

Experiencia en presiometría para el cálculo de cimentaciones en los suelos detríticos de Madrid

J.I. Ortega
A. Berenguer
R.C. Pugh



Objetivos de la presentación

1. Presentar algunas de las ventajas de incluir el ensayo presiométrico como una herramienta *habitual* en el reconocimiento del terreno
2. Comentar un caso práctico en el que se ha utilizado un modelo elástico no lineal para el análisis de los presiómetros y para la predicción de asentos de la cimentación
3. Establecer algunas conclusiones generales sobre los resultados obtenidos





Índice

1. El Elastmeter II, de Oyo Corporation
2. Presentación del caso práctico analizado
3. Fundamentos básicos del modelo elástico no lineal hiperbólico
4. Aplicación del modelo hiperbólico al análisis del ensayo presiométrico
5. Conclusiones



El Elastmeter II, de Oyo Corporation

El Elastmeter II de Oyo Corporation



- Presiómetro preperforado (PBP)
- Elemento dilatante tipo *monocélula*
- Presión radial máxima 20 Mpa
- Dimensiones de la camisa:
 - Longitud 520 mm
 - Diámetro 72 mm
- Equipado con transductores de presión y de desplazamiento

El Elastmeter II de Oyo Corporation



El Elastmeter II de Oyo Corporation

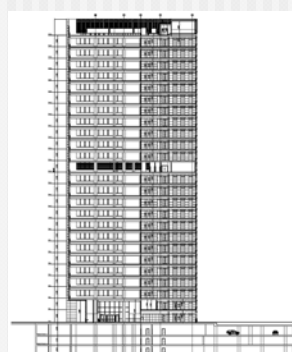
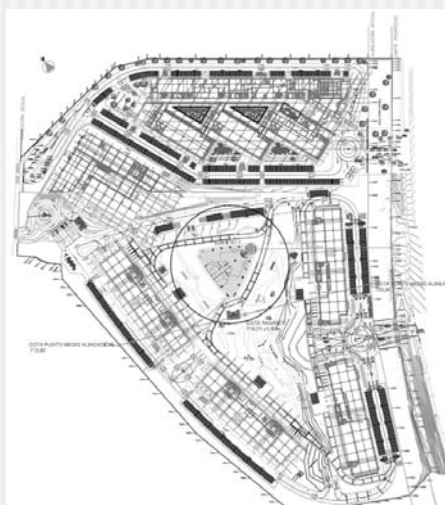


El Elastmeter II de Oyo Corporation



Presentación del caso práctico analizado

Caso práctico analizado: Parque Empresarial Adequa (Madrid)



25 plantas sobre rasante

4 plantas de sótano

Parcela: 10.000 m²



Caso práctico analizado: Parque Empresarial Adequa (Madrid)

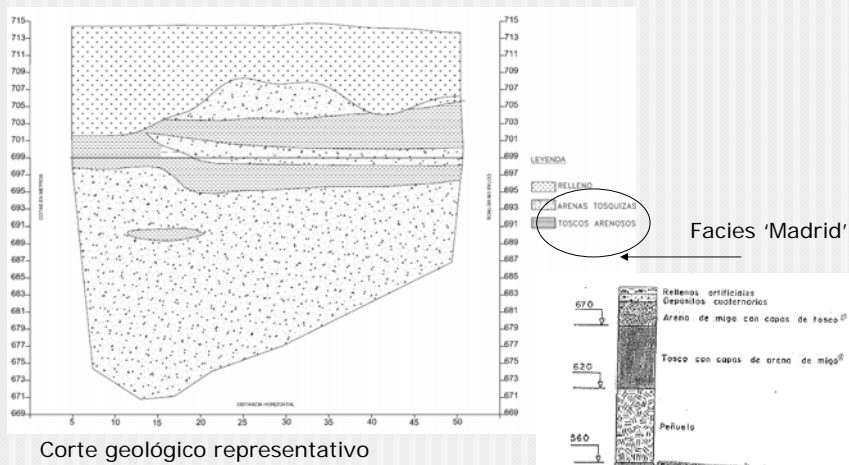
Campaña de reconocimiento geotécnico de campo realizada:

- 25 sondeos a testigo continuo entre 20 y 40 m de profundidad
- 9 ensayos de penetración dinámica continua DPSH entre 9 y 16 m de profundidad
- 8 ensayos presiométricos Elastmeter II (concentrados en tres de los sondeos)

Plan ensayos de laboratorio: →

ENSAYOS DE LABORATORIO	UNIDADES
APERTURA Y DESCRIPCIÓN DE MUESTRAS (ASTM-D2488)	35
DETERMINACIÓN DE LA HUMEDAD NATURAL (UNE 103.300/93)	19
DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD (UNE 103.301/94)	19
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO (UNE 103.101/95)	35
LÍMITES DE ATTERBERG (UNE 103.103/94 Y 103.104/94)	35
DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS RESISTENTES DE UNA MUESTRA DE SUELO EN EL EQUIPO TRIAXIAL 'UU', 'CU' Y 'CD' (UNE 103.402/98)	8
RESISTENCIA A COMPRESIÓN SIMPLE (UNE 103.400/93)	7
ENSAYO DEL HINCHAMIENTO LIBRE DE UN SUELO EN EDÓMETRO (UNE 103.601/96)	4
ENSAYO PARA CALCULAR LA PRESIÓN DE HINCHAMIENTO DE UN SUELO EN EDÓMETRO (UNE 103.602/96)	4
ANÁLISIS DE CONTENIDO EN SULFATOS (EHE 98 - ANEJO 5)	3
DETERMINACIÓN DEL GRADO DE ACIDEZ BALMANN-GULLY (EHE-98 ANEJO 5)	3

Caso práctico analizado: Parque Empresarial Adequa (Madrid)

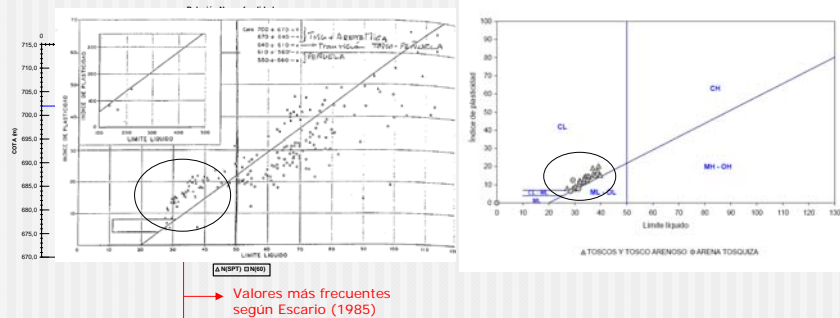


Caso práctico analizado: Parque Empresarial Adequa (Madrid)

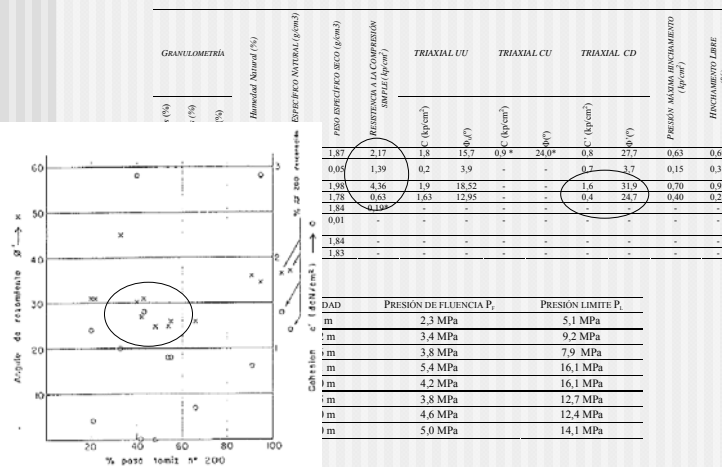
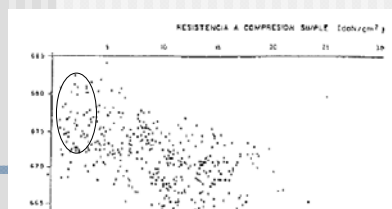
Facies 'Madrid'

Sustrato Mioceno, zonas de borde de la Cuenca Terciaria:

Sedimentos detríticos: arenas arcillosas-arcillas arenosas (*arenas tosquizas-toscas arenosas*). Unidad UM

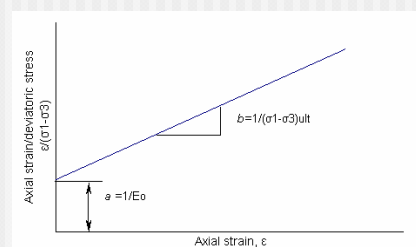
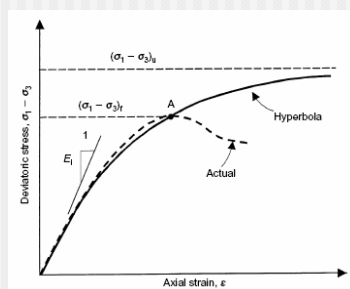


: Parque Empresarial Adequa (Madrid)



Fundamentos básicos del modelo elástico no lineal hiperbólico

Fundamentos básicos del modelo elástico no lineal hiperbólico



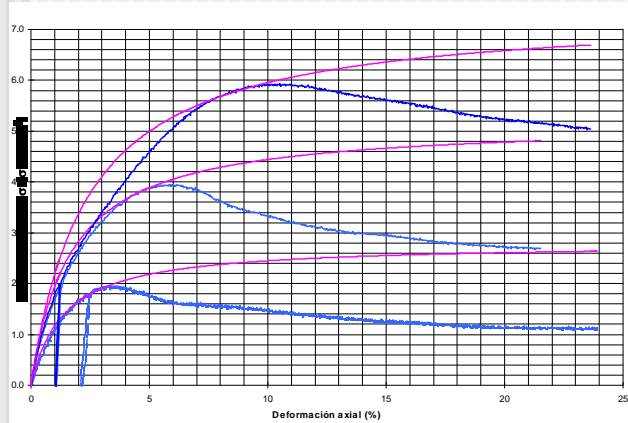
Duncan & Chang
(1970)

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{\epsilon}{a + b \cdot \epsilon}$$

$$R_f = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_f}{(\sigma_1 - \sigma_3)_u}$$

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{\epsilon}{\frac{1}{E_0} + \frac{\epsilon \cdot R_f}{(\sigma_1 - \sigma_3)_f}}$$

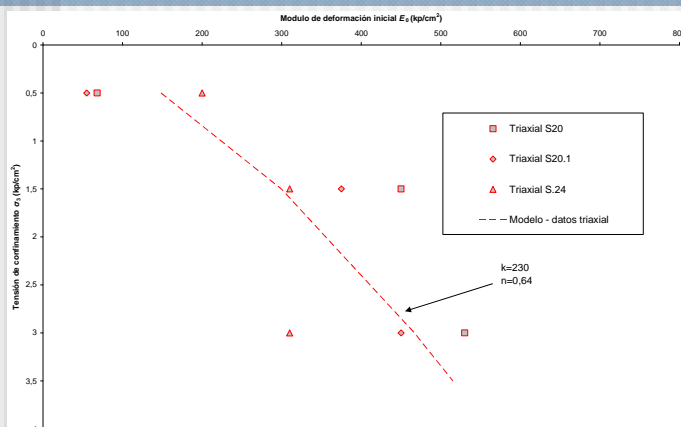
Fundamentos básicos del modelo elástico no lineal hiperbólico



Triaxial G08-2545
Sondeo S-24
Profundidad: 12m

Tensiones de confinamiento:
0,5 Kp/cm²
1,5 Kp/cm²
3,0 Kp/cm²

Fundamentos básicos del modelo elástico no lineal hiperbólico

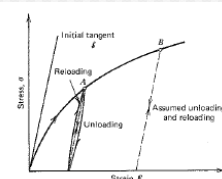


$$E_0 = k \cdot P_a \cdot \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right)^n$$

Jambu (1963)

$$E_{ur} = k_{ur} \cdot P_a \cdot \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right)^n$$

Duncan & Chang (1970)



Fundamentos básicos del modelo elástico no lineal hiperbólico

Ventajas:

- El modelo hiperbólico es un modelo *hipoelástico* (incrementalmente isótropo) muy utilizado en modelación numérica, y que permite una mejor aproximación al problema real que los modelos sencillos elásticos lineales, pero también, en muchas ocasiones, que los muy utilizados modelos elastoplásticos con el tramo elástico lineal (Potts et al., 2001)
- El modelo es sencillo conceptual y matemáticamente, y refleja la no-linealidad y la dependencia tensional de la respuesta del suelo. Asimismo, permite aproximar razonablemente bien los procesos de carga-descarga

(Algunas de sus) Desventajas:

- No permite reproducir fenómenos de dilatancia
- Cerca de rotura presenta algunos problemas conceptuales: no puede reproducir el *softening*; al ser incrementalmente isótropo las direcciones principales del tensor de incremento de tensión y del tensor de deformaciones siempre coinciden; un valor de ν constante implica que K_{VOL} disminuye proporcionalmente a E_{TAN}

Aplicación del modelo hiperbólico al análisis del ensayo presiométrico

Análisis del presiómetro con un modelo hiperbólico

$$\tau = \frac{\varepsilon_c}{\left[\frac{1}{2 \cdot G_0} \right] + \left[\frac{Rf}{(\sigma_1 - \sigma_3)_f} \right] \cdot \varepsilon_c}$$

Denby & Clough, 1980

$$\varepsilon_c = \frac{r - r_0}{r_0}$$

Deformación de la cavidad

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{\varepsilon}{\frac{1}{E_0} + \frac{\varepsilon \cdot Rf}{(\sigma_1 - \sigma_3)_f}}$$

$$\tau = \varepsilon_c \cdot \frac{dp}{d\varepsilon_c} \quad \text{Palmer, 1972}$$

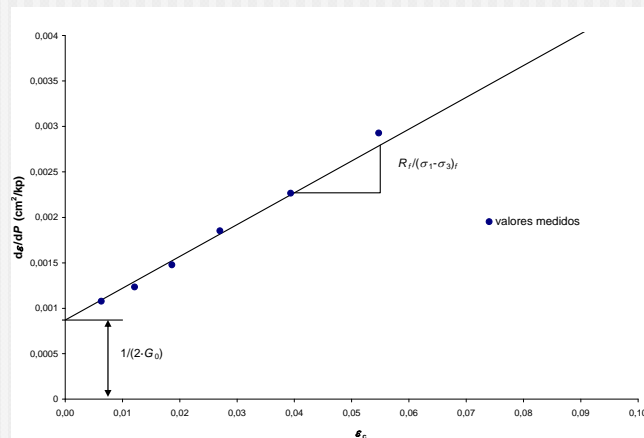
$$\frac{d\varepsilon_c}{dp} = \frac{1}{2 \cdot G_0} + \frac{Rf}{(\sigma_1 - \sigma_3)_f} \cdot \varepsilon_c$$

$$p = \sigma_h + \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_f}{Rf} \cdot \ln \left[1 + 2G_0 \cdot \frac{Rf}{(\sigma_1 - \sigma_3)_f} \cdot \varepsilon_c \right]$$

Curva de expansión de la cavidad

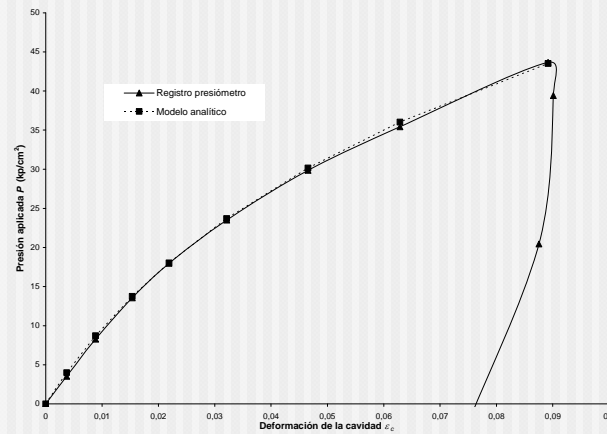
Análisis del presiómetro con un modelo hiperbólico

$$\frac{d\varepsilon_c}{dp} = \frac{1}{2 \cdot G_0} + \frac{Rf}{(\sigma_1 - \sigma_3)_f} \cdot \varepsilon_c$$



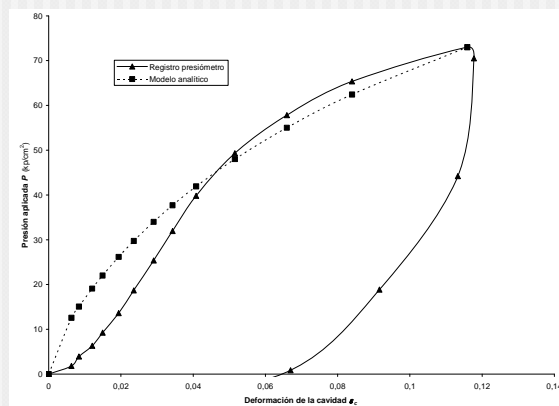
Análisis del presiómetro con un modelo hiperbólico

$$p = \sigma_b + \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_f}{Rf} \cdot \ln \left[1 + 2G_0 \cdot \frac{Rf}{(\sigma_1 - \sigma_3)_f} \cdot \varepsilon_c \right]$$



Análisis del presiómetro con un modelo hiperbólico

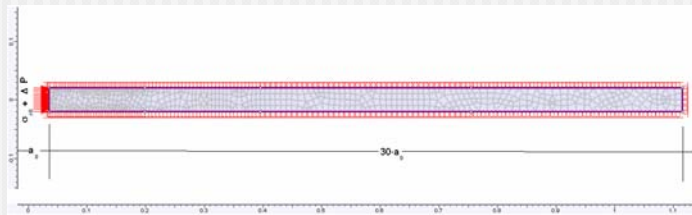
(...a veces el encaje no es tan bueno...)



Simulación numérica del ensayo presiométrico

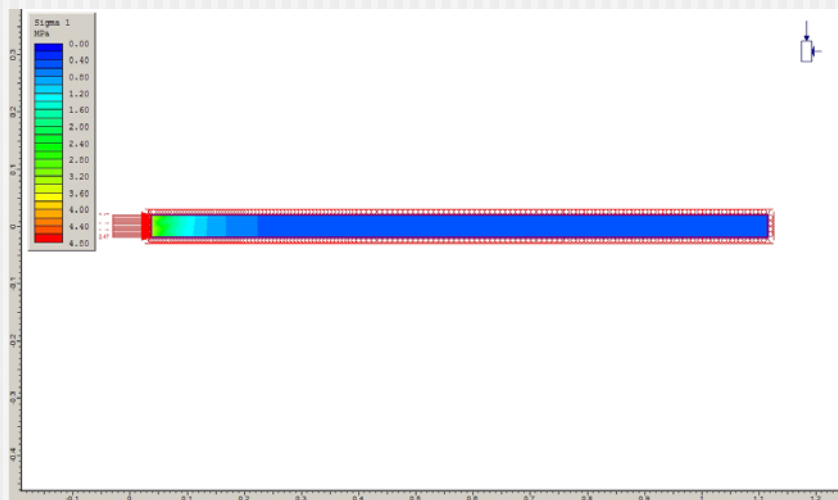
Reproducción del estado tensional del suelo en las distintas fases del ensayo con tensión controlada

1. Fase inicial: Estado tensional in situ
2. Fases sucesivas: Reproducción de distintos incrementos de presión radial (ΔP) hasta alcanzar presión máxima del ensayo analizado



- Geometría axisimétrica; eje de simetría=eje de ordenadas
- Radio externo = 30 veces radio cavidad (a_0)
- Malla de elementos cuadriláteros de 8 nodos

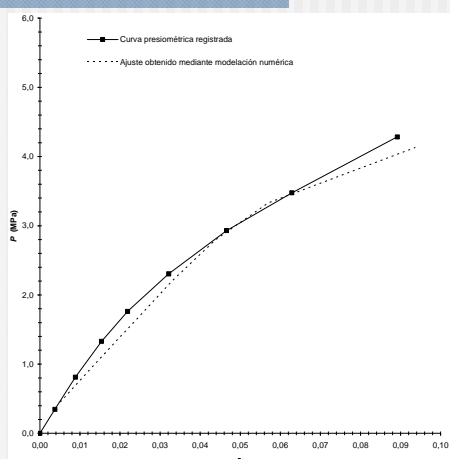
Simulación numérica del ensayo presiométrico



Simulación numérica del ensayo presiométrico

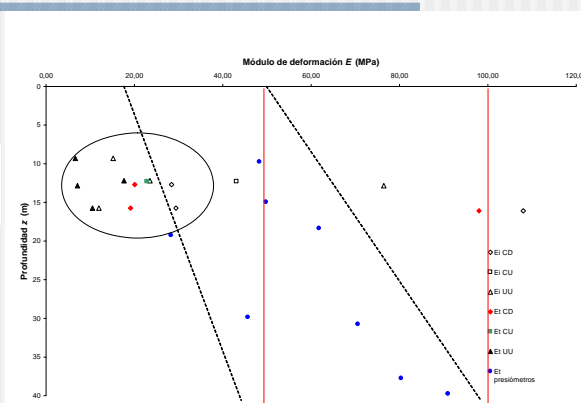
Definición de los parámetros constitutivos del modelo elástico no lineal hiperbólico

Parámetro	Valor
Número k	860
Exponente n	0,20
Ratio de rotura, R_f	0,45
Desviador de rotura, $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$	1,26 MPa



Comparativa presiometro-triaxial

$$E_t = \frac{\partial(\sigma_1 - \sigma_3)}{\partial \epsilon} = \frac{1/E_0}{\left[\frac{1}{E_0} + \frac{R_f \cdot \epsilon}{(\sigma_1 - \sigma_3)_f} \right]^2}$$



Módulos elásticos para $\epsilon=1\%$

Valores más frecuentes según Escario (1985)

Conclusiones

Conclusiones (1)

-Si bien el ensayo presiométrico es una herramienta de reconocimiento del terreno conocida en España, fundamentalmente utilizada en estudios geotécnicos para proyectos de túneles, su uso dista de poderse considerar como *generalizado*

-Sin embargo, las ventajas que incorpora la inclusión de este ensayo en la caracterización del subsuelo permiten pensar en que su popularización puede producirse de forma natural en el corto plazo, como ya ocurre en otros países

-Como ejemplo de las posibilidades del ensayo, se ha presentado una metodología de análisis del presiómetro basada en el conocido modelo elástico hiperbólico de Duncan & Chang (1970)

-Este modelo constitutivo puede presentar un buen ajuste con la respuesta del terreno en suelos que no presenten un *softening* marcado, o bien si el análisis se realiza en el tramo pre-fluencia

Conclusiones (2)

- El modelo elástico hiperbólico se incluye en la mayoría de programas comerciales de cálculo, lo cual facilita su aplicación práctica en el estudio de cimentaciones, y permite ajustar los parámetros del modelo mediante la simulación numérica del ensayo
- En el caso analizado, los módulos de deformación obtenidos con esta metodología han resultado dentro de los valores esperables, de acuerdo a la literatura técnica disponible

Experiencia en presiometría para el cálculo de cimentaciones en los suelos detríticos de Madrid

Gracias por su atención

