



INGENIERÍA CIVIL

Programa de Doctorado en Ingeniería

Línea de Investigación

Geotecnia y Riesgos Geoambientales

50 AÑOS
POSGRADOS
INGENIERÍA CIVIL

Área Curricular de Ingeniería Civil y Agrícola
Facultad de Ingeniería
Sede Bogotá



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA. FACULTAD DE INGENIERÍA. CENTRO DE INVESTIGACIONES, EXTENSIÓN Y DOCTORADOS. 2015

Selección de modelos constitutivos y determinación de parámetros para análisis numéricos de excavaciones profundas en suelos blandos

Estudiante: M.I. Carlos Javier Sainea Vargas

Director: Dr. Mario Camilo Torres Suárez

50 AÑOS
POSGRADOS
INGENIERÍA CIVIL
1966 - 2016



Programa de Doctorado en

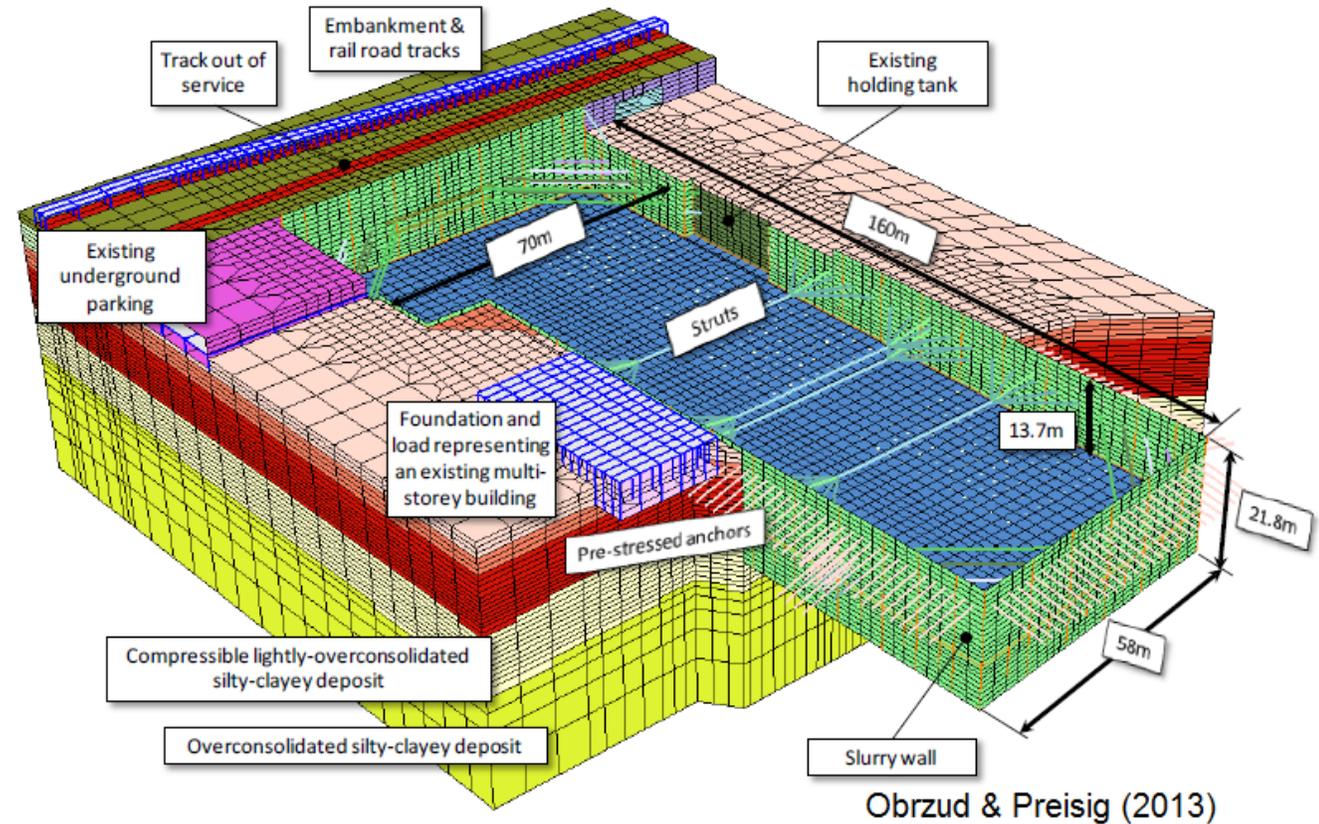
INGENIERÍA CIVIL

Área Curricular de Ingeniería Civil y Agrícola

Línea de Investigación en

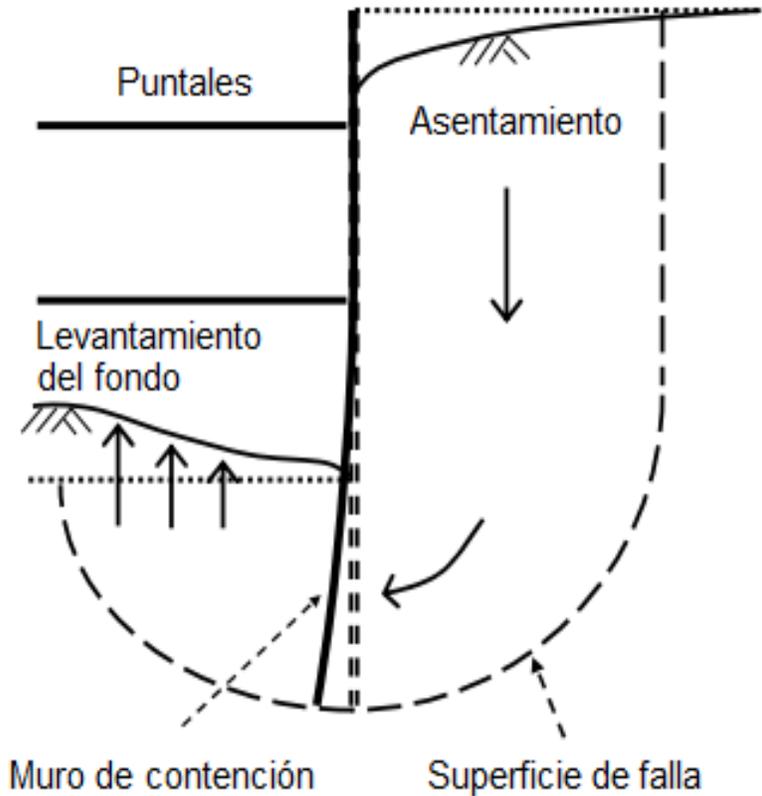
GEOTECNIA Y RIESGOS

Excavaciones profundas en suelos blandos



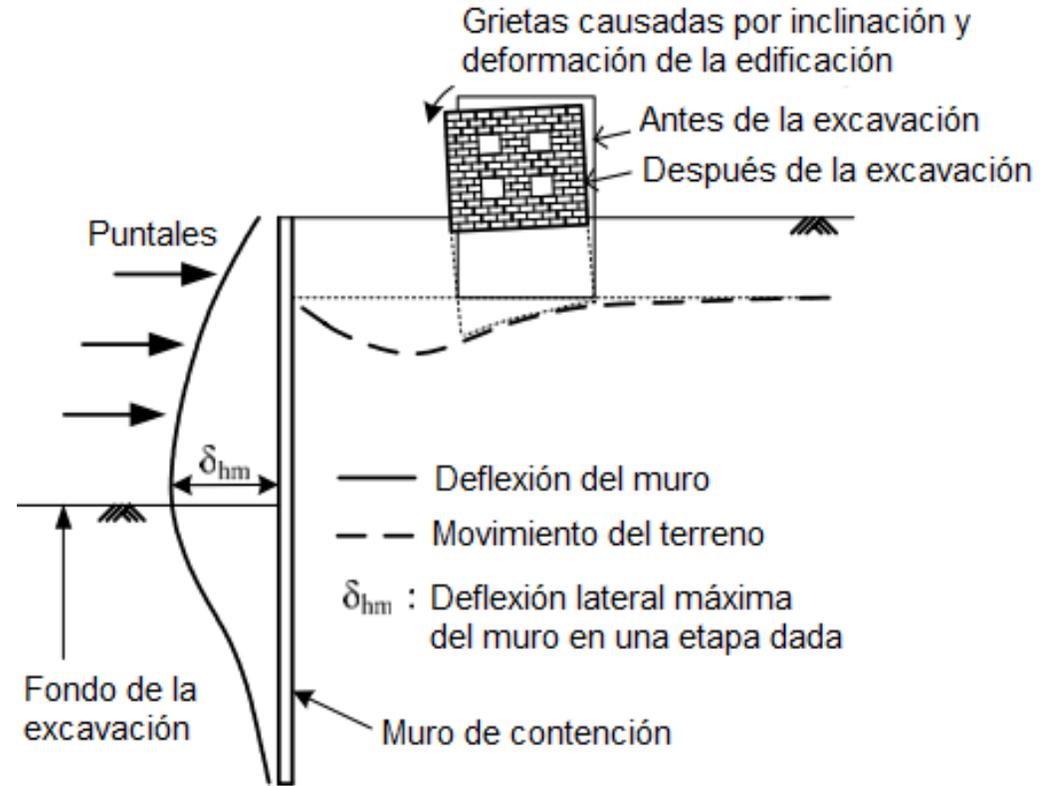
Estados límite para diseño

► Estados límite de falla



Falla de fondo (Luo, 2011)

► Estados límite de servicio



Efectos de excavaciones en arcillas (Hsiao, 2007)

Modelos constitutivos HS y HSsmall

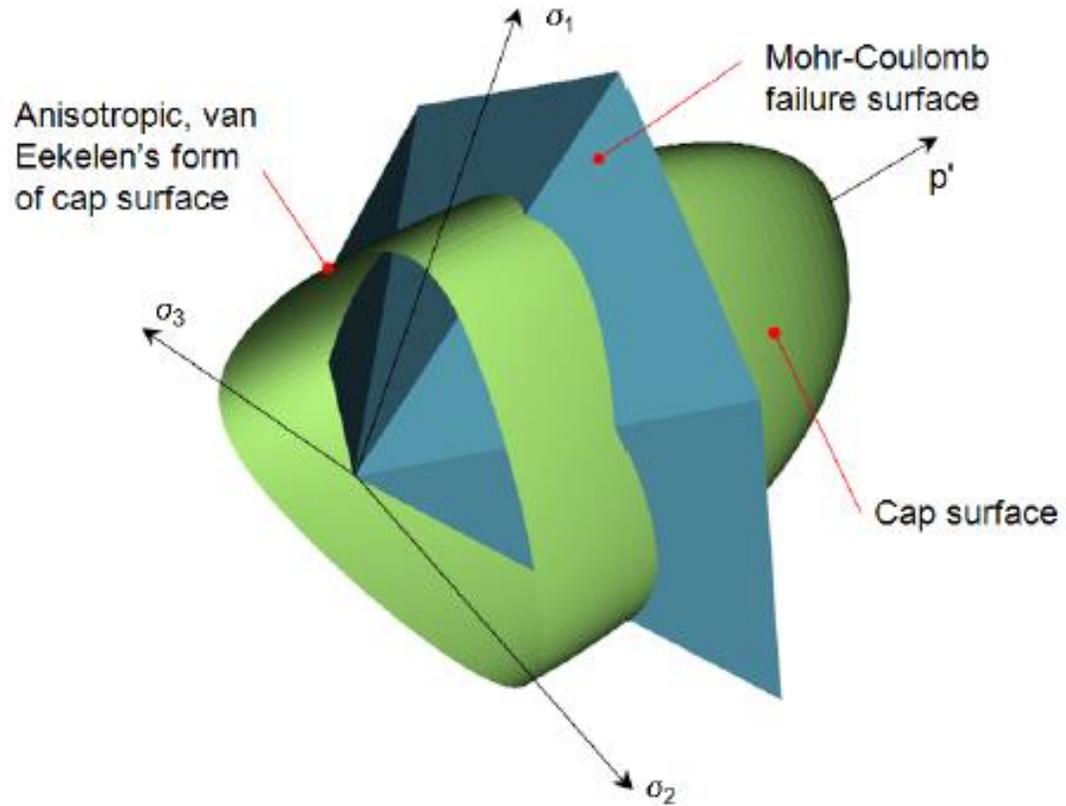
En suelos arcillosos blandos resulta útil aplicar los modelos Hardening Soil (Schanz, 1998) y Hardening Soil Small Strain (Benz, 2007) tanto para análisis de estados límite de falla (ULS) como para estados límite de servicio (SLS) los cuales buscan reproducir aspectos básicos del comportamiento macroscópico del suelo como:

- ▶ Densificación debido a deformaciones plásticas
- ▶ Rigidez dependiente del estado de esfuerzos
- ▶ Historia de esfuerzos - preconsolidación
- ▶ Flujo plástico al alcanzar un criterio de cedencia
- ▶ Dilatación durante la falla
- ▶ Variación fuerte de rigidez al aumentar la amplitud de deformación en el dominio de las pequeñas deformaciones (HSsmall)
- ▶ Comportamiento esfuerzo deformación histerético no lineal en el rango de las pequeñas deformaciones (HSsmall)

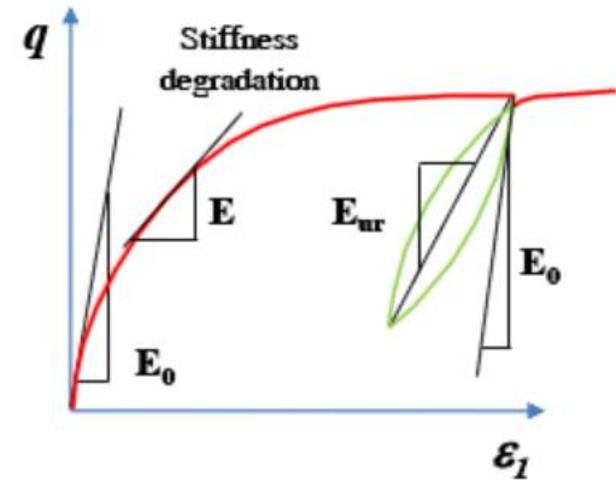
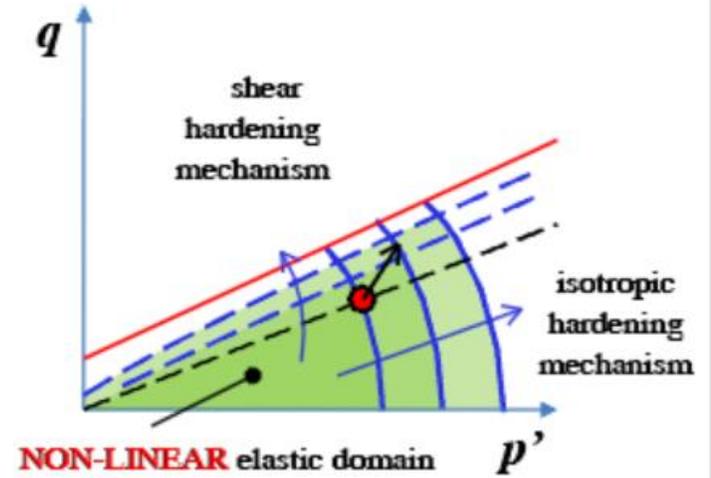
Selected soil models implemented in Z_Soil	Type of analysis	CLAYS	
		Degree of Overconsolidation	
		← High Stiff clays	→ Normal Soft clays
		Low	
Mohr-Coulomb (Drucker-Prager)	SLS		
	ULS	[- - -]	
Modified Cam-Clay	SLS		[]
	ULS		[]
HS-Standard HS-Small Strain	SLS	HS-Small Strain	HS-Std
	ULS		

Selección de modelos para para estados límite de servicio y de falla (Obrzud & Truty, 2014)

Modelos constitutivos HS y HSsmall

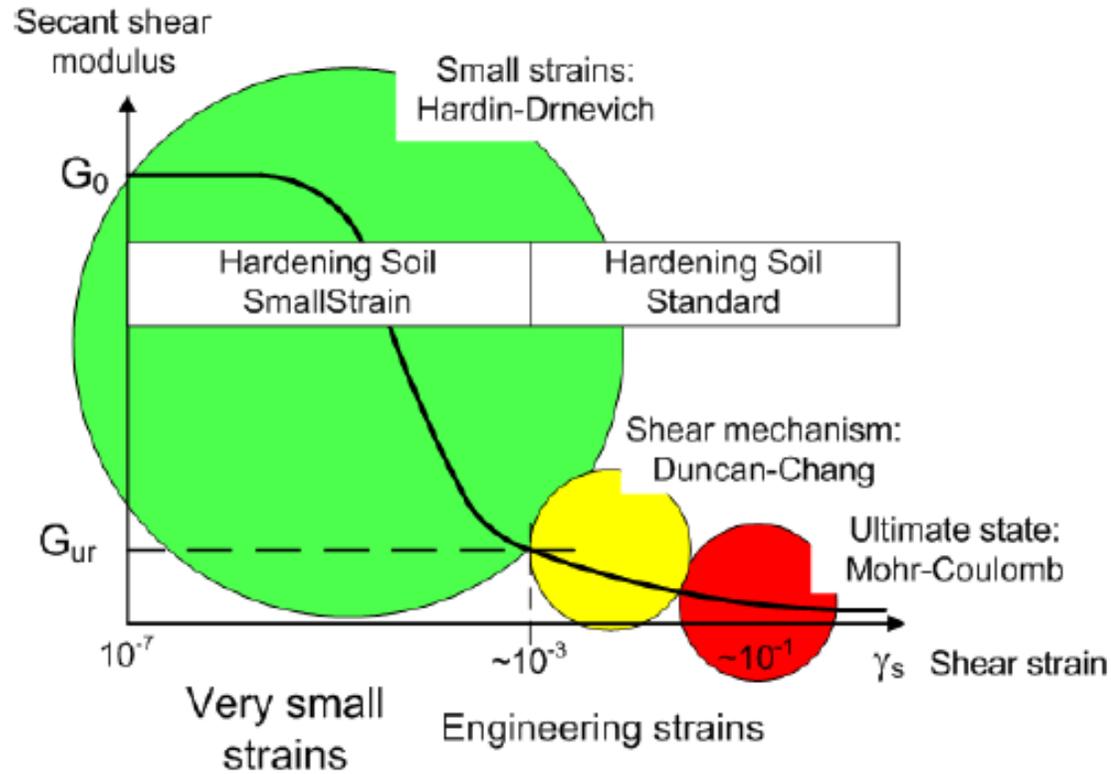


Superficie de fluencia para los modelos HS y HSsmall (Obrzud & Truty, 2014)

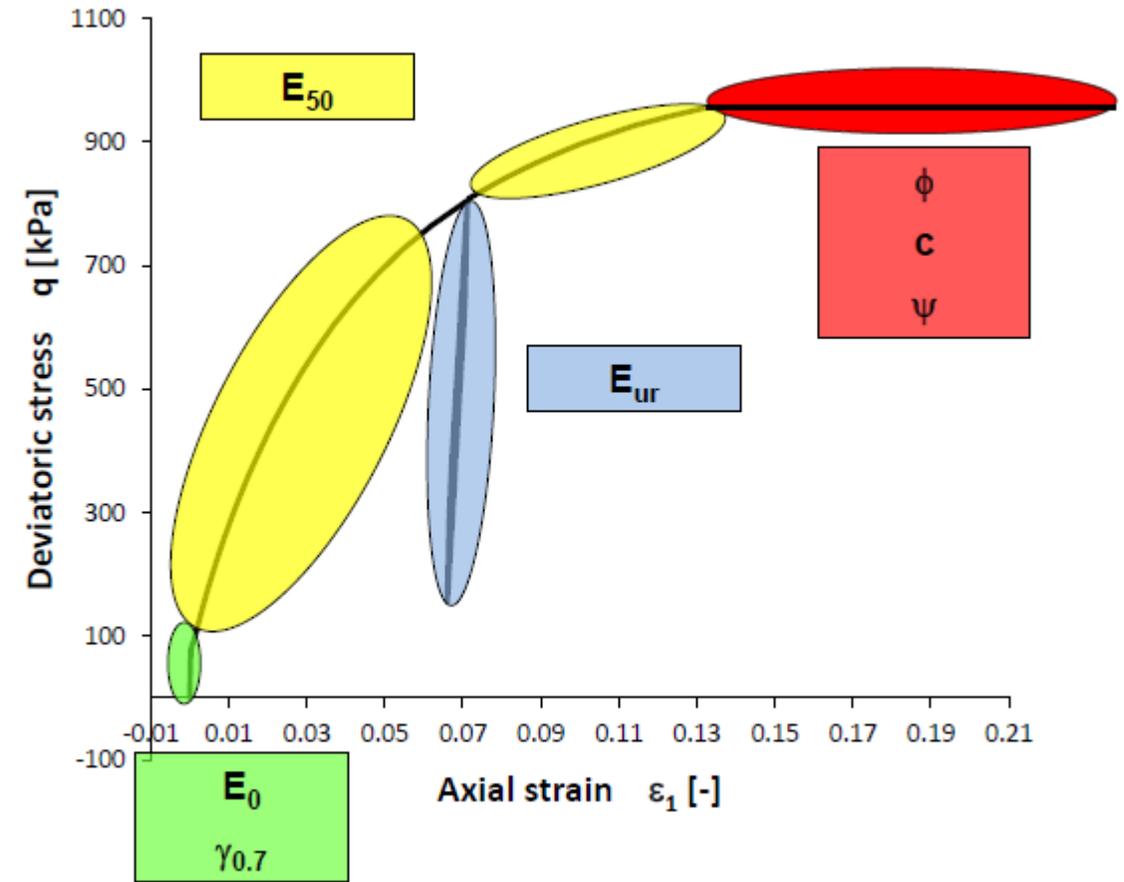


Características de los modelos HS y HSsmall (Obrzud, 2011)

Modelos constitutivos HS y HSsmall



Modelos HS y HSsmall Strain y degradación de la rigidez del suelo (Obrzud & Truty, 2014)



Parámetros de los modelos HS y HSsmall Strain (Obrzud, 2012)

Obtención de parámetros

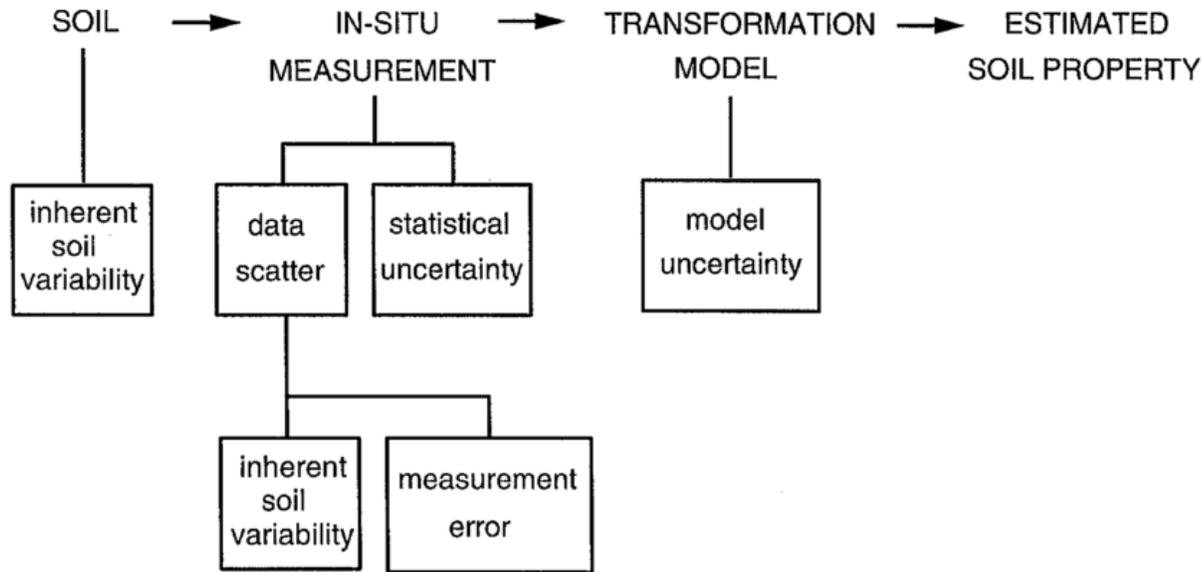
Model parameter	Unit	Direct estimation test	Alternative test or solution
Small stiffness (HS-SmallStrain only)			
E_0^{ref}	[kPa]	SCPT, DMT or bore-hole, cross-hole or other geophysical method	unloading-reloading branch of CIDC; geotechnical evidence; sands: CPT
$\gamma_{0.7}$	[-]	CIDC with local gauges	geotechnical evidence
Elastic constants			
$E_{50}^{ref}(\sigma^{ref})$	[kPa]	min. 1 CIDC at σ_3^{ref}	sands: CPT
$E_{ur}^{ref}(\sigma^{ref})$	[kPa]	min. 1 CIDC at σ_3^{ref} geotechnical evidence	
σ^{ref}	[kPa]	1 CIDC	
ν_{ur}	[-]	min. 1 CIDC with unloading-reloading curve	geotechnical evidence
m	[-]	3 CIDC at different σ_3	geotechnical evidence

Determinación de parámetros de los modelos HS y HSsmall strain (Obrzud & Truty, 2014)

Model parameter	Unit	Direct estimation test	Alternative test or solution
Shear mechanism			
c	[kPa]	3 CIDC or CICU at different σ_3	geotechnical evidence; sand: CPT, DMT, PMT, SPT geotechnical evidence default $R_f = 0.9$, geotechnical evidence geotechnical evidence
ϕ	[°]	3 CIDC or CICU at different σ_3	
ψ	[°]	min. 1 CIDC	
R_f	[-]	min. 1 CIDC	
e_{max}	[-]	min. 1 CIDC on a dense or preconsolidated soil specimen	
f_t	[kPa]	isotropic extension	default $f_t = 0$
D	[-]	min. 1 CIDC	default $D=0$ for HS-Standard and $D=0.25$ HS-SmallStrain
Volumetric (cap) mechanism			
$E_{oed}^{ref}(\sigma_{oed}^{ref})$	[kPa]	min.1 OED	clays: CPT, DMT
σ_{oed}^{ref}	[kPa]	idem	idem
Initial state variables (soil history)			
OCR or q^{POP}	[-/kPa]	min. 1 OED	clay: CPT, CPTU, DMT "Jaky's formula"
K_0^{SR}	[-]	K_0 -consolidation	

Incertidumbre en los parámetros obtenidos

La incertidumbre en los parámetros obtenidos procede de varias fuentes:



Incertidumbre en la estimación de las propiedades del suelo (Phoon & Kulhawy, 1999)

Robertson (2010)
 Mayne (2001), Mayne et al (2009)
 Mayne (2001), Mayne et al (2009)
 Mayne (2012)
 Robertson (2009)
 Kulhawy & Mayne (1990)
 Been et al. (2010), Robertson (2013)

Karlsrud et al. (2005), Robertson (2013)
 Robertson (2013)
 Robertson (2010)

Mayne & Stewart (1988)
 Mayne et al (2006)
 Obrzud & Truty (2014)

Robertson (2010)

Robertson (2010)

Obrzud & Truty (2014)
 Obrzud & Truty (2014)

Obrzud & Truty (2014)

$$\gamma/\gamma_w = 0.27 [\log R_f] + 0.36 [\log(q_t/p_a)] + 1.236$$

$$\gamma_t = 8.63 \cdot \log(V_s) - 1.18 \cdot \log(z) - 0.53$$

$$\gamma_t = 8.64 \cdot \log(V_s) - 0.74 \cdot \log(\sigma_{vo}') - 0.40$$

$$\sigma'_p = 0.33(q_t - \sigma_{vo}')^m (p_a/100)^{1-m}$$

$$OCR = 0.25 (Q_t)^{1.25}$$

$$OCR = k(q_t - \sigma_v) \sigma'_w = k Q_{t1}$$

$$OCR = k(Q_{t1}) \quad (\text{when } Q_{t1} < 20)$$

$$k = [(Q_{t1})^{0.2}/(0.25 (10.5 + 7 \log F_t))]^{1.25}$$

$$OCR = 0.25 (Q_{t1})^{1.2}$$

$$G_0 = 0.0188 [10^{(0.55I_c + 1.68)}] (q_t - \sigma_{vo})$$

$$s_u = \frac{q_t - \sigma_v}{N_{kt}}$$

$$c' \approx 0.02 \sigma'_p$$

$$\phi' (\text{deg}) = 29.5^\circ \cdot B_q^{0.121} [0.256 + 0.336 \cdot B_q + \log Q_t]$$

$$\psi = 0^\circ \text{ for normally- and lightly-overconsolidated soil}$$

$$\psi = \phi'/6 \text{ for overconsolidated soil}$$

$$\psi = \phi'/3 \text{ for heavily overconsolidated soil}$$

$$1.0 < I_c \leq 3.27 \quad k = 10^{(0.952 - 3.04 I_c)}$$

$$3.27 < I_c < 4.0 \quad k = 10^{(-4.52 - 1.37 I_c)}$$

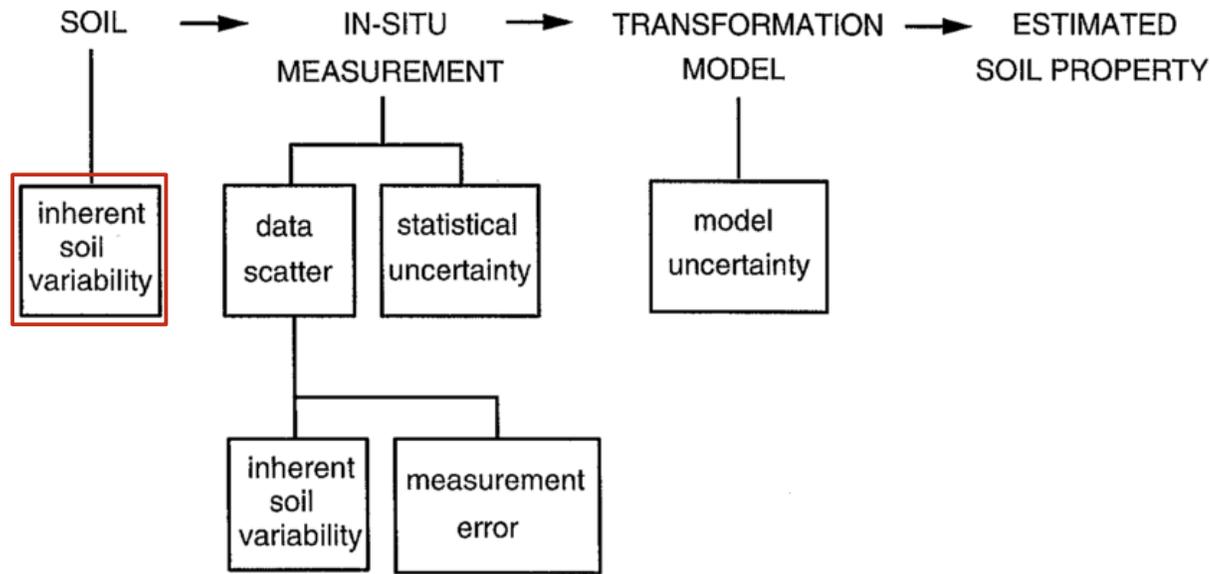
$$M = \alpha_M (q_t - \sigma_{vo})$$

$$E_{ur} = E_s = a E_{oed} = a M_{DMT}$$

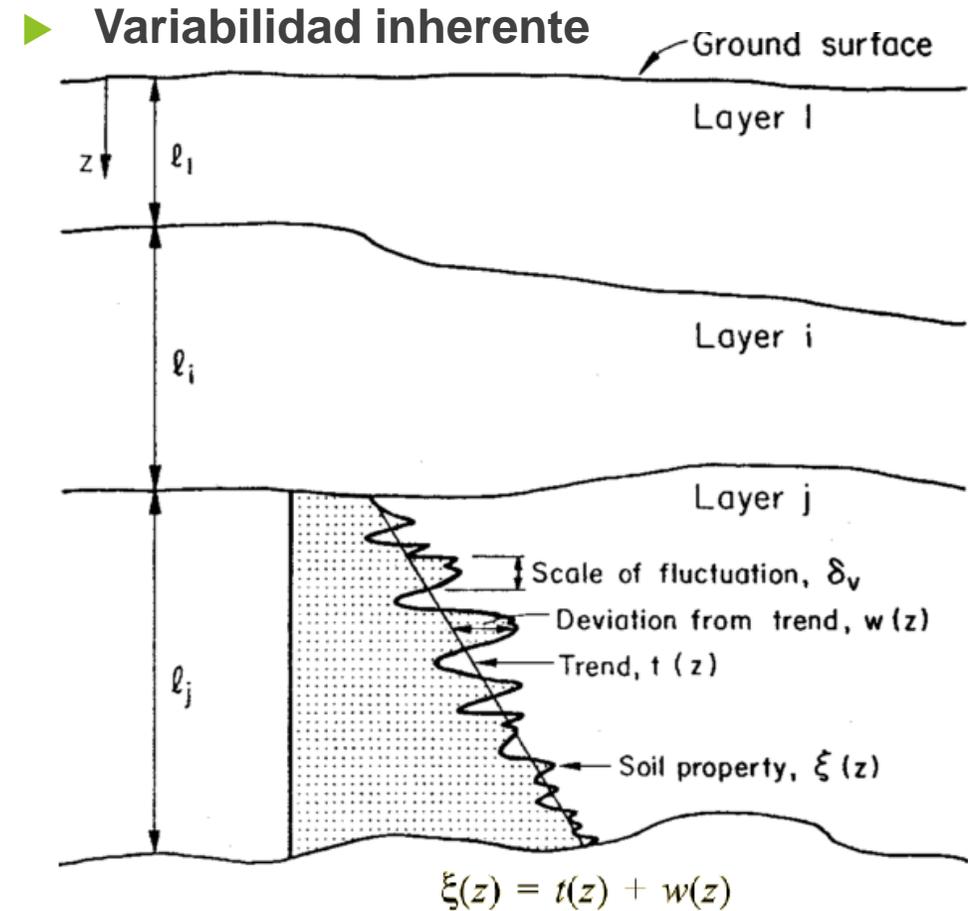
$$\frac{E_{ur}^{ref}}{E_{50}^{ref}} = 3 \text{ to } 6$$

$$E_0 = 2(1 + \nu_{ur}) G_0 \quad G_0 = G_0^{ref} \left(\frac{\sigma_3^* + c \cot \phi}{\sigma_{ref} + c \cot \phi} \right)^m$$

Incertidumbre en los parámetros obtenidos

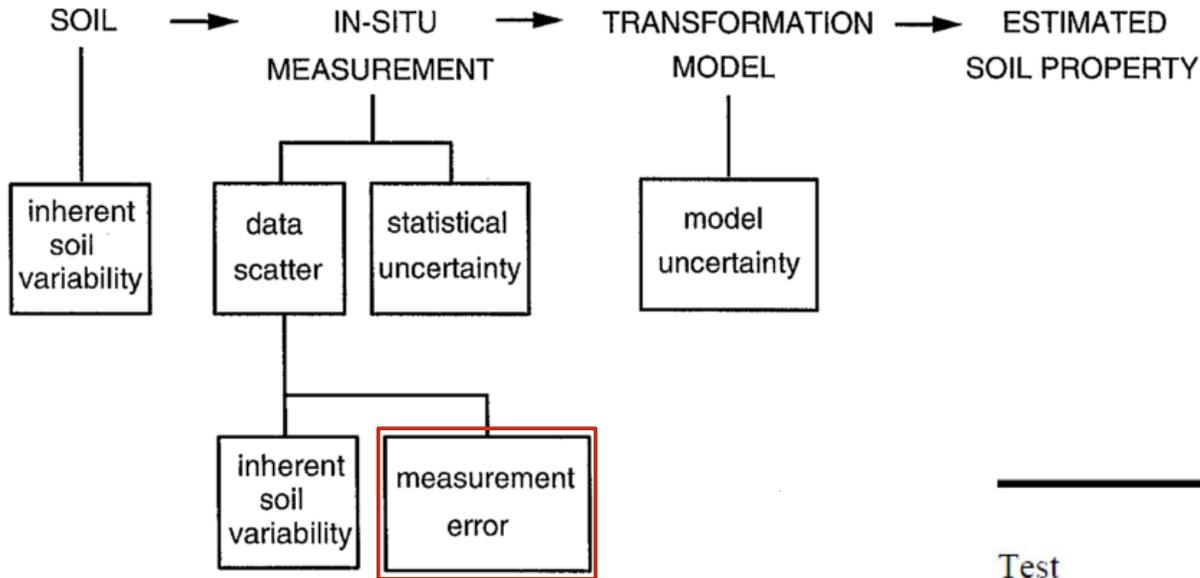


Incertidumbre en la estimación de las propiedades del suelo (Phoon & Kulhawy, 1999)



Variabilidad inherente de las propiedades del suelo (Phoon & Kulhawy, 1999)

Incertidumbre en los parámetros obtenidos



Incertidumbre en la estimación de las propiedades del suelo (Phoon & Kulhawy, 1999)

► Errores de medición

La variabilidad total de una propiedad medida se puede expresar como (Lumb, 1971; Orchant et al, 1988; Phoon & Kulhawy, 1999):

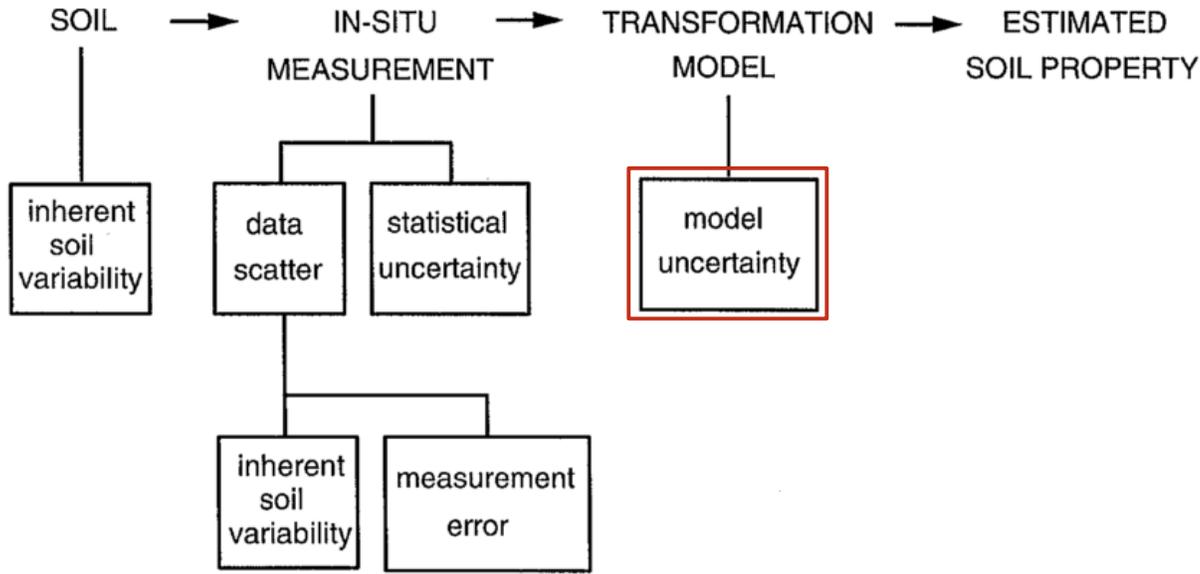
$$\xi_m(z) = \xi(z) + e(z)$$

$$\xi_m(z) = t(z) + w(z) + e(z)$$

Test	Coefficient of variation, COV (%)				
	Equipment	Procedure	Random	Total	Range
Standard penetration test (SPT)	5-75	5-75	12-15	14-100	15-45
Mechanical cone penetration test (MCPT)	5	10-15	10-15	15-22	15-25
Electric cone penetration test (ECPT)	3	5	5-10	7-12	5-15
Vane shear test (VST)	5	8	10	14	10-20
Dilatometer test (DMT)	5	5	8	11	5-15
Pressuremeter test, prebored (PMT)	5	12	10	16	10-20
Self-boring pressuremeter test (SBPMT)	8	15	8	19	15-25

Errores de medición de pruebas in situ (Orchant et al 1988; Kulhawy & Trautmann, 1996; Phoon & Kulhawy, 1999)

Incertidumbre en los parámetros obtenidos

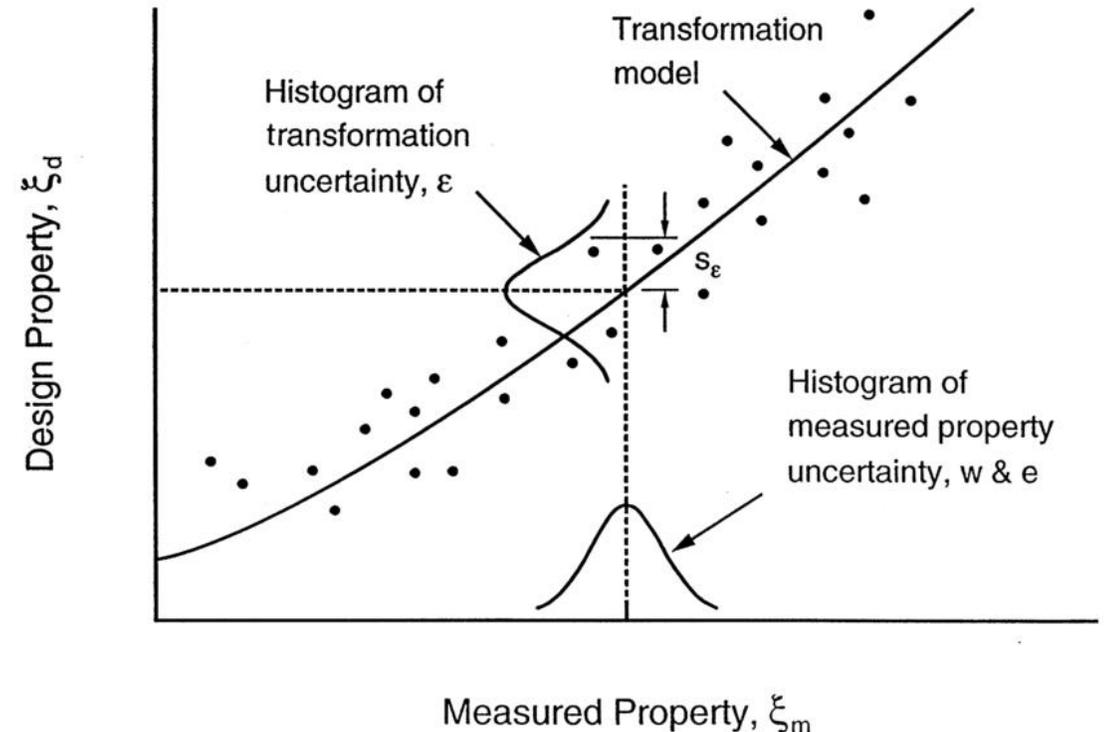


Incertidumbre en la estimación de las propiedades del suelo (Phoon & Kulhawy, 1999)

► Incertidumbre debida al modelo de transformación

$$\xi_d = T(\xi_m, \varepsilon)$$

$$\xi_d = T(t + w + e, \varepsilon)$$



Caracterización probabilística del modelo de transformación (Phoon & Kulhawy, 1999)



PREGRADO

INGENIERÍA CIVIL



DOCTORADO EN INGENIERÍA

INGENIERÍA CIVIL



PREGRADO

INGENIERÍA AGRÍCOLA



MAESTRÍA EN INGENIERÍA

ESTRUCTURAS



MAESTRÍA EN INGENIERÍA

GEOTECNIA



MAESTRÍA EN INGENIERÍA

RECURSOS HIDRÁULICOS



MAESTRÍA EN INGENIERÍA

TRANSPORTE



MAESTRÍA EN INGENIERÍA

INGENIERÍA AGRÍCOLA



ESPECIALIZACIÓN

ESTRUCTURAS



ESPECIALIZACIÓN

TRÁNSITO, DISEÑO Y SEGURIDAD VIAL



ESPECIALIZACIÓN

SANEAMIENTO



50 AÑOS
POSGRADOS
INGENIERÍA CIVIL
1966 - 2016



Programa de Doctorado en

INGENIERÍA CIVIL

Área Curricular de Ingeniería Civil y Agrícola

Línea de Investigación en

GEOTECNIA Y RIESGOS