

# Resistencia al Cizalle de Discontinuidades en Roca

CI52T

Mecánica de Rocas en Obras de Ingeniería

Sergio Sepúlveda

- Experimentalmente, se encuentra que la resistencia al corte entre superficies lisas de mineral o roca, sigue una ley linear del tipo:

$$\tau = S_0 + \mu \sigma \quad (\text{Jaeger, 1959})$$

$S_0$ : Resistencia inherente a la superficie de contacto, equivalente a la cohesión en mecánica de suelos.

$\sigma$ : esfuerzo normal a la superficie.

$\mu$ : coeficiente de fricción.

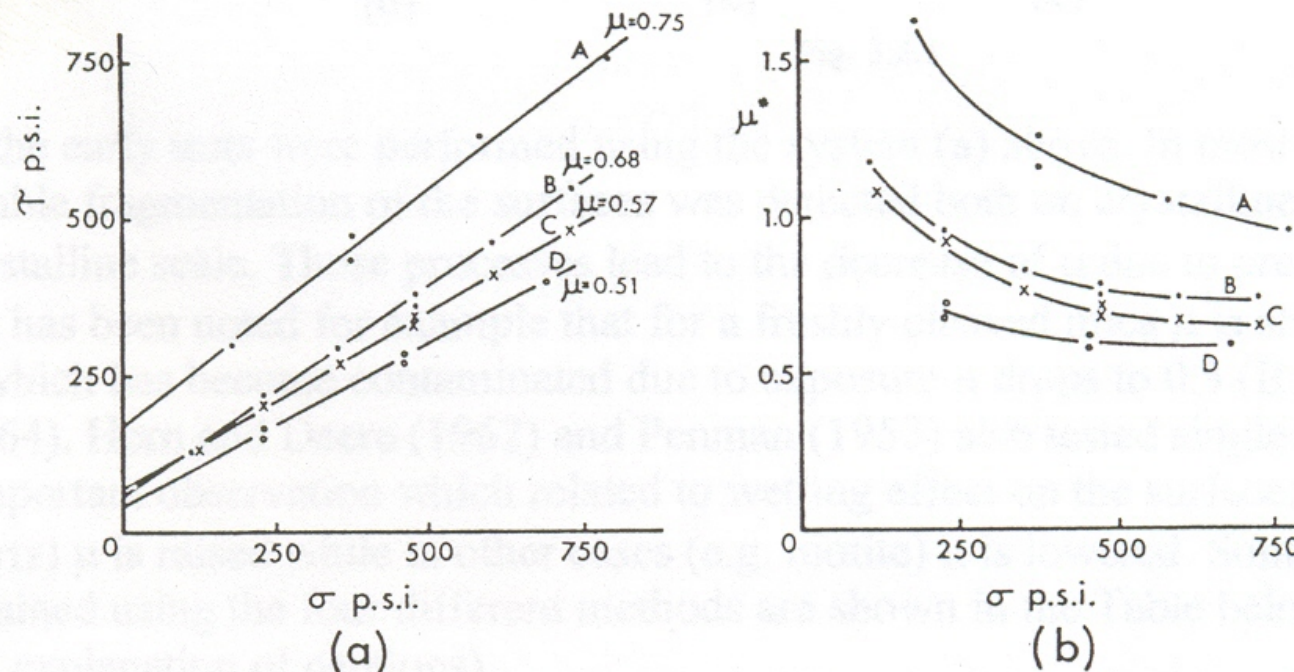


Fig. 3.3.3 (a) Shear stress  $\tau$  plotted against normal stress  $\sigma$  for various sliding surfaces. (b)  $\mu^* = \tau/\sigma$  plotted against  $\sigma$  for the same experiments. A: Marble. B: Trachyte. C: Trachyte with smoother surface. D: Sandstone.

- El coeficiente de fricción no es constante, a bajo esfuerzo normal suele ser mayor. También influye la humedad.

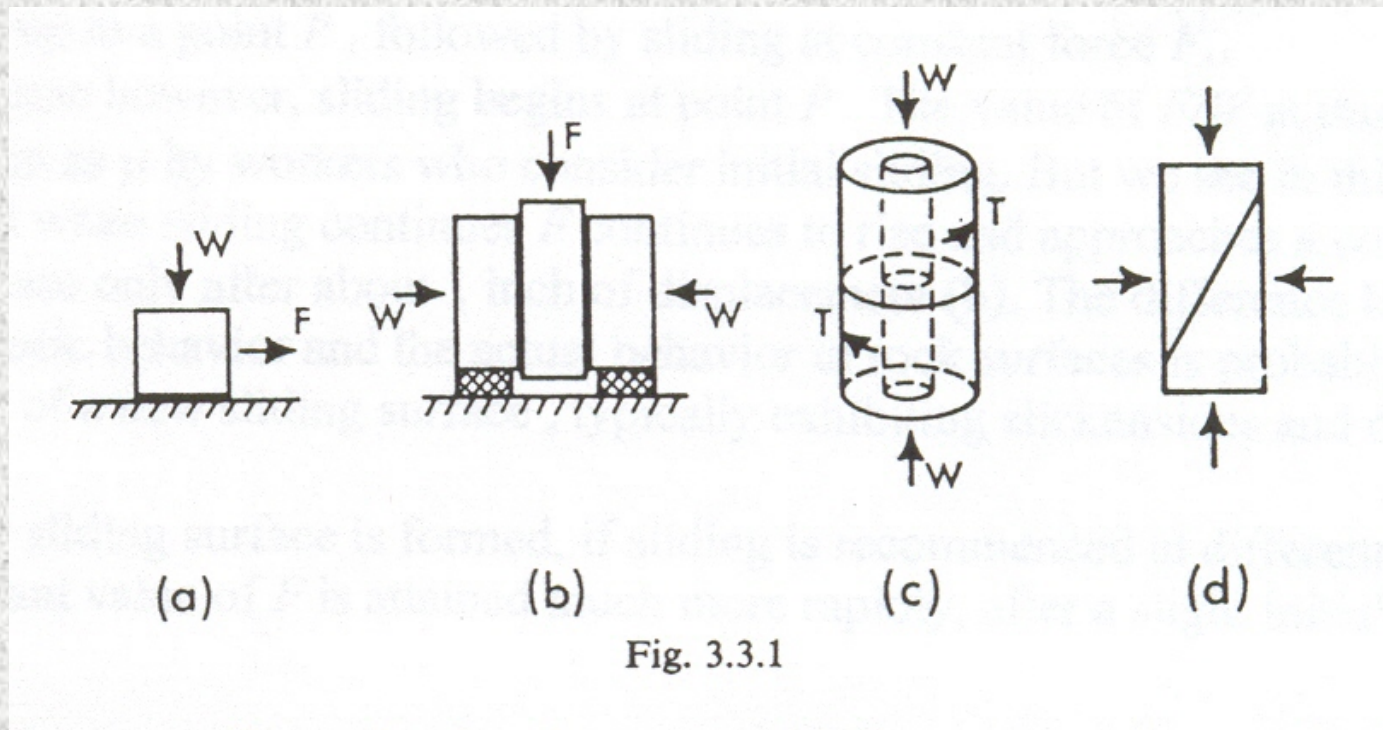
| Minerals                                | $\mu$ | Minerals          | $\mu$ | $\mu$ (wet) |
|-----------------------------------------|-------|-------------------|-------|-------------|
| Na Cl, [B; s]                           | 0.7   | Quartz, [HD]      | 0.11  | 0.42        |
| Pb S, [B; s]                            | 0.6   | Quartz, [P]       | 0.19  | 0.65        |
| S, [B; s]                               | 0.5   | Feldspar, [HD]    | 0.11  | 0.46        |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , [B; s] | 0.4   | Calcite, [HD]     | 0.14  | 0.68        |
| Ice, [B; s]                             | 0.5   | Muscovite, [H, D] | 0.43  | 0.23        |
| Glass, [B; s]                           | 0.7   | Biotite, [HD]     | 0.31  | 0.13        |
| Diamond, [B; s]                         | 0.1   | Serpentine, [HD]  | 0.62  | 0.29        |
| Diamond, [B; s; c]                      | 0.3   | Talc, [HD]        | 0.36  | 0.16        |

| Rocks                     |      | Rocks                  |      |
|---------------------------|------|------------------------|------|
| Sandstone, [R]            | 0.68 | Dolomite, [HS; t; g]   | 0.4  |
| Sandstone, [J; t; n]      | 0.52 | Trachyte, [H; l; p]    | 0.63 |
| Sandstone, [H; l; r]      | 0.51 | Trachyte, [H; l; g]    | 0.68 |
| Sandstone, [H; l; r; w]   | 0.61 | Trachyte, [H; l; g; w] | 0.56 |
| Granite, [By; t; n; g]    | 0.60 | Marble, [H; l; p]      | 0.75 |
| Granite, [By; t; n; g; w] | 0.60 | Marble, [J; t; n]      | 0.62 |
| Granite, [H; l; g]        | 0.64 | Porphyry, [J; t; n]    | 0.86 |
| Quartzite, [W; t; g]      | 0.48 | Gneiss, [J; t; n]      | 0.71 |
| Quartzite, [W; t; n]      | 0.67 | Gneiss, [J; t; n; w]   | 0.61 |
| Dolerite, [W; t; g]       | 0.64 | Gabbro, [H; l; p]      | 0.18 |
| Dolerite, [W; t; n]       | 0.95 | Gabbro, [H; l; g]      | 0.66 |

- En el caso estático,  $\tau$  representa la resistencia para iniciar a deslizar. Sin embargo, cuando hay deslizamiento a velocidad constante, el coeficiente de fricción es distinto al estático, típicamente menor y depende de la velocidad de deslizamiento.

# Determinación experimental de la resistencia al corte

- a) Ensayos de corte directo (varios tipos)
- b) Ensayo de bloques simétricos.
- c) Ensayo de torsión.
- d) Ensayos triaxiales.



# Criterio de Falla

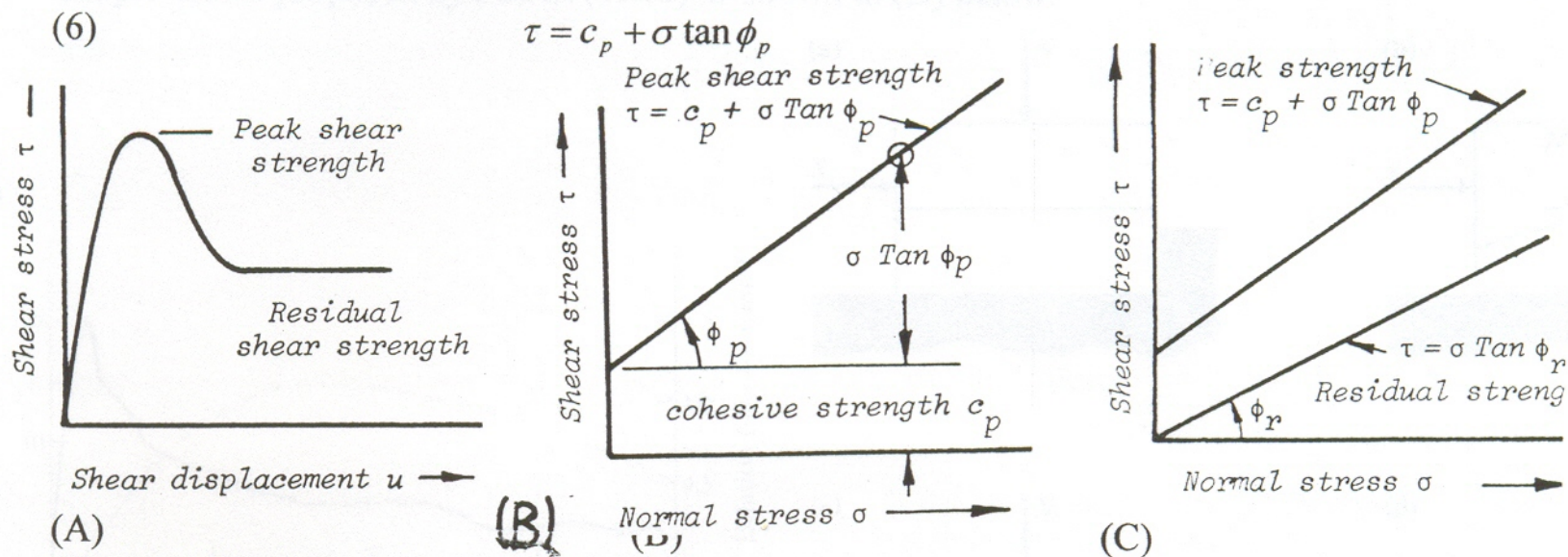
- Típicamente, una curva esfuerzo de corte vs. desplazamiento en una superficie planar tendrá un peak y luego una resistencia residual (Fig. A). Una serie de ensayos resulta en una envolvente de fractura del tipo Mohr-Coulomb:

$$\tau = c_p + \sigma \tan \phi_p,$$

Resistencia peak

$$\tau = \sigma \tan \phi_r$$

Resistencia residual



# Influencia del agua

- Si la discontinuidad está húmeda, la resistencia puede disminuir por la lubricación producida en la superficie.
- Dependiendo del material, la incorporación de agua en la roca puede a su vez producir cambios en los valores de  $c$  y  $\phi$ . En especial en rocas con alto contenido de arcillas.
- Si hay una presión de agua (ej. hidrostática), entonces el esfuerzo normal se reduce a un esfuerzo efectivo y

$$\tau = c + (\sigma - u) \tan \phi$$

# Influencia de la rugosidad

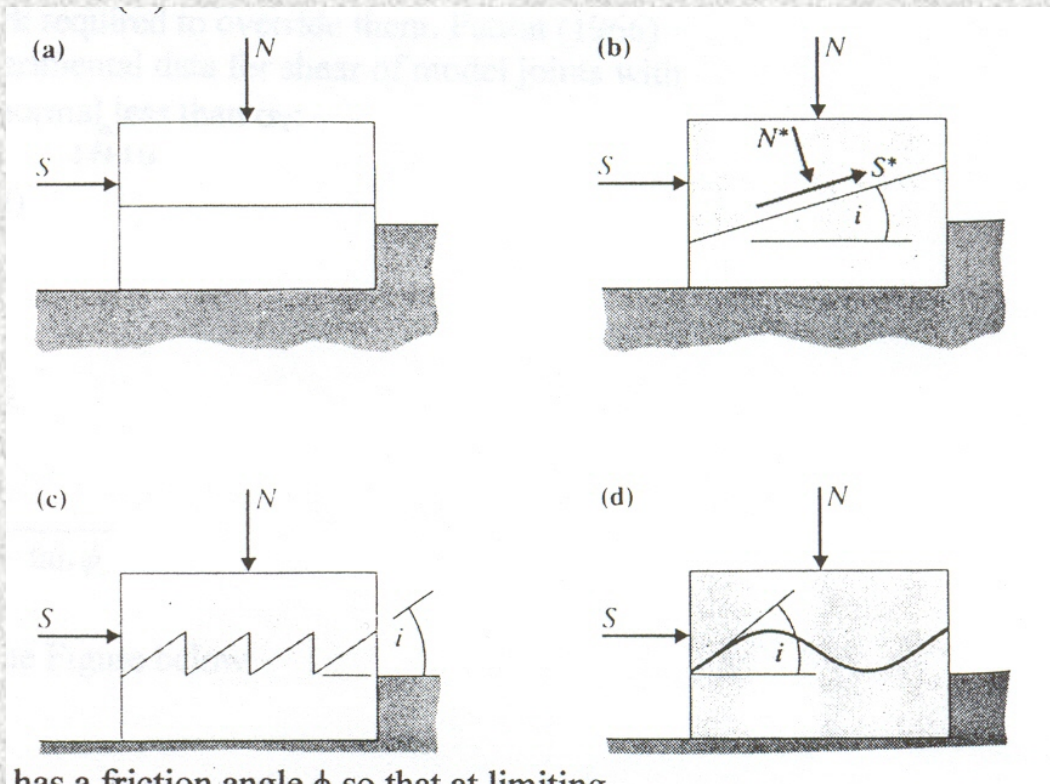
- Las discontinuidades naturales no son lisas, sino presentan asperidades. Una discontinuidad rugosa tendrá una resistencia al cizalle mayor que una lisa en la misma roca. Al cizallarse, las asperidades se irán a su vez puliendo y la resistencia se aproximará a la de la superficie lisa.

# Modelo de Patton

- Patton (1966) modeló una discontinuidad con asperidades, usando un ángulo único que representa la asperidad. Los componentes de las fuerzas de corte y normal se pueden expresar como:

$$S^* = S \cos i - N \sin i;$$

$$N^* = N \cos i + S \sin i$$



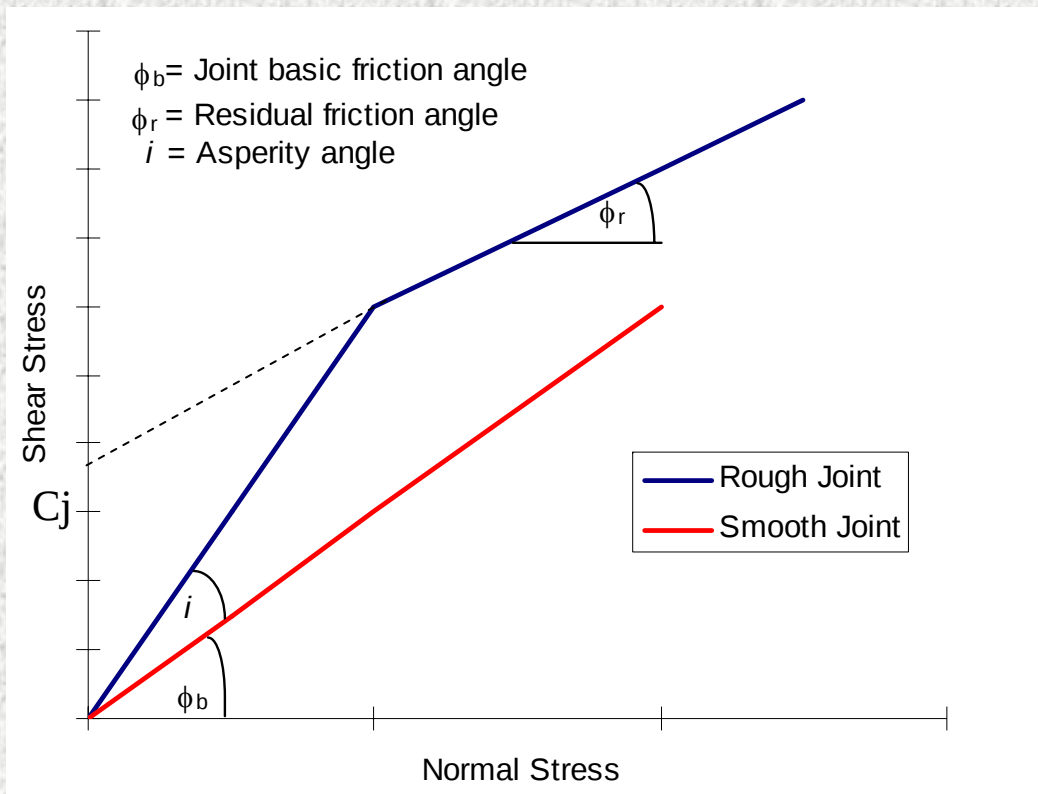
has a friction angle  $\phi$  so that at limiting

- Asumiendo solo fricción, se puede probar que la relación de fuerzas normal y de corte en la discontinuidad es:

$$S = N \tan (\phi + i) \text{ (Ley de Patton)}$$

- El efecto de las asperidades se mantiene solo con esfuerzos normales bajo un cierto umbral sobre el cual el trabajo requerido para cizallar las asperidades es menor que el trabajo requerido para sobrepasarlas.

# Criterio Bilinear de Patton

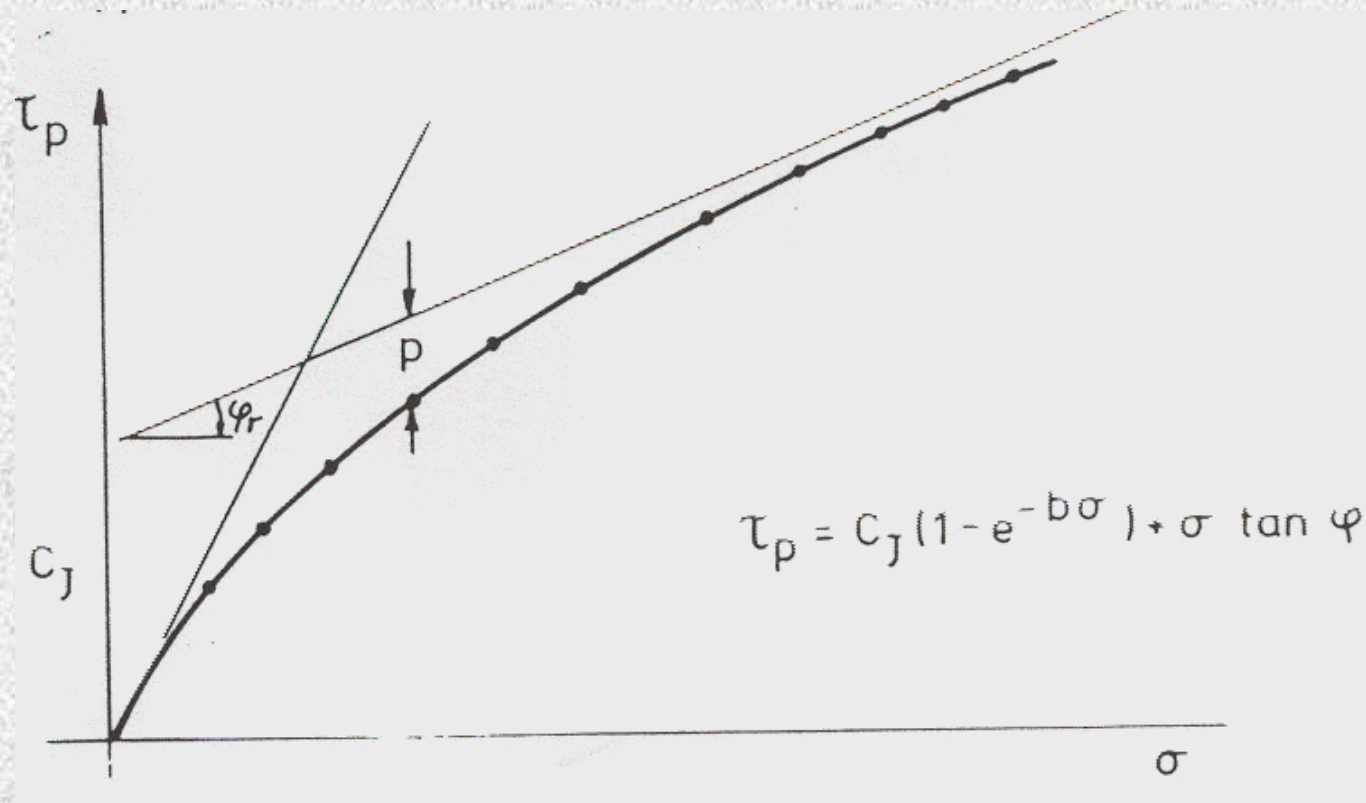


- Bajo el umbral,  
 $\tau_p = \sigma \tan (\phi_b + i)$
- Sobre el umbral,  
 $\tau_p = C_j + \sigma \tan \phi_r$

$\phi_b$ : Angulo de fricción interna puro o básico del material

$C_j$ : Cohesión aparente derivada de las asperidades

- Otros estudios han intentado “suavizar” la curva bilinear de Patton, basados en modelos experimentales. Ej: Jaeger (1971)



# Modelo de Barton-Bandis

- En un modelo empírico, Barton (1976) determinó la resistencia al corte de las discontinuidades como:

$$\tau = \sigma_n \tan [\text{JRC} \log_{10} (\text{JCS}/\sigma_n) + \phi_b]$$

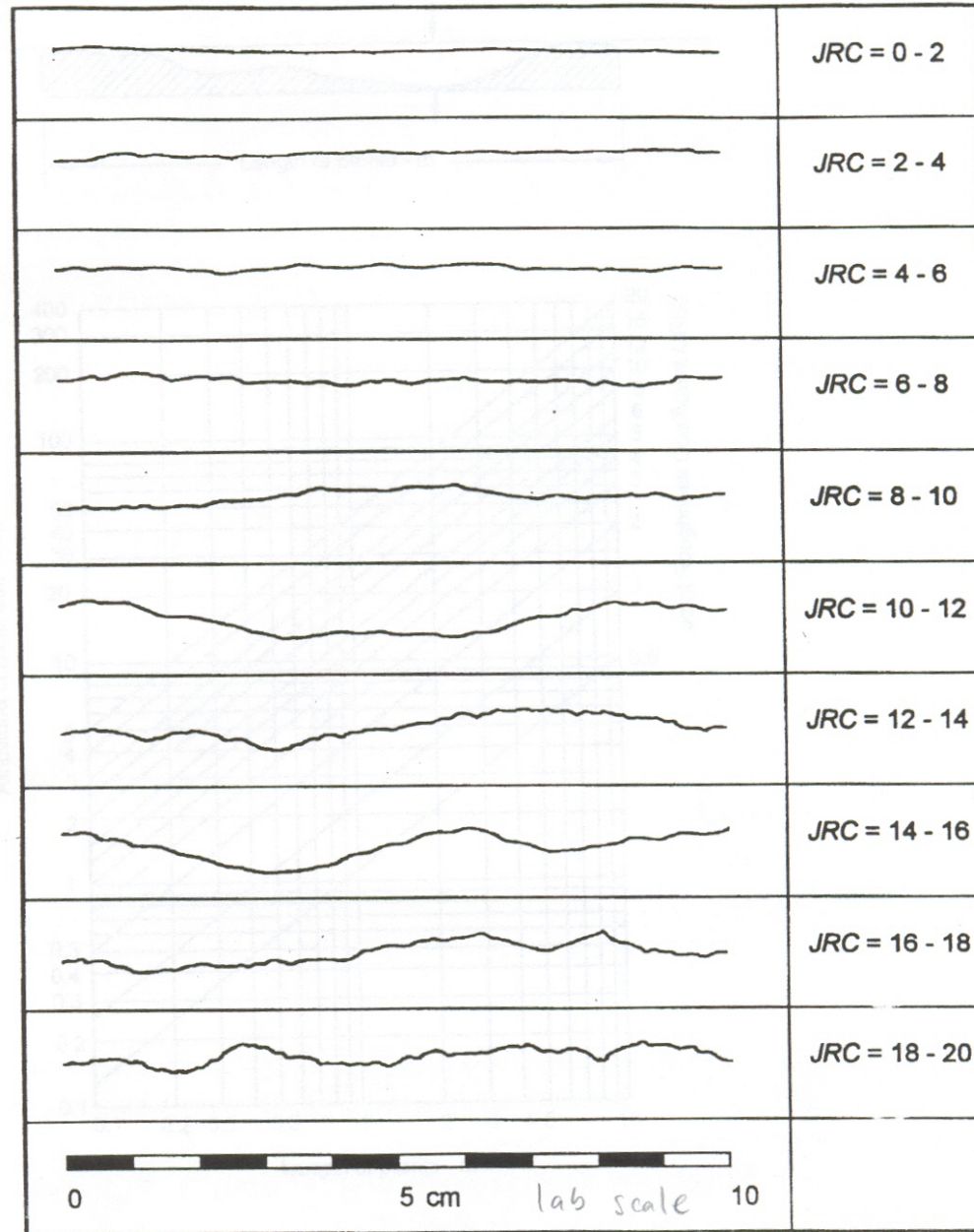
El modelo considera cambios en la resistencia con el esfuerzo normal y la rugosidad. Efectos de cohesión aparente están incorporados en la fórmula.

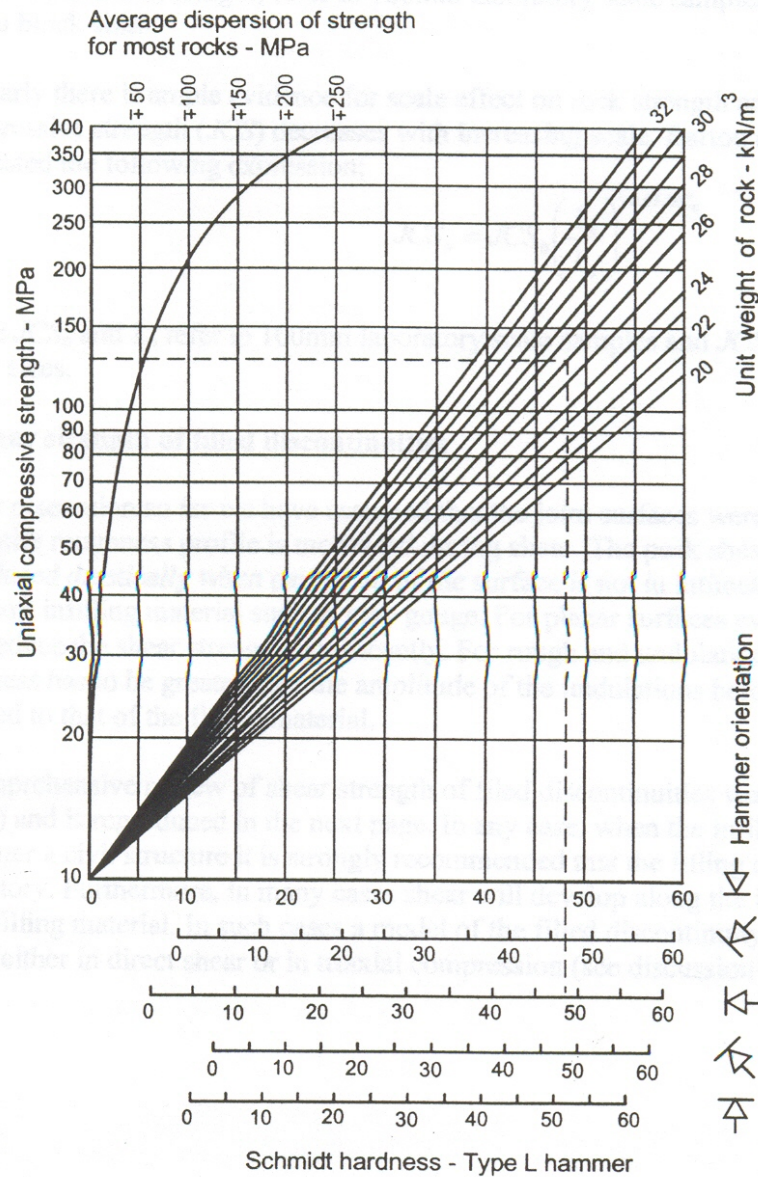
$$\tau = \sigma_n \tan [\text{JRC} \log_{10} (\text{JCS}/\sigma_n) + \phi_b]$$

- **JRC: Joint Roughness Coefficient.**
- **JCS: Joint Compressive Strength.**
- JRC: Expresión del nivel de rugosidad de la discontinuidad, se obtiene por comparación con una tabla. Hay correcciones por efectos de escala.
- JCS: Resistencia de la discontinuidad, se puede obtener de ensayos con martillo de Schmidt. Si la pared es fresca, JCS es similar a compresión uniaxial de la roca (UCS).

# JRC

(Barton & Choubey, 1977)



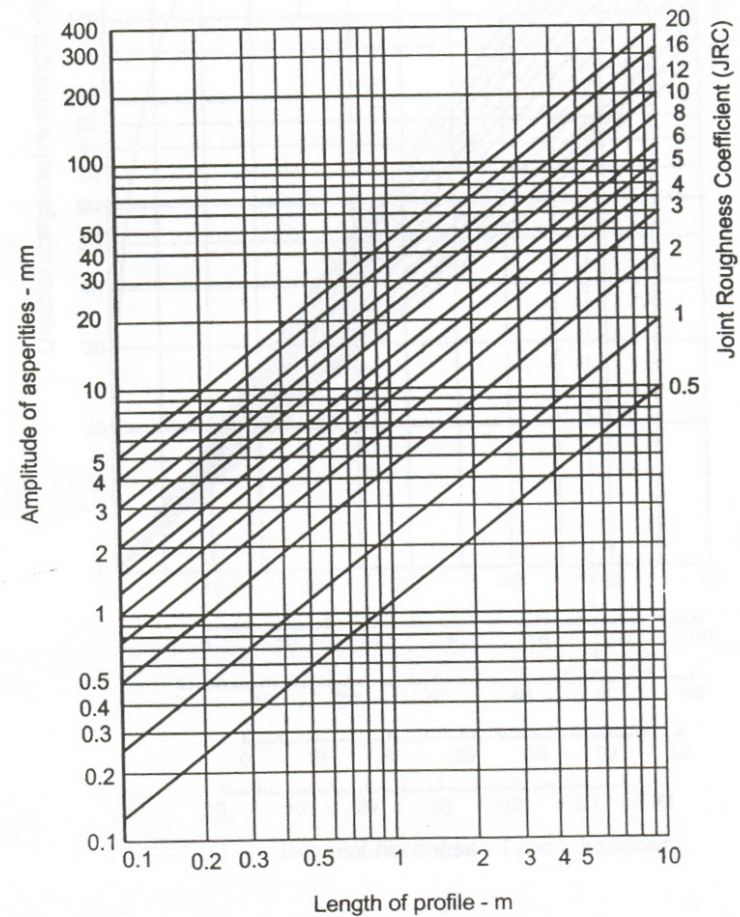
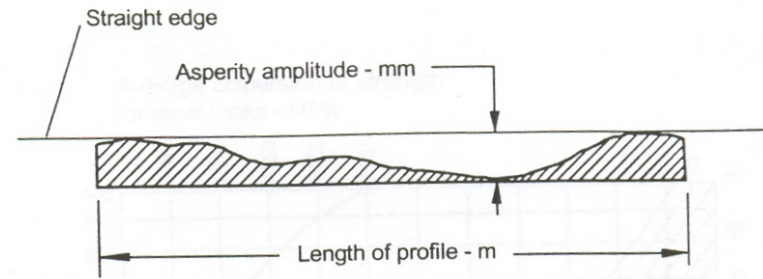


# Cálculo de JCS con Martillo de Schmidt



# Efectos de escala en JRC

(Barton, 1982)



# Ajustes de escala JRC y JCS

- Barton & Bandis (1982) propusieron los siguientes ajustes:

$$JRC_n = JRC_0 \left( \frac{L_n}{L_0} \right)^{-0,02 JRC_0}$$

$$JCS_n = JCS_0 \left( \frac{L_n}{L_0} \right)^{-0,03 JRC_0}$$

Donde  $JRC_n$ ,  $JCS_n$  se refieren a muestras in situ para bloques de tamaño  $L_n$ , y  $JRC_0$ ,  $JCS_0$  se refieren a muestras de laboratorio de tamaño 100 mm ( $L_0$ ).

# Relleno

- La presencia del relleno gobierna el comportamiento de la discontinuidad, por lo que deben ser reconocido.
- Las características que deben ser descritas son: su naturaleza, espesor o anchura, resistencia al corte y permeabilidad
- Rellenos comunes: arcillas, óxidos de hierro, salbanda de falla, suelos, calcita.

# Efectos del relleno

- Si la discontinuidad está rellena por materiales blandos (ej: arcillas) y el espesor del relleno es superior a la amplitud de las asperidades, la resistencia pasa a ser controlada por el material de relleno, pudiendo bajar drásticamente.

Table 1: Shear strength values of filled discontinuities and filling material (After Barton, 1974)

| Rock                                      | Description                                                                                                                        | Peak<br>$c'$ (MPa)             | Peak<br>$\phi^\circ$ | Residual<br>$c'$ (MPa) | Residual<br>$\phi^\circ$ |
|-------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|----------------------|------------------------|--------------------------|
| Basalt                                    | Clayey basaltic breccia, wide variation from clay to basalt content                                                                | 0.24                           | 42                   |                        |                          |
| Bentonite                                 | Bentonite seam in chalk<br>Thin layers<br>Triaxial tests                                                                           | 0.015<br>0.09-0.12<br>0.06-0.1 | 7.5<br>12-17<br>9-13 |                        |                          |
| Bentonitic shale                          | Triaxial tests<br>Direct shear tests                                                                                               | 0-0.27                         | 8.5-29               | 0.03                   | 8.5                      |
| Clays                                     | Over-consolidated, slips, joints and minor shears                                                                                  | 0-0.18                         | 12-18.5              | 0-0.003                | 10.5-16                  |
| Clay shale                                | Triaxial tests<br>Stratification surfaces                                                                                          | 0.06                           | 32                   | 0                      | 19-25                    |
| Coal measure rocks                        | Clay mylonite seams, 10 to 25 mm                                                                                                   | 0.012                          | 16                   | 0                      | 11-11.5                  |
| Dolomite                                  | Altered shale bed, $\pm$ 150 mm thick                                                                                              | 0.04                           | 14.5                 | 0.02                   | 17                       |
| Diorite, granodiorite and porphyry        | Clay gouge (2% clay, PI = 17%)                                                                                                     | 0                              | 26.5                 |                        |                          |
| Granite                                   | Clay filled faults<br>Sandy loam fault filling<br>Tectonic shear zone, schistose and broken granites, disintegrated rock and gouge | 0-0.1<br>0.05<br>0.24          | 24-45<br>40<br>42    |                        |                          |
| Greywacke                                 | 1-2 mm clay in bedding planes                                                                                                      |                                |                      | 0                      | 21                       |
| Limestone                                 | 6 mm clay layer<br>10-20 mm clay fillings<br><1 mm clay filling                                                                    | 0.1<br>0.05-0.2                | 13-14<br>17-21       | 0                      | 13                       |
| Limestone, marl and lignites              | Interbedded lignite layers<br>Lignite/marl contact                                                                                 | 0.08<br>0.1                    | 38<br>10             |                        |                          |
| Limestone                                 | Marlaceous joints, 20 mm thick                                                                                                     | 0                              | 25                   | 0                      | 15-24                    |
| Lignite                                   | Layer between lignite and clay                                                                                                     | 0.014-0.03                     | 15-17.5              |                        |                          |
| Montmorillonite<br>Bentonite clay         | 80 mm seams of bentonite (montmorillonite) clay in chalk                                                                           | 0.36<br>0.016-0.02             | 14<br>7.5-11.5       | 0.08                   | 11                       |
| Schists, quartzites and siliceous schists | 100-15- mm thick clay filling<br>Stratification with thin clay<br>Stratification with thick clay                                   | 0.03-0.08<br>0.61-0.74<br>0.38 | 32<br>41<br>31       |                        |                          |
| Slates                                    | Finely laminated and altered                                                                                                       | 0.05                           | 33                   |                        |                          |
| Quartz / kaolin / pyrolusite              | Remoulded triaxial tests                                                                                                           | 0.042-0.09                     | 36-38                |                        |                          |