



Ingeniería de Minas
FACULTAD DE CIENCIAS
FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
UNIVERSIDAD DE CHILE

DIPLOMA GEO-MINERO-METALURGIA Para Codelco



DISEÑO MINERO

Estabilidad de taludes en roca

Dr. Ing. Javier Vallejos
Octubre 2011

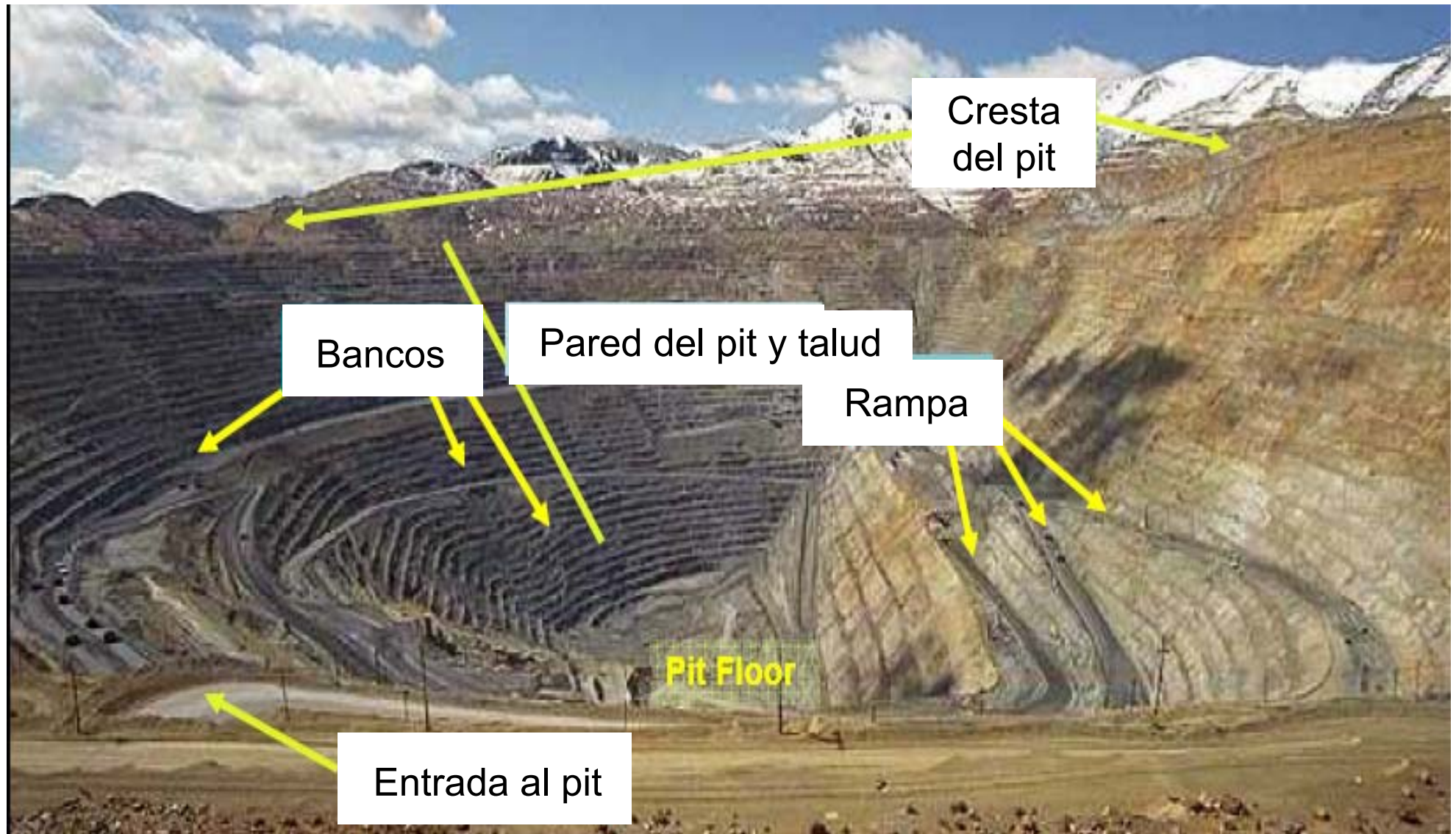
Taludes en roca

Los taludes en roca en la minería son encontrados principalmente en minas a cielo abierto. Sin embargo, una variedad de actividades de ingeniería requieren realizar excavaciones superficiales en roca (carreteras y ferrocarriles, represas, desarrollo urbano e industrial, etc.).

Aquí, el énfasis es colocado en la estabilidad de taludes para la minería a cielo abierto

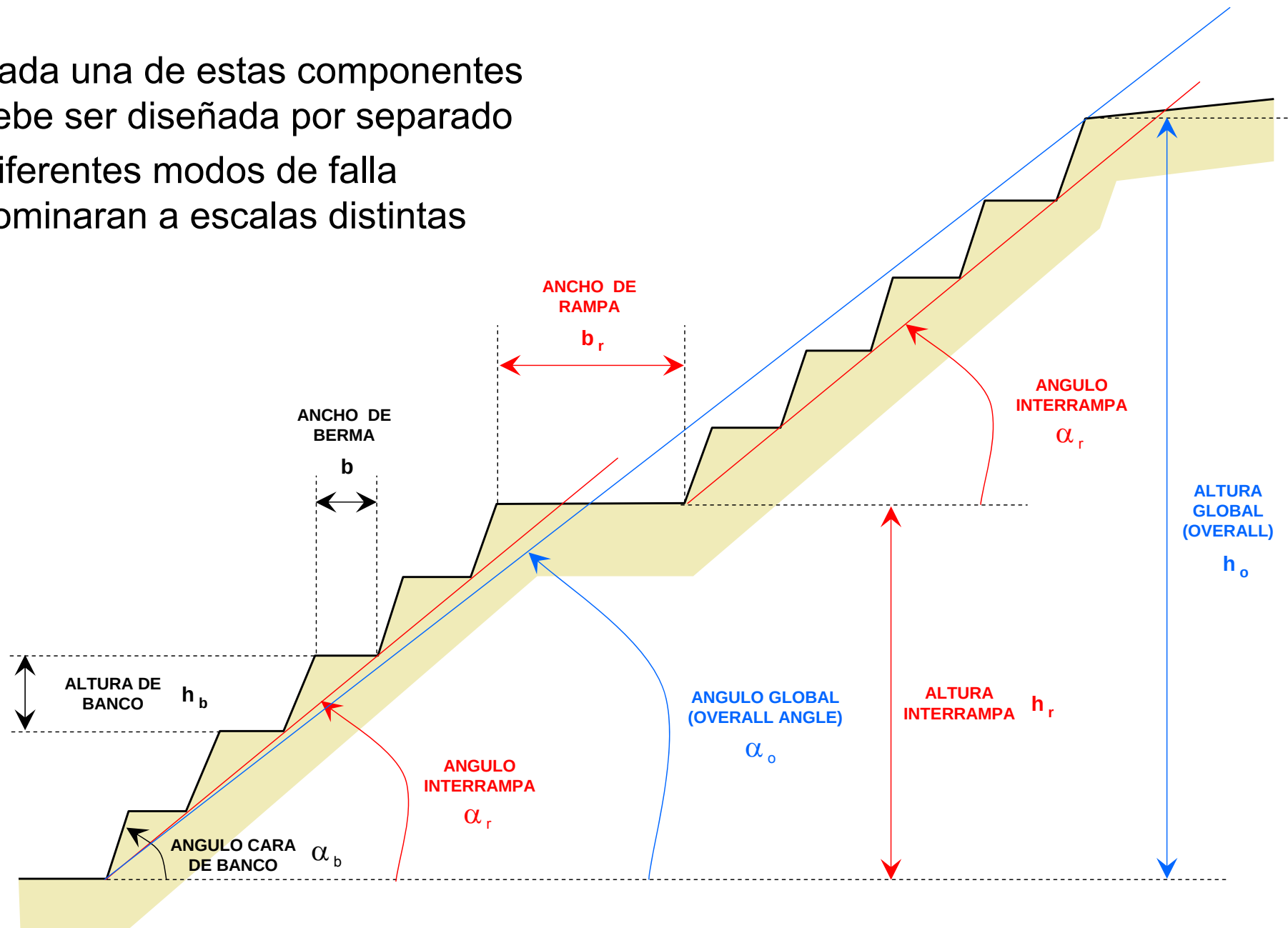


Minas a cielo abierto



Componentes geométricas de un talud minero

- Cada una de estas componentes debe ser diseñada por separado
- Diferentes modos de falla dominaran a escalas distintas



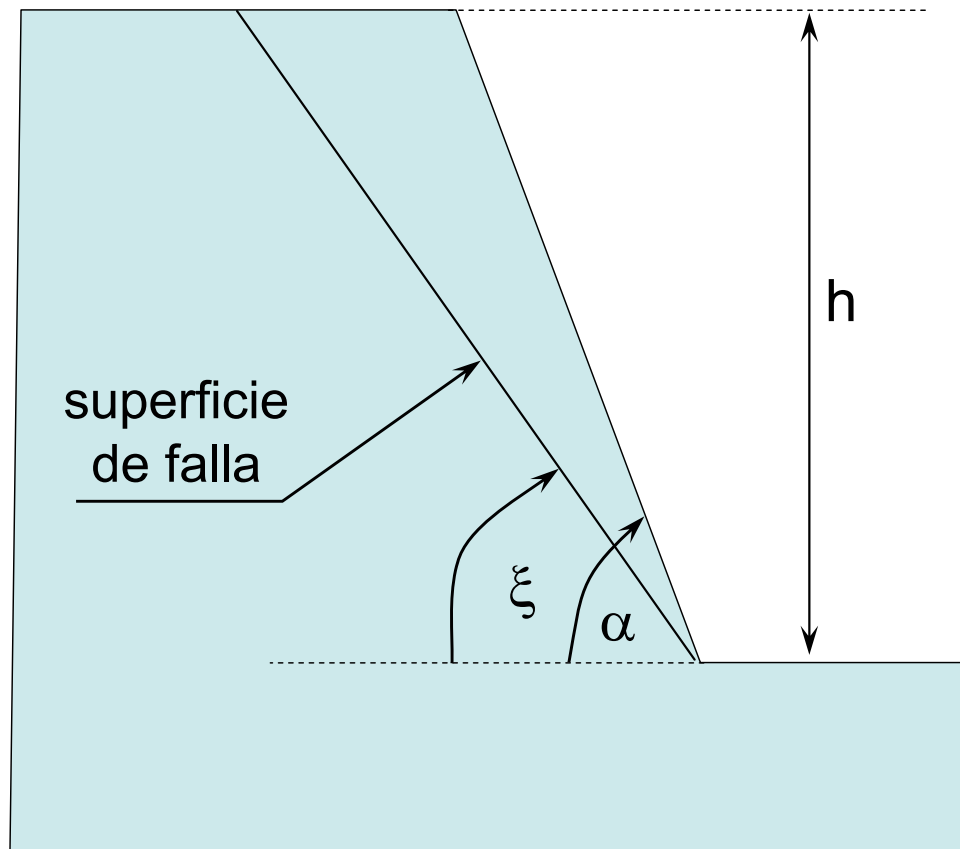
Componentes geométricas de un talud minero

- 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 numero 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



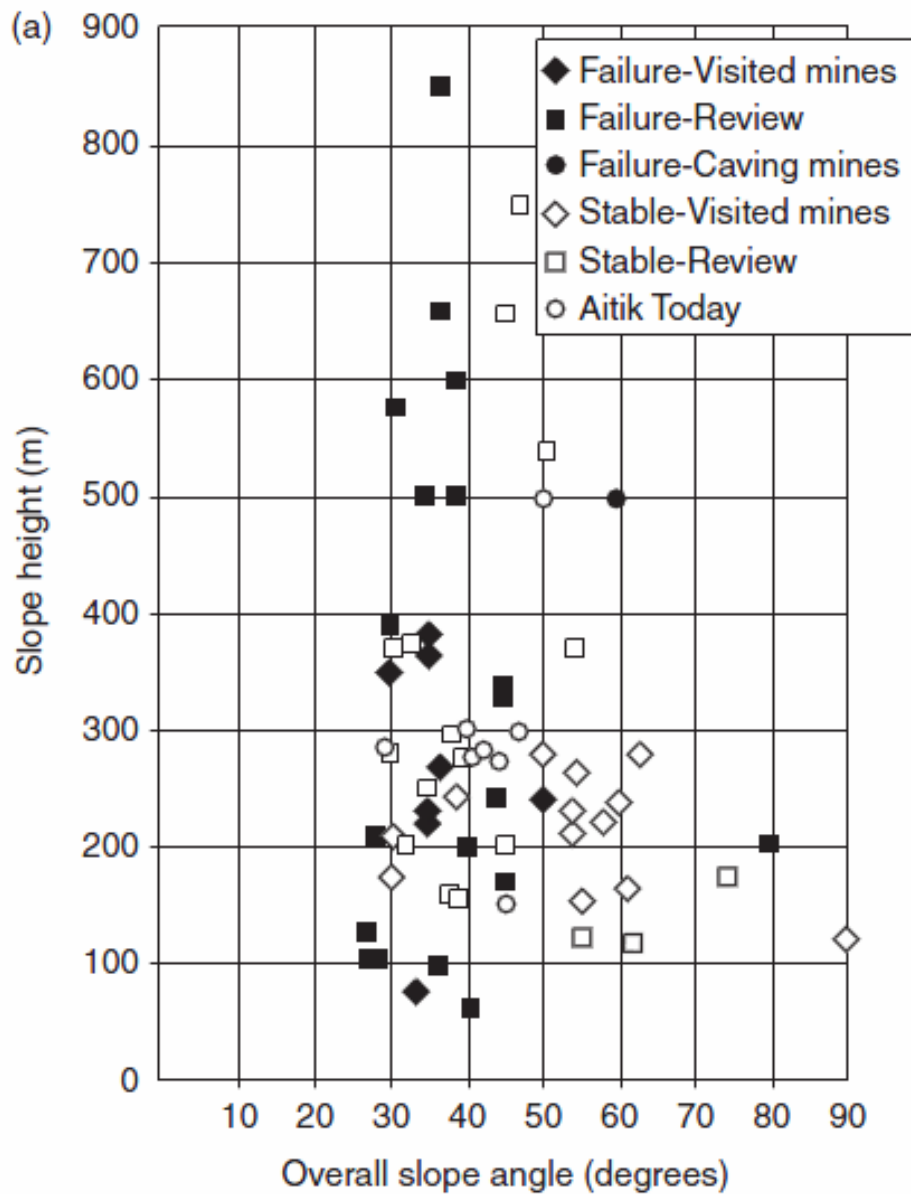
Relación entre el ángulo y altura del talud



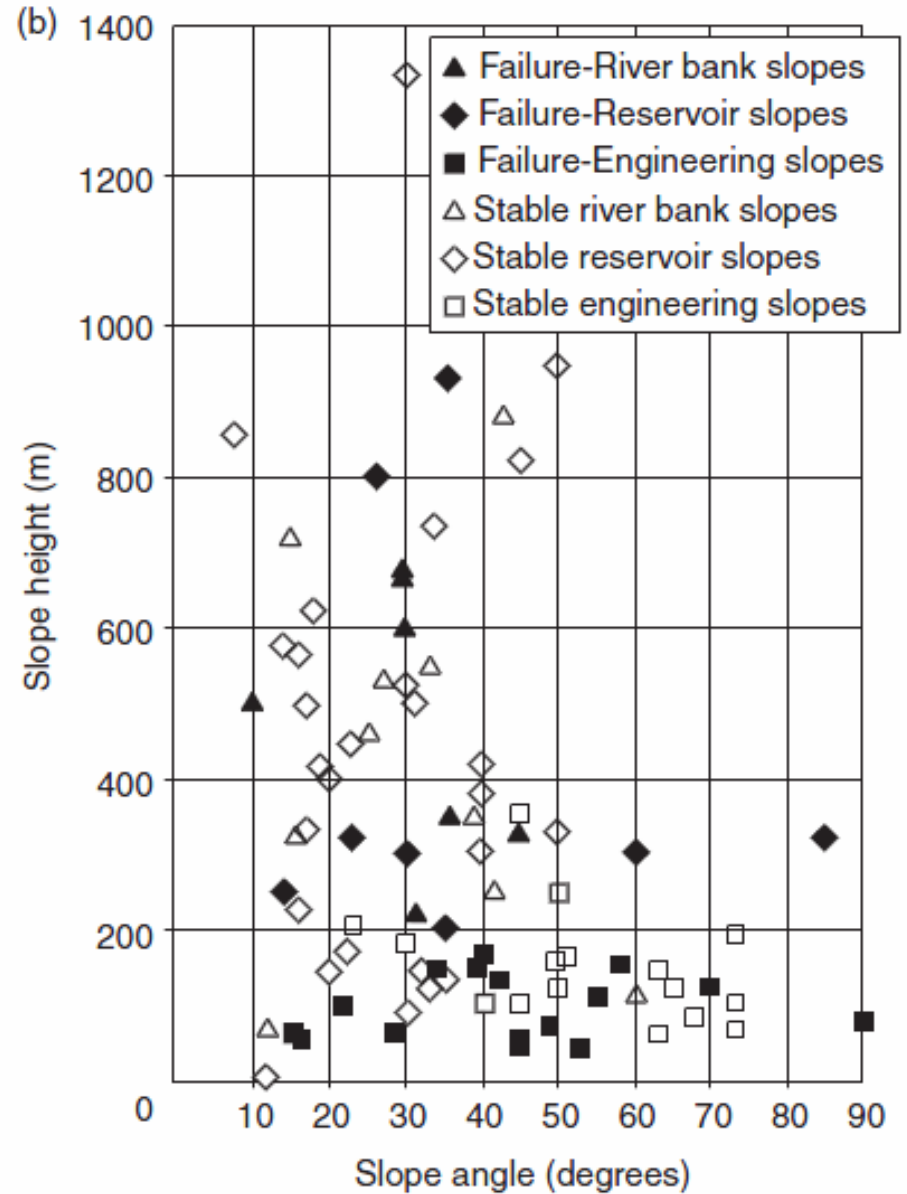
Si el talud es demasiado alto fallará, por lo que para un α dado hay un valor máximo permisible para h

Si el talud es demasiado empinado fallará, por lo que para un h dado hay un valor máximo permisible para α

Relación entre el ángulo y altura del talud



(a) Taludes en minas (Sjöberg, 1999)

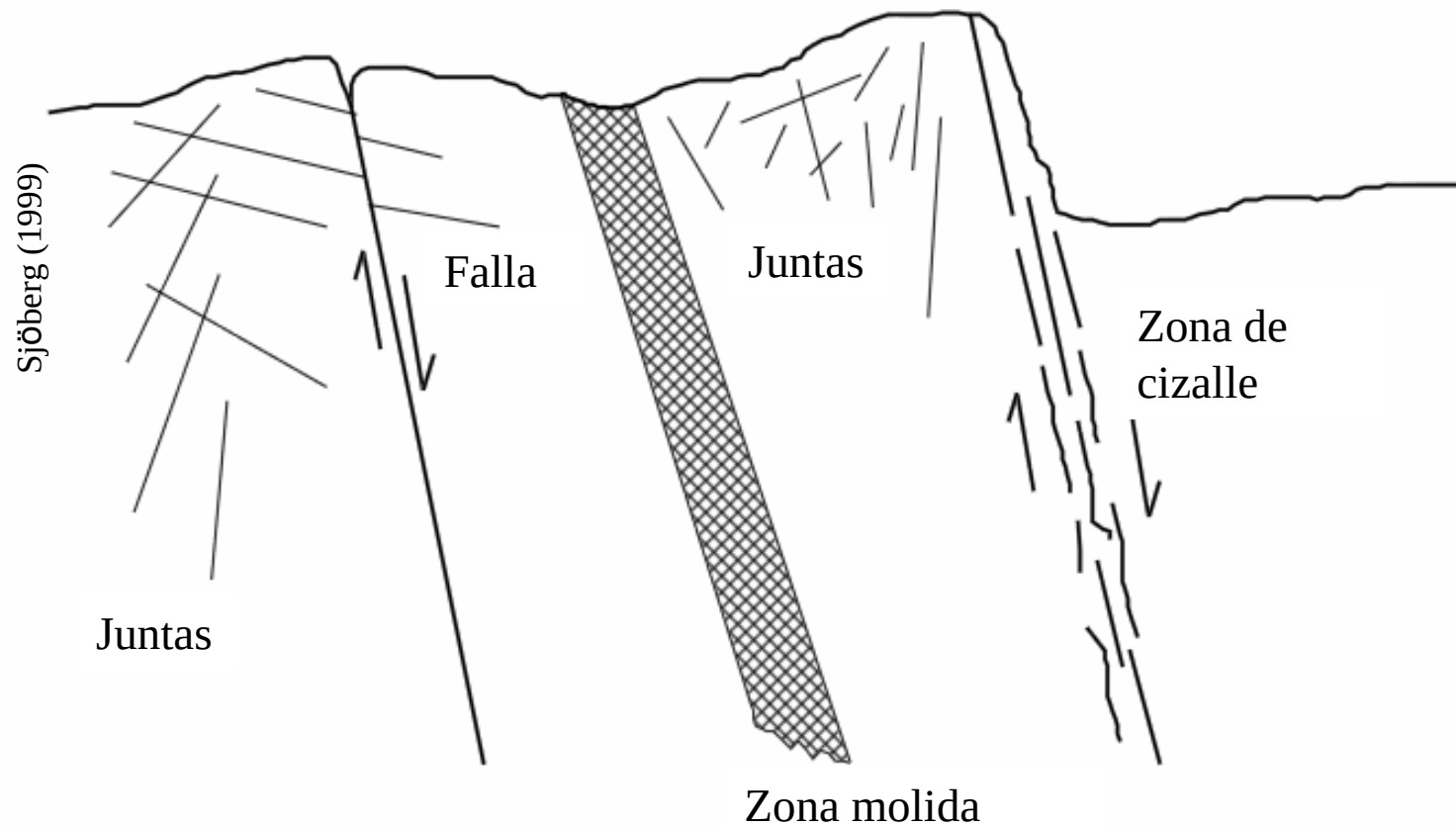


(b) Taludes naturales y civiles en China (Chen, 1995)

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

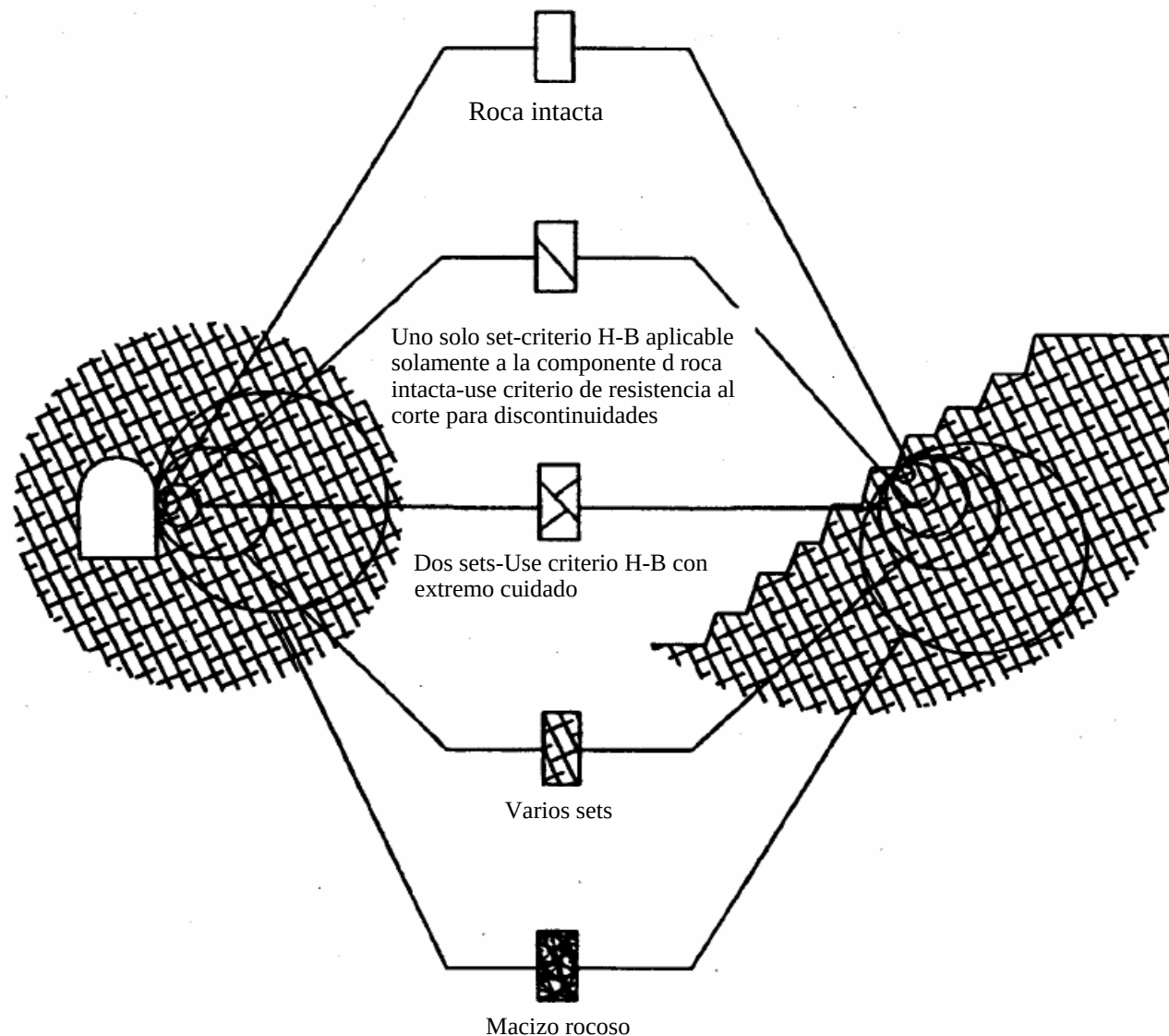
Estructuras geológicas-efecto escala



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

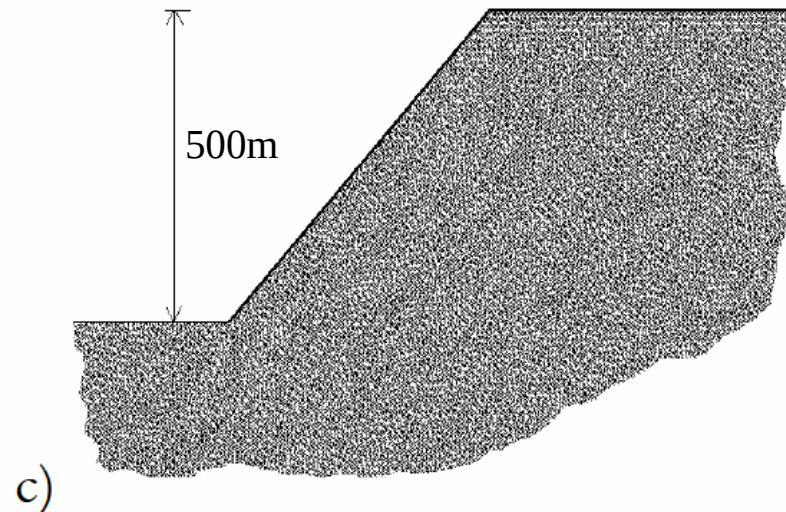
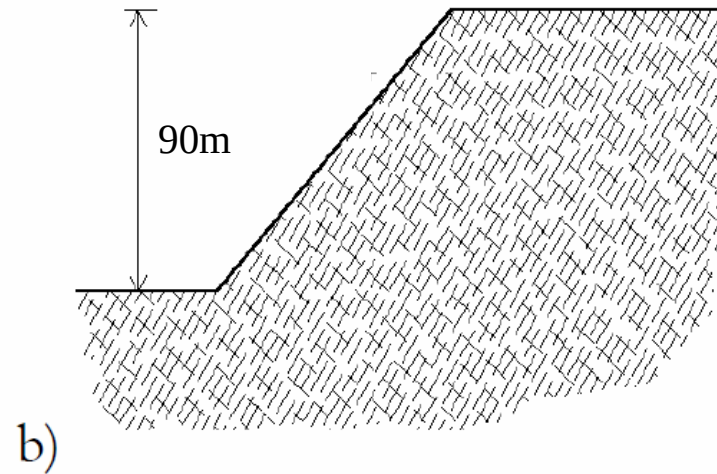
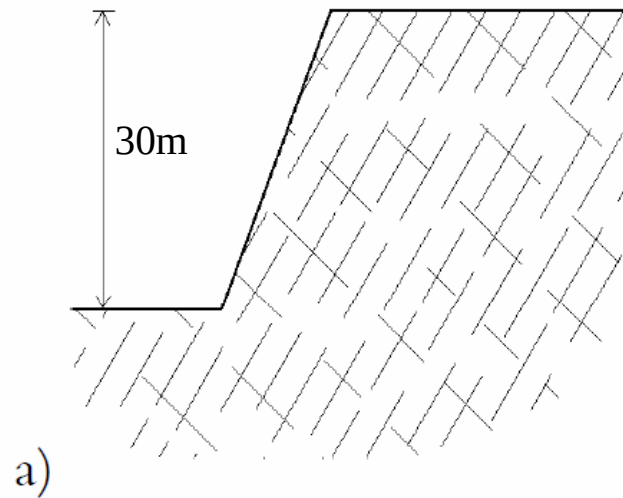
Estructuras geológicas-efecto de escala

El efecto escala en el macizo rocoso influye en como la resistencia del material es determinada (Hoek et al., 1995)



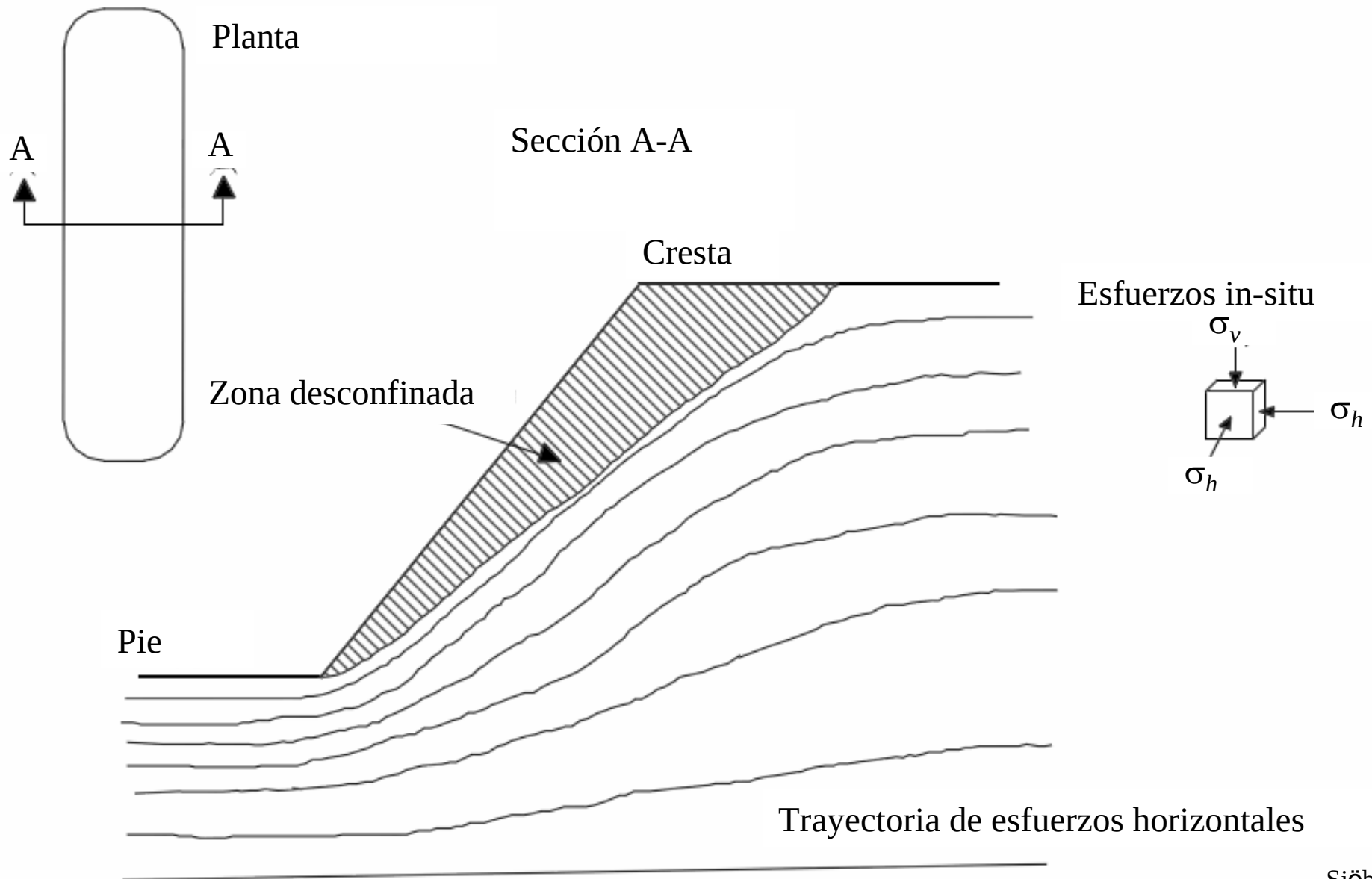
Estructuras geológicas-efecto de escala

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



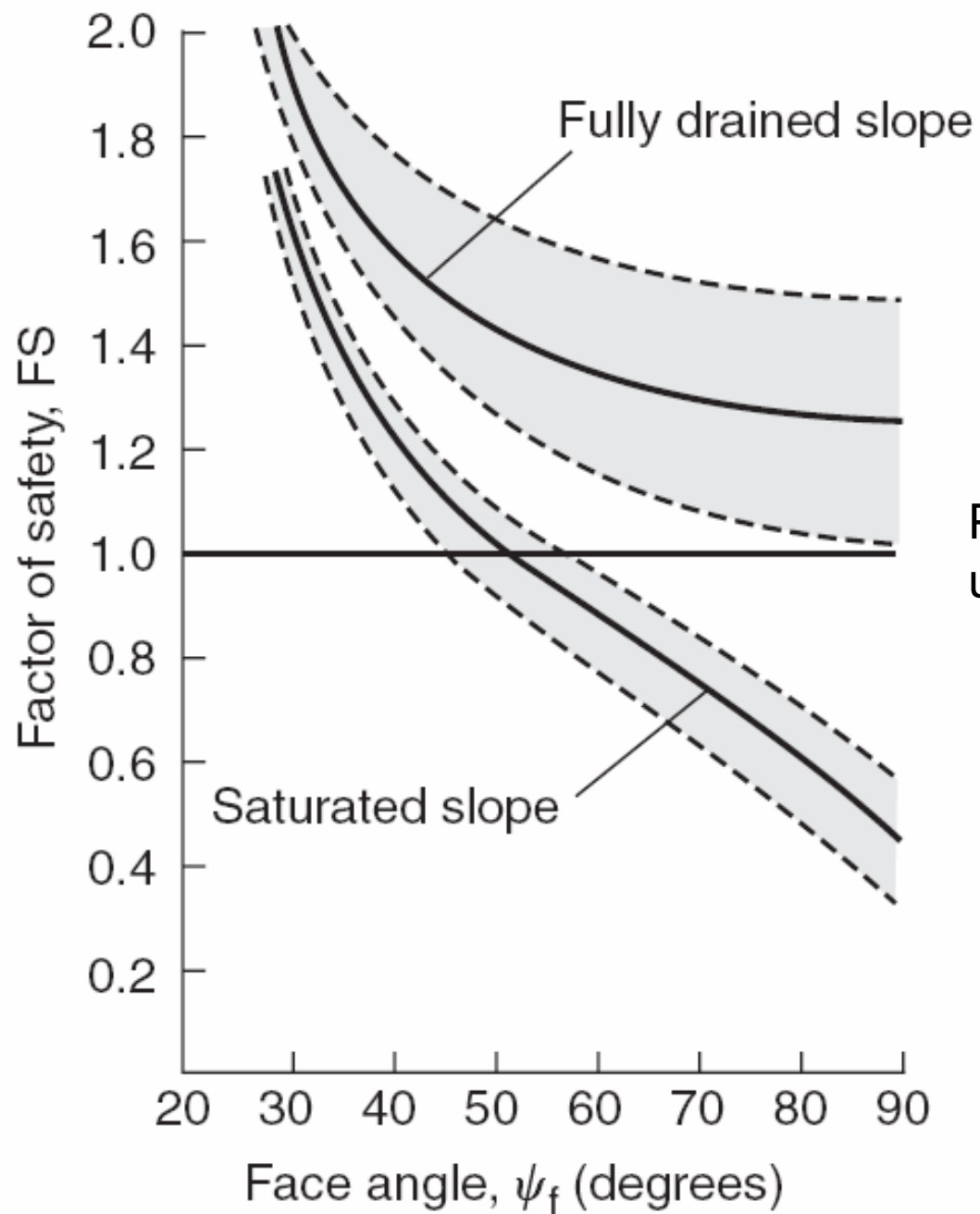
Sjöberg (1999)

Esfuerzos



Sjöberg (1999)

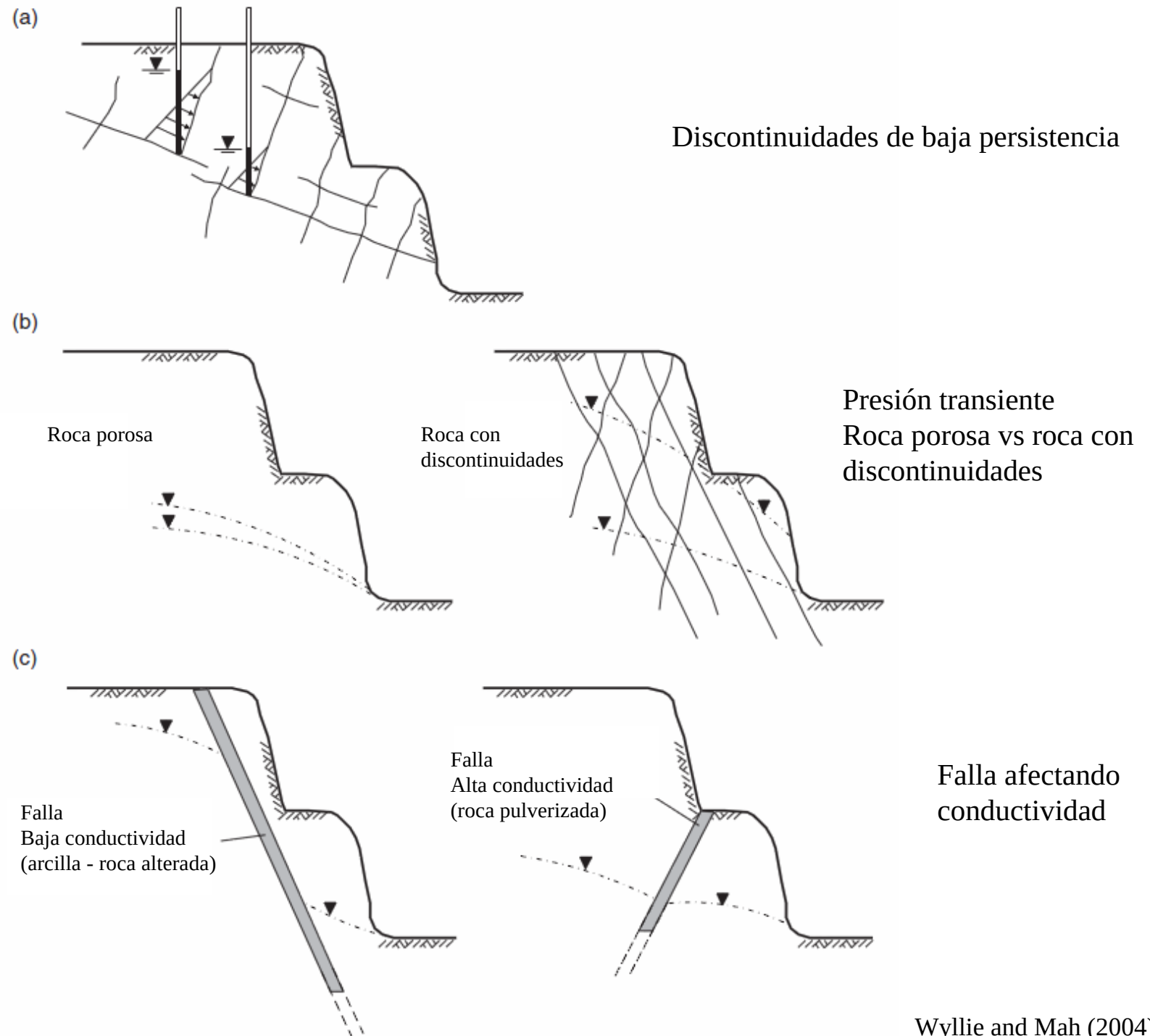
Agua



Para un talud de 60m en una cantera de limolita

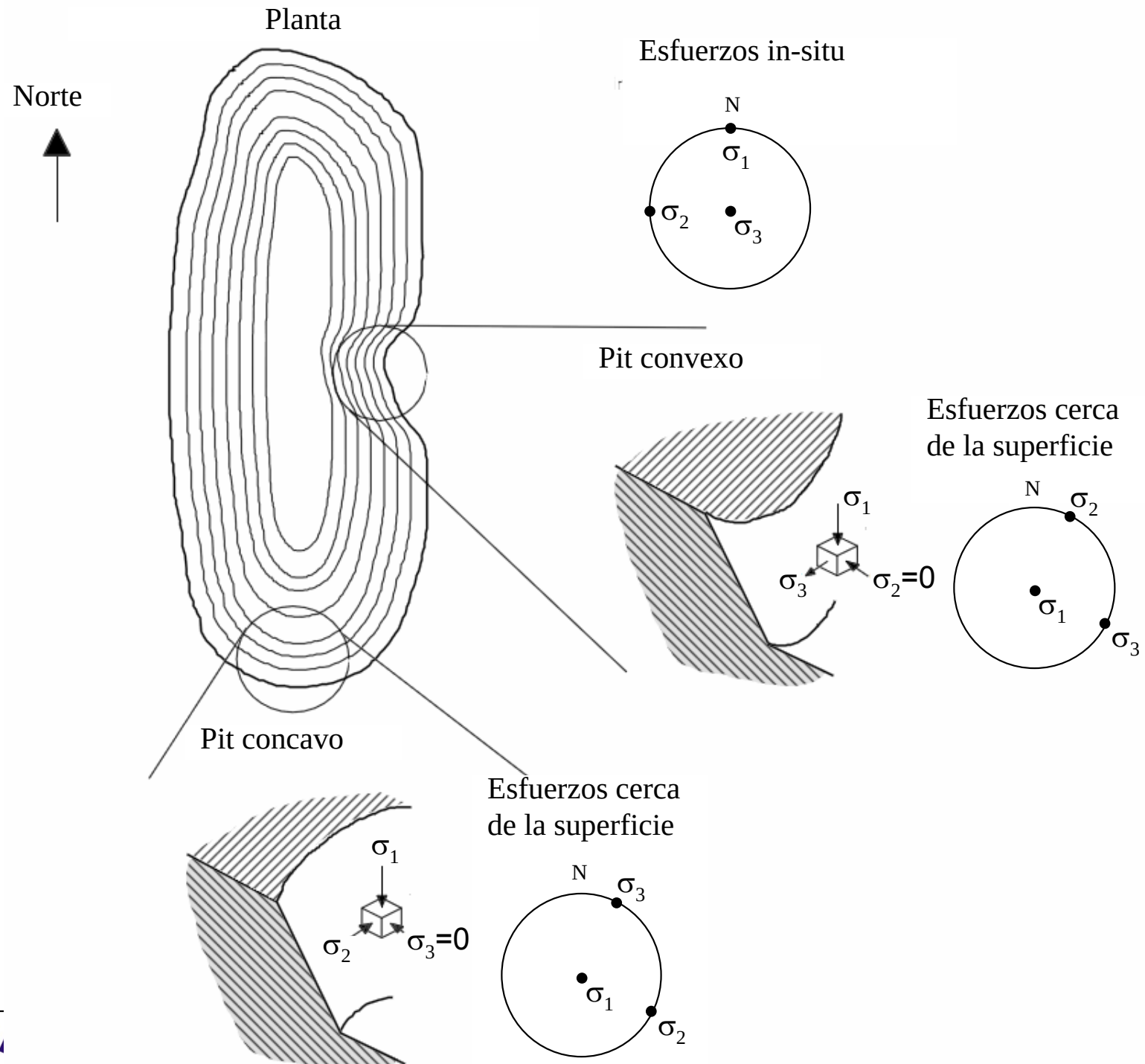
Wyllie and Mah (2004)

Agua



Wyllie and Mah (2004)

Curvatura y geometría del pit



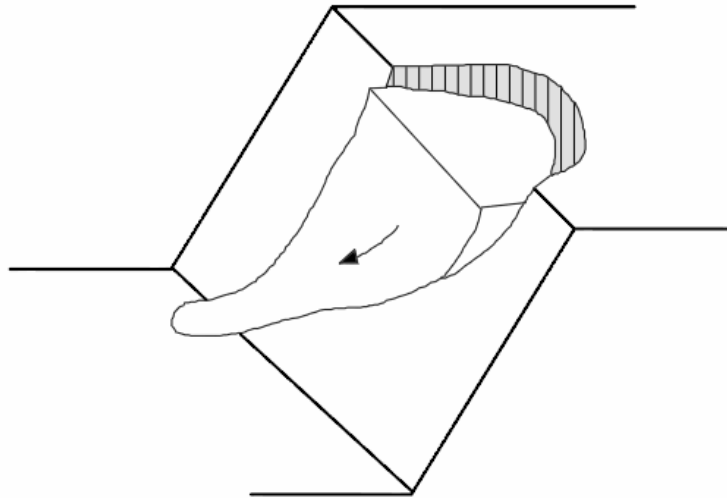
Modos de falla

Los principales tipos de falla que pueden ocurrir en los taludes del pit son:

- Plana
- Cuña
- Toppling
- Circular
- Compleja

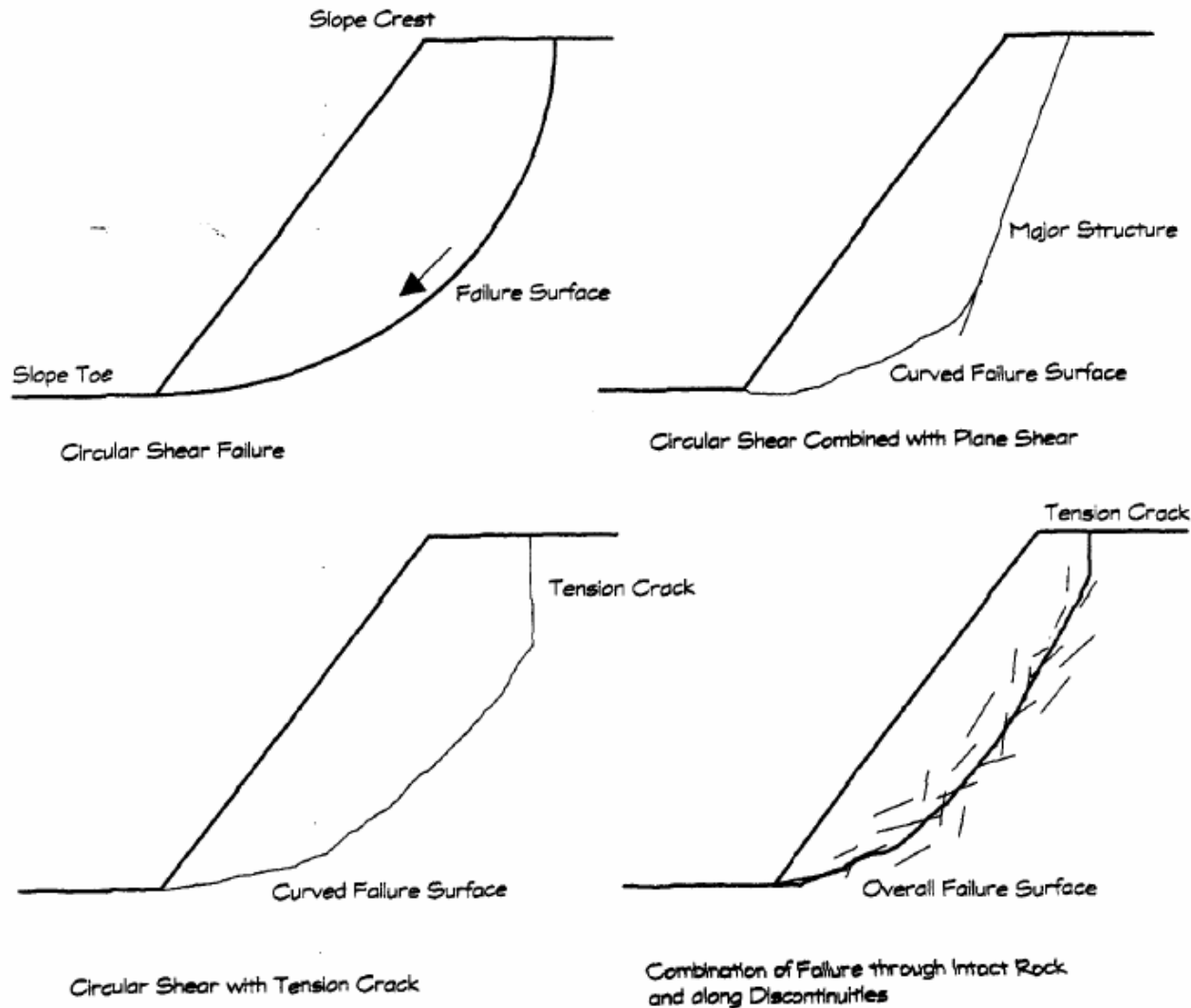
Modos de falla

Geometría de una falla por corte circular en tres dimensiones
(Hoek and Bray, 1981; Franklin and Dusseault, 1991)



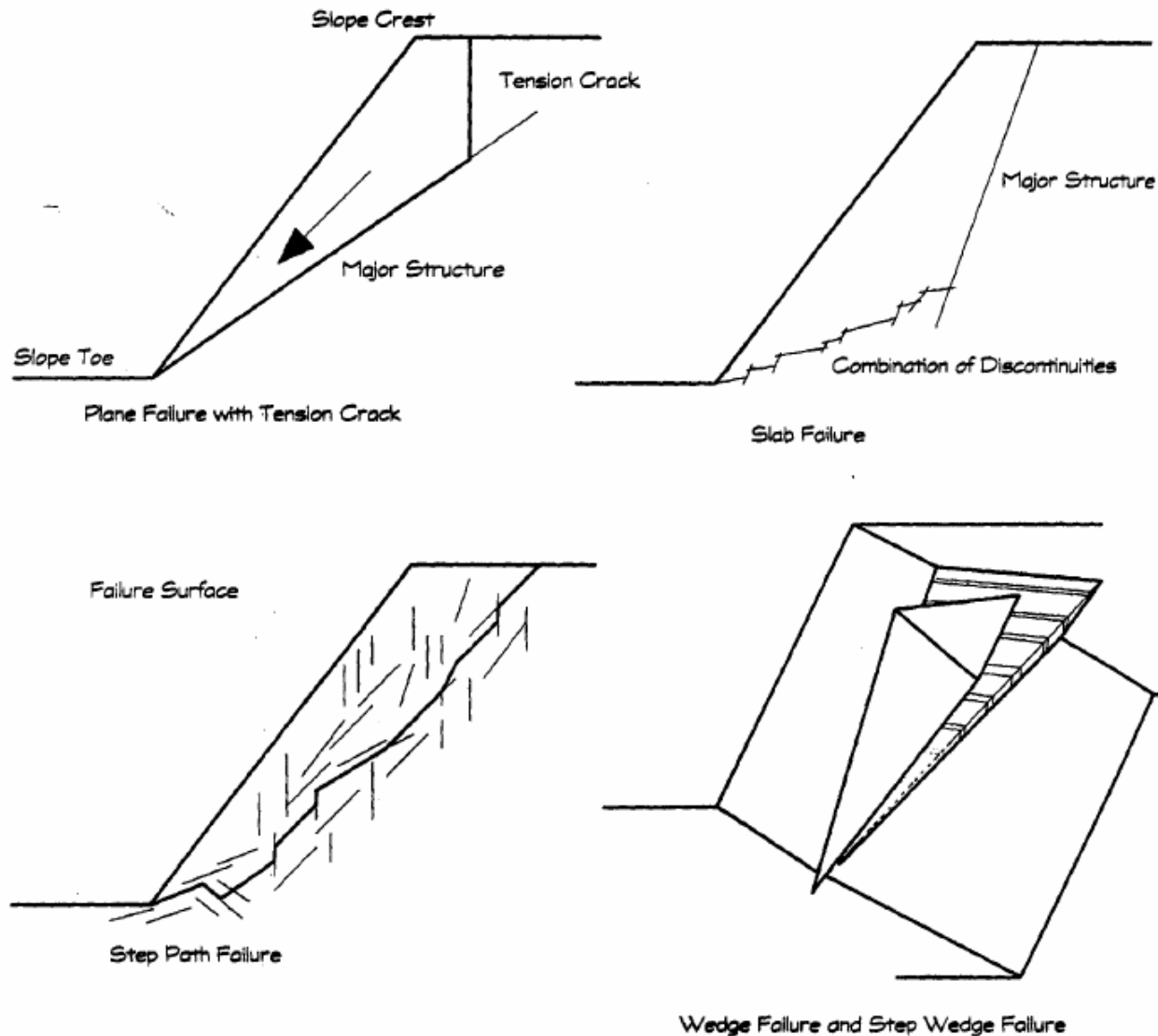
Modos de falla

Fallas circulares y combinaciones de falla por corte circular y falla por corte plano (Coates, 1977; Hoek and Bray, 1981)



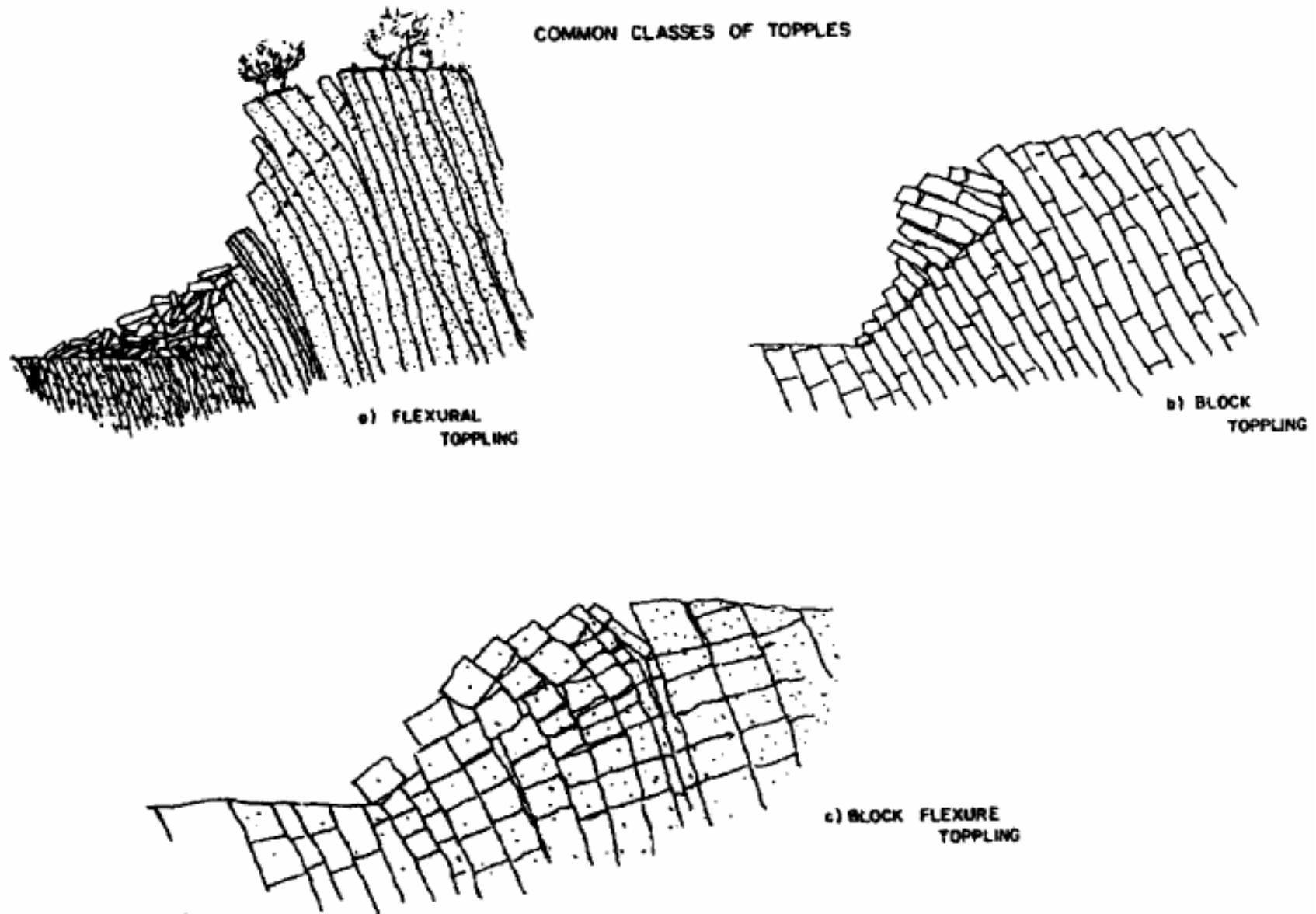
Modos de falla

Combinación de discontinuidades formando una superficie de falla (Coates, 1977; West et al., 1985; Call and Savely, 1990)



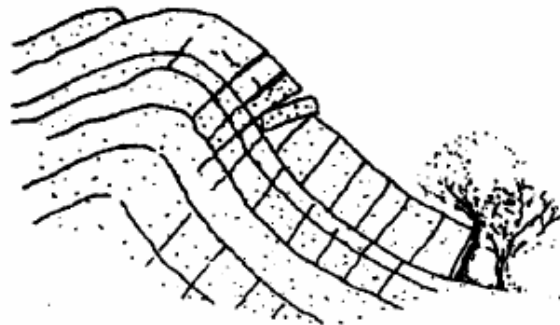
Modos de falla

Tipos comunes de volcamiento primario (Goodman and Bray, 1976)

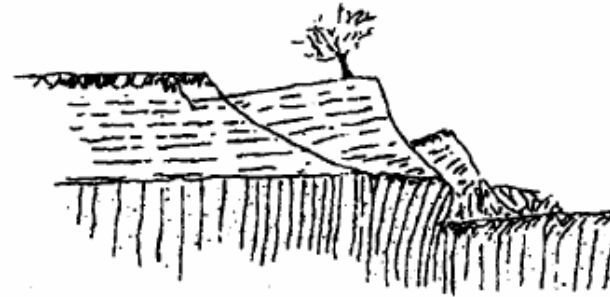


Modos de falla

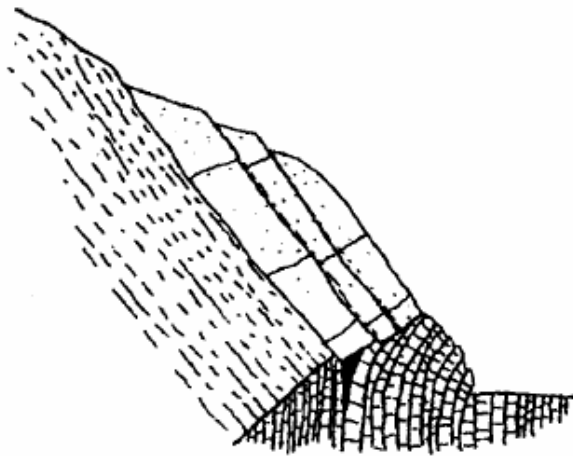
Volcamiento secundario (Goodman and Bray, 1976)



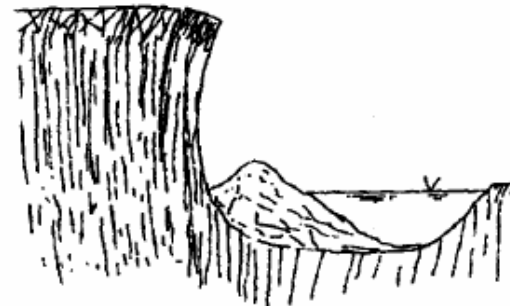
a) SLIDE HEAD TOPPLING



b) SLIDE BASE TOPPLING



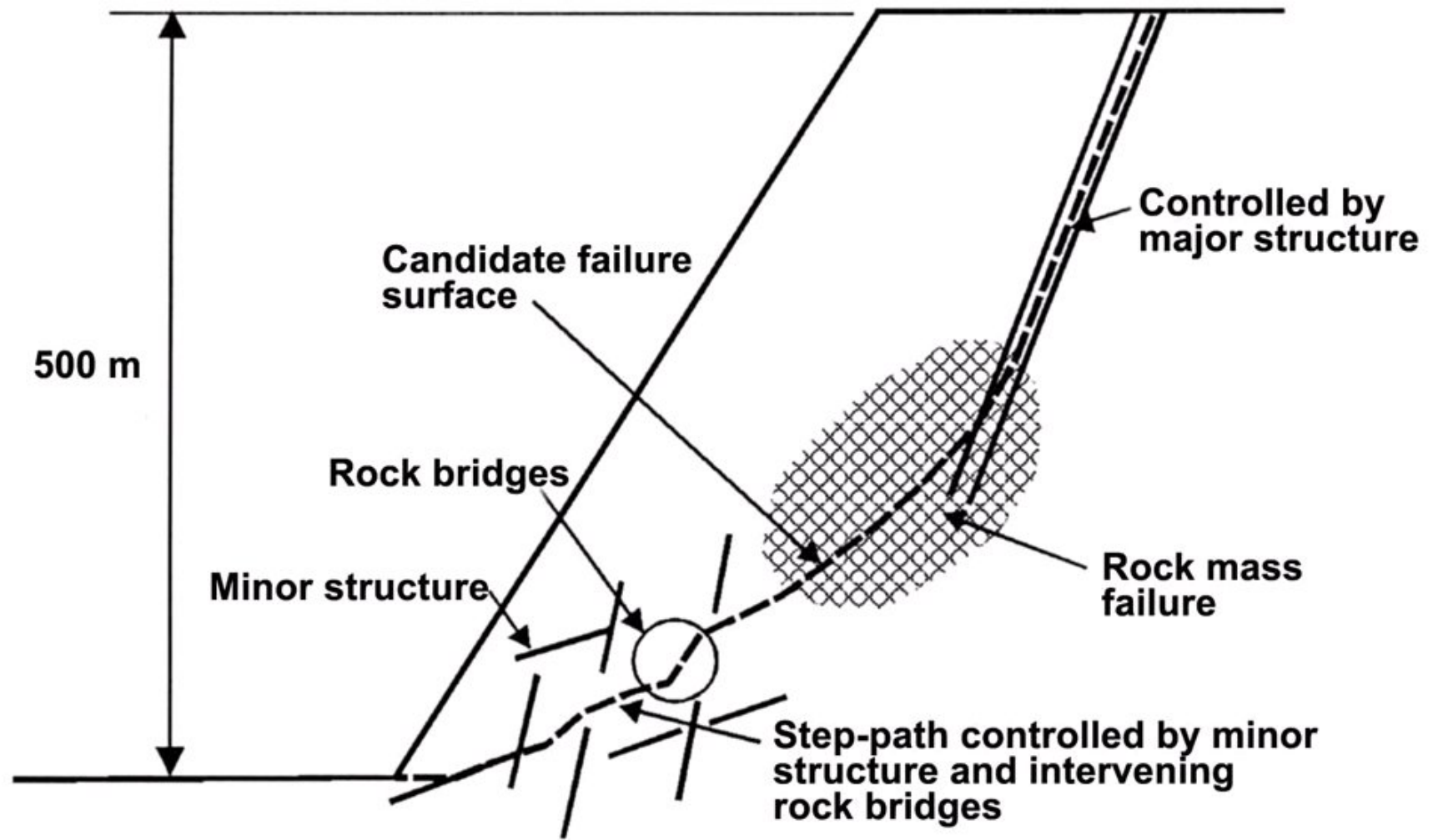
c) SLIDE TOE TOPPLING



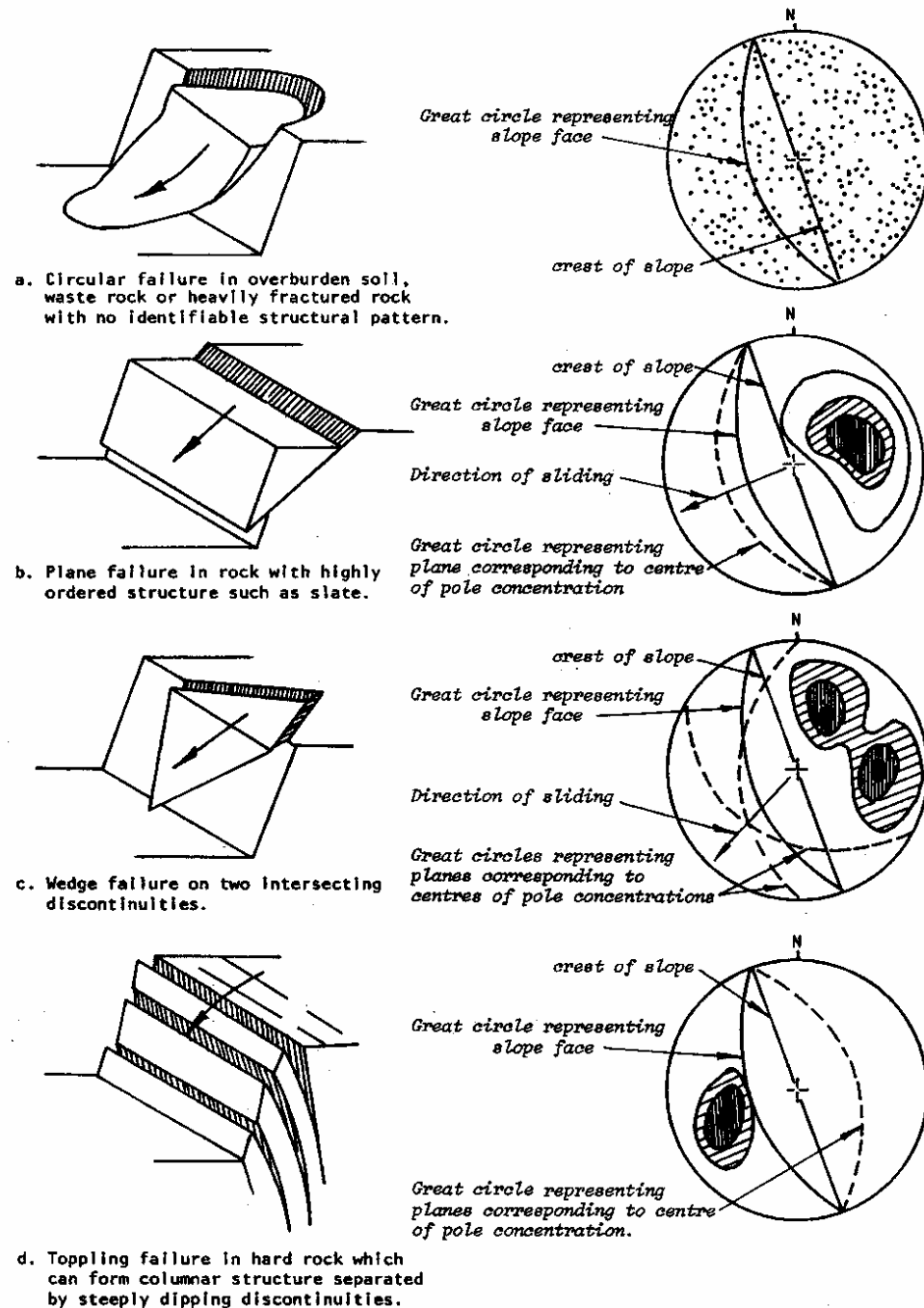
d) TENSION CRACK TOPPLING

Modos de falla

Fallas en pit profundos (Hoek et al., 2000)



Modos de falla



Main types of slope failure and stereoplots of structural conditions likely to give rise to these failures.

Metodología de diseño

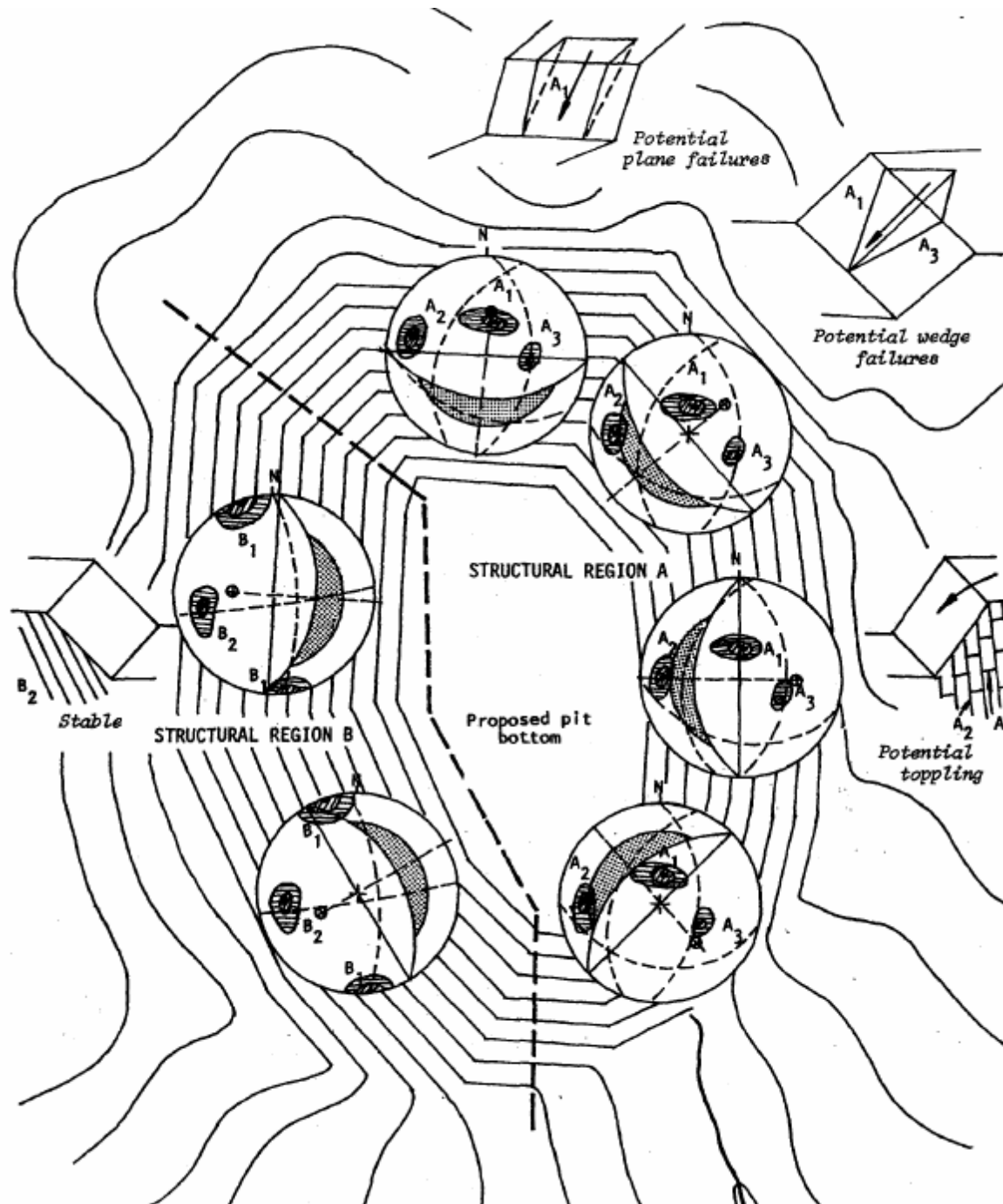
Los pasos principales en el diseño de taludes son:

- Caracterización del macizo rocoso
 - Geología (unidades litológicas)
 - Estructuras (discontinuidades, fallas)
 - Condiciones de agua
- Ensayos de laboratorio de roca intacta y discontinuidades
- Determinación de resistencia del macizo rocoso
- Dividir el pit en regiones de características geotécnicas similares o de comportamiento esperado similares (dominios geotécnicos)
- Seleccionar el método de análisis para cada región
- Back análisis del comportamiento observado
- Programa de monitoreo

Dominios geotécnicos

- Los bordes de los dominios geotécnicos no siempre corresponden con bordes geológicos, sin embargo, ellos son un buen punto de partida a considerar
- Al dividir el macizo rocoso en distintos dominios se clarifica y simplifica el análisis
- Si las propiedades del macizo rocoso en dos dominios geotécnicos son similares, considerar combinarlos en un solo dominio. Diferencia de propiedades (sets de discontinuidades, alteración, etc.) y comportamiento esperado (mecanismos de falla) son los factores decisivos

Dominios geotécnicos



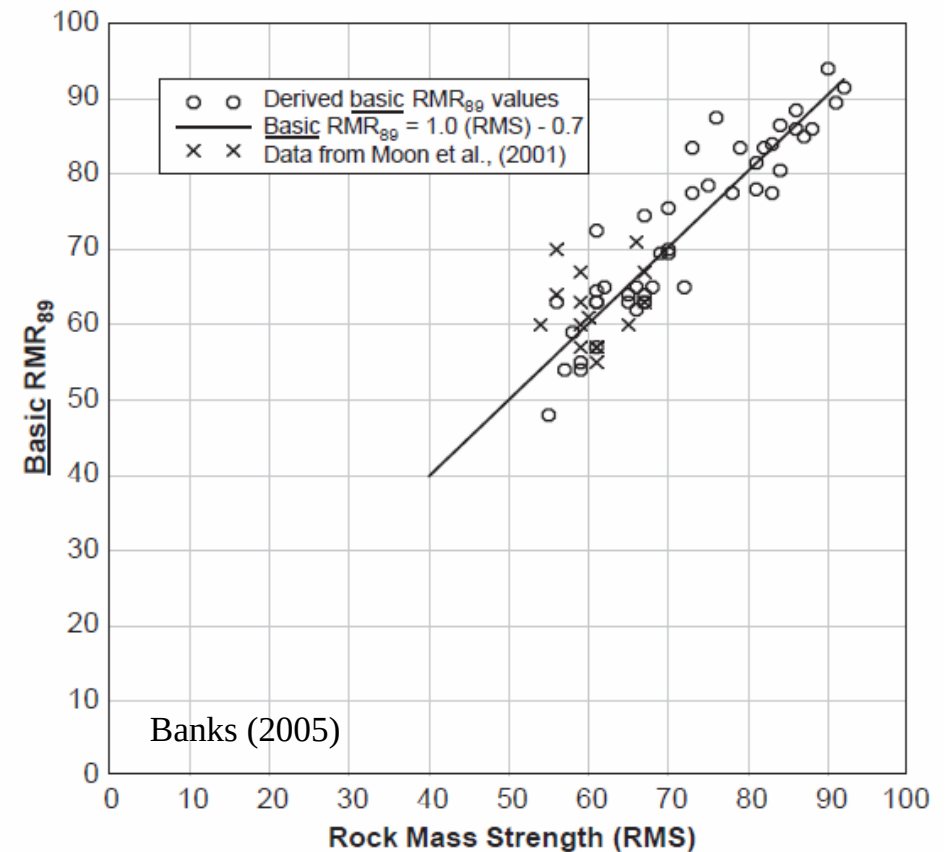
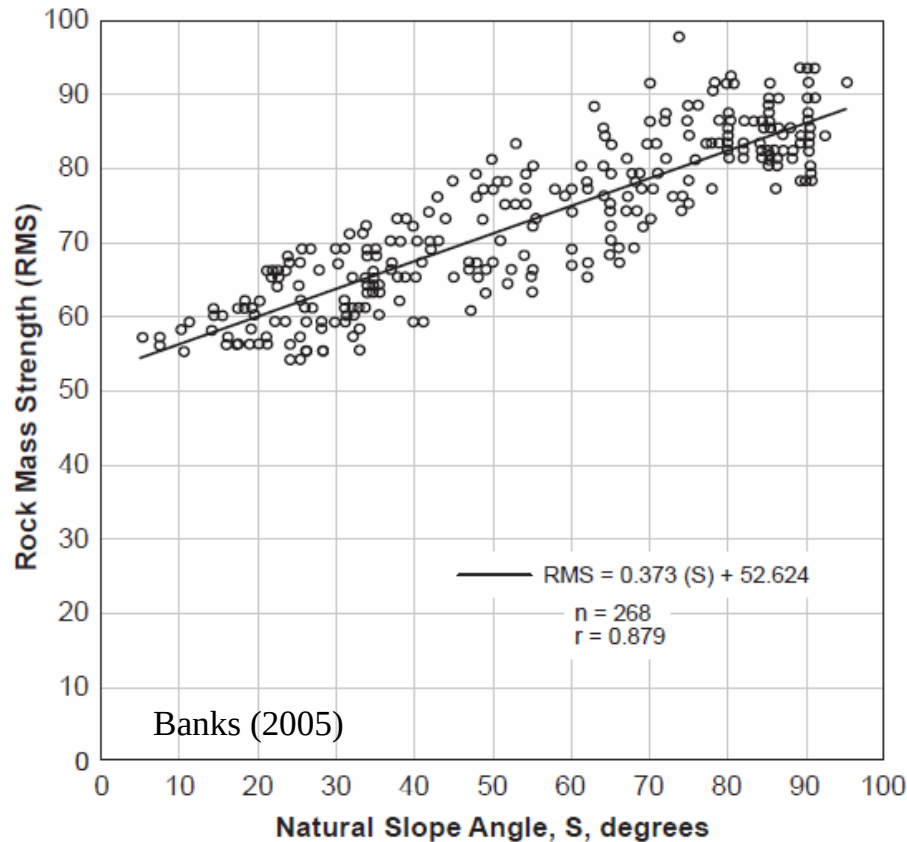
Análisis de estabilidad de taludes

- Métodos empíricos
- Análisis cinemático (redes)
- Métodos de equilibrio limite
- Modelación numérica
 - Continuo
 - Discontinuo
- Probabilística



Métodos empíricos

Clasificación del macizo rocoso RMS ($\approx$ RMR) vs el ángulo natural del talud



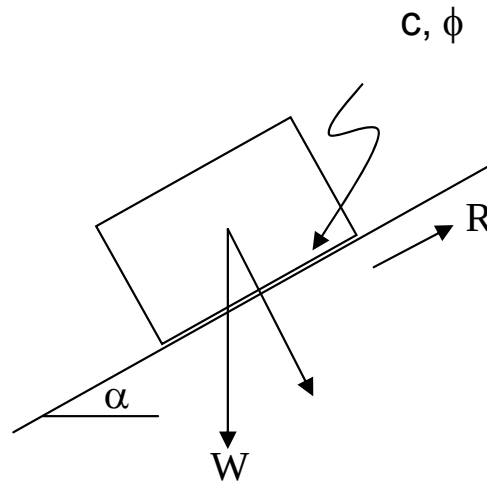
- Marco de referencia para el diseño de taludes en roca
- No para ser utilizado en el diseño final de taludes en minería a cielo abierto

Equilibrio limite

- Superficie de falla debe ser asumida
- Basado en una comparación entre fuerzas/momentos resistentes con fuerzas/momentos deslizantes
- Normalmente la resistencia de material se describe con un criterio de Mohr-Coulomb
- Ninguna de las ecuaciones básicas de la mecánica del continuo (ecuaciones de compatibilidad de deformación y comportamiento constitutivo) son satisfechas completamente
- La deformación del material no se considera
- La resistencia al corte es movilizada completamente a lo largo de la superficie de falla en el momento de la falla

Equilibrio limite

Ejercicio: Determine una expresión para el FS al deslizamiento debido a la carga gravitacional del bloque. Analice el caso $c=0$, $FS=1$

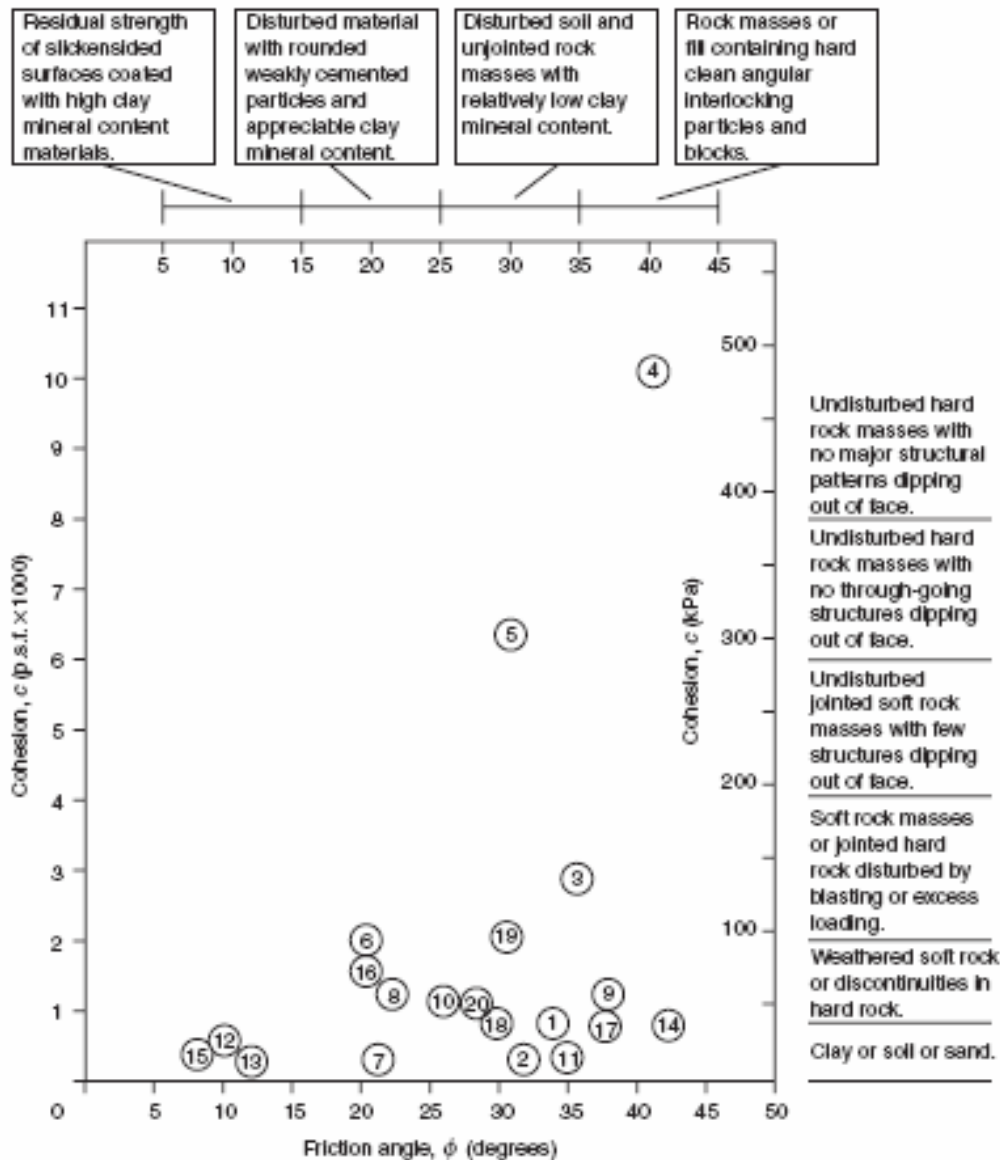


Equilibrio limite

Ejercicio: Determine una expresión para el FS al deslizamiento debido a la carga gravitacional del bloque. Analice el caso $c=0$, $FS=1$

Equilibrio limite

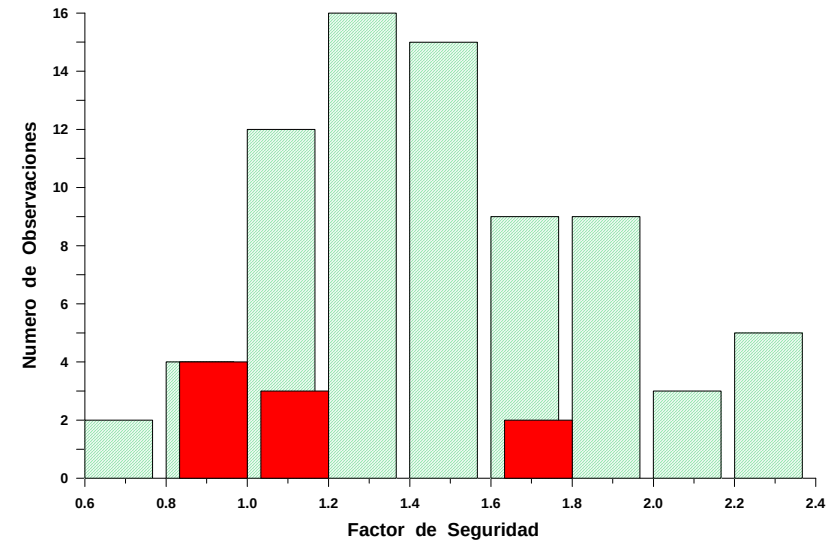
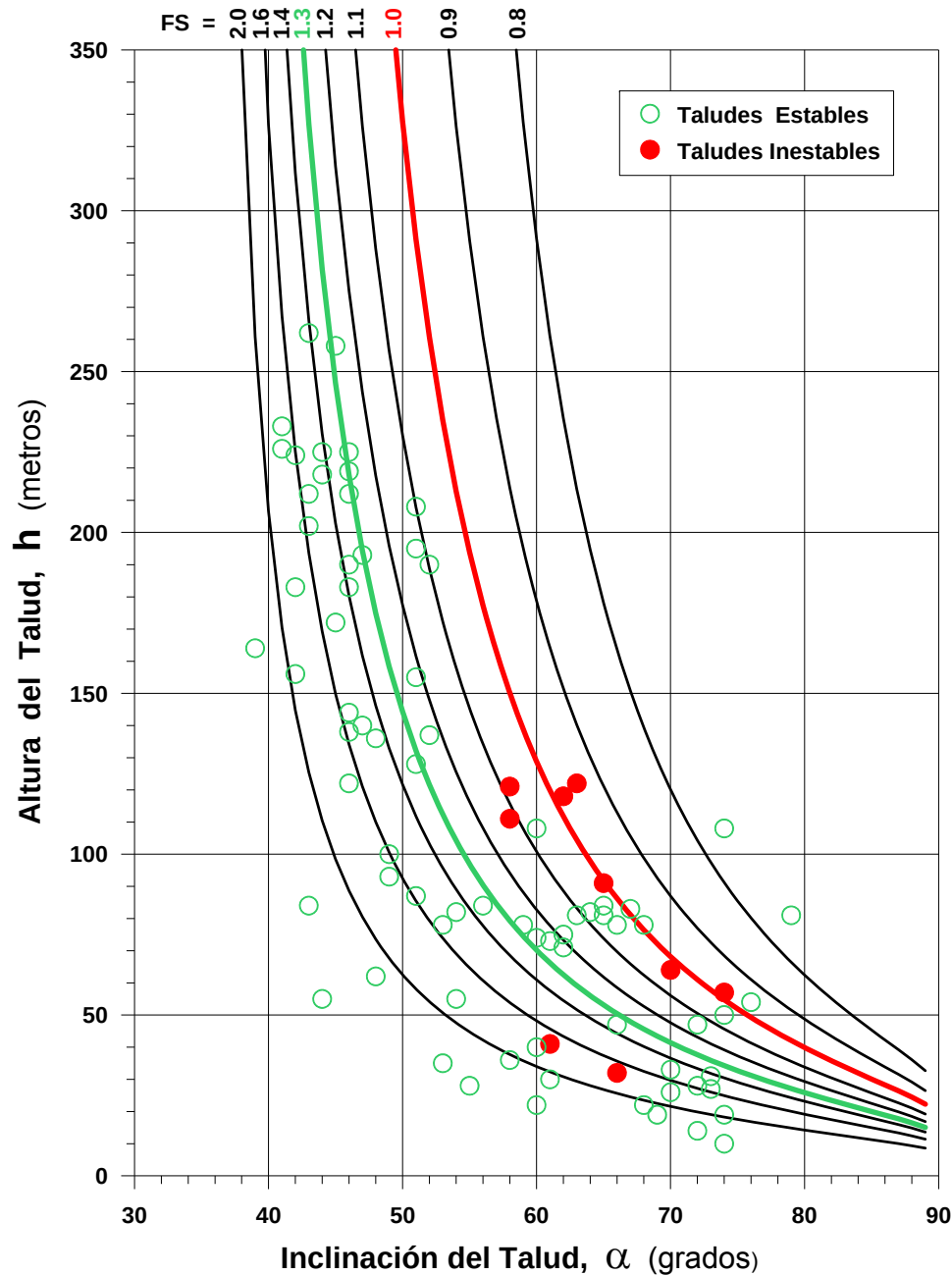
Ángulos de fricción y cohesión



Resultados del back-análisis de falla de taludes en una variedad de condiciones geológicas, estimando los parámetros de resistencia ϕ , c en la falla (Wyllie and Mah, 2004)

Añadiendo puntos adicionales en esta figura para condiciones geológicas locales, es posible desarrollar un gráfico de resistencia del macizo rocoso aplicable a fallas por corte

Equilibrio limite-Aceptabilidad del diseño



Resultados del análisis retrospectivo de taludes estables e inestables en pórfido cuprífero, Rajo Atalaya, Rio Tinto, España, sugieren que $FS \geq 1,30$ parece razonable.

Hoek (1969)