

VII CONGRESO VERSOS22

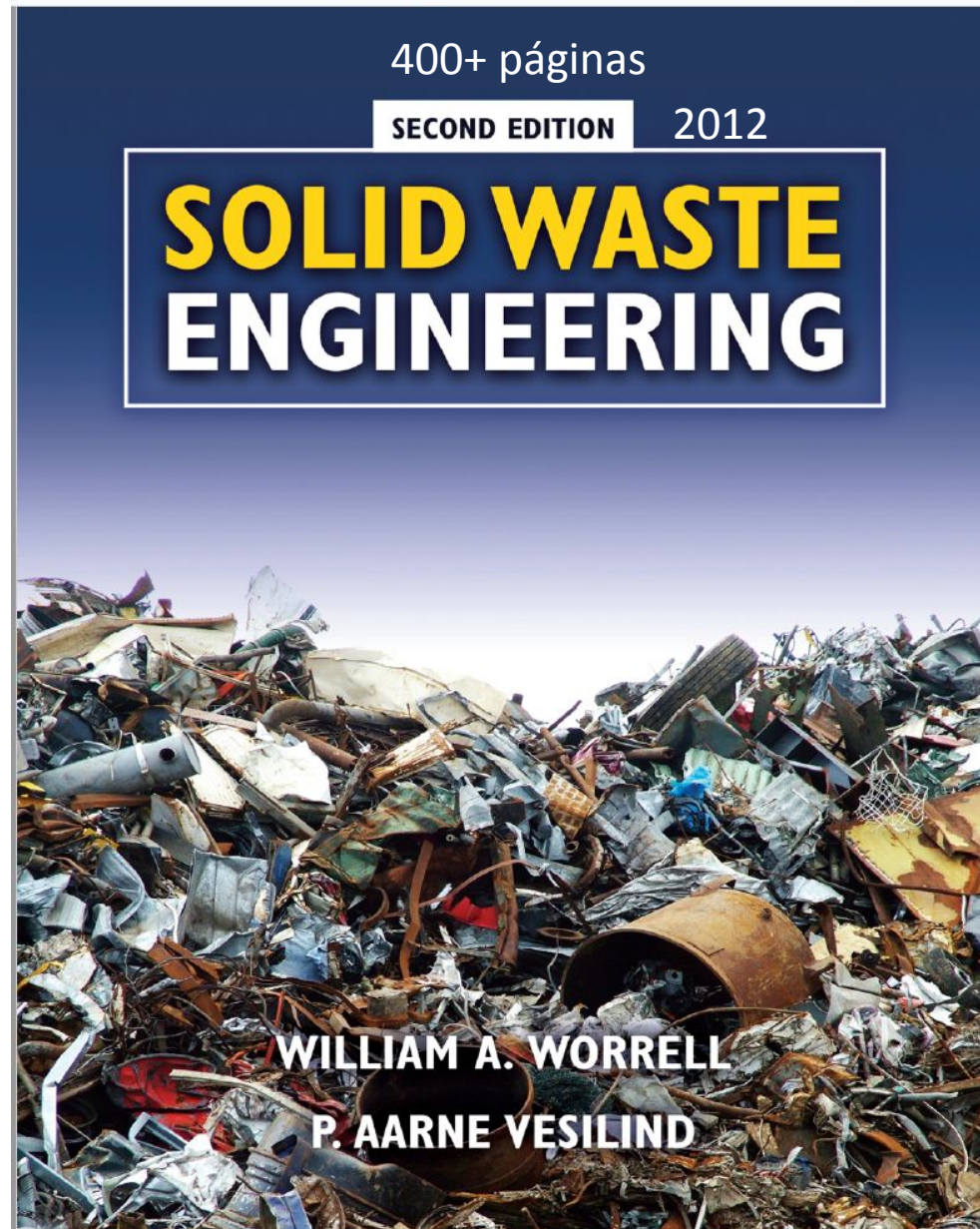
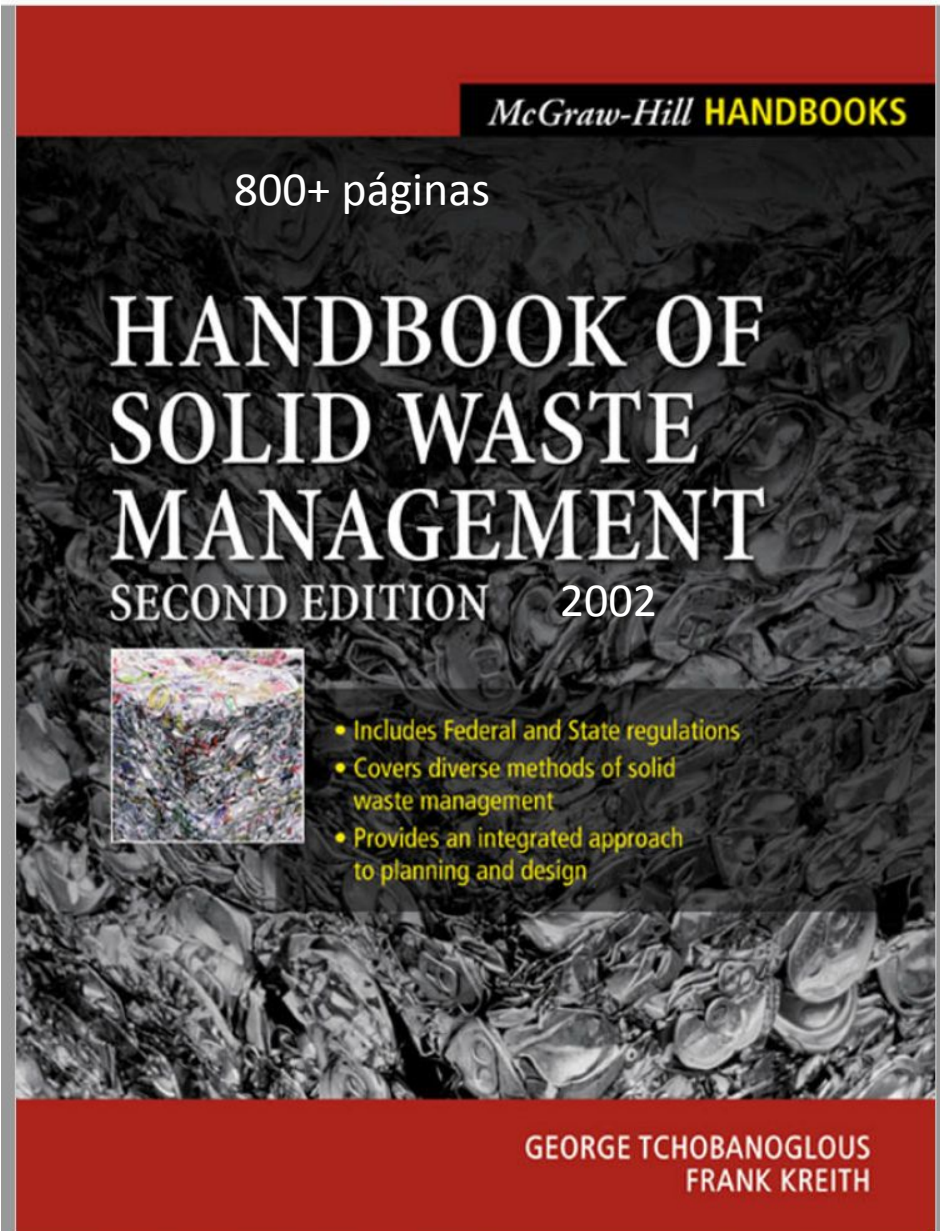
ESTABILIDAD DE VERTEDEROS Y RELLENOS A CIELO ABIERTO



Eduardo Alonso, Anna Ramon
ETS Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, UPC



Bilbao, 27 de octubre, 2022



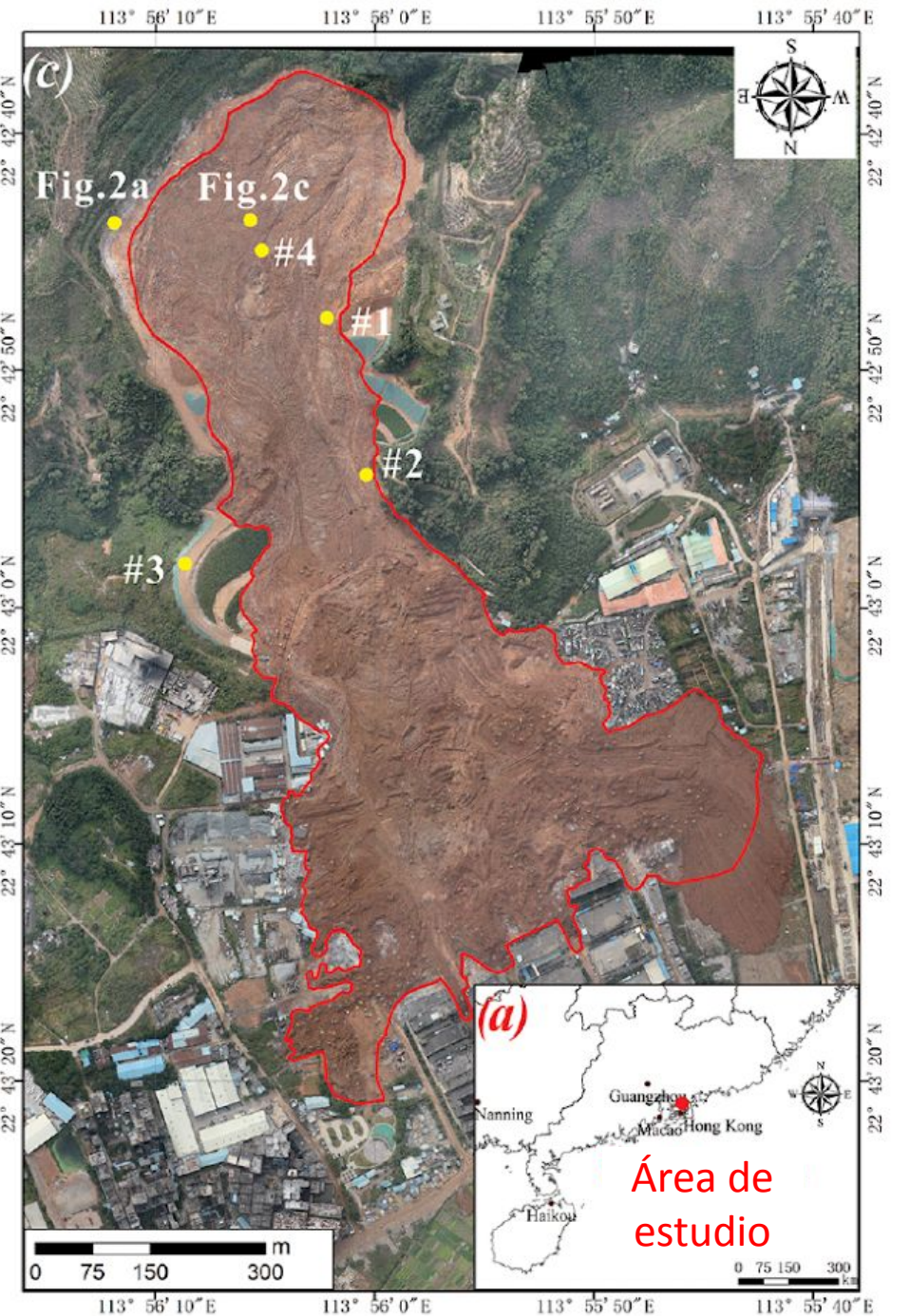
No hay
referencia a
problemas de
estabilidad de
vertederos!

Introducción.
Algunas roturas

Área del
emplazamiento
de Hongao.
China 2015

Construcción +
materiales de
demolición +
suelo

Xu et al., 2017

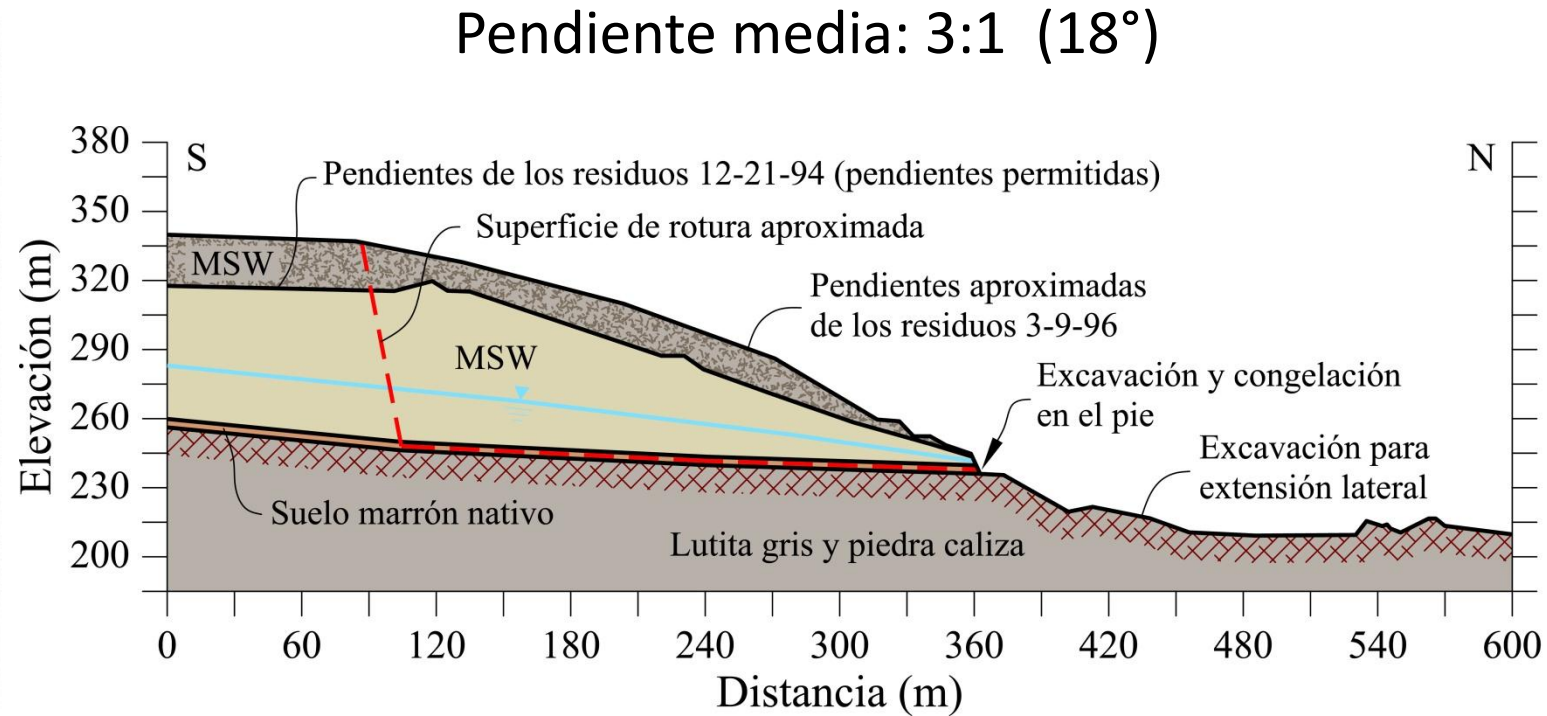
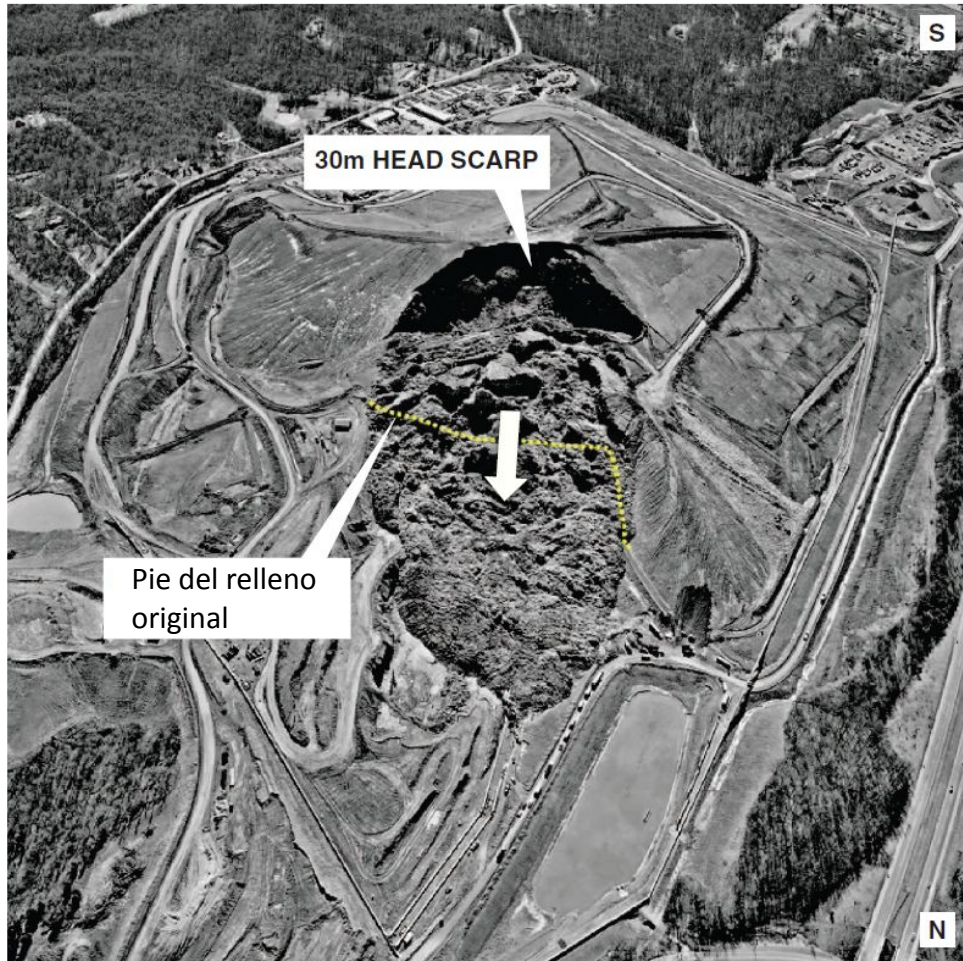


Avalancha de rocas
metamórficas
Cortenova,
Lombardía, 2002

Hungr et al, 2014



Deslizamiento del vertedero de Rumpke. Ohio



“Expansión lateral”
en arcilla sensitiva,
Quebec, Canadá



Hungr et al, 2014

Contenido

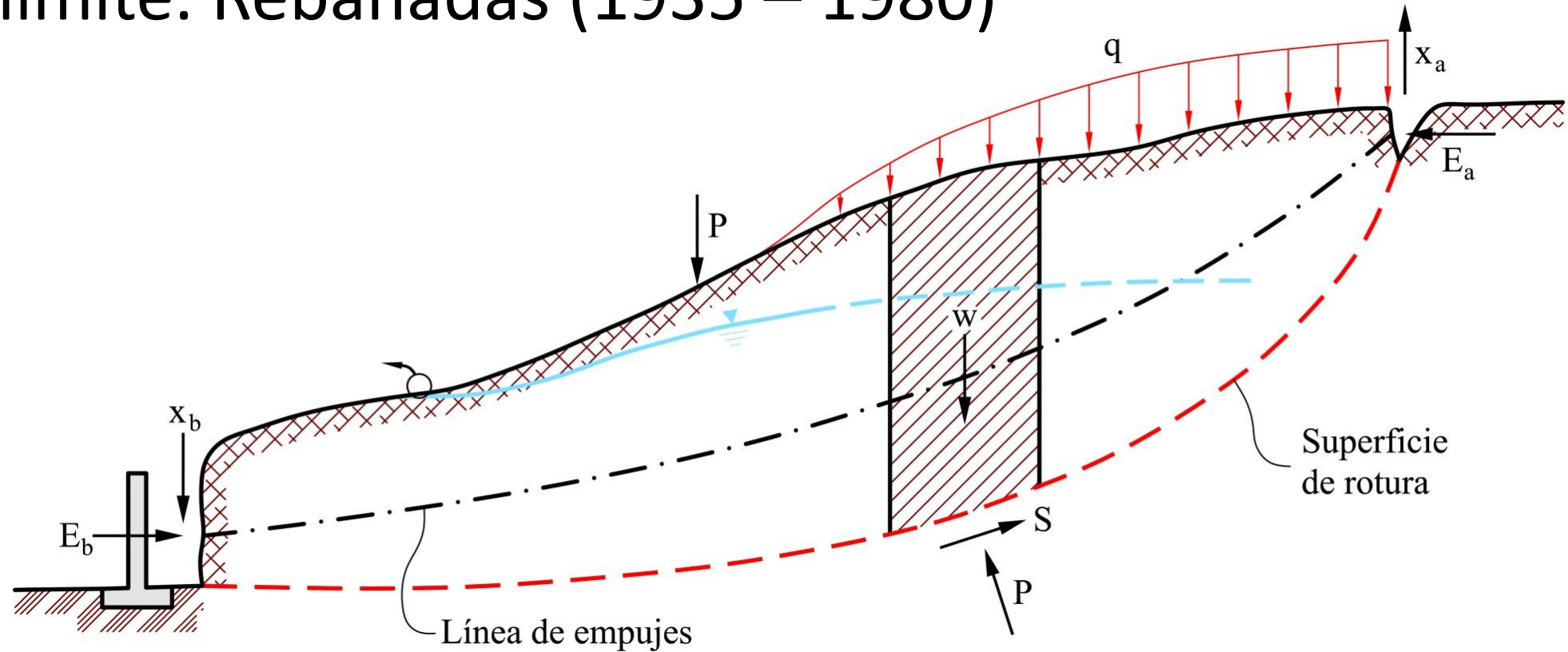
- A) Estabilidad de taludes en mecánica del suelo
- B) Estabilidad de vertederos de residuos
- C) Control e instrumentación

A) ESTABILIDAD DE TALUDES EN MECÁNICA DEL SUELO

1. Equilibrio límite. Rebanadas (1935 – 1980)
2. Elementos Finitos (1980 – 2000)
3. Grandes desplazamientos. Estática y dinámica. MPM (>2010)

A) Estabilidad de taludes en mecánica del suelo

1. Equilibrio límite. Rebanadas (1935 – 1980)



- Mecanismos sencillos. Presión de agua como “dato externo”
- Superficies de rotura “arbitrarias”, pero desconocidas
- Suelos definidos por criterio de rotura a esfuerzo cortante de Mohr - Coulomb
- Proporcionan un número: el Factor de Seguridad (FS)

Equilibrio límite

- Coulomb (1773) $\tau_f = c + \sigma \tan \phi$

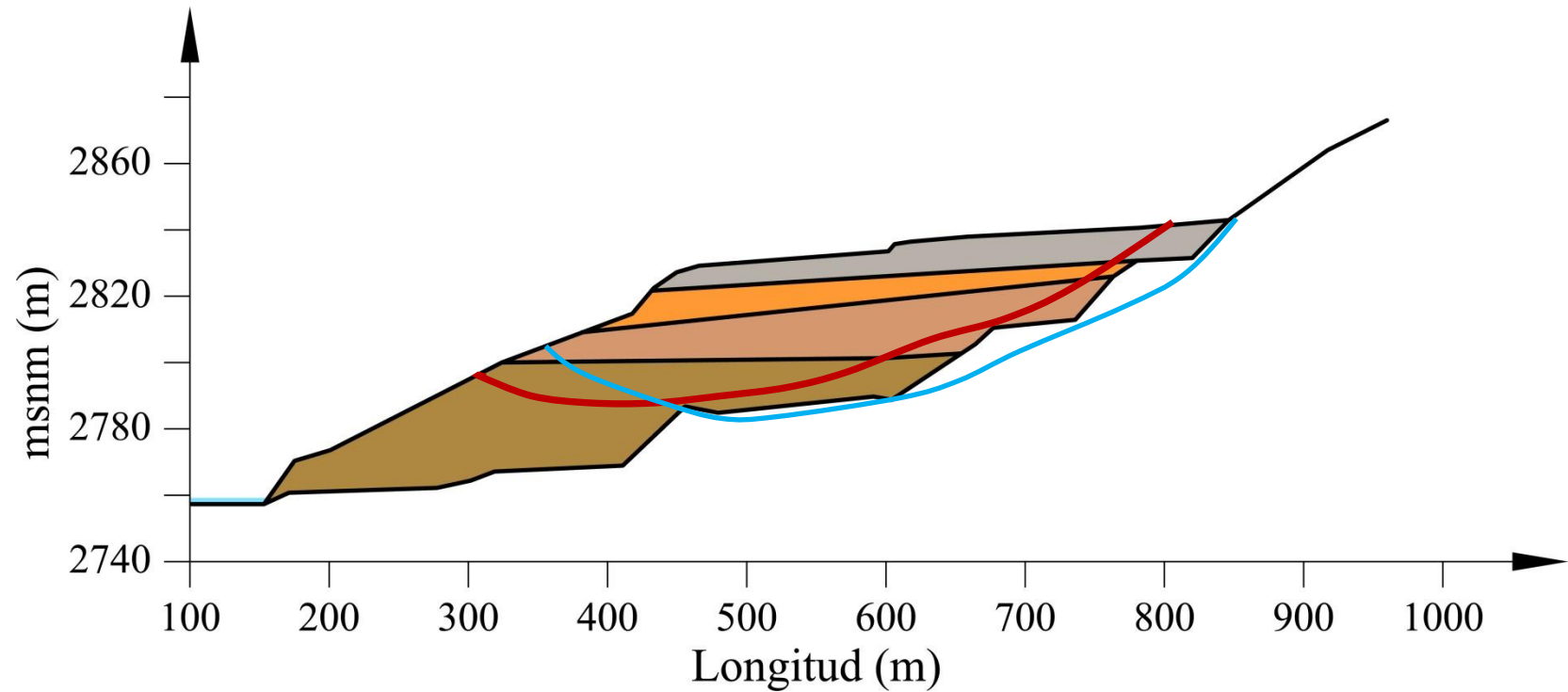
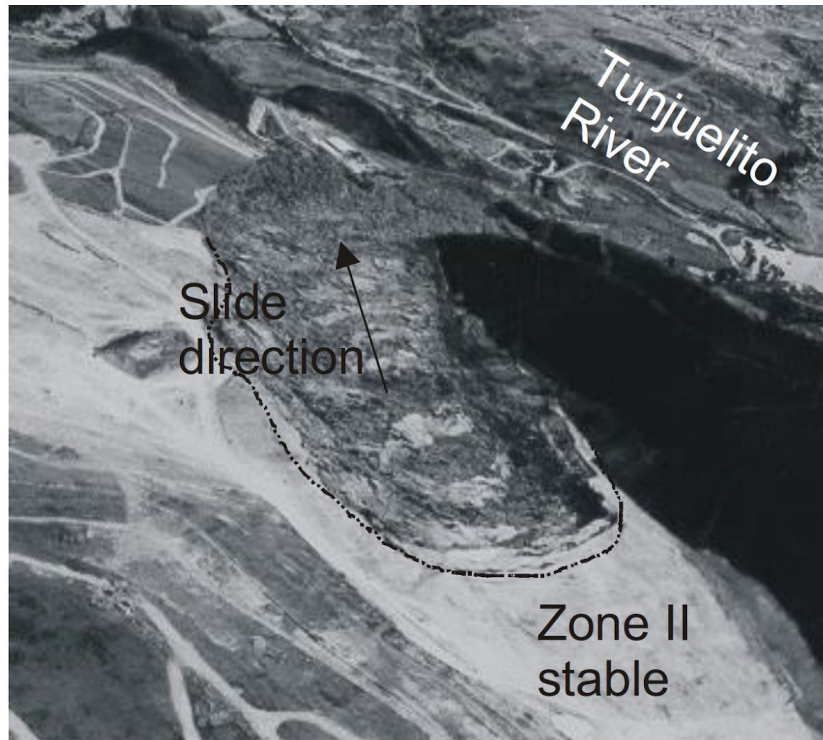
$\uparrow$
 ¡Pierden sentido si agua!

$\uparrow$
 ϕ
 - Terzaghi (1937)
 $\tau_f = c' + \sigma' \tan \phi' = c' + (\sigma - u) \tan \phi'$
 - Definición de FS: $FS = \frac{\tau_f}{\tau_{equilibrio}}$
 - Encontrar $\tau_{equilibrio}$ es un problema mecánico. Función de geometría, pesos, presión de agua, comportamiento $\sigma - \varepsilon$ del suelo, historia de cargas/descargas El método de las rebanadas es una aproximación (mala)
 - Encontrar τ_f requiere conocer σ (equilibrio mecánico), p_w , c' , ϕ'
 - $FS \leq 1$: Rotura. ¿Cómo abordar los movimientos de reptación (muy lentos, lentos)?
- 



Una dificultad de los métodos de Equilibrio Límite (rebanadas)

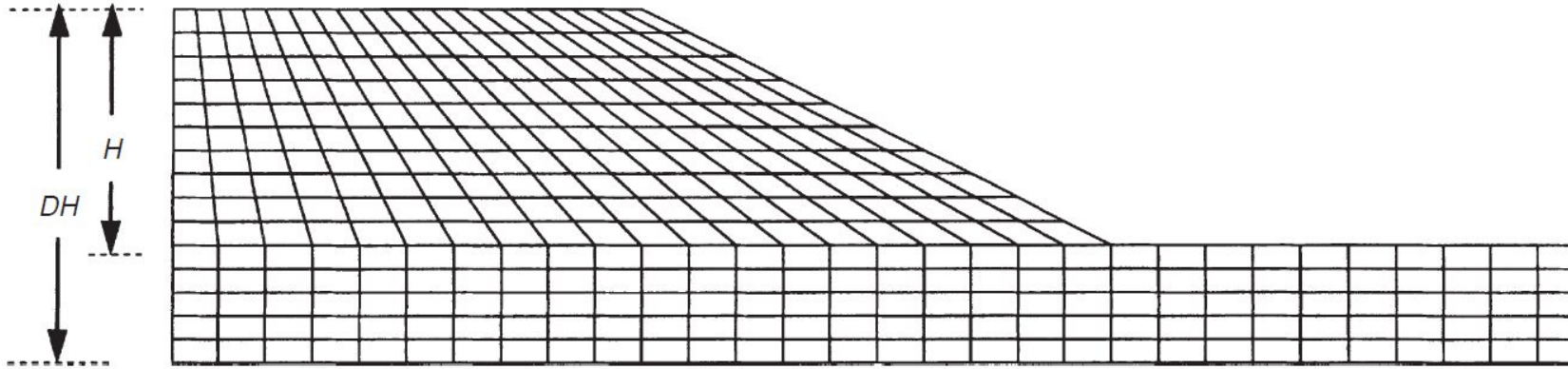
- Encontrar la superficie de rotura correcta



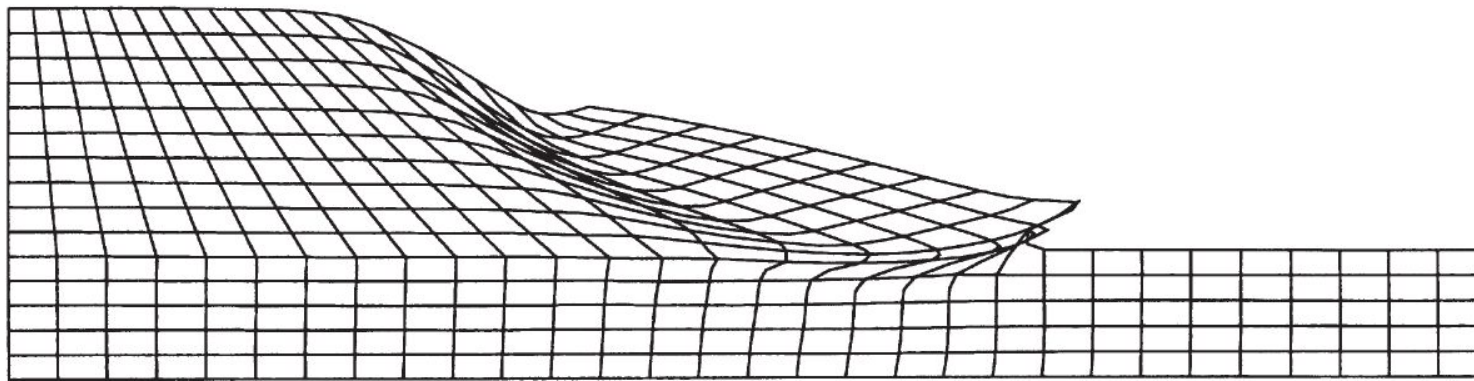
Caicedo et al, 2002

2. Elementos Finitos (1980 – 2000)

- Permiten calcular el FS y la geometría de la superficie de rotura (mecanismo de rotura)

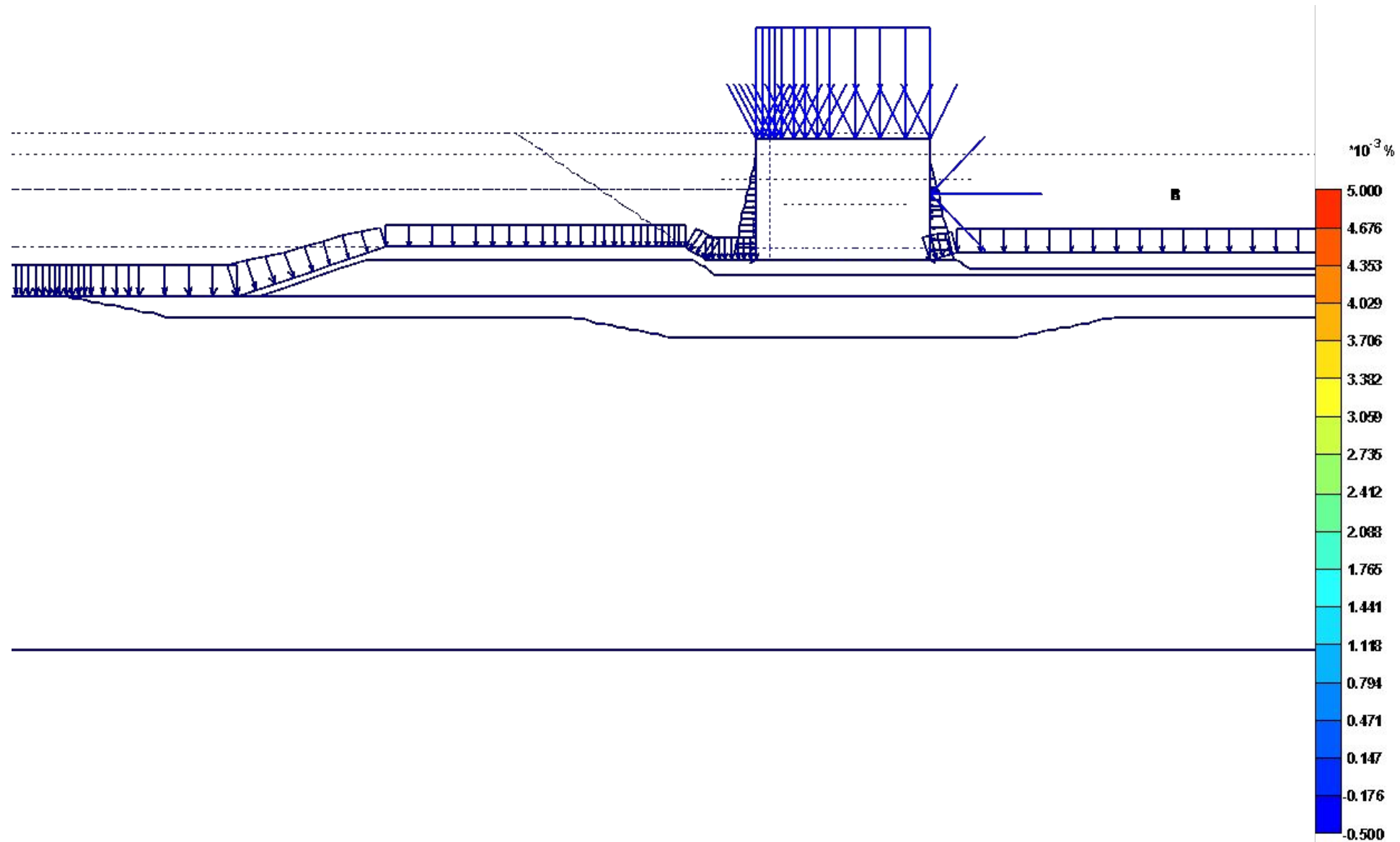


- Pendiente del talud : 26.6° (2:1)
- $\phi' = 20^\circ$
- $c'/\gamma H = 0.05$
- $D = 1.5$

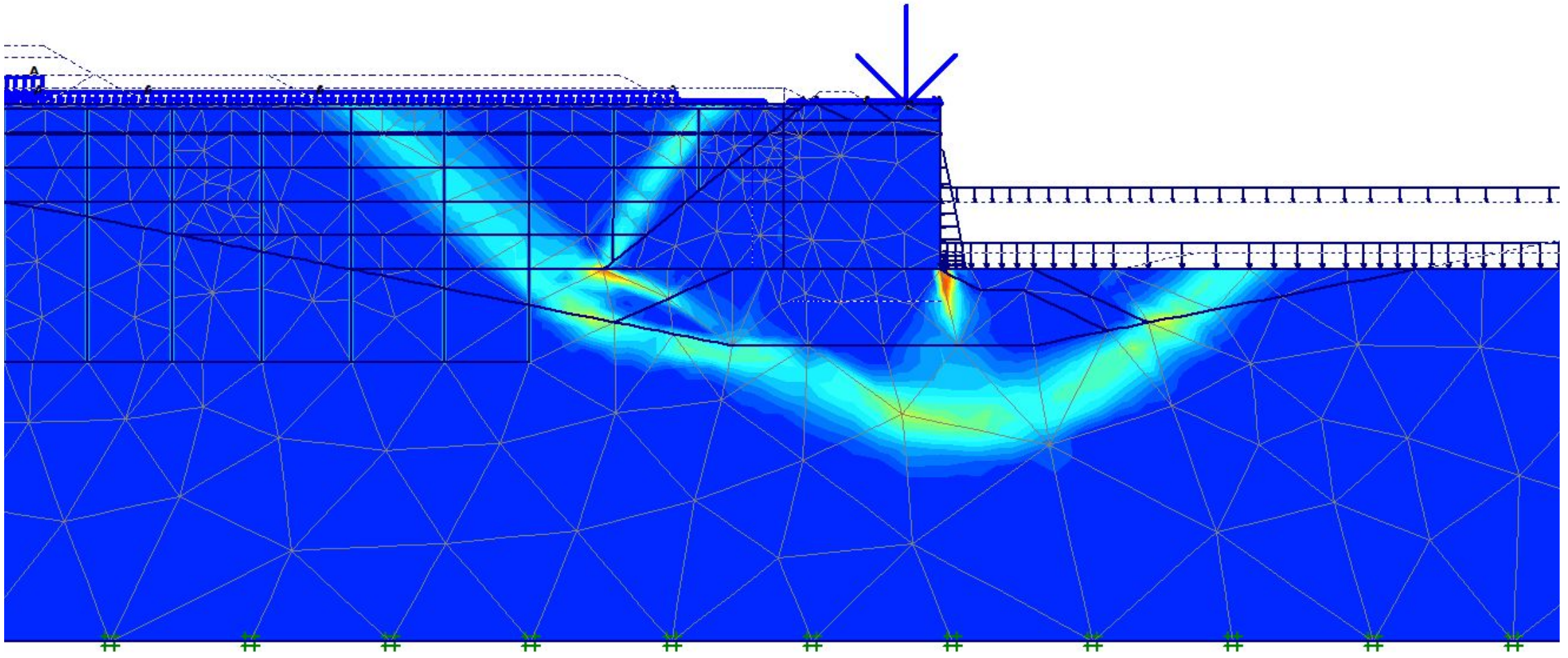


- “Reducción c' , ϕ' ”:
- **FS = 1.4**

Estabilidad de nuevo dique (cajones fondeados) del Puerto de Barcelona



Estabilidad de muelle. Puerto de Barcelona

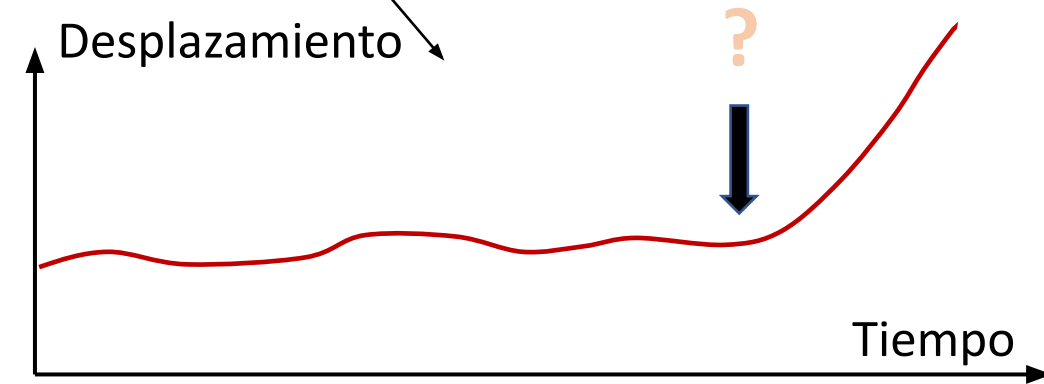


Elementos Finitos

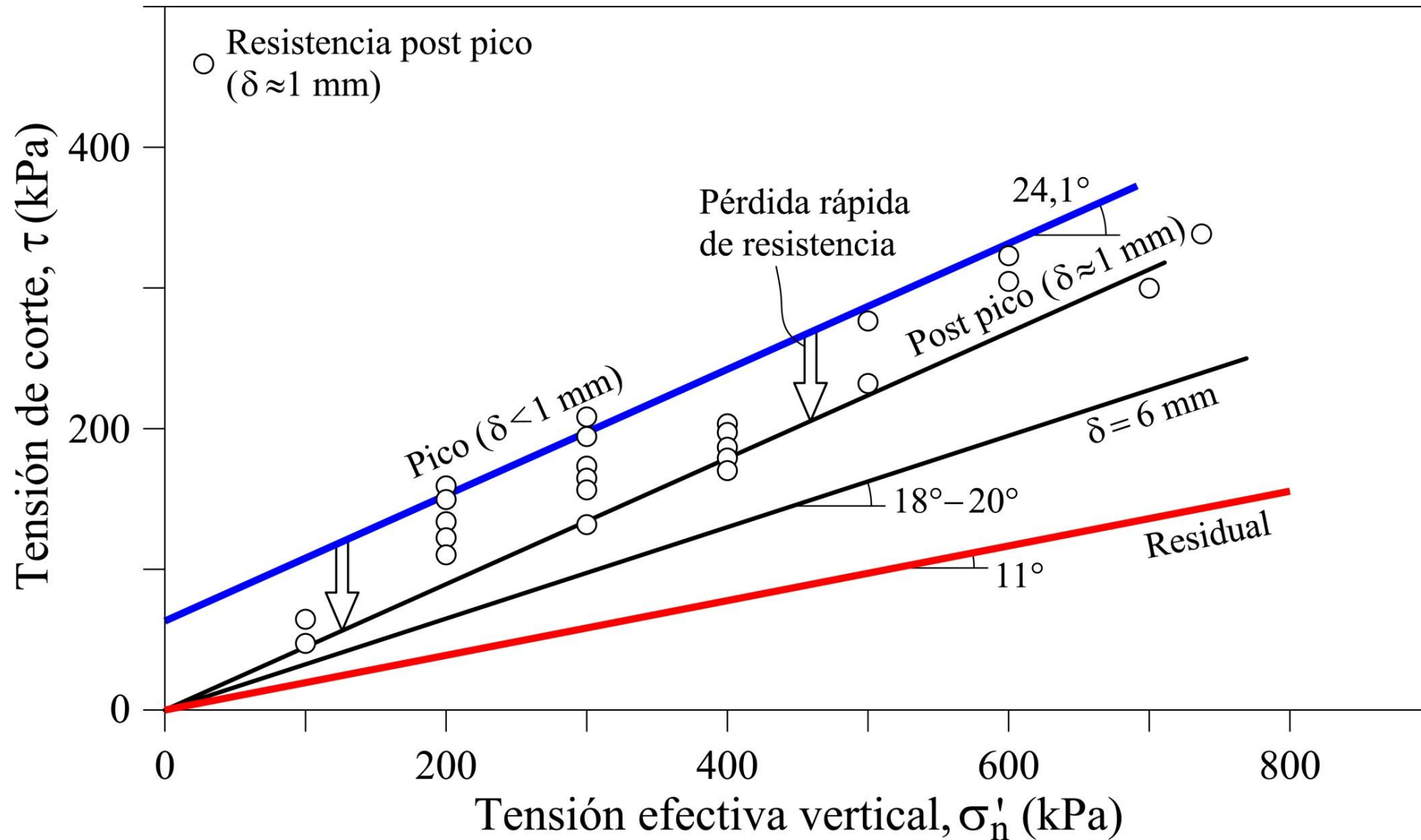
- Necesitan información de las relaciones tensión – deformación
- Permiten la determinación de tensiones, desplazamientos, deformaciones
- Permiten analizar la rotura progresiva



Presa de residuos mineros Aznalcóllar
25 de Abril 1998

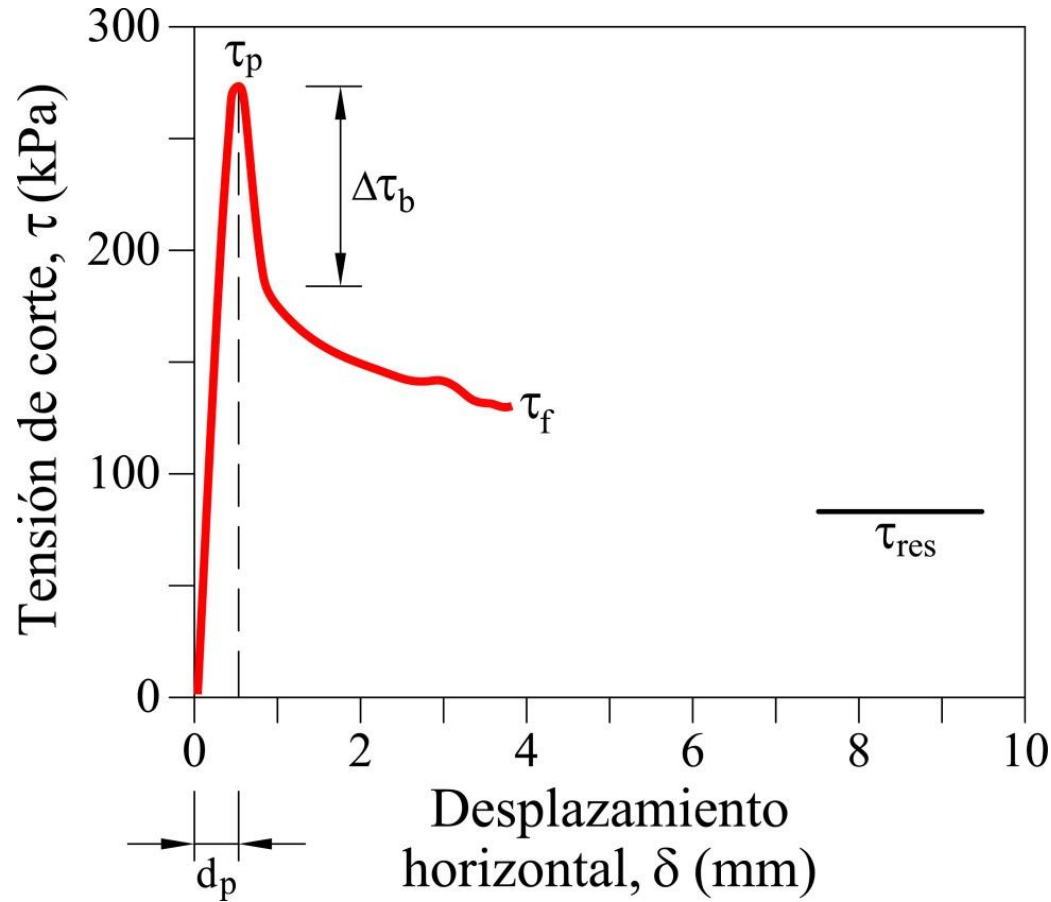


Envolventes de rotura Mohr-Coulomb. Arcilla azul del Guadalquivir

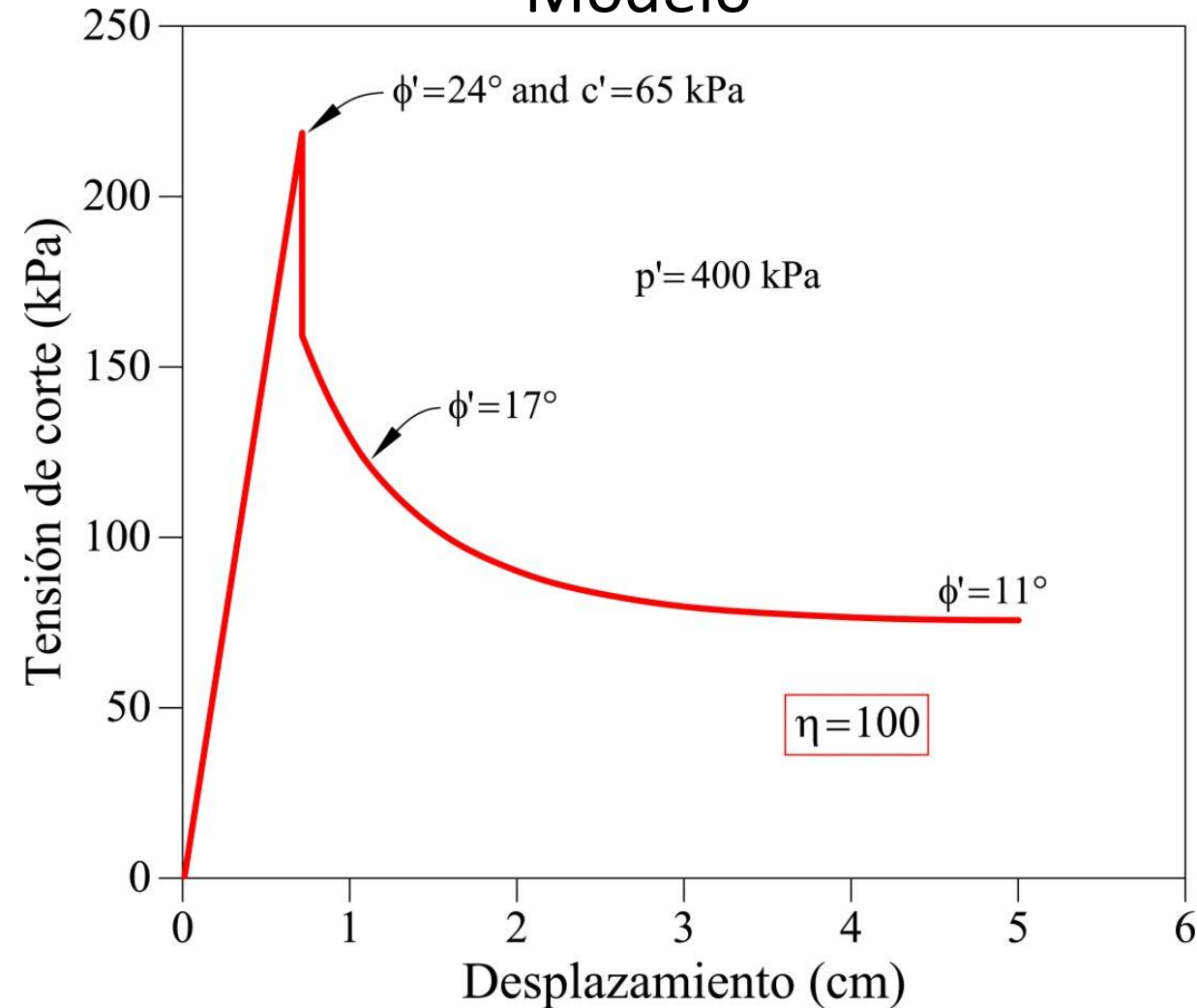


Modelo de comportamiento “strain softening” del substrato arcilloso de la balsa de residuos y del dique de contención de Aznalcóllar

Ensayo de corte directo

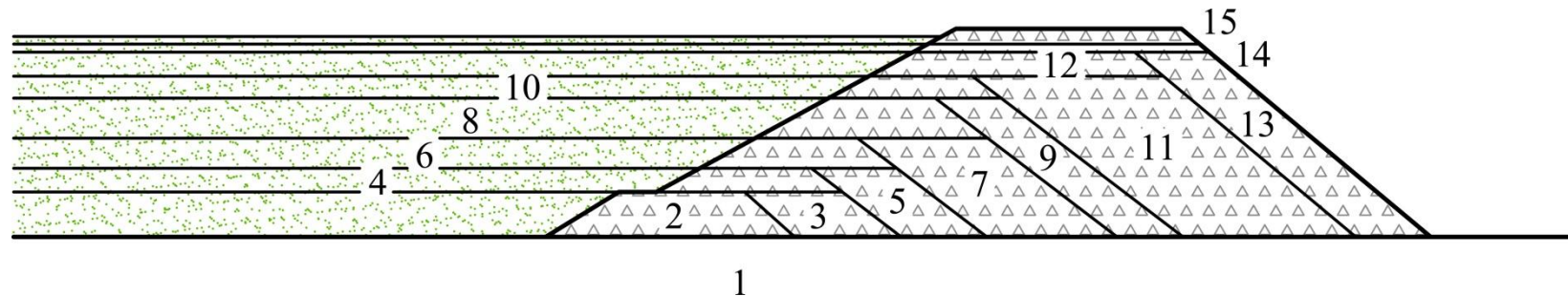
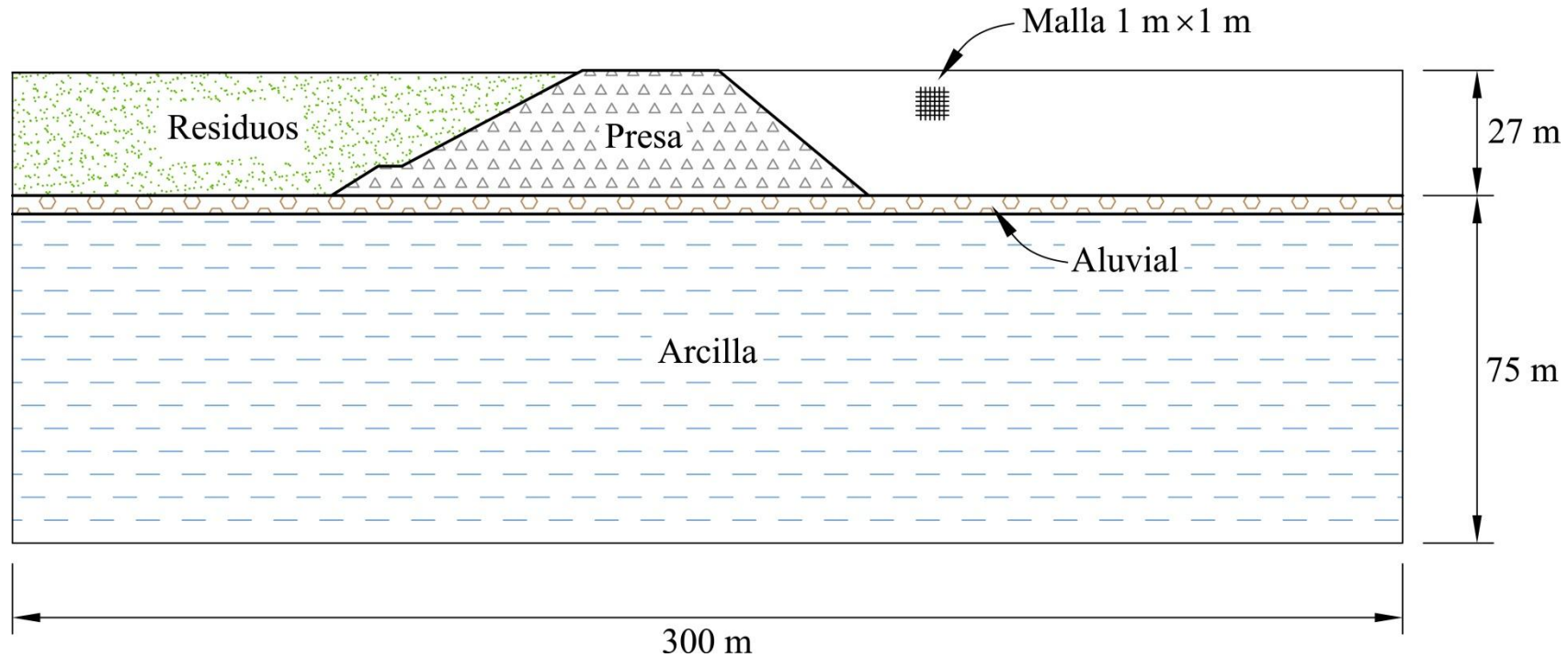


Modelo

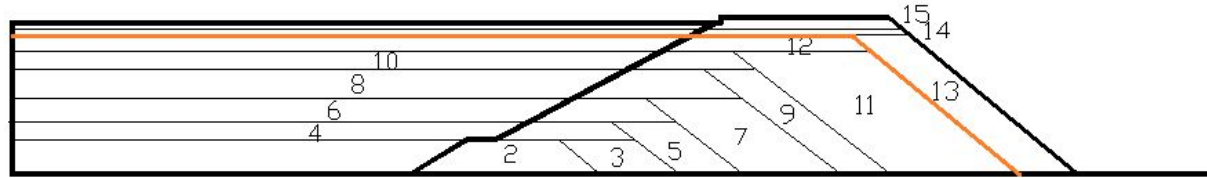


Zabala and Alonso, 2011

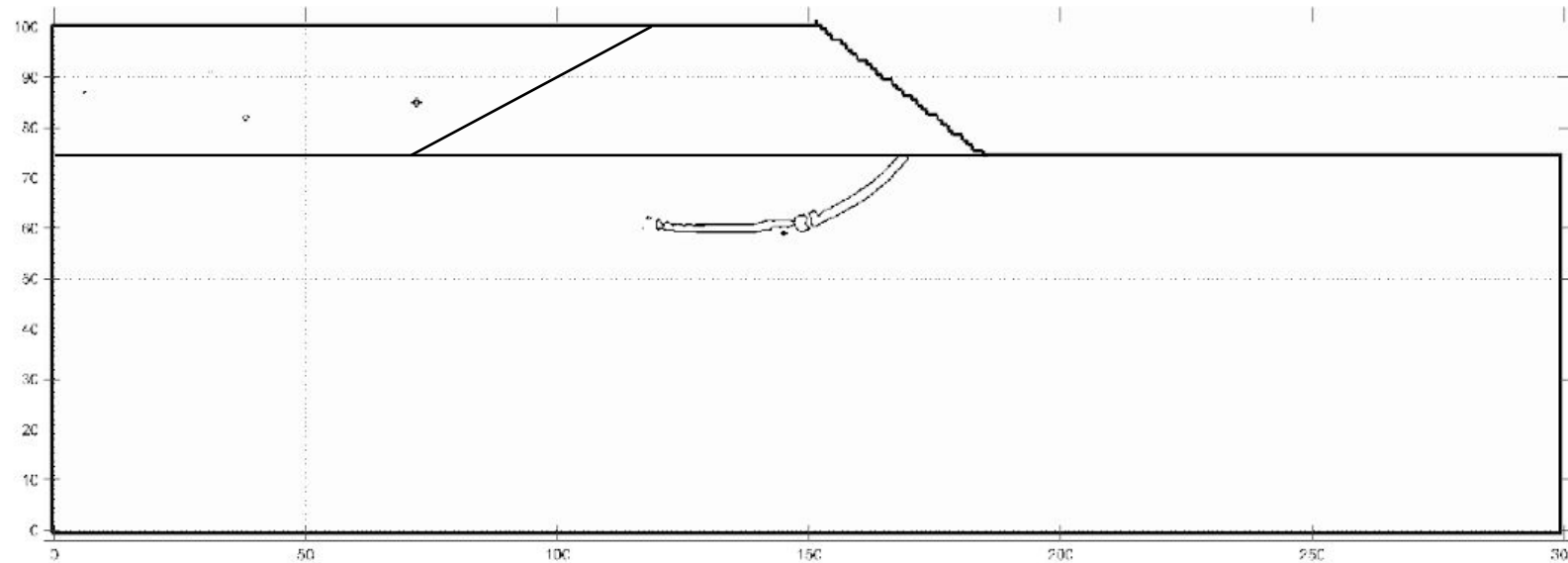
Modelo y fases de construcción. Presa de residuos mineros de Aznalcóllar



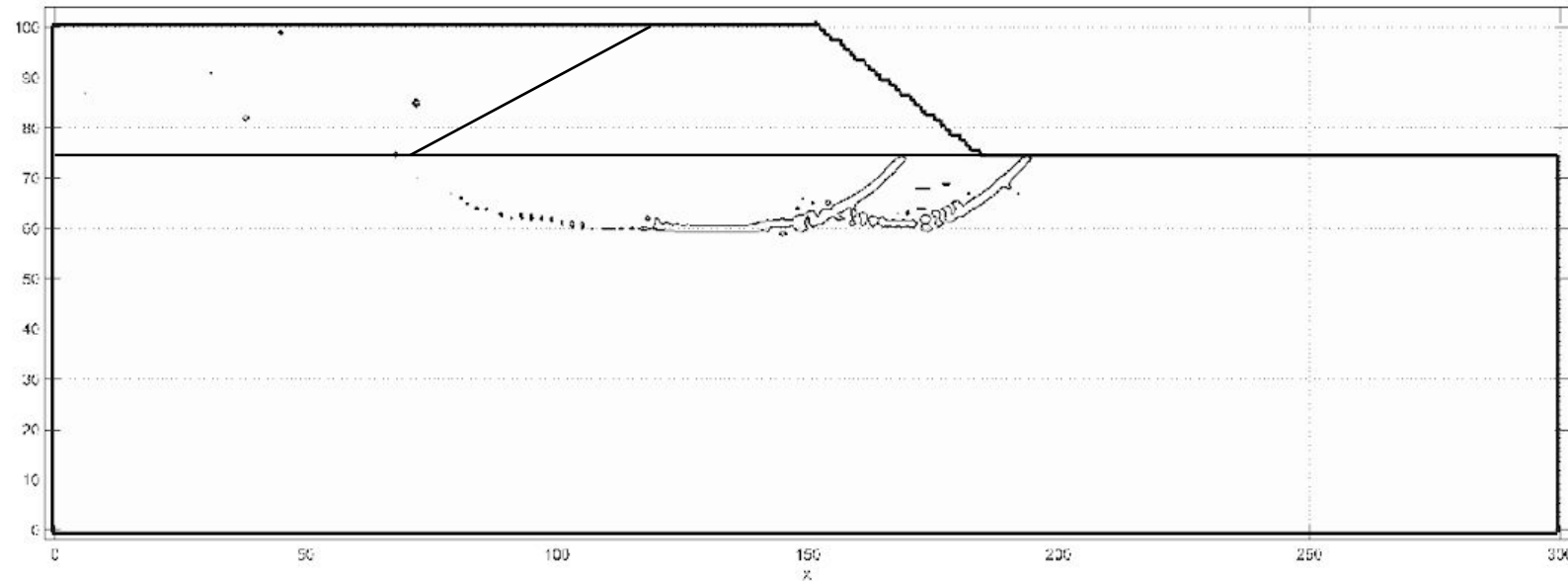
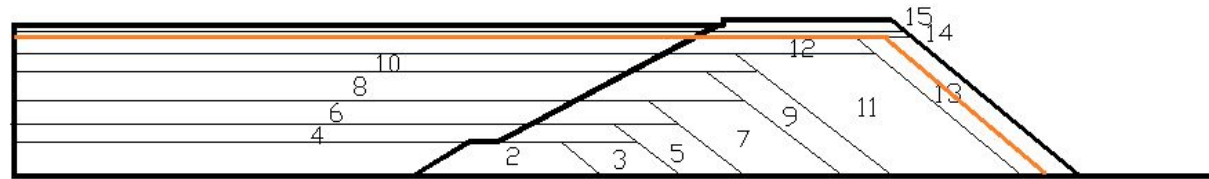
Contornos de igual deformación plástica de corte (1% y 5%). $K_0=1$



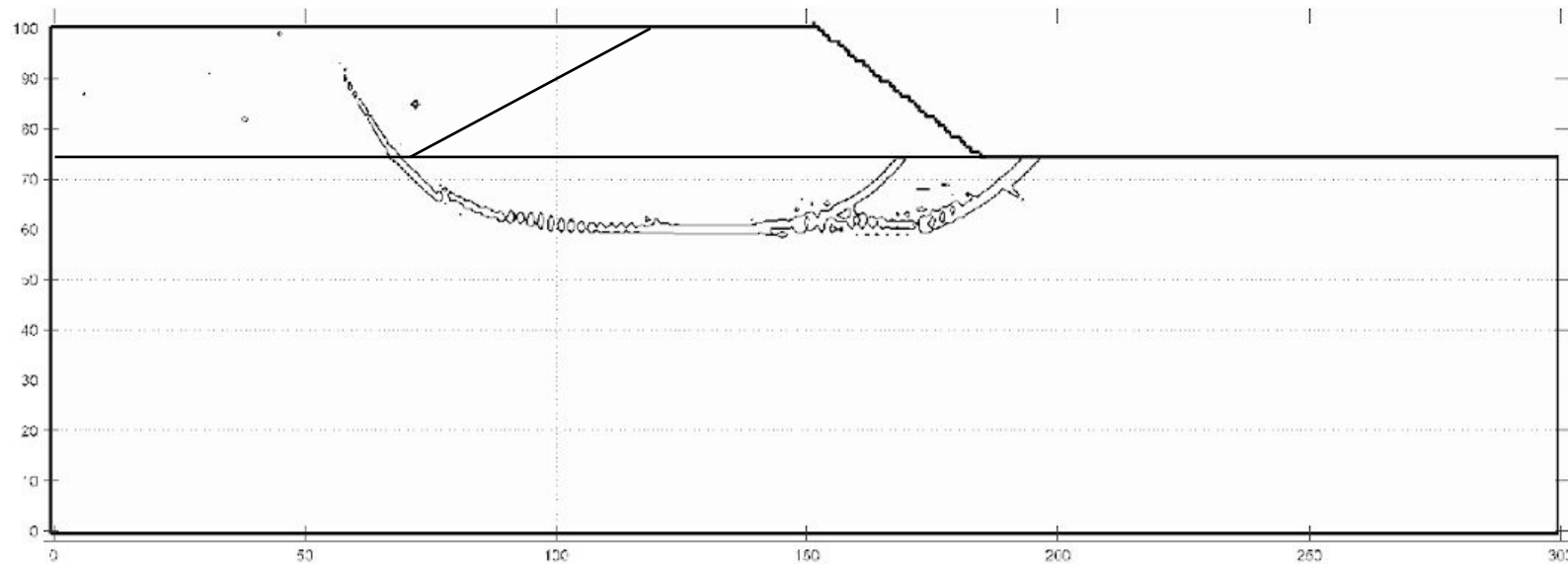
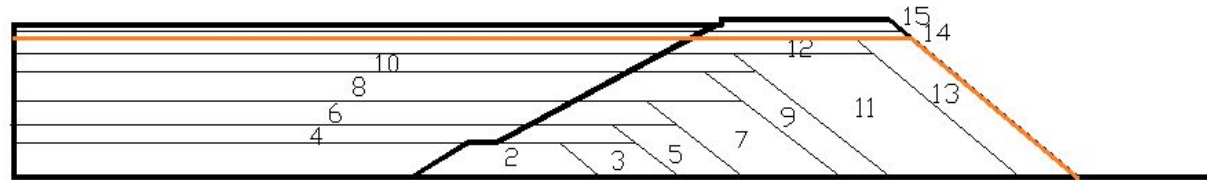
1



Contornos de igual deformación plástica de corte (1% y 5%). $K_0=1$

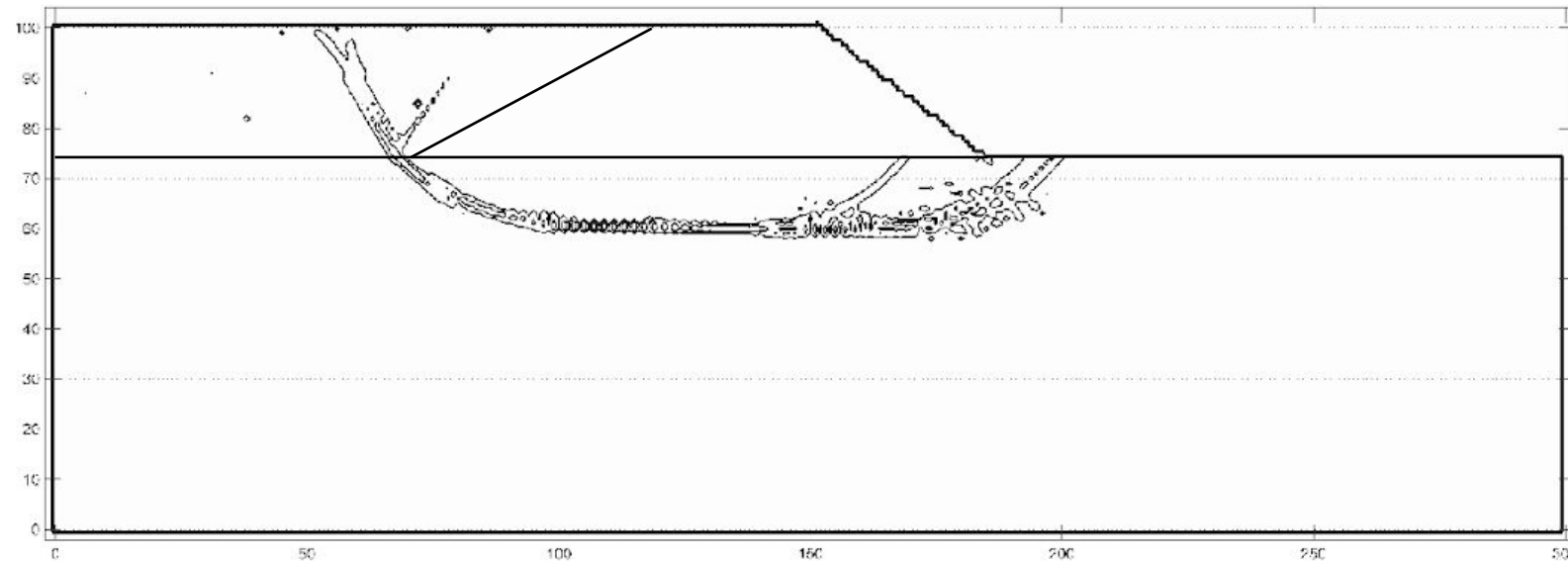
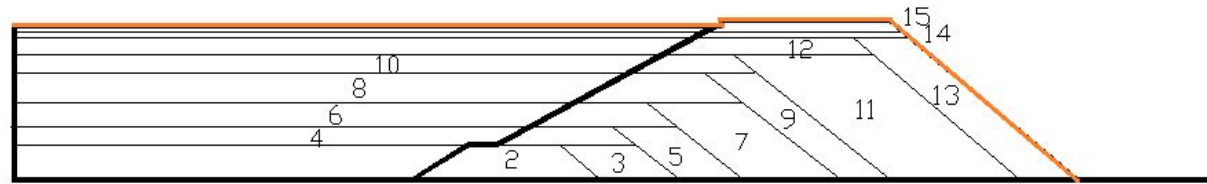


Contornos de igual deformación plástica de corte (1% y 5%). $K_0=1$





Contornos de igual deformación plástica de corte (1% y 5%). $K_0=1$

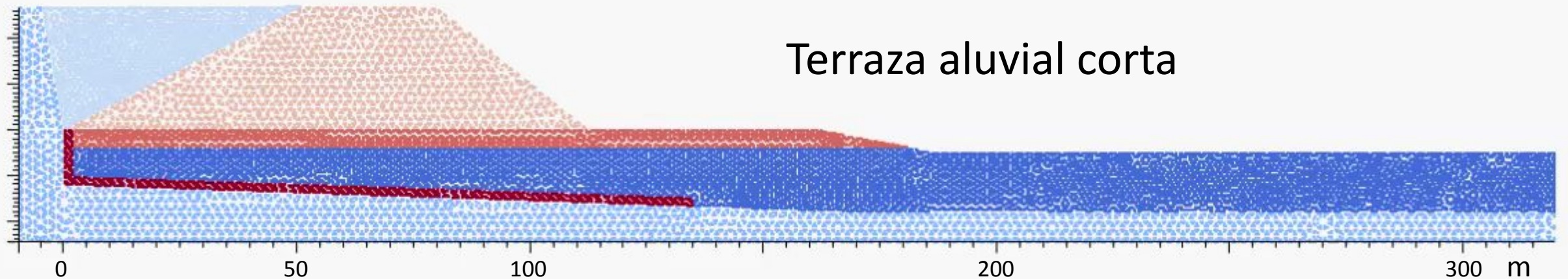
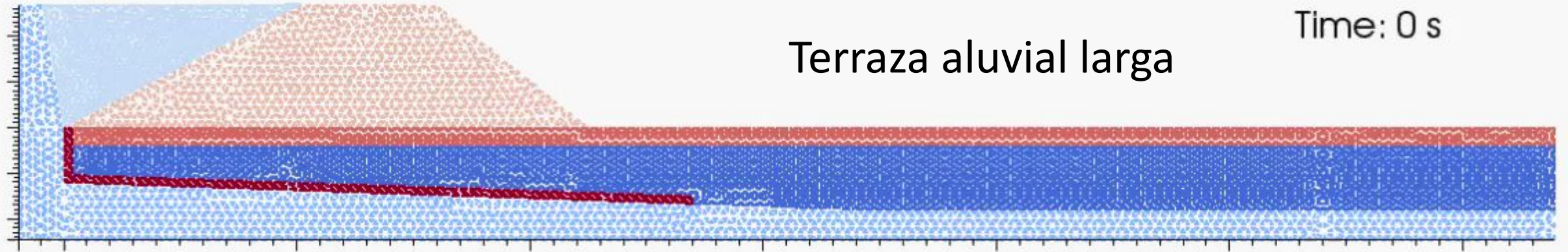


Modelos de Elementos Finitos. Posibilidades

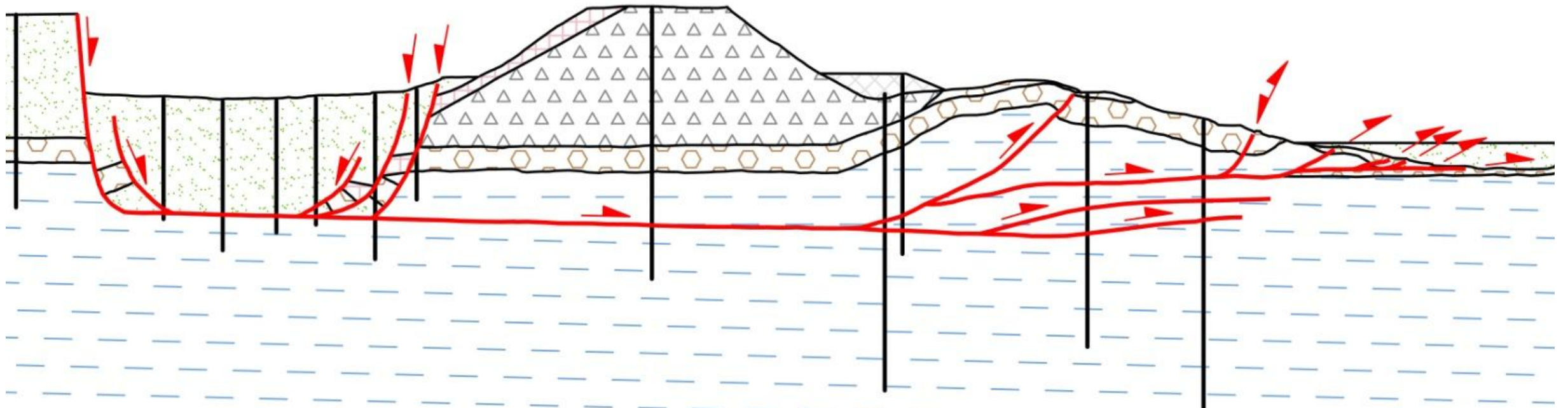
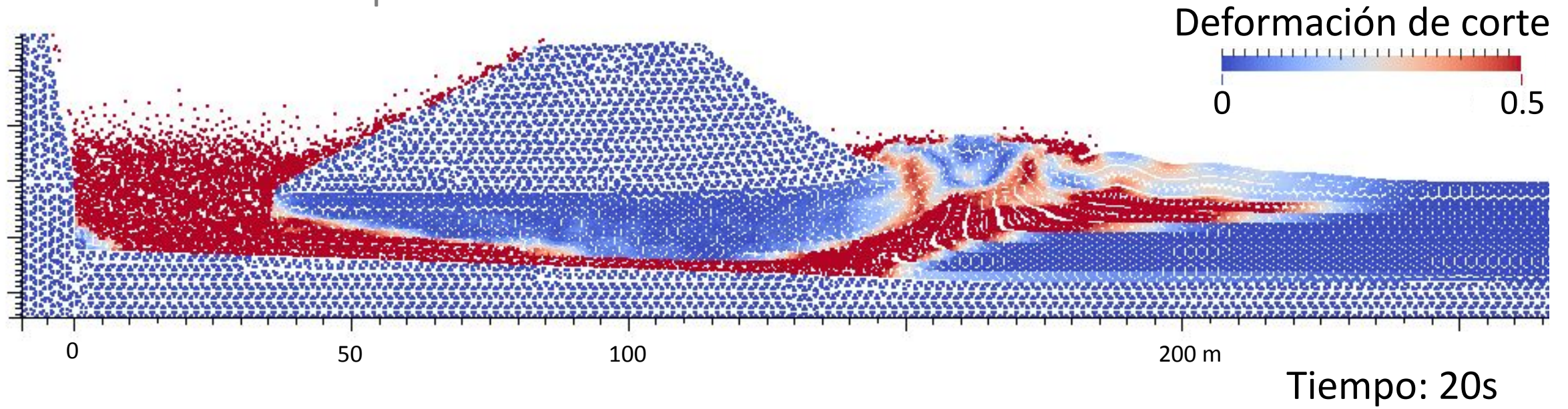
- Resolución conjunta de flujo (permeabilidad) y deformación (modelo constitutivo)
- Simular cambios temporales (construcción, excavación, infiltración, cargas..)
- Incluir:
 - Deformaciones diferidas (reptación)
 - Modelos constitutivos avanzados (licuefacción)
 - Elementos estructurales
 - Geometrías 3D
- Utilizar el “método observacional” (comparar en tiempo real predicciones del modelo y resultados de auscultación). Analizar fases intermedias

3. Grandes desplazamientos. Estática y dinámica. MPM (>2010)

Análisis de la rotura de Aznalcóllar



Aználcollar. Grandes desplazamientos

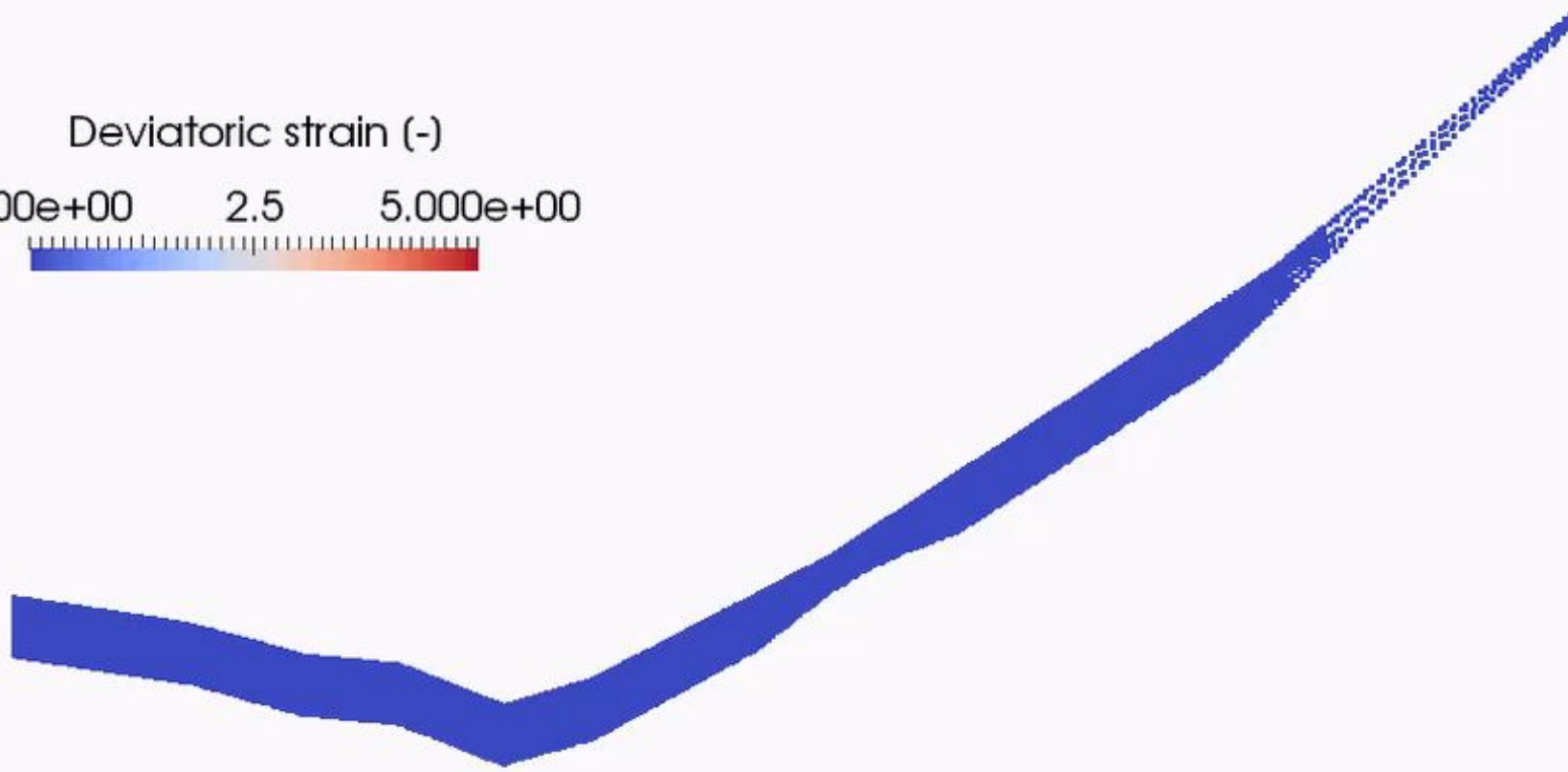


Licuefacción y flujo de coluvión granular poco denso. Valarties. Pirineo de Lleida



Deviatoric strain (-)

0.000e+00 2.5 5.000e+00



Di Carluccio et al, 2022

B) ESTABILIDAD DE VERTEDEROS DE RESIDUOS

- Tipos de residuos
- Configuración de los vertederos
- Características singulares
 1. Sellado del contacto con el terreno natural
 2. La resistencia al esfuerzo cortante del vertido
 3. Las presiones de agua/lixiviado y gas
 4. Más dificultades

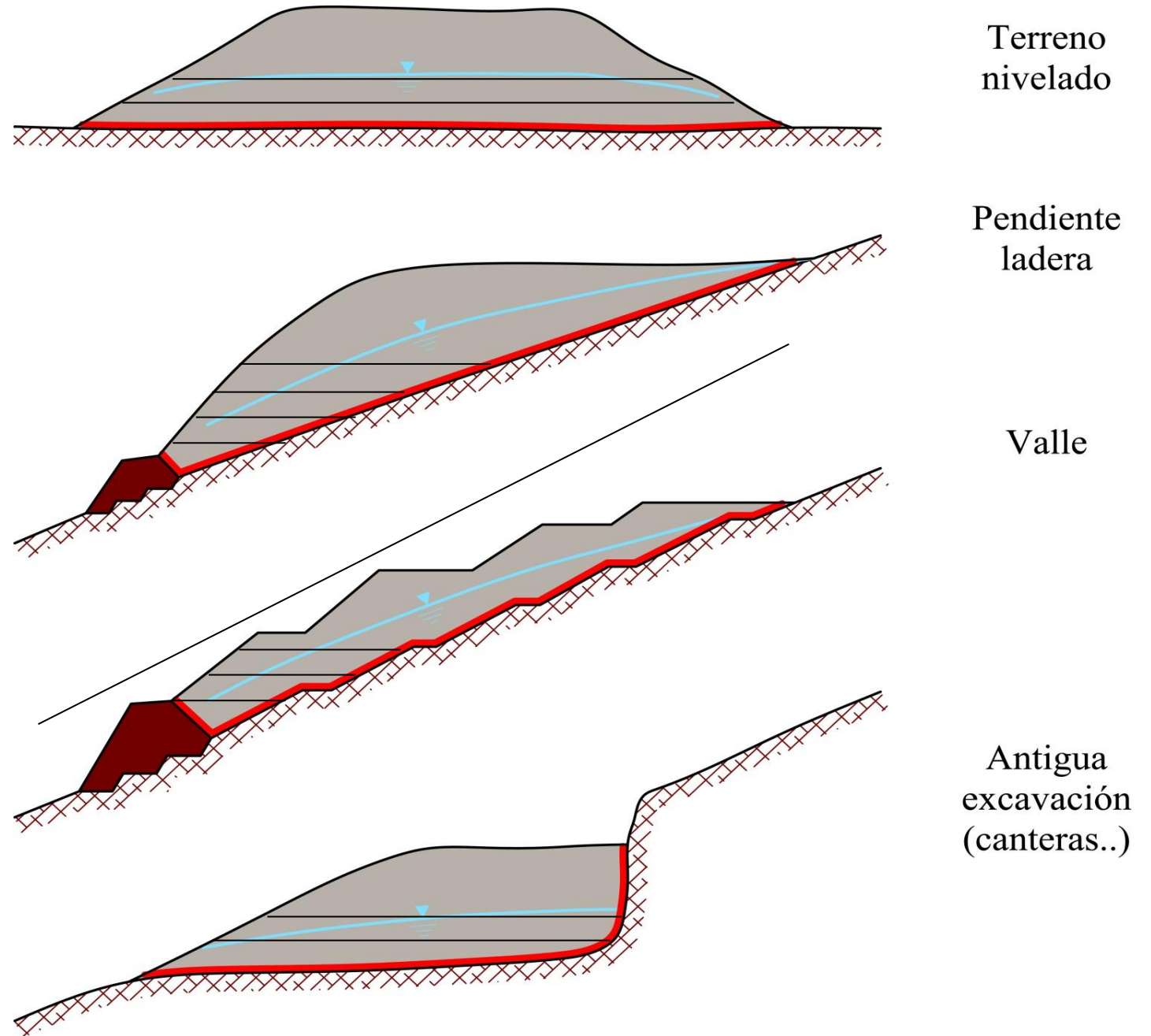
Tipos de residuos

- Materiales de origen mineral (suelos, rocas procedentes de excavaciones)
- Escombros, derribos
- Residuos sólidos urbanos (RSU; MSW: Municipal Solid Waste)
- Residuos industriales
- Residuos tóxicos y peligrosos

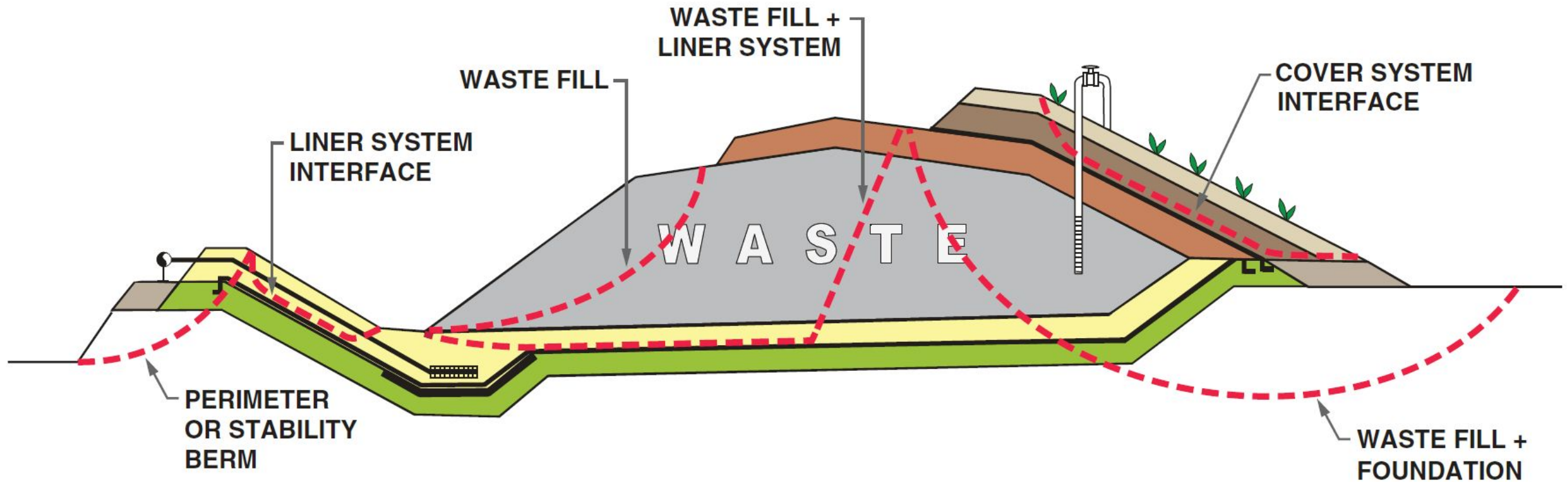
Thomas Walter; Alemania

B) Estabilidad de vertederos de residuos

Configuración de los vertederos



Configuración de un esquema moderno de vertedero en Estados Unidos y tipos de inestabilidad

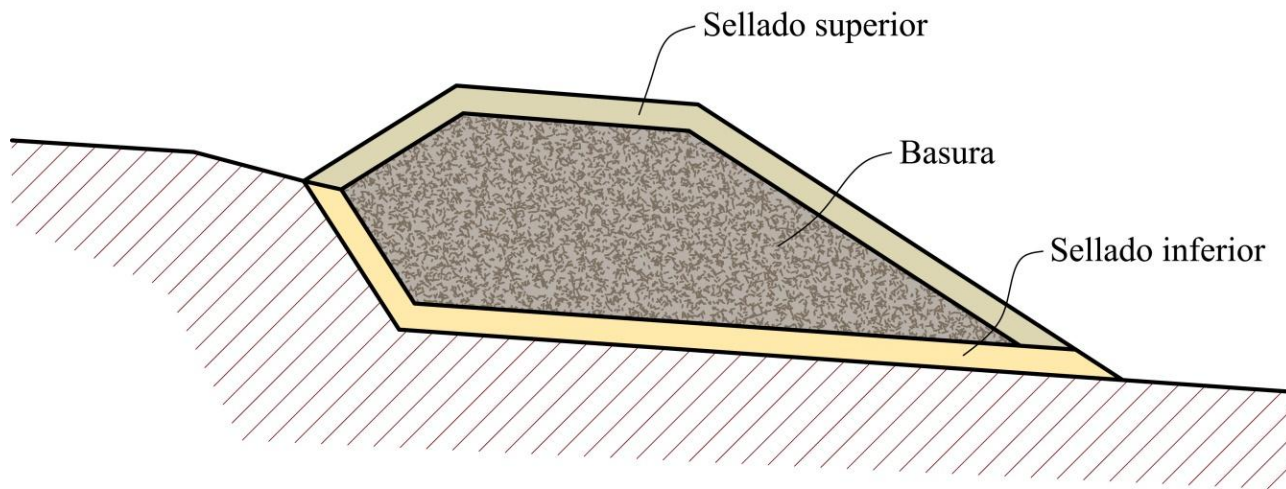


Características singulares de los vertederos

1. Sellado del contacto con el terreno natural

Desde el punto de vista mecánico introduce una discontinuidad muy notable

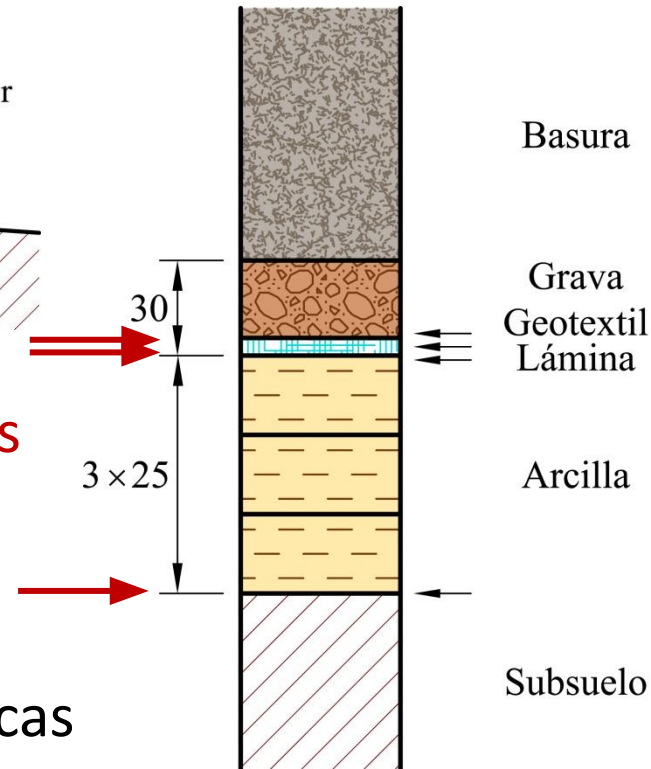
Estructura general



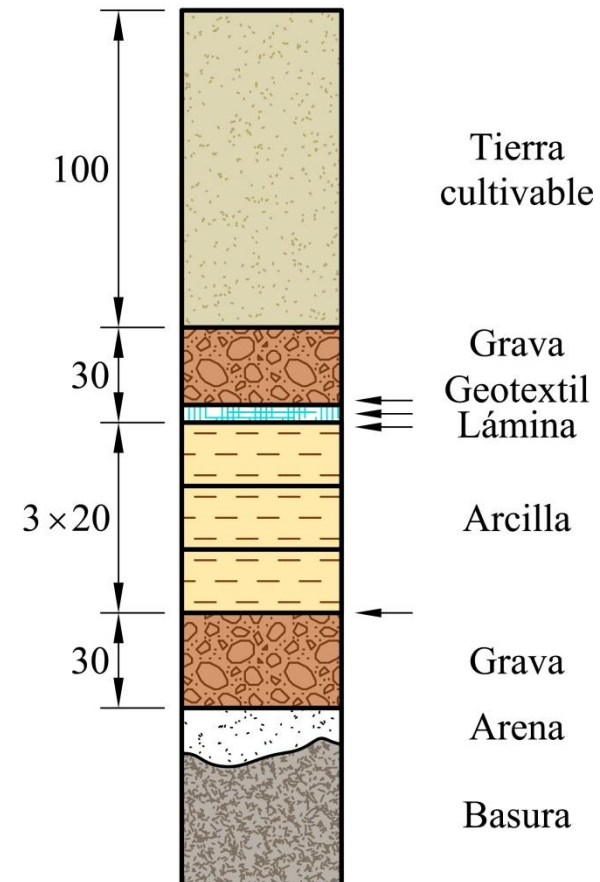
Walter, 1992

Interfases

Sellado inferior



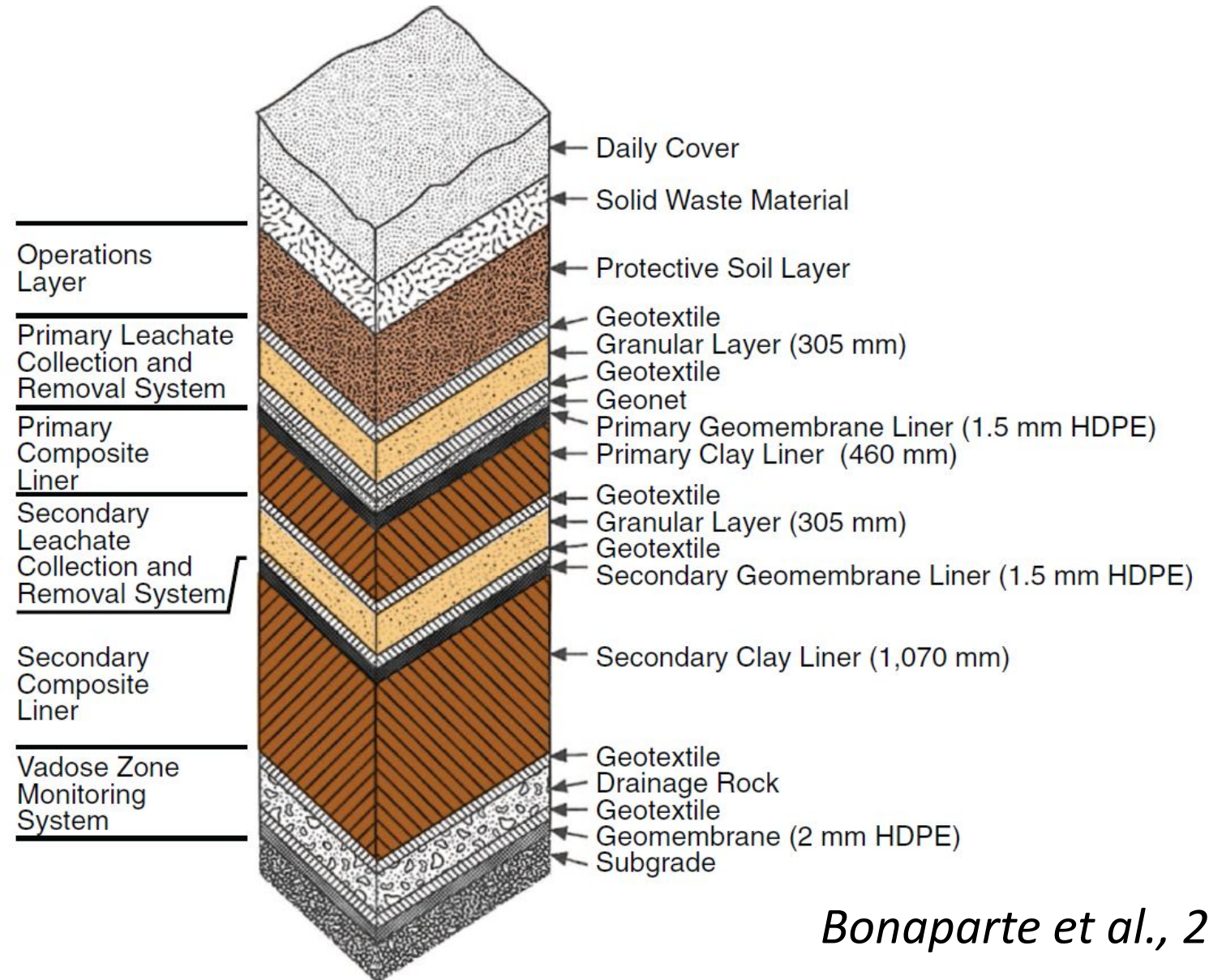
Sellado superior



- Las flechas indican posibles superficies críticas

Sellado del contacto con el terreno natural

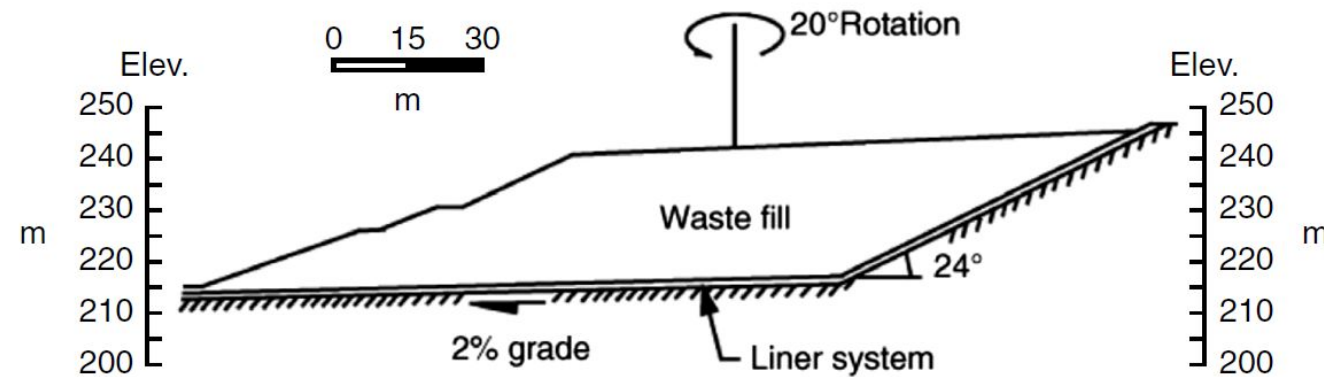
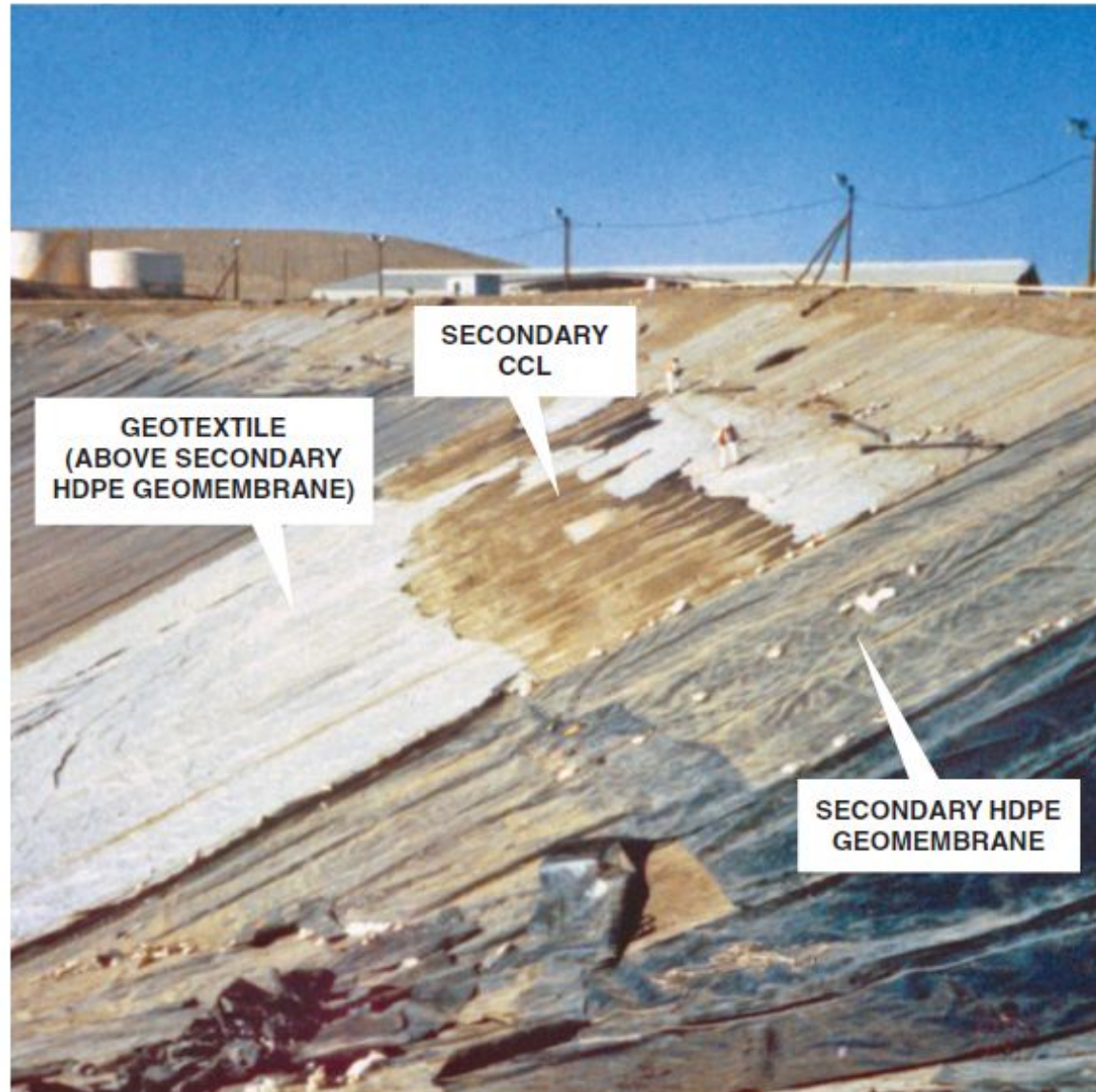
Doble protección inferior. Vertedero de Kettleman Hills, EEUU



Bonaparte et al., 2020

Sellado del contacto con el terreno natural

Kettlement Hills se rompió en 1988, un año después de comenzar el vertido

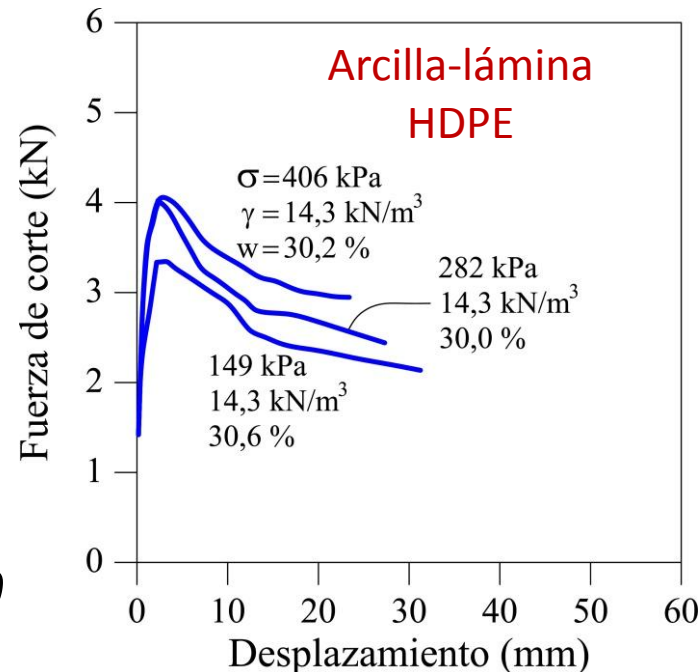
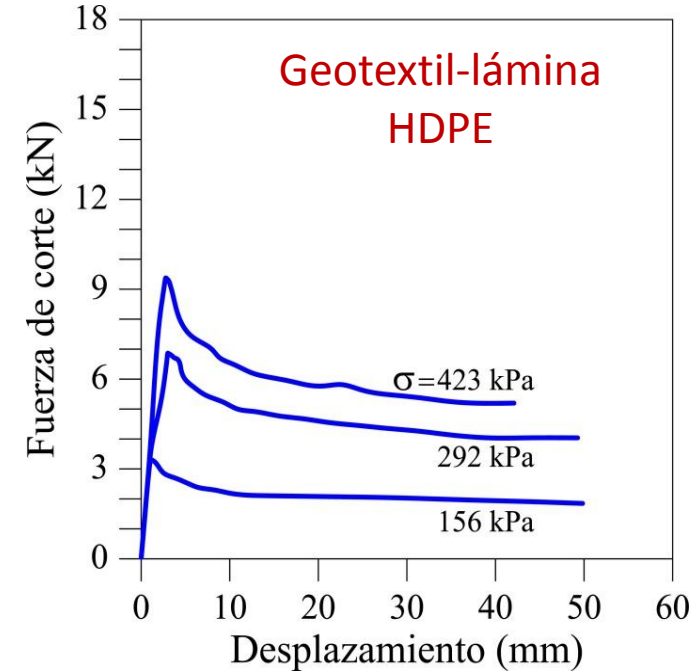


- Interpretado como una rotura progresiva a lo largo de un contacto entre capas de geotextil-lámina impermeable

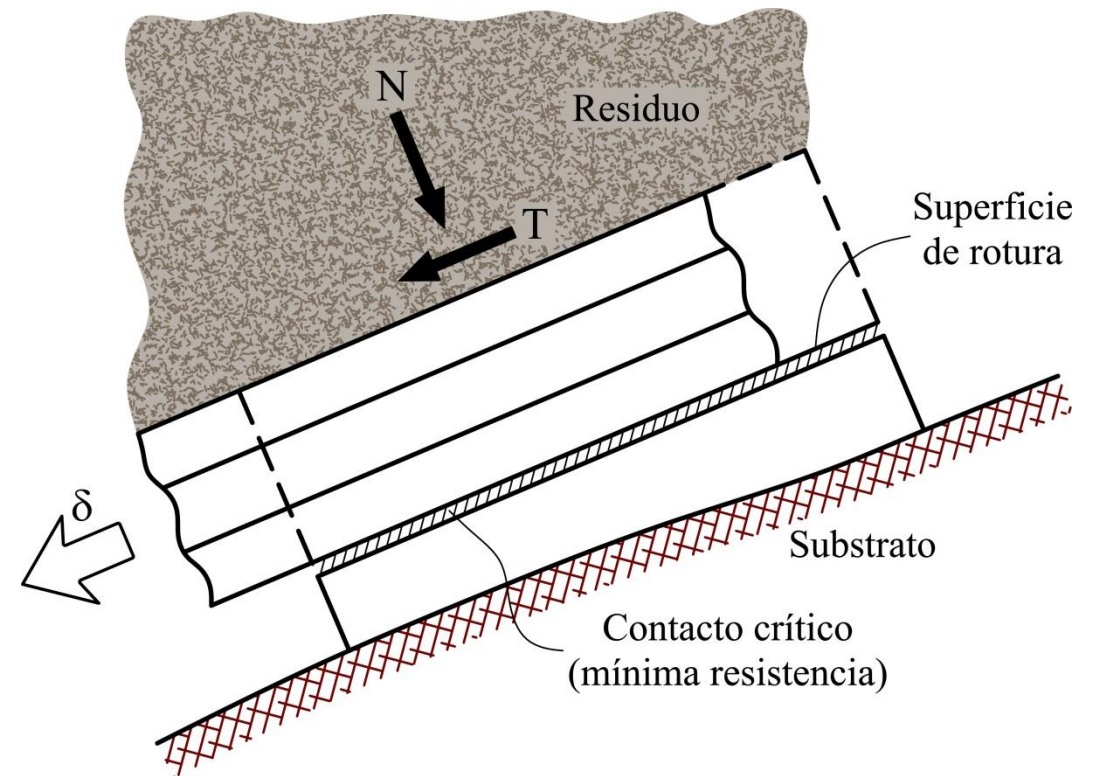
Mitchell et al., 1993

Sellado del contacto con el terreno natural

Resistencia al corte de interfases entre capas



- Resistencia residual baja
- Rotura progresiva
- Los asentos del vertido inducen deformaciones de corte sobre las capas de base inclinadas



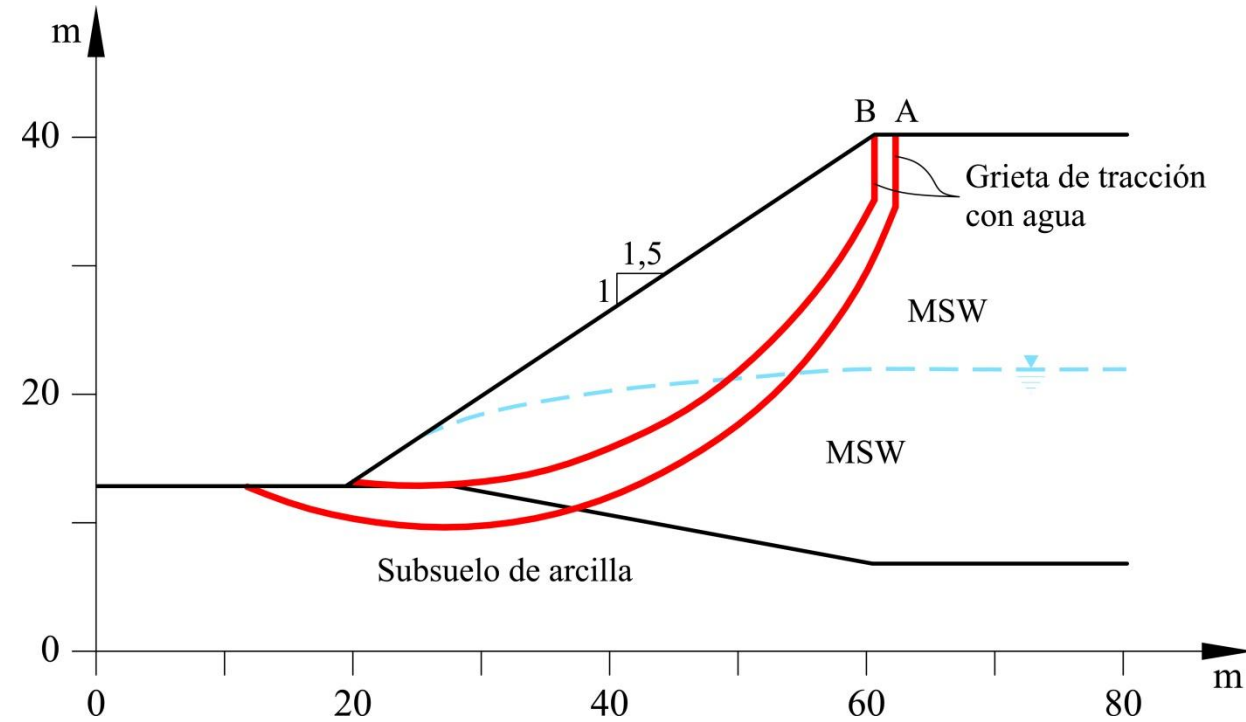
Ángulos de fricción entre geomembrana y geotextil no tejido

Referencia	ϕ pico (°)	ϕ residual (°)
<i>Seed et al., 1988. Seco</i>	12.5	9
<i>Seed et al., 1988. Húmedo</i>	10.4	8
<i>Byrne et al., 1992</i>	14	8
<i>Stark and Pepoel, 1992</i>	8.5	6

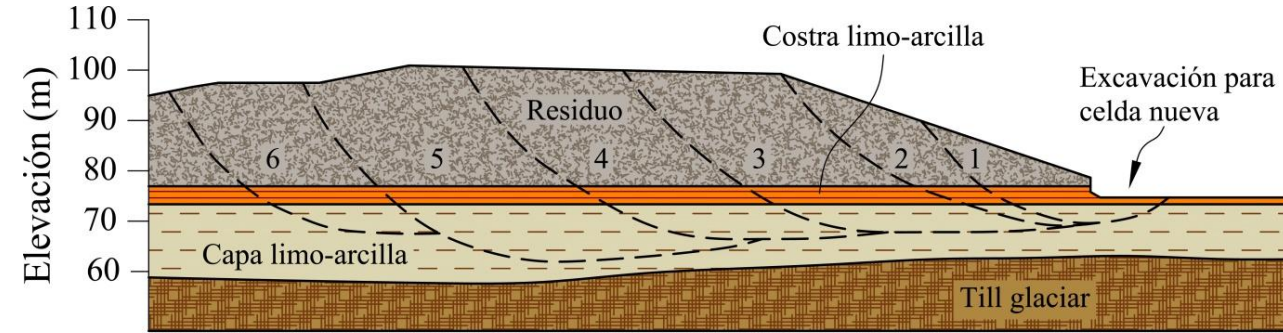
Filz et al., 2001

Sellado del contacto con el terreno natural

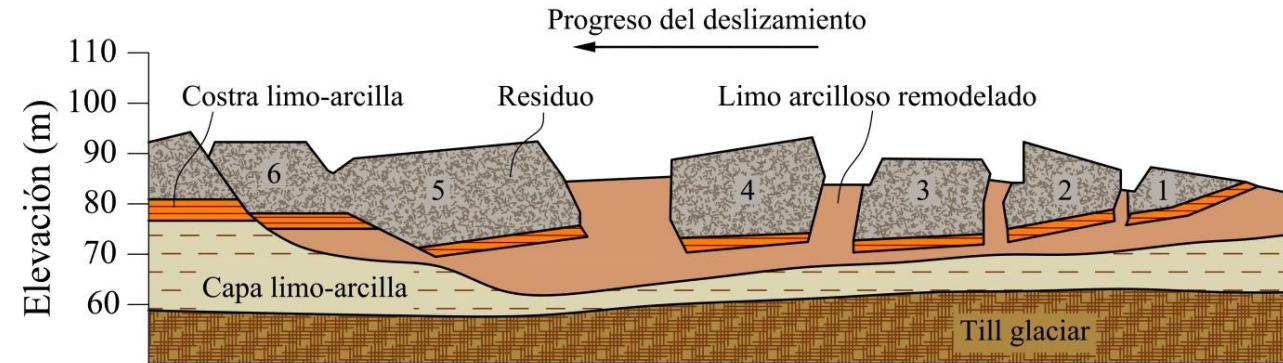
No olvidar el “substrato”!



Huvaj and Stark, 2008



(a)



(b)

0 60 m

Reynolds, 2015

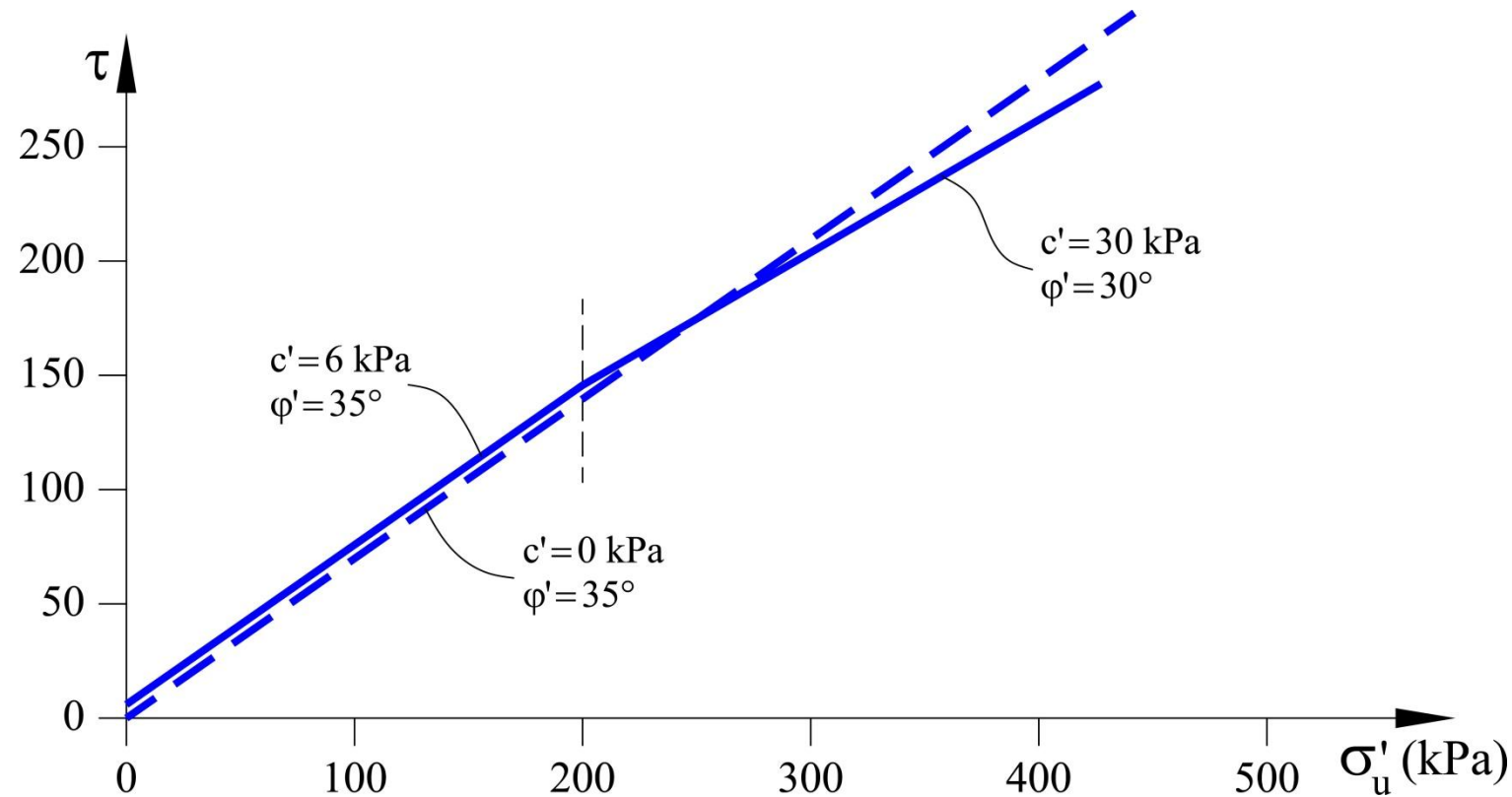
2. La resistencia al esfuerzo cortante del vertido

Posibilidades:

- Analizar roturas (“back analysis”) ($p_{\text{líquido}}$!)
- Ensayos “in situ”
- Ensayos de laboratorio

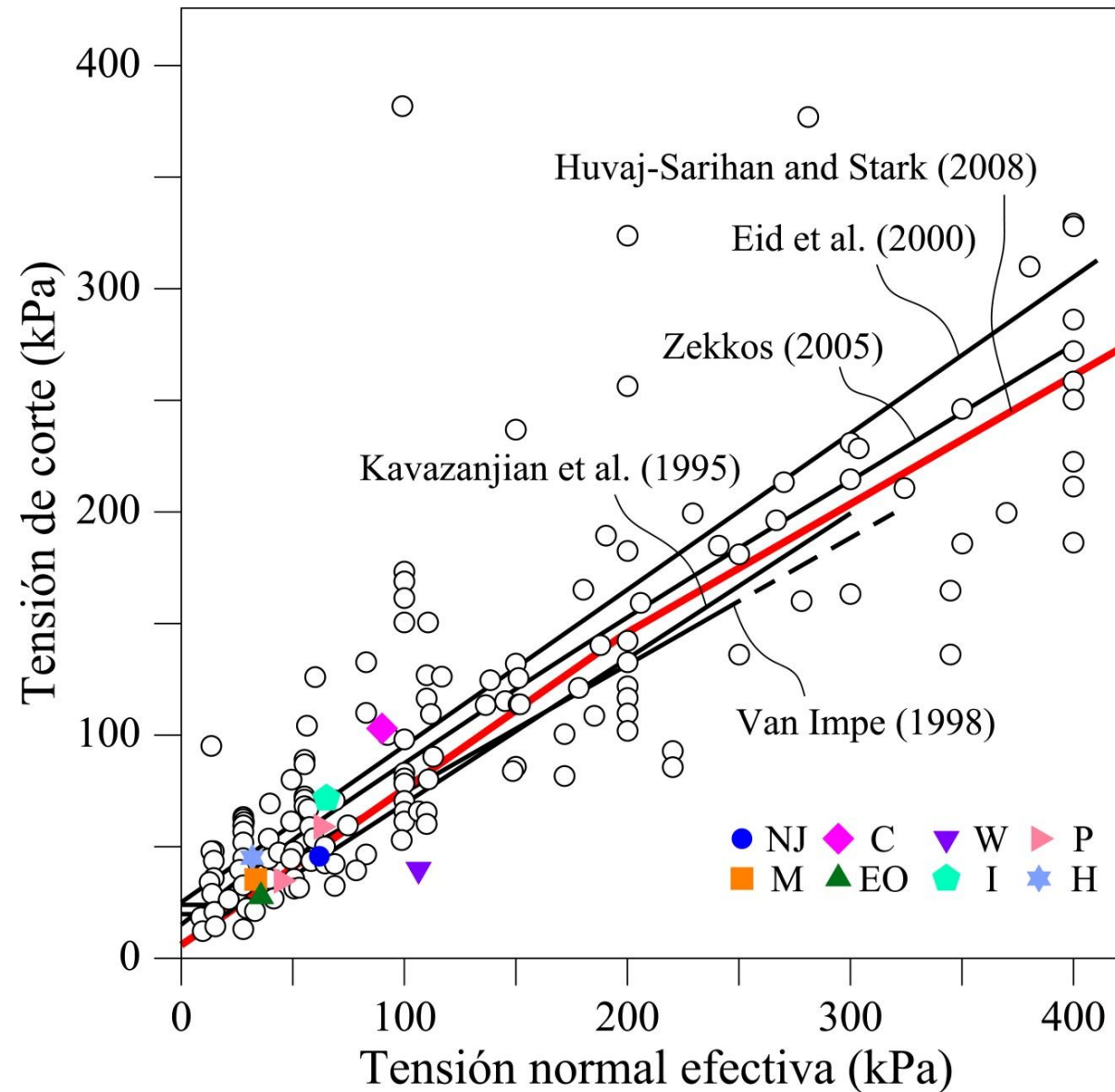
La resistencia al esfuerzo cortante del vertido

Envolventes de rotura a partir del análisis de cinco roturas de vertederos de residuos sólidos urbanos



Huvaj-Sarihan and Stark, 2008

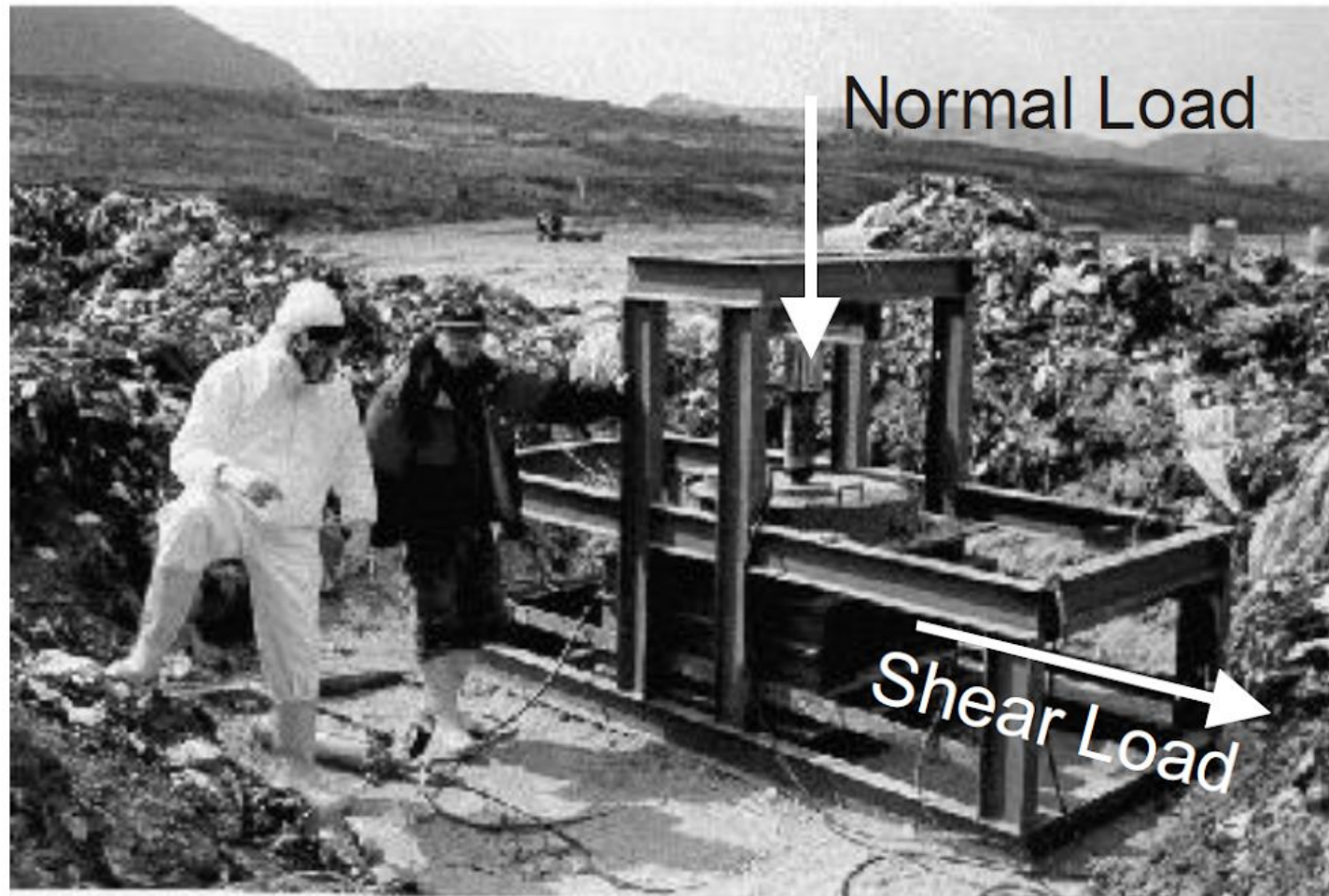
Más casos. RSU. Análisis de roturas de vertederos



Stark et al., 2007

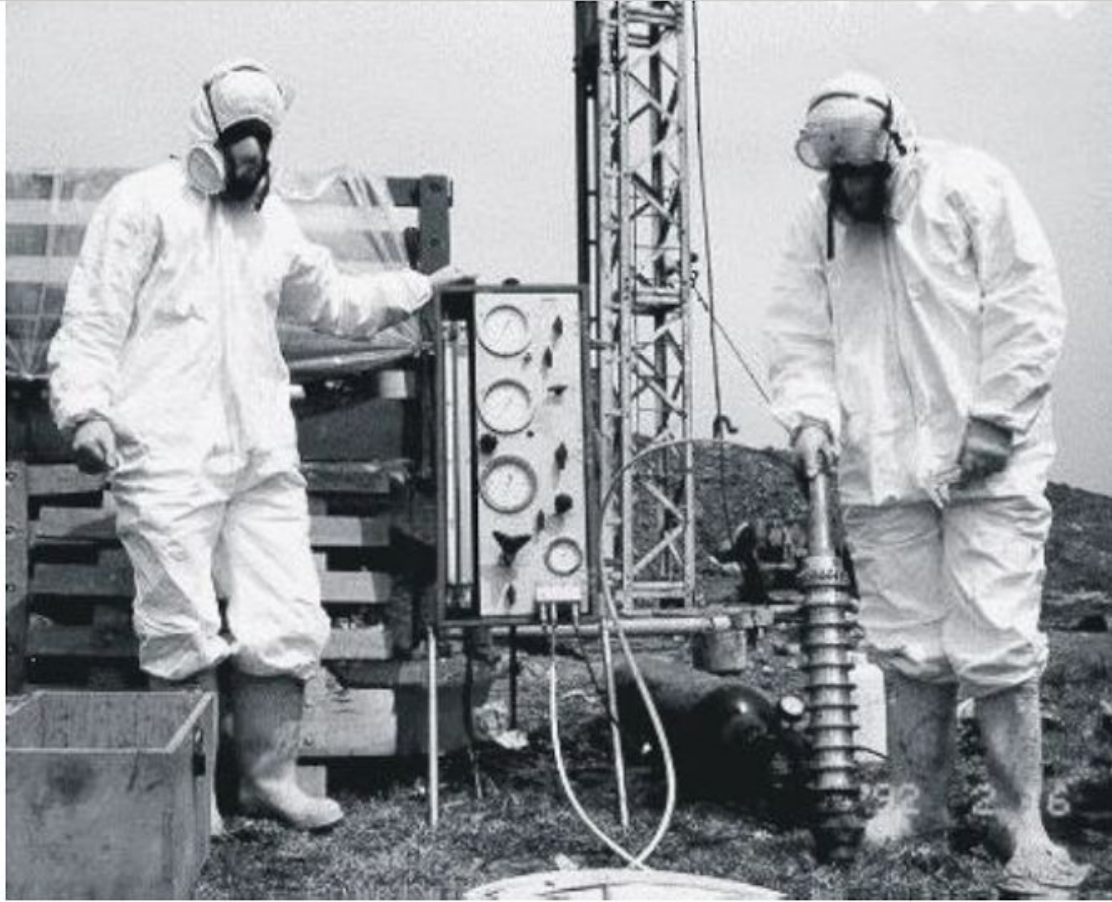
La resistencia al esfuerzo cortante del vertido

Ensayos de corte “in situ”. Vertedero Doña Juana de Bogotá. Muestras de 90 x 90 cm



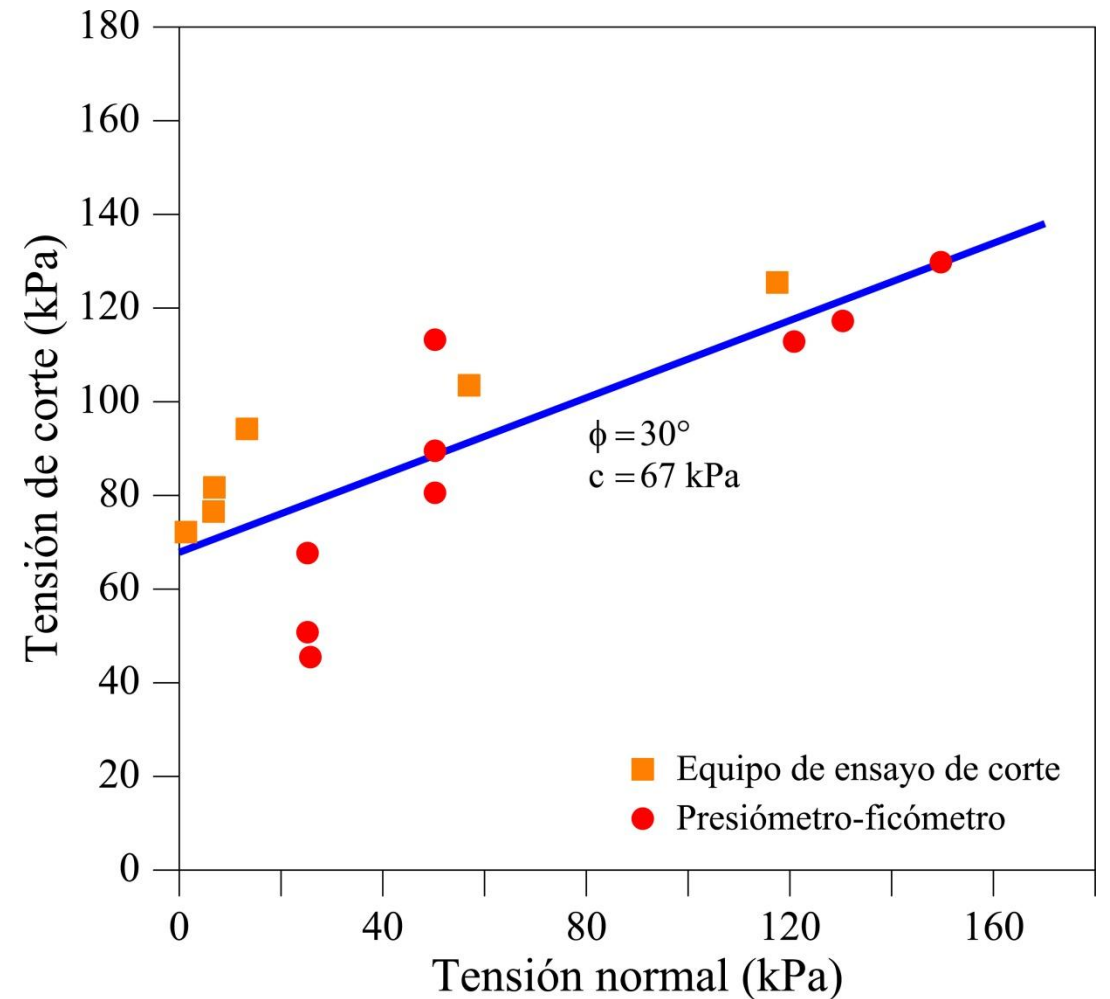
Caicedo et al., 2002

La resistencia al esfuerzo cortante del vertido



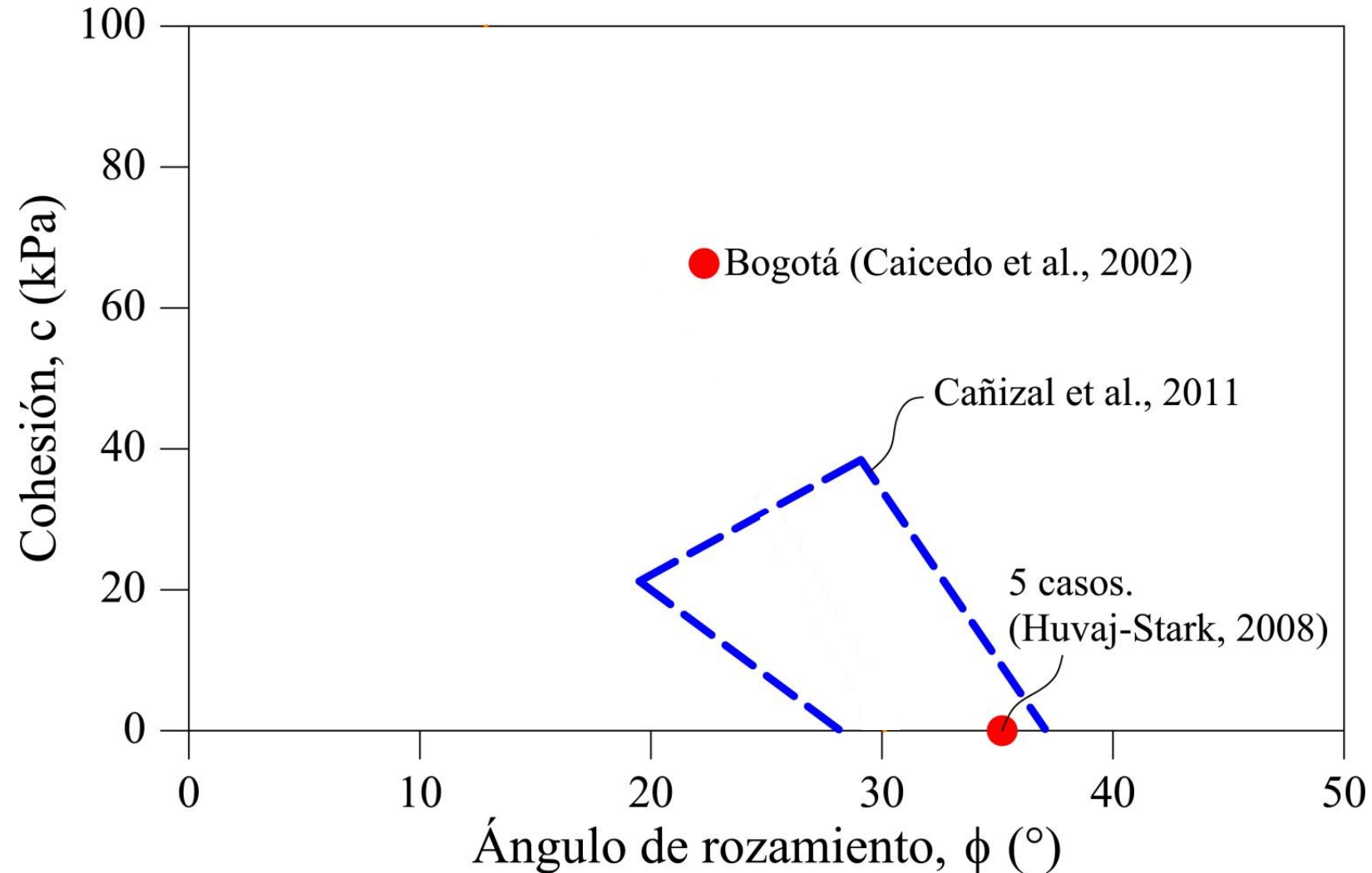
Presiómetro-Ficómetro. Doña Juana

Resumen de ensayos de corte, RSO. Vertedero de Doña Juana



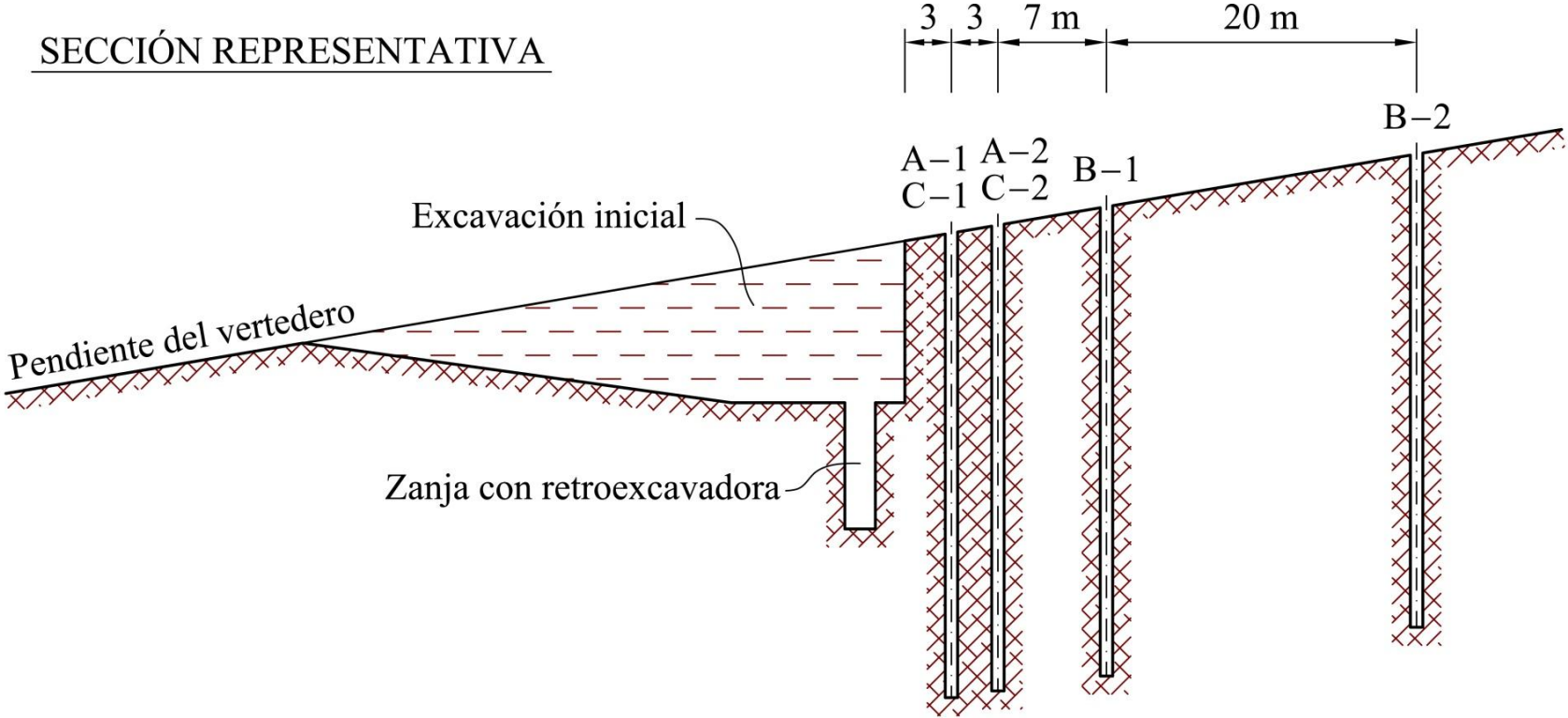
Caicedo et al., 2002

Resultados de análisis retrospectivos



La resistencia al esfuerzo cortante del vertido

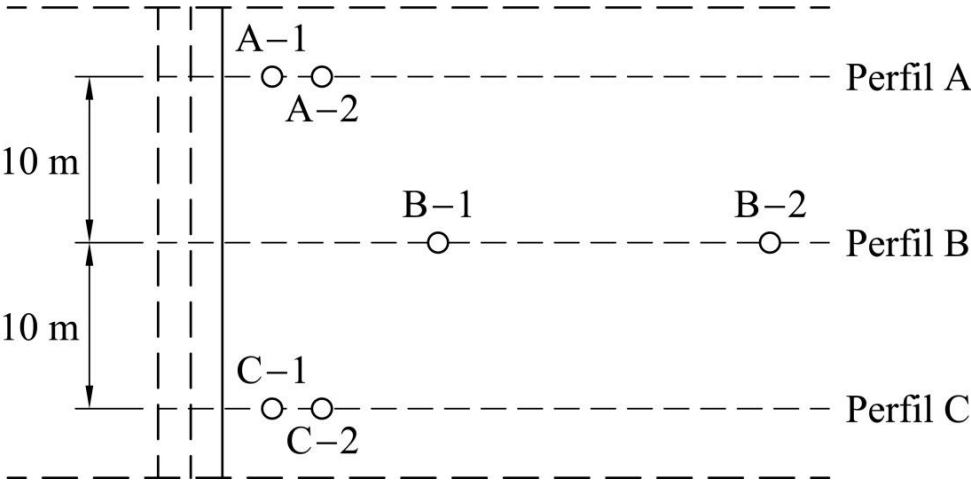
SECCIÓN REPRESENTATIVA



PLANTA

Tubos inclinométricos: A-1, A-2
C-1, C-2

Sondeo con piezómetros: B-1, B-2



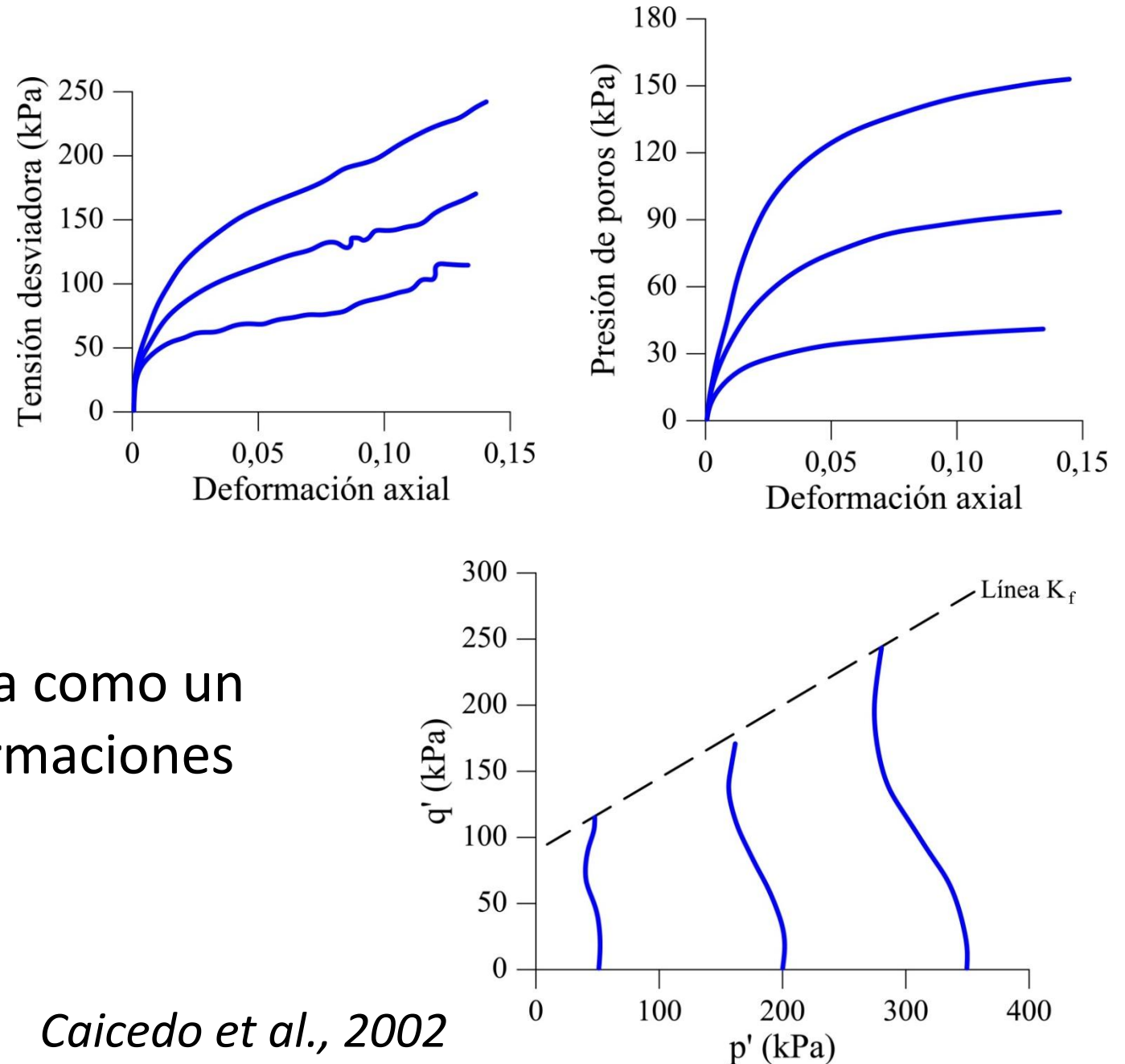
Vertedero del Garraf, Barcelona (1981)



**Ensayos triaxiales
consolidados no drenados
Residuo urbano del vertedero
Doña Juana. Bogotá**

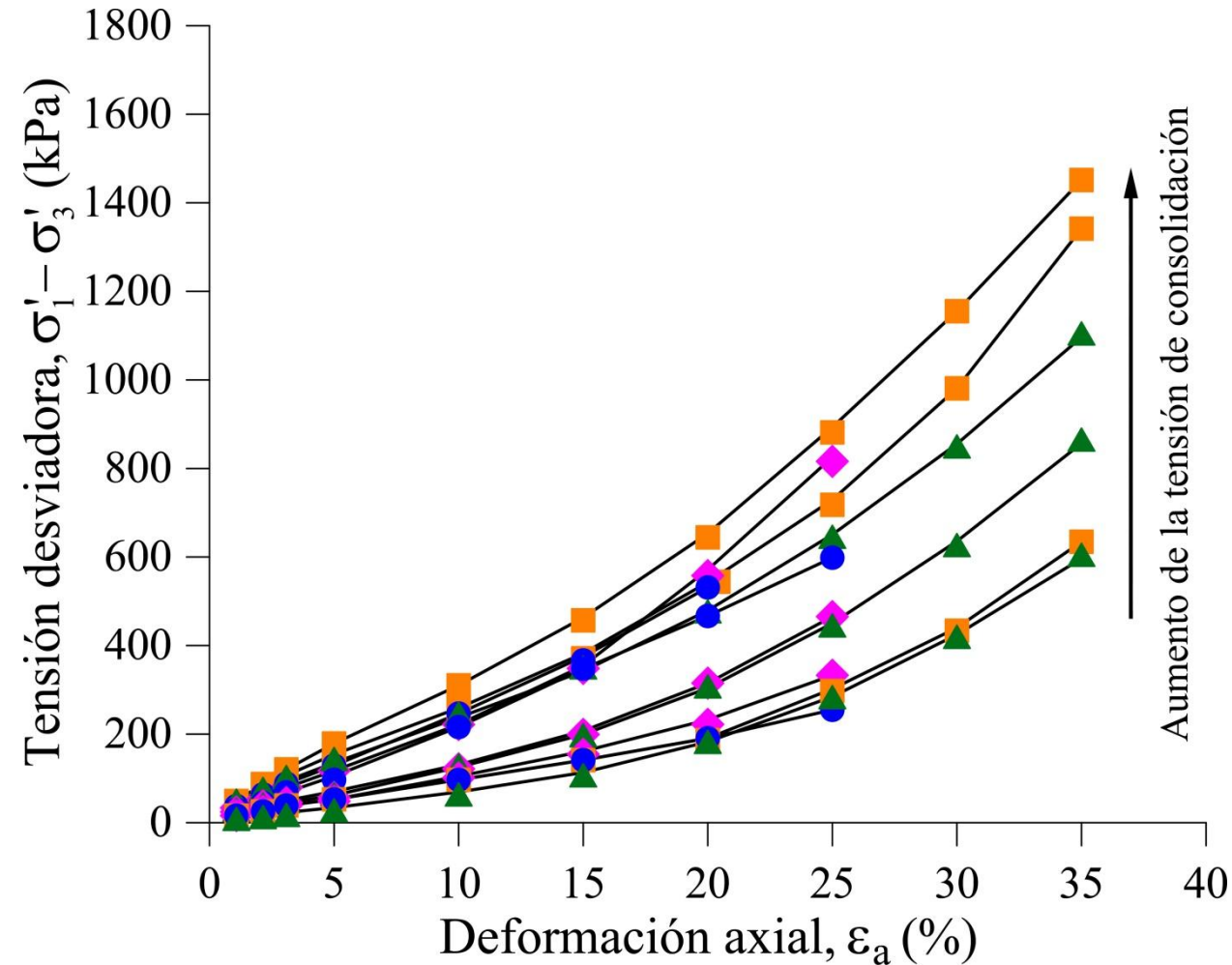
Diámetro muestras: 300 mm
Altura muestras: 600 mm

- El residuo urbano se comporta como un material dúctil: Grandes deformaciones hasta alcanzar la rotura



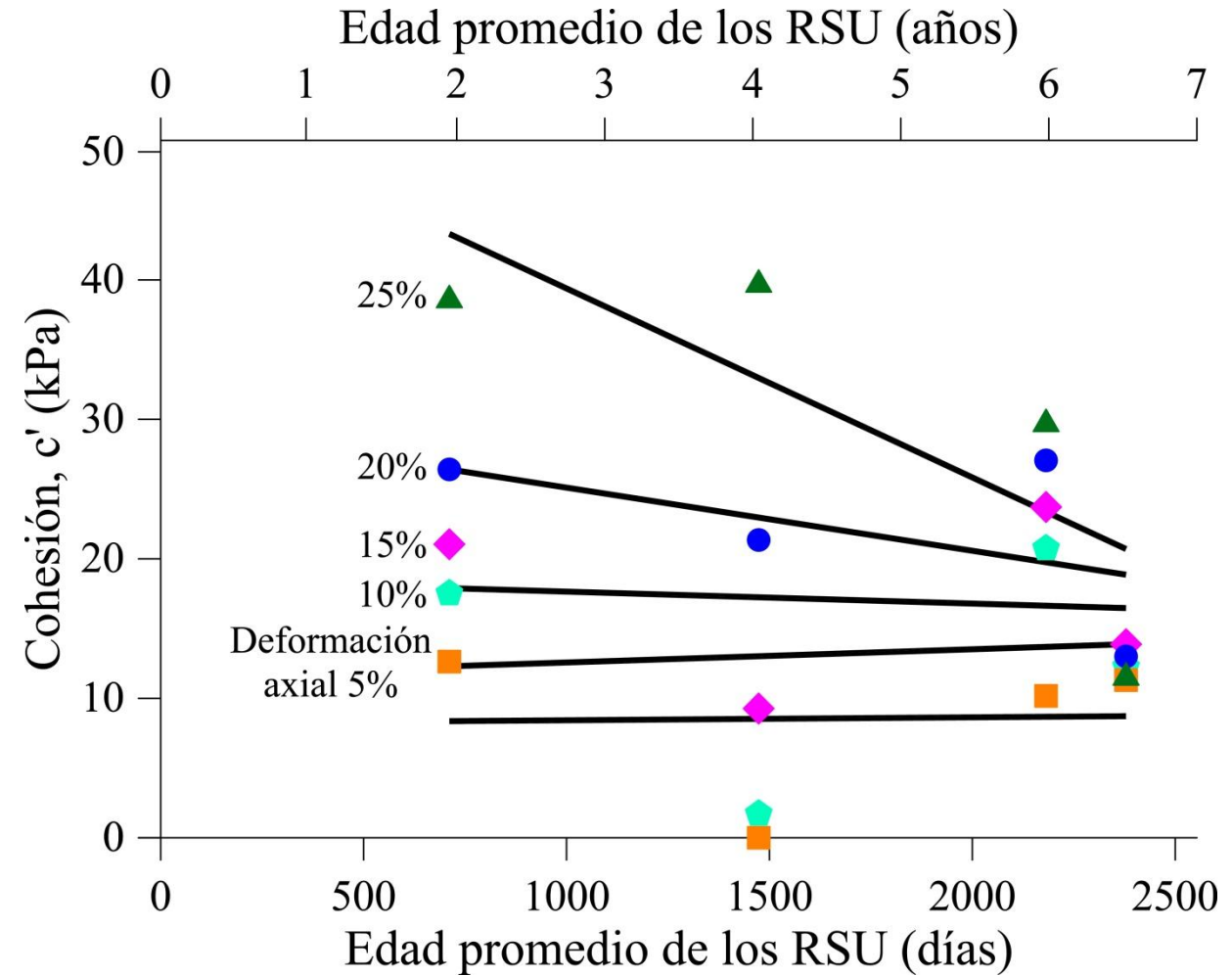
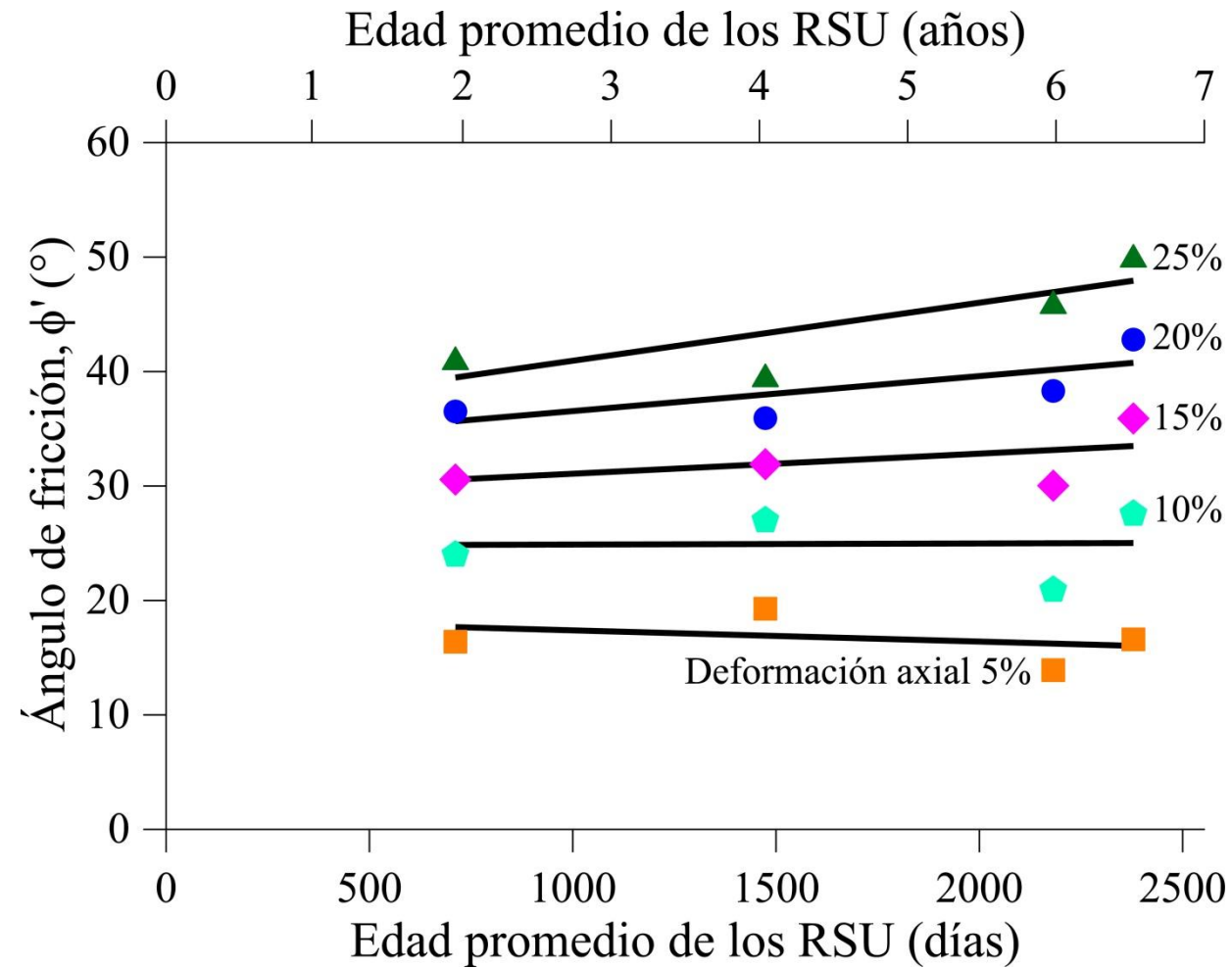
Caicedo et al., 2002

Ensayos de compresión triaxial. Muestras de vertederos RSO. Portugal



Gomes et al., 2013

Ensayos de compresión triaxial



□ Se pueden interpretar como fricción o cohesión movilizadas al incrementarse la deformación de corte

Gomes et al., 2013

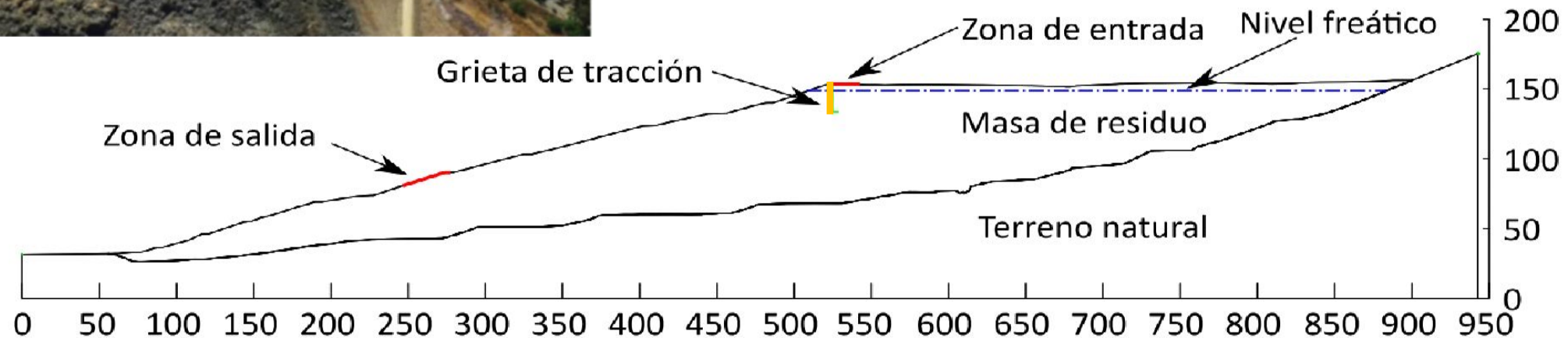
3. Las presiones de agua/lixiviado y gas

- Es frecuente que las roturas estén asociadas a episodios previos de lluvia intensa
- No es fácil drenar los vertederos de RSU

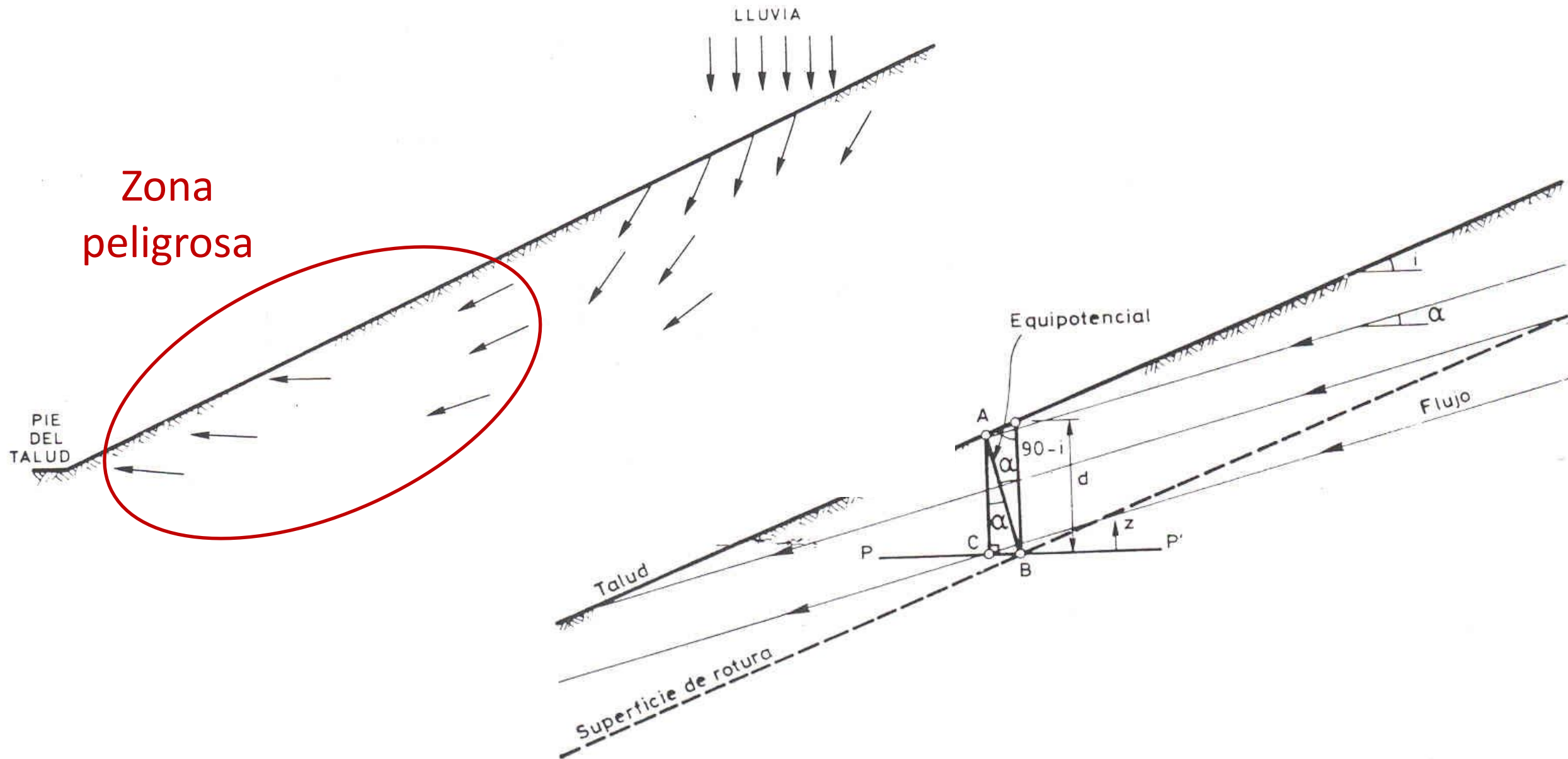


Santa Marta, Chile. Rotacional.
Rotura en 2016. Comienza
operación en 2002

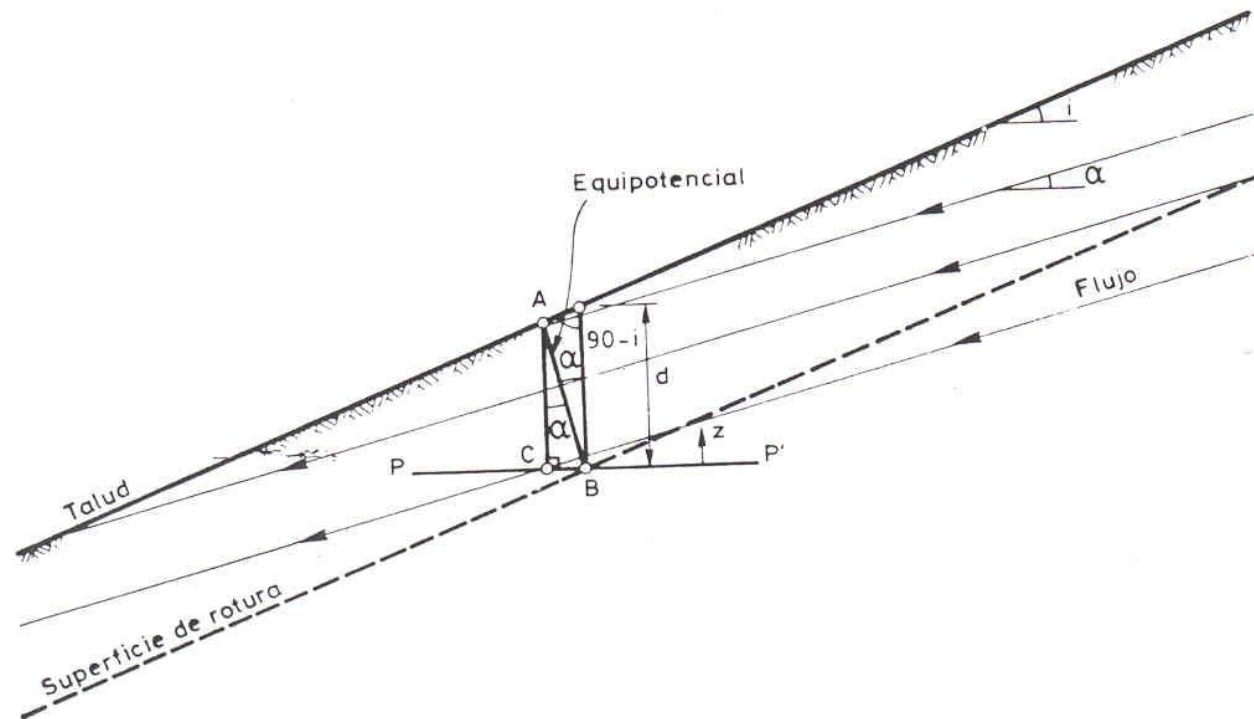
Lapeña et al., 2022



Talud indefinido. Flujo no paralelo a la superficie



Talud indefinido. Flujo no paralelo a la superficie



Caso	FS/FS _{seco}	Observaciones
$i = 30^\circ ; \alpha = 30^\circ$ $\gamma = 15 \text{ kN/m}^3$	0.33	Flujo paralelo a talud
$i = 30^\circ ; \alpha = 0^\circ$ $\gamma = 15 \text{ kN/m}^3$	0.114	Flujo emergente

Factor de seguridad. Expresión general:

$$F_\tau = \frac{c' + d \cos i \left[\gamma \cos i - \gamma_w \frac{\cos \alpha}{\cos (\alpha - i)} \right] \operatorname{tg} \varphi'}{\gamma d \sin i \cos i}$$

- FLUJO HORIZONTAL ($\alpha=0$)
TERRENO GRANULAR ($c'=0$)



$$F_\tau = \left[1 - \frac{\gamma_w}{\gamma \cos^2 i} \right] \frac{\operatorname{tg} \varphi'}{\operatorname{tg} i} \quad \text{--- } F_{\tau \text{ seco}}$$

- EXPRESIÓN GENERAL SI $c'=0$



$$\frac{F_\tau}{F_{\tau \text{ seco}}} = 1 - \frac{\gamma_w}{\gamma} \frac{\cos \alpha}{\cos i \cos (\alpha - i)}$$

Las presiones de agua/lixiviado y gas

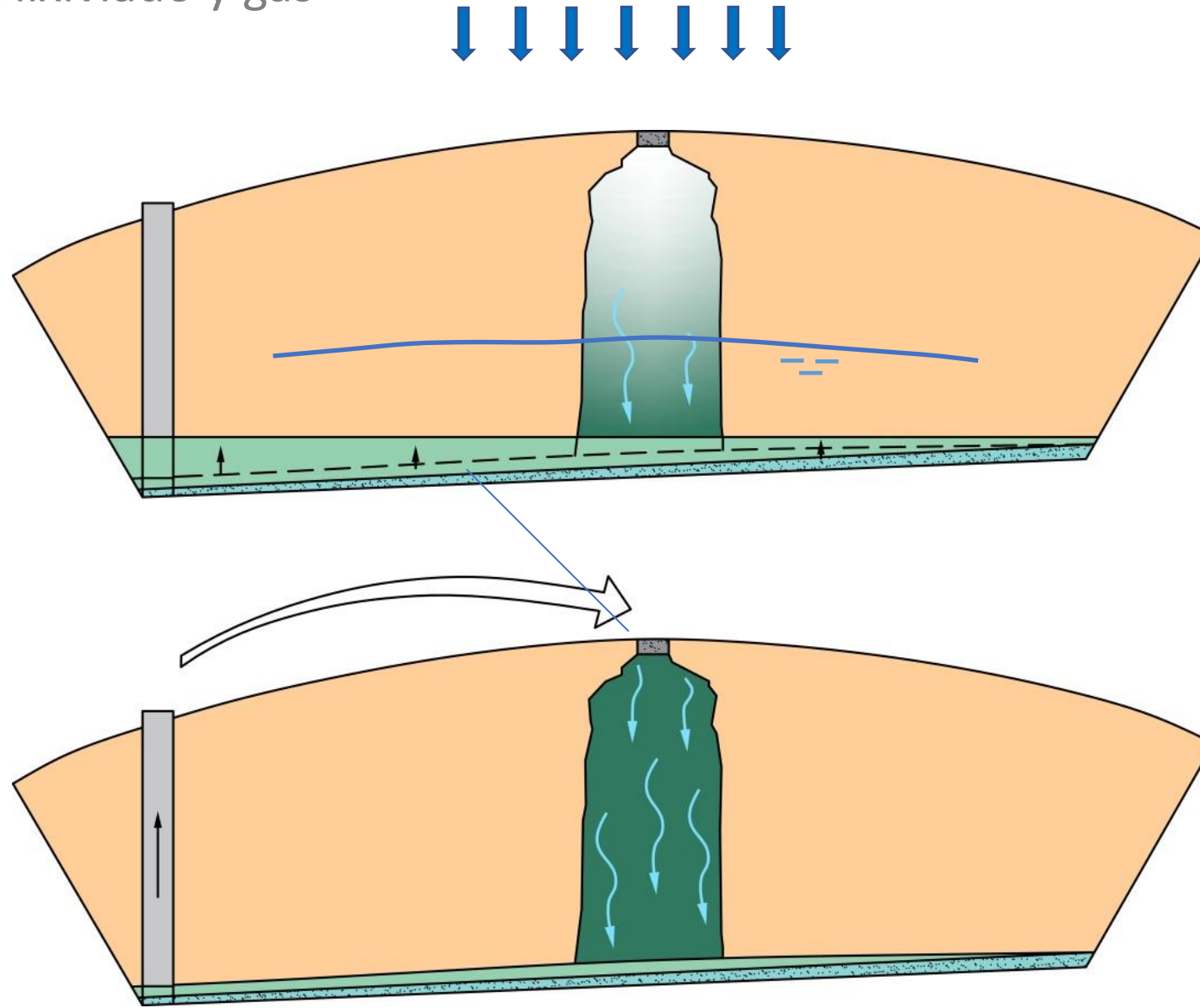
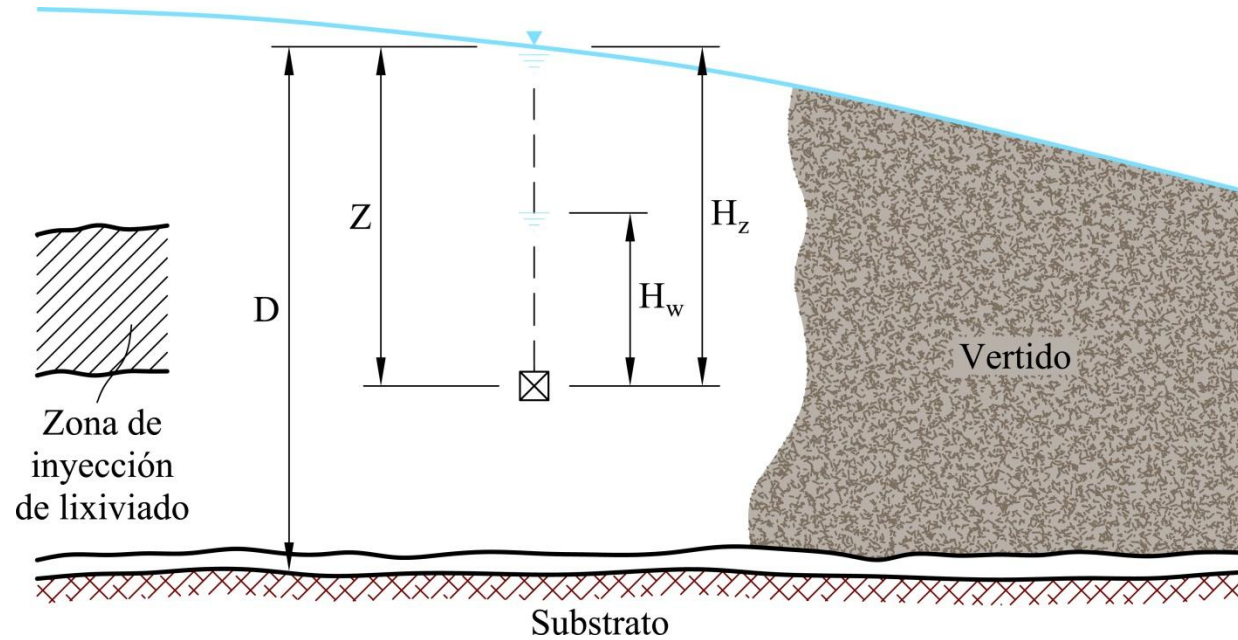


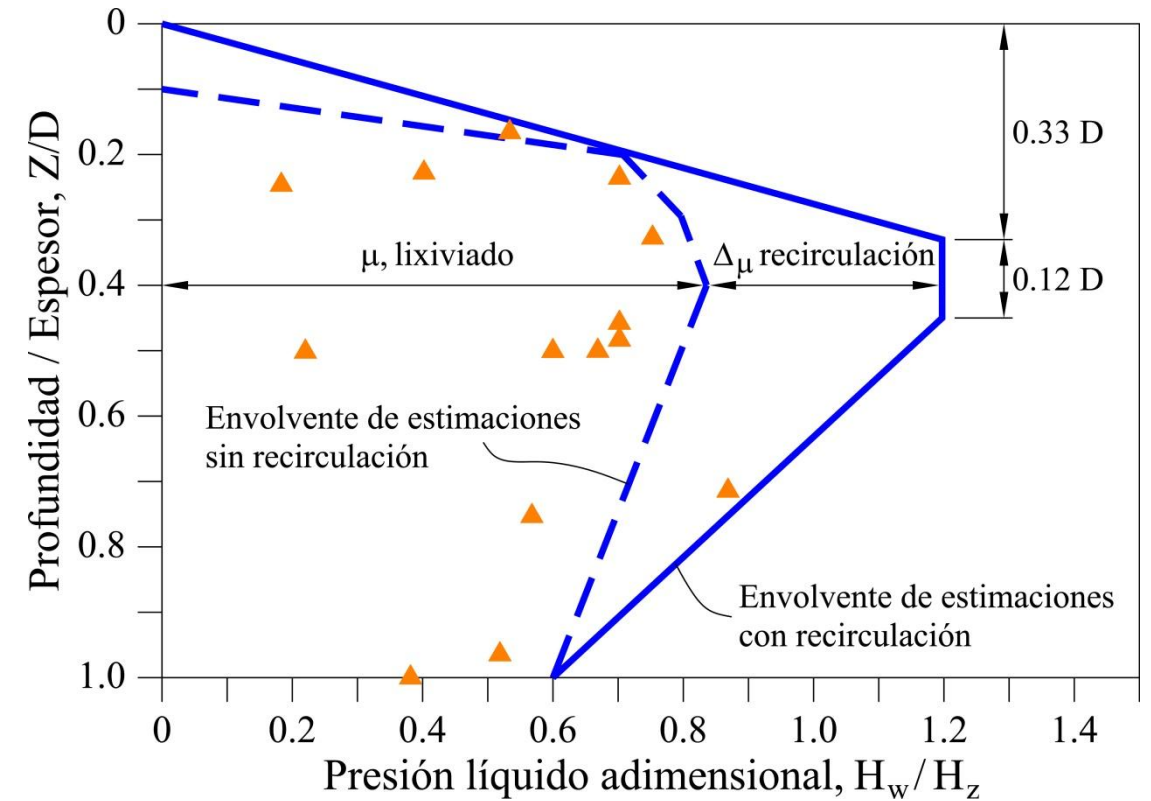
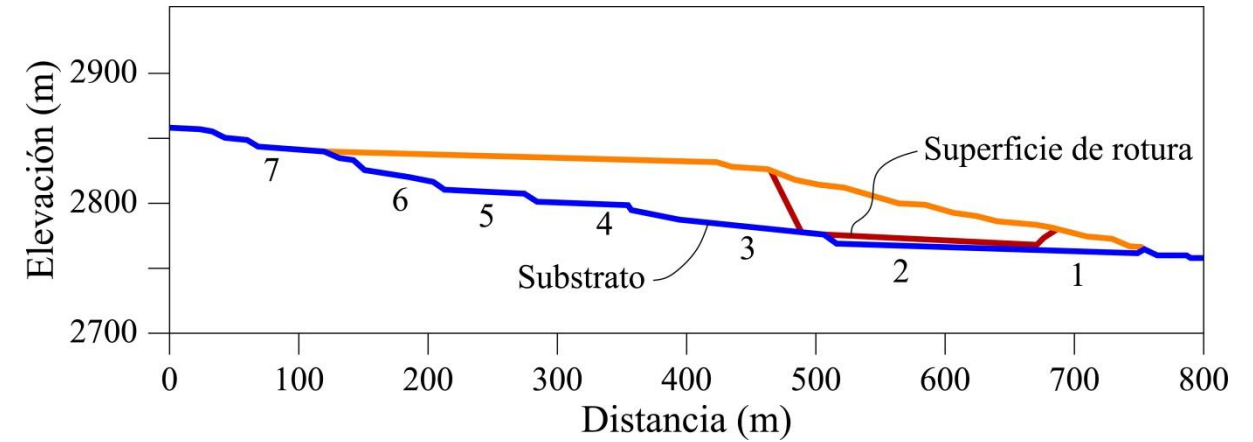
Ilustración de la circulación de lixiviado en Google

Vertedero Doña Juana. Bogotá

■ Presiones intersticiales

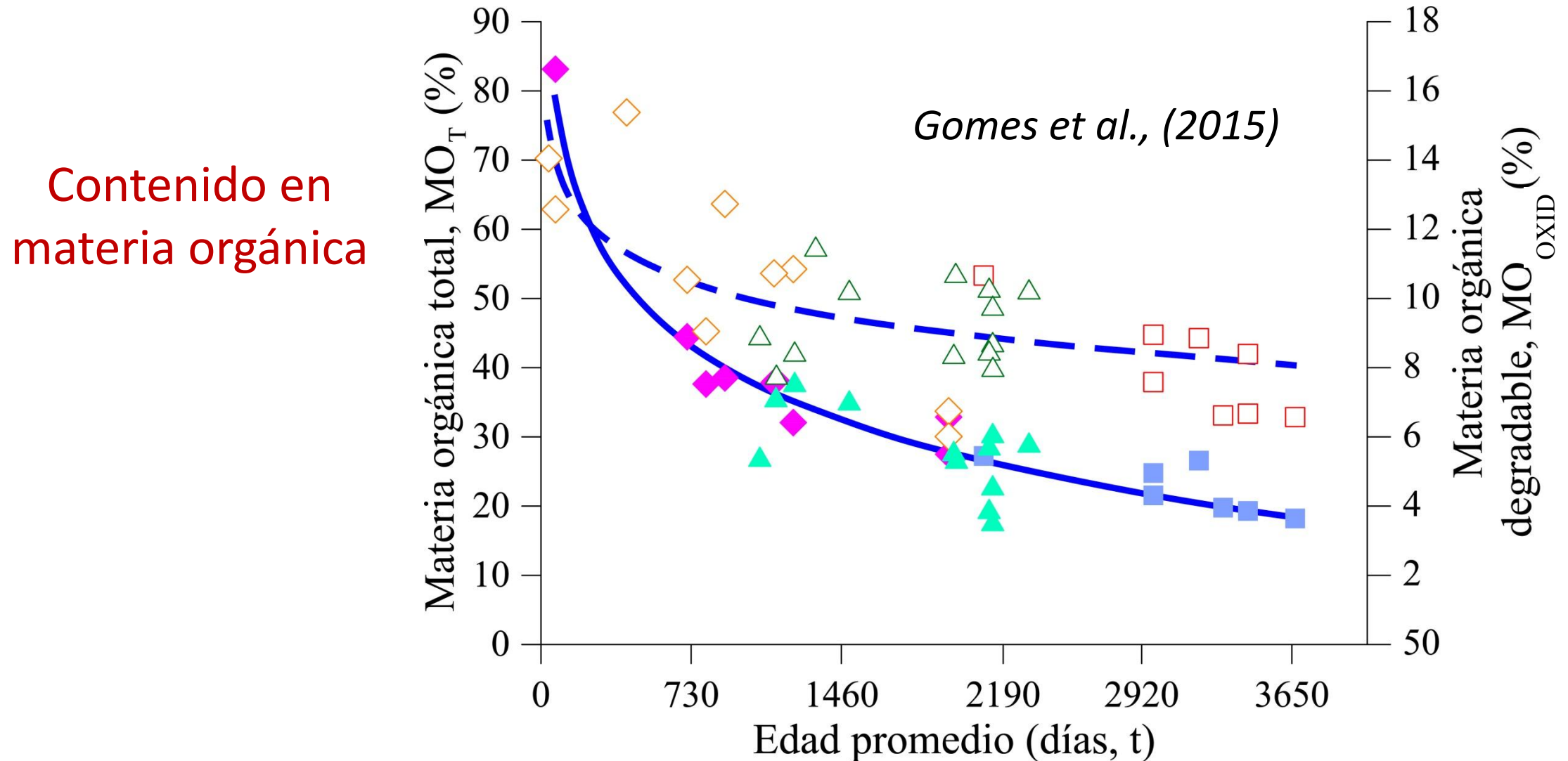


□ Funciona la ley de tensiones efectivas!



4. Más dificultades

- Variación en el tiempo de propiedades del vertido (biodegradación)



4. Más dificultades

- Material multifase (materia “sólida”, materia orgánica, gas, fluido)
- Gran heterogeneidad
- Muestras y ensayos “in situ” son poco representativos
- Medio ambiente muy agresivo (reacciones químicas, alta temperatura) para la instrumentación interna. Daño a membranas HDPE y barreras GCL
- Modelos de simulación “completos” (mecánico, multifluido, reacciones químicas internas, temperatura, tiempo) complicados

C) CONTROL E INSTRUMENTACIÓN

1. Una interpretación global (geotécnica)
2. Acceso a dos informaciones fundamentales, a lo largo del tiempo:
 - 2.1 Movimientos (intensidad, dirección, velocidad)
 - 2.2 Presiones de gas y líquido
3. Interpretación en tiempo real de observaciones

Datos para una investigación geotécnica de un vertedero

1. Revisar la historia del relleno
2. Obtener un registro de las lluvias desde el inicio del vertido
3. Inspeccionar la superficie del relleno en búsqueda de fisuras, grietas, cualquier movimiento
4. Inspeccionar si hay alguna pérdida de lixiviados
5. Ensayos “in situ” y muestras? (depende del tipo de residuo y de la heterogeneidad esperable)
6. Movimientos y presiones de poros

Movimientos (intensidad, dirección, velocidad)

Vertedero Radiowo. Varsovia, Polonia



Pasternak, 2022

Vertedero Radiowo. Varsovia, Polonia

Leyenda:

- ◆ Punto de referencia
- [] Vertedero

0 200 m



C) Control e instrumentación. Movimientos (intensidad, dirección, velocidad)

Vertedero Radiowo. Varsovia, Polonia

Leyenda:

Año de la primera
medición

- 2017
- 2016
- 2015
- 2014
- 2013
- 2007
- Antes de 2007
- × Puntos destruidos

0 100 m



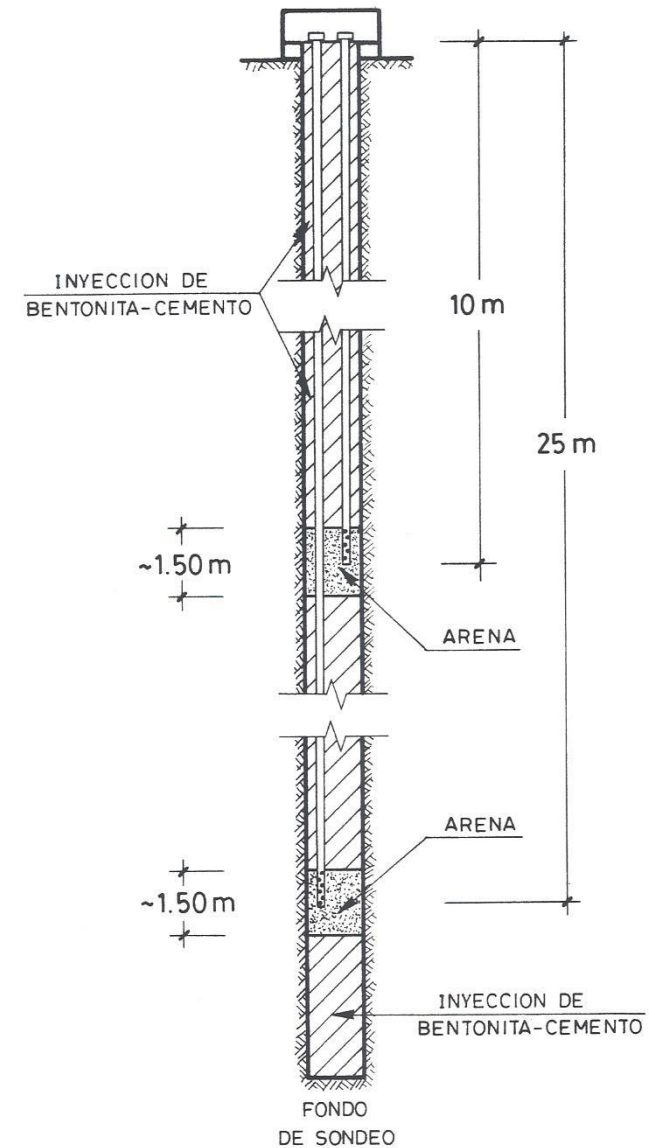
Pasternak, 2022

Presiones de gas y líquido

Vertedero de Garraf, Barcelona. 1981



Piezómetros?

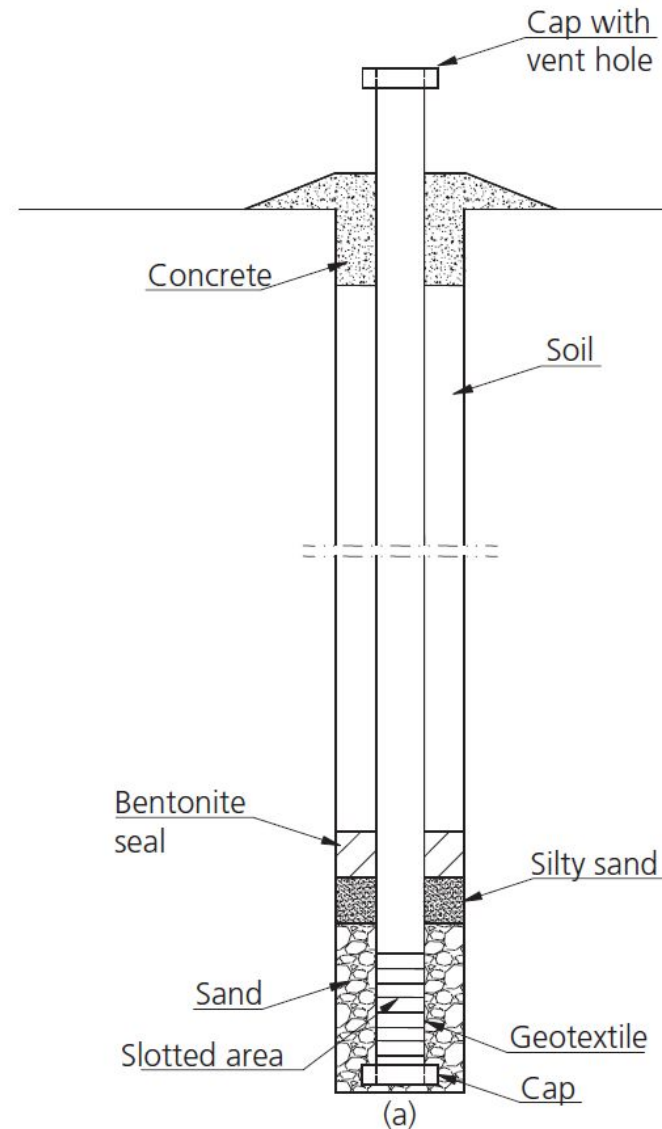


Piezómetros

Vertedero Radiowo
Varsovia, Polonia

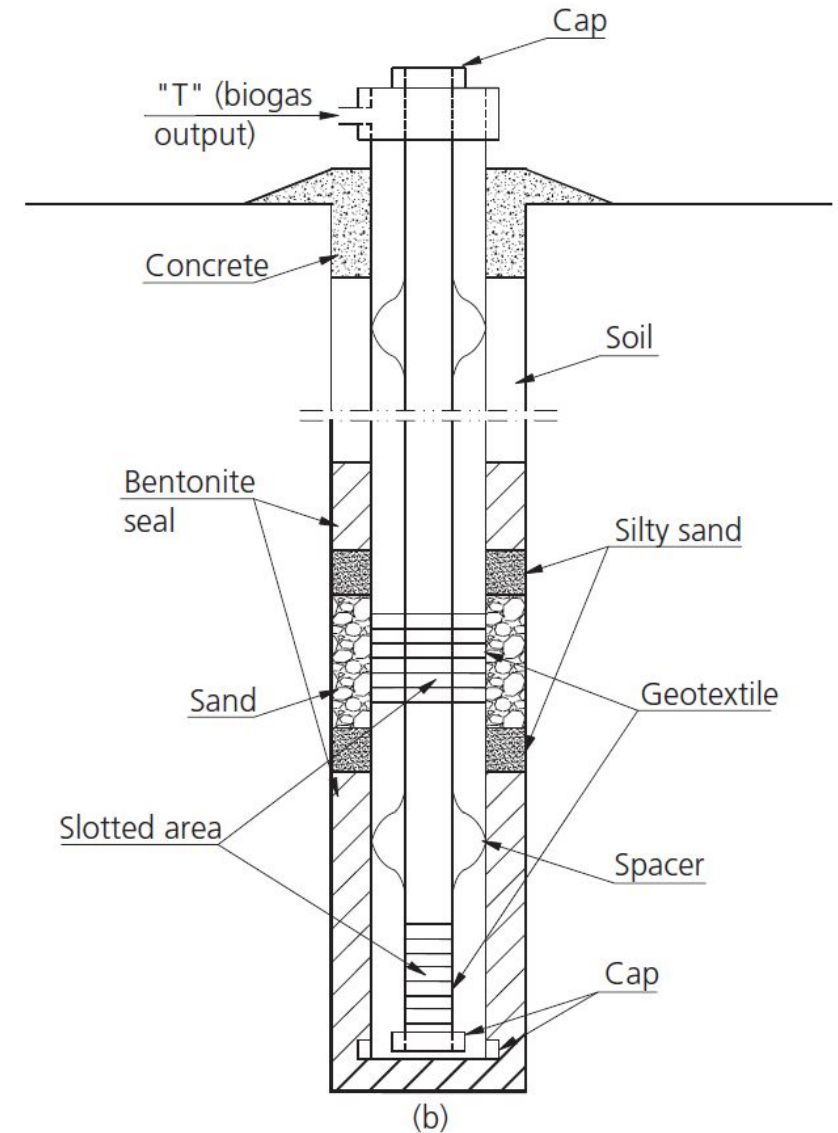
Lopes and Gomes, 2015

“Geotécnico”



Poco fiables

Vertedero



Algunos aspectos críticos en la estabilidad de vertederos

- Recirculación del lixiviado: Puede aumentar las presiones del líquido
- Capas intermedias impermeables: Aumentan la presión del líquido
- Control del balance hídrico del vertedero
- Mezcla de vertidos de diferente naturaleza
- Aumento de la capacidad del vertedero (extensión en altura y lateralmente). Analizar de nuevo la estabilidad
- Evitar grados altos de saturación ($> 50 - 60 \%$): El gas debe salir
- Establecer umbrales de riesgo (para movimientos y presiones líquido) y medidas a adoptar

Eskerrik asko zuen arretagatik
Muchas gracias por vuestra atención