

La simulación numérica y el ensayo presiométrico

Marcos Arroyo
Universidad Politécnica de Cataluña
Departamento de Ingeniería del Terreno



JORNADA TÉCNICA
El ensayo presiométrico en el proyecto geotécnico
Barcelona, Aula PaymaCotas
15 Septiembre 2009

INDICE

- INTRODUCCIÓN
- ASPECTOS TEÓRICOS
 - LA SIMULACIÓN AL SERVICIO DE LA PRESIOMETRÍA
 - LA PRESIOMETRÍA AL SERVICIO DE LA SIMULACIÓN
- UN CASO PRÁCTICO
- CONCLUSIONES

INTRODUCCIÓN

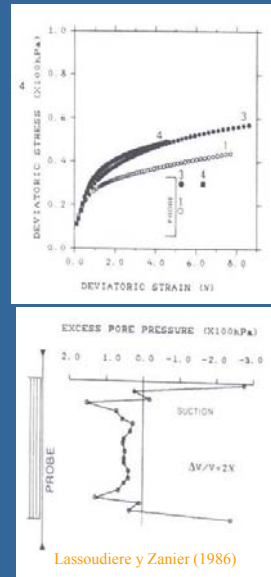
- 1955 Mènard inventa el presiómetro
- 1962-65 Método Mènard de cálculo de cimentaciones
- 1961 Gibson y Anderson: método analítico para Cu
- 1970 -75 Presiómetros autoperforadores
- 1960-1962 Primeros modelos de EF en Berkeley (Clough y otros)
- 1971 O.C. Zienkiewicz 'Finite Element method in Engineering Science'
- 1970 -75 Intel patenta el microprocesador

LA SIMULACIÓN AL SERVICIO DE LA PRESIOMETRÍA

- Objetivo general: examen de las hipótesis básicas de la interpretación analítica y/o empírica
 - Efecto de escala: cavidad cilíndrica infinita vs longitud finita
 - Condiciones de drenaje: ¿drenado, no drenado, intermedio?
 - Efecto de la instalación: pre-perforación, hınca,...

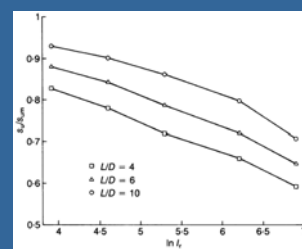
Efecto de escala (1)

- Esbeltez (L/D) presiómetros
 - 2-7 autoperforados
 - 4-10 hincados
 - 5-7 pre-perforados
- Resistencia mayor, drenaje más rápido
- Efecto mayor
 - en medidas de volumen que en medidas de deformación radial
 - en resistencia que en rigidez inicial

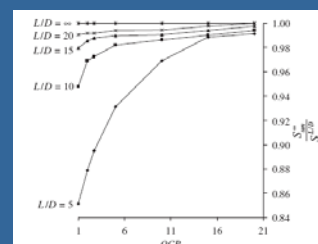


Efecto de escala (2)

- Resistencia a corte sin drenaje (S_u) (Gibson y Anderson)
- Efecto del modelo constitutivo
 - Elasto-plástico sin endurecimiento (Tresca)
 $I_r = G/s_u \approx 50 - 500$
 - Elasto-plástico con endurecimiento (Cam-clay)



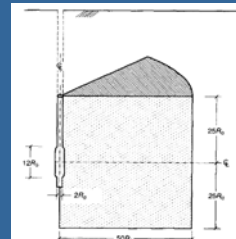
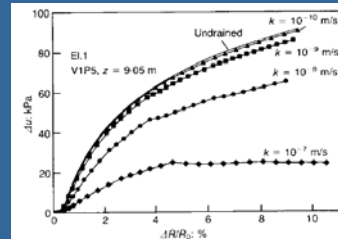
Carter y Housby (1990)



Yu y otros (2005)

Condiciones de drenaje (1)

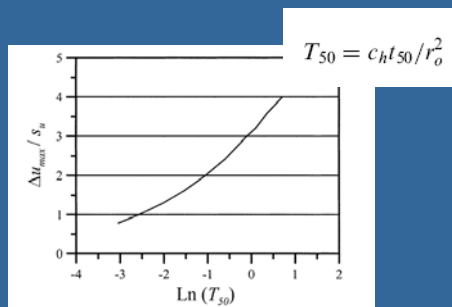
- Drenado / no drenado: flujo ‘más rápido /lento’ que carga
- Criterio no drenado
 - Deformación controlada
 - 1% / min si $k < 10^{-9}$ m/s
 - No depende del modelo constitutivo
 - Carga controlada
 - 20 kPa / min si $k < 10^{-7}$ m/s
 - Depende de la rigidez y modelo (?)
- Efecto supuesto drenaje incorrecto
 - Sobreestimación S_u
 - Subestimación rozamiento



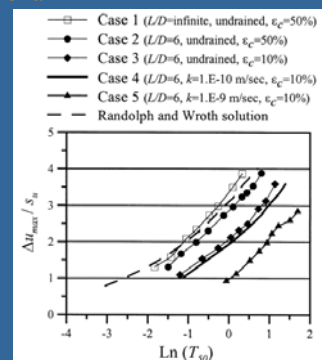
Fioravante y otros (1995)

Condiciones de drenaje (2)

- Ensayo de consolidación (Tresca)
 - Curva normalizada supone 50% deformación
 - Deformación real $\approx 10\%$
 - Subestimación c_h por método convencional



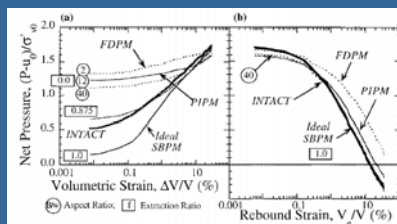
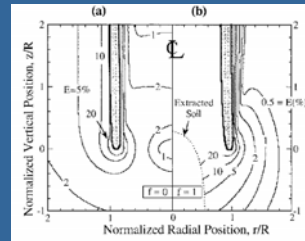
Clarke, Randolph & Wroth (1995)



Jiang y otros (2003)

Efecto de la instalación

- ‘Strain path method’
- Efecto en tension horizontal
 - Hinca: aumenta
 - Excavado: disminuye
- Efecto en C_u convencional
 - Hinca: disminuye
 - Excavado: aumenta
- Descarga robusta



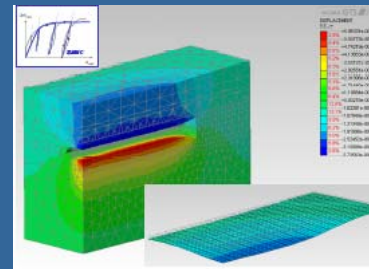
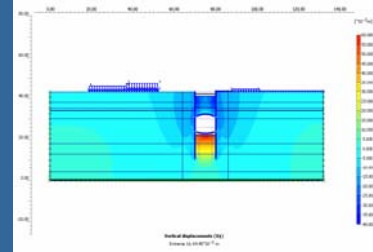
Aubeny y otros, JGGE ASCE (2000)

INDICE

- INTRODUCCIÓN
- ASPECTOS TEÓRICOS
 - LA SIMULACIÓN AL SERVICIO DE LA PRESIOMETRÍA
 - LA PRESIOMETRÍA AL SERVICIO DE LA SIMULACIÓN
- UN CASO PRÁCTICO
- CONCLUSIONES

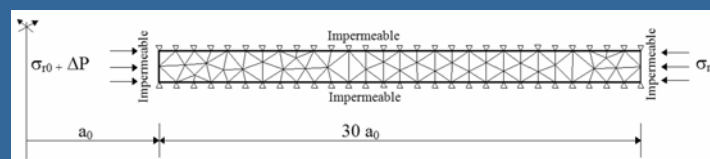
LA PRESIOMETRÍA AL SERVICIO DE LA SIMULACIÓN (1)

- Rigidez / resistencia dependen de...
 - Estado (nivel de tensión, densidad, cementación, saturación...)
 - Modo de carga (compresión, extensión, corte...)
- Simulación realista : modelos constitutivos realistas
- Problemas
 - Disponibilidad: ¿qué modelo?
 - Calibración: ¿qué valores?



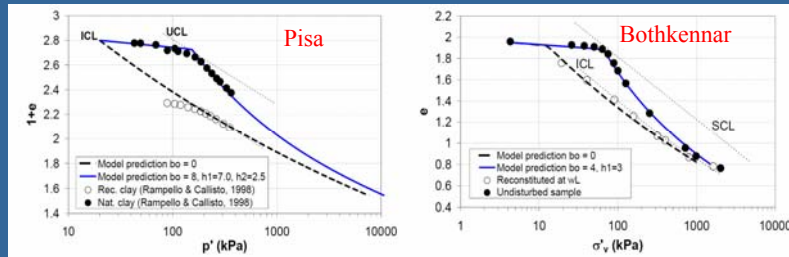
LA PRESIOMETRÍA AL SERVICIO DE LA SIMULACIÓN (2)

- Presiómetro
 - No es un ensayo elemental (triaxial, edómetro...)
 - Es una prueba de carga (barata)
- Problema directo
 - Disponibilidad: ¿qué modelo?
 - un modelo “bueno” debe simular las pruebas de carga a partir de datos previos suficientes (sin ajustes)
- Problema inverso
 - Calibración: ¿qué valores?
 - Análisis de la prueba de carga para ajustar parámetros



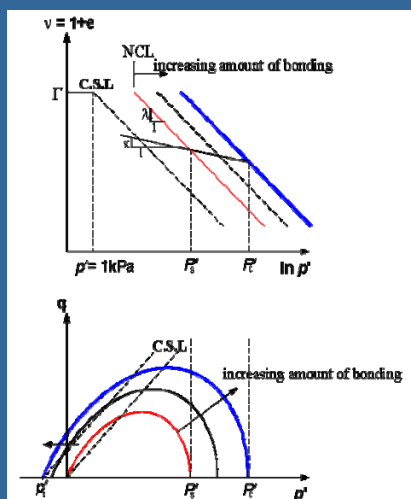
Gonzalez, Arroyo & Gens NUMOG X (2007)

Ejemplo: un problema geotécnico



- Cuando se toman muestras buenas la arcilla parece más rígida, pero también más frágil ¿cómo aprovecharlo?

Ejemplo: modelo suelo cementado



Gens y Nova (1993)

Función de fluencia

$$f = \left(\frac{q}{M_\theta(p' + p_t)} \right)^n + \frac{1}{\ln r} \ln \frac{(p' + p_t)}{P'_c}$$

$$P'_c = P'_s(1+b)$$

$$p'_t = P'_s(\alpha b)$$

Endurecimiento por deformación

$$\frac{dP'_s}{P'_s} = \frac{1}{\lambda^* - \kappa^*} [d\varepsilon_v^p + \alpha d\varepsilon_s^p]$$

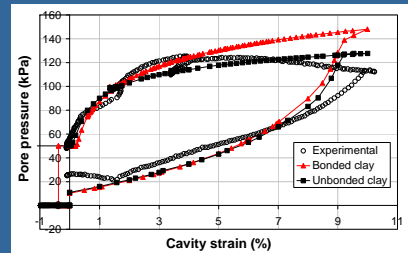
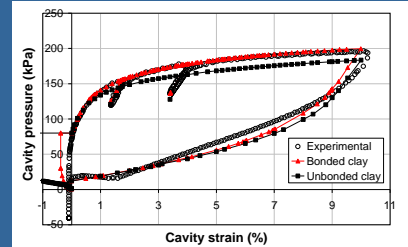
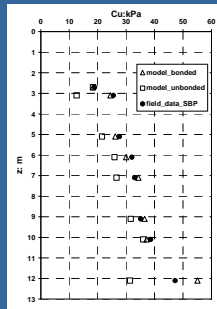
Cementación frágil:

$$b = b_0 e^{-(h-h_0)}$$

$$dh = h_1 |d\varepsilon_v^p| + h_2 |d\varepsilon_s^p|$$

Problema directo: validación

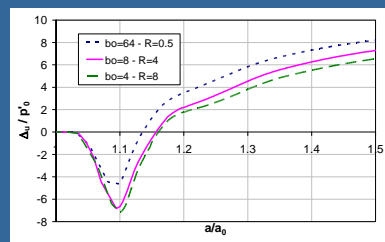
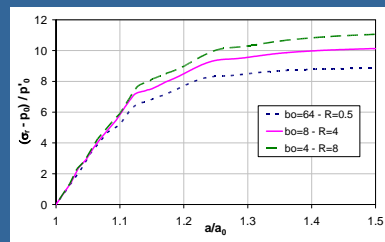
- Arcilla de Bothkennar
- Ensayos SBPM
- Simulación a partir de laboratorio



Arroyo y otros ISC'3-Taipei (2008)

Problema inverso: ajuste (1)

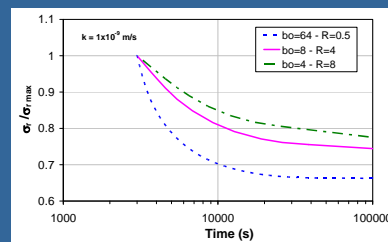
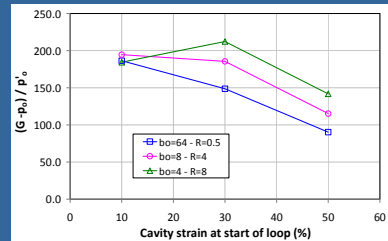
- Planteamiento general
 - Material remoldeado: laboratorio
 - Material intacto: “in situ”
- Estado in situ
 - Tensión
 - Densidad
 - Cementación
- Problema:
 - Ambigüedad en la curva de carga
 - No distingue densidad y cementación



Gonzalez, Arroyo y Gens (2008)

Problema inverso: ajuste (2)

- Solución:
 - Usar ciclos de recarga
 - Usar curva de consolidación
- Lecciones generales
 - Si se buscan 2 números:
 - curva de carga OK
 - No imposibles (K y G)
 - Si se buscan ≥ 2 números
 - Más medidas (presión de poro)
 - Programas de carga más complejos (ciclos, disipación...)
 - Cuidado con la “fuerza bruta” (optimización numérica)

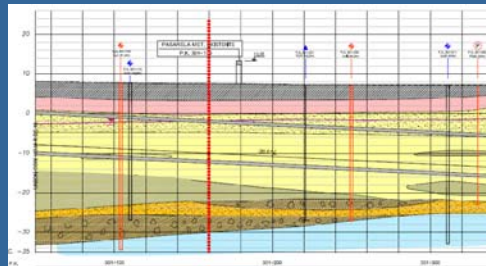


Gonzalez, Arroyo y Gens (2008)

INDICE

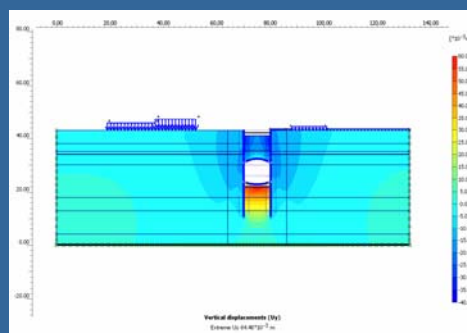
- INTRODUCCIÓN
- ASPECTOS TEÓRICOS
 - LA SIMULACIÓN AL SERVICIO DE LA PRESIOMETRÍA
 - LA PRESIOMETRÍA AL SERVICIO DE LA SIMULACIÓN
- UN CASO PRÁCTICO
- CONCLUSIONES

Excavación en medio urbano



- Zona de influencia deltáica
- Excavación hasta 20 m de profundidad
- Abundante edificación de altura a 10 m excavación

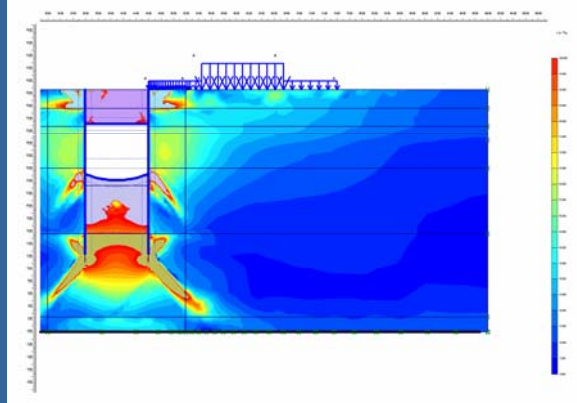
El riesgo de afección a terceros



- Excavación → movimientos
- Susceptible de análisis
 - Primer análisis (RIDO+sondeos+ SPT+CPT): riesgo elevado
 - Reanálisis: MEF + cross-hole + **presimetría**

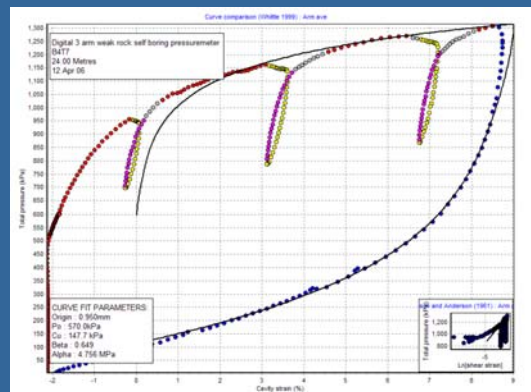
El rango importa

- Deformaciones de corte
 - Gris > 0,1%
 - Colores > 0,01%
- Rango de medida
 - Presiómetro con medida radial: entre 0,01% y 0,1%
 - Columna resonante: menor de 0,01%
 - Triaxial CIU (sin medidas sobre probeta): mayor de 0,1%



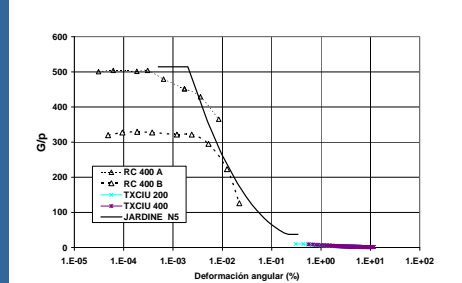
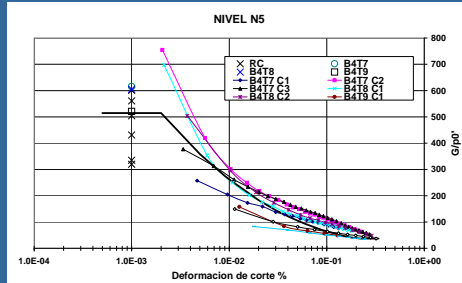
Caracterización del terreno (1)

- Presiómetros
 - Con medida radial
 - Autoperforante
 - Con medida de presión de poro



Ensayo: Cambridge In Situ

Caracterización del terreno (2)



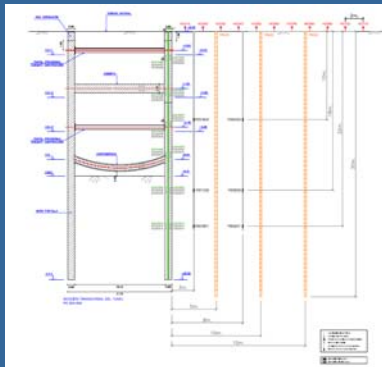
- Elasticidad no lineal, plasticidad sin endurecimiento (R. Jardine, 1986)
- Calibración no drenado :empírica basado en la interpretación clásica

$$\frac{G_{sec}}{p'} = A + B \cos \left[\alpha \left(\log_{10} \left(\frac{E_d}{\sqrt{3}C} \right) \right)^r \right]$$

$$\frac{K_{sec}}{p'} = R + S \cos \left[\delta \left(\log_{10} \left(\frac{|\epsilon_v|}{T} \right) \right)^\eta \right]$$

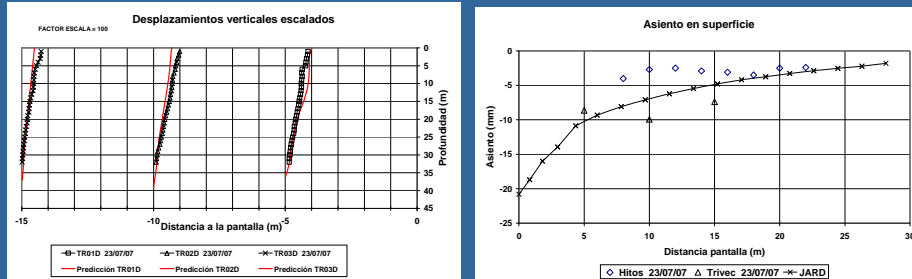
$$\frac{\epsilon_c}{\epsilon_s} = 1,2 + 0,8 \log_{10} \frac{\epsilon_c}{10^{-5}}$$

Método observacional (1)



- Instrumentación extensiva en 2 secciones “de prueba”

Método observacional (2)



- Predicción y medida a CME
- Asiento bien, movimiento horizontal algo sobreestimado
- Riesgo estimado: baja a nivel aceptable

Conclusiones: simulación y presiometría

- Encuentro tardío pero fructífero
- La simulación muestra límites del ensayo
 - Importancia de la instalación
 - Importancia de la ejecución
 - Importancia de la especificación
- La presiometría da alas a la simulación
 - Precisión
 - Variedad de posibilidades
 - Prueba de carga a buen precio

Agradecimientos

- UPC: Nubia González, Joanna Butlanska, Antonio Gens, Alessandra Di Mariano
- MEC (2005-05801) “Interpretación avanzada de ensayos geotécnicos in situ”
- ADIF
- Cambridge In Situ
-y al paciente público