

VI Congreso Suramericano de Mecánica de Rocas - XI Congreso Colombiano de Geotecnia
Octubre 8 al 13 de 2006 Cartagena, Colombia

Modelo viscohipoplástico para interacción dinámica suelo - estructura

J. Eraso & A. Lizcano

Grupo de investigación Geotécnica
(C. Grandas, D.K Reyes, L.F. Prada)

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental

<http://uque.uniandes.edu.co/~geotecnia/geopagina/index.php>

Cartagena, 10 October 2006

Contenido

- Motivación
- Modelo Constitutivo Visco-hypoplastico
- Aplicación a problemas de valor de contorno
- Conclusiones

Motivación

La práctica actual para el análisis de respuesta de sitio

- Modelos elásticos, visco-elásticos y no lineales
- La no linealidad se introduce con curvas dinámicas
- Usa módulos secantes
- El módulo depende de la amplitud de la deformación solamente
- Esfuerzos y deformaciones cortantes
- Solución en el dominio de la frecuencia

Motivación

Modelo viscohipoplástico

- Incremental No lineal e inelástico
- La rigidez depende de:
 - Amplitud de deformación
 - Dirección de deformación
 - Velocidad de deformación
 - Número de ciclos
 - Estado de esfuerzos
 - Relación de vacíos
 - Historia de esfuerzos (carga o descarga)
 - Historia reciente
 - Condiciones de drenaje

De hipoplasticidad a visco-hipoplasticidad

Hipoplasticidad: $\dot{\mathbf{T}} = \mathbf{L} : \mathbf{D} + f_d \mathbf{N} \|\mathbf{D}\|$ (von Wolffersdorff)

$$\mathbf{L} = \frac{f_b f_e}{\hat{\mathbf{T}} : \hat{\mathbf{T}}} a^2 \left(\left(\frac{F}{a} \right)^2 \mathbf{I} + \hat{\mathbf{T}} \hat{\mathbf{T}} \right) = \frac{f_b f_e}{\hat{\mathbf{T}} : \hat{\mathbf{T}}} \hat{\mathbf{L}}$$

$$\mathbf{N} = \frac{f_b f_e}{\hat{\mathbf{T}} : \hat{\mathbf{T}}} a^2 \left(\frac{F}{a} \right) (\hat{\mathbf{T}} + \hat{\mathbf{T}}^*) = \frac{f_b f_e}{\hat{\mathbf{T}} : \hat{\mathbf{T}}} \hat{\mathbf{N}}$$

$$a = \frac{\sqrt{3} (3 - \sin \varphi_c)}{2\sqrt{2} \sin \varphi_c}$$

$$F = \sqrt{\frac{1}{8} \tan^2 \psi + \frac{2 - \tan^2 \psi}{2 + \sqrt{2} \tan \psi \cos 3\theta}} - \frac{1}{2\sqrt{2}} \tan \psi$$

$$\tan \psi = \sqrt{3} \|\hat{\mathbf{T}}^*\|$$

De hipoplasticidad a visco-hipoplasticidad

$$\tan \psi = \sqrt{3} \left\| \hat{\mathbf{T}}^* \right\|$$

$$\cos 3\theta = -\sqrt{6} \frac{\text{tr} \left(\hat{\mathbf{T}}^* \cdot \hat{\mathbf{T}}^* \cdot \hat{\mathbf{T}}^* \right)}{\left[\hat{\mathbf{T}}^* : \hat{\mathbf{T}}^* \right]^{3/2}}$$

$$\hat{\mathbf{T}} = \frac{\mathbf{T}}{\text{tr} \mathbf{T}}$$

$$\hat{\mathbf{T}}^* = \hat{\mathbf{T}} - \frac{1}{3} \mathbf{1}$$

De hipoplasticidad a visco-hipoplasticidad

$$\overset{\circ}{\mathbf{T}} = \mathbf{L} : \mathbf{D} + \mathbf{N} \|\mathbf{D}\|$$

$$\overset{\circ}{\mathbf{T}} = \mathbf{L} : \left[\mathbf{D} - \left(-\mathbf{L}^{-1} : \mathbf{N} \|\mathbf{D}\| \right) \right]$$

$$\mathbf{D}^{vis} = -\mathbf{L}^{-1} : \mathbf{N} \|\mathbf{D}\|$$

Visco-hipoplasticidad: $\boxed{\overset{\circ}{\mathbf{T}} = \mathbf{L} : \left[\mathbf{D} - \mathbf{D}^{vis} \right]}$ (3D)

Modelo de Maxwell: $\dot{\sigma} = \frac{\sigma}{K} \left(\dot{\varepsilon} - \dot{\varepsilon}^v \right)$ (1D)

De hipoplasticidad a visco-hipoplasticidad

$$\dot{\mathbf{T}} = f_b \hat{\mathbf{L}} : (\mathbf{D} - \mathbf{D}^{vis})$$

$$\mathbf{D}^{vis} \propto - \frac{\hat{\mathbf{L}}^{-1} : \mathbf{N}}{\|\hat{\mathbf{L}}^{-1} : \mathbf{N}\|} = -\bar{\mathbf{B}}$$

Regla de Norton: $\dot{\varepsilon}^v = \dot{\varepsilon}_r \left(\frac{\sigma}{\sigma_e} \right)^{\frac{1}{I_v}} \Rightarrow \mathbf{D}^{vis} = -D_r \bar{\mathbf{B}} \left(\frac{1}{OCR} \right)^{\frac{1}{I_v}}$

$$OCR = \frac{p_e}{p_e^+}$$

Modelo visco-hipoplástico

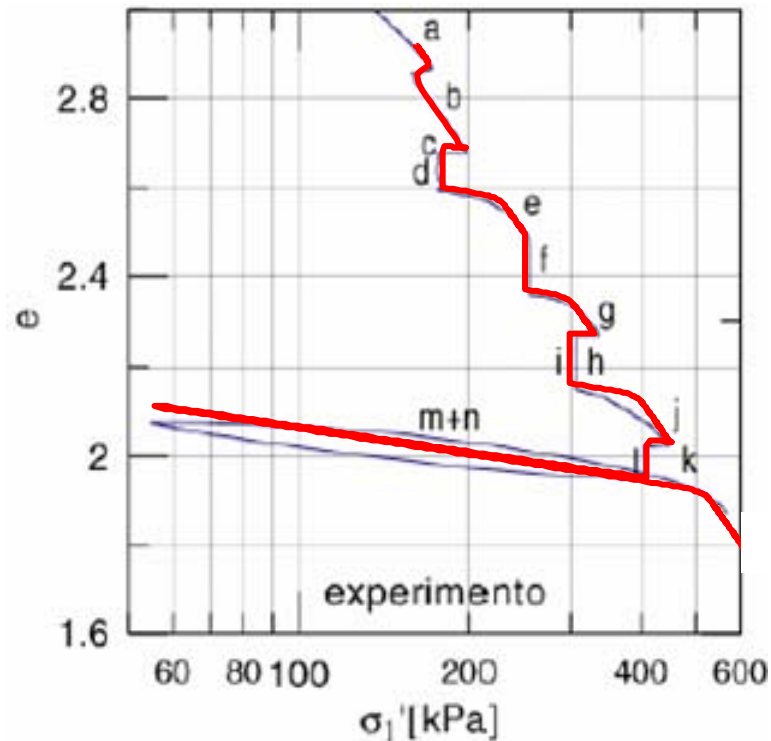
12 Parámetros:

Parámetro	Descripción	Ensayo
λ	Pendiente de normal consolidación	Oedométrico
κ	Pendiente de descarga recarga	Oedométrico
I_v	Índice de viscosidad	Oedométrico
ϕ_c	Ángulo de fricción crítico	Triaxial monotónico
e_{100}	Relación de vacíos para 100 kPa	Oedométrico
D_r	Velocidad de referencia (Ref)	Oedométrico
β_r	Parámetro de control	Triaxial monotónico
m_T	Rigidez característica a 90°	Triaxial cíclico
m_R	Rigidez característica a 180°	Triaxial cíclico
R	Tamaño del rango elástico	Triaxial cíclico
β_x	Coeficiente de interpolación	Triaxial cíclico
χ	Exponente de interpolación	Triaxial cíclico

VI Congreso Suramericano de Rocas XI Congreso Colombiano de Geotecnia, Cartagena, Oct 2006

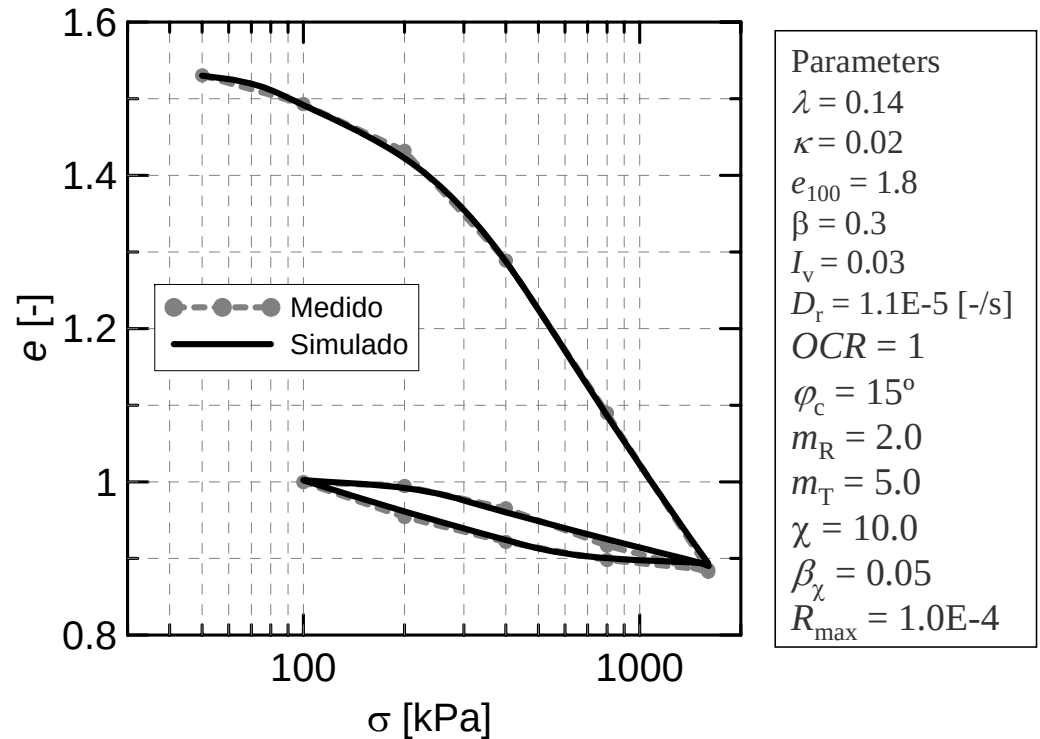


- Ensayos oedométricos

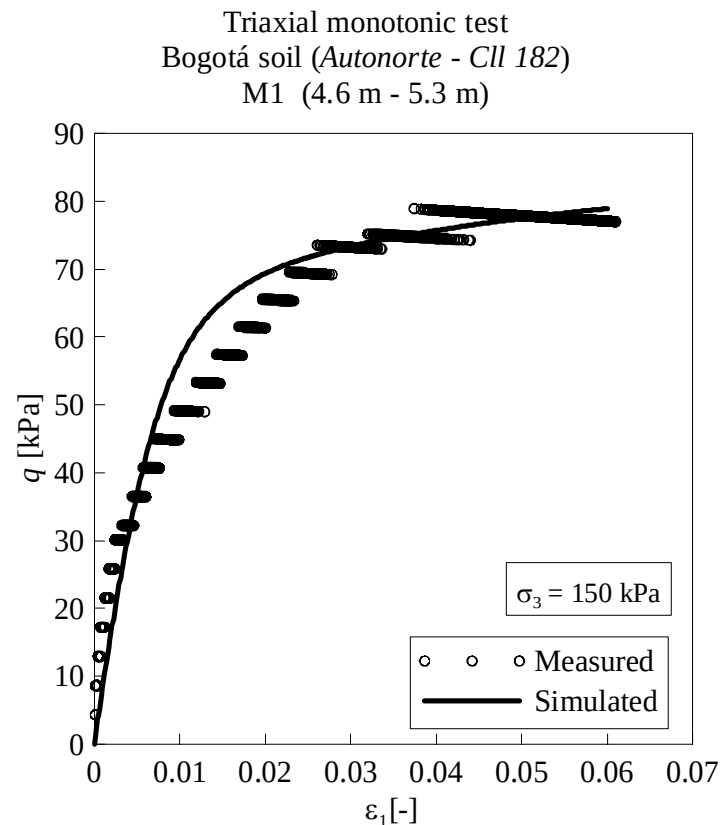
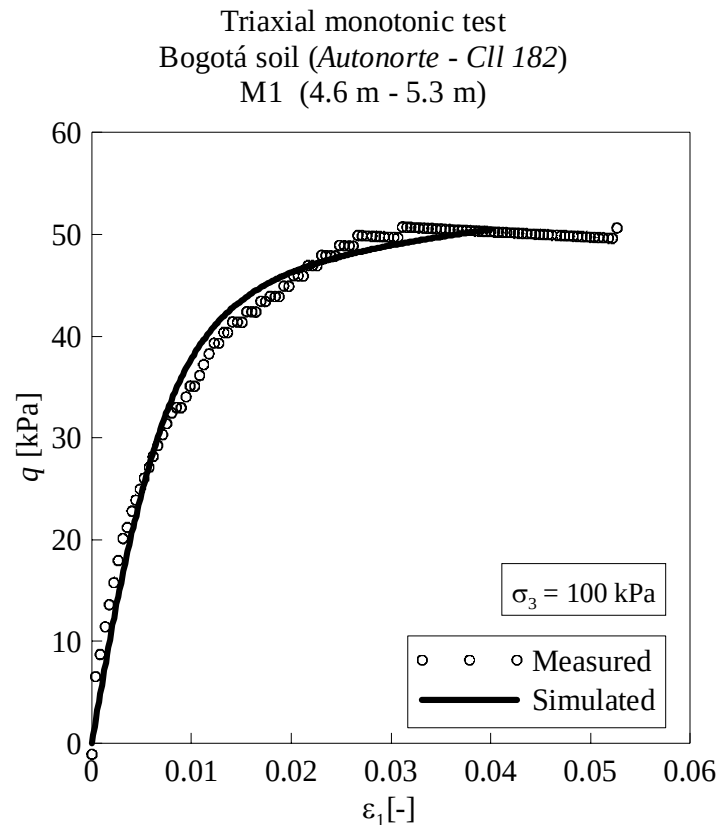


Krieg, 1995

<http://civil.uniandes.edu.co/~depcivil/manager.php?id=1066>



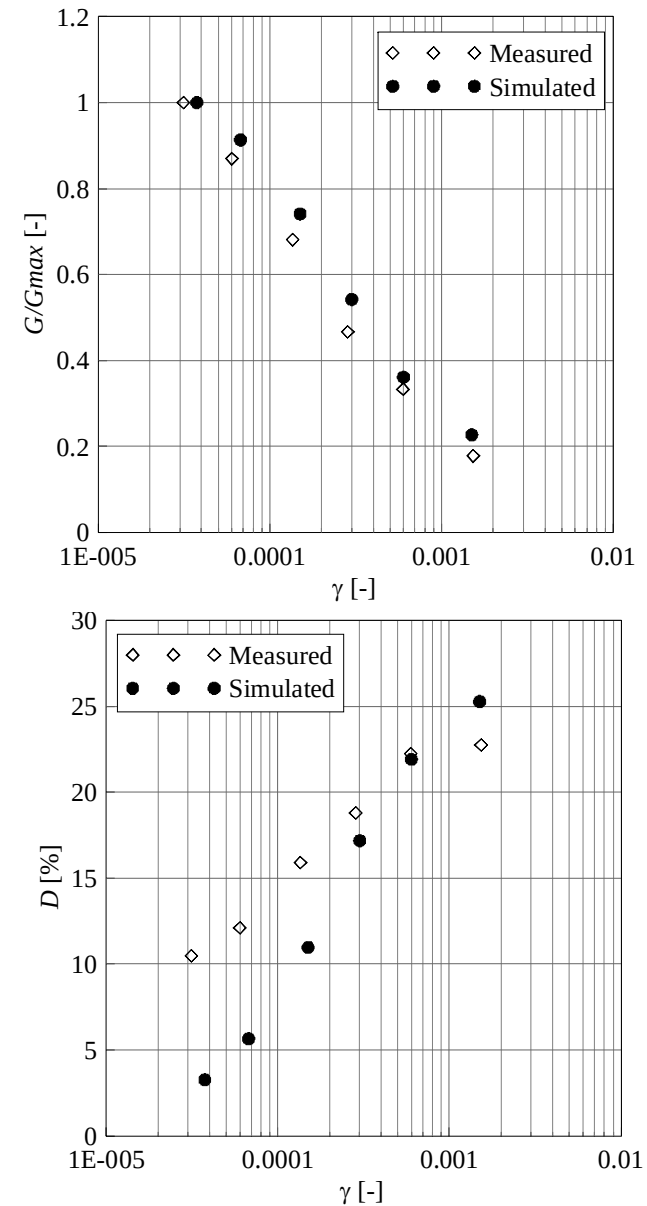
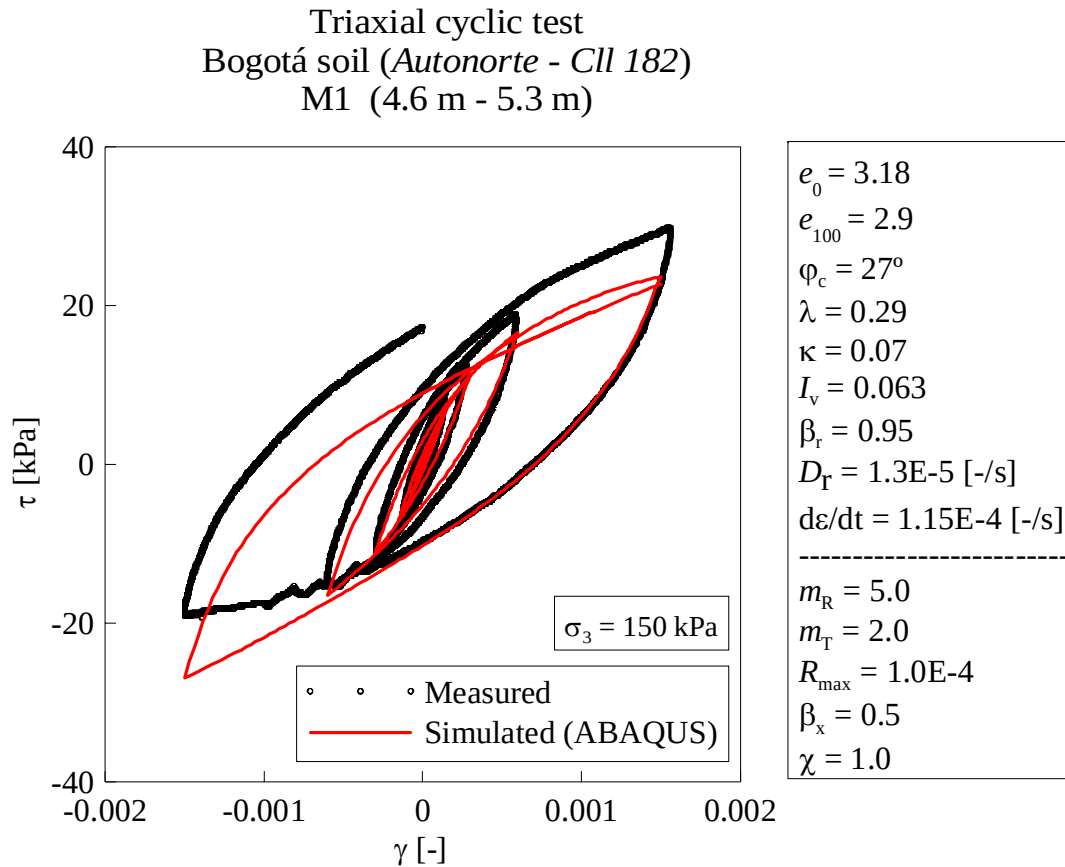
- Ensayos triaxiales monotónicos



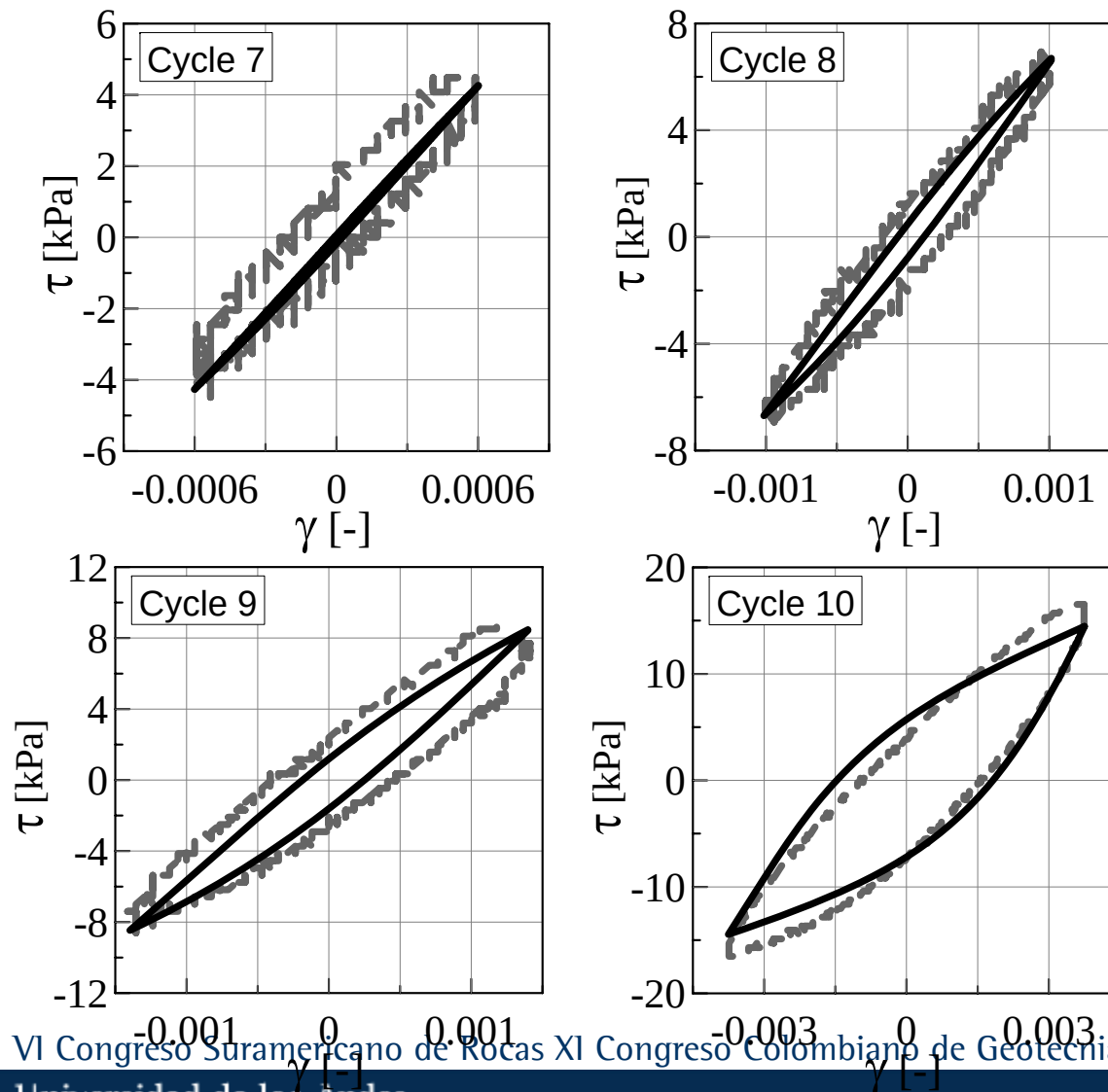
$e_0 = 3.18$
 $e_{100} = 2.9$
 $\phi_c = 27^\circ$
 $\lambda = 0.29$
 $\kappa = 0.07$
 $I_v = 0.063$
 $\beta_r = 0.95$
 $D_r = 1.3E-5$ [-/s]
 $d\varepsilon/dt = 1.15E-4$ [-/s]

$m_R = 5.0$
 $m_T = 2.0$
 $R_{max} = 1.0E-4$
 $\beta_x = 0.08$
 $\chi = 5.0$

- Ensayos triaxiales cíclicos



Modelo visco-hipoplástico

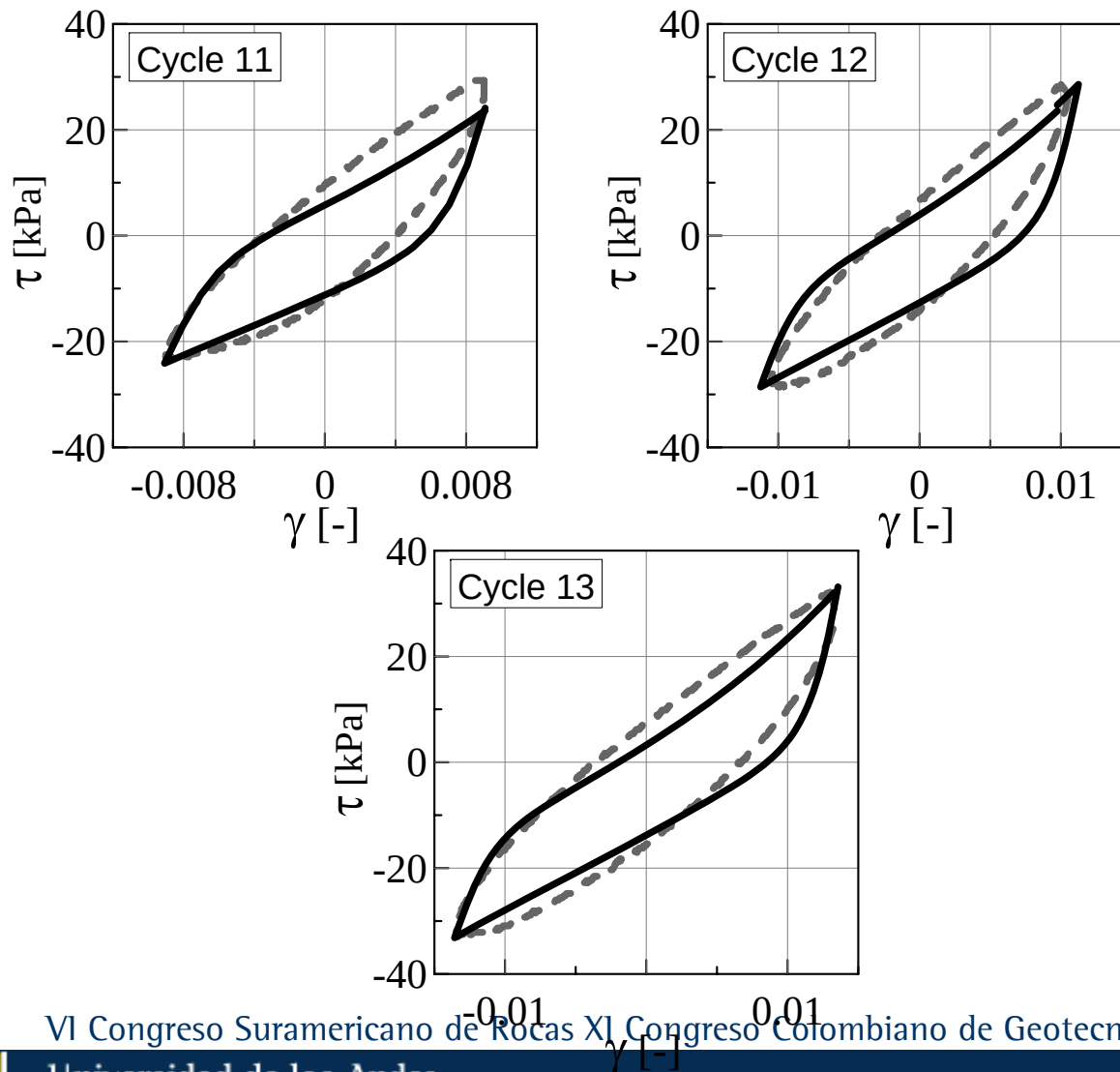


M14-PT3
 “Autonorte – Calle 170”
 Depth: 28.0 m – 28.7 m
 $\gamma = 13.7 \text{ kN/m}^3$

Parameters:

$\lambda = 0.26$
 $\kappa = 0.018$
 $e_{100} = 3.97$
 $\beta = 0.95$
 $I_v = 0.06$
 $D_r = 1.0\text{E-}5 \text{ [-/s]}$
 $OCR = 1$
 $\phi_c = 30^\circ$
 $m_R = 2.0$
 $m_T = 5.0$
 $\chi = 5.0$
 $\beta_\chi = 0.08$
 $R_{\max} = 1.0\text{E-}4$

Modelo visco-hipoplástico



M14-PT3
 “Autonorte – Calle 170”
 Depth: 28.0 m – 28.7 m
 $\gamma = 13.7 \text{ kN/m}^3$

Parameters:

$$\lambda = 0.26$$

$$\kappa = 0.018$$

$$e_{100} = 3.97$$

$$\beta = 0.95$$

$$I_v = 0.06$$

$$D_r = 1.0\text{E-}5 \text{ [-/s]}$$

$$OCR = 1$$

$$\phi_c = 30^\circ$$

$$m_R = 2.0$$

$$m_T = 5.0$$

$$\chi = 5.0$$

$$\beta_\chi = 0.08$$

$$R_{\max} = 1.0\text{E-}4$$

VI Congreso Suramericano de Rocas XI Congreso Colombiano de Geotecnia, Cartagena, Oct 2006



Universidad de los Andes

Propagación de ondas

- Ecuación de movimiento, balance de impulso:

$$\rho \vec{\ddot{u}} = \text{Div} \underline{\underline{\sigma}} + \vec{f}$$

- Fuerzas volumétricas = 0 $\Rightarrow$

$$\rho \frac{\partial^2 u_k}{\partial t^2} = \frac{\partial \sigma_{lk}}{\partial x_l}$$

Ecuación de onda visco-hipoplástica

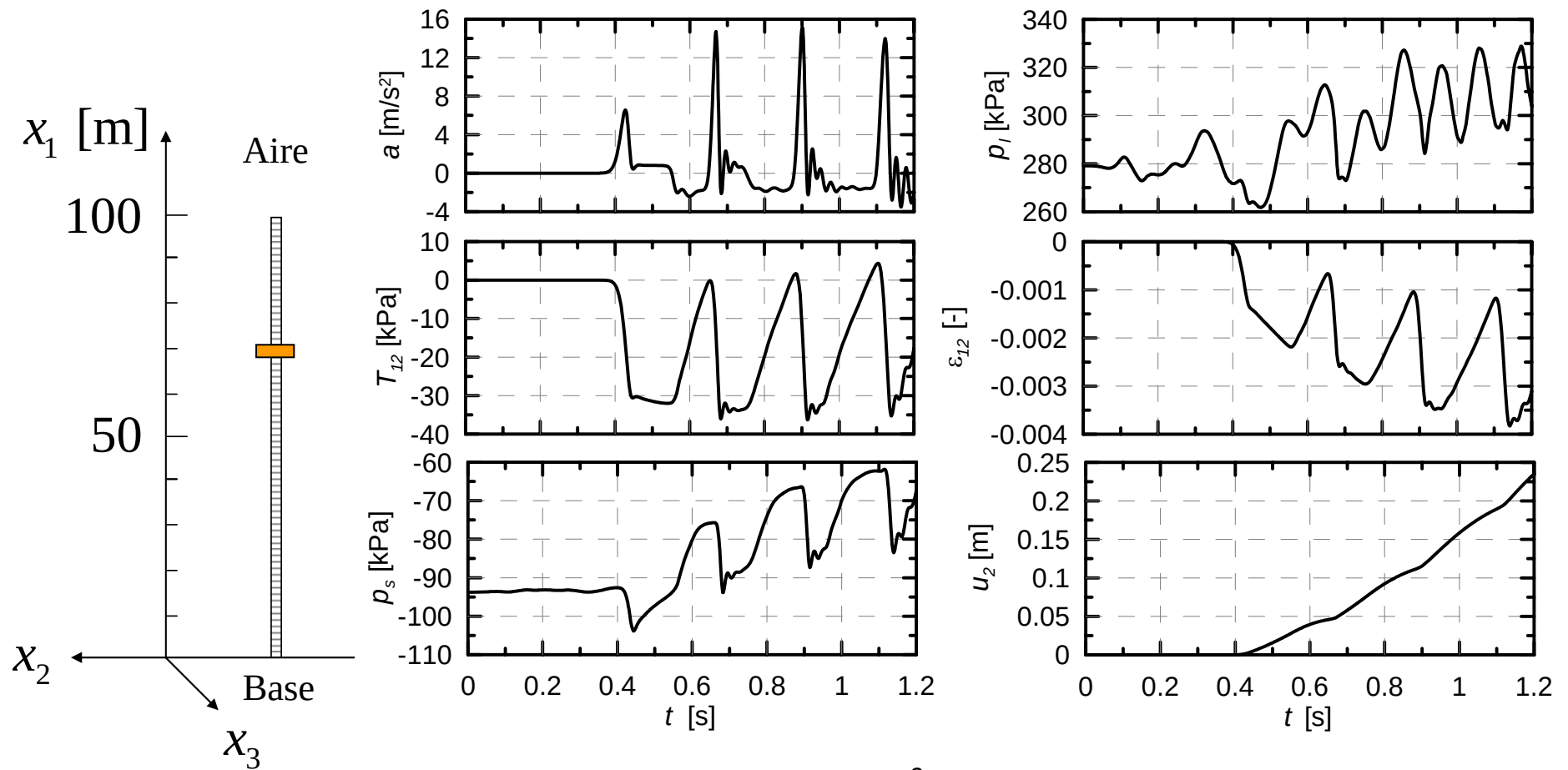
- Velocidad de propagación: elástica

$$v_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$

- Viscohipoplástica

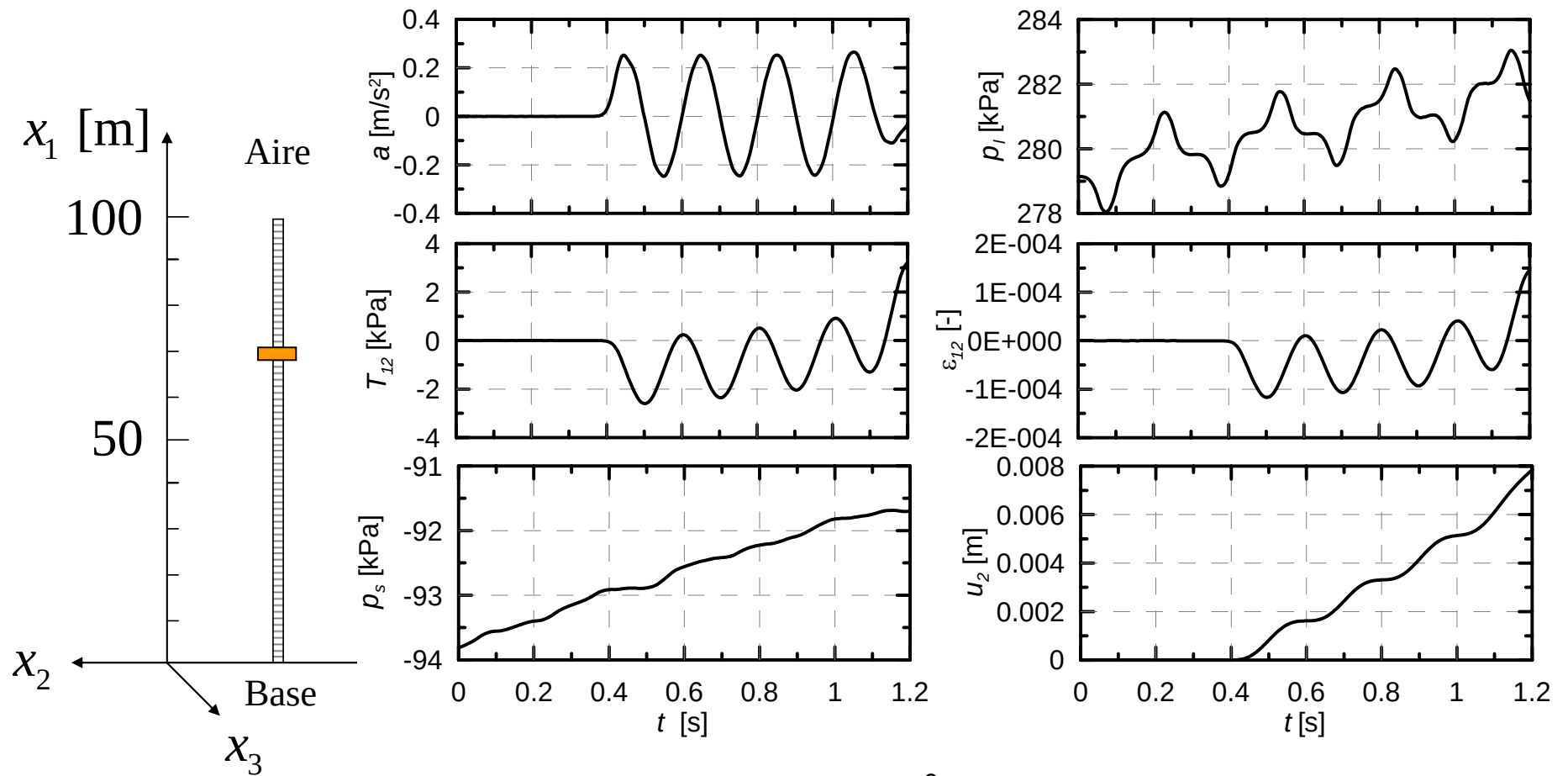
$$v_s = \begin{cases} \sqrt{\frac{(k_1 + k_2) f_b \hat{L}_{1212} - (T_{22} - T_{11}) - f_b \hat{L}_{12kl} D_{kl}^{vis}}{\rho}} & \text{para } h_{12} D_{12} > 0 \\ \sqrt{\frac{(k_1 + k_3) f_b \hat{L}_{1212} - (T_{22} - T_{11}) - f_b \hat{L}_{12kl} D_{kl}^{vis}}{\rho}} & \text{para } h_{12} D_{12} \leq 0 \end{cases}$$

Simulaciones



Señal fuerte : $a = 10 \text{ m/s}^2$

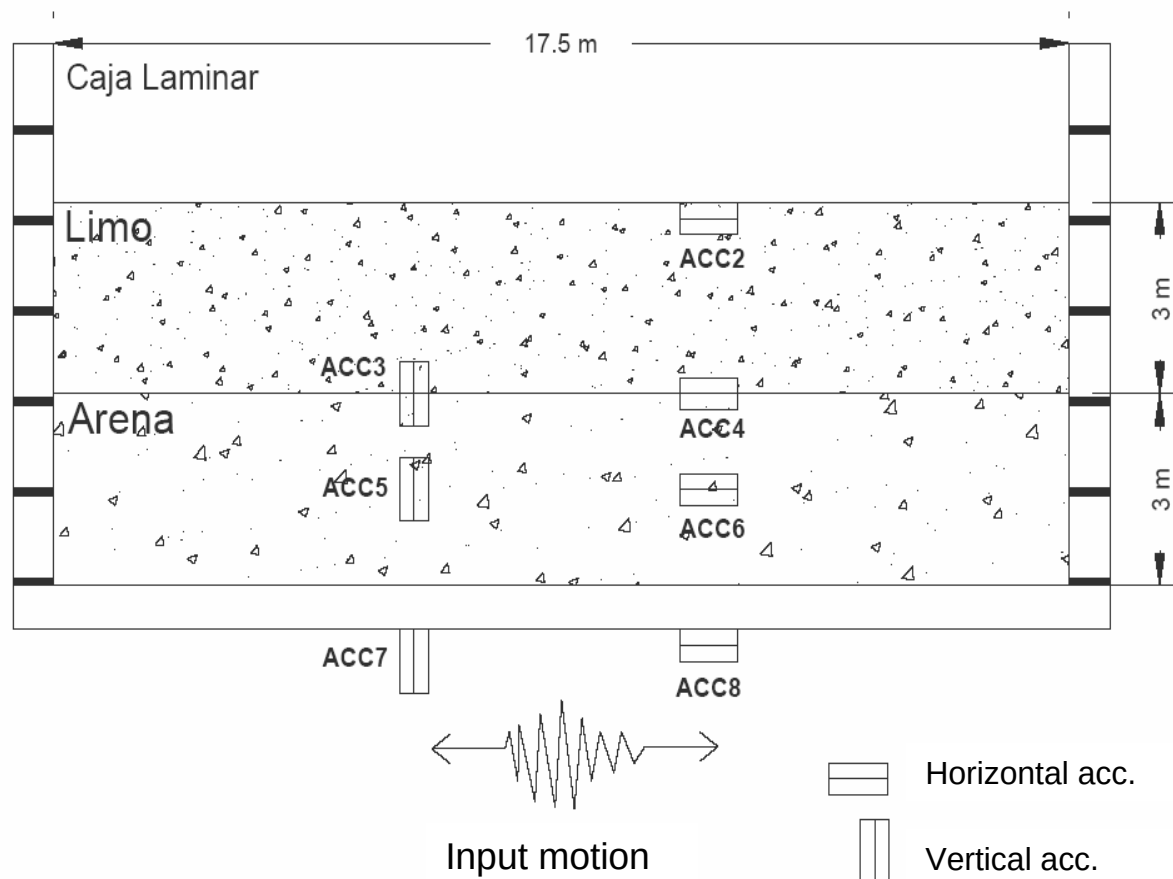
Simulaciones

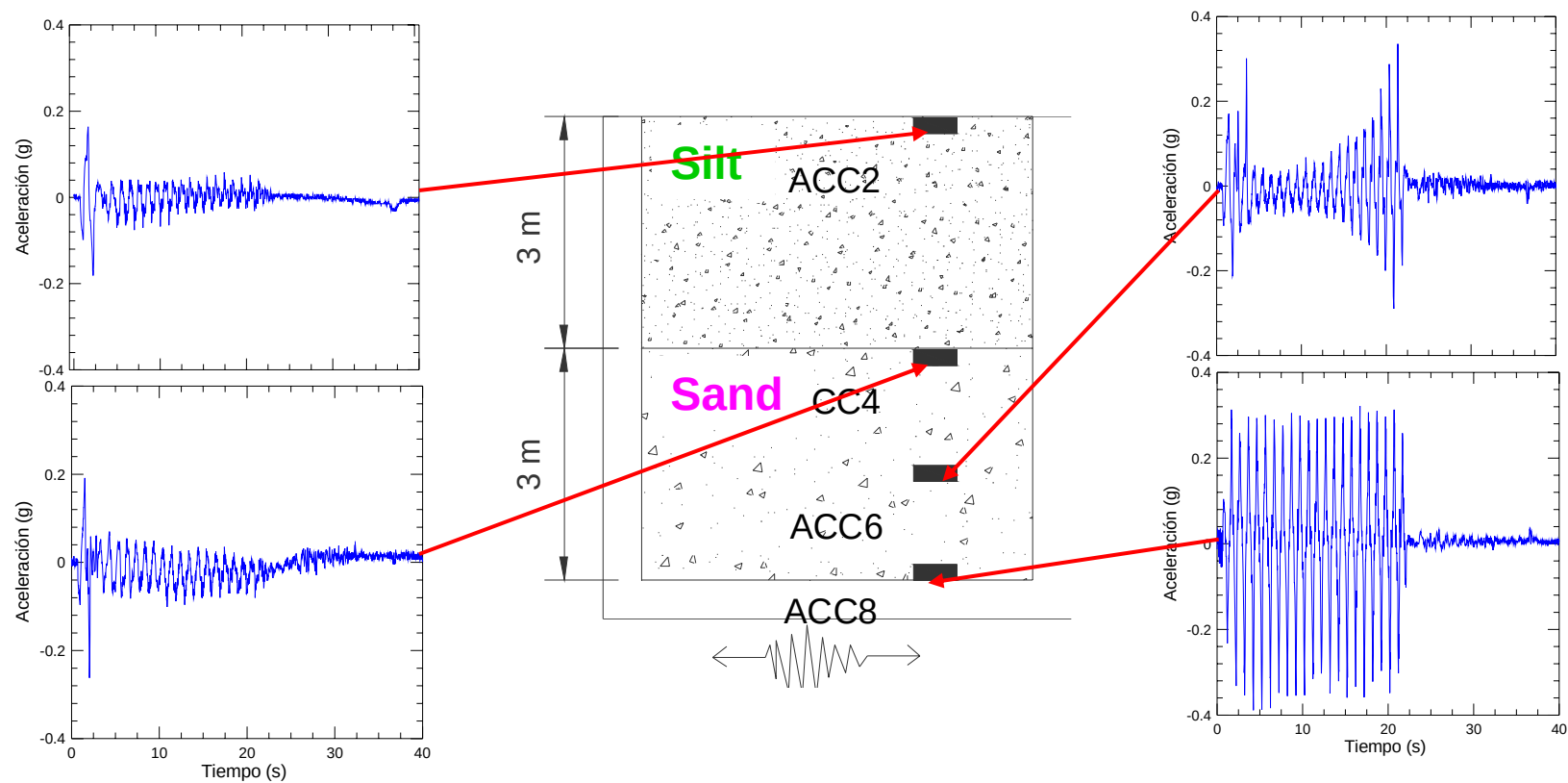


Señal débil : $a = 0.2 \text{ m/s}^2$

Problemas de valor de contorno

- Centrifuge test (VELACS: Verification of liquefaction analysis by centrifuge studies)





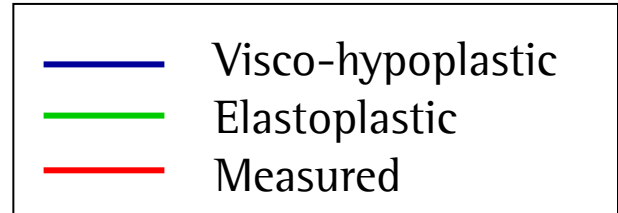
Bonnie Silt parameters

e_{100}	λ_B	κ_B	β	I_v	φ_c	Dr	m_R	m_T	R	β_R	χ
0.707	0.031	0.007	0.5	0.018	28°	7E-5	5	5	1E-4	0.05	1.5

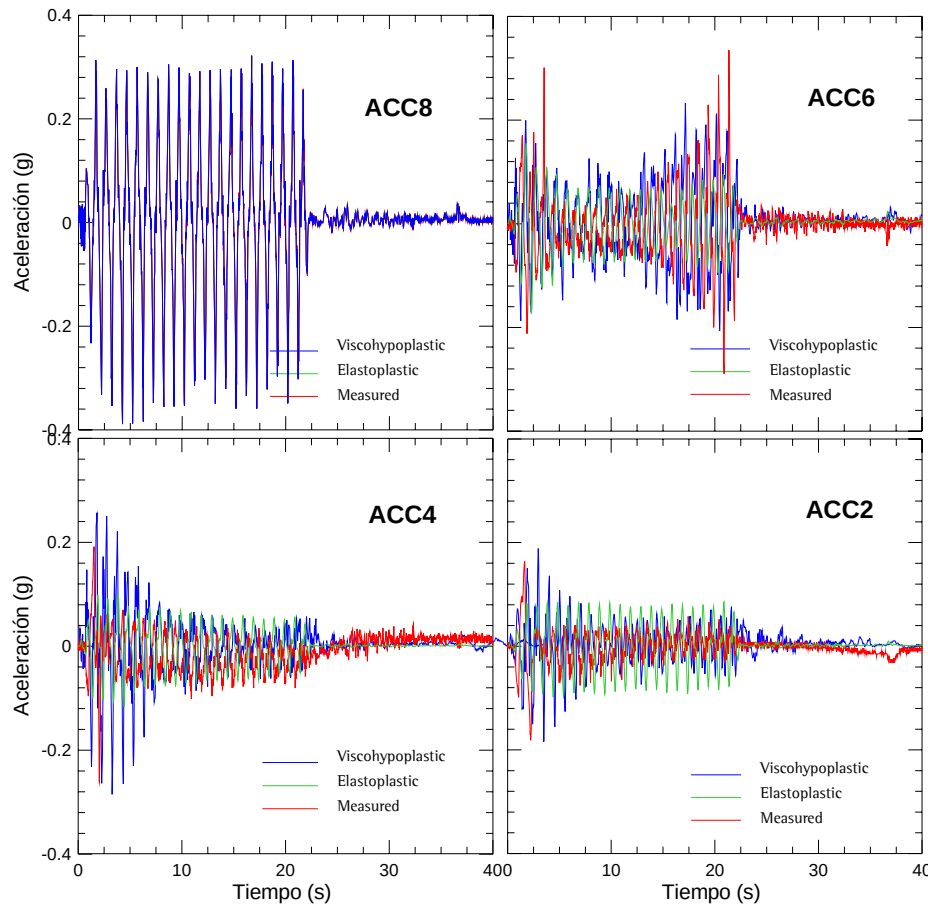
Nevada Sand parameters

hs	n	e_{co}	e_{do}	e_{io}	φ_c	α	β	m_R	m_T	R	β_R	χ
720	0.35	0.877	0.511	0.921	35°	0.19	0.95	5	5	1E-4	0.05	1

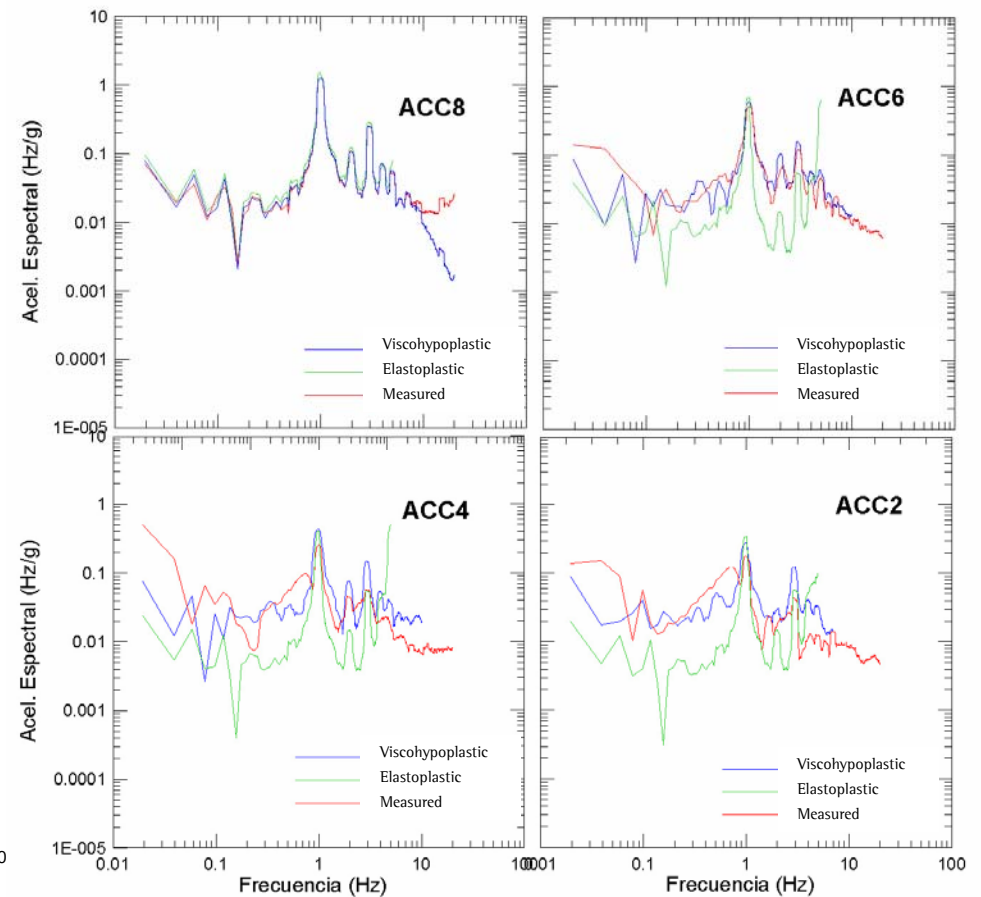
- Centrifuge FE model test:



Time histories

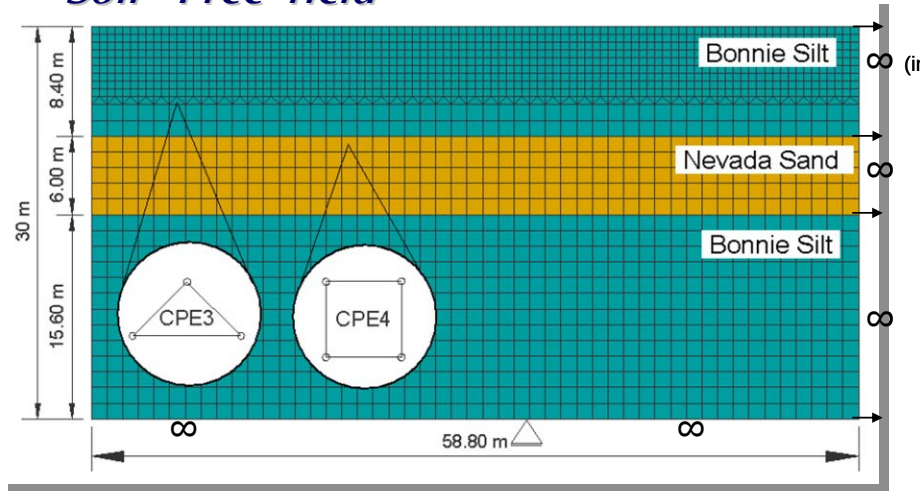


Acceleration Spectra

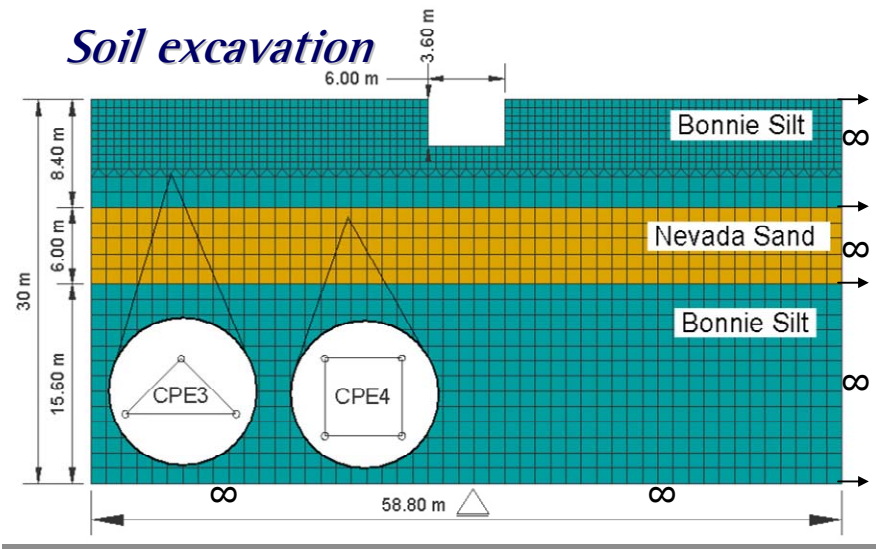


Soil Structure Interaction (SSI)

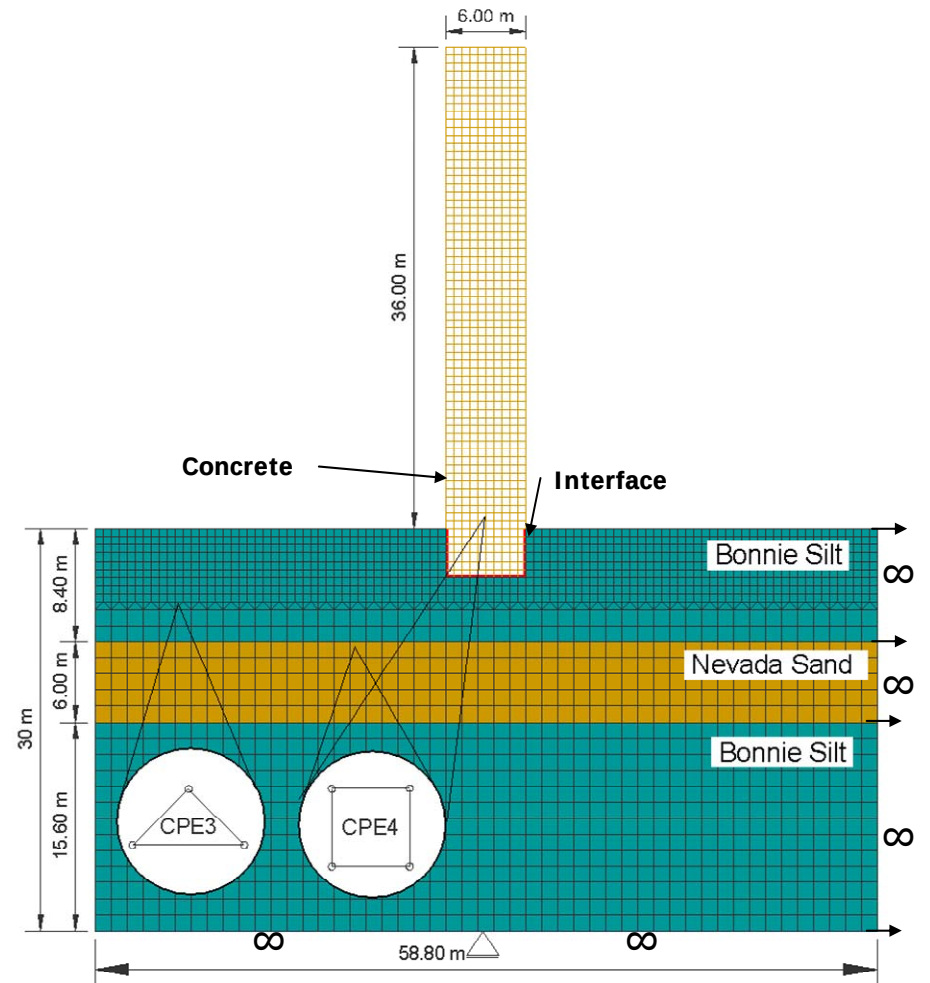
Soil "Free-field"



Soil excavation

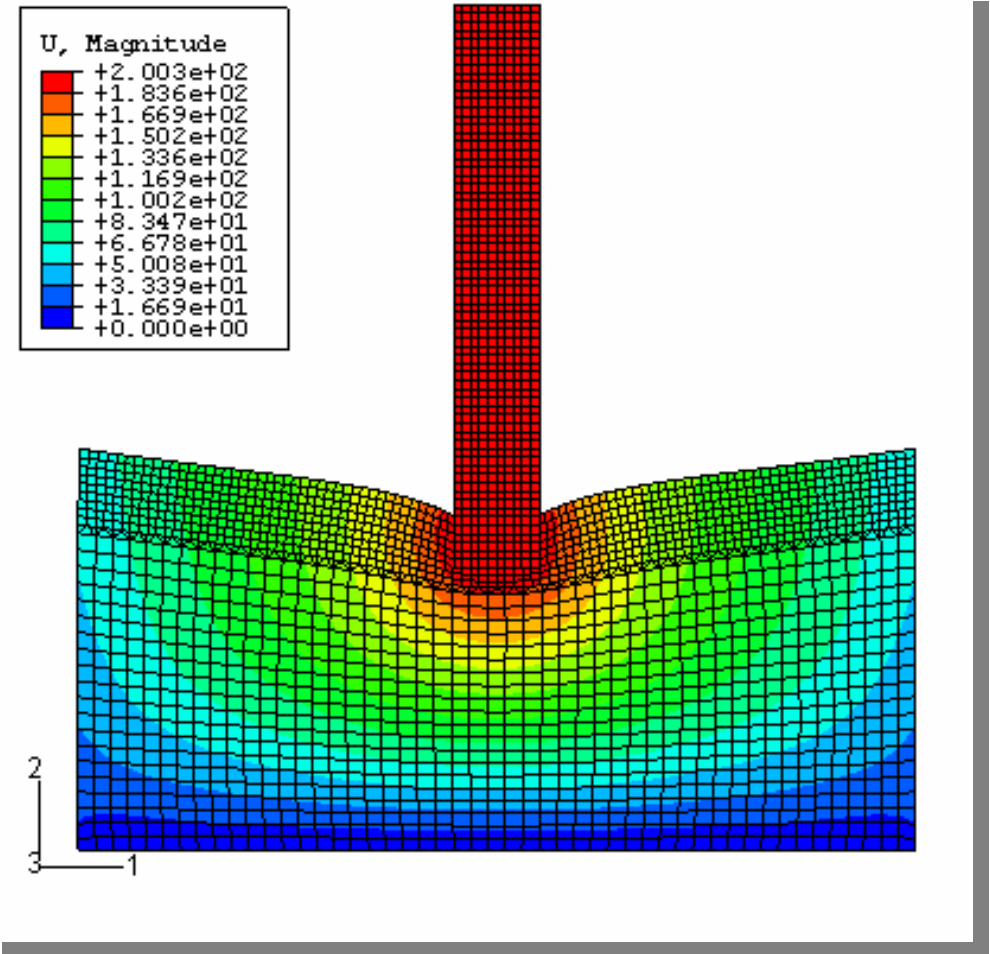
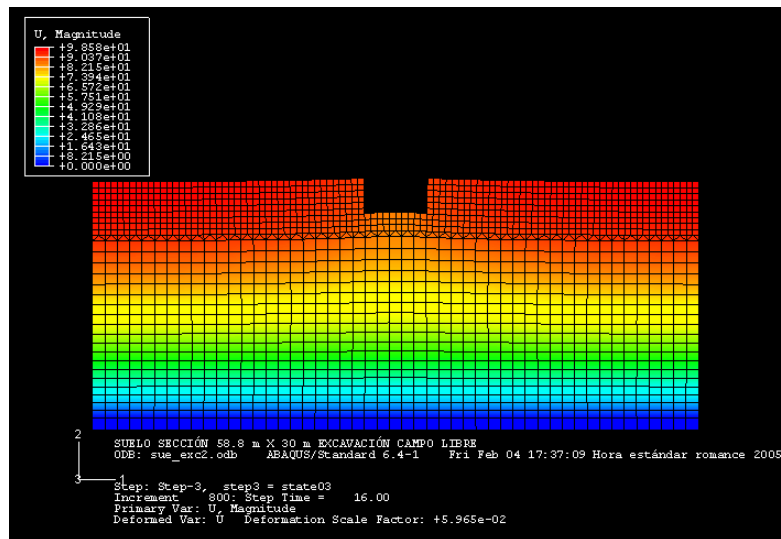
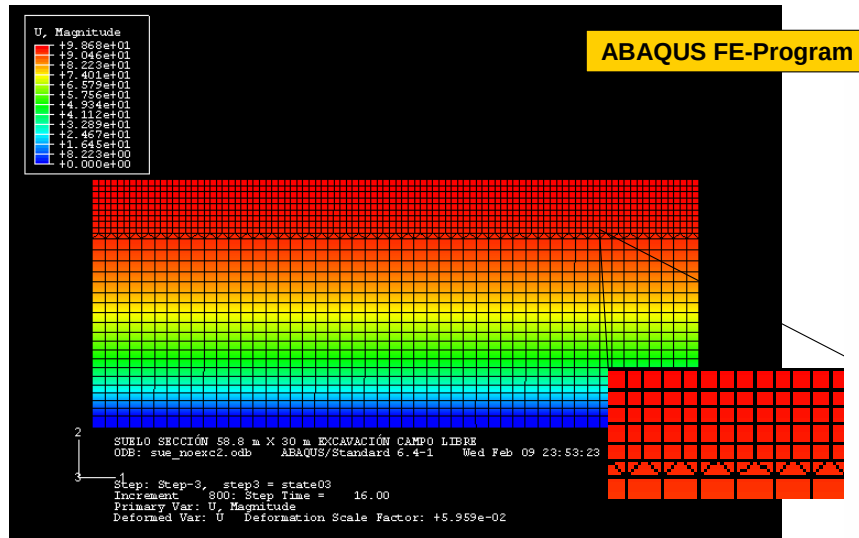


Soil-Structure

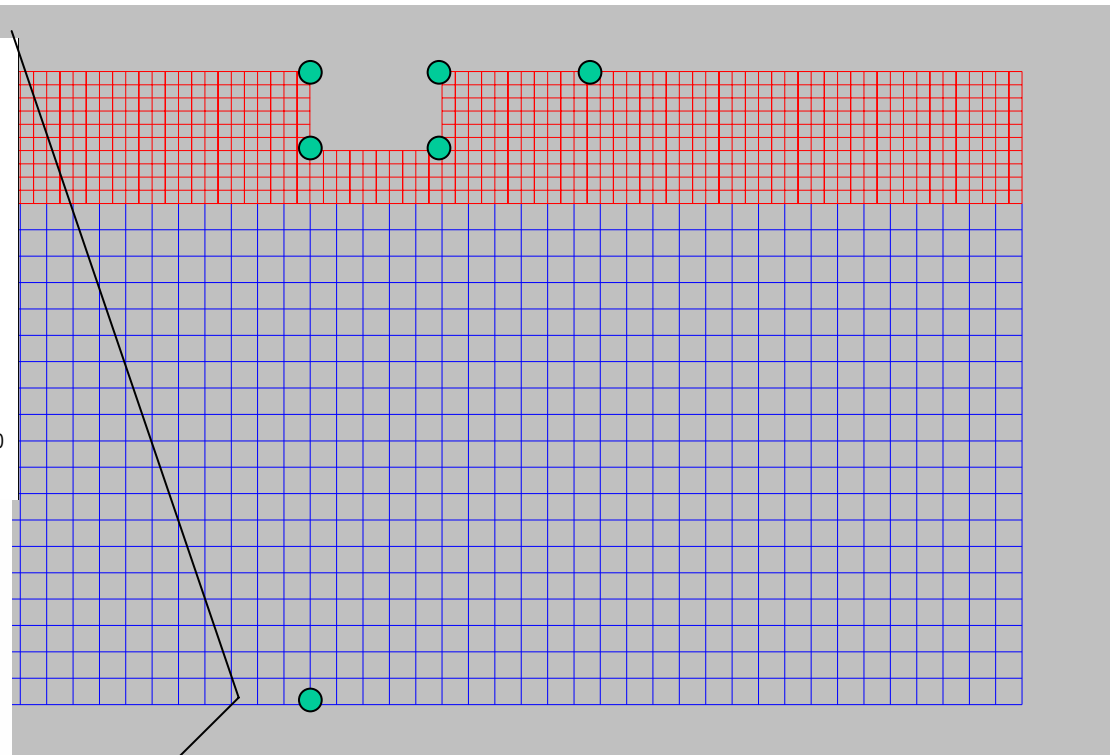
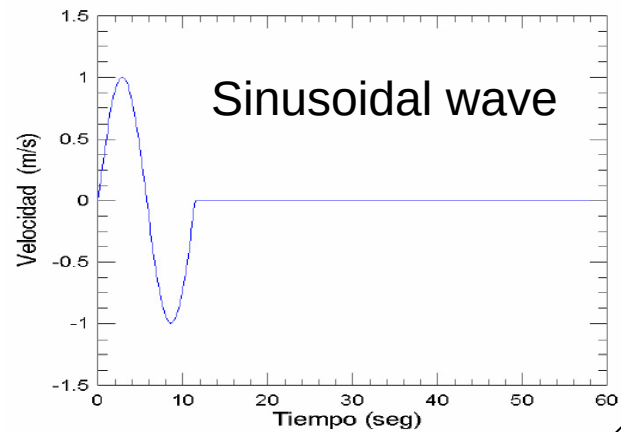
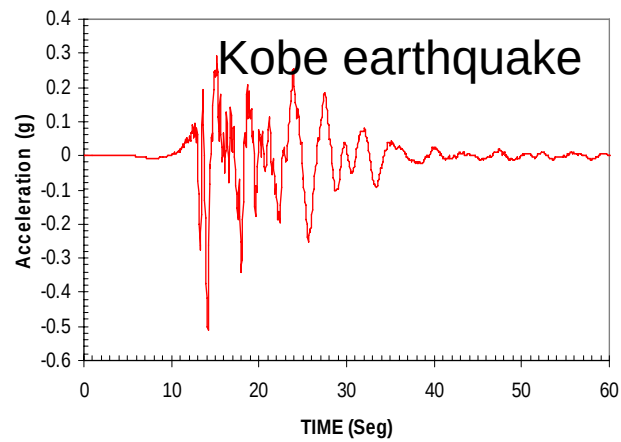


- SSI FE model:

Displacements

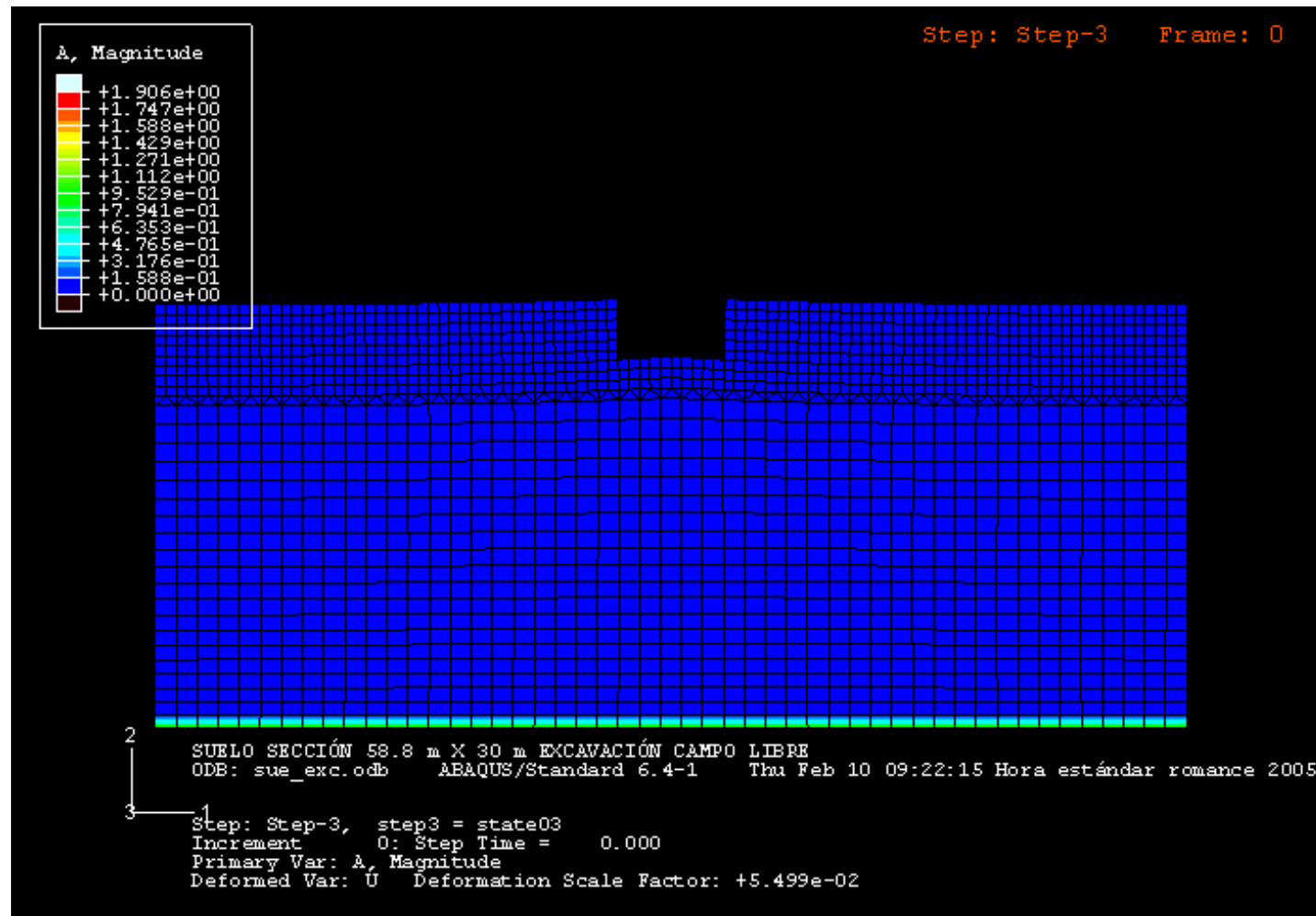


Input signal

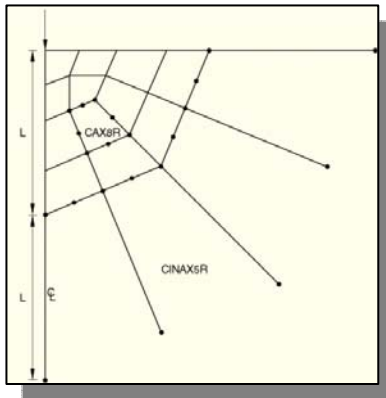


● record points

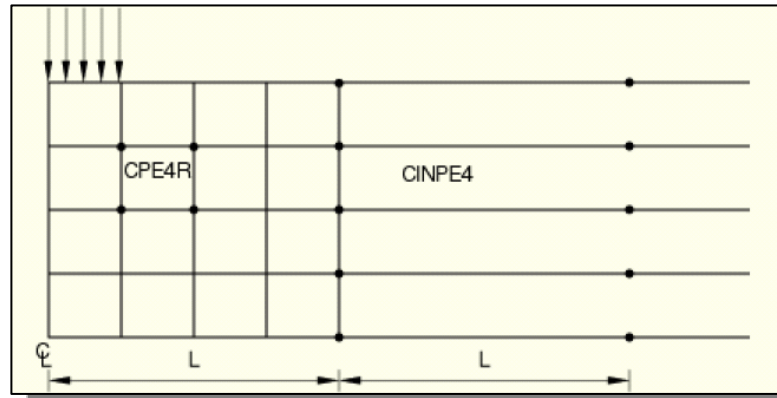
Input motion – Soil with excavation – Wave reflections



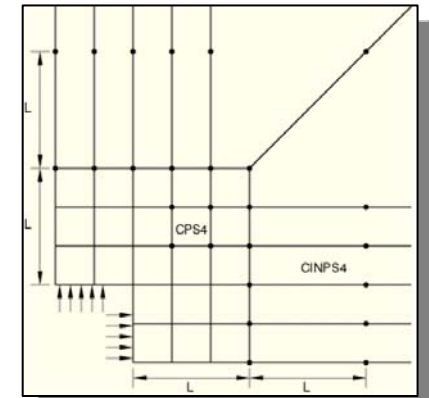
- Infinite elements



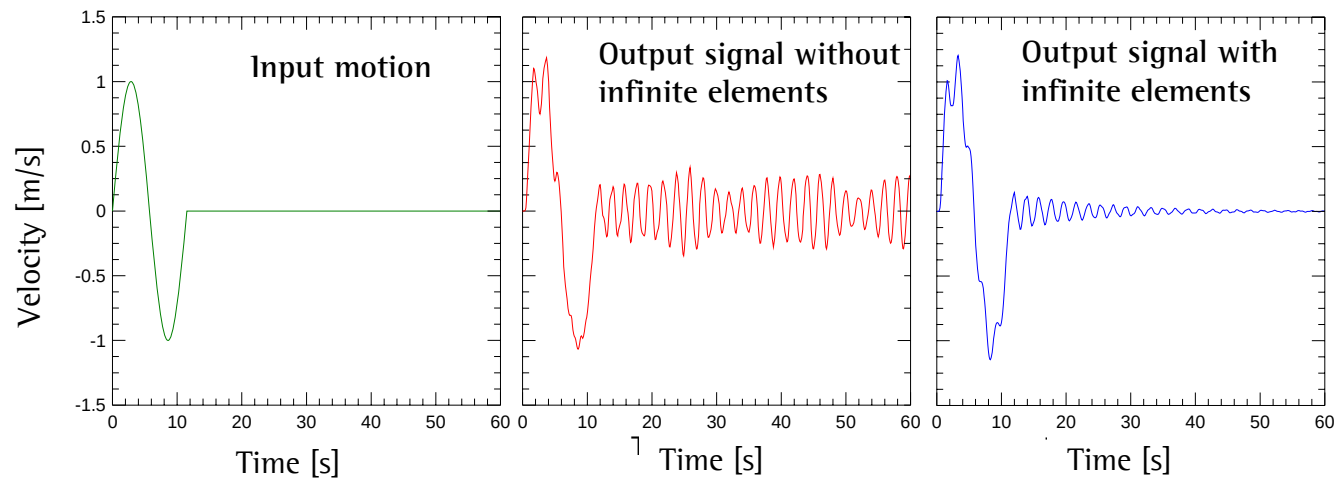
Point load on elastic half space



Strip footing on infinitely extending layer of soil.



Quarter plate with square hole.

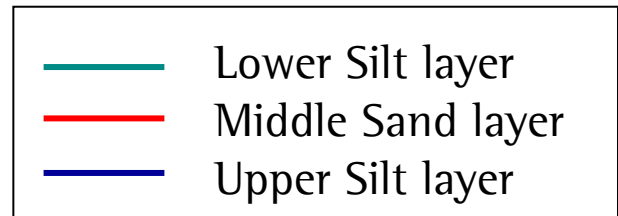


Input motion – Soil with excavation with infinite elements

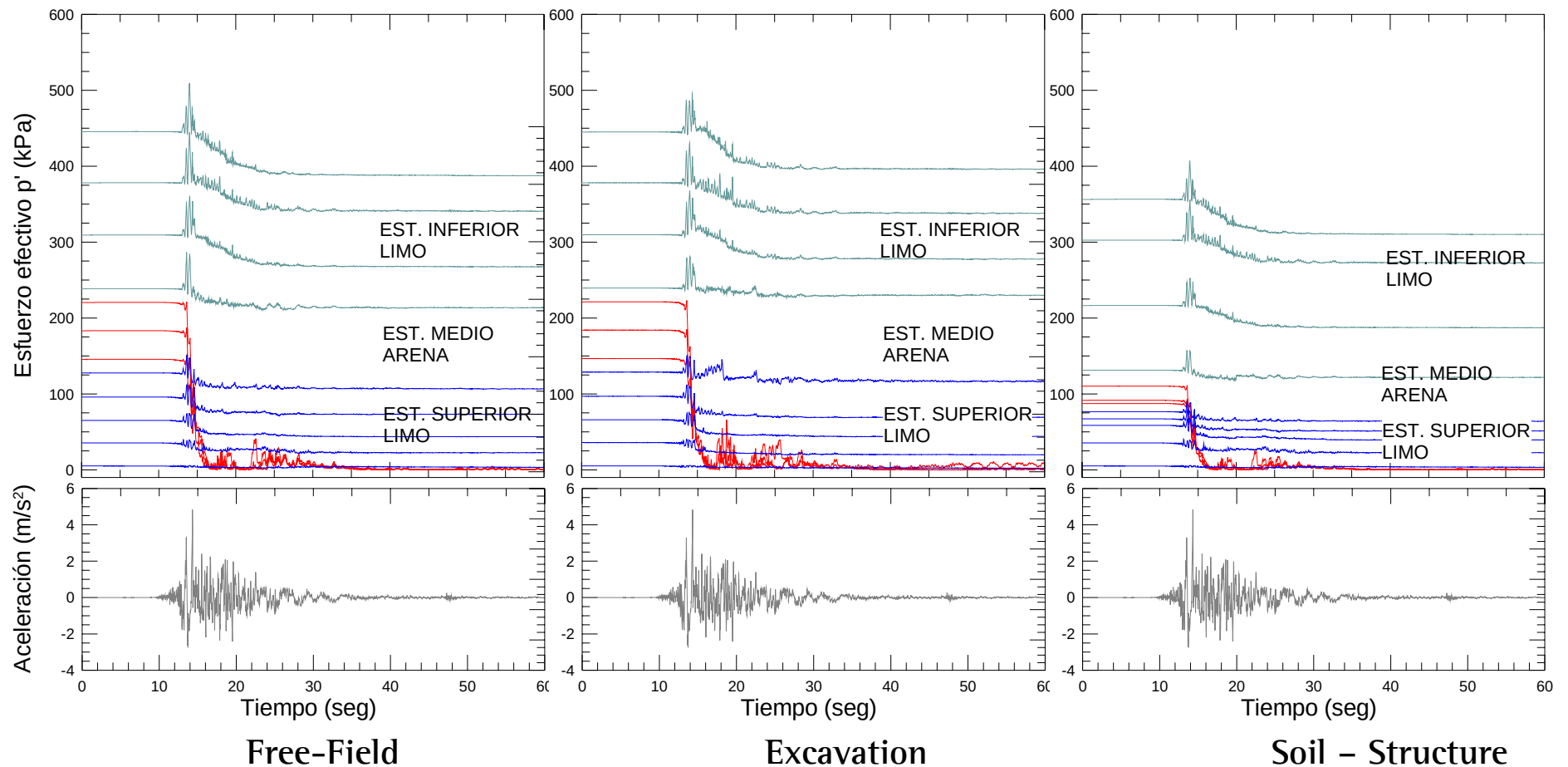


SSI FE model results

Visco-hypoplastic analysis

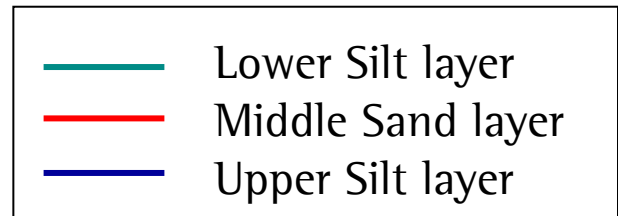


Effective Pressure

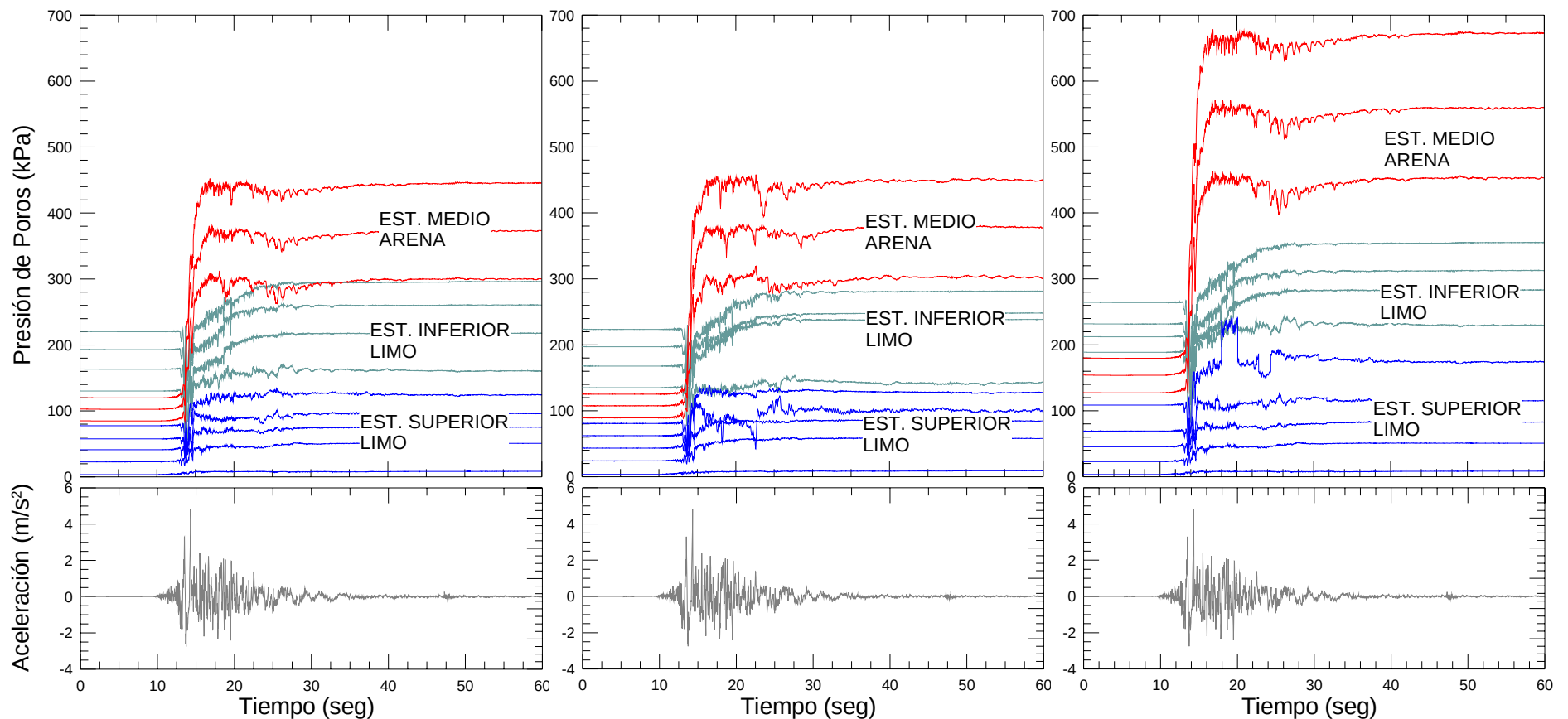


SSI FE model results

Visco-hypoplastic analysis



Pore water Pressure

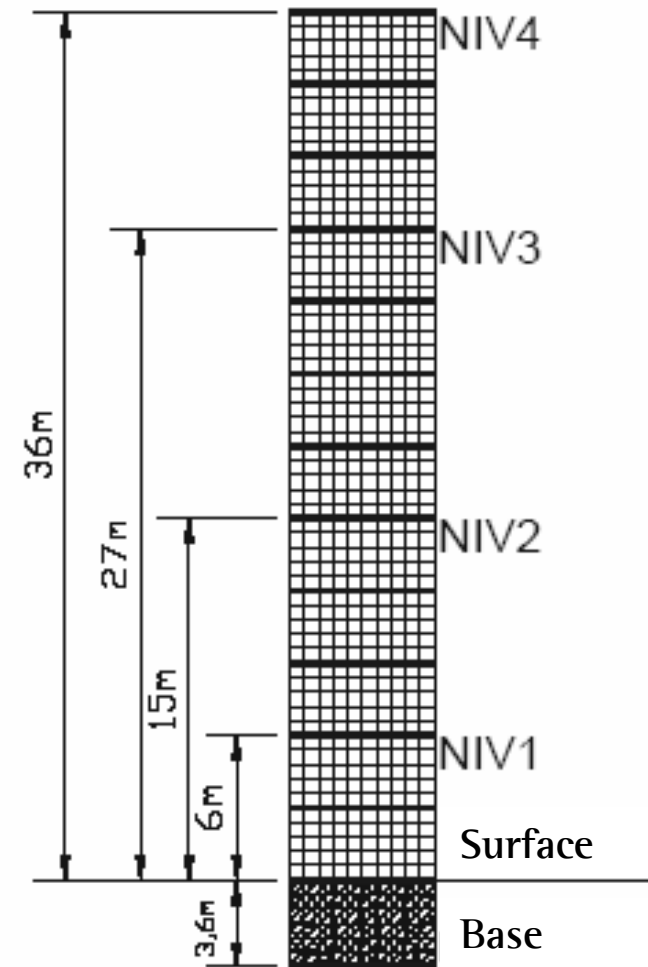
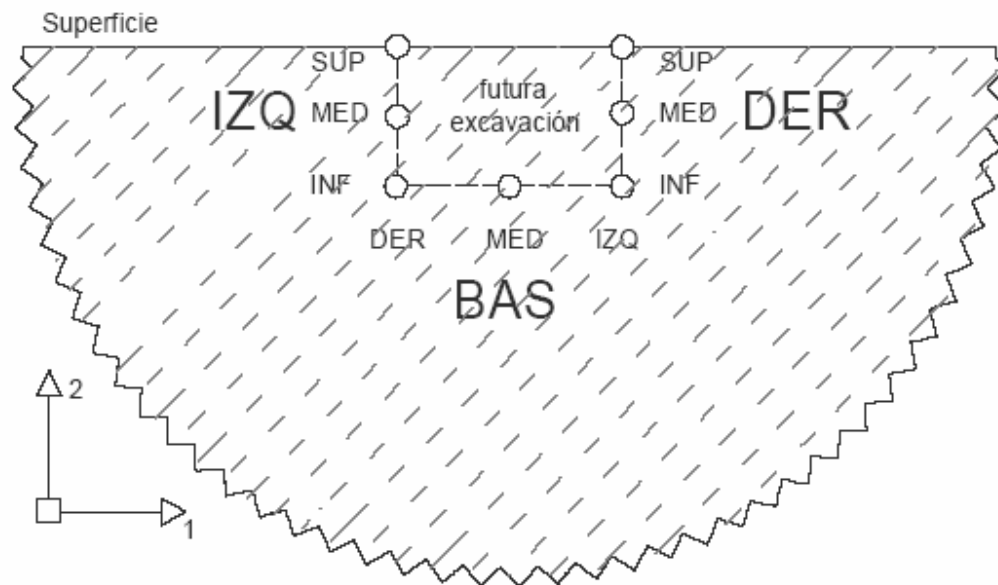


Free-Field

Excavation

Soil - Structure

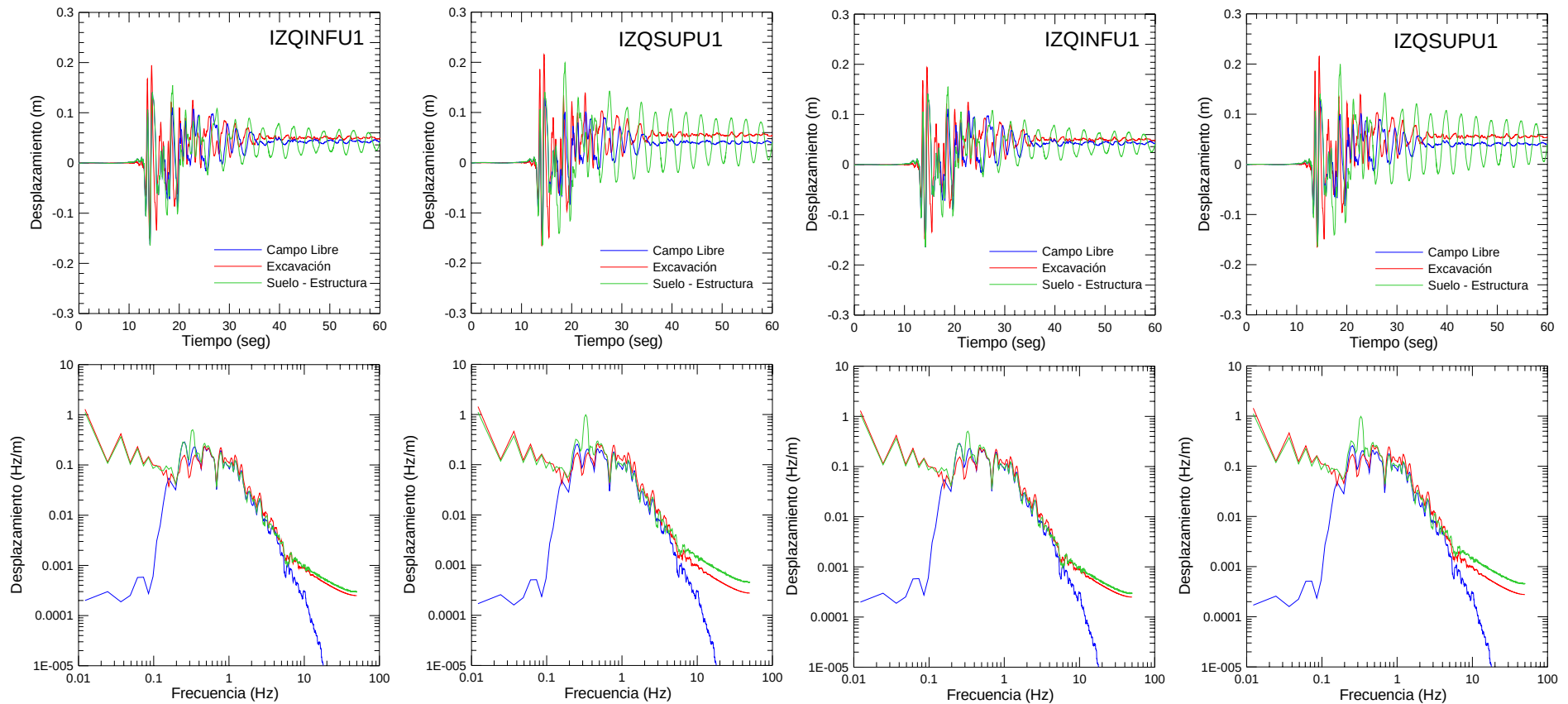
Convenciones de la estructura



SSI FE model results

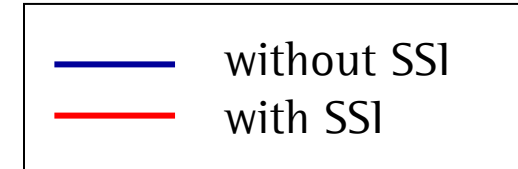
Visco-hypoplastic analysis

Displacements

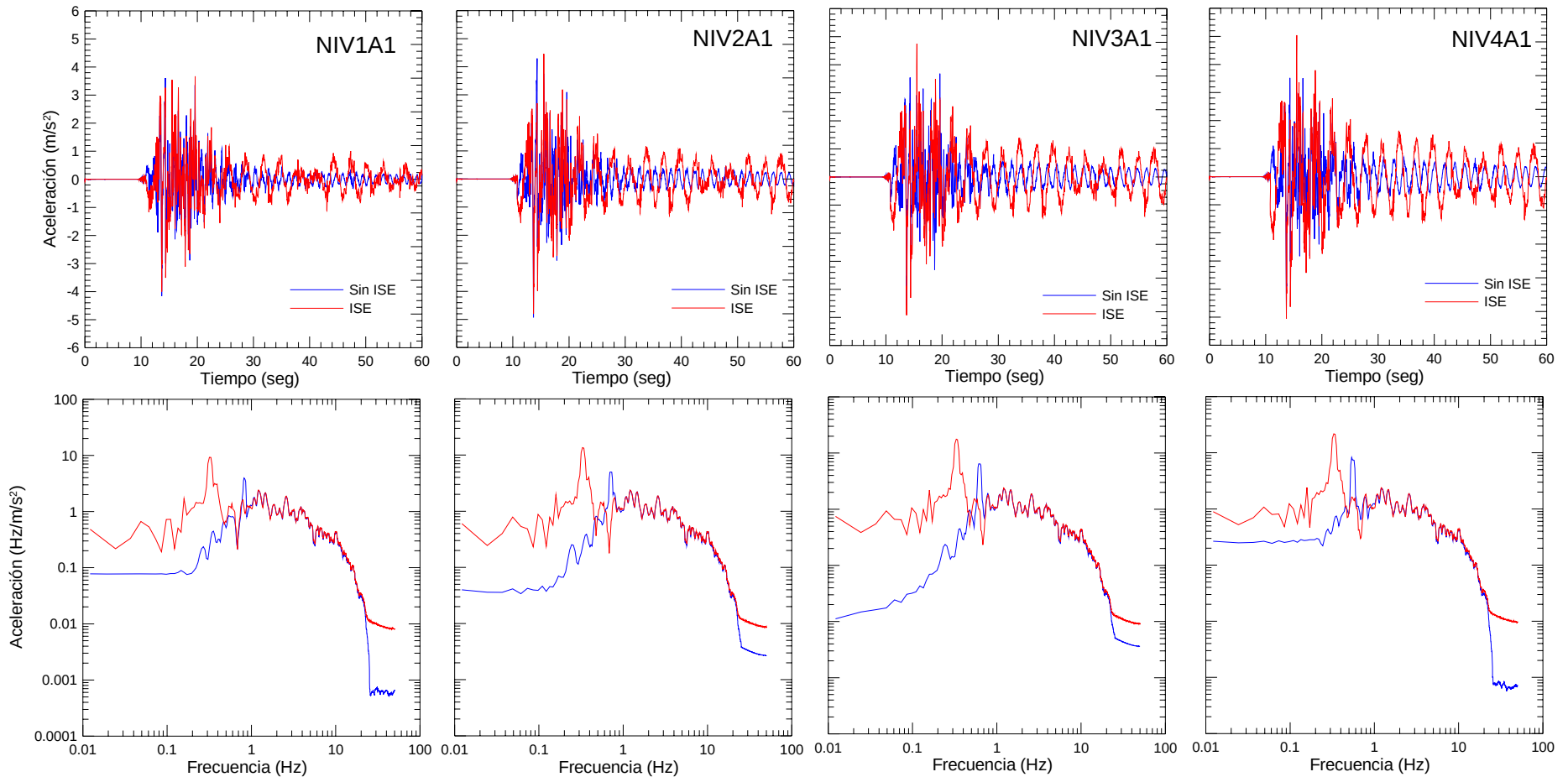


SSI FE model results

Visco-hypoplastic analysis

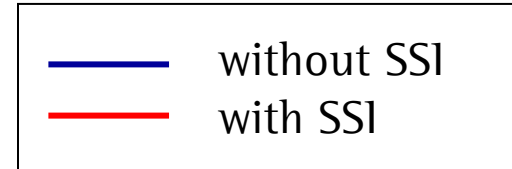


Accelerations in the structure

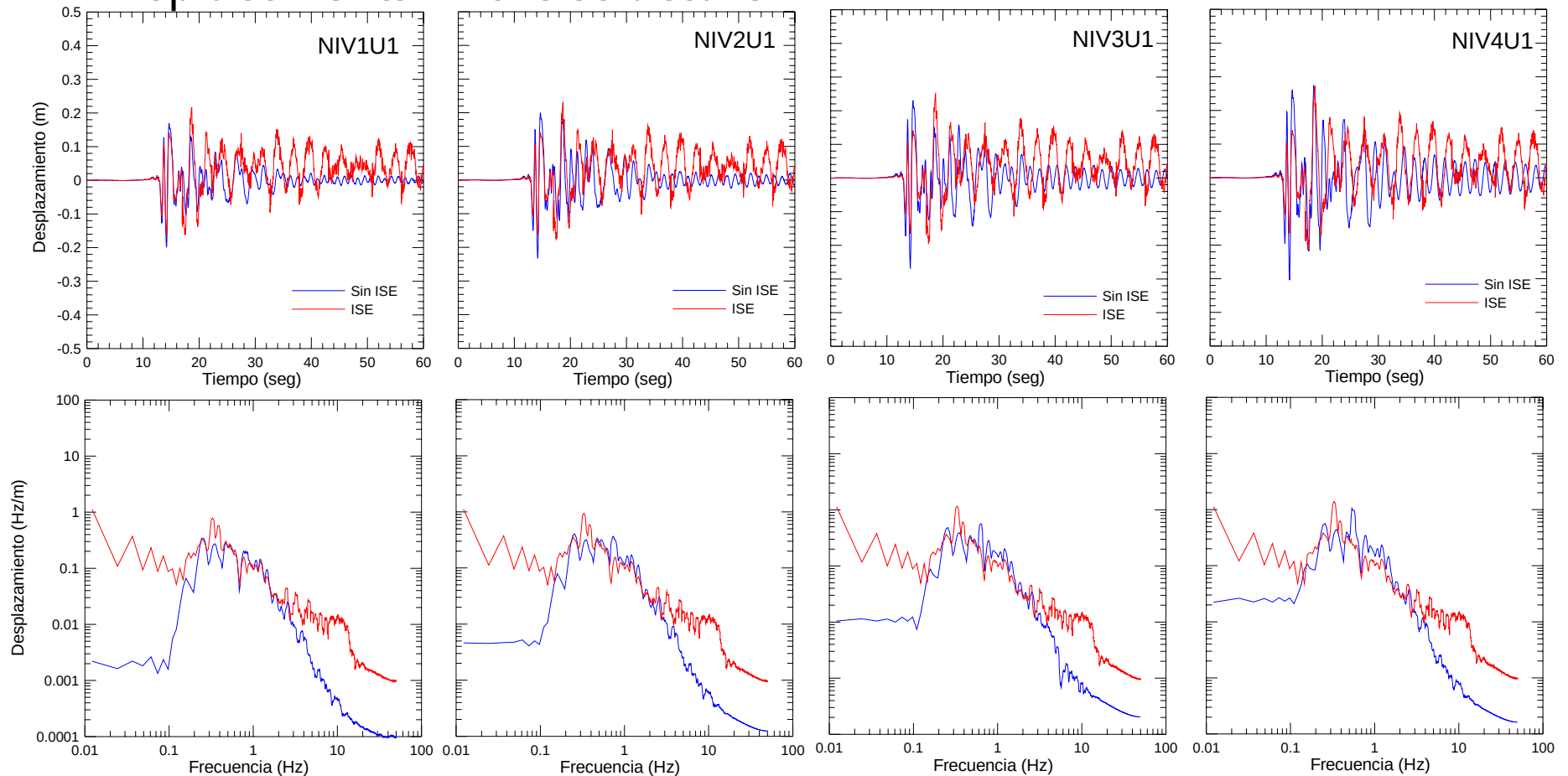


SSI FE model results

Visco-hypoplastic analysis



Displacements in the structure



Conclusiones

- El modelo es capaz de absorber energía y amortiguar la amplitud de las ondas cortantes según su intensidad: a mayor intensidad mayor amortiguamiento.
- Los resultados de las simulaciones sugieren la existencia de una envolvente de aceleraciones máxima que depende de la resistencia del material

Conclusiones

- La presencia de una estructura en la superficie del suelo cambia su estado de esfuerzos efectivos y por tanto su resistencia. Esto hace que las aceleraciones máximas en superficie cambien respecto a las obtenidas para el suelo sin estructura
- Como el modelo puede calcular la presión de poros, es posible la simulación de la consolidación que ocurre después del sismo (efecto post-sismo).

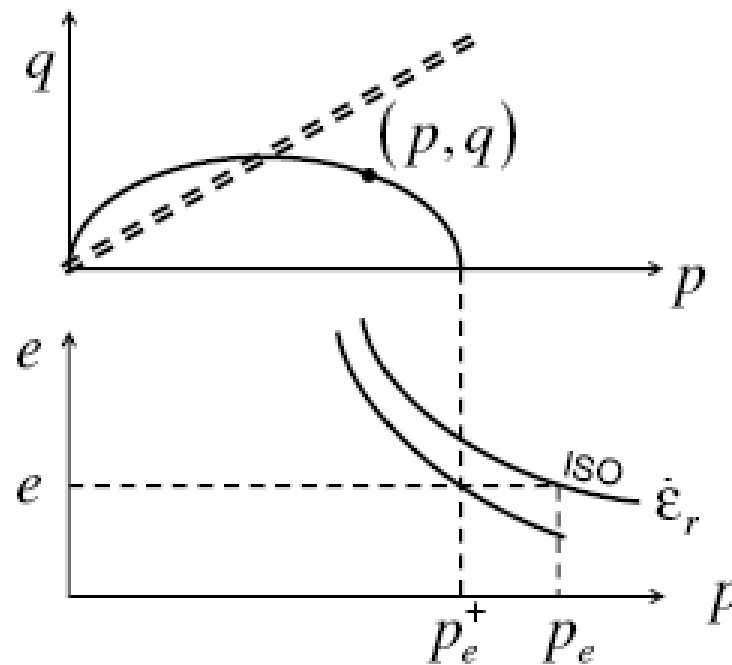
Los “NO” de la modelación matemática

S. W. Golomb, Simulation 14 (1970), 197-198.

- DON'T believe that the model is the reality
- DON'T extrapolate beyond the region of fit
- DON'T distort reality to fit the model
- DON'T retain a discredited model
- DON'T fall in love with your model

Muchas gracias por su atención





$$OCR = \frac{p_e}{p_e^+}$$

$$p_e^+ = \frac{p}{\beta_R - 1} \left[\beta_R \sqrt{1 + \eta^2 (\beta_R^2 - 1)} - 1 \right] \quad \text{para } \eta < 1$$

$$p_e^+ = p (1 + \eta^2) \frac{1 + \beta_R}{2} \quad \text{para } \eta > 1$$

$$\eta = \frac{q}{M_p}$$

