Formulario Primer Parcial

Propiedades índice de la matriz rocosa

Densidad

$$\rho = \frac{M}{V}$$

Densidad seca

$$\rho_d = \frac{M_s}{V}$$

Contenido de agua

$$w = \frac{M_w}{M_s} \times 100\,\%$$

Porosidad

$$n = \frac{V_v}{V} \times 100\,\%$$

Gravedad específica

$$G_s = \frac{\gamma_{\text{sólidos}}}{\gamma_{\text{agua}}}$$

Propiedades mecánicas de la matriz rocosa

Resistencia a la compresión

$$\sigma_{ci} = \frac{P}{A}$$

Efecto de escala en la resistencia a compresión

$$R = R_1\left(0.778 + 0.222\frac{D}{L}\right) \qquad \text{Obert, Windes y Duvall (1946)}$$

$$R = R_{0.5}\left(0.875 + 0.250\frac{D}{L}\right) \qquad \text{Brook (1993)}$$

$$R = R_{50}\left(\frac{50}{D}\right)^{0.18} \qquad \text{Hoek y Brown (1980)}$$

Resistencia a la compresión, ensayo de carga puntual

$$I_s = \frac{P}{D^2} \qquad \sigma_{ci} = KI_s \qquad \text{si } D = 50\,\text{mm}$$

$$I_{s(50)} = \left(\frac{D}{50}\right)^{0.45} I_s \qquad \sigma_{ci} = KI_{s(50)} \qquad \text{si } D \neq 50\,\text{mm}$$

Donde el factor K depende del tipo de roca, según ASTM D5731

Tamaño (mm)	20	30	40	50	54	60
K	17.5	19	21	23	24	24.5

También puede usarse el ajuste teórico

$$K = 6.6817 \ln D - 3.09$$

Resistencia a la compresión (γ en kN/m^3) y módulo de elasticidad, martillo Schmidt Tipo L

$$\begin{aligned} \log \sigma_{ci} &= 0.00088\gamma R_L + 1.01 && \text{en MPa} \\ \ln E_i &= -8.967 + 3.091 \ln R_L && \text{en GPa} \end{aligned}$$

Equivalencia entre número de rebote martillo Schmidt Tipo L y Tipo N

$$R_L = -3.4 + 0.83 R_N + 0.00295 R_N^2$$

Corrección por ángulo de inclinación para martillo Schmidt Tipo L

Rebote	Hacia abajo		Horizontal	Hacia arriba	
	$-90°$	$-45°$	$0°$	$45°$	$90°$
10	0	7.52	4.98	-	-
20	0	5.86	3.57	7.44	5.15
30	0	4.14	2.16	4.70	2.4
40	0	2.51	0.79	2.02	-0.26
50	0	0.82	-0.62	-0.70	-2.98
60	0	-0.86	-2.01	-3.39	-5.66

Resistencia a la tracción

$$\begin{aligned} \sigma_t &= \frac{2P}{\pi D t} && \text{ensayo brasileño} \\ \sigma_t &= \frac{16PL}{3\pi D^3} && \text{ensayo a flexión} \end{aligned}$$

Esfuerzo normal y cortante

$$\begin{aligned} \sigma &= \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} - \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos 2\beta \\ \tau &= \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin 2\beta \end{aligned}$$

Criterio de Mohr-Coulomb

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

Criterio de Mohr-Coulomb en el espacio (s, t)

$$t = a + s \tan \alpha$$

Cambios de variable para el espacio (s, t)

$$\begin{aligned} s &= \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} && a = c \cos \phi \\ t &= \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} && \tan \alpha = \sin \phi \end{aligned}$$

Criterio de Hoek-Brown

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \sqrt{m_i \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s_i}$$

Ábaco para martillo Schmidt Tipo L

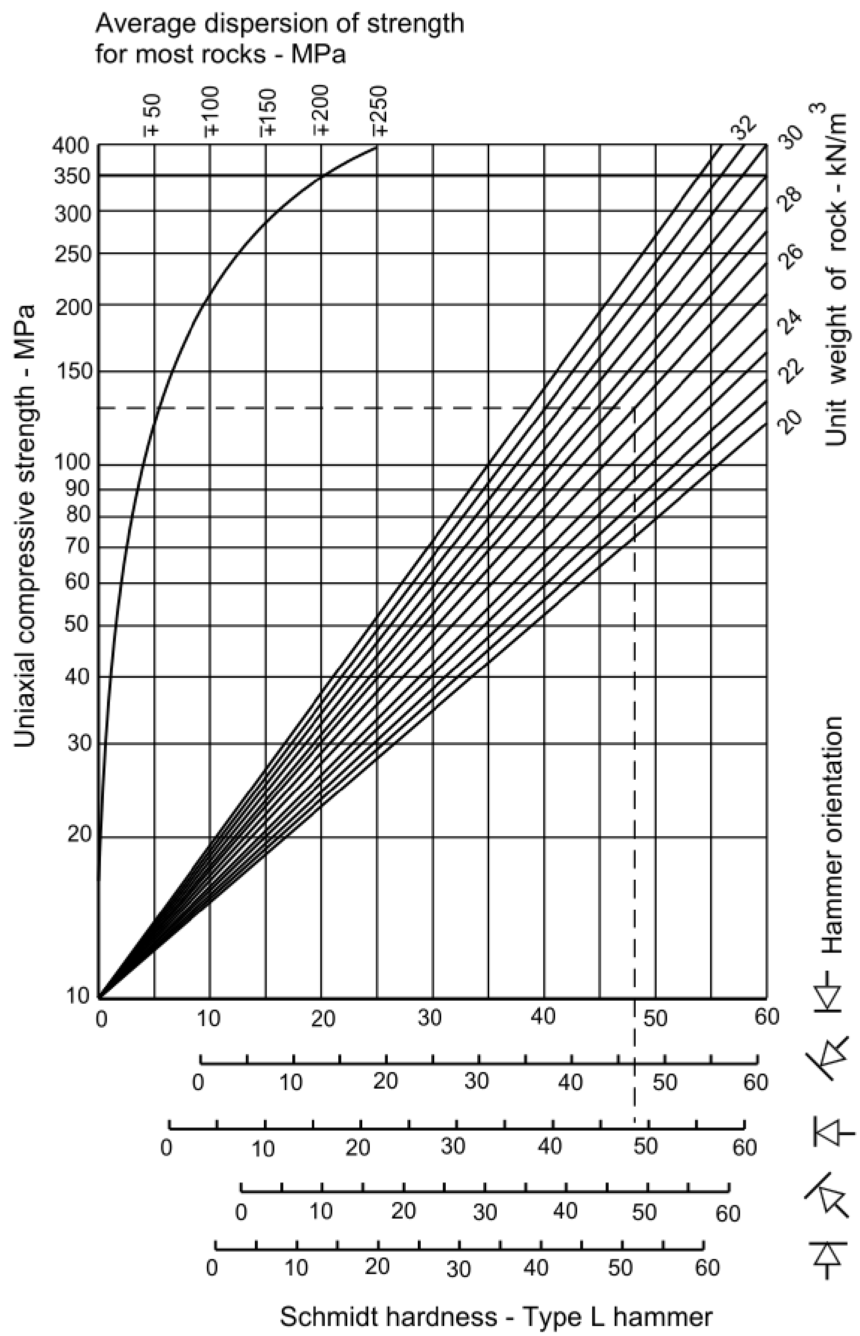

Figura 1: Practical Rock Engineering - Evert Hoek (2007)

Propiedades mecánicas de las discontinuidades

Resistencia a la compresión (γ en kN/m^3)

$$\log \mathrm{JCS} = 0.00088\,\gamma\, r + 1.01 \qquad \text{en MPa}$$

Resistencia al corte usando el criterio de Mohr-Coulomb

$$\begin{aligned} \tau_p &= c + \sigma \tan \phi_p && \text{cortante pico} \\ \tau_r &= \sigma \tan \phi_r && \text{cortante residual} \end{aligned}$$

Resistencia al corte usando el criterio de Patton

$$\tau = \begin{cases} \sigma \tan \phi_p = \sigma \tan\big(\phi_b + i\big) & \sigma \leqslant \text{esfuerzo de transición} \\ c + \sigma \tan \phi_r & \sigma > \text{esfuerzo de transición} \end{cases}$$

Resistencia al corte usando el criterio de Barton-Choubey para $\frac{\text{JCS}}{\sigma} \leqslant 50$

$$\begin{aligned} \tau_p &= \sigma \tan \phi_p = \sigma \tan\big(\phi_r + i\big) = \sigma \tan\left[\phi_r + \text{JRC} \log\left(\frac{\text{JCS}}{\sigma}\right)\right] && \text{cortante pico} \\ \tau_r &= \sigma \tan \phi_r && \text{cortante residual} \end{aligned}$$

Para $\frac{\text{JCS}}{\sigma} > 50$

$$\begin{aligned} \tau_p &= \sigma \tan \phi_p = \sigma \tan\big(\phi_r + i\big) = \sigma \tan\big(\phi_r + 1.7\,\text{JRC}\big) && \text{cortante pico} \\ \tau_r &= \sigma \tan \phi_r && \text{cortante residual} \end{aligned}$$

Ángulo de fricción residual

$$\phi_r = \big(\phi_b - 20\big) + 20\left(\frac{r}{R}\right)$$

Coeficiente de rugosidad de la junta mediante el ensayo de mesa inclinada

$$\text{JRC} = \frac{\alpha - \phi_r}{\log\left(\frac{\text{JCS}}{\sigma}\right)}$$

Para este ensayo el esfuerzo normal es

$$\sigma = \gamma\, h\, \cos^2 \alpha$$

Efecto de escala en la resistencia al corte

$$\begin{aligned} L_0 &= 100\,\text{mm} \\ \text{JRC}_n &= \text{JRC}_0 \left(\frac{L_n}{L_0}\right)^{-0.02\text{JRC}_0} \\ \text{JCS}_n &= \text{JCS}_0 \left(\frac{L_n}{L_0}\right)^{-0.03\text{JRC}_0} \end{aligned}$$

Resistencia al corte a escala real usando el criterio de Barton-Choubey

$$\tau = \sigma \tan\left[\phi_r + \text{JRC}_n \log\left(\frac{\text{JCS}_n}{\sigma}\right) + i\right]$$

Esfuerzo normal y cortante en un plano inclinado

$$\begin{aligned} \sigma &= \sigma_1 \cos^2 \alpha + \sigma_3 \sin^2 \alpha \\ \tau &= \sigma_1 \sin \alpha \cos \alpha + \sigma_3 \sin \alpha \cos \alpha \end{aligned}$$

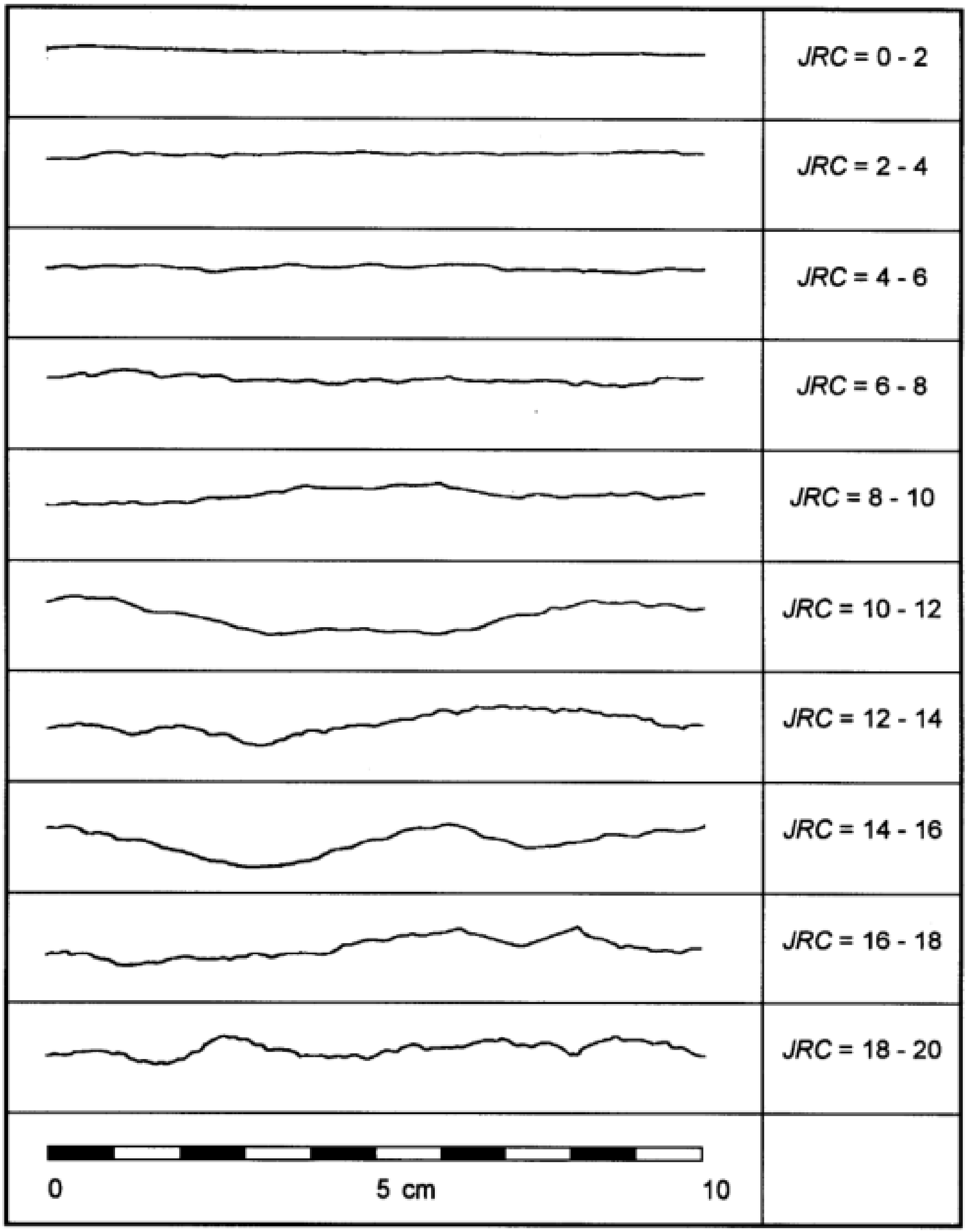

Figura 2: Practical Rock Engineering - Evert Hoek (2007)

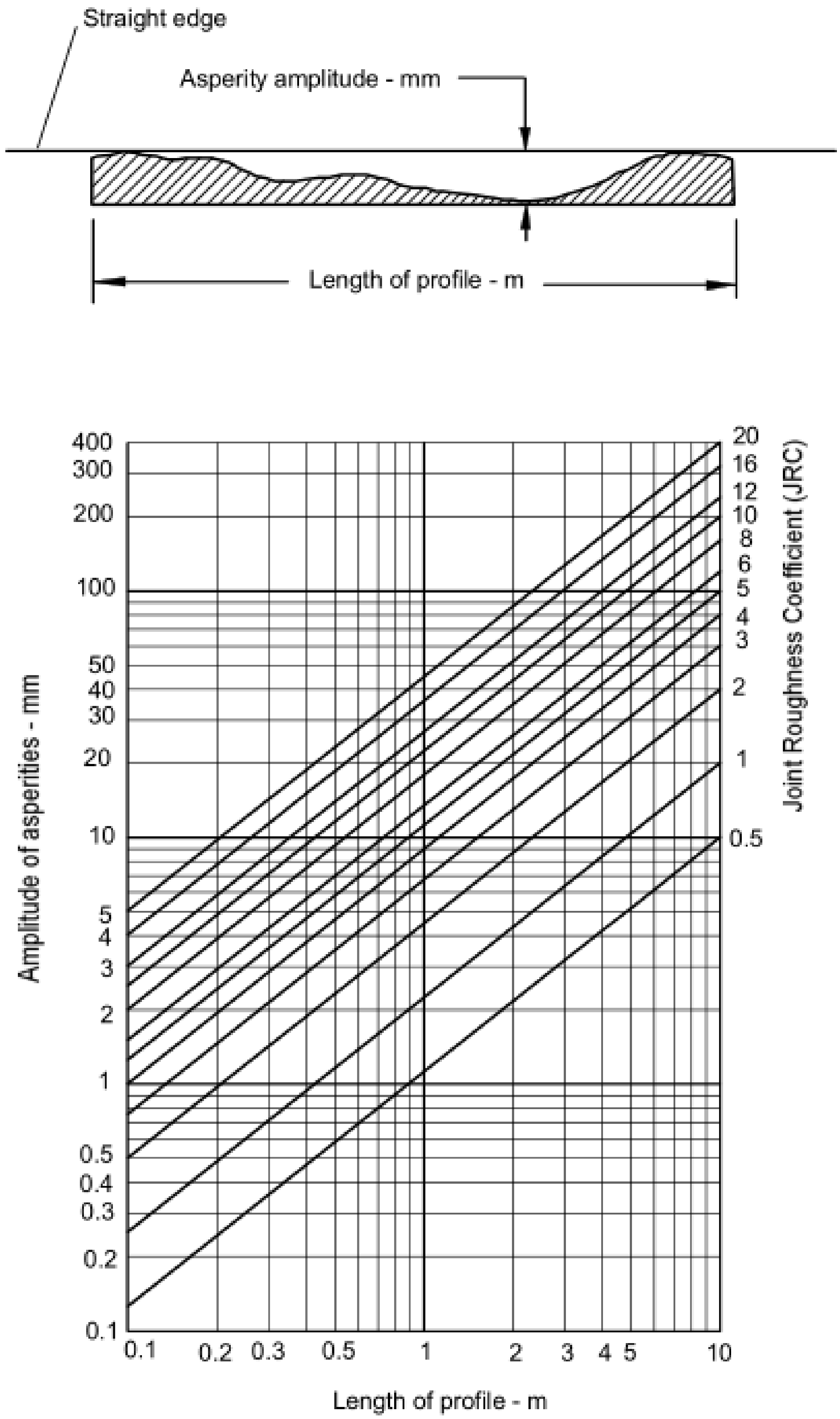

Figura 3: Practical Rock Engineering - Evert Hoek (2007)

Clasificación de macizos rocosos

Índice de calidad de la roca

$$\mathrm{RQD} = \frac{\sum \text{fragmentos} > 10\,\mathrm{cm}}{\text{longitud total}} \times 100\,\%$$

Número de discontinuidades que interceptan $1\,\mathrm{m}^3$

$$J_v = \sum \frac{\text{número de discontinuidades}}{\text{espaciamiento}}$$

Índice de calidad de la roca en función del número de discontinuidades que interceptan $1\,\mathrm{m}^3$

$$\mathrm{RQD} = 110 - 2.5 J_v$$

Frecuencia de discontinuidades

$$\lambda = \frac{\text{número de discontinuidades}}{\text{longitud que interceptan las discontinuidades}} = \frac{1}{\text{espaciamiento medio}}$$

Índice de calidad de la roca en función de la frecuencia de discontinuidades

$$\mathrm{RQD} = 100\, e^{-0.1\lambda}\big(1 + 0.1\lambda\big)$$

Clasificación de Bieniawski o sistema RMR, actualización 1989

$$\mathrm{RMR} = (1) + (2) + (3) + (4) + (5) + (6)$$

Clasificación de Barton o sistema Q, actualización 2015

$$\mathrm{Q} = \frac{\mathrm{RQD}}{J_n} \frac{J_r}{J_a} \frac{J_w}{\mathrm{SRF}}$$

Correlación entre RMR y Q según Bieniawski(1976)

$$\mathrm{RMR} = 9 \ln \mathrm{Q} + 44$$

Correlación entre RMR y Q según Barton(1995)

$$\mathrm{RMR} = 15 \log \mathrm{Q} + 50$$

Correlación entre GSI y RMR, para condiciones secas $(5) = 15$, orientación muy favorable de las discontinuidades $(6) = 0$ y $\mathrm{RMR} \geqslant 23$

$$\mathrm{GSI} = \mathrm{RMR} - 5$$

Propiedades mecánicas del macizo rocoso

Criterio generalizado de Hoek-Brown

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

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

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6}\left[\exp\left(-\frac{\mathrm{GSI}}{15}\right) - \exp\left(-\frac{20}{3}\right)\right]$$

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci}\left(m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s\right)^a$$

Resistencia a la compresión uniaxial y tracción uniaxial

$$\sigma_c = \sigma_{ci}\, s^a$$
$$\sigma_t = -\frac{s\,\sigma_{ci}}{m_b}$$

Resistencia a la compresión, cohesión y ángulo de fricción en el intervalo $\sigma_t < \sigma_3 < \sigma_{3max}$

$$\sigma_{cm} = \sigma_{ci}\frac{\left[m_b + 4s - a\left(m_b - 8s\right)\right]\left(\frac{m_b}{4} + s\right)^{a-1}}{2\left(1+a\right)\left(2+a\right)}$$
$$\sigma_{3max} = \frac{\sigma_{ci}}{4} \qquad \text{En general}$$
$$\frac{\sigma_{3max}}{\sigma_{cm}} = 0.47\left(\frac{\sigma_{cm}}{\gamma H}\right)^{-0.94} \qquad \text{Para túneles}$$
$$\frac{\sigma_{3max}}{\sigma_{cm}} = 0.72\left(\frac{\sigma_{cm}}{\gamma H}\right)^{-0.91} \qquad \text{Para taludes}$$
$$\sigma_{3n} = \frac{\sigma_{3max}}{\sigma_{ci}}$$
$$c = \sigma_{ci}\frac{\left[\left(1+2a\right)s + \left(1-a\right)m_b\,\sigma_{3n}\right]\left(s + m_b\,\sigma_{3n}\right)^{a-1}}{\left(1+a\right)\left(2+a\right)\sqrt{1 + \frac{6a\,m_b\left(s+m_b\,\sigma_{3n}\right)^{a-1}}{\left(1+a\right)\left(2+a\right)}}}$$
$$\phi = \arcsin\left[\frac{6a\,m_b\left(s + m_b\,\sigma_{3n}\right)^{a-1}}{2\left(1+a\right)\left(2+a\right) + 6a\,m_b\left(s + m_b\,\sigma_{3n}\right)^{a-1}}\right]$$

Esfuerzos normales y de corte en función de σ_1 y σ_3 según Balmer(1952)

$$\frac{d\sigma_1}{d\sigma_3} = 1 + a\,m_b\left(m_b\frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s\right)^{a-1}$$
$$\sigma = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} - \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}\left(\frac{\frac{d\sigma_1}{d\sigma_3} - 1}{\frac{d\sigma_1}{d\sigma_3} + 1}\right)$$
$$\tau = \left(\sigma_1 - \sigma_3\right)\left(\frac{\sqrt{\frac{d\sigma_1}{d\sigma_3}}}{\frac{d\sigma_1}{d\sigma_3} + 1}\right)$$

Criterio de Mohr-Coulomb

$$\tau = c + \sigma\tan\phi$$
$$c = \frac{\sigma_{cm}\left(1 - \sin\phi\right)}{2\cos\phi}$$
$$\phi = \arcsin\left(\frac{k-1}{k+1}\right)$$

Criterio de Mohr-Coulomb en función de σ_1 y σ_3

$$\sigma_1 = \sigma_{cm} + k\,\sigma_3$$
$$\sigma_{cm} = \frac{2\cos\phi}{1 - \sin\phi}$$
$$k = \frac{1 + \sin\phi}{1 - \sin\phi}$$

Modulo de elasticidad del macizo rocoso en MPa según Hoek y Diederichs (2006)

$$E_{rm} = E_i \left[0.02 + \frac{1 - \frac{D}{2}}{1 + \exp\left(\frac{60+15D-\text{GSI}}{11}\right)} \right]$$
$$E_{rm} = 10^5 \left[\frac{1 - \frac{D}{2}}{1 + \exp\left(\frac{75+25D-\text{GSI}}{11}\right)} \right]$$

Modulo de elasticidad del macizo rocoso en GPa según Hoek, Carranza-Torres y Corkum (2002)

$$E_{rm} = \begin{cases} \left(1 - \frac{D}{2}\right)\sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}}10^{\frac{\text{GSI}-10}{40}} & \sigma_{ci} \leqslant 100 \text{ MPa} \\ \left(1 - \frac{D}{2}\right)10^{\frac{\text{GSI}-10}{40}} & \sigma_{ci} > 100 \text{ MPa} \end{cases}$$