

Casos Prácticos en la Aplicación de Elementos Finitos para la reducción del riesgo geotécnico

Ignacio Zuloaga
Ingeosolum Panamá, S.A.

Contenido de la Presentación

- Objetivos
- Reflexiones
- El triángulo de la Geotecnia
- Análisis Geotécnico
- Elementos Finitos
- Ejemplo de un Modelo (Mohr-Coulomb)
- Ejemplos Prácticos
- Errores comunes
- Consideraciones
- Referencias

Objetivos

- Definir: ¿qué es el Análisis Geotécnico?
- Presentar, muy brevemente, la teoría, hipótesis y aproximaciones de los métodos numéricos, con especial énfasis en el MEF
- Describir uno de los modelos constitutivos mas populares
- Proveer información para que Uds. puedan evaluar y comparar las capacidades de software comercial disponible
- Mostrar, por medio de ejemplos, algunas de las restricciones, peligros, ventajas y desventajas del análisis numérico

Reflexiones

- "...el objeto de la teoría de la mecánica de suelos, en la ingeniería, es muy diferente al de la aplicación de las teorías correspondientes al proyecto de estructuras."
- "Cuando las usamos (las teorías) en el proyecto de una estructura de acero o de hormigón armado, la mecánica aplicada nos suministra muy buenos principios, con informaciones concluyentes, porque los datos en los que los cálculos se basan son relativamente seguros. En cambio, las teorías de la mecánica de los suelos nos suministran solamente hipótesis aproximadas, ya que, de ordinario, nuestro conocimiento de las propiedades físicas del subsuelo y de la orientación de las superficies separativas de los distintos estratos, es siempre incompleto y a menudo totalmente erróneo"

....Terzaghi 1944

Reflexiones

- “No obstante, desde el punto de vista práctico, las hipótesis suministradas por la mecánica de suelos, son tan útiles, en otras ramas de la ingeniería civil, como las correspondientes a la teoría de las estructuras. Si el ingeniero está perfectamente enterado de las imprecisiones que implican las hipótesis fundamentales de sus cálculos, está capacitado para anticipar la naturaleza e importancia de las diferencias que pueden existir entre la realidad y su concepción original del problema”

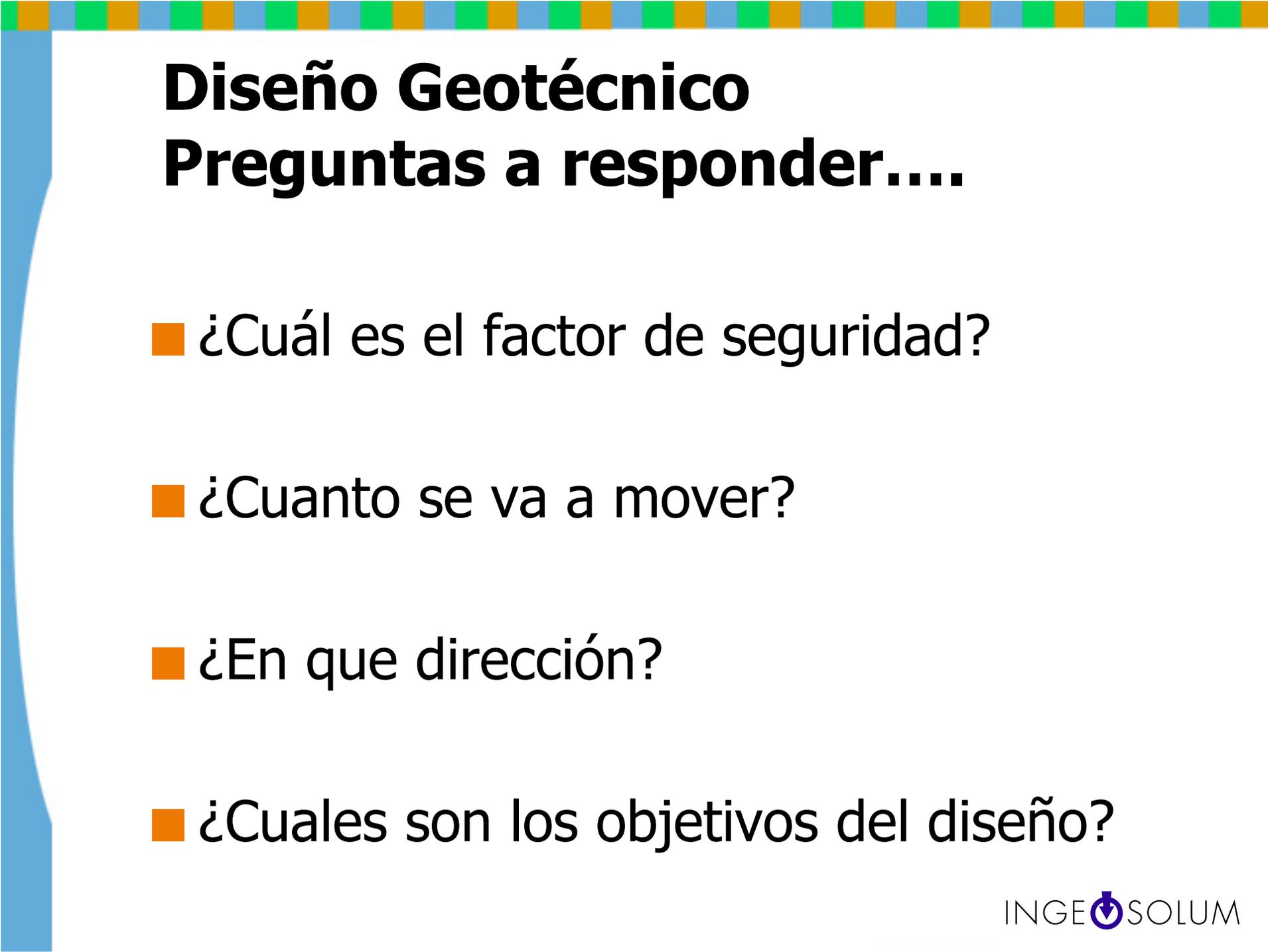
Triángulo de la Geotecnia

**El secreto de la geotecnia
es mantener el
triángulo equilibrado**

GE

o

análisis
geotécnico

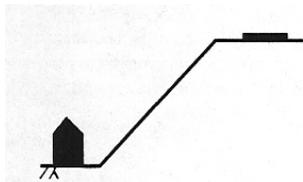


Diseño Geotécnico

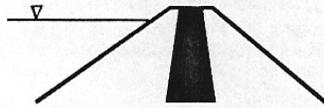
Preguntas a responder....

- ¿Cuál es el factor de seguridad?
- ¿Cuanto se va a mover?
- ¿En que dirección?
- ¿Cuales son los objetivos del diseño?

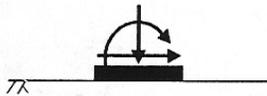
Análisis Geotécnico



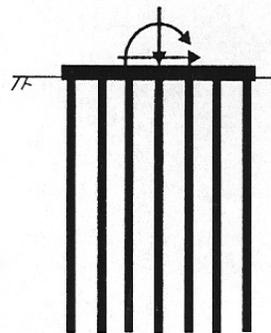
Talud



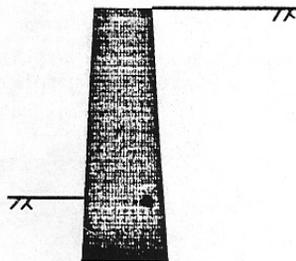
Presa



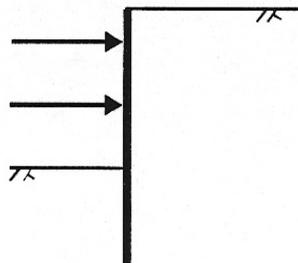
Zapata



Pilotes



Muro de gravedad

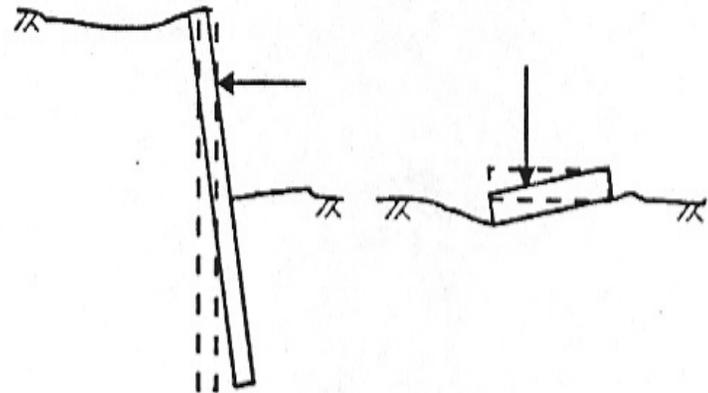


Muro pantalla

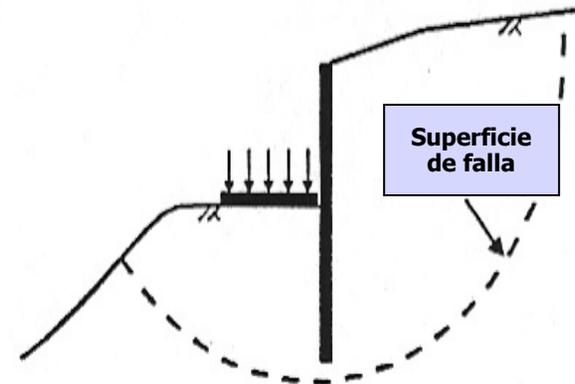
- El Análisis Geotécnico provee el marco para responder a las preguntas anteriores
- Aun siendo una importante parte del proceso de diseño, el Análisis Geotécnico es SOLO una herramienta para cuantificar los efectos a partir de:
 - Las propiedades de los materiales
 - Las condiciones geométricas
 - Las cargas

Objetivos del Diseño

- Estabilidad local
- Estabilidad global
- Determinar las fuerzas que actúan sobre las estructuras bajo cargas de trabajo y máximas (últimas) (momentos flectores, fuerzas axiales y cortantes)
- Desplazamientos



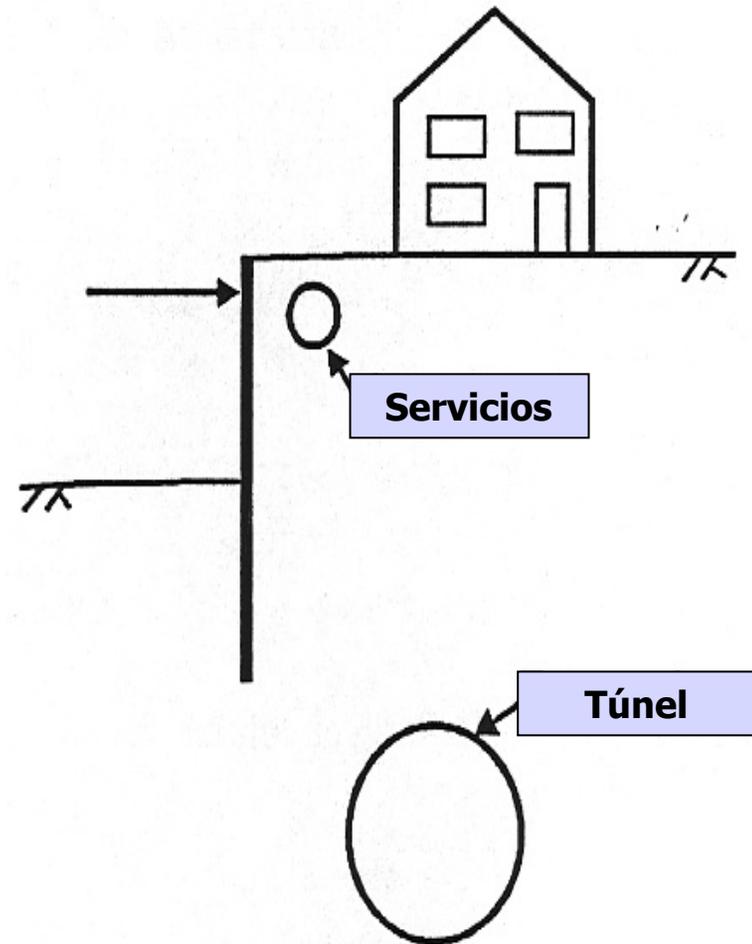
Estabilidad Local



Estabilidad Global

Requisitos del Diseño

- Geometría y condiciones de carga
- Restricciones en el comportamiento de la estructura
- Condiciones del terreno
- Localización de servicios, estructuras adyacentes (y sus desplazamientos permitidos)



Requisitos Teóricos

- En general una solución teórica debe satisfacer:
 - Equilibrio
 - Compatibilidad
 - Relación Constitutiva
 - Condiciones de Frontera (fuerza y desplazamientos)

....para una solución teórica

Equilibrio en forma de tensores

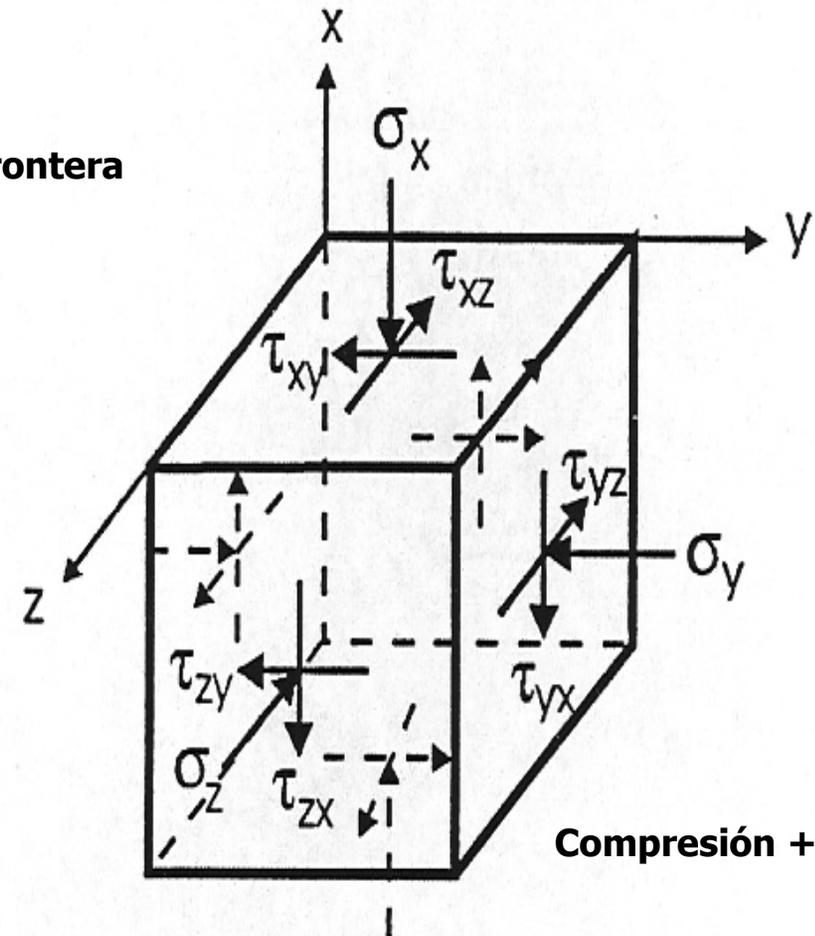
Debe satisfacer las condiciones de frontera

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + \gamma = 0$$

$$\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} = 0$$

$$\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} = 0$$

Peso Propio

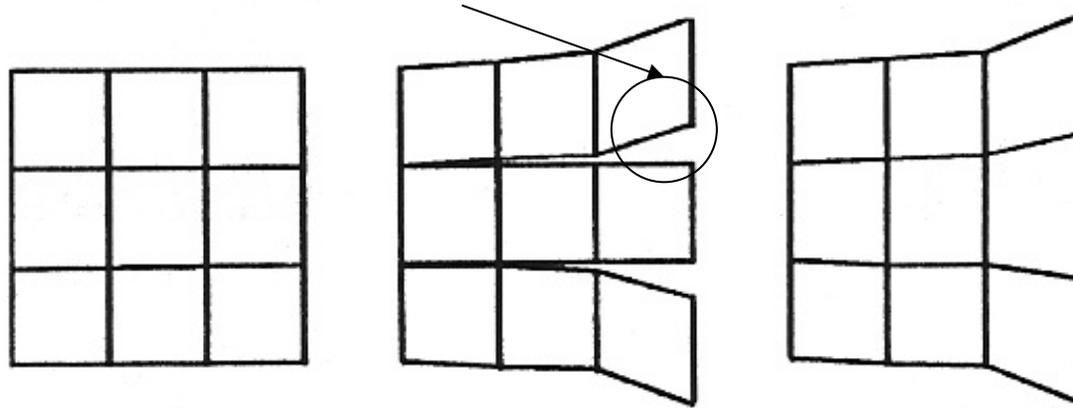


....fuerza por unidad de area

Compatibilidad

$$\epsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x}; \quad \epsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y}; \quad \epsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z}; \quad \gamma_{xy} = \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}; \quad \gamma_{yz} = \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z}; \quad \gamma_{xz} = \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z}$$

Hacemos imposible la superposición o aparición de huecos



Original

Incompatible

Compatible

....deformaciones unitarias

Equilibrio y Compatibilidad

- Combinando las ecuaciones de equilibrio y compatibilidad
 - Variables desconocidas
 - ◆ $6 \text{ esfuerzos} + 6 \text{ deformaciones} + 3 \text{ desplazamientos} = 15$
 - Ecuaciones
 - ◆ $3 \text{ equilibrio} + 6 \text{ compatibilidad} = 9$
 - Necesitamos 6 ecuaciones independientes mas...

....nos hace falta una relación constitutiva

Relación Constitutiva

$$\begin{bmatrix} \Delta\sigma_x \\ \Delta\sigma_y \\ \Delta\sigma_z \\ \Delta\tau_{xy} \\ \Delta\tau_{xz} \\ \Delta\tau_{zy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{13} & D_{14} & D_{15} & D_{16} \\ D_{21} & D_{22} & D_{23} & D_{24} & D_{25} & D_{26} \\ D_{31} & D_{32} & D_{33} & D_{34} & D_{35} & D_{36} \\ D_{41} & D_{42} & D_{43} & D_{44} & D_{45} & D_{46} \\ D_{51} & D_{52} & D_{53} & D_{54} & D_{55} & D_{56} \\ D_{61} & D_{62} & D_{63} & D_{64} & D_{65} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\varepsilon_x \\ \Delta\varepsilon_y \\ \Delta\varepsilon_z \\ \Delta\gamma_{xy} \\ \Delta\gamma_{xz} \\ \Delta\gamma_{zy} \end{bmatrix}$$

o

$$\Delta\sigma = [D] \Delta\varepsilon$$

Si el material es Elástico

$$\frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} (1-\nu) & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & (1-\nu) & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & (1-\nu) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & (\frac{1}{2}-\nu) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & (\frac{1}{2}-\nu) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & (\frac{1}{2}-\nu) \end{bmatrix}$$

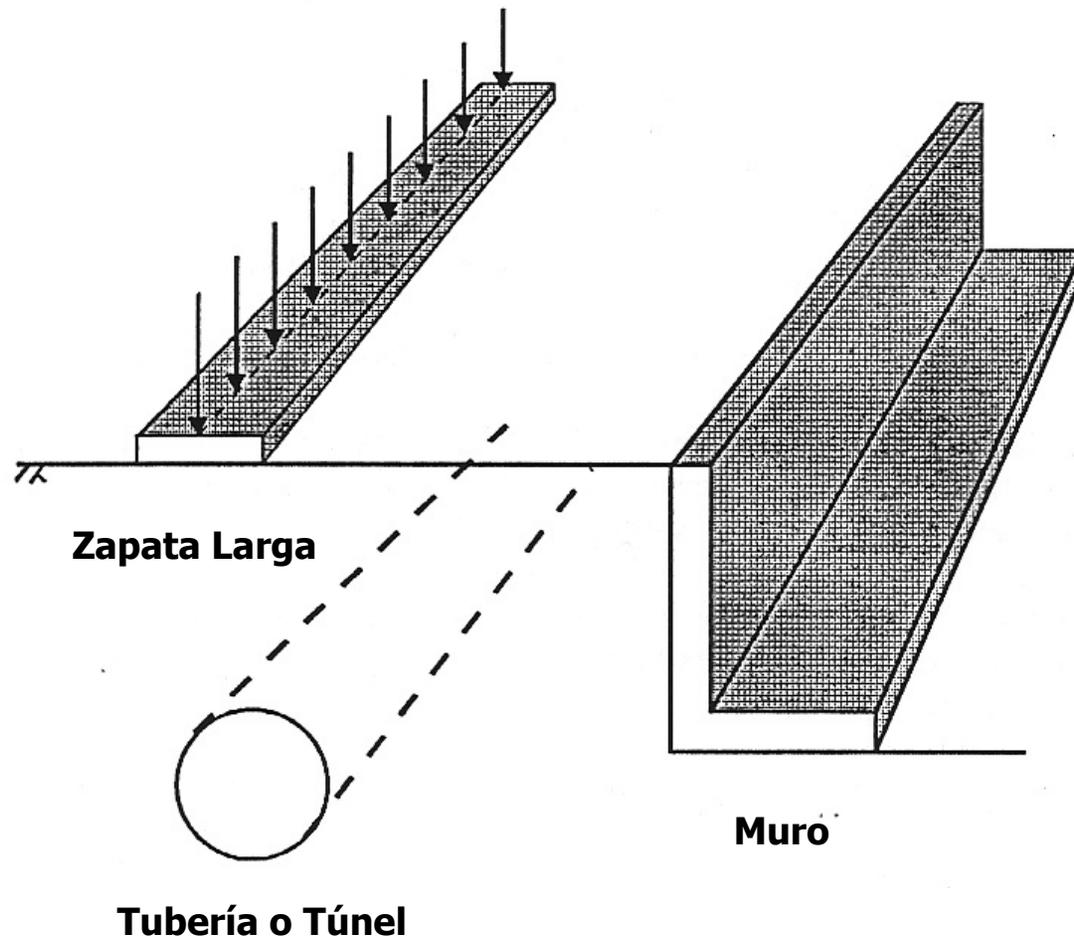
Donde E y μ son el Módulo de Young y la Relación de Poisson

Idealizaciones Geométricas

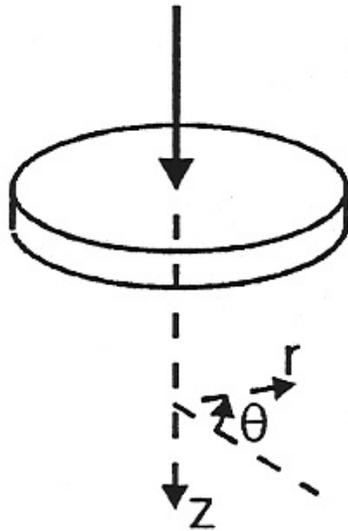
- Para aplicar los conceptos anteriores a un problema geotécnico real, hace falta hacer ciertas suposiciones e idealizaciones.
- Es necesario especificar el comportamiento del terreno en la forma de un relación matemática constitutiva.
- Puede ser también necesario simplificar y/o idealizar la geometría y/o las condiciones de frontera del problema

Deformación Plana

$$\varepsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z} = 0; \quad \gamma_{xz} = \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} = 0; \quad \gamma_{yz} = \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} = 0;$$



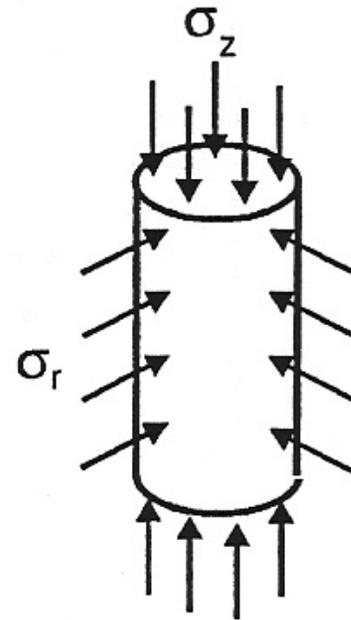
Simetría Axial



Zapata Circular



Pilote



Ensayo Triaxial

Requisitos teóricos satisfechos por los distintos métodos de análisis

Métodos de Análisis		Requisitos para una Solución				
		Equilibrio	Compatibilidad	Relación Constitutiva	Condiciones de Frontera	
					Fuerza	Desplazamiento
Solución Analítica		Satisfecho	Satisfecho	Elasticidad Lineal	Satisfecho	Satisfecho
Equilibrio Límite		Satisfecho parcialmente	No Satisfecho	Rígido con un criterio de falla	Satisfecho	No Satisfecho
Campos de Tensiones		Satisfecho	No Satisfecho	Rígido con un criterio de falla	Satisfecho	No Satisfecho
Análisis Límite	Superior	Satisfecho	No Satisfecho	Plasticidad Ideal con una regla de fluencia	Satisfecho	No Satisfecho
	Inferior	No Satisfecho	Satisfecho		No Satisfecho	Satisfecho
Viga-Resorte		Satisfecho	Satisfecho	Suelo modelado por resortes	Satisfecho	Satisfecho
Análisis Numérico		Satisfecho	Satisfecho	Cualquiera	Satisfecho	Satisfecho

Requisitos de diseño que satisfacen los distintos métodos de análisis

Métodos de Análisis		Requisitos para el Diseño		
		Estabilidad	Desplazamientos	Estructuras Adyacentes
Solución Analítica (Elasticidad)		NO	SI	SI
Equilibrio Límite		SI	NO	NO
Campos de Tensiones		SI	NO	NO
Análisis Límite	Superior	SI	NO	NO
	Inferior	SI	Aproximado	NO
Viga-Resorte		SI	SI	NO
Análisis Numérico		SI	SI	SI

Análisis Numérico I

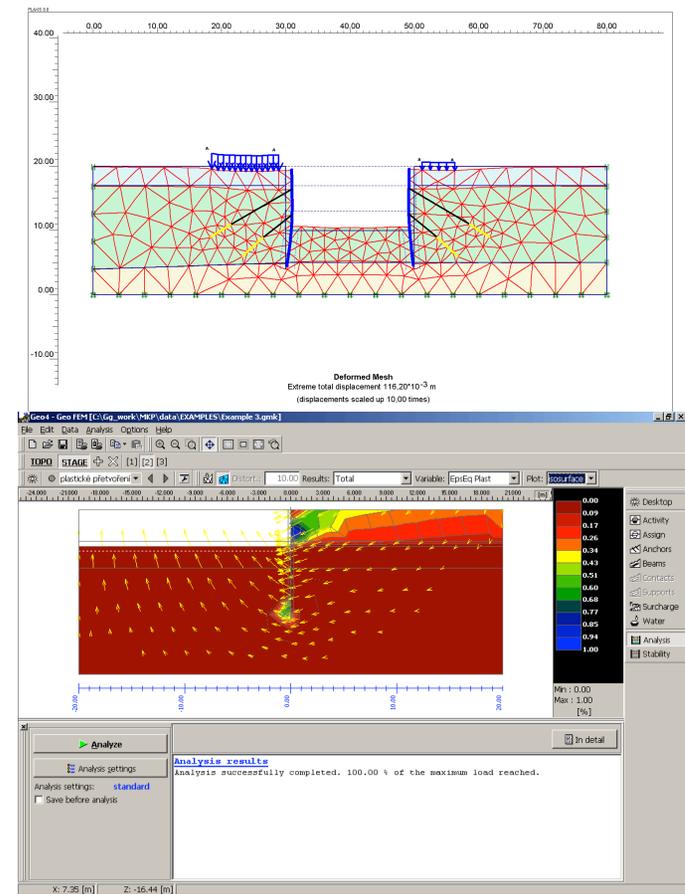
- Esta categoría de métodos de análisis puede satisfacer todos los requerimientos teóricos
- Cuando incluimos modelos constitutivos realistas e incorporamos condiciones de frontera que simulan las condiciones de campo, las predicciones pueden ser realistas
- Son métodos numéricos que resuelven las no linealidades en el comportamiento del terreno mediante aproximaciones matemáticas
- En Geotecnia generalmente se emplean las diferencias finitas y los elementos finitos
- También se emplean, en menor extensión, el método de las celdas y de elementos de frontera

Análisis Numérico II

- Estos métodos involucran simulaciones por ordenador de la historia del problema de condiciones de frontera, desde las condiciones iniciales hasta el largo plazo, incluyendo la construcción
- Su capacidad para predecir las condiciones de campo depende esencialmente de:
 - La capacidad del modelo constitutivo de representar el comportamiento real del terreno
 - La exactitud de las condiciones de frontera impuestas
 - La adecuación del método numérico empleado

Análisis Numérico III

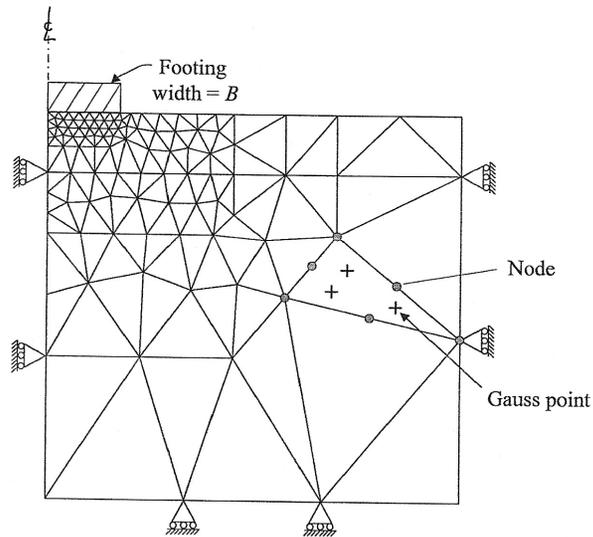
- El usuario sólo tiene que definir la geometría apropiada, el procedimiento constructivo, los parámetros del terreno y las condiciones de frontera
- Elementos estructurales pueden ser incluidos y retirados durante la simulación para modelar las condiciones de campo
- Por ejemplo: estructuras de retención compuestas por muros pantallas interconectadas por arrostros y con anclajes con terrenos estratificados pueden ser estudiadas en detalle



Análisis Numérico IV

- Efectos producidos en el transcurso del tiempo, tal y como el desarrollo de las presiones de poros, pueden ser simulados incluyendo fenómenos de consolidación en el análisis
- No se postulan mecanismos de falla o modos de comportamiento del problema. Estos son estimados por el análisis
- El análisis permite predecir la historia completa del problema de condiciones de frontera en un solo análisis, proporcionando información completa de TODOS los requerimientos de diseño

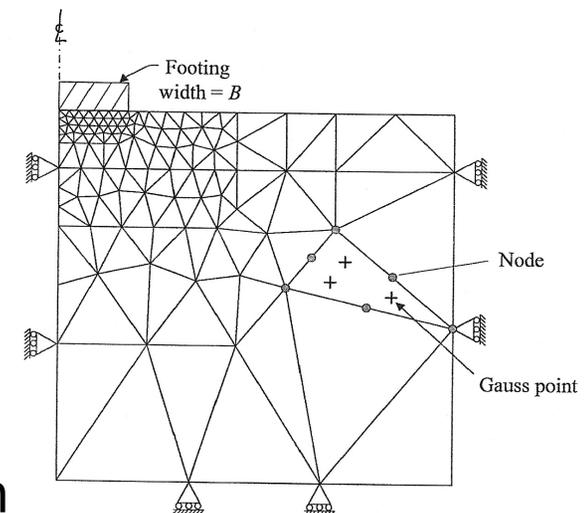
MEF en Geotecnia



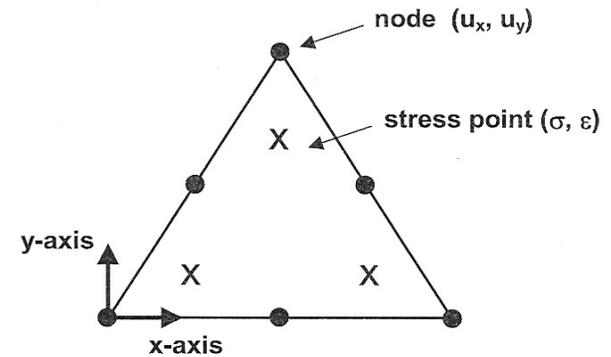
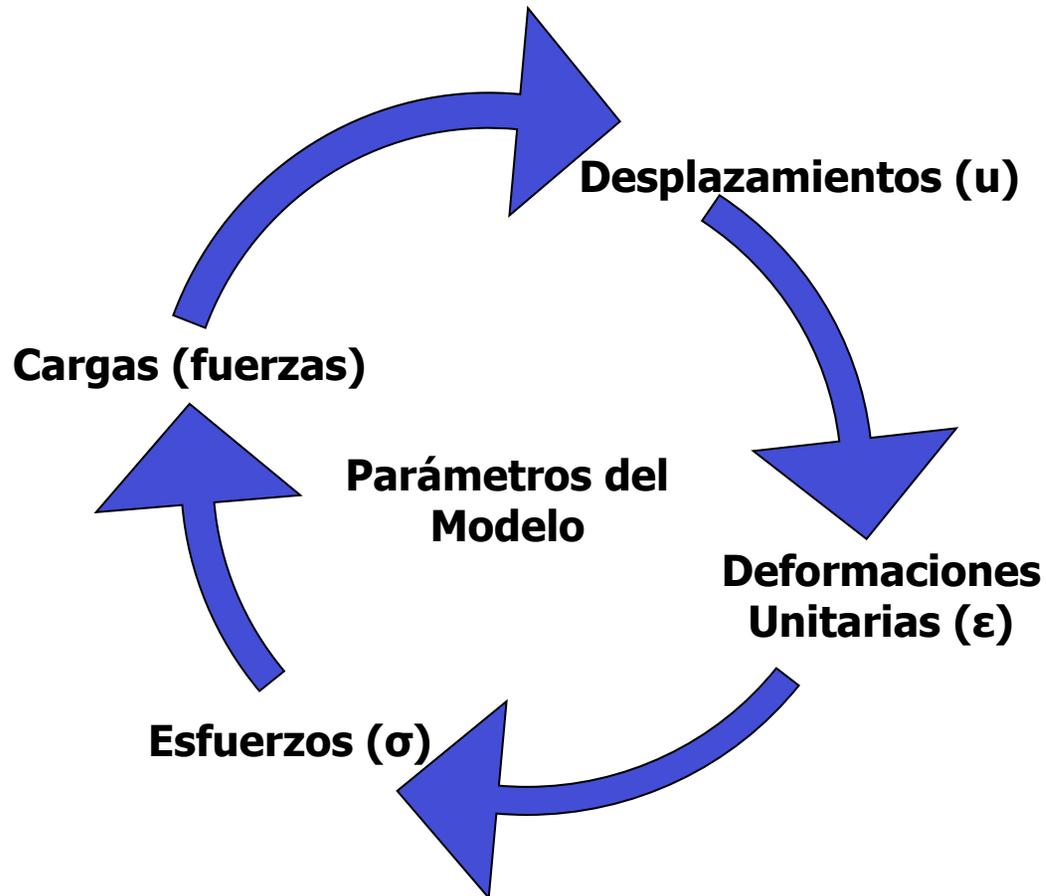
- Potencialmente se pueden resolver problemas 3D y no sufrir ninguna de las limitaciones de las que adolecen los métodos señalados anteriormente
- En el presente, debido a la velocidad de procesamiento de los ordenadores personales la mayoría de los problemas están limitados a 2D
- El Análisis Geotécnico empleando métodos numéricos debe ser realizado por personal cualificado y con experiencia en el tema
- El operador debe entender los principios de la geotecnia y, en particular, los modelos constitutivos que usa el software
- El análisis no lineal tiene algunas complicaciones importantes. Actualmente existen varios algoritmos para resolver los problemas no lineales. Algunos de estos son mas exactos que otros y dependen del tamaño del incremento. Existen aproximaciones en estos algoritmos y errores asociados con la discretización que solo el usuario experimentado puede resolver

Pasos a seguir

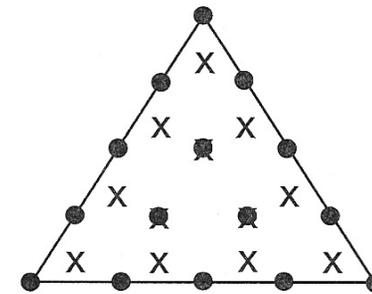
- Geometría
 - Ajustes Generales
 - Entrada de Geometría
 - Entrada de Condiciones de Frontera
 - Entrada de Propiedades de los Materiales
 - Generar Malla
- Condiciones Iniciales
 - Generar Presiones de Poros
 - Configuración de Geometría Inicial
 - Generar Tensiones Iniciales
- Cálculo
 - Fase por fase según la construcción
- Revisión de los Resultados



Lo que hace el programa

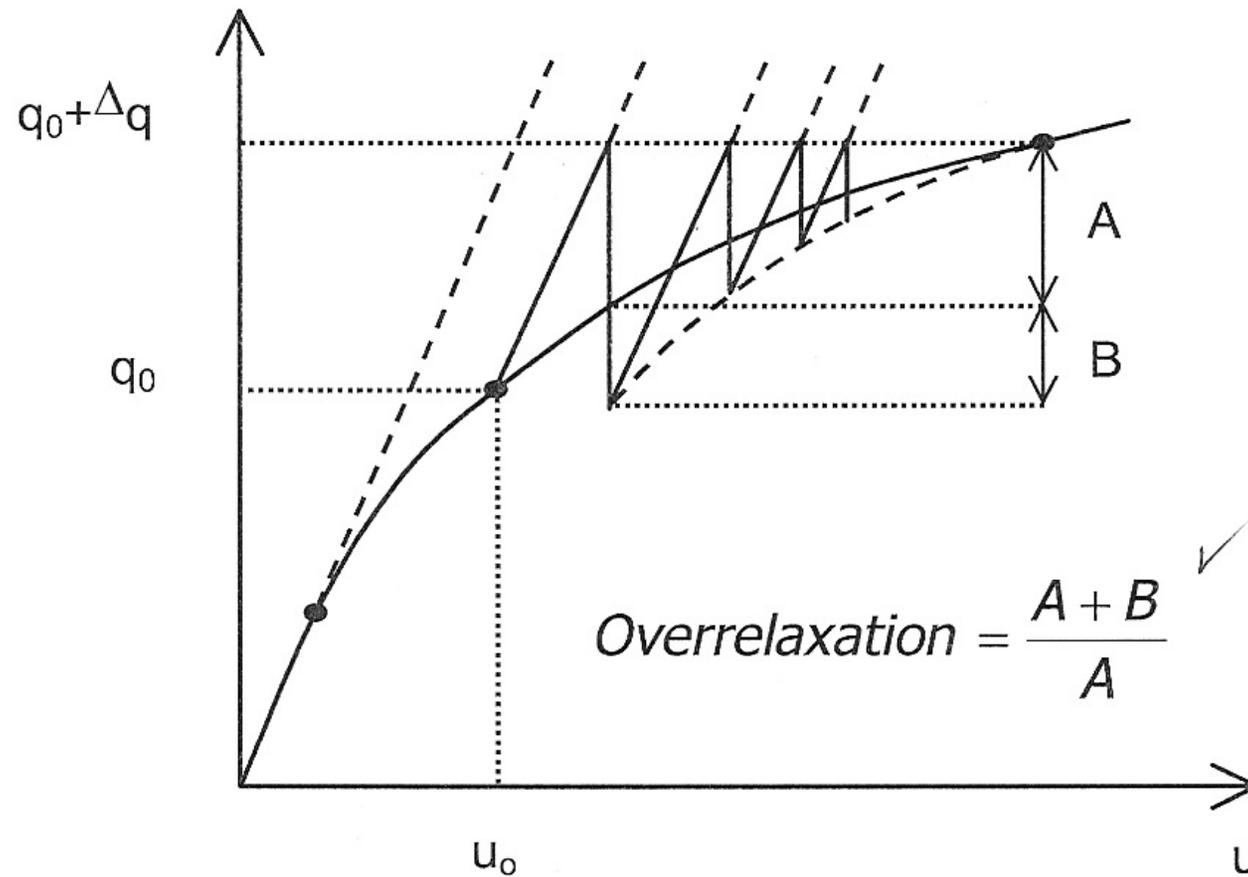


6-node triangle



15-node triangle

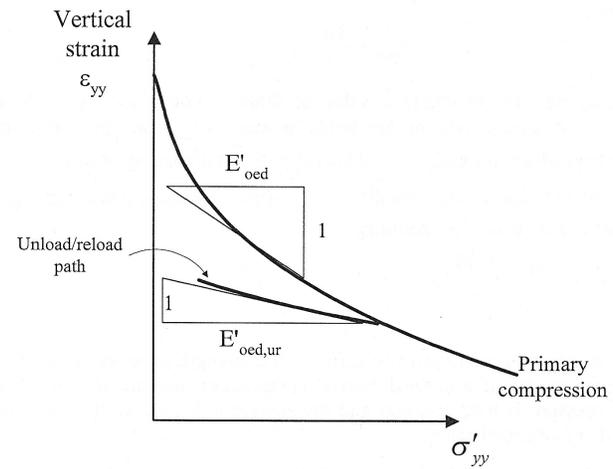
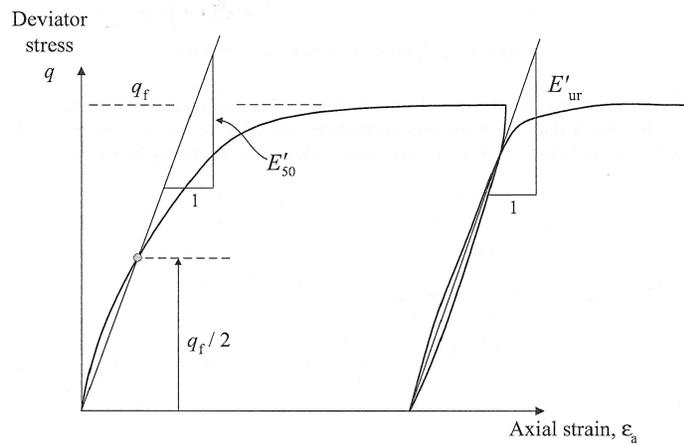
Estrategia de Solución



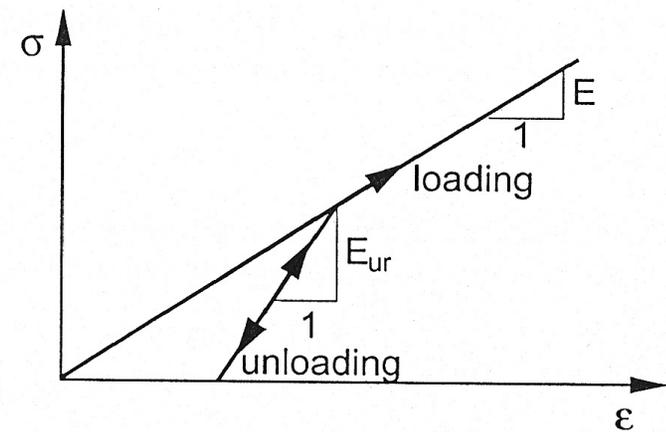
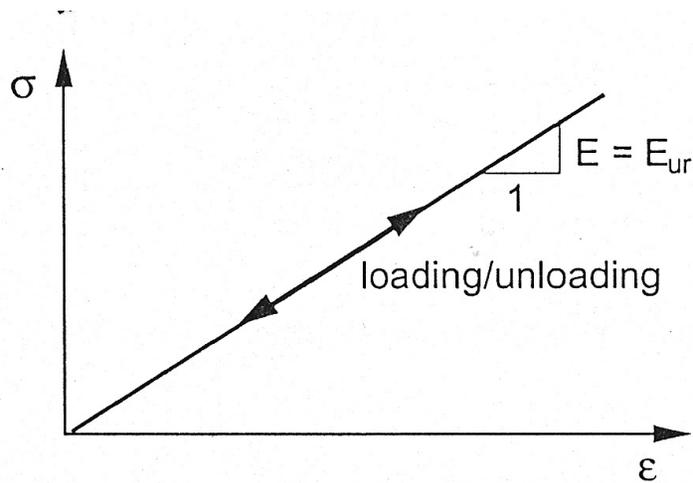
Modelos Constitutivos

- Un suelo está compuesto por materiales complejos y su comportamiento, tal y como observamos en el laboratorio o in situ, depende de un gran número de variables.
- La mas importante es su composición (tamaño de las partículas y contenido de arcilla), luego su historia de cargas (grado de consolidación, estado de tensiones, etc.) y luego sus condiciones de drenaje.

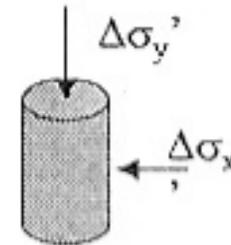
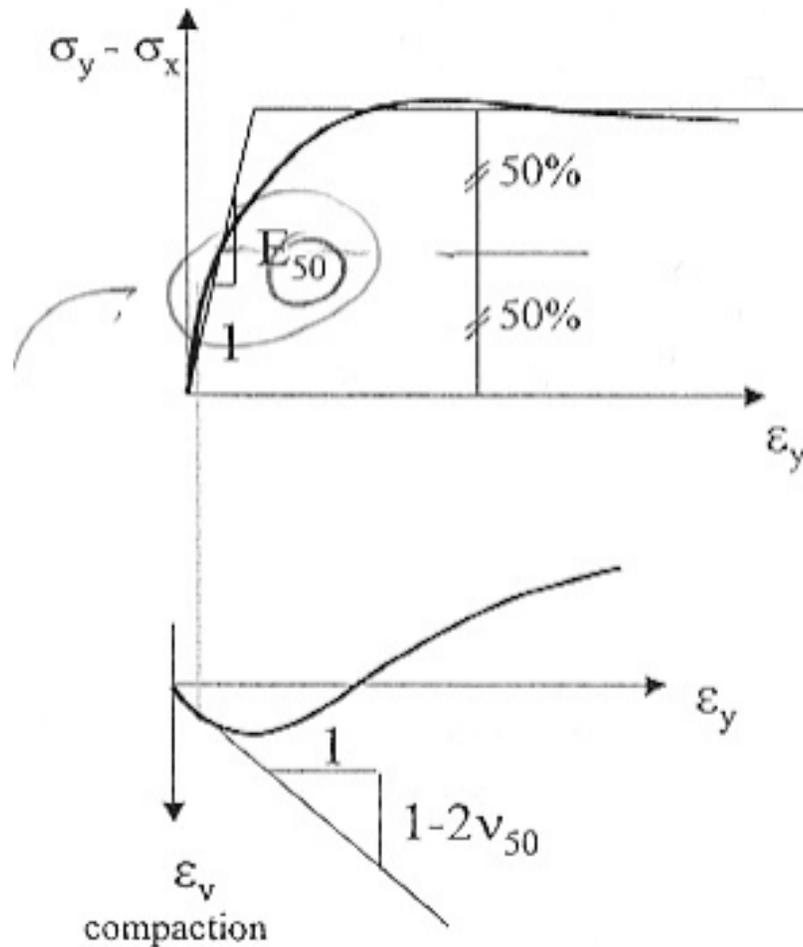
Corte y Compresión del Terreno



Idealizaciones



Mohr - Coulomb

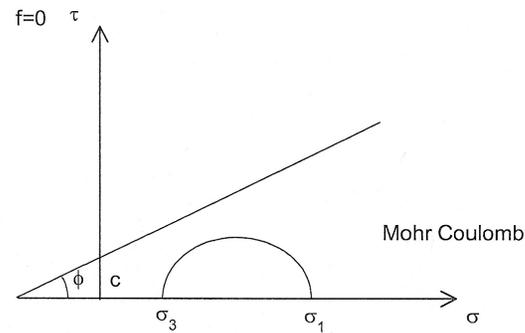


A bi-linear stress-strain relationship is assumed:

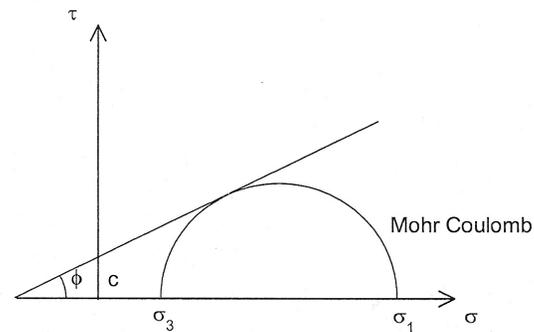
Constant average stiffness:

$E = E_{50}$ and $\nu = \nu_{50}$ must be given for each material applied.

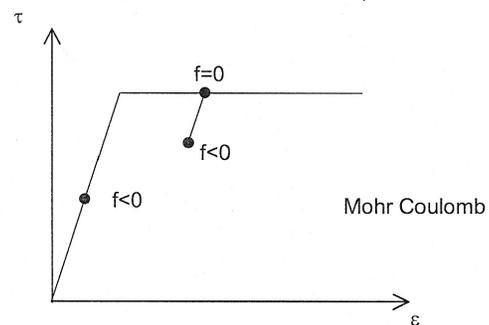
Aplicación del Algoritmo MC



Elastic point
 $f < 0$
 $\dot{\varepsilon}^p = 0$

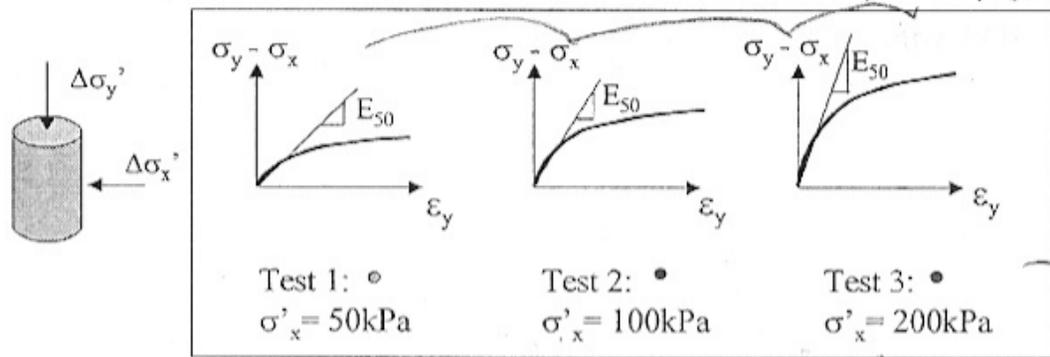


Plastic point
 $f = 0$
 $\dot{\varepsilon}^p \neq 0$



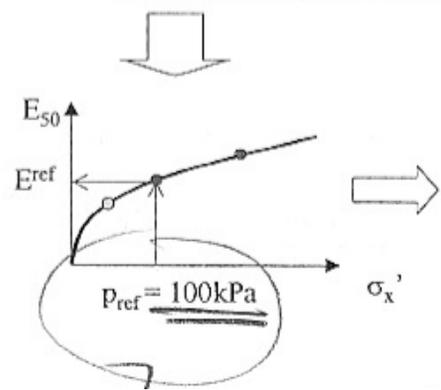
Parámetros del Modelo

Stiffness of sand, drained triaxial testing:



VARYING STIFFNESS IN RELATION TO STRESS RANGE (POTN)

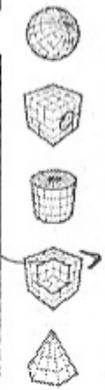
STRESS DEPENDENCY



SOFTWARE

$$E_{50} = E_{ref} \sqrt{\frac{\sigma_x'}{P_{ref}}}$$

Loose sands: $E_{ref} = 15\text{ MPa}$
 Dense sands: $E_{ref} = 50\text{ MPa}$



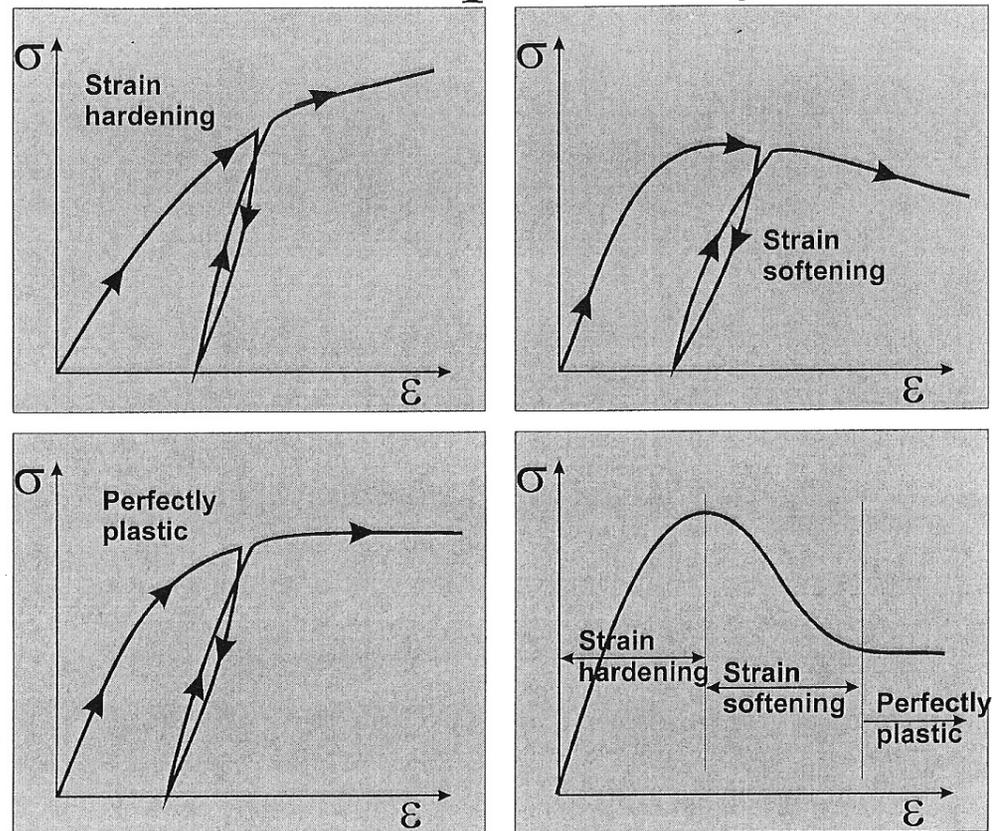
APPROXIMATION

Consideraciones con respecto al Modelo Mohr-Coulomb

- Mohr-Coulomb
 - Bilinearidad (E y Φ constantes)
 - Dilatancia infinita
 - Isotropía
 - Se deforma elásticamente antes de llegar al estado límite
 - Una mejor aproximación: Hardening Soil (arenas) o Cam Clay (Arcilla)

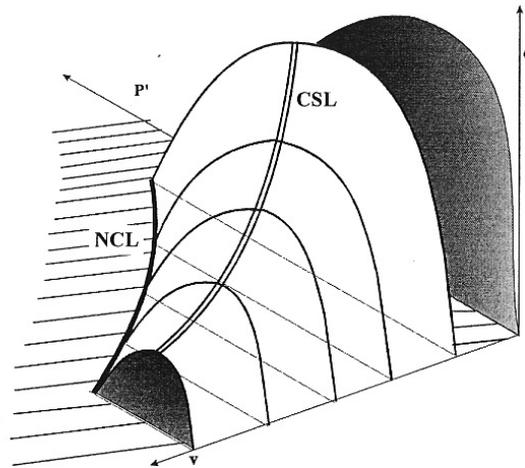
Modelos Avanzados

Elasto - plasticity



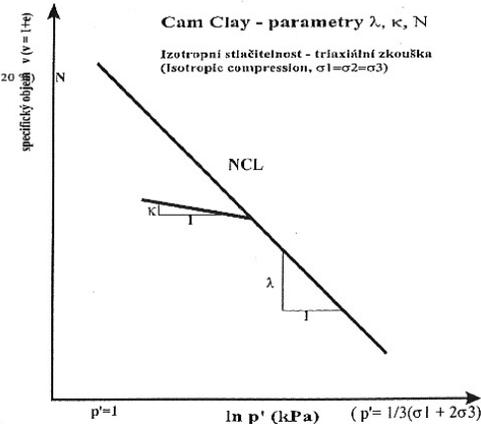
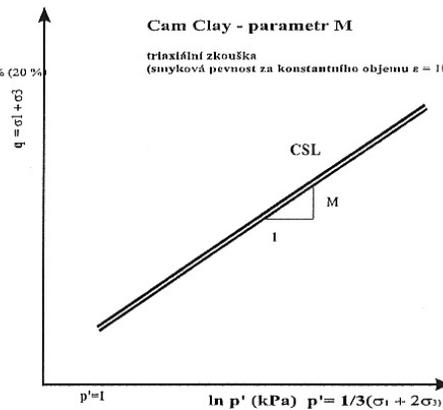
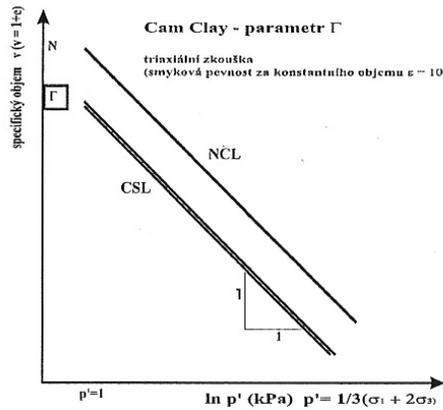
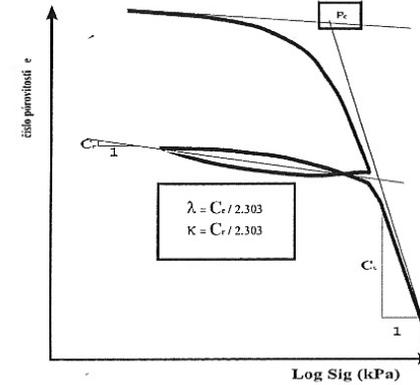
Cam-Clay

Cam-Clay

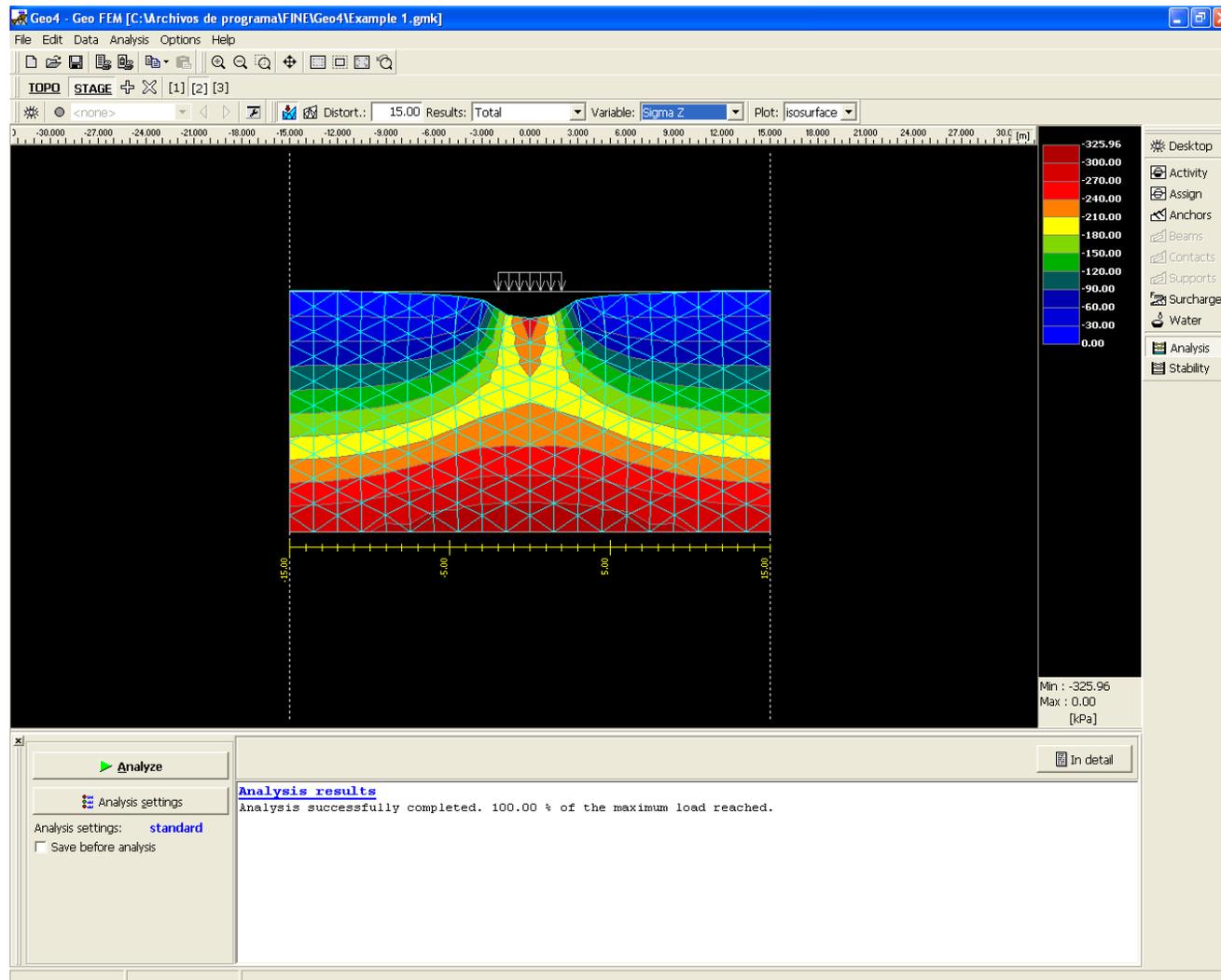


Cam Clay - parametry λ , κ , P_c

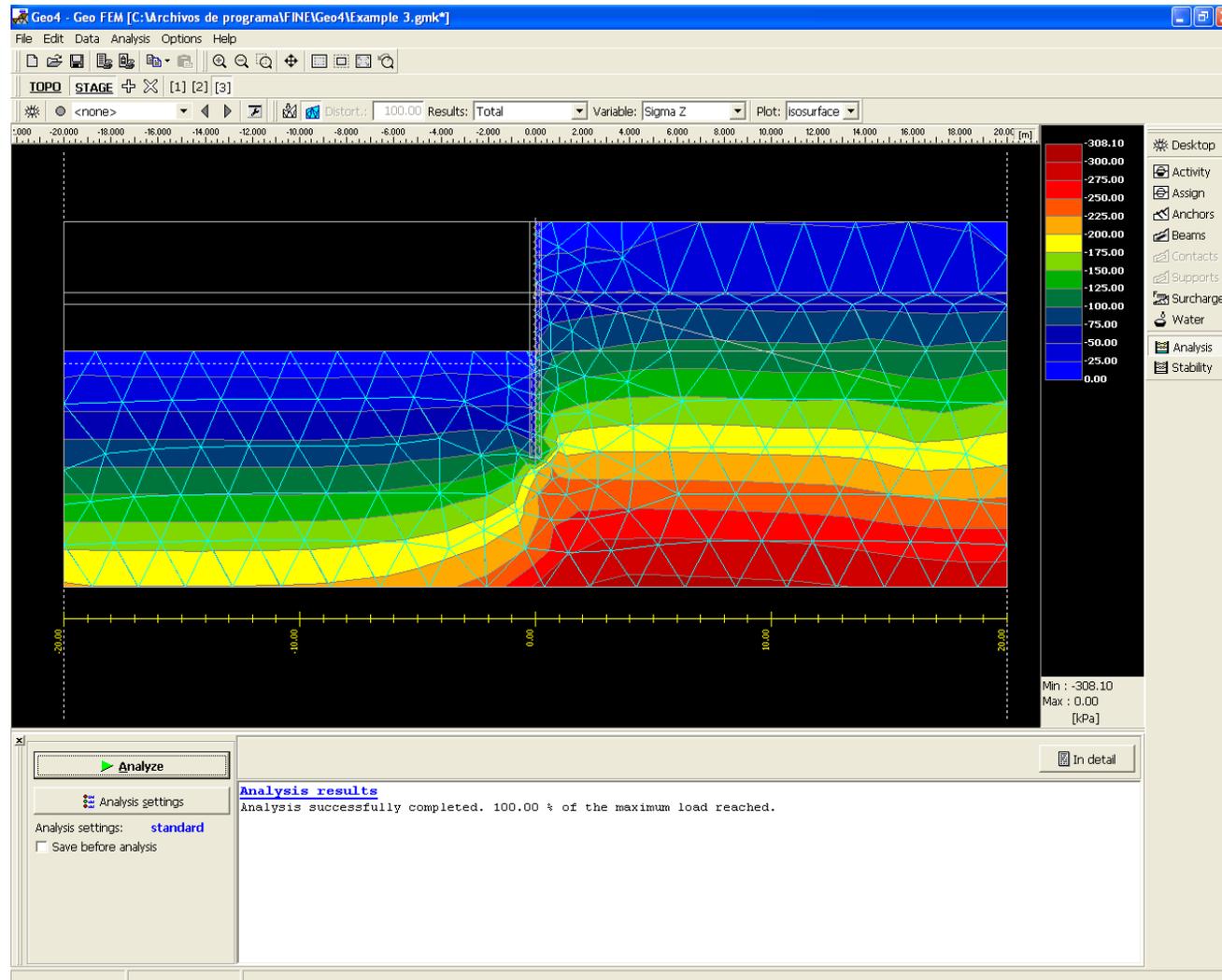
Zkouška stlačitelnosti - oedometrická zkouška
(One dimensional consolidation test)



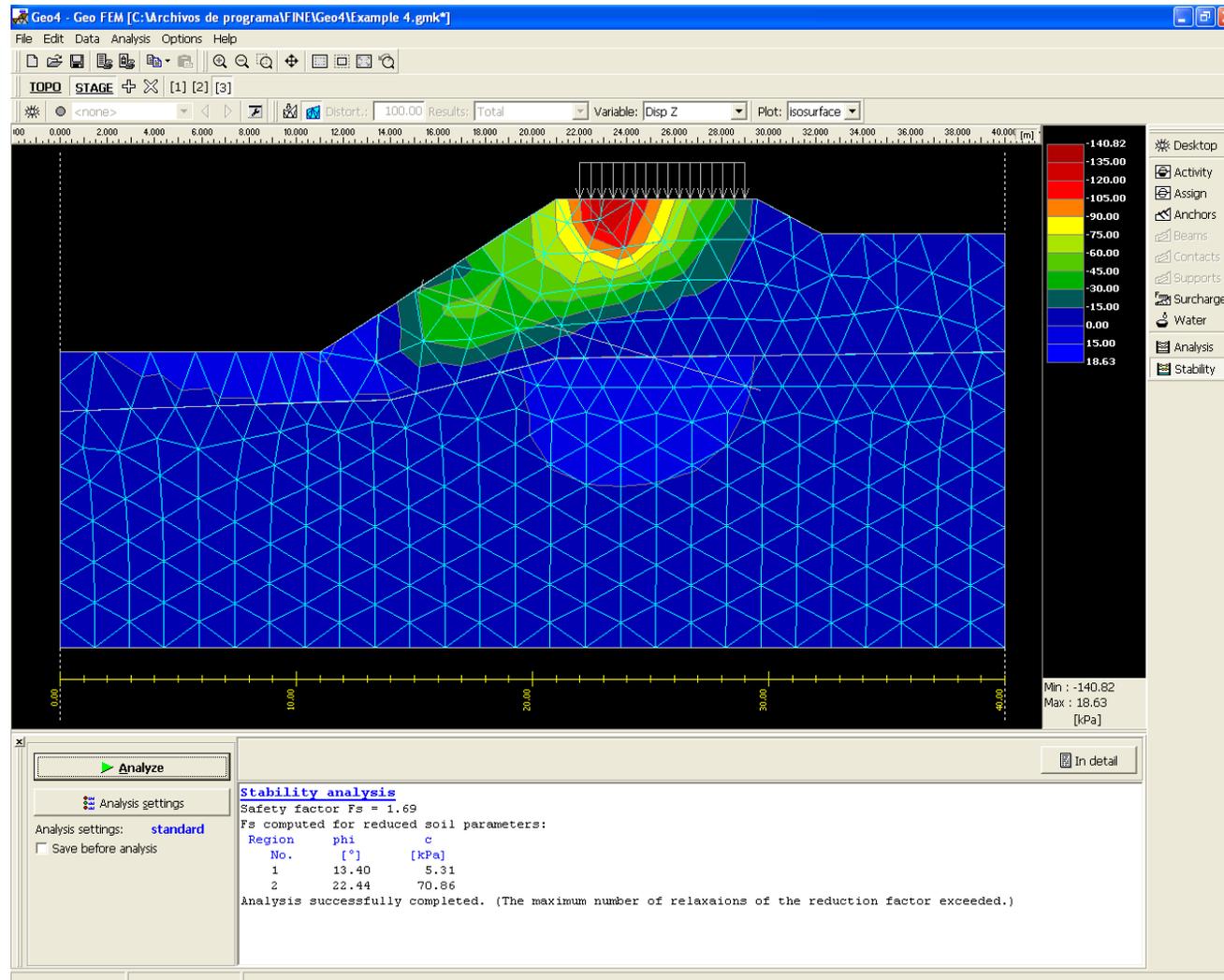
Ejemplo No. 1



Ejemplo No. 3



Ejemplo No. 4



Errores comunes

- Errores de discretización – malla
 - Datos incorrectos
 - Dimensiones incorrectas
 - Identificación equivocada de las características
 - Errores en las condiciones de frontera
 - Selección del tipo de elementos
 - Densidad y refinamiento de la malla
- Errores en el modelado de miembros estructurales
- Problemas de construcción
 - Cambios de geometría
 - Etapas
 - “Nacimiento y muerte” de elementos
- Excavaciones bajo el nivel freático
- Inconsistencia de los parámetros de entrada

Recomendaciones

- Elija un modelo constitutivo que conozca bien desde el punto de vista teórico y tenga experiencia práctica en su aplicación
- Realice varios análisis simples haciendo un estudio paramétrico. Esto es mejor que hacer un solo análisis sofisticado con gran incertidumbre en los parámetros
- Si tiene tiempo y presupuesto, haga un análisis simple (entender ordenes de magnitud) y luego un análisis más sofisticado

Limitaciones y Peligros del Análisis Numérico

- El análisis numérico es una herramienta poderosa y versátil para investigar la influencia de varios factores y parámetros para un problema de condiciones de frontera
- Con las capacidad moderna de los ordenadores para realizar gráficos sofisticados y en colores los resultados son cuando menos fascinantes
- Sin embargo, uno SIEMPRE tiene que acordarse de que la solución a cualquier problema está condicionada por la entrada de datos y no por el conocimiento inherente a la comprensión física del problema
- Por lo tanto, el análisis numérico es muy útil para mejorar nuestra comprensión del problema físico que ya ha sido identificado
- Preferiblemente, antes de aplicar análisis numérico, el problema debe ser entendido y haberse estudiado con otros métodos de análisis

Otras consideraciones

- El análisis numérico puede ser utilizado para probar hipótesis y mecanismos de falla
- Es una excelente herramienta para aprender sobre los fenómenos físicos y el comportamiento del terreno/estructura
- Existe la posibilidad de cometer GRAVES errores cuando estamos trabajando con materiales "strain-softening". En este caso el análisis numérico concentrará deformaciones muy grandes en bandas estrechas, estando el resultado muy afectado por las condiciones de frontera y la malla
- Otro fenómeno complejo de modelar es el análisis no drenado de materiales (volumen constante)

Consideración Final

- En resumen, se recomienda utilizar el análisis numérico siempre y cuando EL ANALISTA:
 - Evalúe racionalmente los resultados, los contraste con la experiencia práctica y los principios básicos de ingeniería
 - Calibre, específicamente, el modelo para resolver el problema en cuestión y cumpla con la normativa vigente

Referencias

- Burland, 1987, The teaching of Soil Mechanics - a personal view, Proc. 9th European Conf. SMFE, Dublin, 3, 1427-1447
- Potts, 1997, Apuntes de Clase, Imperial College, Londres
- Potts and Zdravkovic, 1999, Finite Element Analysis in Geotechnical Engineering, Vol I y II, Thomas Telford, Londres
- Varios Profesores, 2003, Apuntes del Curso, Computational Geotechnics, Universidad Nacional de Praga
- Taylor, 1948, Fundamentals of Soil Mechanics, Wiley, Nueva York
- Terzaghi, 1944, Mecánica Teórica de Suelos, ACME Agency, Buenos Aires