

Diseño geotécnico de taludes

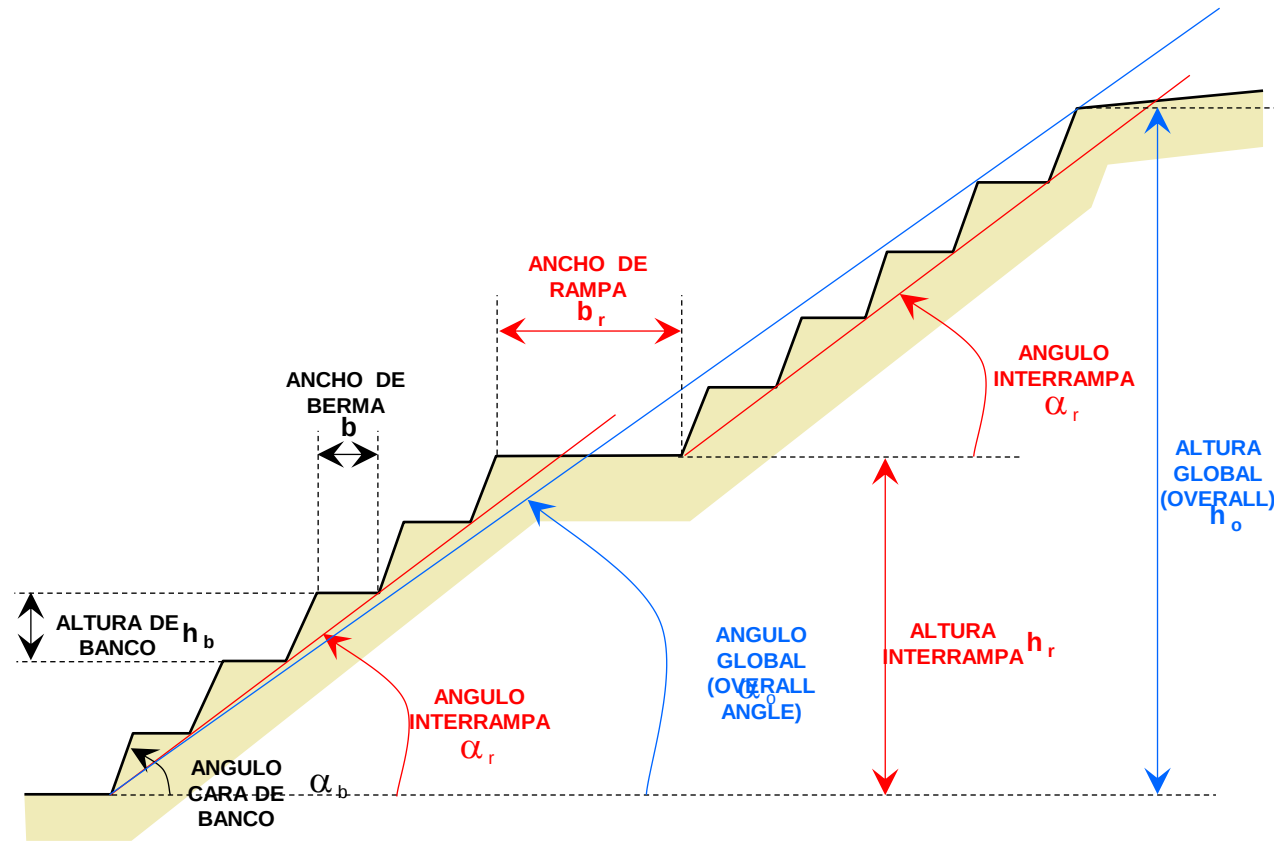
Análisis cinemático estructural

Javier Vallejos

Octubre 2024

Componentes geométricas de un talud minero

- Cada una de estas componentes debe ser diseñada por separado
- Diferentes Mecanismos de inestabilidades dominarán a escalas distintas



Componentes geométricas de un talud minero

- **Angulo global:**
Incorpora todas las rampas y bancos. Puede variar en altura y alrededor del pit dependiendo de las condiciones del talud.
- **Angulo inter-rampa:**
Depende del número de rampas y sus anchos
- **Angulo de banco:**
Depende del espaciamiento vertical entre bancos y el ancho de los bancos para contener desprendimientos de roca

Aumento del ángulo

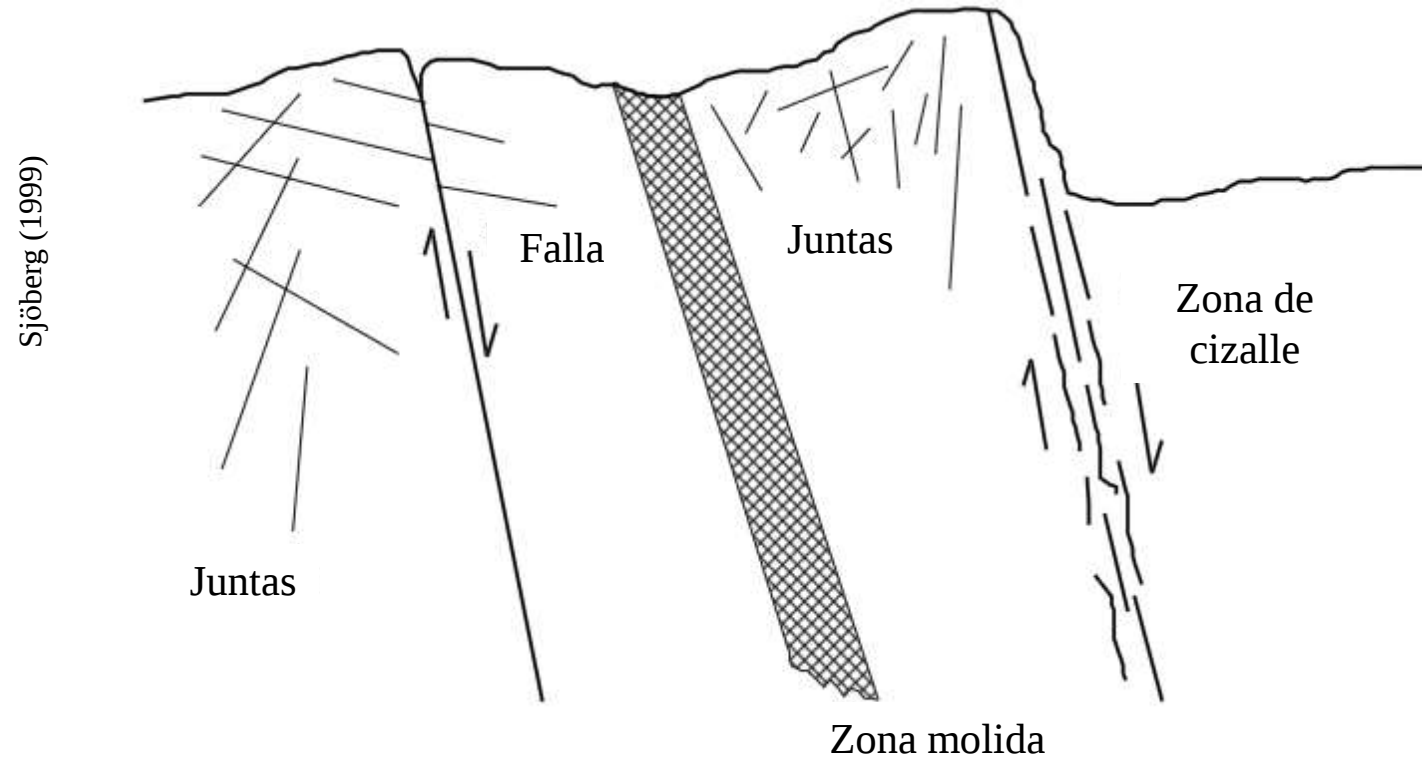


Factores que afectan la estabilidad de taludes

- Estructuras geológicas
- Esfuerzos y condiciones de agua
- Resistencia de discontinuidades y roca intacta
- Geometría del pit, ángulos de taludes y curvatura
- Vibraciones y tronadura, o eventos sísmicos
- Condiciones climáticas
- Tiempo

Stacey, T. R. (1968). Stability of rock slopes in open pit mines. National Mechanical Engineering Research Institute. Council for Scientific and Industrial Research (CSIR), Report MEG 737, Pretoria, South Africa.

Estructuras geológicas-efecto escala

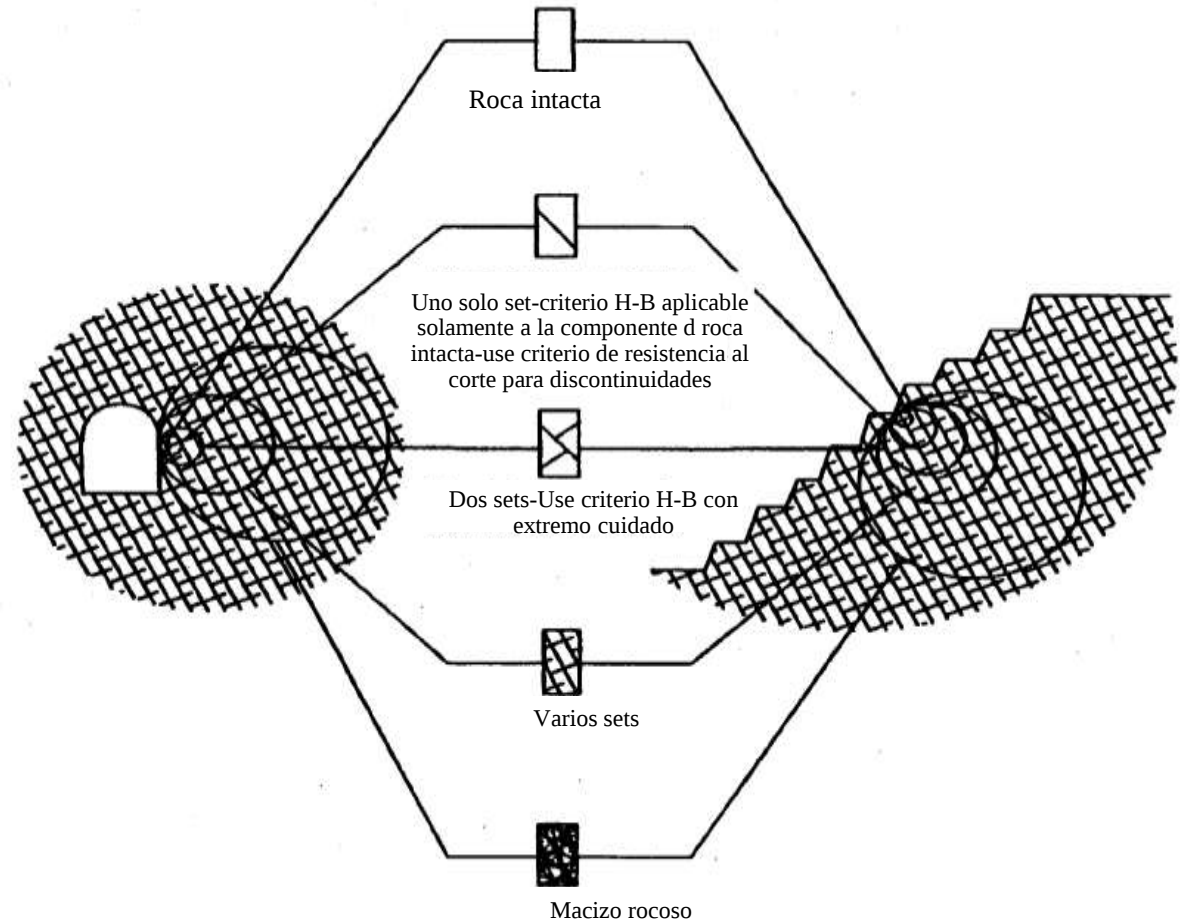


- Aproximadamente la misma escala que las dimensiones del talud (ej: fallas)
- Discontinuidades a escala menor (fábrica del macizo rocoso)

Sjöberg, J. (1996). Large scale slope stability in open pit mining—A review (Technical Report 1996:10T). Division of Rock Mechanics, Luleå University of Technology, Sweden.

Estructuras geológicas-efecto escala

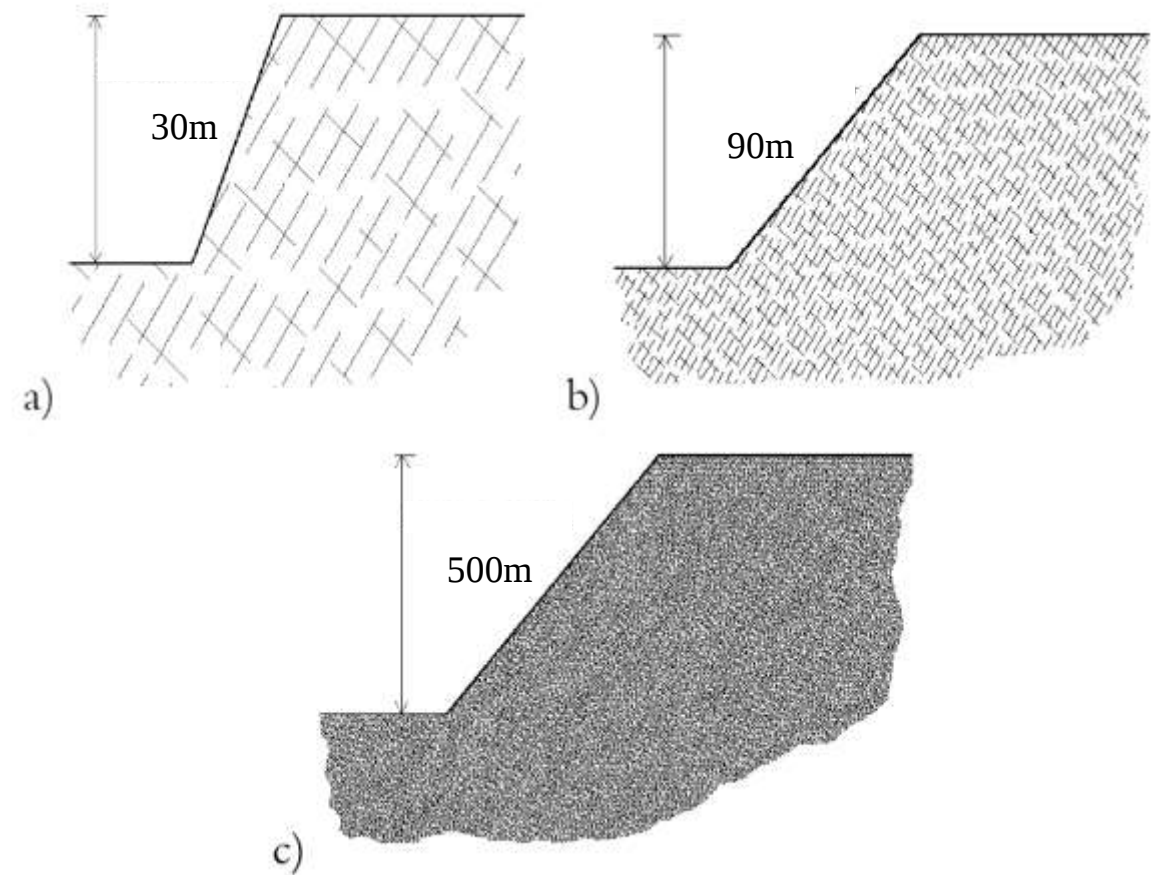
El efecto escala en el macizo rocoso influye en como la resistencia del material es determinada.



Hoek, E., Kaiser, P. K., & Bawden, W. F. (1995). Support of underground excavations in hard rock. Rotterdam: A. A. Balkema.

Estructuras geológicas-efecto escala

Dos sistemas de discontinuidades con espaciamiento y dip fijos, RQD = 100%



Sjöberg, J. (1996). Large scale slope stability in open pit mining—A review (Technical Report 1996:10T). Division of Rock Mechanics, Luleå University of Technology, Sweden.

Mecanismos de inestabilidades

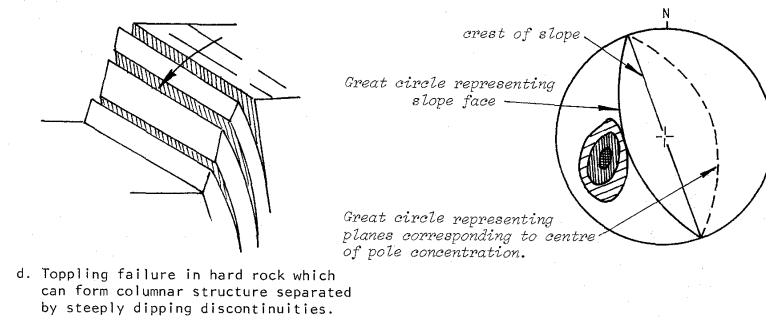
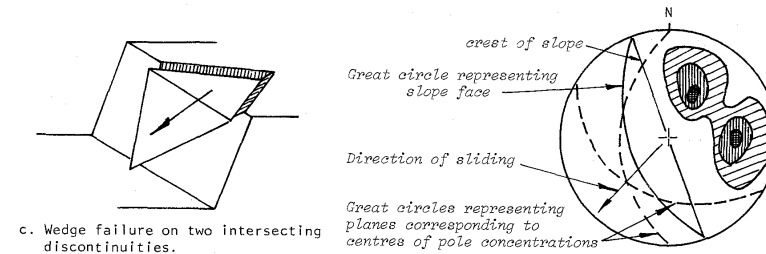
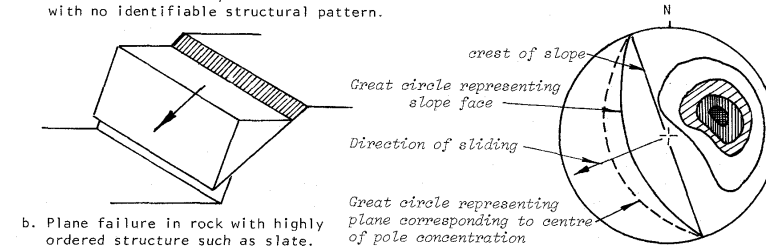
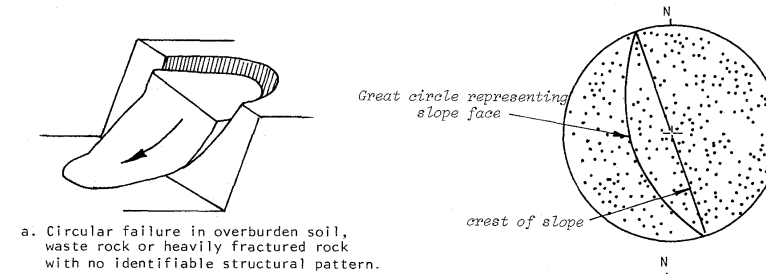
Los principales mecanismos de inestabilidades que pueden ocurrir en los taludes del pit son:

- Plana
- Cuña
- Volcamiento (Toppling)
- Circular
- Caídas de rocas
- Combinaciones (cuña no aflorante, circular-planar)

Mecanismos de inestabilidades

PROYECCIONES ESTEREOGRÁFICAS DE LOS PRINCIPALES MECANISMOS DE FALLA EN TALUDES

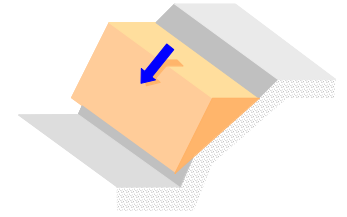
Sin control estructural



Con control estructural

Mecanismos de inestabilidades

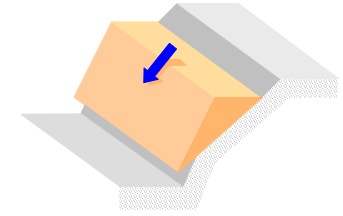
Falla plana



- Fallamiento Planar
- Escala talud bancos
- Ángulo interrampa 52°

Mecanismos de inestabilidades

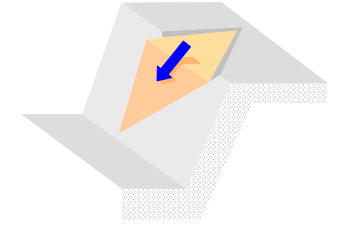
Falla plana



- Fallamiento Planar,
- Escala talud inter-rampa (16 bancos)
- El plano de deslizamiento corresponde al plano principal de estratificación

Mecanismos de inestabilidades

Falla por cuña



- Fallamiento tipo cuña
- Escala talud inter-rampa

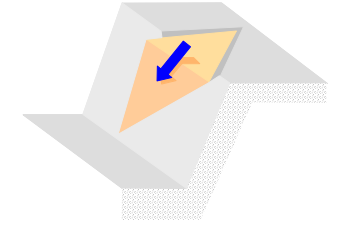


- Fallamiento tipo Cuña, con mala calidad de macizo rocoso
- Escala talud inter-rampa
- Angulo interrampa 45°

Read, J., & Stacey, P. (Eds.). (2009). Guidelines for open pit slope design. CSIRO Publishing.

Mecanismos de inestabilidades

Falla por cuña



- Cuña removida durante la construcción de un talud en roca
- Escala banco

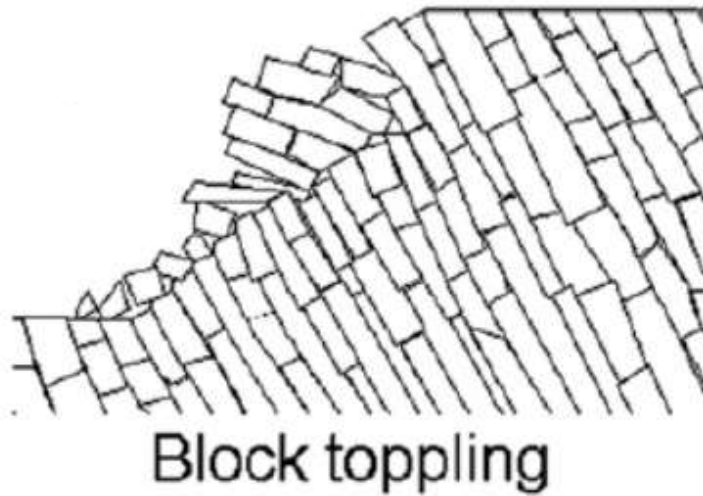
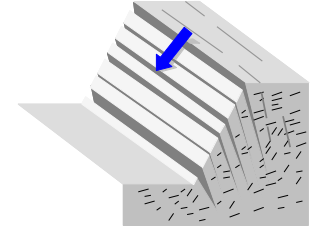


- Fallamiento tipo cuña
- Escala banco

Harrison, J.P. and Hudson, J. (2000). Engineering Rock Mechanics Part II. Illustrative Worked Examples.

Mecanismos de inestabilidades

Volcamiento primario

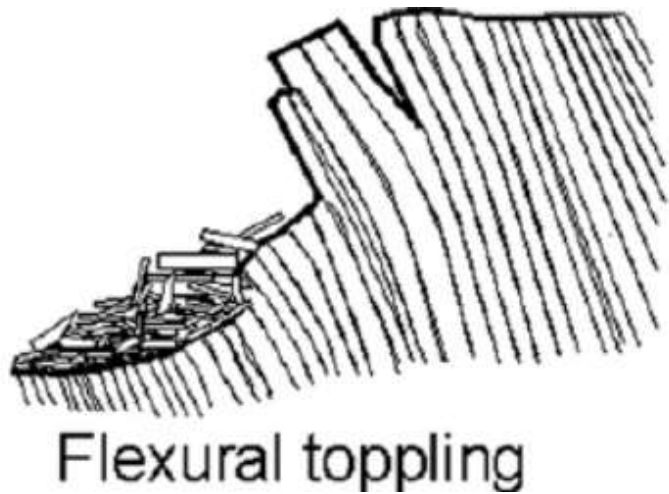
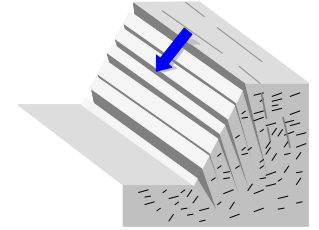


- Volcamiento de bloques
- Escala banco

Alejano, L. R., Gómez-Márquez, I., & Martínez-Alegría, R. (2010). Analysis of a complex toppling-circular slope failure. *Engineering Geology*, 114, 93-104. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2010.04.008>

Mecanismos de inestabilidades

Volcamiento primario

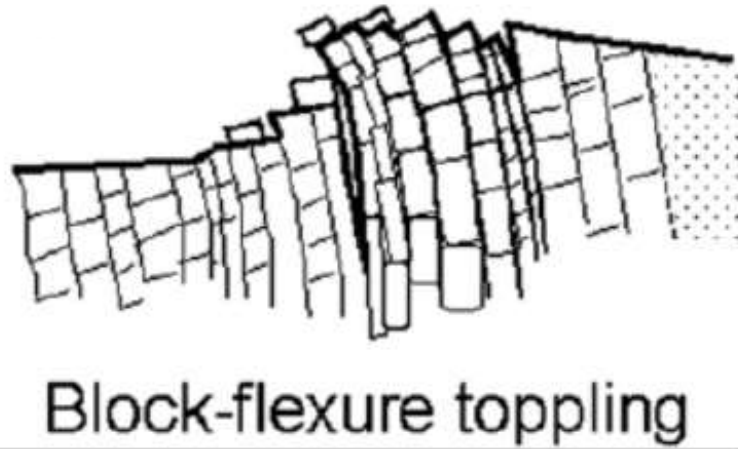
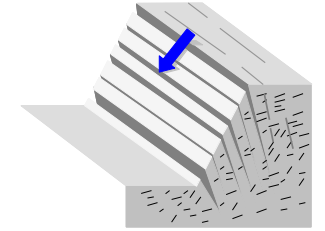


- Volcamiento por flexión
- Escala banco

Read, J., & Stacey, P. (Eds.). (2009). Guidelines for open pit slope design. CSIRO Publishing.

Mecanismos de inestabilidades

Volcamiento primario

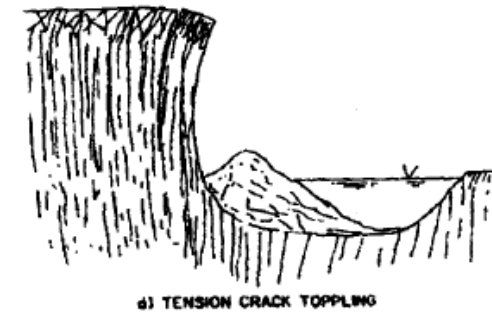
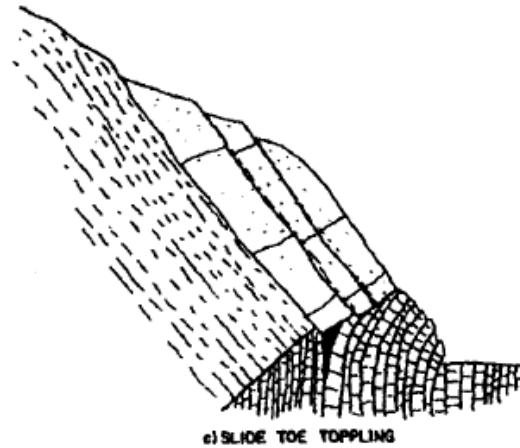
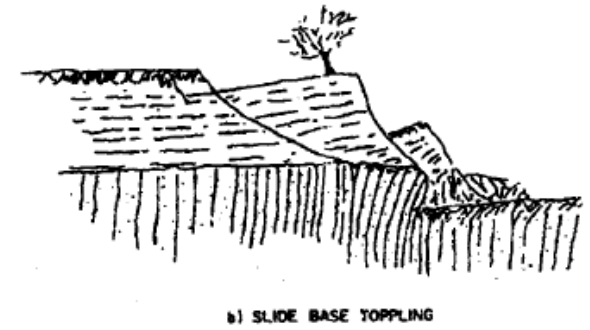
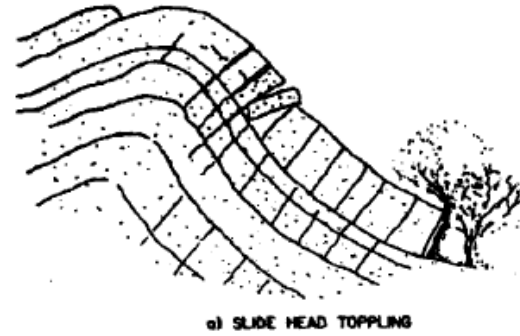


- Volcamiento por flexión de bloques

Alejano, L. R., Gómez-Márquez, I., & Martínez-Alegría, R. (2010). Analysis of a complex toppling-circular slope failure. Engineering Geology, 114, 93-104. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2010.04.008>

Mecanismos de inestabilidades

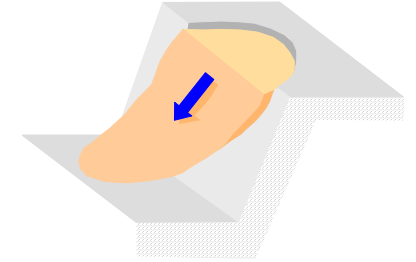
Volcamiento secundario



Goodman, R. E., & Bray, J. W. (1986). Toppling of rock slopes. In Rock engineering for foundations and slopes: ASCE Specialty Conference (Boulder, August 15-18, 1976), Vol. 2, pp. 201-234.

Mecanismos de inestabilidades

Falla circular



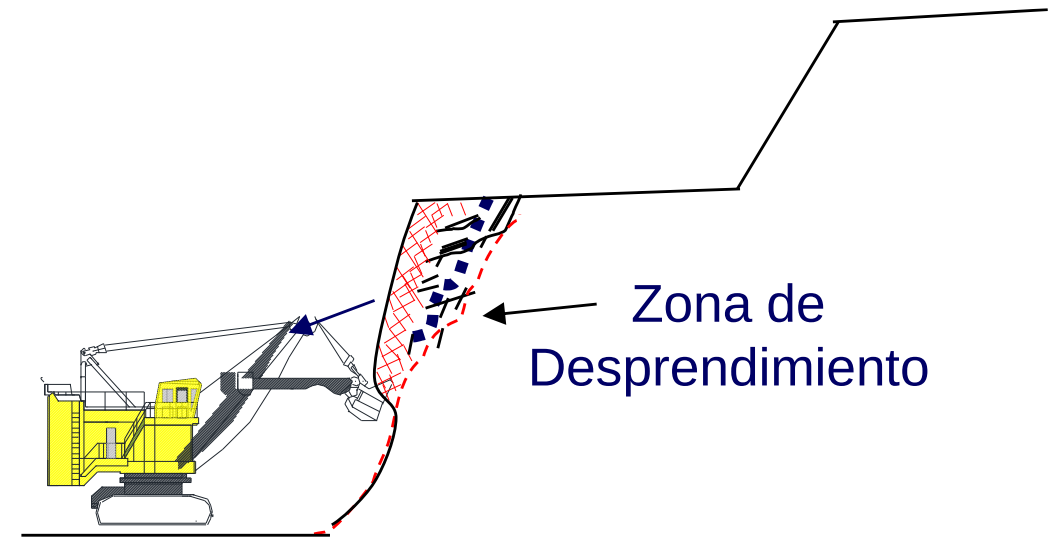
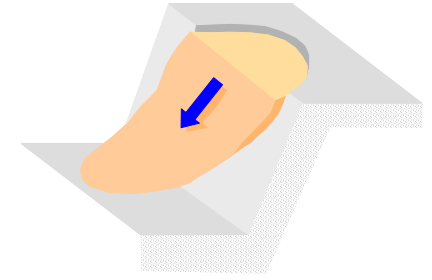
- Este tipo de falla es común en materiales tipo suelo (depósitos de lastre acopios de material poco consolidado) pero también puede ocurrir en:
 - Rocas alteradas
 - Macizos altamente fracturados
 - Macizos con orientaciones aleatorias de fracturas
- En materiales altamente alterados o fracturados un patrón estructural bien definido ya no existe y el deslizamiento se produce a través de la línea de resistencia mínima al corte. Observaciones sugieren que esta superficie de deslizamiento toma la forma de un círculo
- Falla circular ocurre cuando las partículas o bien el plano de debilidad es pequeño en relación al talud

Mecanismos de inestabilidades

Falla circular

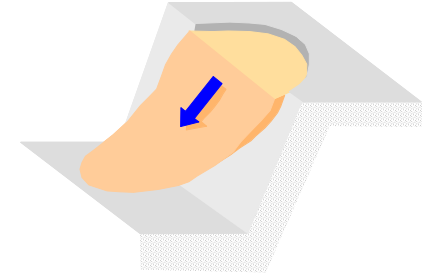


- Fallamiento circular, provocado por socavamiento de la pata.



Mecanismos de inestabilidades

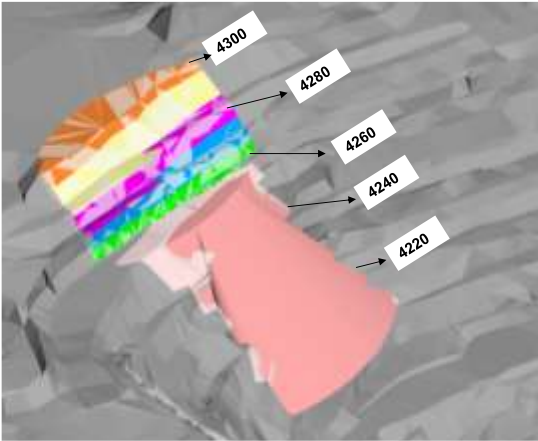
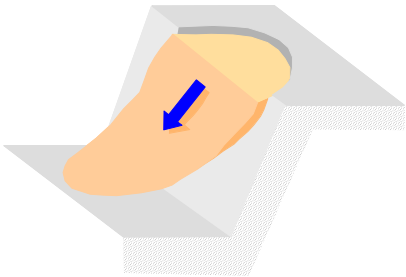
Falla circular



- Se observa un macizo rocoso que corresponde a una zona de falla compleja, configurando un macizo rocoso muy heterogéneo, con sectores potentes de salbanda, cataclasitas, protocataclasitas y puentes de roca de mejor calidad.
- El banco de diseño tenía un ángulo de cara de banco de 70° el cual en terreno tuvo que ser reducido a 65° , con una disminución del ancho de berma para mantener el ángulo interrampa. La altura del banco es de 12.5 m.

Mecanismos de inestabilidades

Falla circular



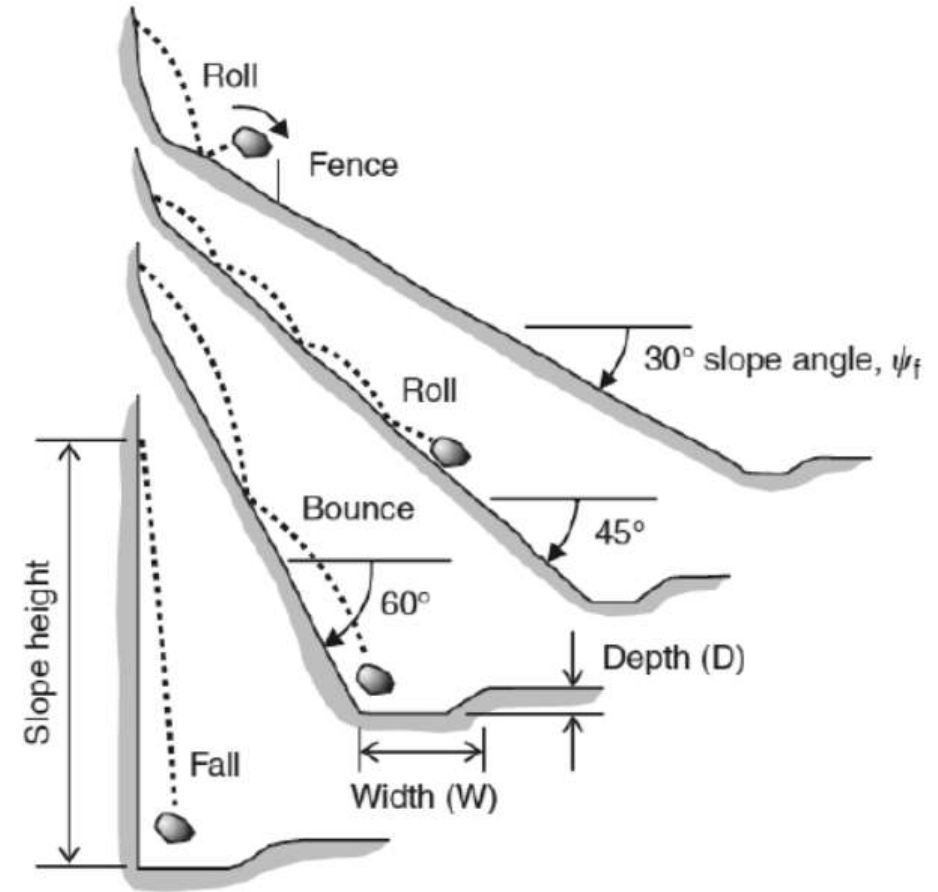
Parámetros Geométricos al interior cuña				
Banco	α_b (°)	h_b (m)	b (m)	α_i (°)
4280	36	20	12	29
4260	36	20	12	29
4240	43	20	7	35
4220	43	20	7	35
4200	43	20	16	30
4180	40	20	5	30
4160	40	20	10	30

- Mecanismo de falla: Matriz – Circular

Mecanismos de inestabilidades

Caídas de rocas

- Las caídas de rocas es el movimiento de bloque de roca (individual o múltiples) debido a la pendiente del talud.
- Los tipos de movimientos corresponden a caída libre, rebote, rodar o deslizar.



Ritchie (1963). Evaluation of rock fall and its control. Highway Research Record 17 pp. 13-28.

Mecanismos de inestabilidades

Caídas de rocas

- En minería de Cielo Abierto las caídas de roca pueden ser a causa de una implementación del diseño (prácticas de tronadura/acuñamiento deficientes) o un resultado de la degradación del taludes por meteorización o producto del ciclo hielo-deshielo.
- Eventos tales como: terremotos vibraciones de tronaduras, cambios en presión de poros debido a la infiltración de lluvia, erosión de material, fuerte vientos pueden iniciar la caída de rocas.



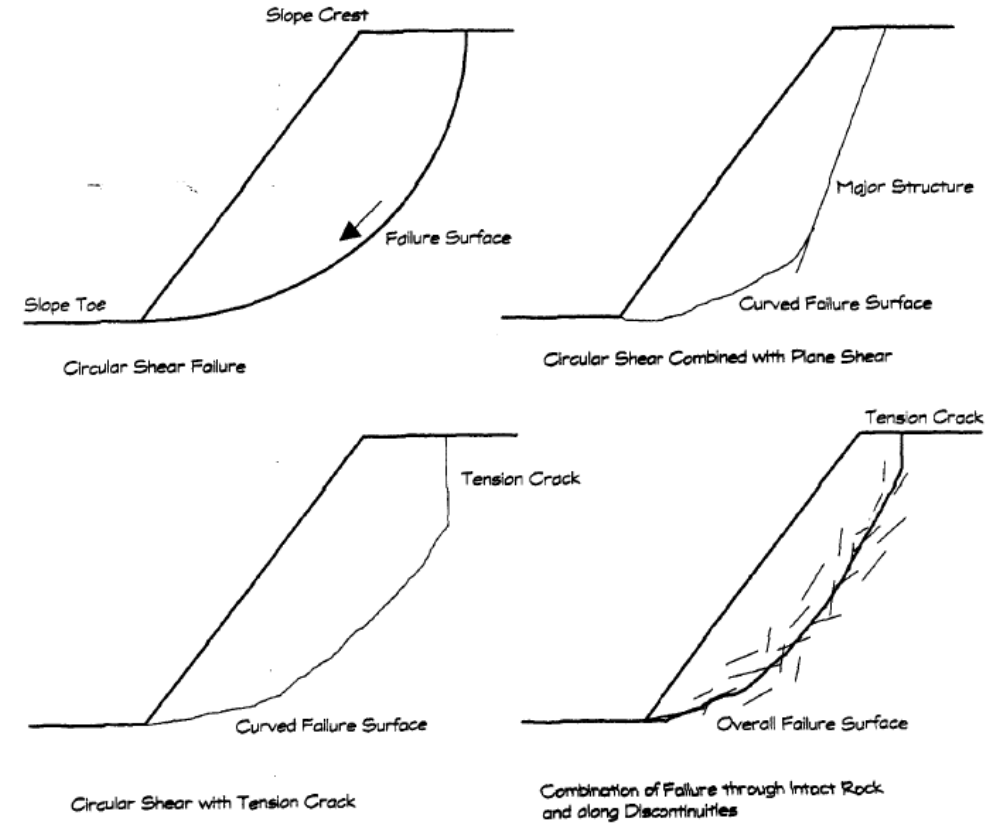
Saroglou, H., & Bar, N. (2017). Predicting the primary impact and total rollout distances of rock falls based on cases in quarries and mines in Australia and the United Kingdom. En Proceedings of the 51st U.S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium. American Rock Mechanics Association, Alexandria

Hoek, E. (2007). Practical rock engineering (2007 Edition). Rocscience. Recuperado de <https://www.rocscience.com/learning/hoek-s-corner>

Mecanismos de inestabilidades

Combinaciones

Fallas circulares y combinaciones de falla por corte circular y falla por corte plano.



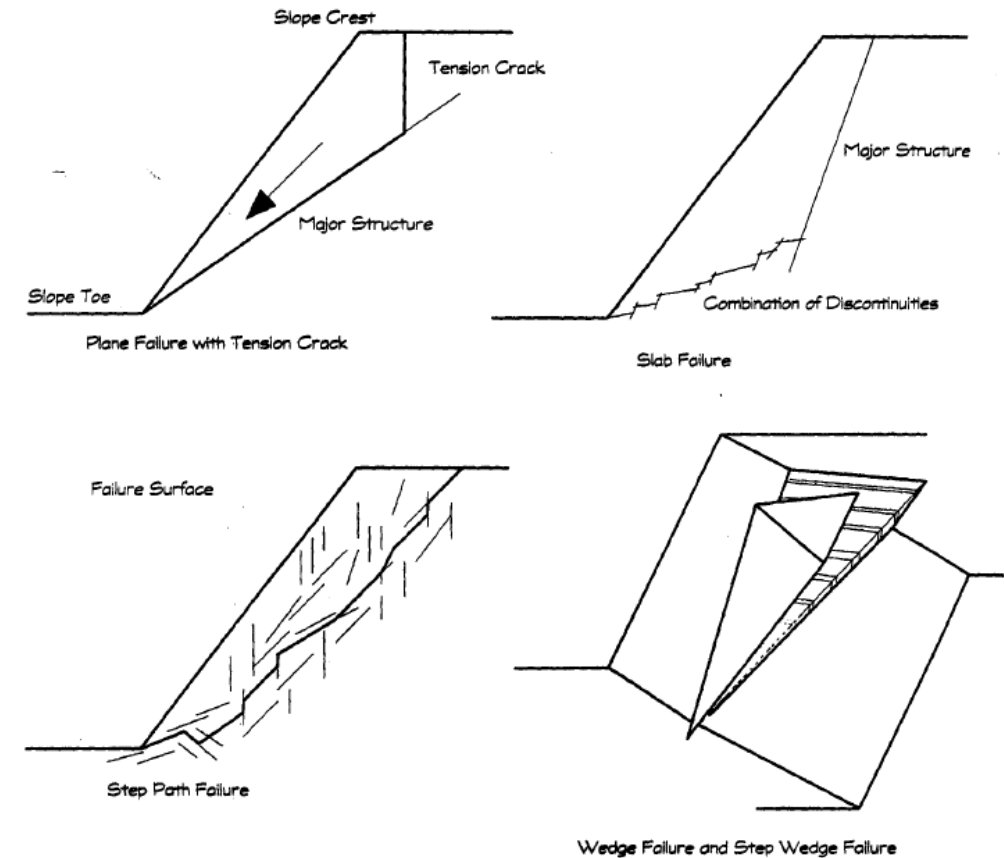
Coates, D. F. (1977). Pit Slope Manual, Chapter 9: Rock Mechanics.

Hoek, E., & Bray, J. W. (1981). Rock Slope Engineering (3rd ed.)

Mecanismos de inestabilidades

Combinaciones

Combinación de discontinuidades formando una superficie de falla.



West, R. J., Larson, N. B., Visca, P. J., Nicholas, D. E., & Call, R. D. (1985). Aitik slope stability study. Call & Nicholas, Inc. Report to Boliden Mineral AB, Aitik Mine.

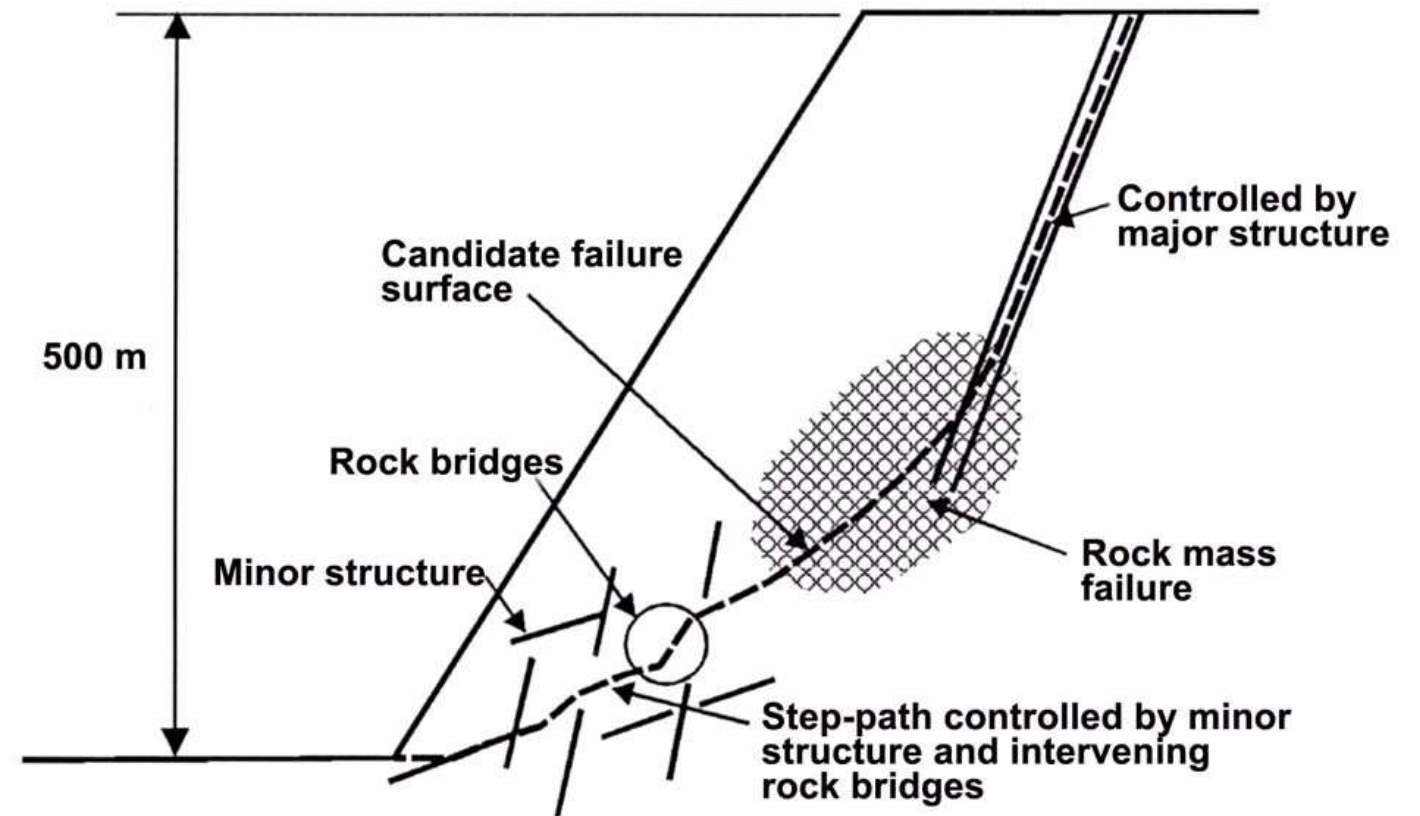
Call, R. D., & Savely, J. P. (1990). Open pit rock mechanics. En B. A. Kennedy (Ed.), Surface mining (2ª ed., pp. 860-882). Littleton: Society for Mining, Metallurgy and Exploration, Inc.

Coates, D. F. (1977). Pit Slope Manual, Chapter 9: Rock Mechanics.

Mecanismos de inestabilidades

Combinaciones

Fallas en taludes profundos.

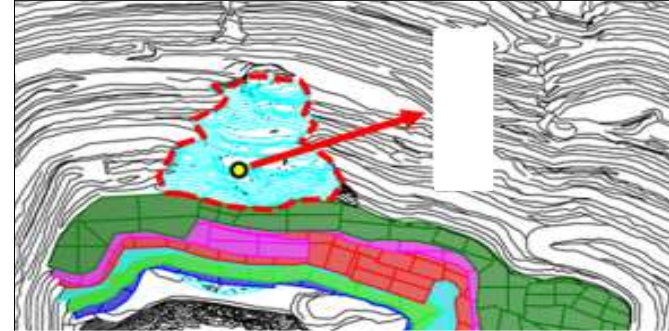


Hoek, E., Read, J., Karzulovic, A., & Chen, Z. Y. (2000). Rock slopes in civil and mining engineering. En Proceedings of the International Conference on Geotechnical and Geological Engineering, GeoEng2000 (19-24 de noviembre, 2000, Melbourne).

Coates, D. F. (1977). Pit Slope Manual, Chapter 9: Rock Mechanics.

Mecanismos de inestabilidades

Combinaciones



- Cuña no aflorante
- Evento post tronadura
- Escala inter-rampa
- Ángulo interrampa 54°

Mecanismos de inestabilidades

Combinaciones



- Cuña no aflorante
- Evento post tronadura
- Escala inter-rampa

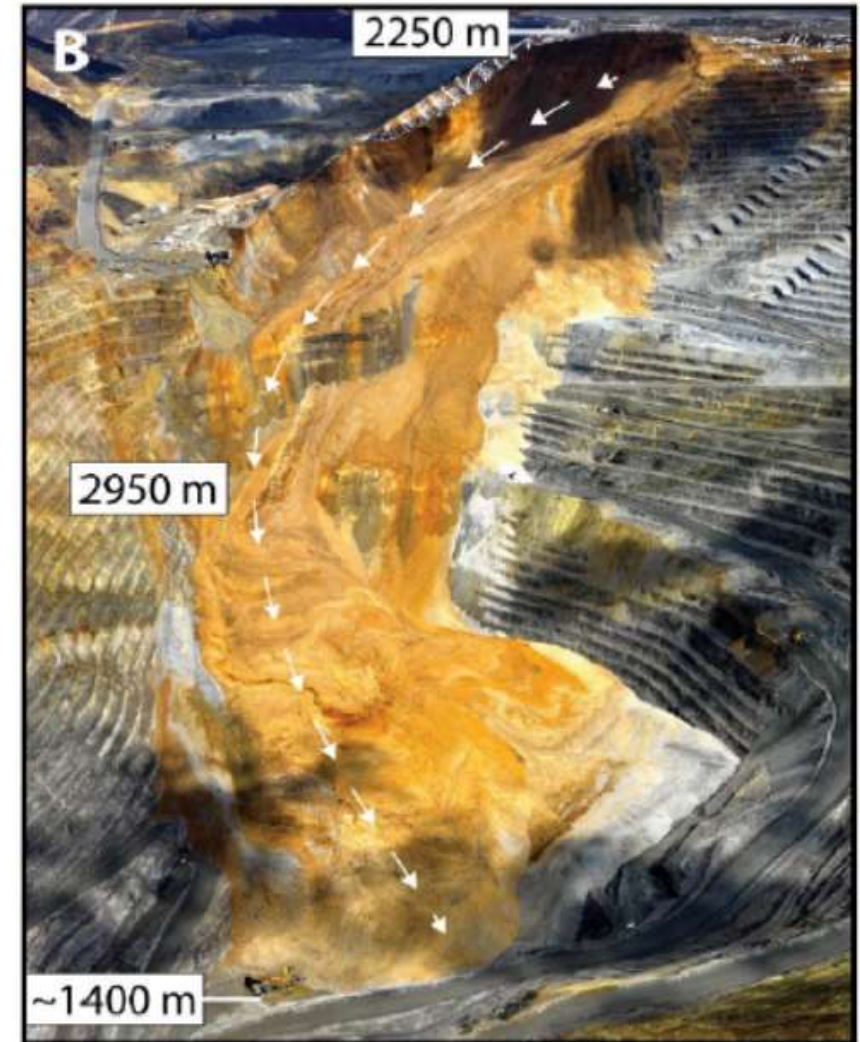


Mecanismos de inestabilidades

Combinaciones



- Circular-planar
- Escala global



Casos adicionales

Country	Location	Names of Mining Company	Mode of Failure	Causes of Failure
Botswana	Central District	Letlhakane mine	Toppling	Presence of tension crack formation, crack widening and extension
Canada	British Columbia	Afton Mine	Wedge, Toppling and circular failure	Multiple failures occurred as a result of intersection of discontinuities
	British Columbia	Brenda Mine	Toppling	Intersection of joint sets
	British Columbia	Cassiar Mine	Toppling	Presence of shear zones, faults and sets of discontinuities
	British Columbia	Highland Valley Copper	Toppling	Steeply dipping joints, increase in groundwater pressure and melting of snow
	British Columbia	Lonex Pit at Highland valley	Toppling	Groundwater condition, Steeply dipping faults
	British Columbia	Highmont	Planar	Structural discontinuities, precipitation, run off, poor quality and low strength rock mass
	Vancouver	Island Copper	Wedge and Toppling	Large fault zone passing through a weaker rock mass
	Quebec	Jeffrey Mine, Asbestos	Wedge and Planar	Intersection of several thick shear zones and smaller scale discontinuities
	British Columbia	Nickel Plate Mine	Wedge	Steeply dipping joint sets and faults
	Mongolia	Changshan hao open-pit	Wedge and Toppling	Presence of faults and joints
China	Shazhenxi	Qianjiangping	Planar	Increase in water level, poor geological structure and continuous rainfall
Norway	Hange i Dalane	Tellness Dagbrudd	Wedge	Heavy rainfall
Mexico	Calama, Antofagasta	Chiquicamata	Toppling	Presence of fault zones
Spain	Seville	Aznacollar Mine	Complex	Presence of tension cracks, Heavy rainfall, groundwater pressure
Sweden	Kiruna	Kirunavaara	Rotational	Presence of tension cracks

Kolapo, P., Oniyide, G. O., Said, K. O., Lawal, A. I., Onifade, M., & Munemo, P. (2022). An overview of slope failure in mining operations. Sustainability, 14(19), 12345. <https://doi.org/10.3390/su141912345>

Casos adicionales

Country	Location	Names of Mining Company	Mode of Failure	Causes of Failure
United States of America	Utah	Bingham Canyon Mine	Rotational, Planar	Rise in water table, fractured rock mass with minor joints and larger fault structure
	Nevada	Carlin Trend	NA	Presence of wider fault zones and clay infillings
	Arizona	Cyprus Bagdad and Sierrita	Toppling	Presence of steeply joint sets
	Nevada	Liberty Pit	Wedge	Intersection of joint sets
	Nevada	Veteran—Tripp Pit	Wedge	Intersection of faults, presence of clay gouge in fault zones
	Nevada	Kimbley pit	Wedge	Presence of flat sipping fault, High water pressure
	Arizona	Twin Butes	Toppling	Numerous faults and several joints
South Africa	Limpopo	Palabora Mine	Wedge	Presence of faults and set of joints
	Mokopane	Sandsloot open pit	Planar and Wedge	Presence of set of joints
Zambia	Chingola	Nchanga Open Pit	Wedge	Intersection of joint sets, abnormally rainfall, weathering

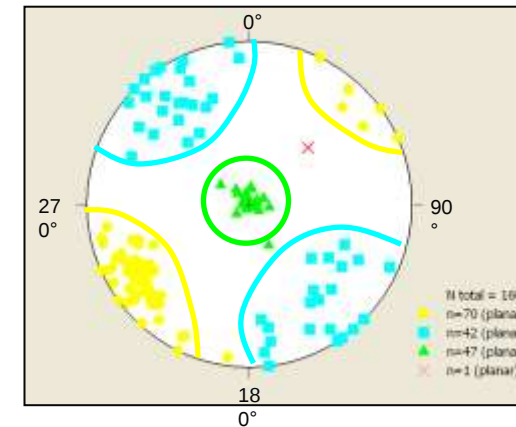
Kolapo, P., Oniyide, G. O., Said, K. O., Lawal, A. I., Onifade, M., & Munemo, P. (2022). An overview of slope failure in mining operations. Sustainability, 14(19), 12345. <https://doi.org/10.3390/su141912345>

Análisis cinemático estructural

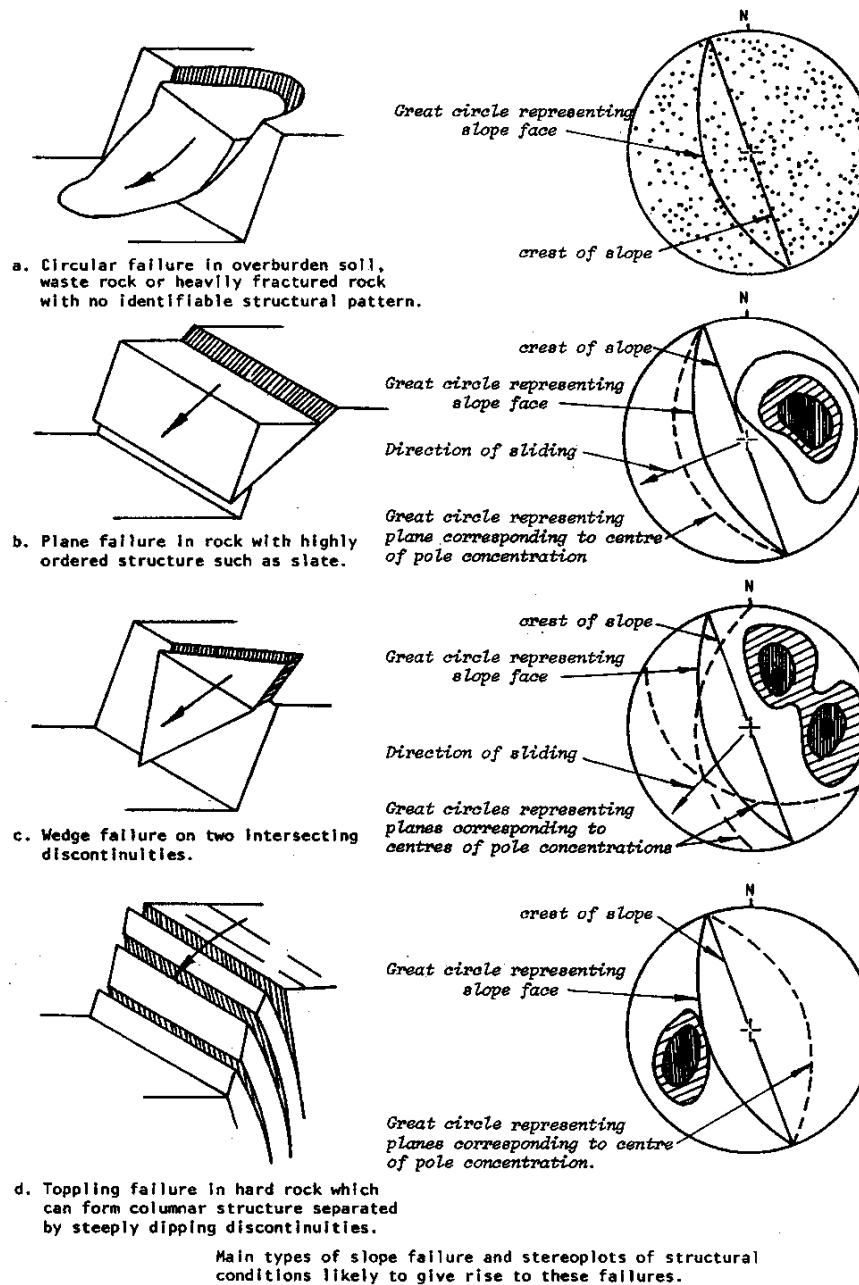
- La orientación de estructuras es un factor clave en el análisis de estabilidad.
- Se utiliza una red estereográfica como método de representación y análisis de la orientación de estructuras.



3 sets de discontinuidades
strike/dip: 236/81, 321/01, 325/89

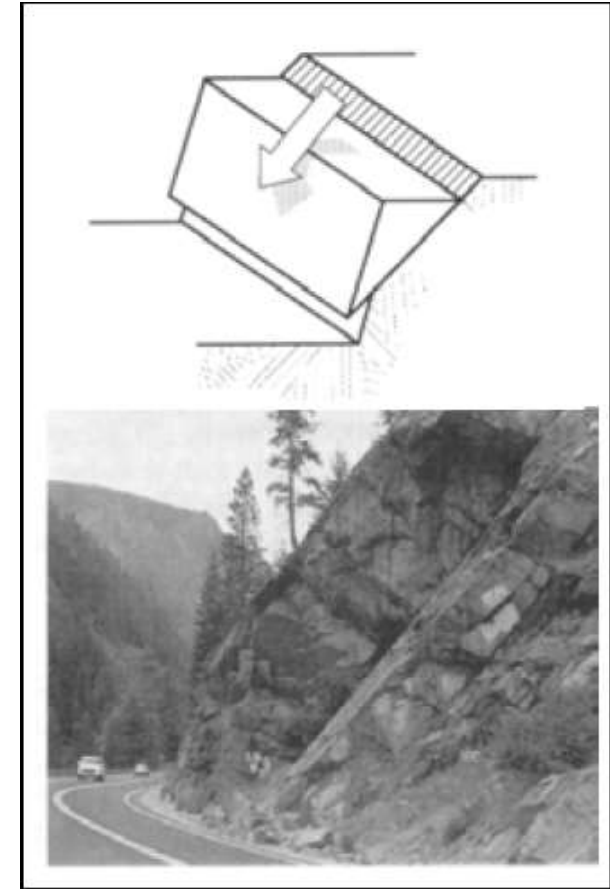


Modos de falla

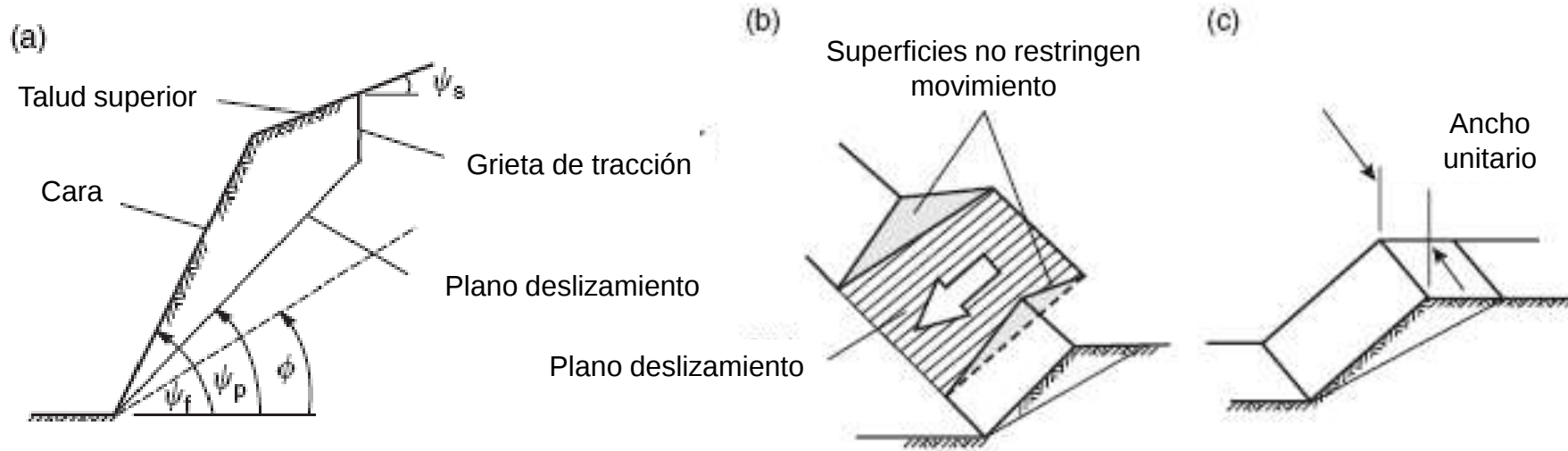


Falla plana

(Wyllie and Mah, 2004)



Falla plana

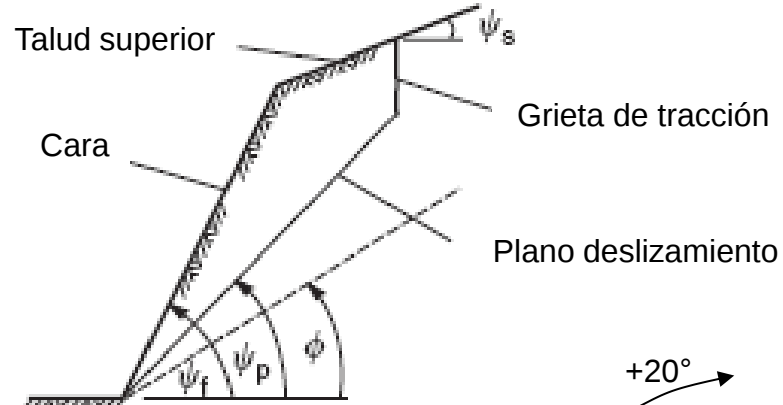


Condiciones:

- El DipDir del plano de deslizamiento (α_p) debe ser aproximadamente paralelo al DipDir de la cara del talud (α_f): $\alpha_f - 20 \leq \alpha_p \leq \alpha_f + 20$
- Plano de deslizamiento debe tener un dip menor al plano del talud (daylight): $\Psi_p < \Psi_f$
- El Dip del plano de deslizamiento debe ser mayor al ángulo de fricción de este plano: $\Psi_p > \phi$
- La parte superior de la superficie de falla debe interceptar al talud o a una grieta de tracción
- El plano no está restringido lateralmente (Figura b)
- Se asume ancho unitario (Figura c)

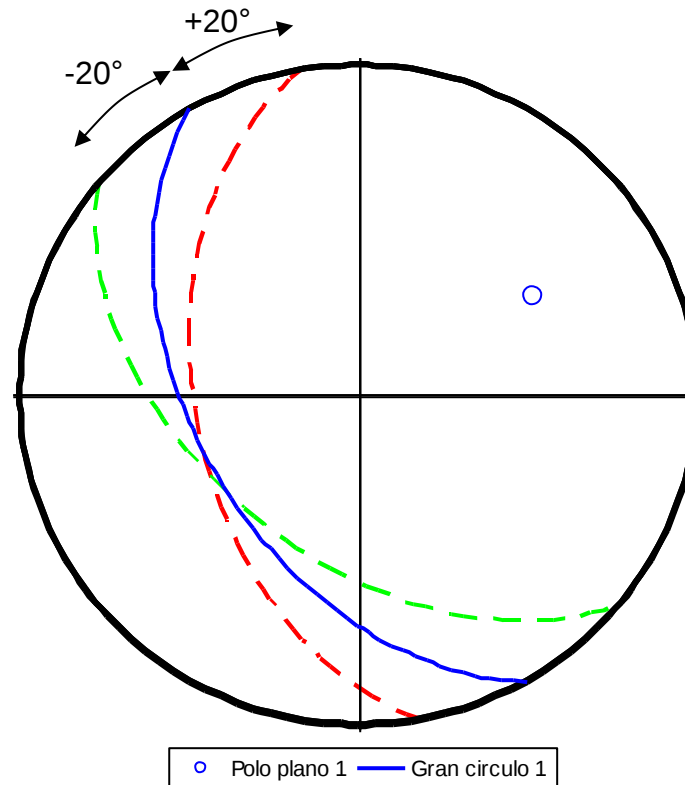
Falla plana

(a)



Condiciones:

- Plano de deslizamiento debe tener un DipDir aproximadamente paralelo al plano del talud ($\pm 20^\circ$)



Ejemplo:

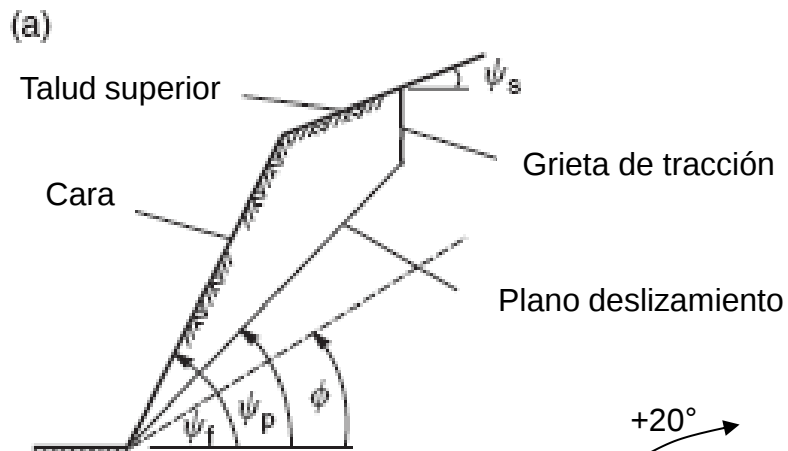
Cara talud: 50/240

Cara talud+20: 50/260

Cara talud-20: 50/220

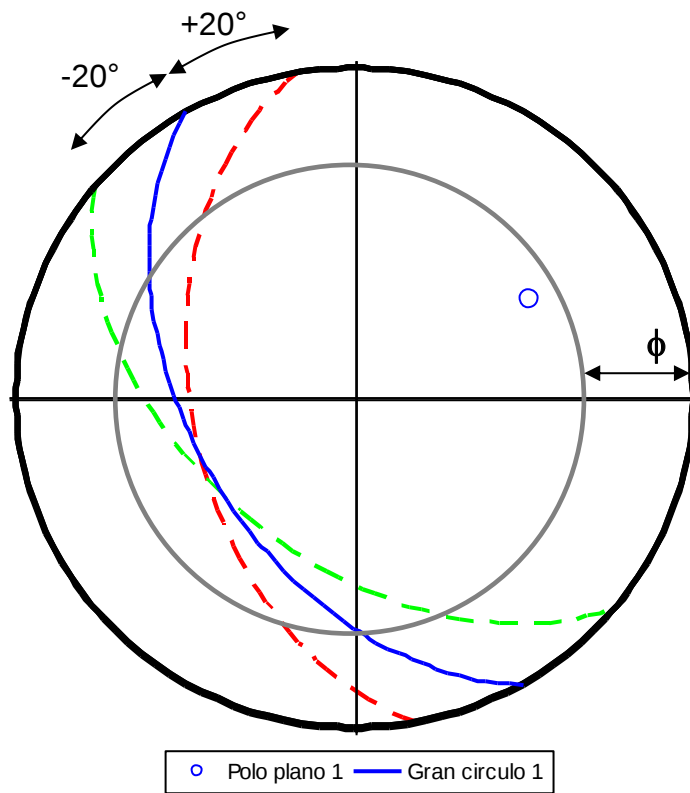
El DipDir del plano de deslizamiento debe estar dentro de los DipDir de las líneas punteadas

Falla plana



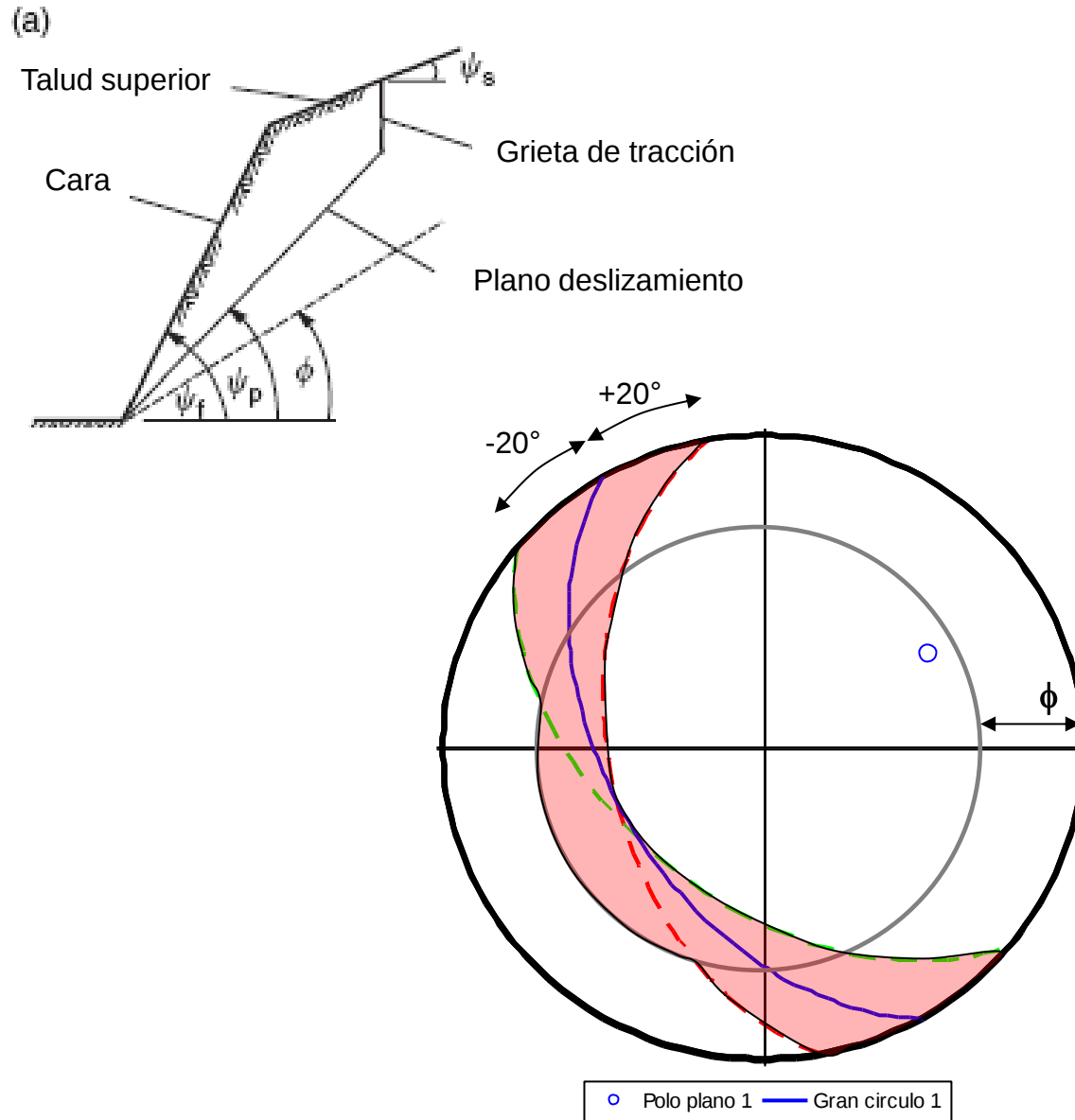
Condiciones:

- El Dip del plano de deslizamiento debe ser mayor al ángulo de fricción de este plano: $\Psi_p > \phi$



El ángulo de fricción se
dibuja como un círculo
de Dip ϕ

Falla plana



Planos de deslizamiento que grafican dentro de la zona achurada son potenciales a presentar falla plana

Falla por cuña

Comúnmente encontradas en:

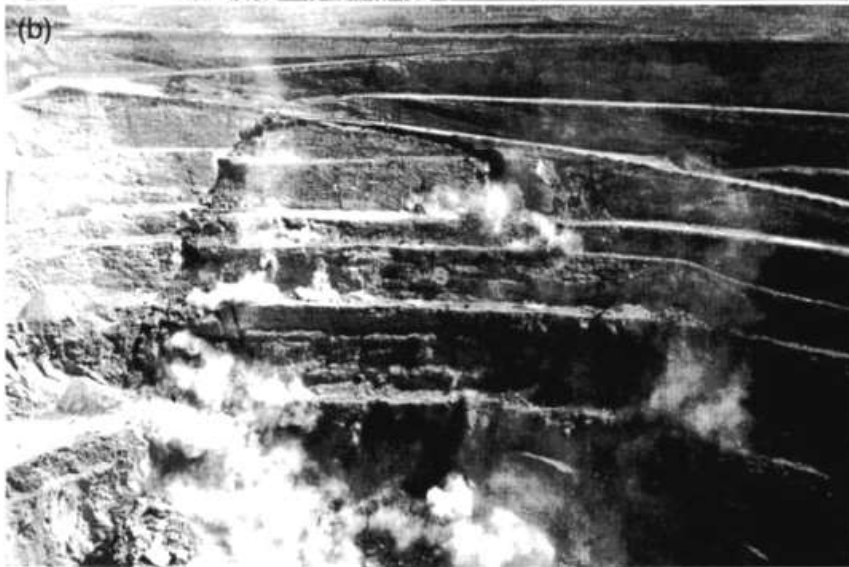
- bancos
- pequeños taludes
- cortes para carreteras, etc.

Cuñas individuales pueden ser:

- soportadas
 - removidas
- } Depende de las circunstancias

En minas de open pit, el soporte de cuñas es generalmente impráctico, por lo que los taludes deben ser diseñados para acomodar la falla de cuñas

Falla por cuña



Iniciación y propagación de una cuña mayor en una mina de open pit, Western Australia. (Harrison and Hudson, 2001)

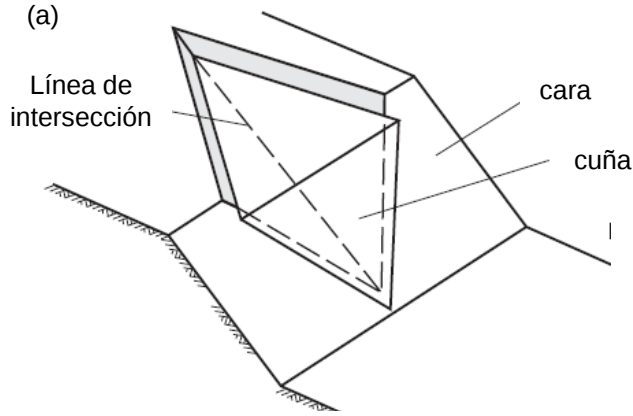


Cuña removida durante la construcción por pre-splitting de un talud en roca (Harrison and Hudson, 2001)



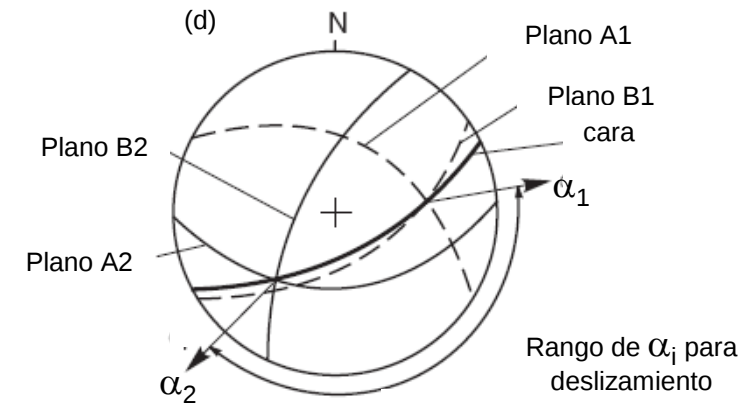
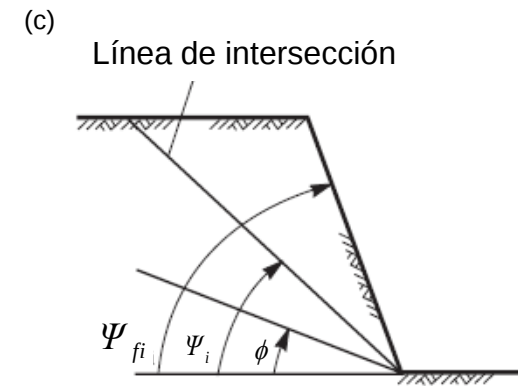
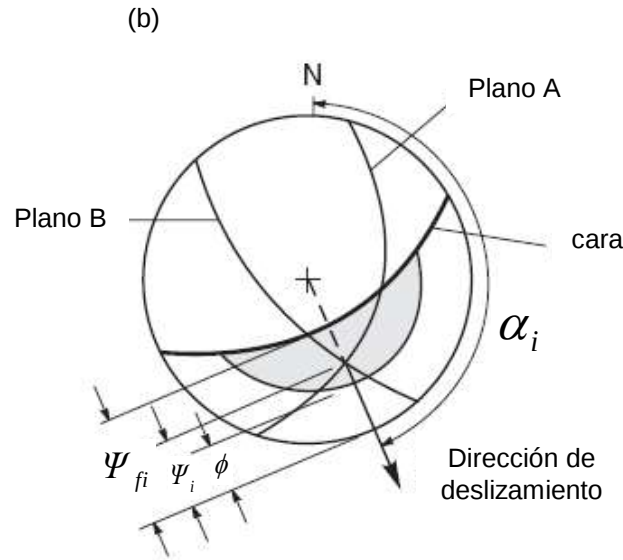
Falla por cuña (Wyllie and Mah, 2004)

Falla por cuña



Nota: La convención adoptada para el análisis es que el plano menos inclinado es siempre referido como el plano A

α_i, Ψ_i	trend y plunge línea de intersección
Ψ_{fi}	inclinación de la cara del talud en la dirección de deslizamiento



Condiciones:

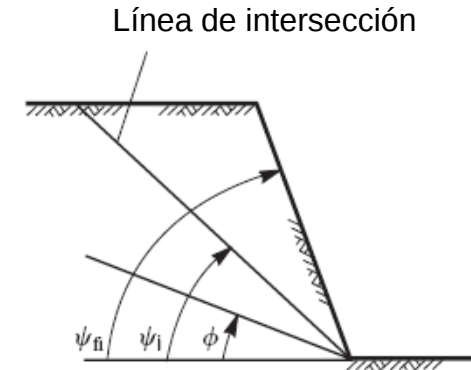
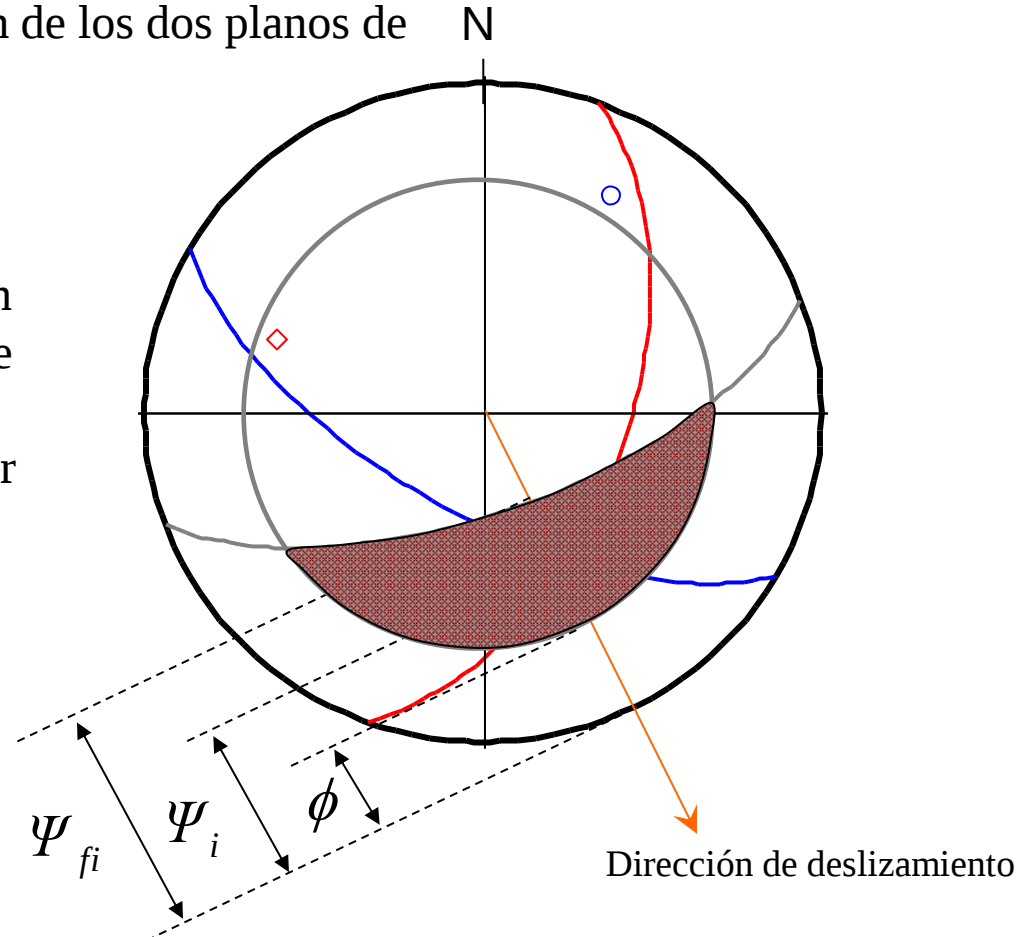
- Dos planos que se intercepten (ver Figura a y b)
- El plunge de la línea de intersección (Ψ_i) debe ser menor que el plunge de la cara del talud en la dirección de deslizamiento (Ψ_{fi}) y mayor que el ángulo de fricción de los dos planos de deslizamiento, $\Psi_{fi} > \Psi_i > \phi$ (ver Figura b, c)
- El trend de la línea de intersección (α_i) debe aflorar en el talud. La figura d presenta que el rango posible del trend de la línea de intersección es entre α_1 y α_2

Falla por cuña

Condiciones:

- Dos planos que se intercepten
- El plunge de la línea de intersección (Ψ_i) debe ser menor que el plunge de la cara del talud en la dirección de deslizamiento (Ψ_{fi}) y mayor que el ángulo de fricción de los dos planos de deslizamiento, $\Psi_{fi} > \Psi_i > \phi$

Líneas de intersección que grafican dentro de la zona achurada son potenciales a presentar falla por cuña



Ejemplo:

Plano A: 65/210

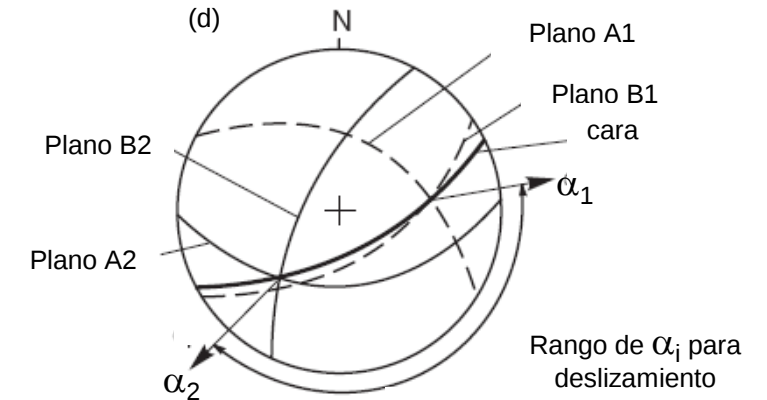
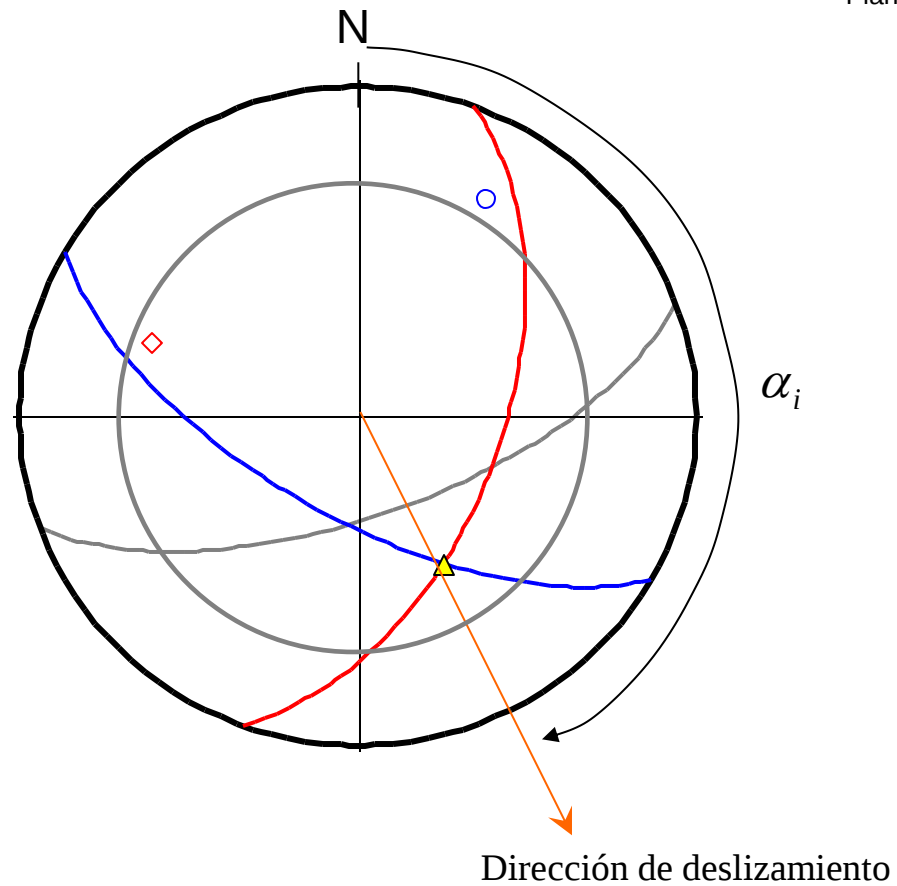
Plano B: 55/110

Cara talud: 65/160

Falla por cuña

Condiciones:

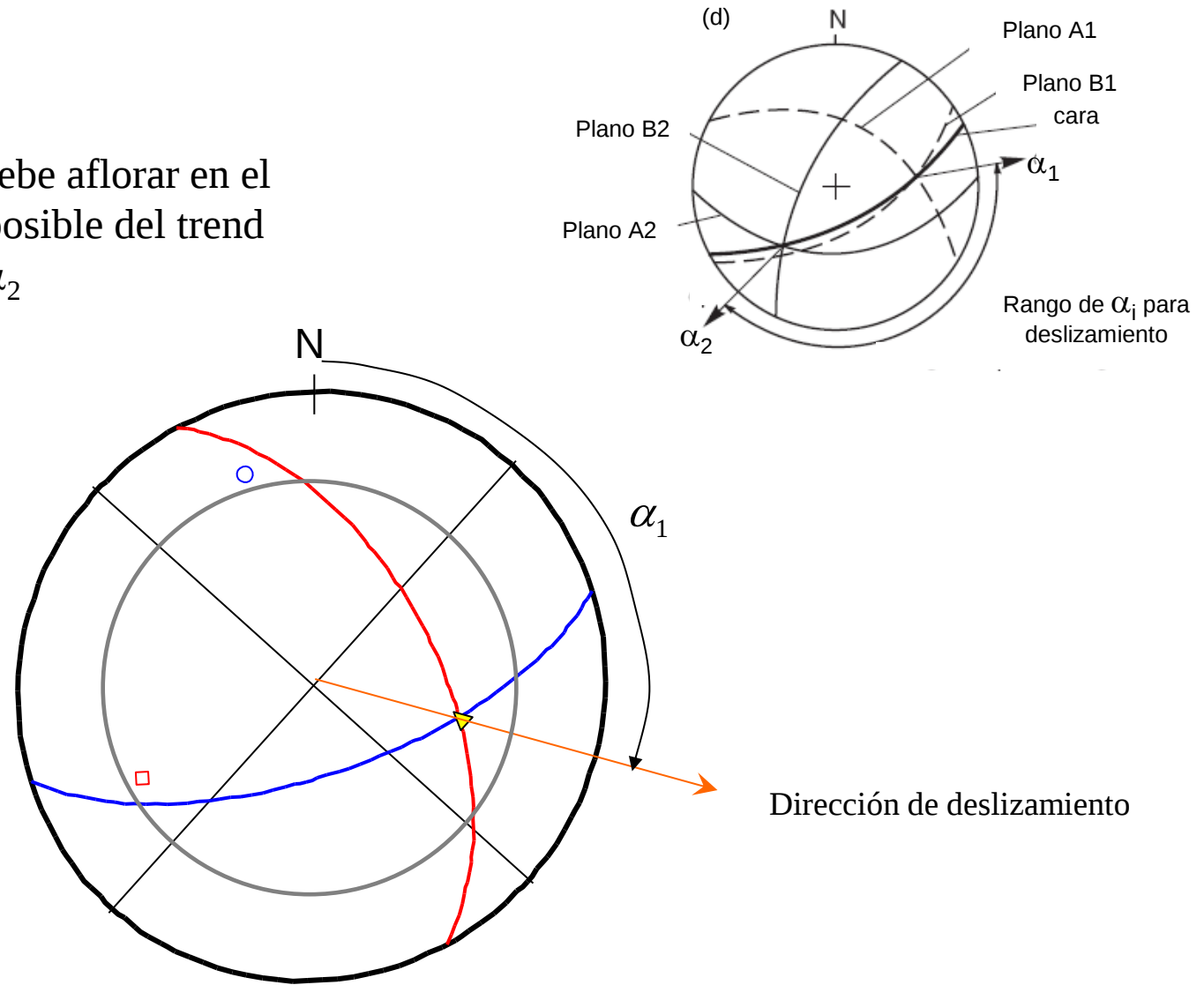
- El trend de la línea de intersección (α_i) debe aflorar en el talud. La figura d presenta que el rango posible del trend de la línea de intersección es entre α_1 y α_2



Falla por cuña

Condiciones:

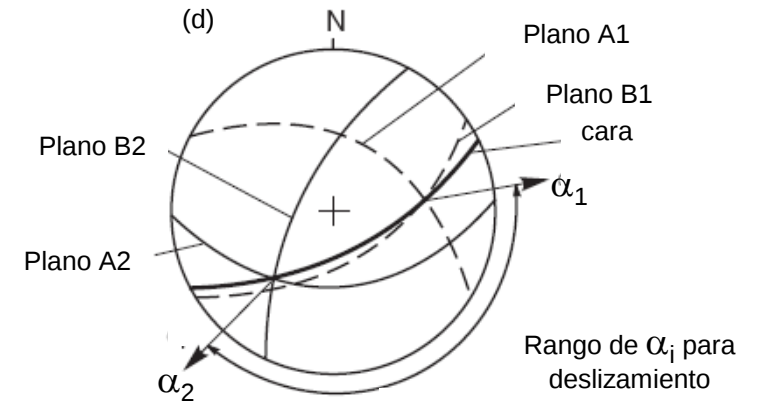
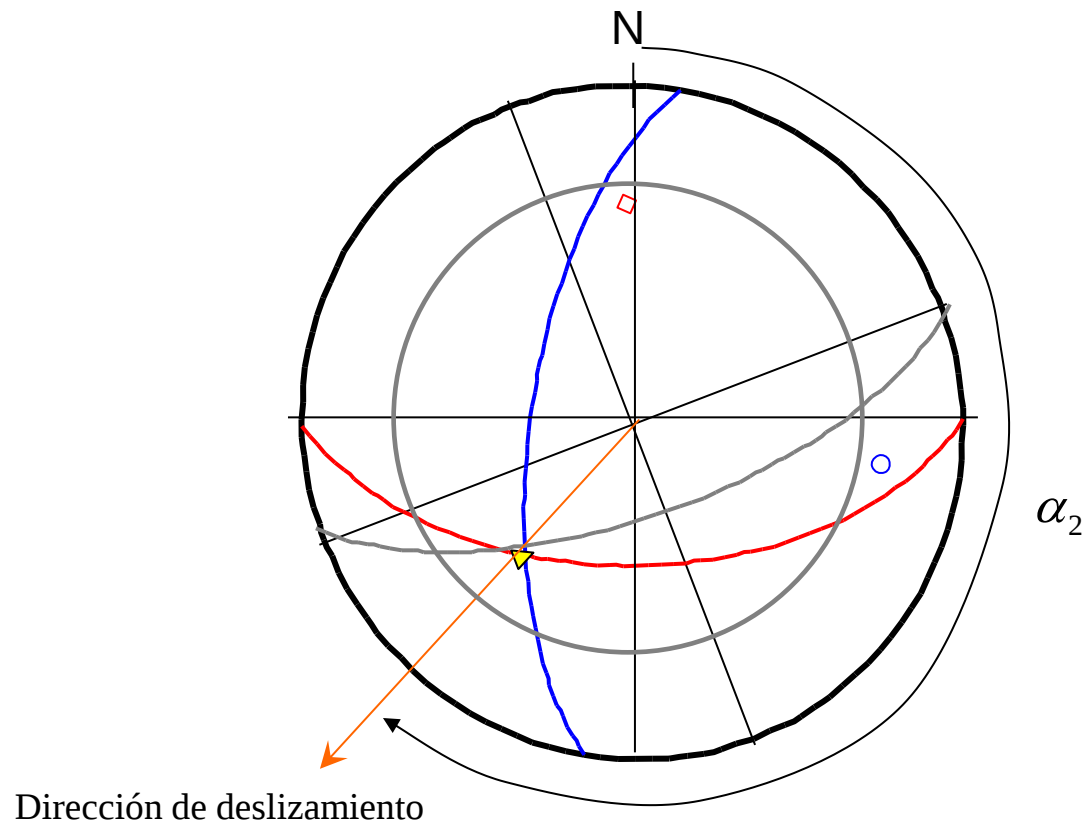
- El trend de la línea de intersección (α_i) debe aflorar en el talud. La figura d presenta que el rango posible del trend de la línea de intersección es entre α_1 y α_2



Falla por cuña

Condiciones:

- El trend de la línea de intersección (α_i) debe aflorar en el talud. La figura d presenta que el rango posible del trend de la línea de intersección es entre α_1 y α_2

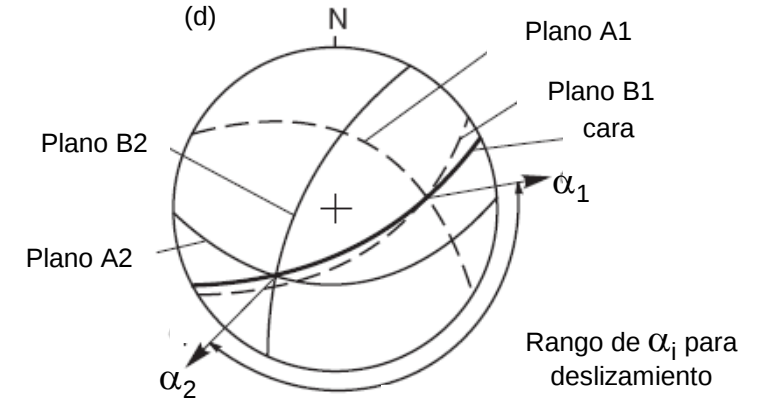
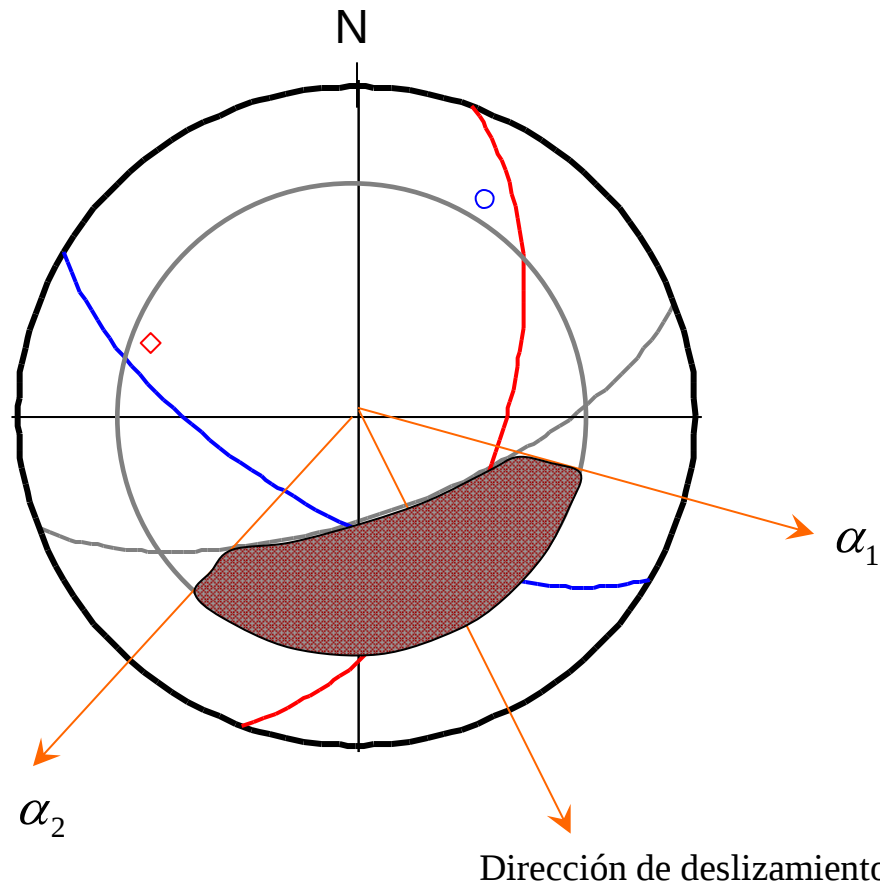


Falla por cuña

Condiciones:

- El trend de la línea de intersección (α_i) debe aflorar en el talud. La figura d presenta que el rango posible del trend de la línea de intersección es entre α_1 y α_2

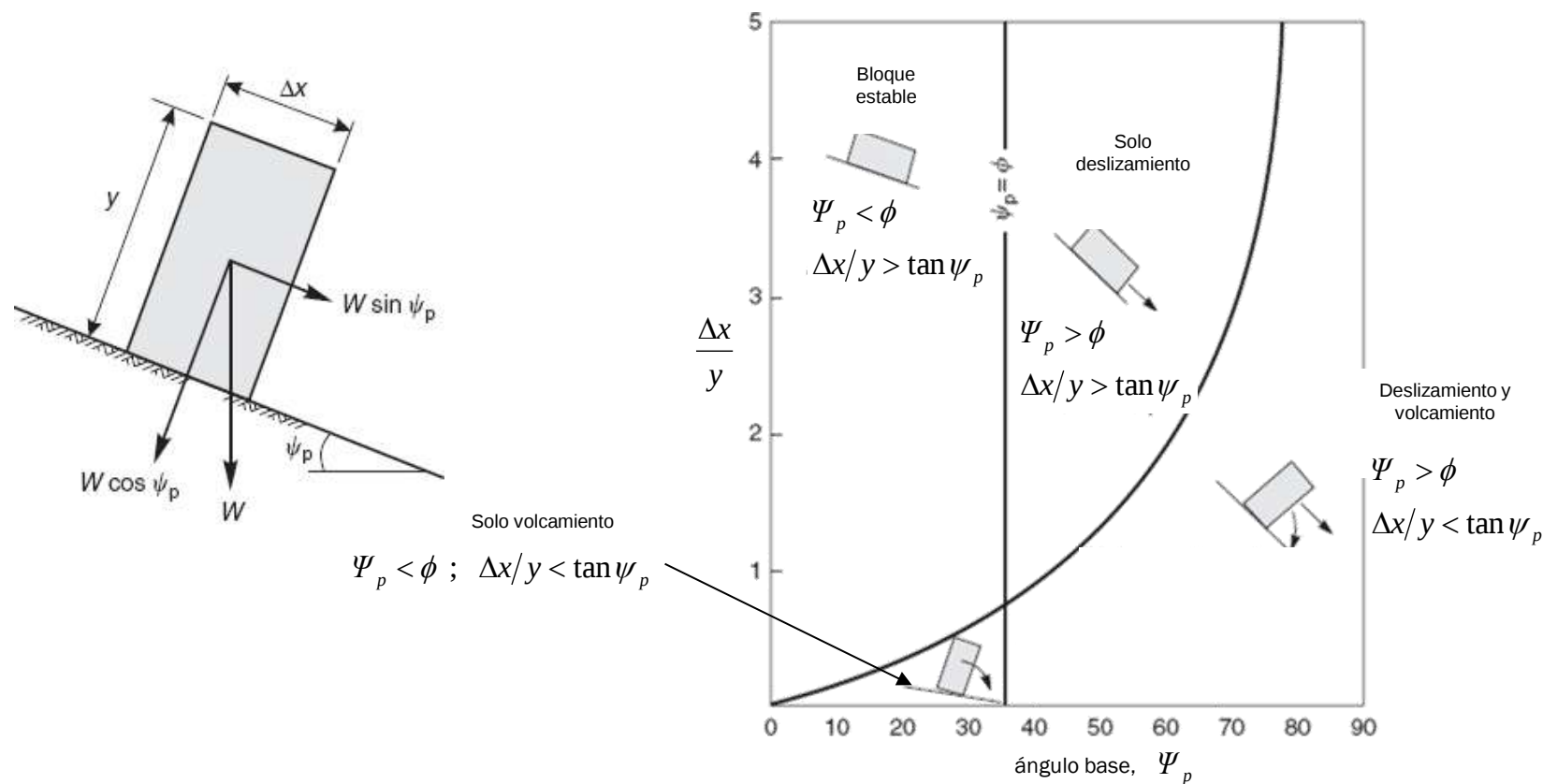
Líneas de intersección que grafican dentro de la zona achurada son potenciales a presentar falla por cuña



Falla por volcamiento

Condiciones

1) Forma de bloques. Bajo ciertas condiciones geométricas el bloque puede volcarse en vez de deslizarse

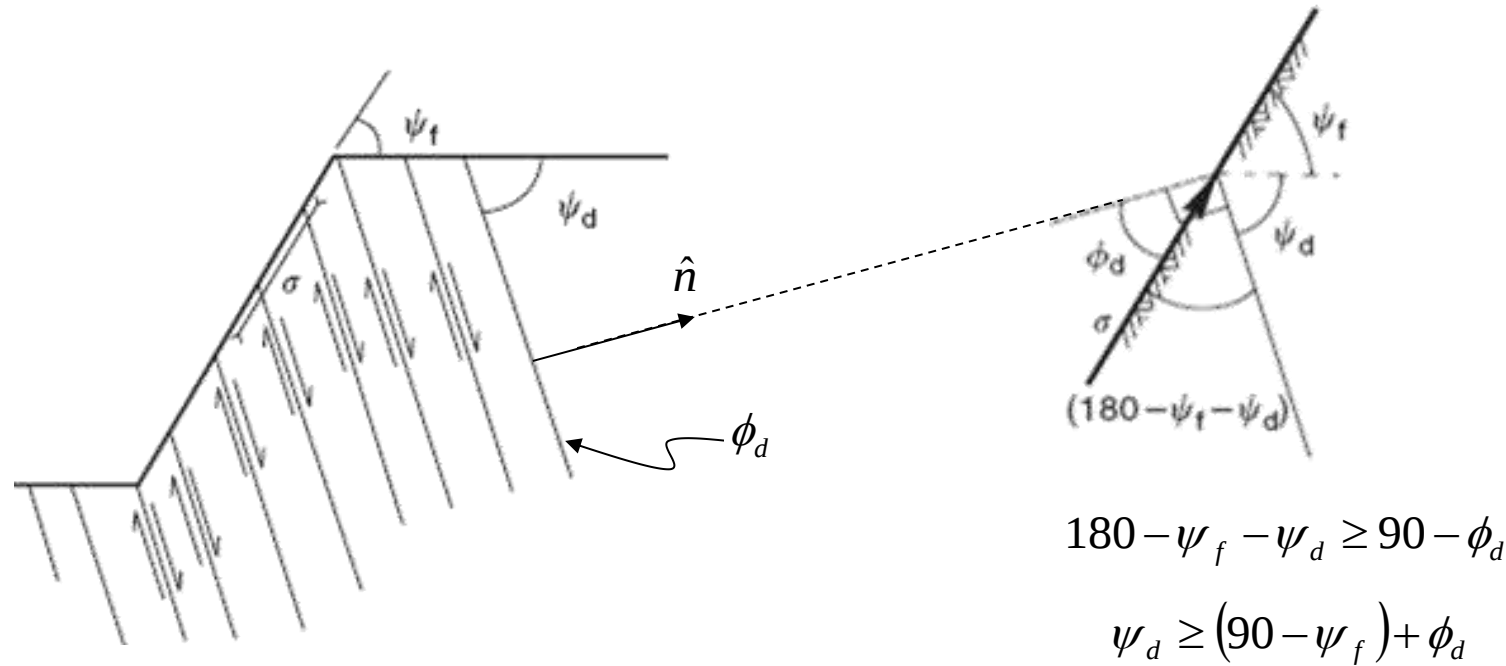


Falla por volcamiento

Condiciones

2) Esfuerzos

- Cerca de la superficie del talud el esfuerzo principal mayor σ es paralelo a la cara
- De manera que hay deslizamientos debe estar inclinado en un ángulo ϕ_d con respecto a la normal a las estructuras



Falla por volcamiento

Condiciones

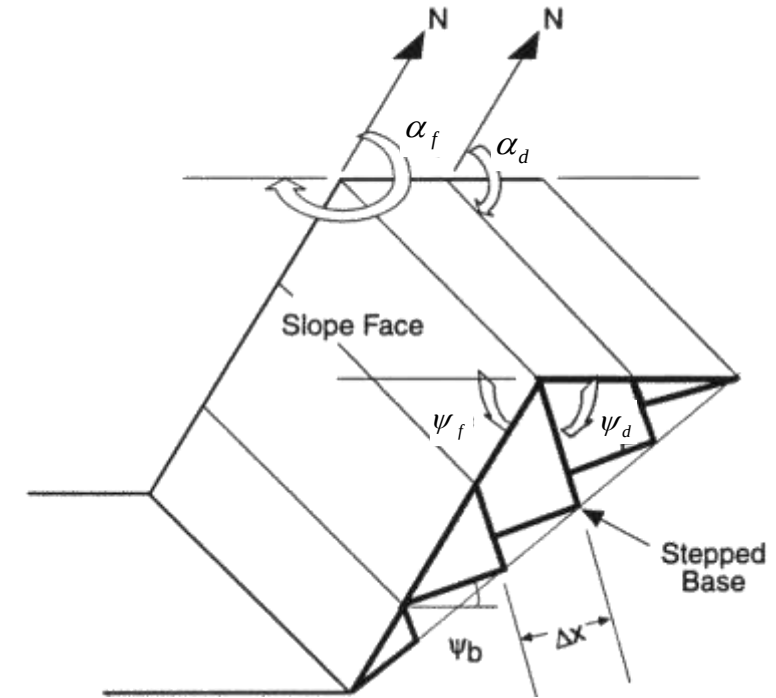
3) Alineación de bloques

- Los planos que forman los bloques deben tener un rumbo aproximadamente paralelo a la cara del talud de manera que cada bloque pueda volcarse con la menor restricción de los bloques adyacentes
- Observaciones empíricas sugieren que los planos de discontinuidades deben satisfacer:

$$\alpha_f + 160 \leq \alpha_d \leq \alpha_f + 200$$

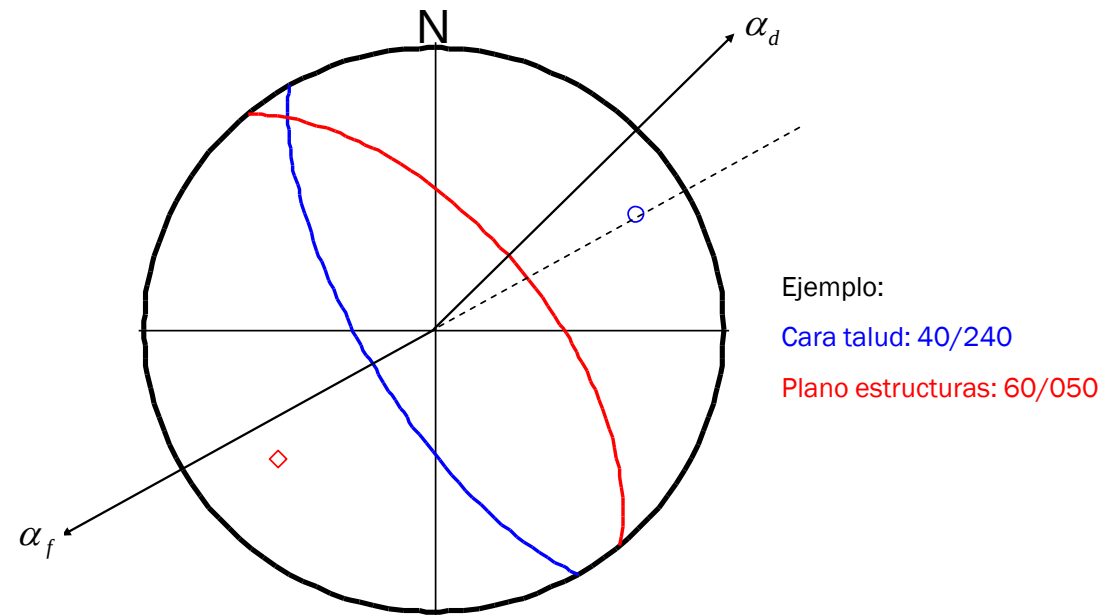
α_d : DipDir estructuras

α_f : DipDir cara talud



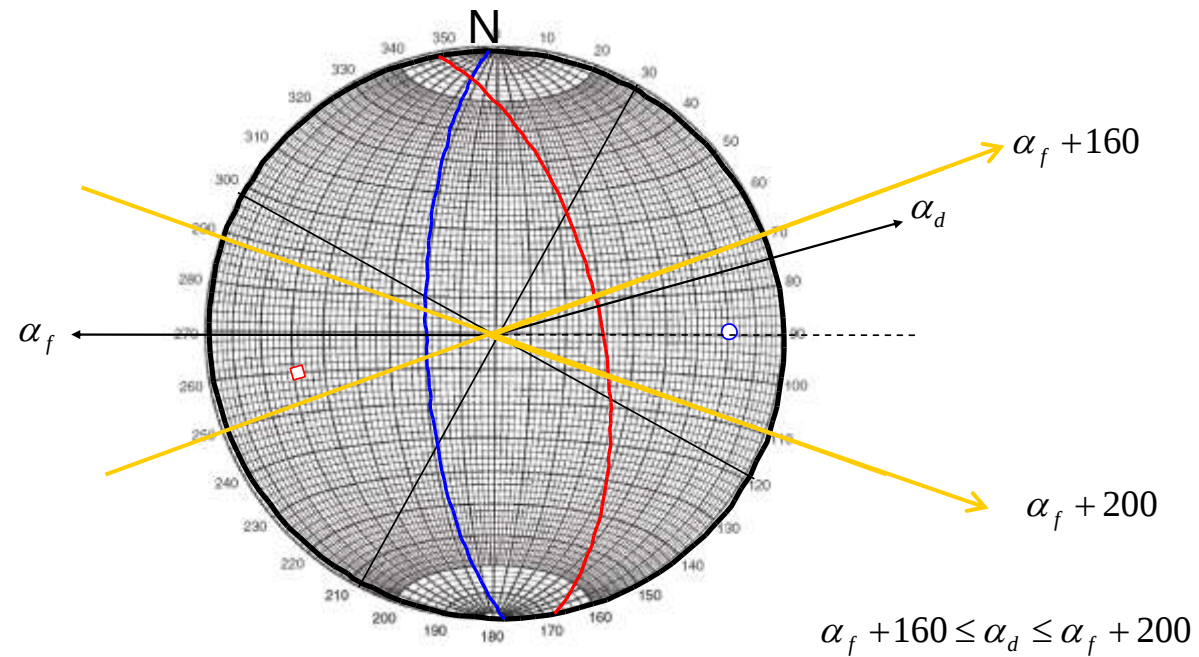
Falla por volcamiento

Las condiciones 2 y 3 pueden ser representadas en una red



Falla por volcamiento

Las condiciones 2 y 3 pueden ser representadas en una red

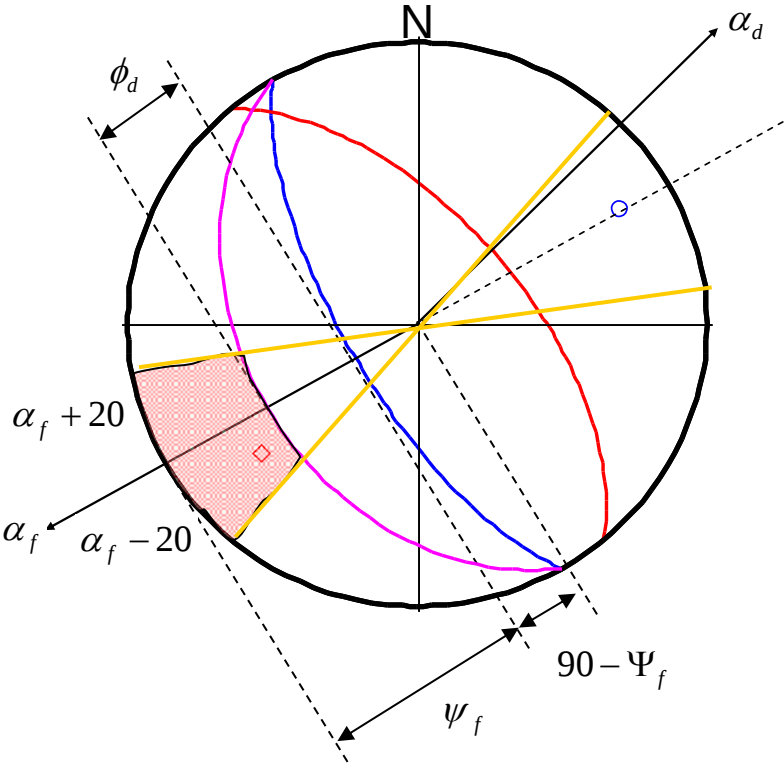


Falla por volcamiento

Las condiciones 2 y 3 pueden ser representadas en una red

Polos que grafican dentro de la zona achurada son potenciales a presentar volcamiento

$$\psi_d \geq (90 - \psi_f) + \phi_d$$



Dominios estructurales- modos de falla

