos avanzados

LEY DE FLUENCIA: Comienzo de la dilatancia en función del nivel de tensiones



AYDAN, SEIKI, JEONG y TOKASHIKI 1995

Curvas de Convergencia: efecto de algunos modelos constitutivos avanzados

LEY DE FLUENCIA:

- **Reynolds** (1885). Realizó la primera consideración de la dilatación (materiales granulares densos), y la describió como el cambio de volumen asociado a la distorsión durante la plastificación.
- **Hansen** (1958). Define el concepto general de “ángulo de dilatación” como la relación entre el incremento de la deformación volumétrica plástica y el incremento de deformación cortante. Esta definición es válida para la hipótesis de deformación plana.
- **Cristescu** (1982). Define la dilatación como “una propiedad mecánica de las rocas que se manifiesta con presiones de confinamiento bajas, aumentando su afección con la deformación principal en la fase previa a la rotura” y propone su cuantificación mediante la determinación del ángulo de dilatación.
- **Lama y Vutukuri** (1982) y **Farmer** (1983). Ensayos experimentales muestran que la dilatación existe tanto en materiales dúctiles como frágiles.
- **Veermor-Borst** (1984), **Ogawa** (1986) y **Papanastasiou et al** (1994). Proponen expresiones para obtener el ángulo de dilatación a partir de ensayos triaxiales teniendo en cuenta la presión de confinamiento. Estos autores han comprobado cómo la deformación volumétrica plástica que se produce a lo largo de la trayectoria de cargas depende, fuertemente, de las tensiones (fluencia lineal).

Curvas de Convergencia: efecto de algunos modelos constitutivos avanzados

LEY DE FLUENCIA:

➤ Es necesario adoptar una *ley de fluencia no asociada*, especialmente *en los casos de deformación plana en materiales isótropos con criterios de rotura independientes de la tensión principal intermedia*.

➤ La *dilatancia* depende, principalmente, de la *tensión de confinamiento*, del *nivel de deformación plástica* y de la *escala*, disminuyendo esta a medida que aumentan estas variables (Detournay 1986 y Alonso-Alejo 2005).

Expresión General: $sen v = N(sen \rho)$ (función de la tensión en rotura).

Ejemplos:

$$sen v = sen \rho$$

Dilatancia Asociada

$$sen v = sen v_o$$

Dilatancia Constante

$$sen v = \lambda(sen \rho - sen \rho_{crit})$$

Dilatancia Lineal

Curvas de Convergencia: efecto de algunos modelos constitutivos avanzados

LEY DE FLUENCIA: Criterio de rotura Mohr-Coulomb

Se adopta una *ley de fluencia lineal*: $\text{sen } v = \lambda \text{sen } \rho$

Hoek-Brown (1997):

Calidad del Macizo	Ángulo de Dilatancia (v)
Muy Buena (I)	$\rho/2$
Buena (II)	$\rho/4$
Media (III)	$\rho/8$
Mala-Muy Mala (IV-V)	0

Curvas de Convergencia: efecto de algunos modelos constitutivos avanzados

LEY DE FLUENCIA: Criterio de rotura Hoek-Brown

Se propone el empleo de una *ley de fluencia lineal*:

$$\text{sen } v = \frac{\text{sen } v_{\text{máximo}}}{1 - \text{sen } \rho_{\text{crítico}}} (\text{sen } \rho - \text{sen } \rho_{\text{crítico}})$$

- **Ángulo Crítico** ($\text{sen } \rho_{\text{crítico}}$) definido como el ángulo de rozamiento instantáneo a partir del cual el macizo deja de ser dilatante positivo. Su valor varía entre 0 ($\sigma_1/\sigma_3=1$) y 30° ($\sigma_1/\sigma_3=5$).

Macizos rocosos variará entre 0° ($\sigma_1=\sigma_3$), 11,5° ($\sigma_1=2\sigma_3$) y 19,5° ($\sigma_1=3\sigma_3$), aproximadamente y dependiendo del valor de ζ .

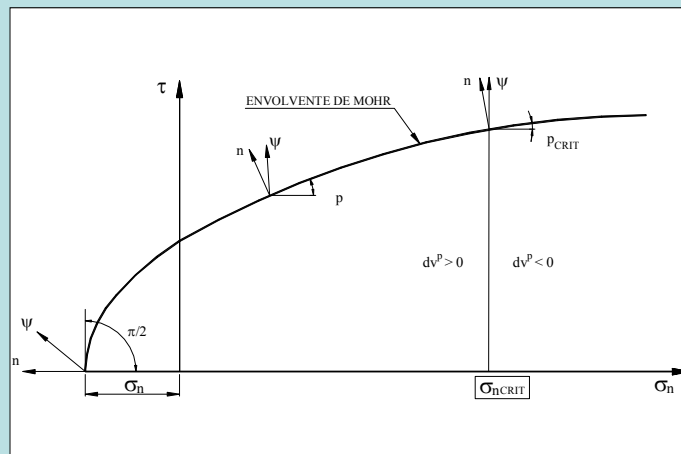
$$\text{sen } \rho_{\text{crítico}} = \frac{(\sigma_1/\sigma_3)-1}{(\frac{\sigma_1}{\sigma_3})+1+2\sqrt{1+((\frac{\sigma_1}{\sigma_3})-1)^2 \frac{\zeta}{2}}}$$

- **Ángulo de Dilatancia Máxima** ($\text{sen } v_{\text{Máxima}}$) definido como el ángulo máximo de dilatancia que se produce cuando el macizo está en tracción simple. Su valor es de 90° ($\pi/2$).

Curvas de Convergencia: efecto de algunos modelos constitutivos avanzados

LEY DE FLUENCIA: Criterio de rotura Hoek-Brown

$$\text{sen } v = \frac{\text{sen } v_{\text{máximo}}}{1 - \text{sen } \rho_{\text{crítico}}} (\text{sen } \rho - \text{sen } \rho_{\text{crítico}})$$



Curvas de Convergencia: efecto de algunos modelos constitutivos avanzados

LEY DE FLUENCIA: Criterio de rotura Hoek-Brown

➤ Se adopta una *ley de fluencia lineal*:

$$\text{sen } v = \lambda \cdot \text{sen } \rho - a$$

$$\lambda = \frac{\text{sen } v_{\text{máximo}}}{1 - \text{sen } \rho_{\text{crítico}}}$$

$$a = \frac{\text{sen } v_{\text{máximo}} \cdot \text{sen } \rho_{\text{crítico}}}{1 - \text{sen } \rho_{\text{crítico}}}$$

Calidad del Macizo	Ángulo de Dilatancia (v)
Muy Buena (I)	$\text{sen } v = 2 \cdot \text{sen } \rho - 1,0$ ($\lambda=2$ y $a=1$)
Buena (II)	$\text{sen } v = 1,5 \cdot \text{sen } \rho - 0,5$ ($\lambda=1,5$ y $a=0,5$)
Media (III)	$\text{sen } v = 1,25 \cdot \text{sen } \rho - 0,25$ ($\lambda=1,25$ y $a=0,25$)
Mala-Muy Mala (IV-V)	$\text{sen } v = 0$ ($\lambda=0$ y $a=0$)

* Si $\text{sen } v = \text{sen } \rho$ ($\lambda=1$; $a=0$; Dilatancia asociada)

* Si $\text{sen } v = -\text{sen } v_0$ ($\lambda=0$; $a=-\text{sen } v_0$; Dilatancia constante)

Curvas de Convergencia: efecto de algunos modelos constitutivos avanzados

- En Elasticidad existe una relación biunívoca entre tensiones y deformaciones.

Ley de Hooke

- En Plasticidad no, ya que un mismo estado de tensiones puede producir una variedad infinita de deformaciones, según la trayectoria de tensiones seguida hasta llegar a ese estado.

Por tanto, las deformaciones en plasticidad no pueden estudiarse directamente, sino tan sólo como una integración de las deformaciones elementales producidas por cada variación infinitesimal de las tensiones a lo largo de una trayectoria de tensiones.

Regla de Flujo

Curvas de Convergencia: efecto de algunos modelos constitutivos avanzados

FORMULACIÓN ANALÍTICA GENERAL PARA MACIZOS ELASTOPLÁSTICOS

- Ecuaciones que rigen el comportamiento:

- Generales de Mecánica del Continuo:

- ✓ Ecuación de equilibrio interno de tensiones
- ✓ Ecuación de Continuidad (Compatibilidad)

- Ecuaciones Constitutivas:

- ✓ Leyes Elásticas: ley de Hooke
- ✓ Leyes Anelásticas: ley de fluencia

- Ecuación de Consistencia (tensiones zona plástica verifican el criterio de rotura)

Curvas de Convergencia: efecto de algunos modelos constitutivos avanzados

➤ Ecuación de Equilibrio Interno:

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0$$

Expresada en Variables Lambe:

$$\frac{d(p-q)}{dr} + \frac{(-2 \cdot q)}{r} = 0$$

$$p = \frac{\sigma_r + \sigma_\theta}{2} \quad q = \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{2}$$

➤ Sistema diferencial:

$$dp = 0; p = C_1$$

$$d(r^2 q) = 0; q = \left(\frac{C_2}{r^2} \right)$$

➤ Solución comportamiento elástico:

- Tensiones antes de la apertura:

$$p = p^0; q = 0$$

se obtiene $C_1 = p_0$

- Tensiones después de la apertura:

para $r = a \rightarrow q = q_a = p_0 - \sigma_a$ (σ_a conocido)

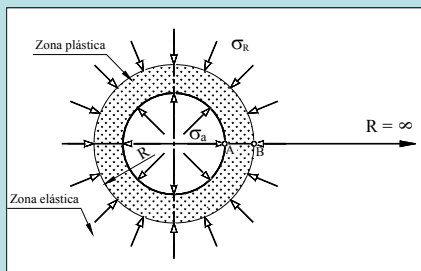
se obtiene $C_2 = q_a \cdot a^2$

siendo $p = p_0$ y $q = (p_0 - \sigma_a) \cdot (a/r)^2$

- Tensión radial $\sigma_r = p - q$
- Tensión tangencial $\sigma_\theta = p + q$

Curvas de Convergencia: efecto de algunos modelos constitutivos avanzados

TENSIONES EN LA ZONA ELÁSTICA



➤ Solución comportamiento elástico-plástico para la zona elástica:

- Tensiones antes de la apertura:

$$p = p^0; q = 0$$

- Tensiones después de la apertura:

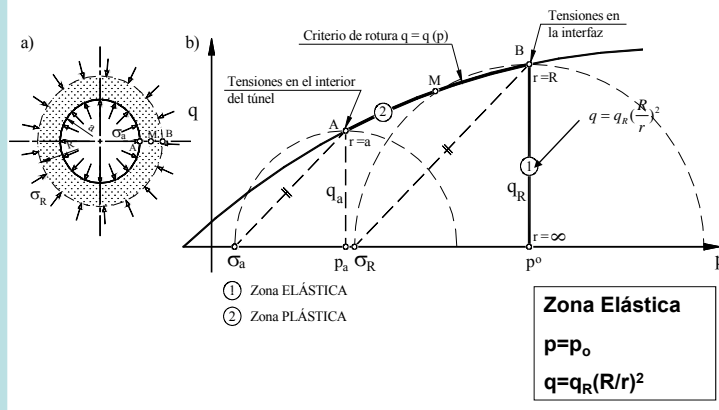
para $r = R \rightarrow q = q_R = p_0 - \sigma_R \rightarrow q_R$ debe verificar el criterio de rotura $\rightarrow q = f(p) \rightarrow q_R = f(p_0)$

y se obtiene $C_2 = q_R \cdot R^2$

siendo $p = p_0$ y $q = q_R \cdot (R/r)^2$

- Tensión radial $\sigma_r = p - q$
- Tensión tangencial $\sigma_\theta = p + q$

Curvas de Convergencia: efecto de algunos modelos constitutivos avanzados



a) ESQUEMA CON LAS CONDICIONES DE CONTORNO

b) DIAGRAMA DE MOHR DE TENSIONES

Curvas de Convergencia: efecto de algunos modelos constitutivos avanzados

DEFORMACIONES EN LA ZONA ELÁSTICA

➤ Cambio de tensiones:

$$\Delta p = 0$$

$$\Delta q = q_R \left(\frac{R}{r} \right)^2$$

➤ Ecuaciones de Hooke:

$$v = (1 - 2\mu) \frac{\Delta p}{G}$$

$$\gamma = \frac{\Delta q}{G}$$

➤ Deformaciones:

$$v = 0$$

$$\gamma = \frac{q_R}{G} \left(\frac{R}{r} \right)^2$$

• Deformaciones en el interfaz (r=R)

$$v_R = 0$$

$$\gamma_R = \frac{q_R}{G}$$

$$\varepsilon_{rr} = \frac{v_R - \gamma_R}{2} = -\frac{q_R}{2G}$$

• Deformaciones principales:

$$\varepsilon_{rr} = \frac{v_R + \gamma_R}{2} = \frac{q_R}{2G}$$

$$\varepsilon_{\theta\theta} = \frac{u_R}{R} = \frac{q_R}{2G}$$

Curvas de Convergencia: efecto de algunos modelos constitutivos avanzados

TENSIONES EN LA ZONA PLÁSTICA

➤ Sistema diferencial:

- $2 \frac{dr}{r} = B(q) dq$ Equilibrio interno

- $q = q(p)$ Criterio de rotura

siendo:

- $B(q) = \left(\frac{dp}{dq} - 1 \right) \frac{1}{q} = \left(\frac{1}{\text{sen} \rho} - 1 \right) \frac{1}{q}$

- $\text{sen} \rho = \frac{dq}{dp}$ Rozamiento instantáneo

➤ Solución:

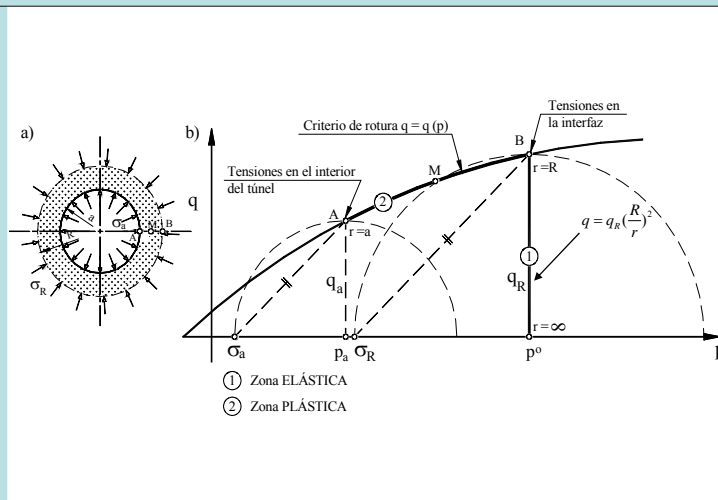
- Ley General

$$\ln \left(\frac{r}{R} \right)^2 = \int_{q_R}^q B(q) dq$$

- Radio de Plastificación

$$\ln \left(\frac{a}{R} \right)^2 = \int_{q_a}^{q_R} B(q) dq$$

Curvas de Convergencia: efecto de algunos modelos constitutivos avanzados



a) ESQUEMA CON LAS CONDICIONES DE CONTORNO

b) DIAGRAMA DE MOHR DE TENSIONES

Curvas de Convergencia: efecto de algunos modelos constitutivos avanzados

DEFORMACIONES EN LA ZONA PLÁSTICA

➤ **Sistema Gobernante:**

- Equilibrio Interno: $2 \frac{dr}{r} = B(q) dq$
- Consistencia: $\frac{dq}{dp} = \text{sen} \rho$
- Compatibilidad: $u = r \cdot \varepsilon_\theta$
- Deformación Total:

$$dv = dv^E + dv^P \quad d\gamma = d\gamma^E + d\gamma^P$$
- Ecuaciones Constitutivas
 Elástica: $dv^E = (1 - 2\mu) \frac{dp}{G} \quad d\gamma^E = \frac{dq}{G}$
 Plástica:

$$-\frac{dv^P}{d\gamma^P} = \text{sen} \nu = N(\text{sen} \rho)$$

➤ **Sistema Resolvente:**

- $(1 - \text{sen} \nu) \frac{d\gamma}{dq} + B(q) \gamma = -\frac{E(q)}{G}$
 - $\frac{d\varepsilon_\theta}{dq} = -\frac{B(q)}{2} \gamma$
- con:
- $B(q) = \left(\frac{1}{\text{sen} \rho} - 1 \right) \frac{1}{q}$
 - $E(q) = \text{sen} \nu + \frac{1 - 2\mu}{\text{sen} \rho}$

Curvas de Convergencia: efecto de algunos modelos constitutivos avanzados

- La **solución de la primera ecuación** permite determinar γ :

$$\gamma = Cte \left(1 - \frac{1}{G} \int_{q_0}^q \frac{E(q)}{1 - \text{sen} \nu} e^{H(q_0, q)} dq \right) e^{-H(q_0, q)} \quad H(q_0, q) = \int_{q_0}^q \frac{B(q)}{1 - \text{sen} \nu} dq$$

y la **solución de la segunda ecuación**, una vez obtenida γ , permite determinar ε_q :

$$\varepsilon_\theta - \varepsilon_{\theta R} = - \int_{q_R}^q \frac{B(q)}{2} \gamma dq$$

$$\Omega = \frac{\varepsilon_\theta}{\varepsilon_{\theta R}} - 1 \quad \varepsilon_{\theta R} = \frac{\gamma_R}{G} = \frac{q_R}{2G} \quad \varepsilon_\theta = \frac{u}{r}$$

- **Criterio de Mohr-Coulomb:**

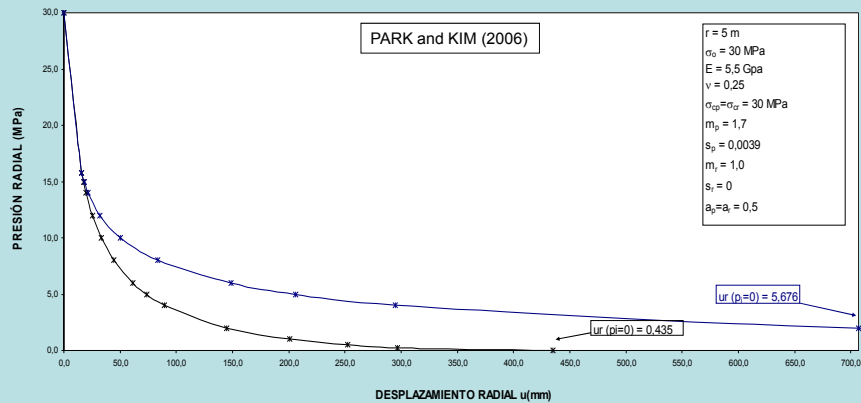
$$B(q) = \frac{n}{q} \quad \text{sen} \nu = \lambda \text{sen} \rho$$

- **Criterio de Hoek&Brown:** $B(q) = 1 \quad \text{sen} \nu = \frac{\text{sen} \nu_{\text{máximo}}}{1 - \text{sen} \rho_{\text{crítico}}} (\text{sen} \rho - \text{sen} \rho_{\text{crítico}})$

Curvas de Convergencia: efecto de algunos modelos constitutivos avanzados

COMPARACIÓN ENTRE SOLUCIONES

CURVA DE CONVERGENCIA Hoek-Brown ($\psi=0^\circ$ y $\psi=30^\circ$)

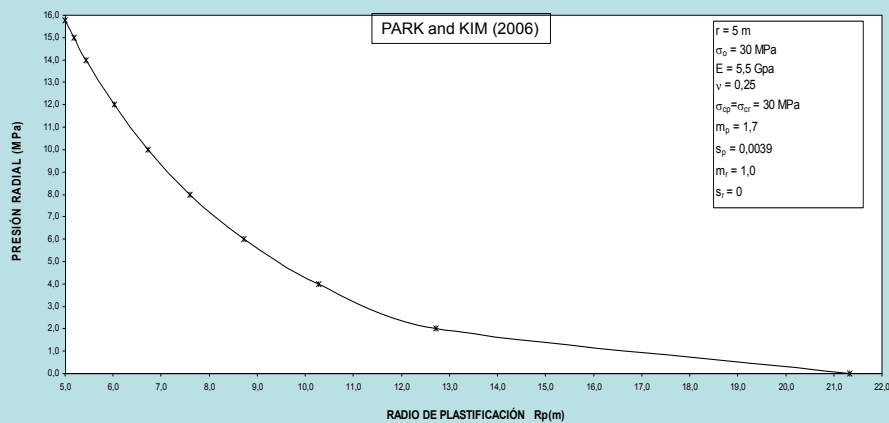


Curva de convergencia (H&B Original) – Influencia de la Dilatancia ($\psi=0^\circ$ y $\psi=30^\circ$)

Curvas de Convergencia: efecto de algunos modelos constitutivos avanzados

COMPARACIÓN ENTRE SOLUCIONES

PRESIÓN - RADIO DE PLASTIFICACIÓN
Hoek-Brown ($\psi=0^\circ$ y $\psi=30^\circ$)



Radio de Plastificación en función de la presión interna radial (H&B Original)

Curvas de Convergencia: efecto de algunos modelos constitutivos avanzados

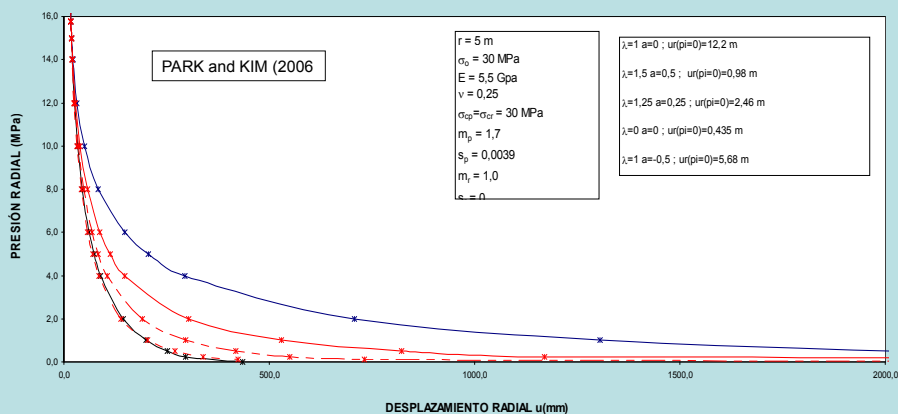
Ejemplo Elastofrágil	k.-H. Park, Y.-J. Kim [51]		Este trabajo	
	(u.E)/(Radio.po) $\Psi=0$ a $\Psi=30^\circ$	Rplastico/a (m)	(u.E)/(Radio.po) $\Psi=0$ a $\Psi=30^\circ$	Rplastico/a (m)
k.-H. Park, Y.-J. Kim [51] H&B original	$\approx 2.55-7.5$	≈ 1.85	2.698-7.557	1.885

Curva de convergencia (H&B Original) – Influencia de la Dilatancia ($\psi=0^\circ$ y $\psi=30^\circ$)

Curvas de Convergencia: efecto de algunos modelos constitutivos avanzados

COMPARACIÓN ENTRE SOLUCIONES

CURVA DE CONVERGENCIA Hoek-Brown ($\psi=0^\circ$ - $\psi=30^\circ$ - Ley Fluencia Lineal)

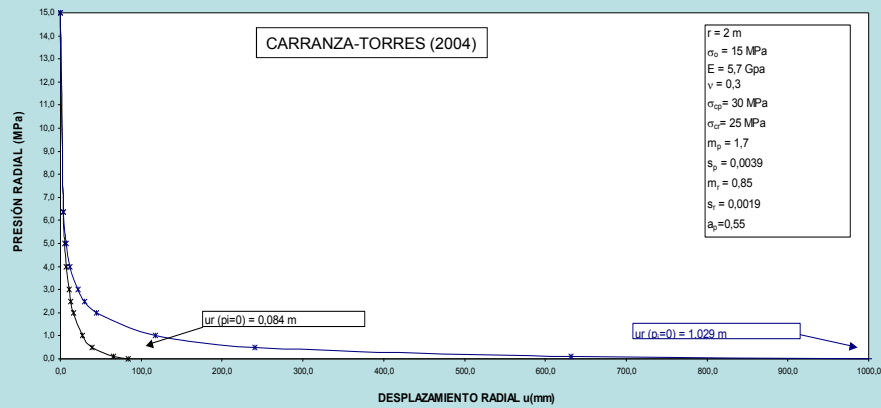


Curva de convergencia (H&B Original) – Influencia de la Dilatancia ($\psi=0^\circ$ - $\psi=30^\circ$ -Dilatancia Lineal)

Curvas de Convergencia: efecto de algunos modelos constitutivos avanzados

COMPARACIÓN ENTRE SOLUCIONES

CURVA DE CONVERGENCIA Hoek-Brown ($\psi=0^\circ$ y $\psi=30^\circ$)

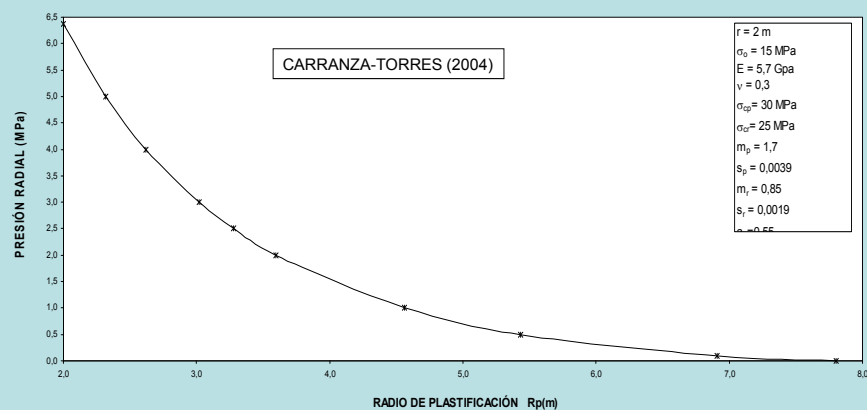


Curva de convergencia (H&B Modificado) – Influencia de la Dilatancia ($\psi=0^\circ$ y $\psi=30^\circ$)

Curvas de Convergencia: efecto de algunos modelos constitutivos avanzados

COMPARACIÓN ENTRE SOLUCIONES

PRESIÓN - RADIO DE PLASTIFICACIÓN
Hoek-Brown ($\psi=0^\circ$ y $\psi=30^\circ$)

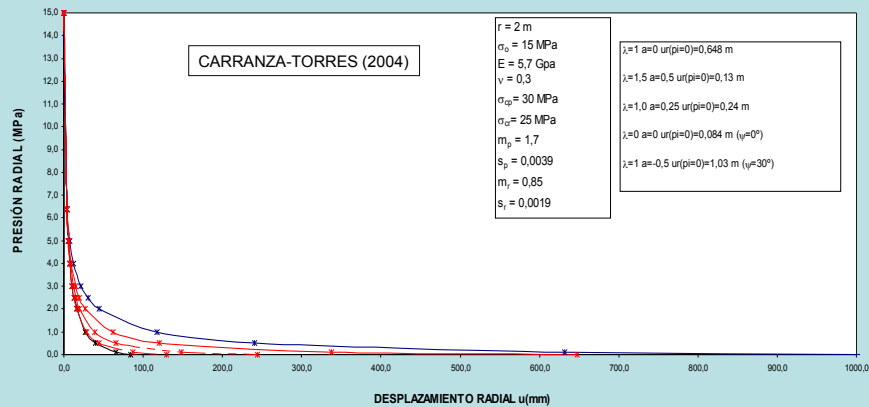


Radio de Plasticificación en función de la presión interna radial (H&B Modificado)

Curvas de Convergencia: efecto de algunos modelos constitutivos avanzados

COMPARACIÓN ENTRE SOLUCIONES

CURVA DE CONVERGENCIA Hoek-Brown ($\psi=0^\circ$ - $\psi=30^\circ$ - Ley Fluencia Lineal)

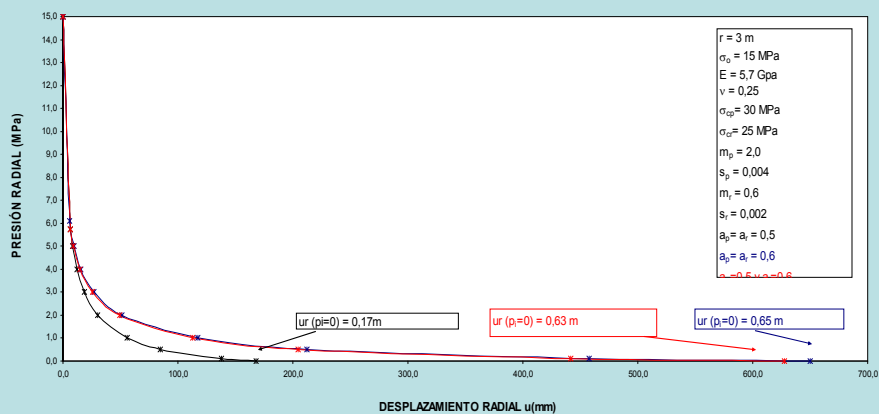


Curva de convergencia (H&B Modificado) – Influencia de la Dilatancia
($\psi=0^\circ$ - $\psi=30^\circ$ - Dilatancia Lineal)

Curvas de Convergencia: efecto de algunos modelos constitutivos avanzados

COMPARACIÓN ENTRE SOLUCIONES

CURVA DE CONVERGENCIA Hoek-Brown ($\psi=15^\circ$)

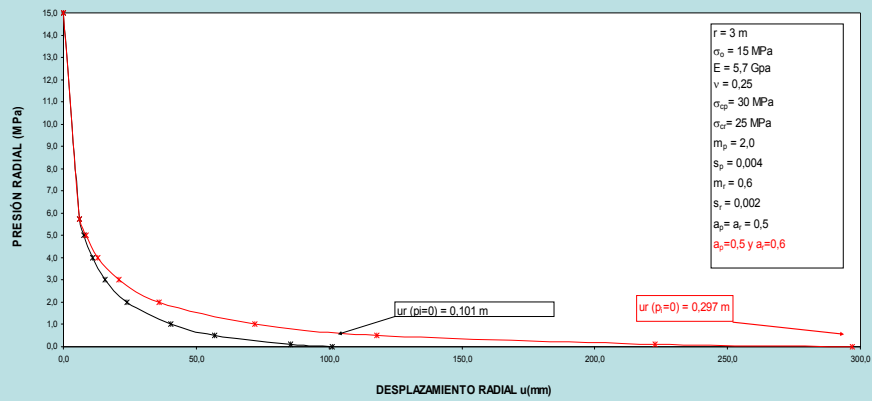


Curva de convergencia (H&B Modificado) – Influencia de "a"
($\psi=15^\circ$)

Curvas de Convergencia: efecto de algunos modelos constitutivos avanzados

COMPARACIÓN ENTRE SOLUCIONES

CURVA DE CONVERGENCIA Hoek-Brown ($\psi=5^\circ$)

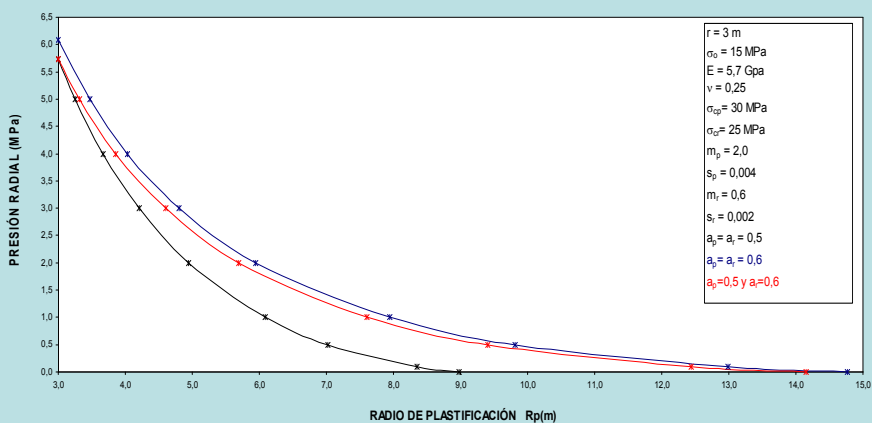


Curva de convergencia (H&B Modificado) – Influencia de “a”
($\psi=5^\circ$)

Curvas de Convergencia: efecto de algunos modelos constitutivos avanzados

COMPARACIÓN ENTRE SOLUCIONES

PRESIÓN - RADIO DE PLASTIFICACIÓN
Hoek-Brown ($\psi=15^\circ$)



Radio de Plastificación en función de la presión interna radial (H&B Modificado) – Influencia “a”

Curvas de Convergencia: efecto de algunos modelos constitutivos avanzados

BIBLIOGRAFÍA

- Panet, M. (1995). "Le calcul des tunnels par la méthode des courbes convergence-confinement". Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées. Paris.
- Carranza-Torres, C. Elasto-plastic solution of tunnel problems using the generalized form of the Hoek-Brown failure criterion. In: Hudson JA, Xia-Ting F, editors. Sinorock 2004 Symposium, China, 2004. Int. J. Rock Mech Min Sci 2004; 41 (3):480-1.
- Sharan SK. "Exact and approximate solutions for displacements around circular openings in elastic-brittle-plastic Hoek-Brown rock". Int. J. Rock Mech Min Sci 2005; 42: 542-9.
- Kyung – Ho Park, Yong-Jin Kim. "Analytical solution for a circular opening in an elastic-brittle-plastic rock. Int. J. Rock Mech Min Sci 2005; 43: 616-22".
- L.R. Alejano, E. Alonso. "Considerations of the dilatancy angle in rocks and rock masses". Int. J. Rock Mech Min Sci 2005; 42: 481-507.
- Ypun-Kyou Lee, S. Pietruszczak "A new numerical procedure for elasto-plastic analysis of a circular opening excavated in a strain-softening rock mass". Tunnelling and Underground Space Technology, 23 (2008) 588-599.