



RC 2018 xvii Reunión
del **CONCRETO**

El evento del Cemento, el Concreto y los Prefabricados



CONSIDERACIONES PARA EL DISEÑO SISMO-RESISTENTE DE INFRAESTRUCTURA PORTUARIA

Carlos E. Ospina, PhD, PE

BergerABAM Inc.

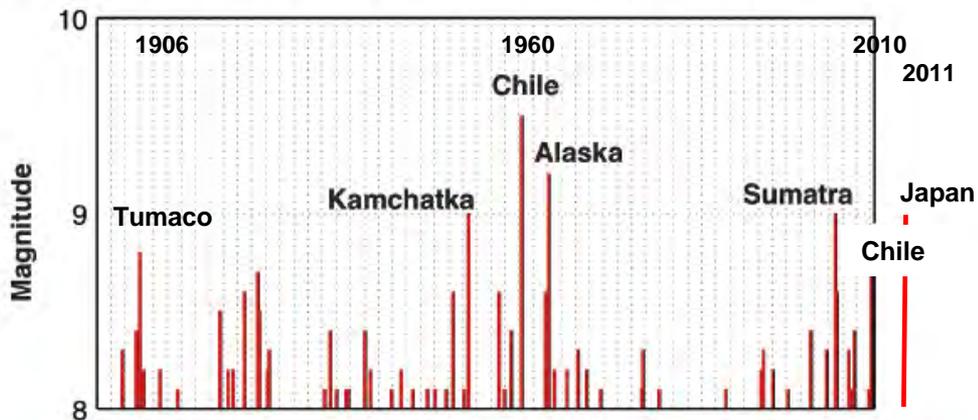
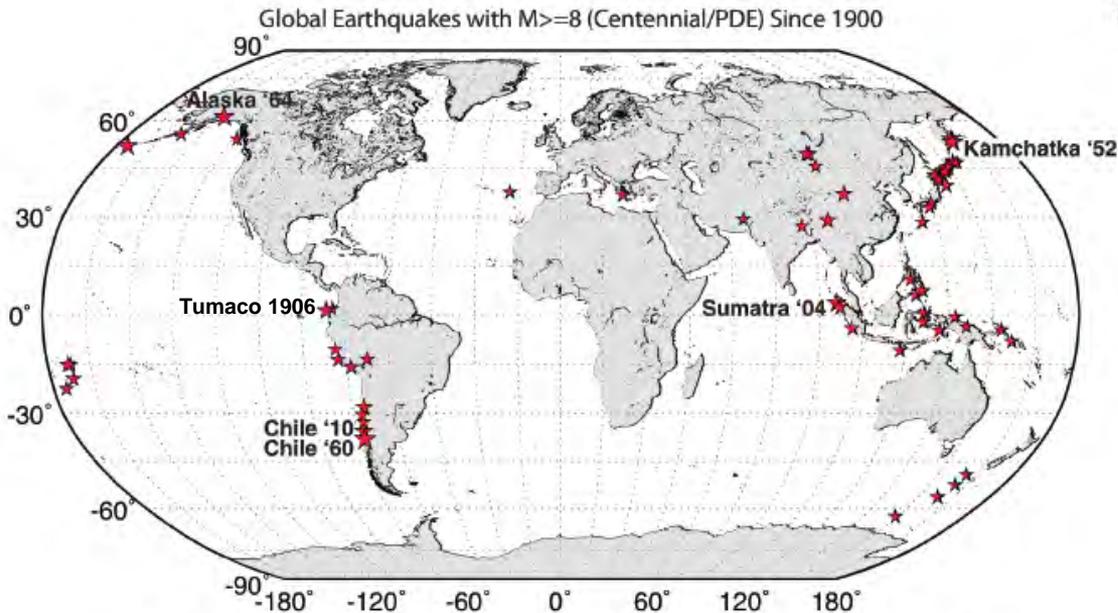
Houston, TX, Estados Unidos

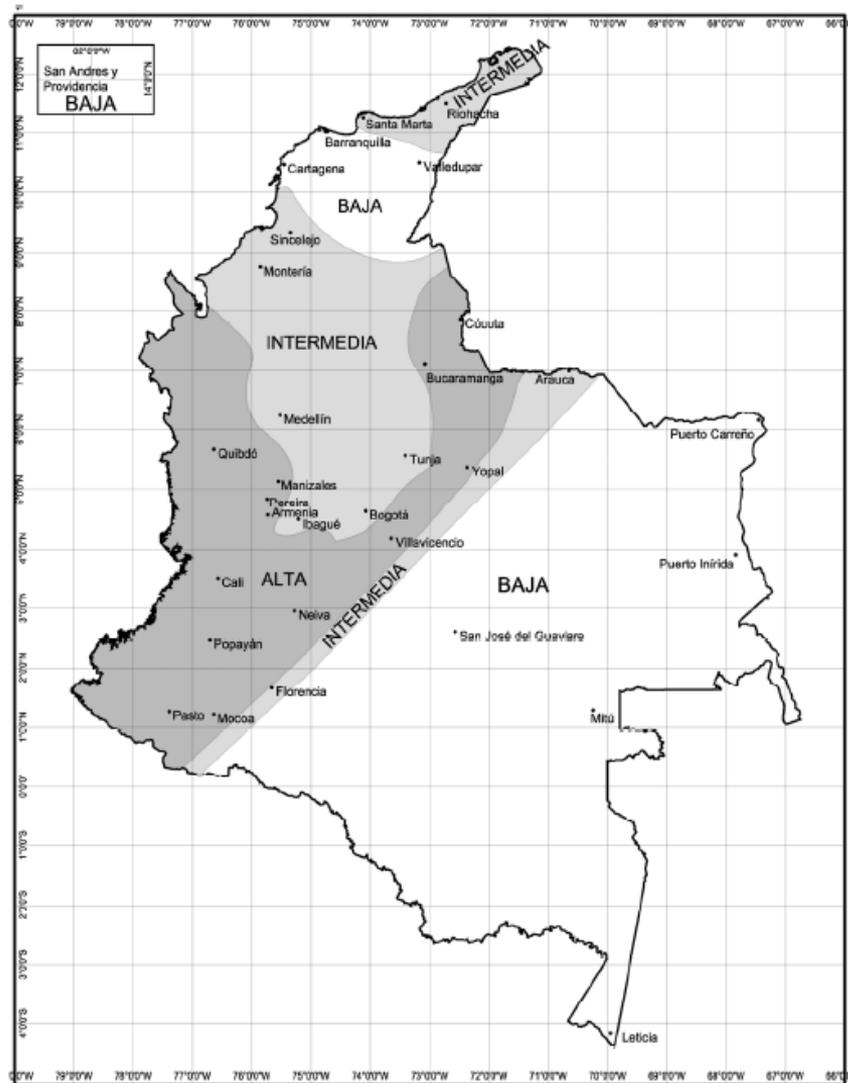
Organización

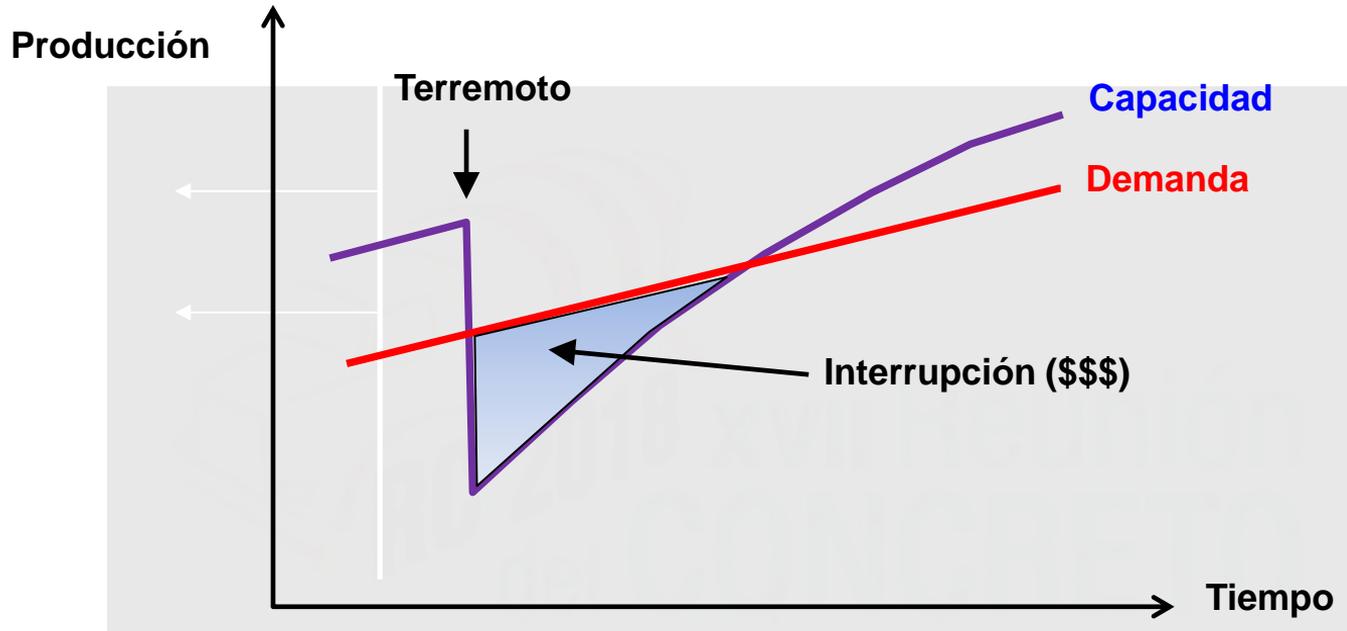
- Motivación
- Alcance
- Filosofía de diseño sismo-resistente de muelles
- Consideraciones técnicas
- Conclusiones

Motivación

- El diseño sismo-resistente de muelles difiere de los conceptos tradicionales utilizados en el diseño sismo-resistente de edificios.
- Construcción horizontal \neq Construcción vertical
- En el país no existe una norma especializada para el diseño sismo-resistente de muelles.

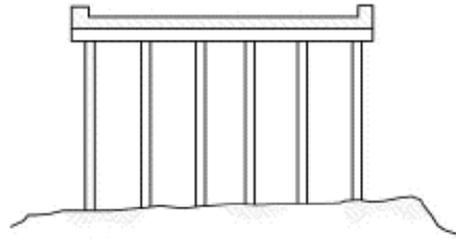




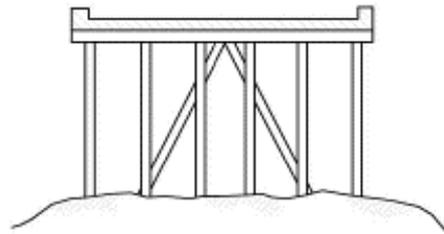


Pérdida total = Σ pérdidas en el tiempo + costos de reparación

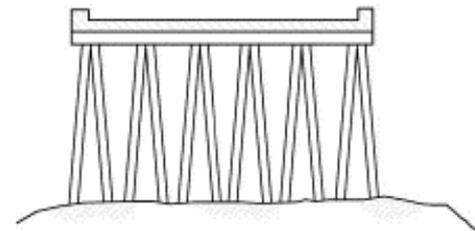
Alcance: Muelles Abiertos



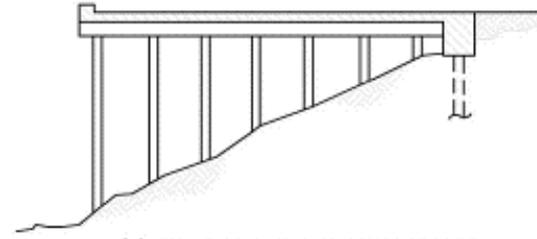
(A) ALL PLUMB PILE PIER



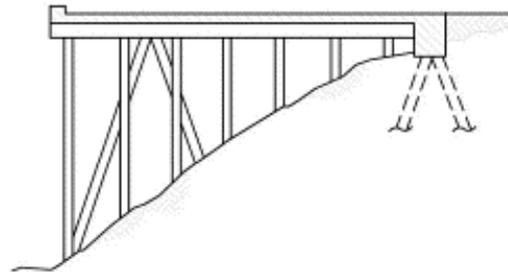
(B) PLUMB & BATTER PILE PIER



(C) ALL BATTER PILE PIER



(D) ALL PLUMB PILE MARGINAL WHARF



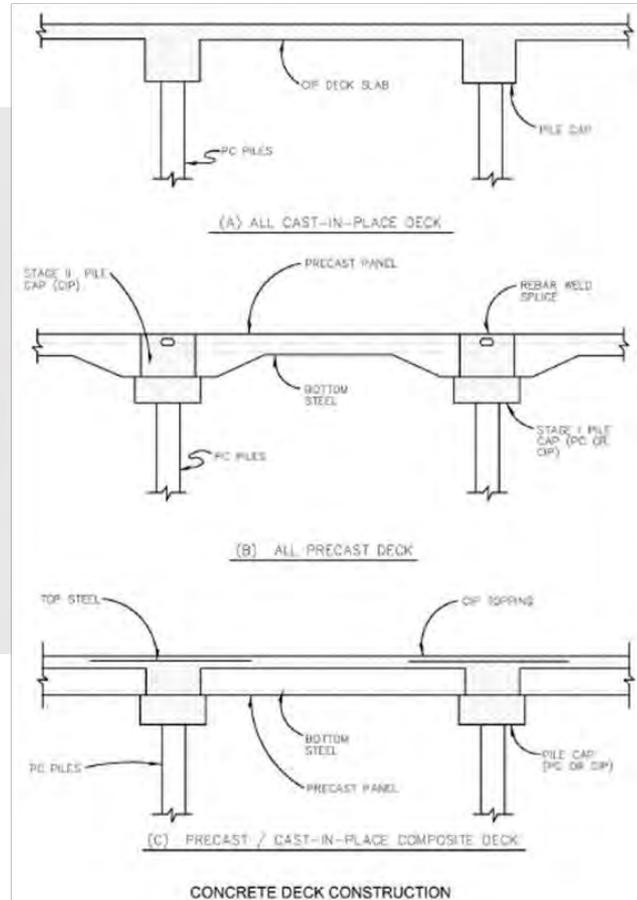
(D) PLUMB & BATTER PILE MARGINAL WHARF

Superestructura

Vaciada en sitio

Prefabricada

Combinada



Muelles en espolón



Muelles marginales



Otras configuraciones



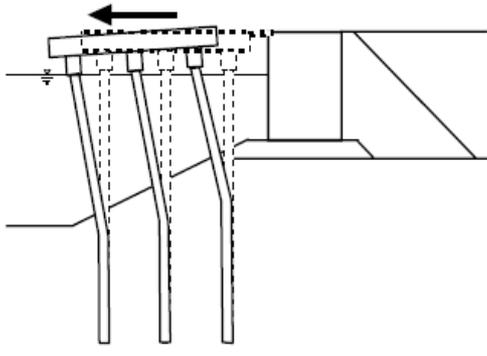
Sismo-resistencia de muelles

- Edificios (ASCE/SEI 7-10):
 - MCE: 2500 años (No colapso)
 - Sismo de diseño: 2/3 MCE (seguridad)
- Muelles (ASCE/COPRI 61-19):
 - No es fácil distinguir entre seguridad y no colapso.
 - Tres sismos de diseño (OLE (75 años), CLE (475 años), DE (1000 años)) según el “daño” que se acepte
 - Incluye estado límite de licuefacción, con probabilidad similar a la del ASCE/SEI 7-10.

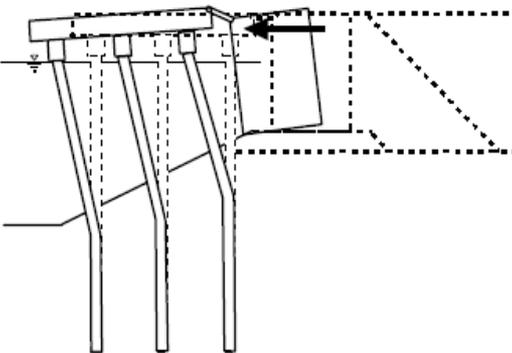
Sismo-resistencia – Muelles Abiertos

- Códigos modernos (diseño basado en desplazamientos)
 - PIANC
 - UFC 4-152-01
 - California Marine Oil TErMinal Standard (MOTEMS)
 - POLA
 - POLB
 - ASCE/COPRI 61-14 (2019 Revision)

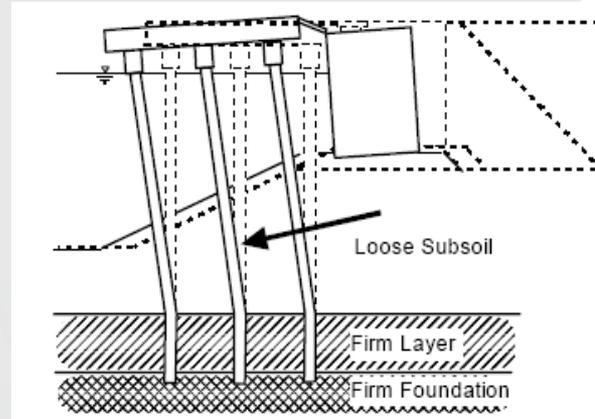
Modos de falla en muelles abiertos (PIANC)



Deformación del muelle



Desplazamiento del tablaestacado



Deformación del suelo

Filosofía: Desempeño según importancia (PIANC)

Nivel de desempeño	Definición
S	Estructuras esenciales e imprescindibles
A	Estructuras importantes, difíciles de reparar
B	Estructuras convencionales
C	Estructuras pequeñas de fácil reparación

Nivel de daño aceptable (PIANC)

Table 1 Acceptable level of damage in performance-based design*

Acceptable level of damage	Structural	Operational
Degree I : Serviceable	Minor or no damage	Little or no loss of serviceability
Degree II: Repairable	Controlled damage**	Short-term loss of serviceability***
Degree III: Near collapse	Extensive damage in near collapse	Long-term or complete loss of serviceability
Degree IV: Collapse****	Complete loss of structure	Complete loss of serviceability

* Considerations: Protection of human life and property, functions as an emergency base for transportation, and protection from spilling hazardous materials, if applicable, should be considered in defining the damage criteria in addition to those shown in this table.

** With limited inelastic response and/or residual deformation

*** Structure out of service for short to moderate time for repairs

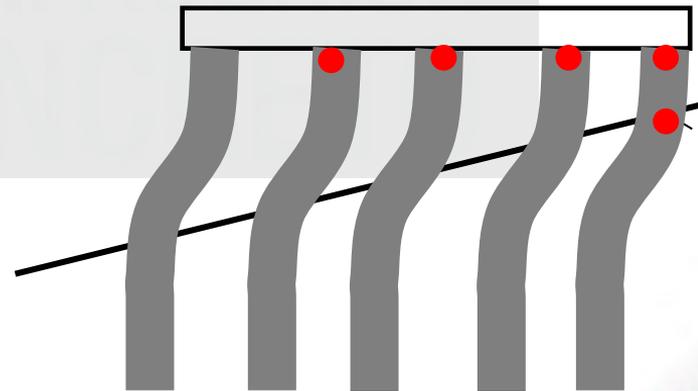
**** Without significant effects on surroundings

Diseño basado en desempeño

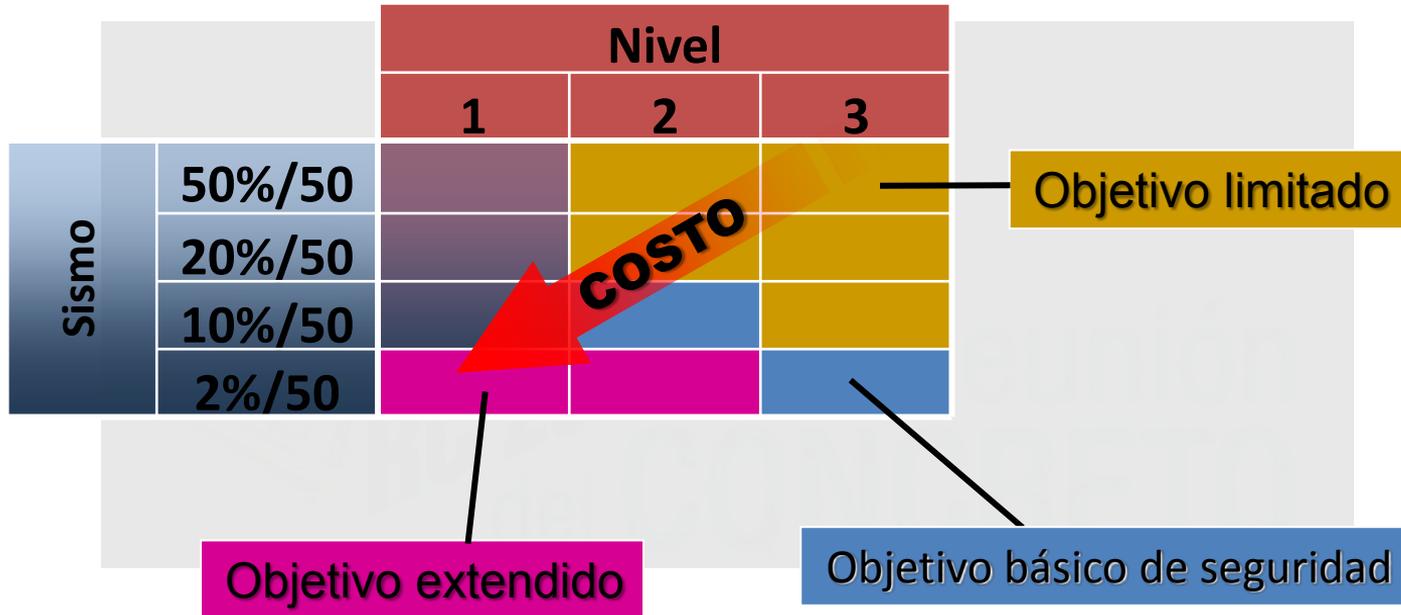
- Diseñar el muelle para que tenga un comportamiento estructural determinado, junto con niveles de daño permitidos ante acciones sísmicas pre-establecidas.
- Es importante definir los sismos de diseño con su correspondiente umbral de daño.

Filosofía de diseño sismo-resistente

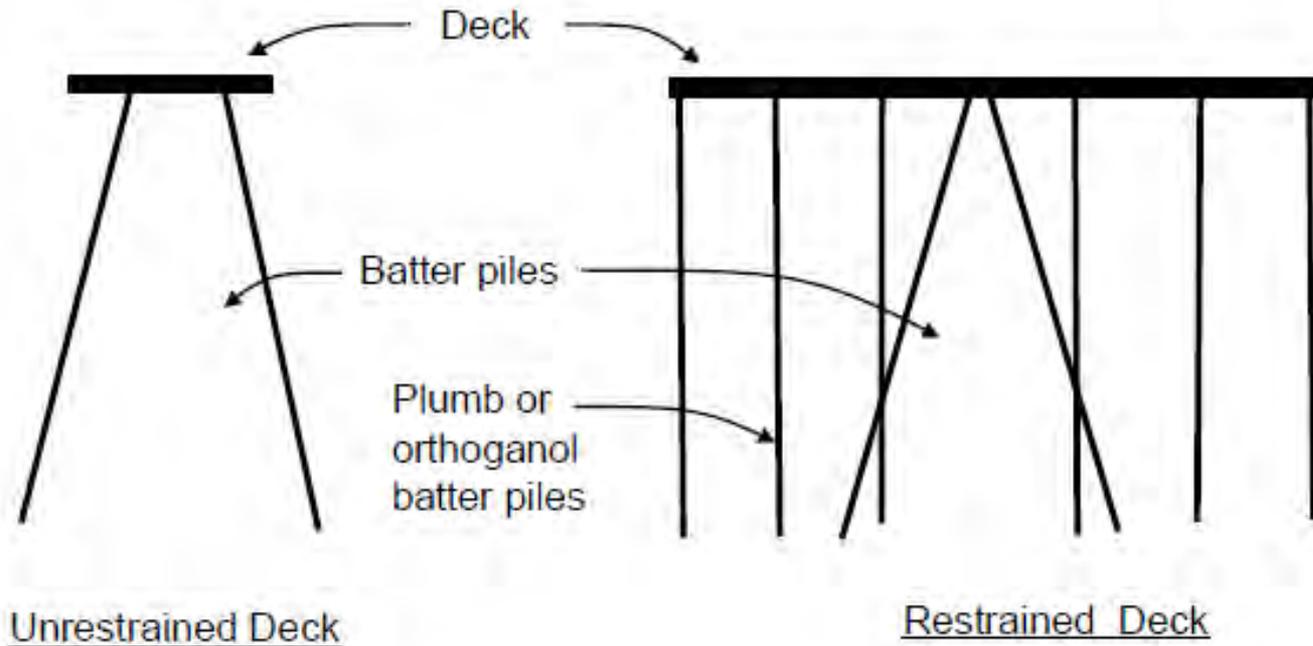
- Se permite respuesta inelástica en algunos pilotes. Se evitan rótulas plásticas donde sea difícil repararlas.
- El tablero permanece elástico.
- Desplazamiento lateral es función del daño que se acepte.
- Principios de protección de capacidad.
- Interacción suelo-estructura



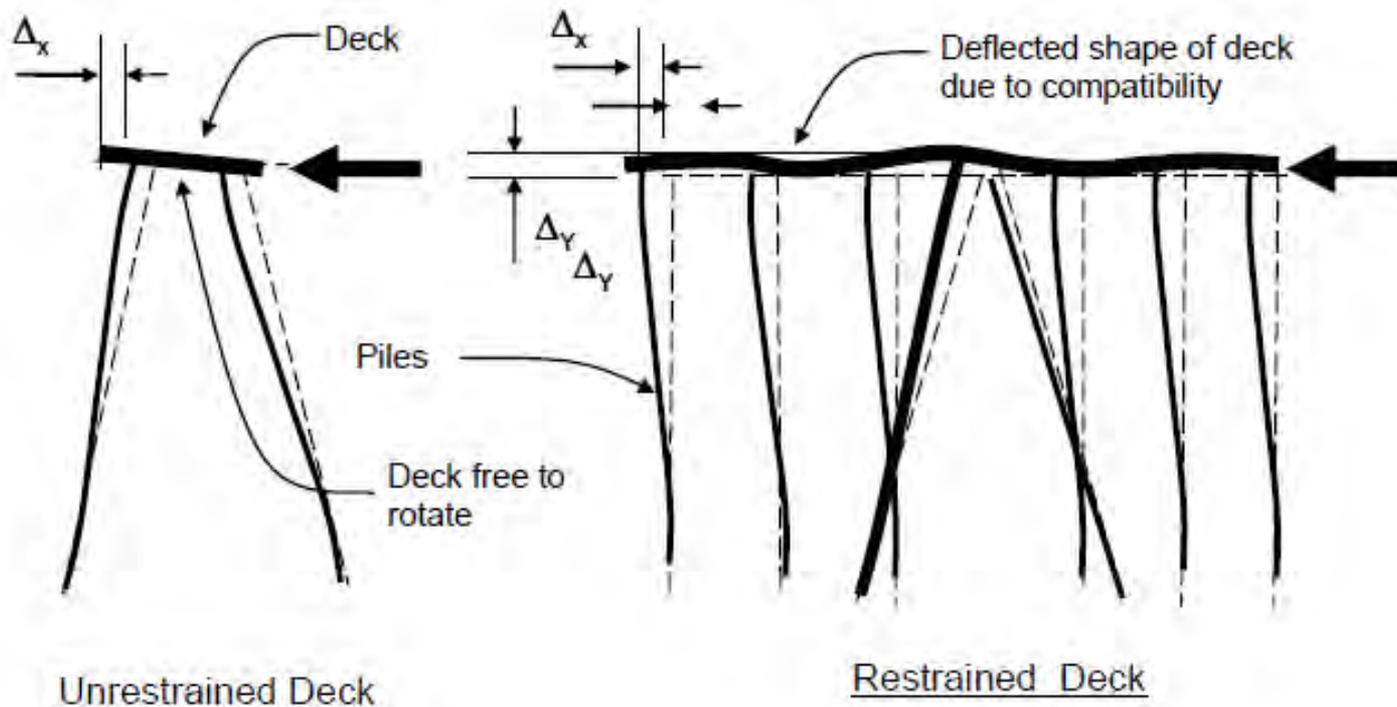
Diseño basado en desempeño



Pilotes inclinados



Pilotes inclinados



2010 Haiti



Source: S. Chodkiewicz (USACE)

1989 Loma Prieta



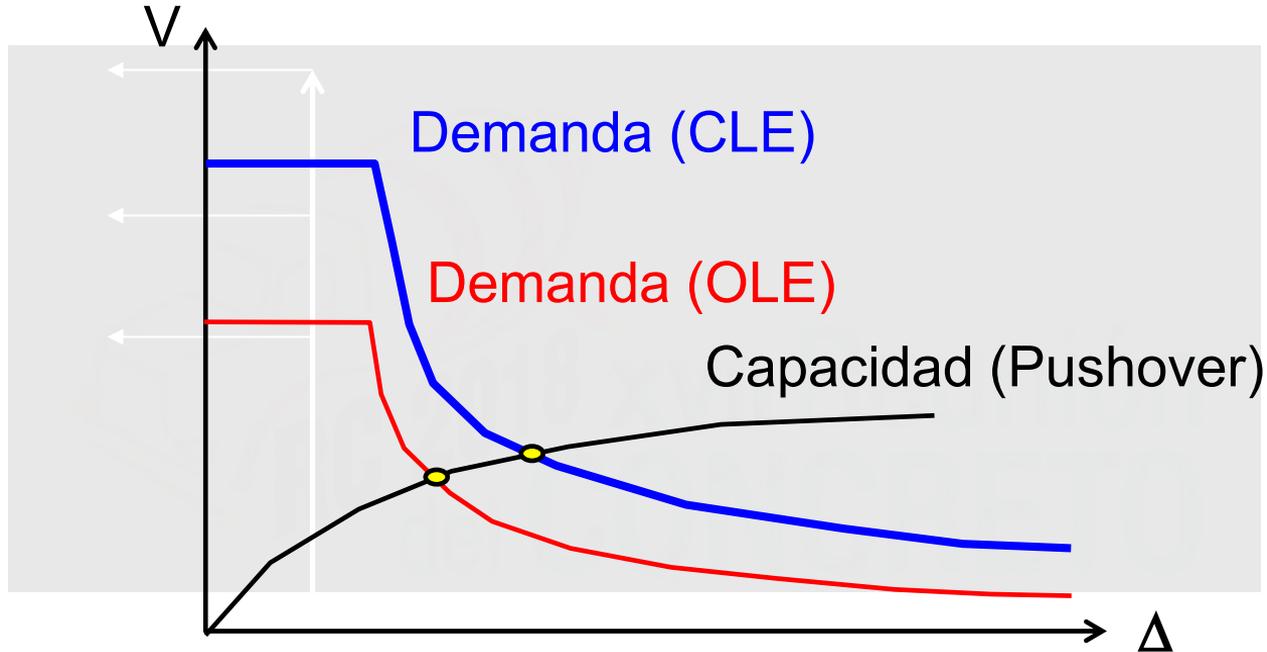
Source: lai

1995 Manzanillo (México)

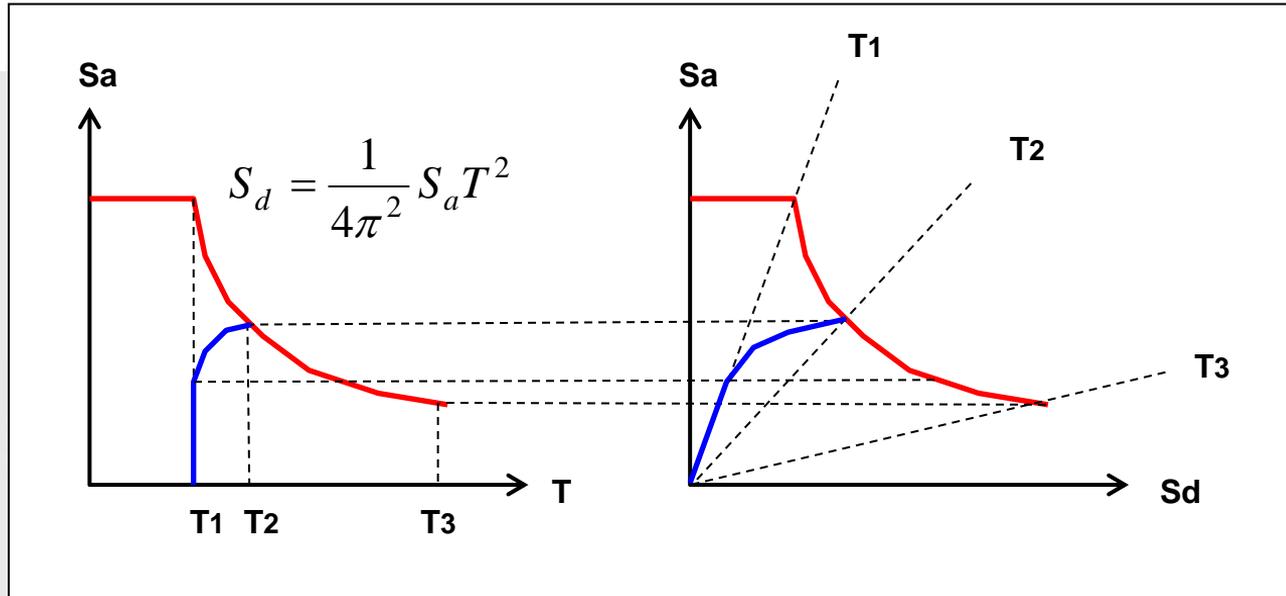


Source: lai

Desempeño Estructural

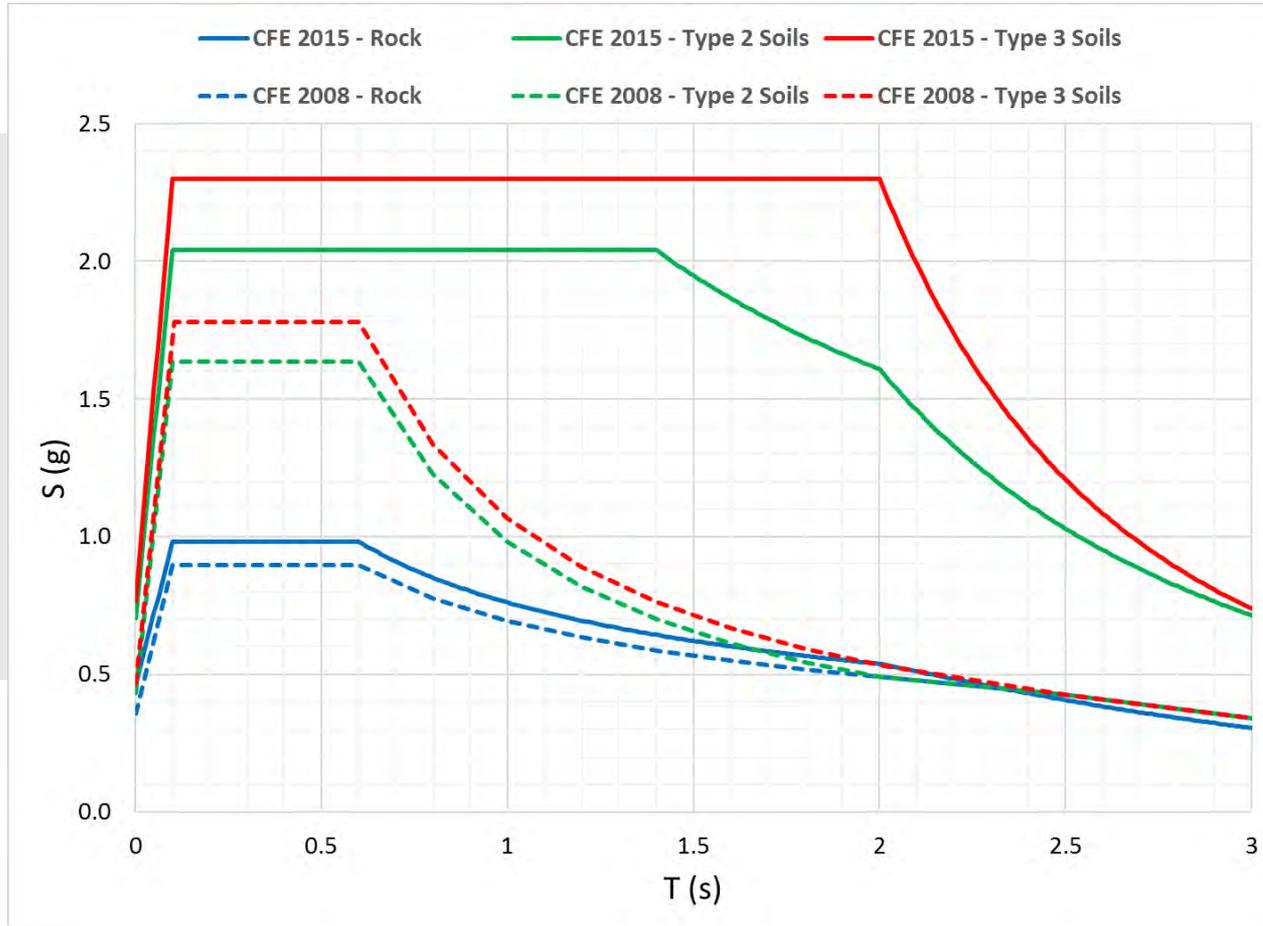


Demanda: Aceleraciones y Desplazamientos

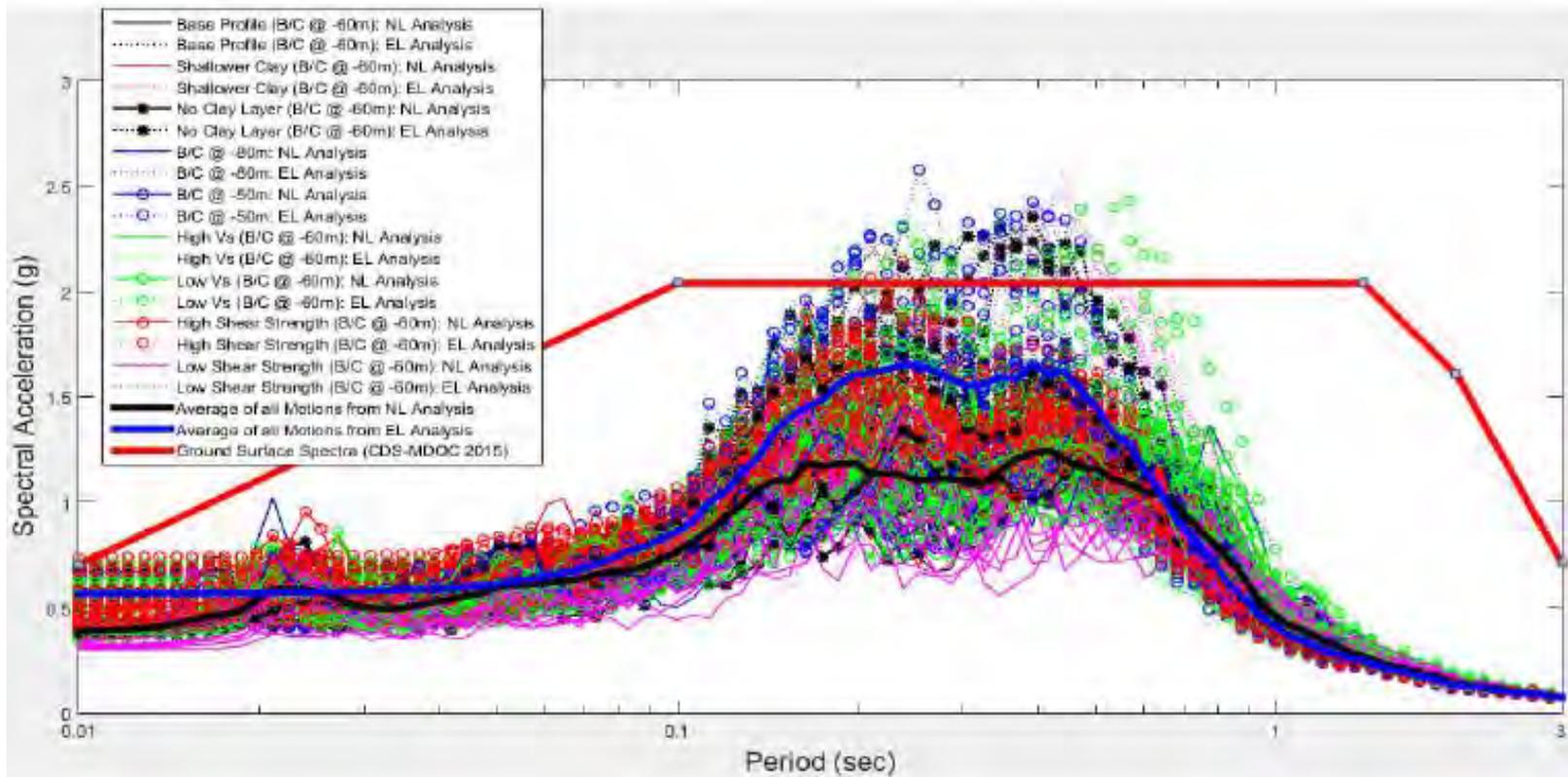


- Espectro elástico reducido según amortiguamiento
- Punto de desempeño es la intersección entre el EAD y la curva de capacidad (pushover)

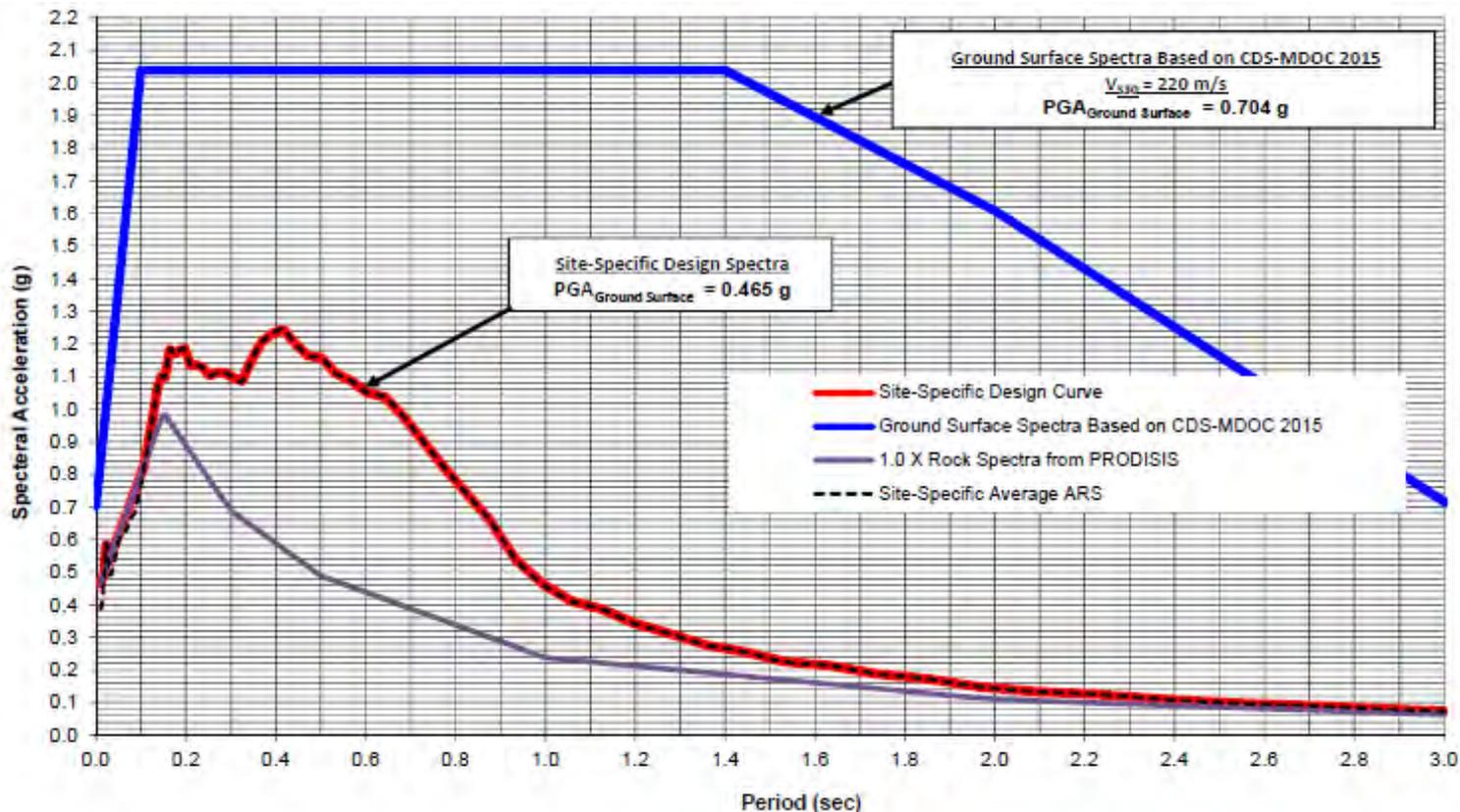
Demanda (Espectro Regional)



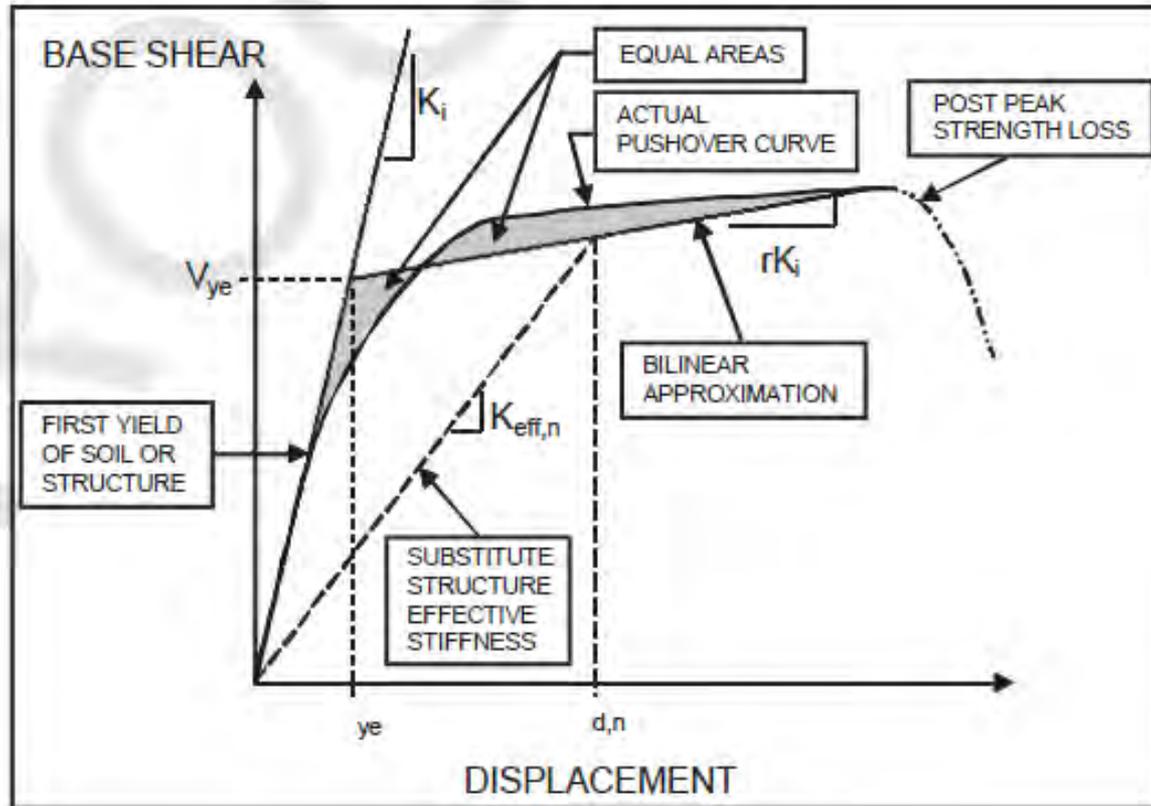
Espectro específico para el sitio



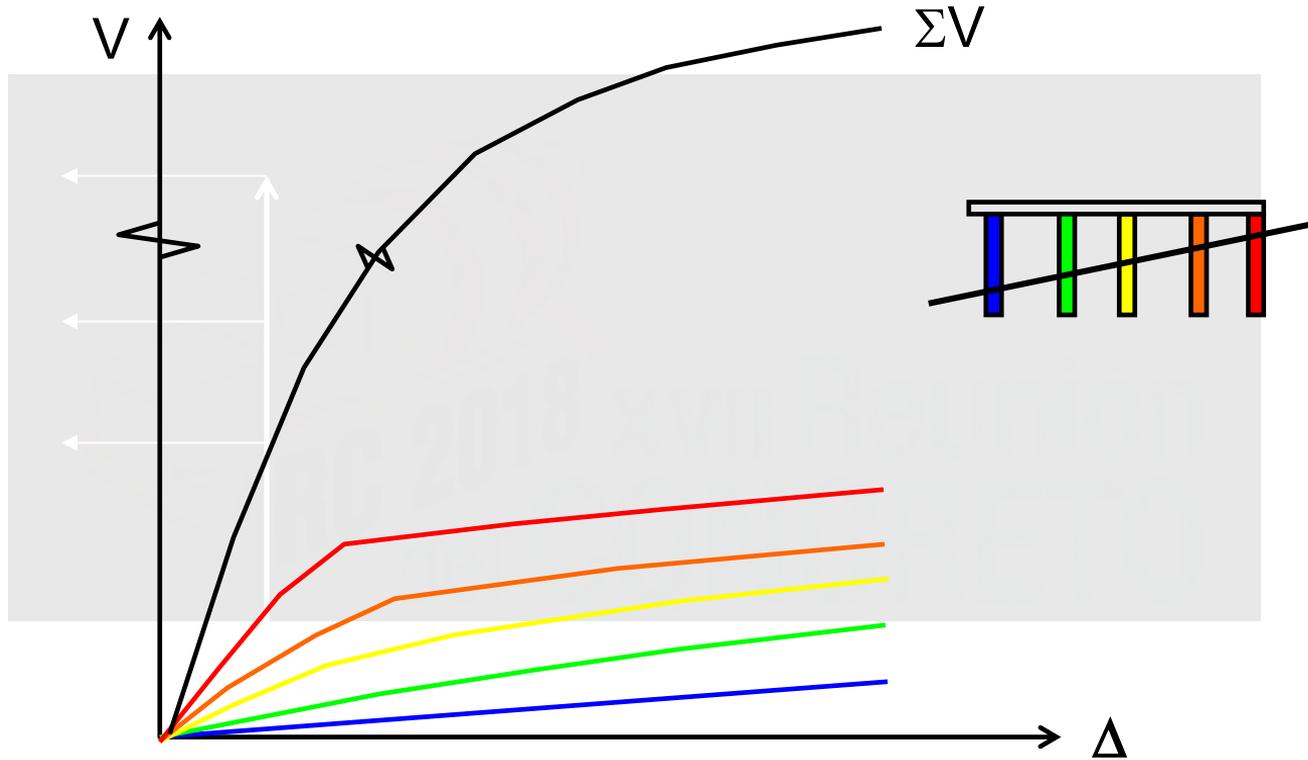
Espectro Regional vs Espectro específico para el sitio



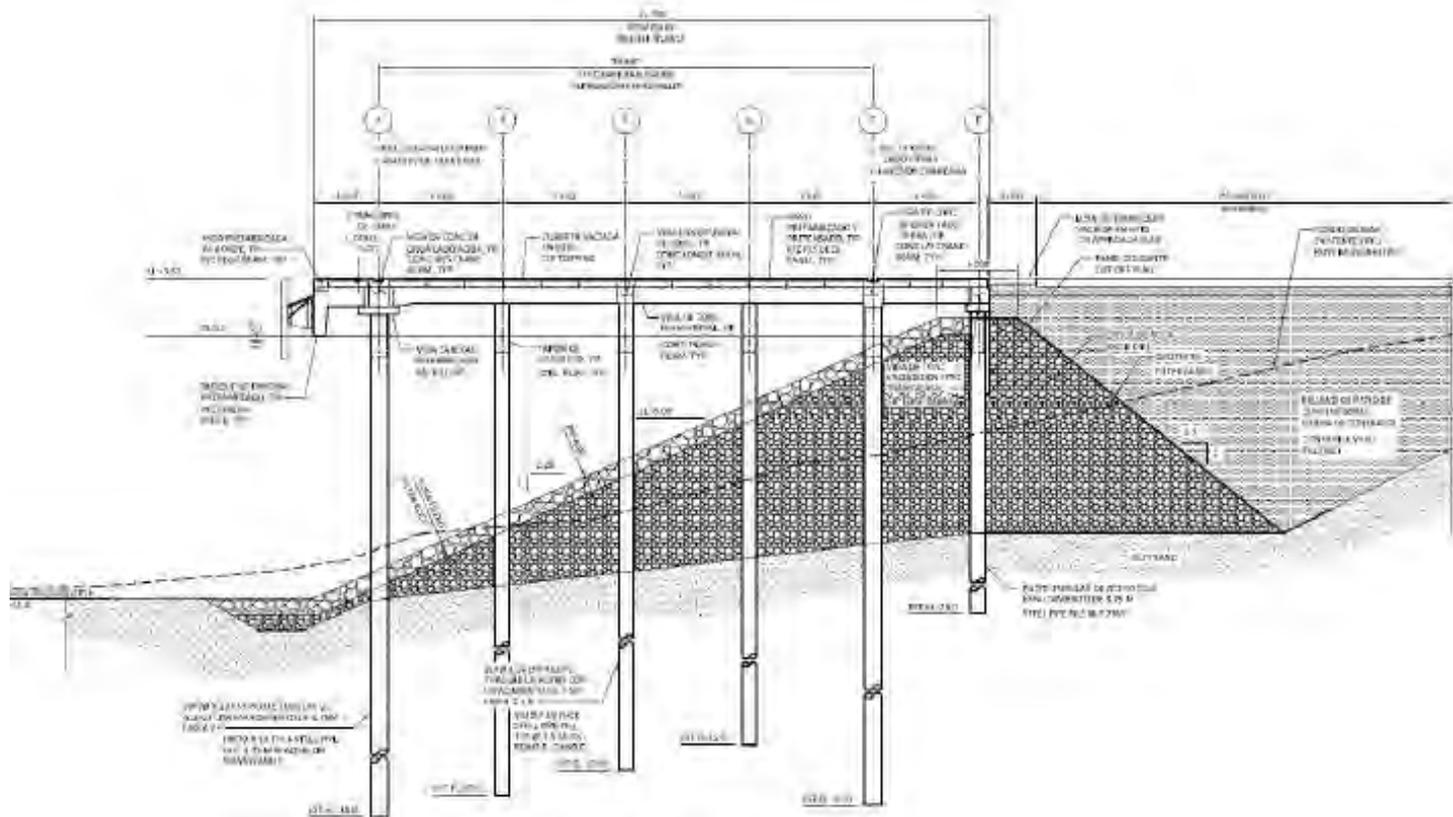
Curva "Pushover"



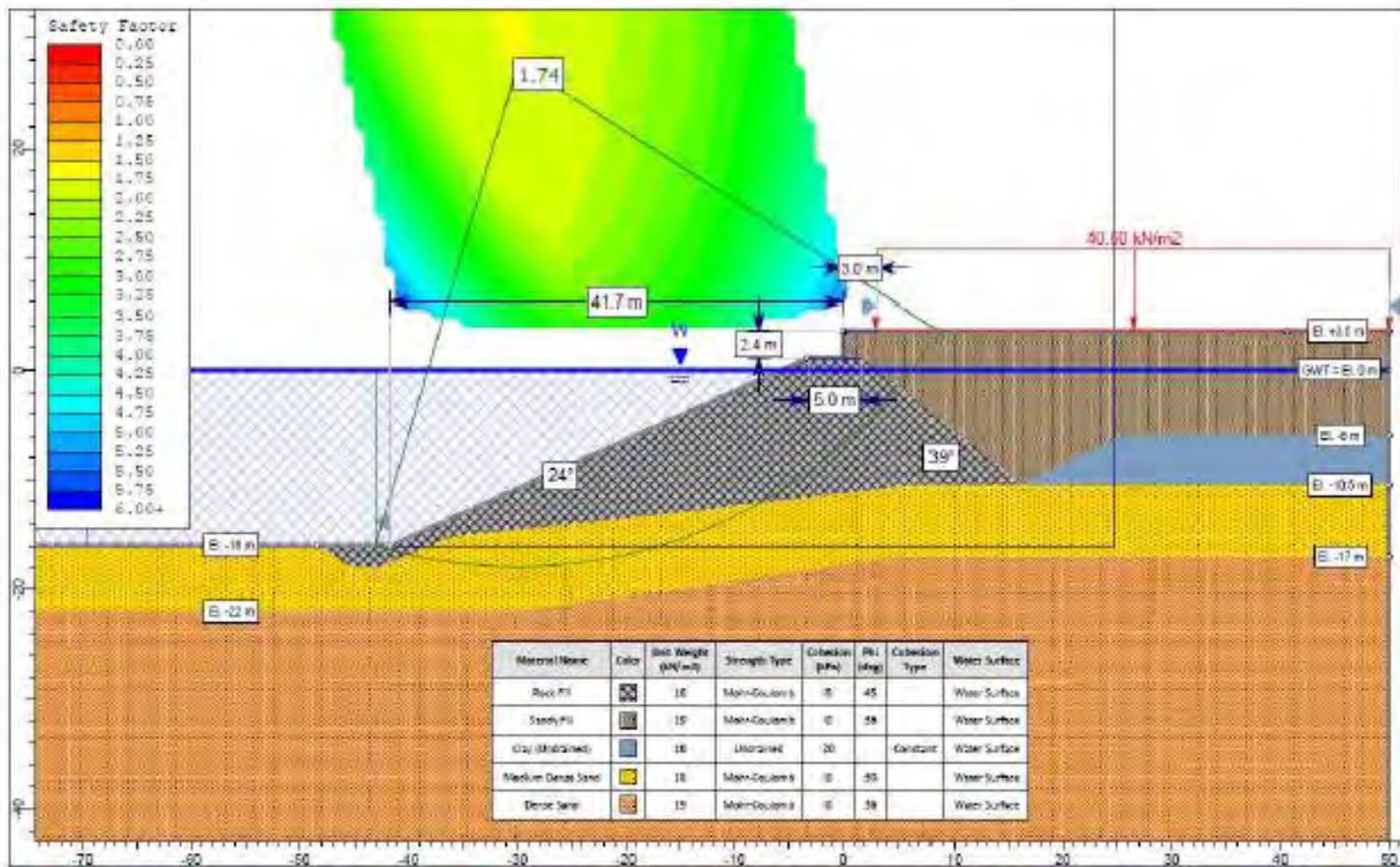
Capacidad ante fuerzas laterales



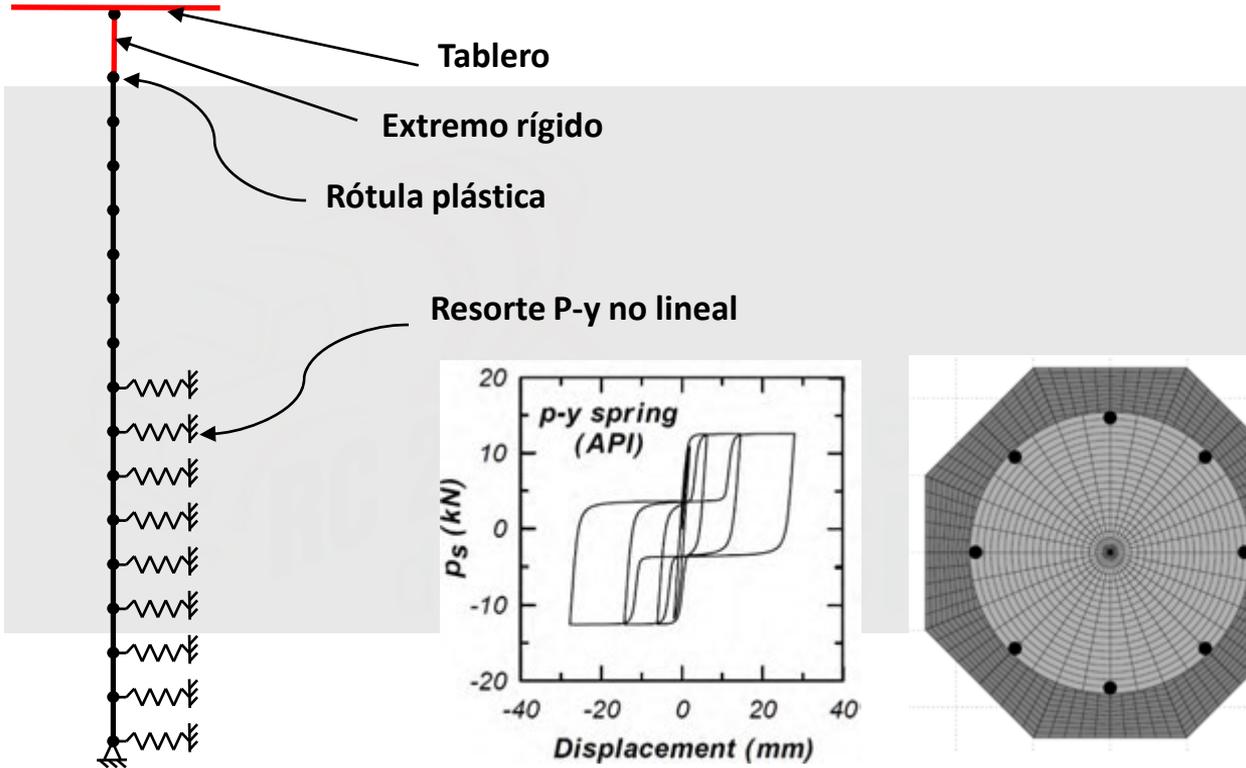
Interacción Suelo-Estructura



Estabilidad del talud

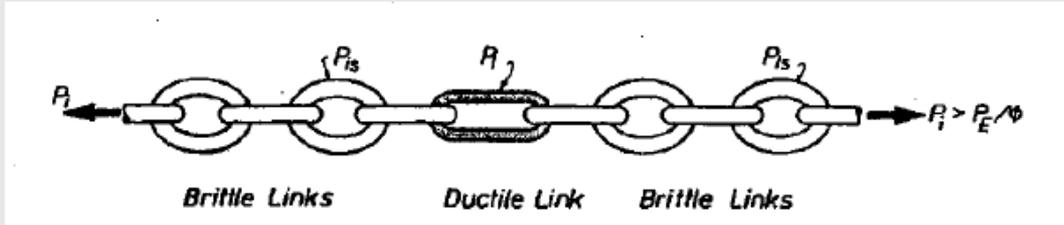


Interacción suelo-estructura



Protección de capacidad

- Concepto

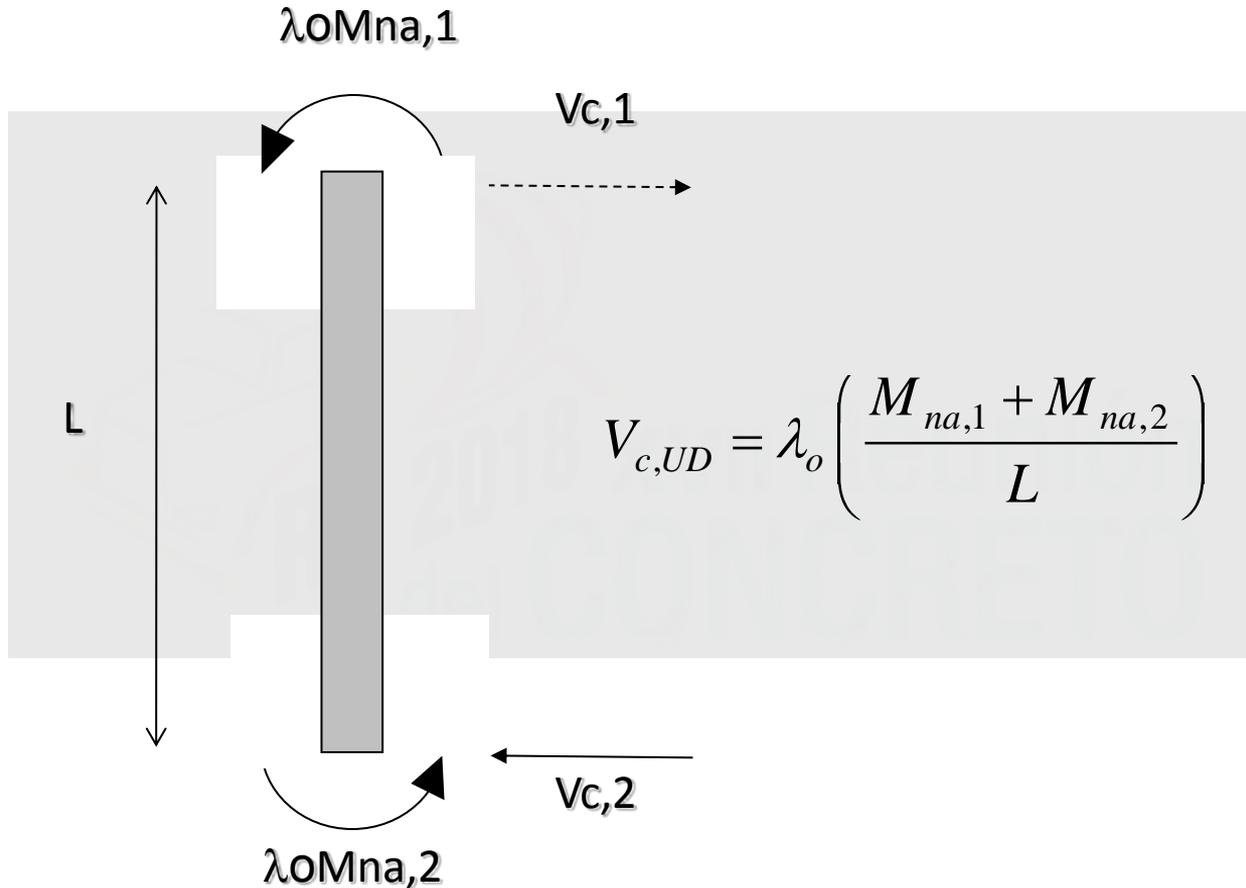


- Elementos y efectos a proteger
 - Pilotes (Falla prematura por cortante)
 - Conexiones pilote-tablero
 - Tablero

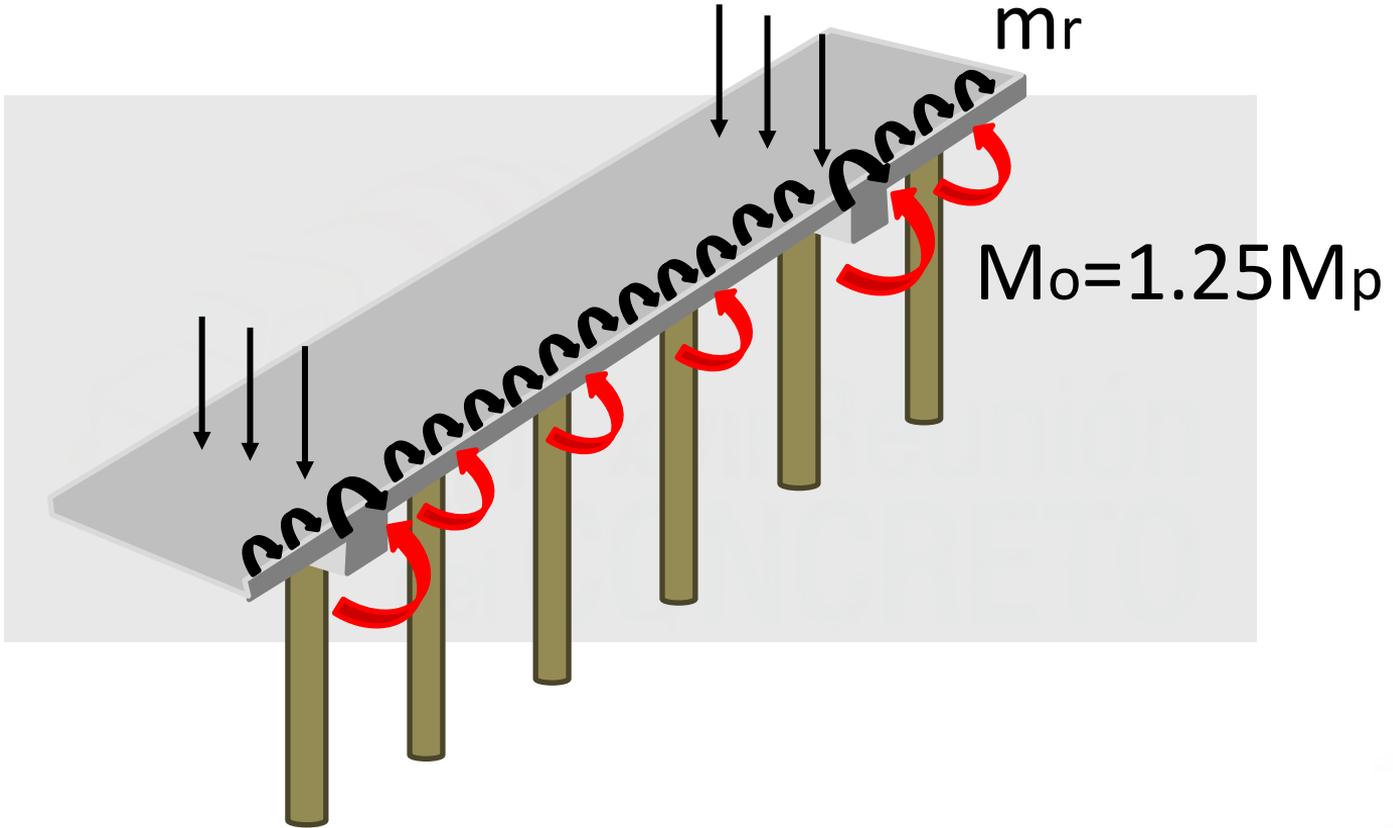
Resistencias (ASCE/COPRI 61-14)

- La evaluación de resistencias se basa en valores reales **esperados**:
 - $f_{ye} = 1.1 f_y$
 - $f'_{ce} = 1.3 f'_c$
 - $f_{pye} = 1.0 f_{py}$
 - $f_{pue} = 1.05 f_{pu}$
- Se definen límites de deformación en el concreto y en el refuerzo según el daño que se considere aceptable (OLE, CLE, DL)

Protección de capacidad (Pilotes)

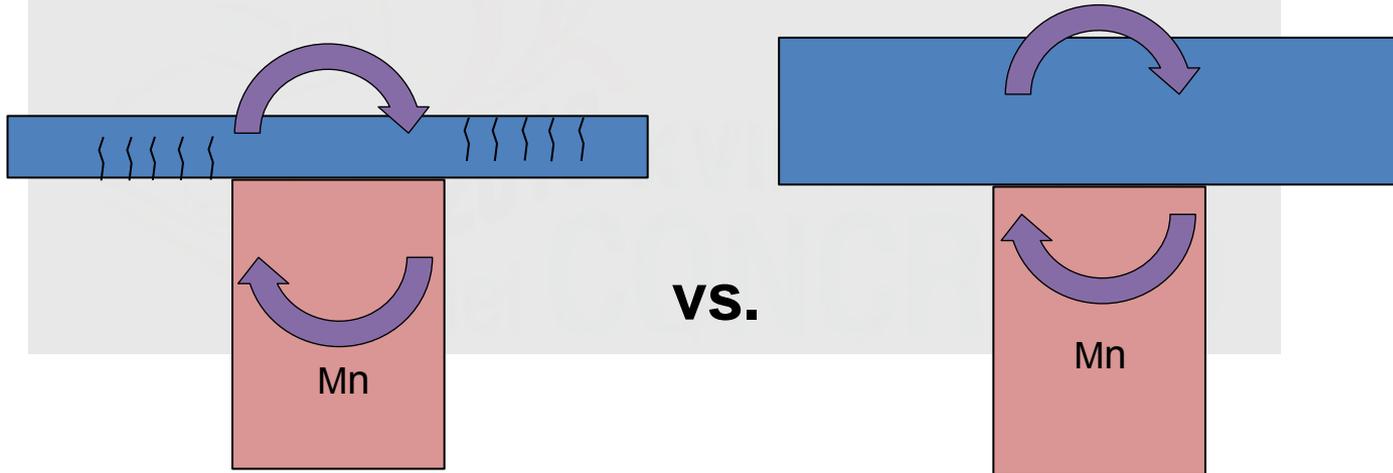


Protección de capacidad (Tablero)

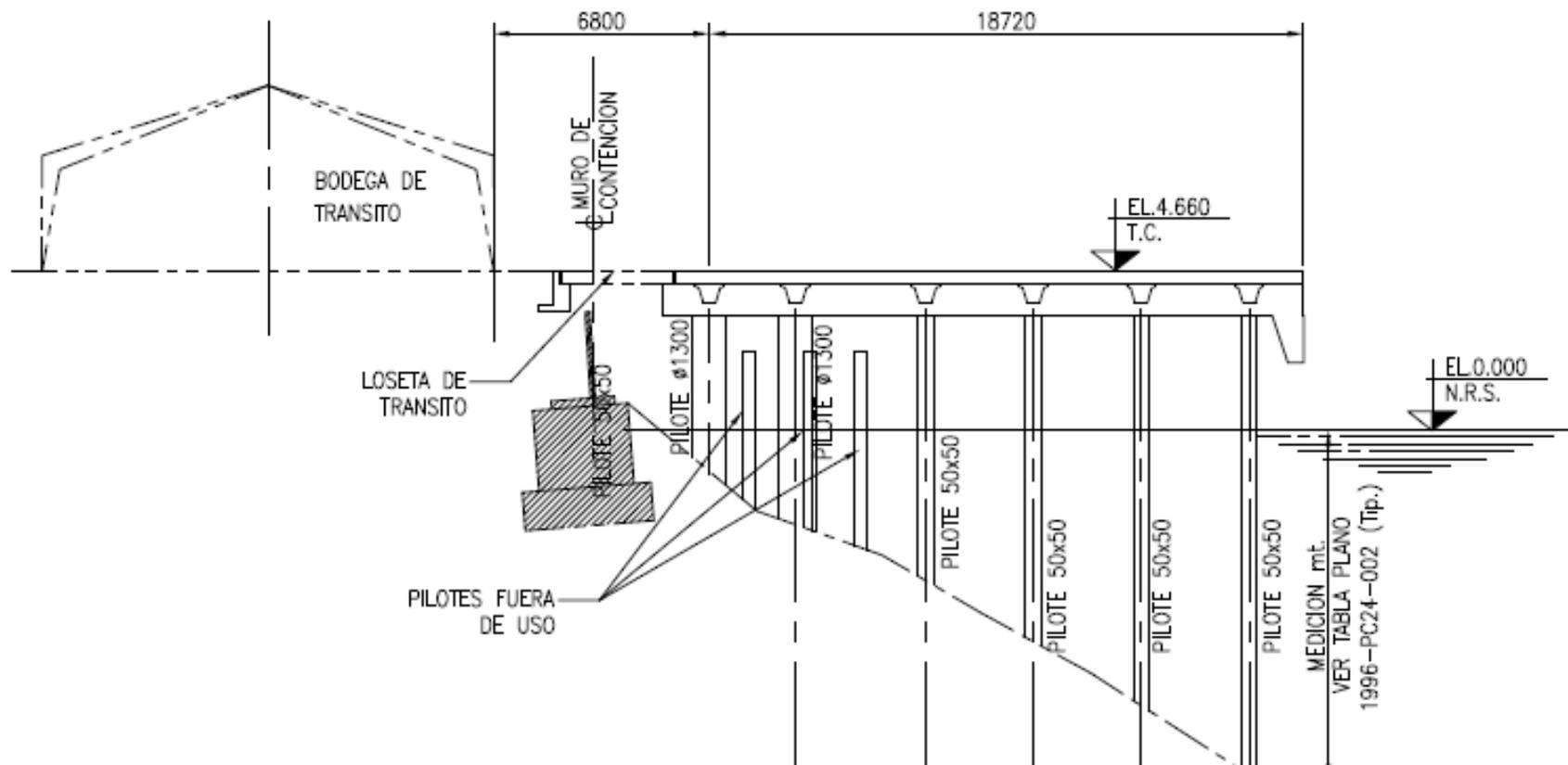


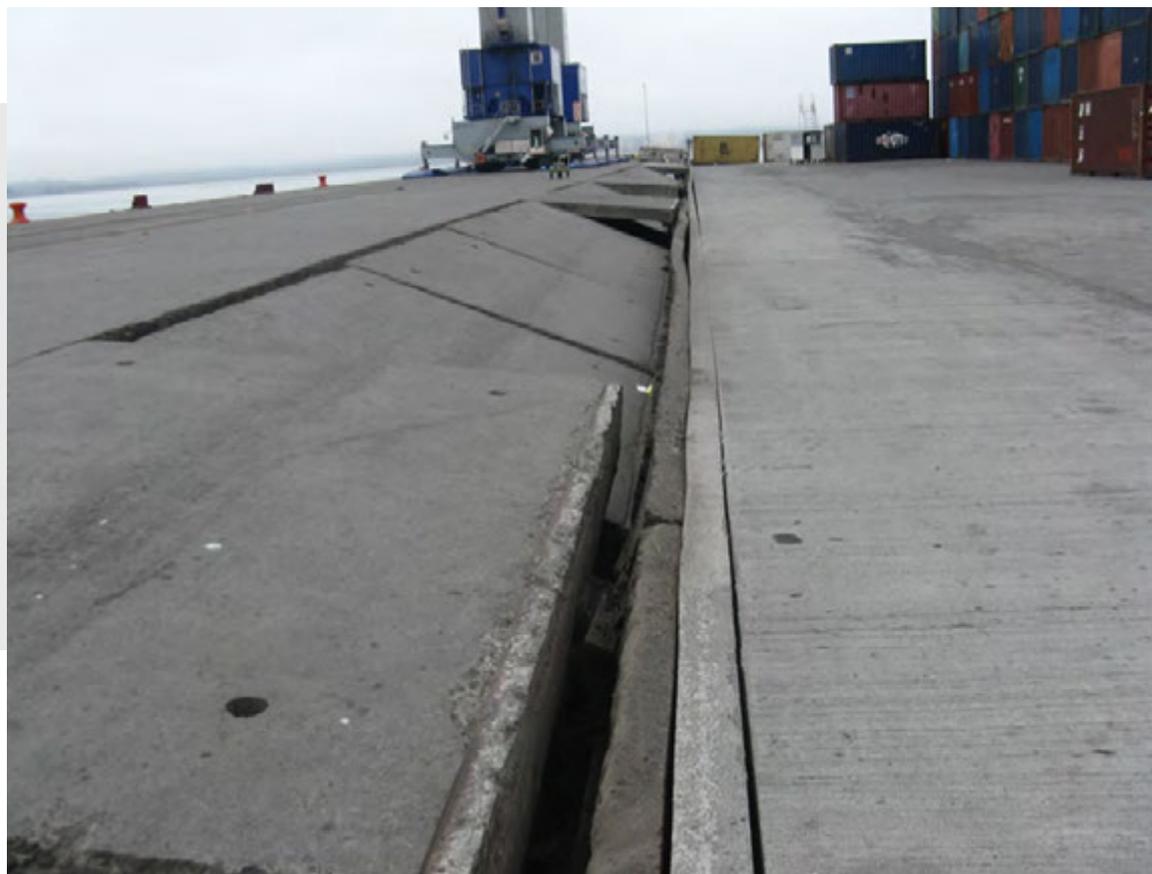
Protección de capacidad (Tablero)

- La zona del tablero tributaria a un pilote debe resistir $1.25M_n$ sin exhibir mayor daño



Condiciones adversas





Juntas de expansión



Combinación de cargas: ASCE/COPRI 61-19

$$(1 \pm 0.5 \text{ PGA})D + 0.1L + E$$

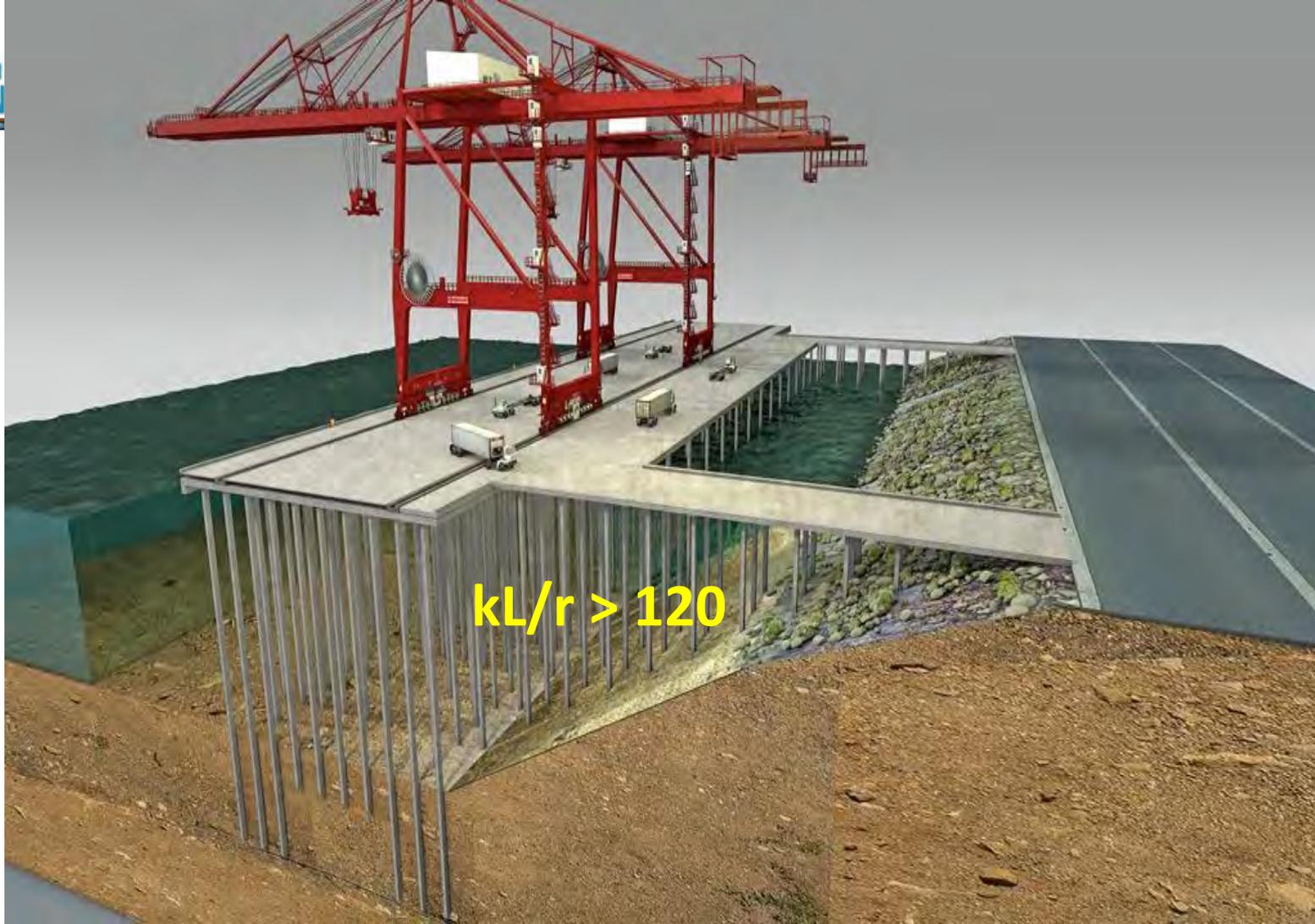
- Por qué 0.1?
- OK para muelles con cargas vivas bajas.
- Liberal para muelles con cargas vivas altas o muelles en donde se apilen contenedores
- Cómo manejar OLE, CLE y DLE?

Carga viva sísmica



Patio de contenedores

Muelle



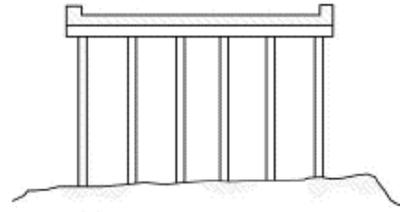
$kL/r > 120$

Efectos de esbeltez

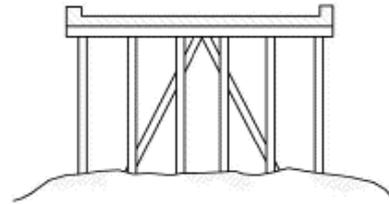
No Arriostrado
 $k > 1.0$

Arriostrado
 $k < 1.0$

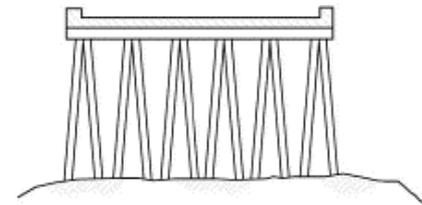
Arriostrado
 $k < 1.0$



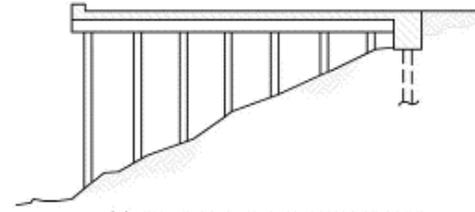
(A) ALL PLUMB PILE PIER



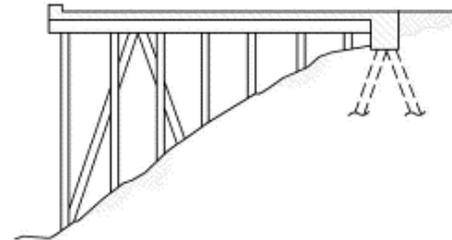
(B) PLUMB & BATTER PILE PIER



(C) ALL BATTER PILE PIER



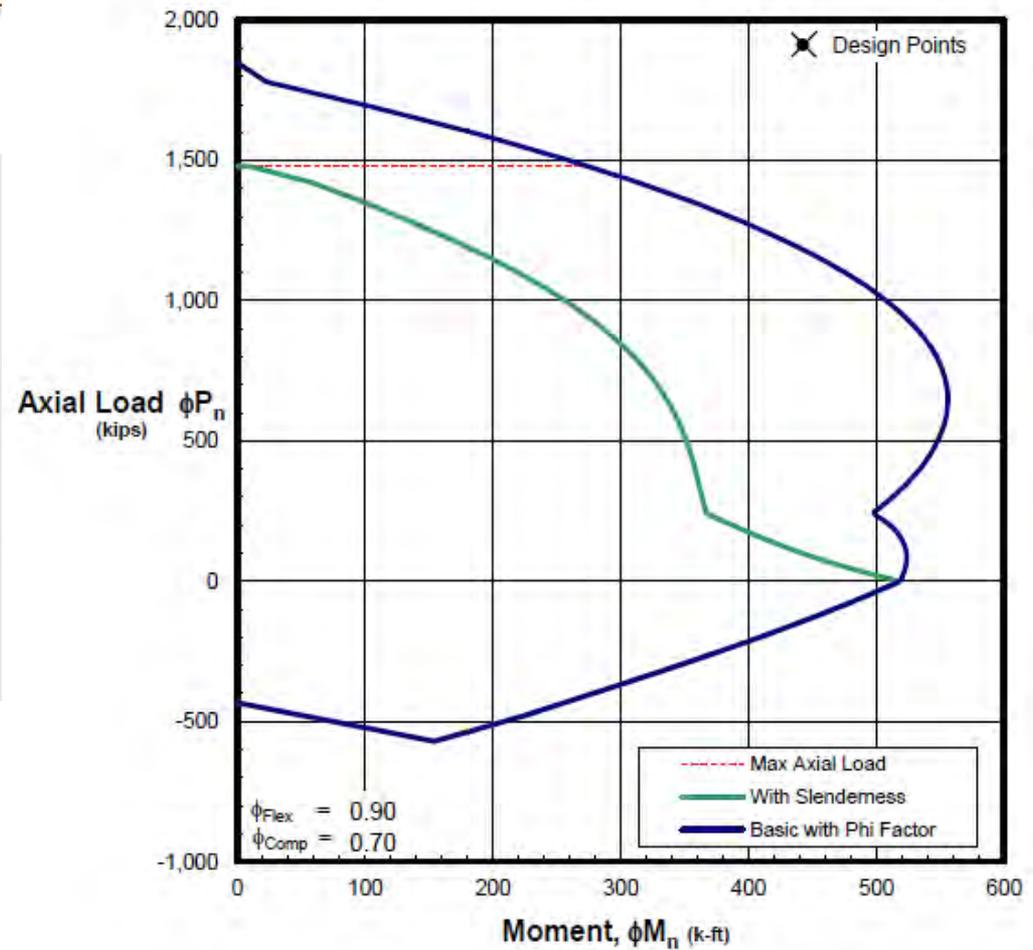
(D) ALL PLUMB PILE MARGINAL WHARF



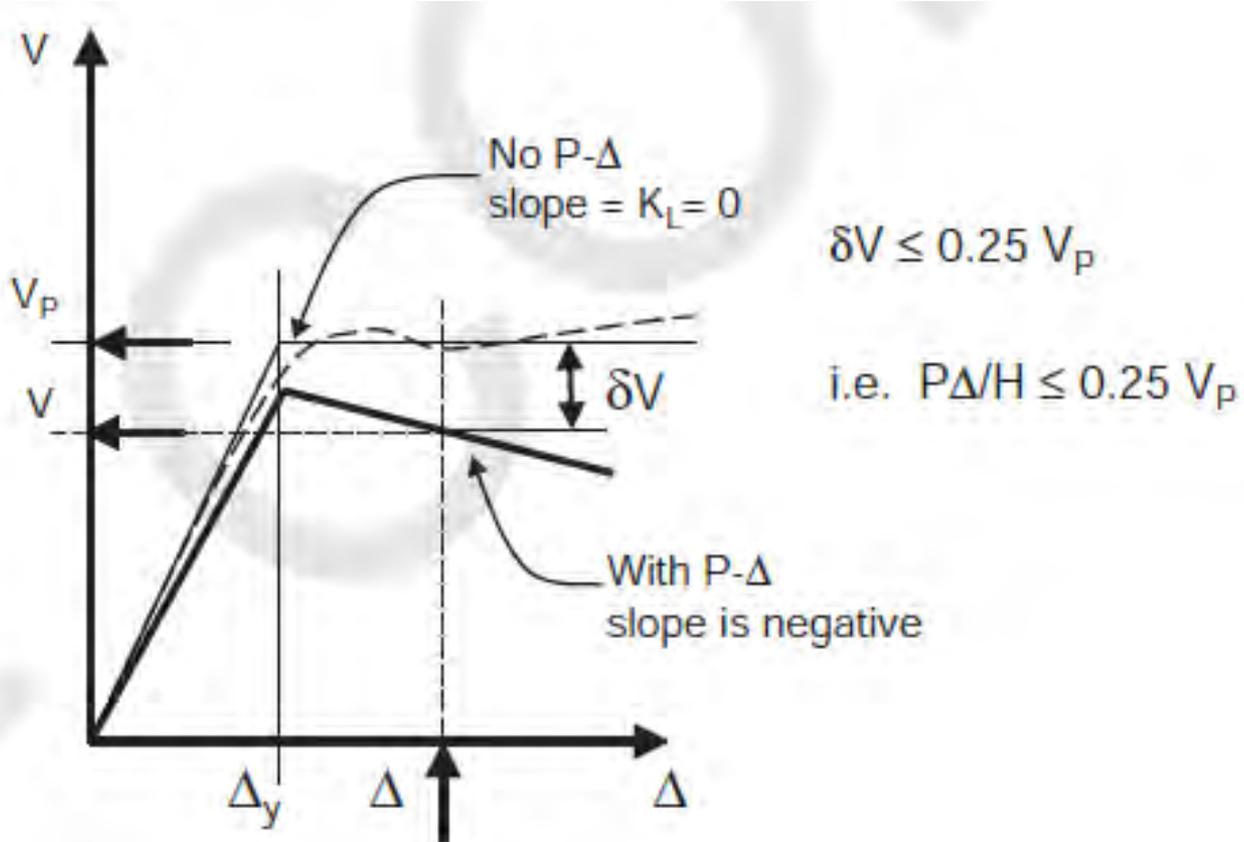
(D) PLUMB & BATTER PILE MARGINAL WHARF

Arriostrados, $k < 1.0$

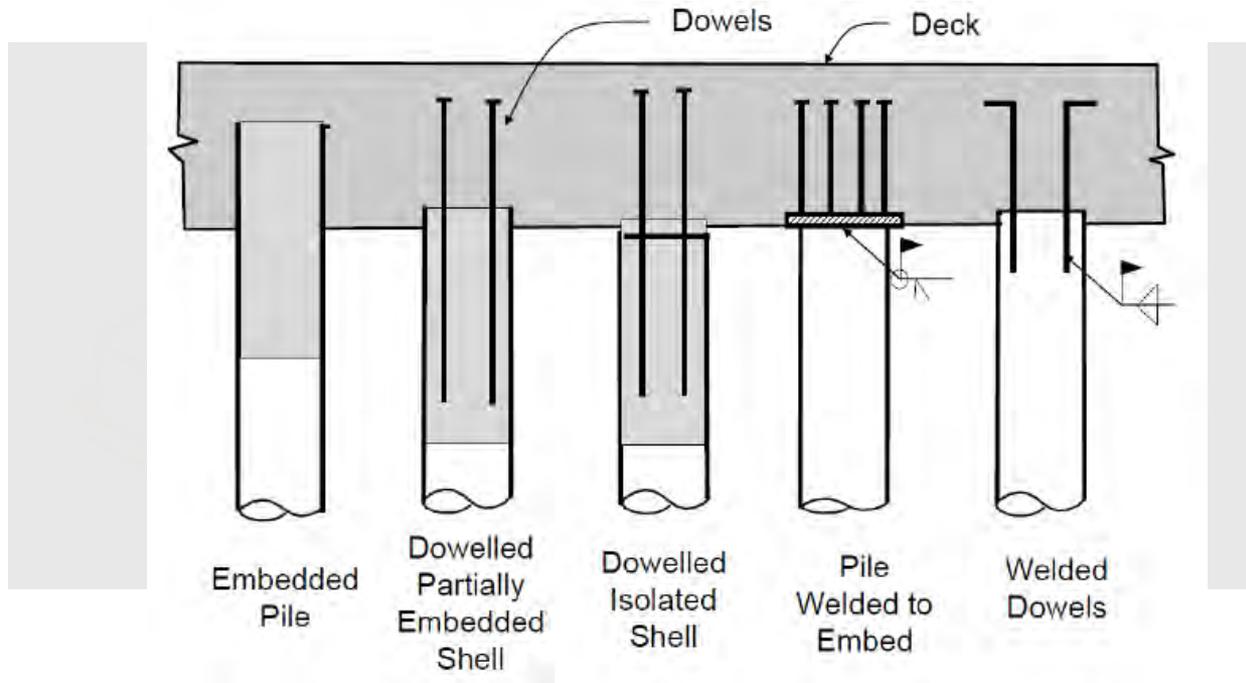
24 in. Solid Square Pile
20 - 0.5 in. Dia. Strands $f'_c = 6$ ksi
 Secant Method for Slenderness, $kl/r = 73.3$



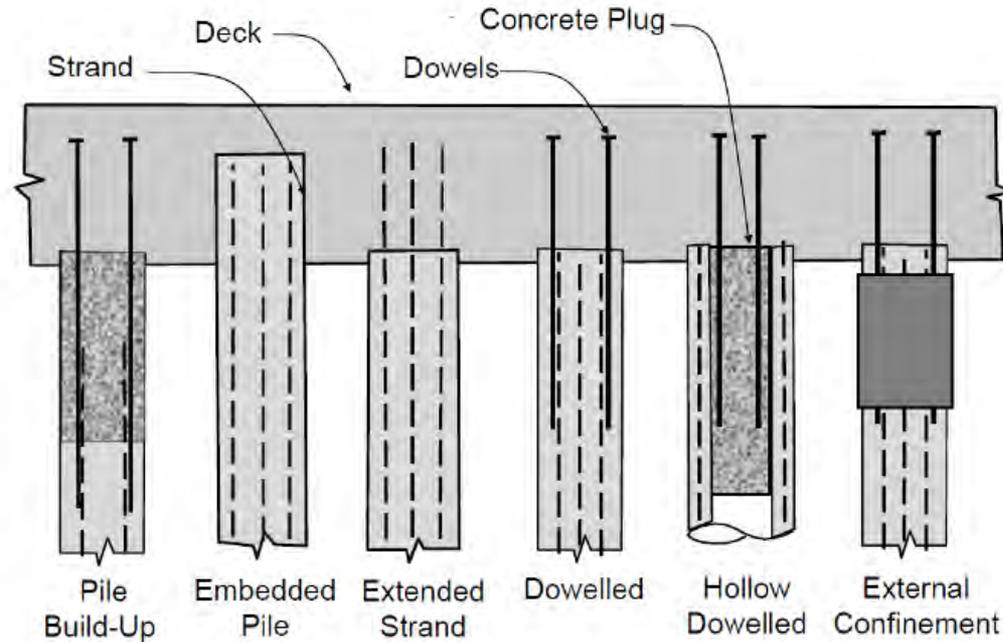
Efectos P-delta sísmicos



Conexiones pilote de acero - tablero



Conexiones pilote de concreto - tablero



Límites de deformación unitaria, OLE

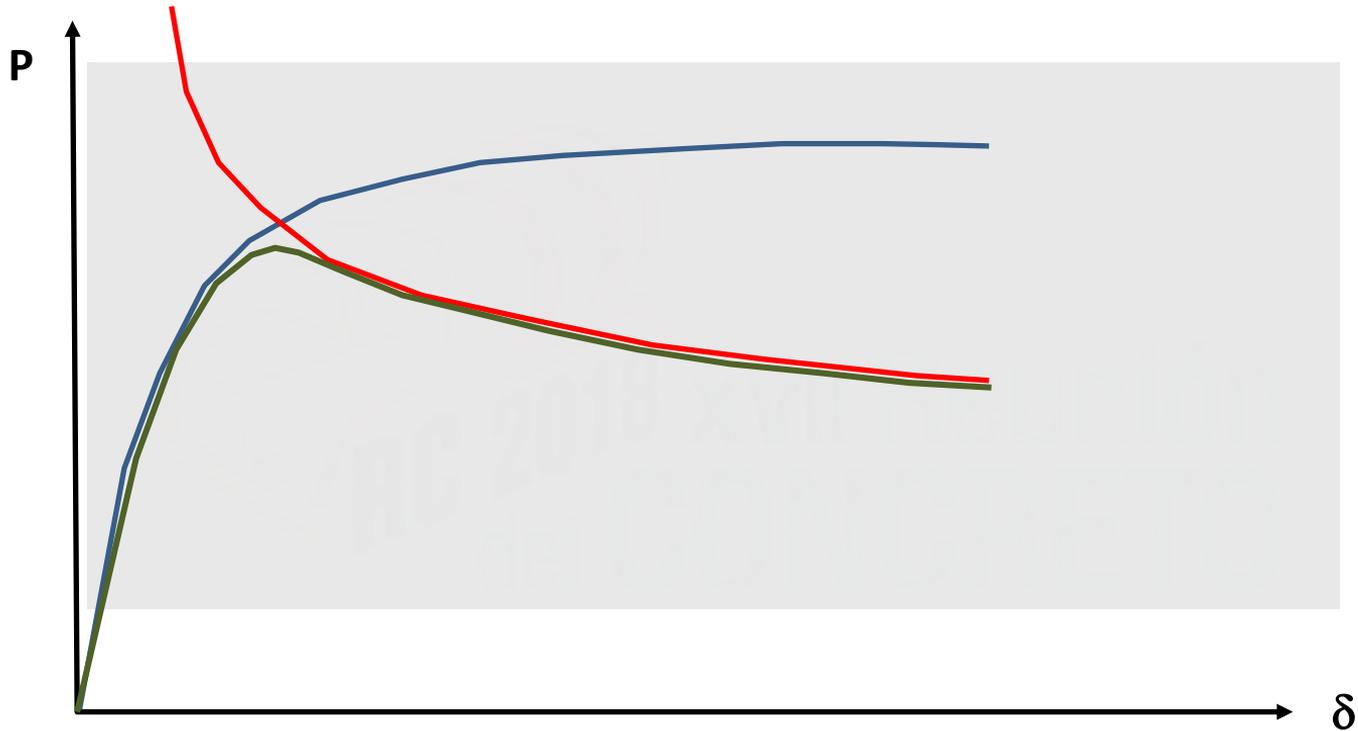
Pile type	Component	Hinge location		
		Top of pile	In ground	Deep in ground (>10D _p)
Solid concrete pile	Concrete	$\epsilon_c \leq 0.005$	$\epsilon_c \leq 0.005$	$\epsilon_c \leq 0.008$
	Reinforcing steel	$\epsilon_s \leq 0.015$		
	Prestressing steel		$\epsilon_p \leq 0.015$	$\epsilon_p \leq 0.015$
Hollow concrete pile ^a	Concrete	$\epsilon_c \leq 0.004$	$\epsilon_c \leq 0.004$	$\epsilon_c \leq 0.004$
	Reinforcing steel	$\epsilon_s \leq 0.015$		
	Prestressing steel		$\epsilon_p \leq 0.015$	$\epsilon_p \leq 0.015$
Steel pipe pile	Steel pipe		$\epsilon_s \leq 0.010$	$\epsilon_s \leq 0.010$
	Concrete	$\epsilon_c \leq 0.010$		
	Reinforcing steel	$\epsilon_s \leq 0.015$		

^aIf the interior of the hollow pile is filled with concrete, all strain limits shall be the same as for solid piles.

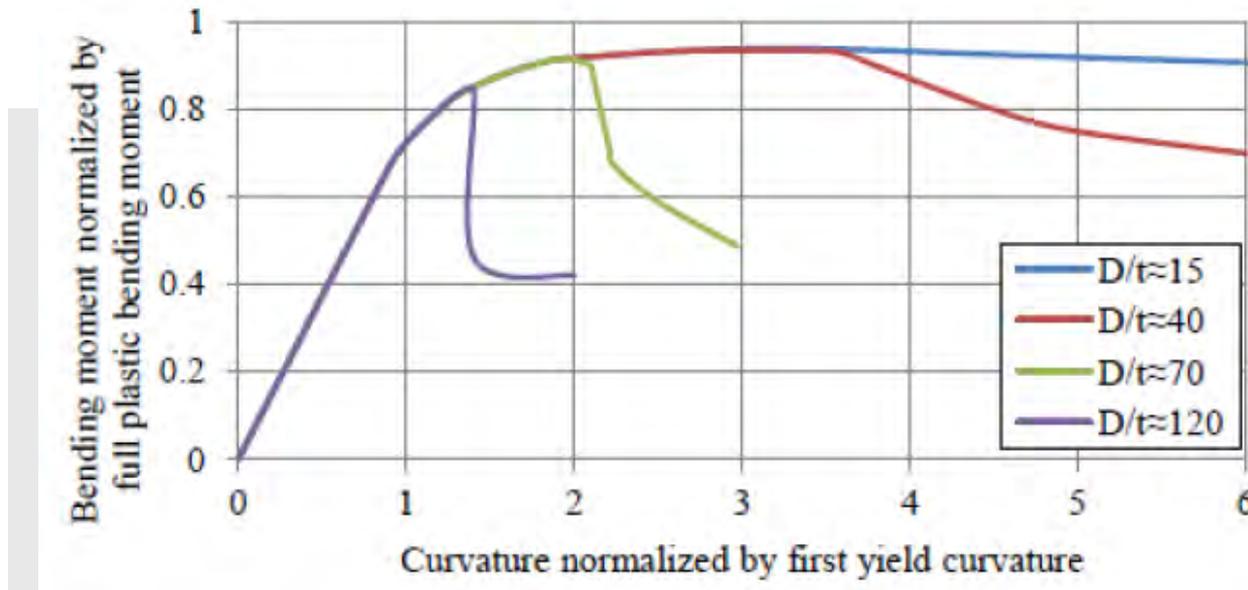
Límites de deformación unitaria, CLE

Pile type	Component	Hinge location		
		Top of pile	In ground	Deep in ground (>10D _p)
Solid concrete pile	Concrete	$\epsilon_c \leq 0.005 + 1.1\rho_s \leq 0.025$	$\epsilon_c \leq 0.005 + 1.1\rho_s \leq 0.008$	$\epsilon_c \leq 0.012$
	Reinforcing steel	$\epsilon_s \leq 0.6\epsilon_{smd} \leq 0.06$		
	Prestressing steel		$\epsilon_p \leq 0.025$	$\epsilon_p \leq 0.025$
Hollow concrete pile ^a	Concrete	$\epsilon_c \leq 0.006$	$\epsilon_c \leq 0.006$	$\epsilon_c \leq 0.006$
	Reinforcing steel	$\epsilon_s \leq 0.4\epsilon_{smd} \leq 0.04$		
	Prestressing steel		$\epsilon_p \leq 0.020$	$\epsilon_p \leq 0.025$
Steel pipe pile	Steel pipe		$\epsilon_s \leq 0.025^b$	$\epsilon_s \leq 0.035$
	Concrete	$\epsilon_c \leq 0.025$		
	Reinforcing steel	$\epsilon_s \leq 0.6\epsilon_{smd} \leq 0.06$		

Respuesta de pilotes tubulares a flexión

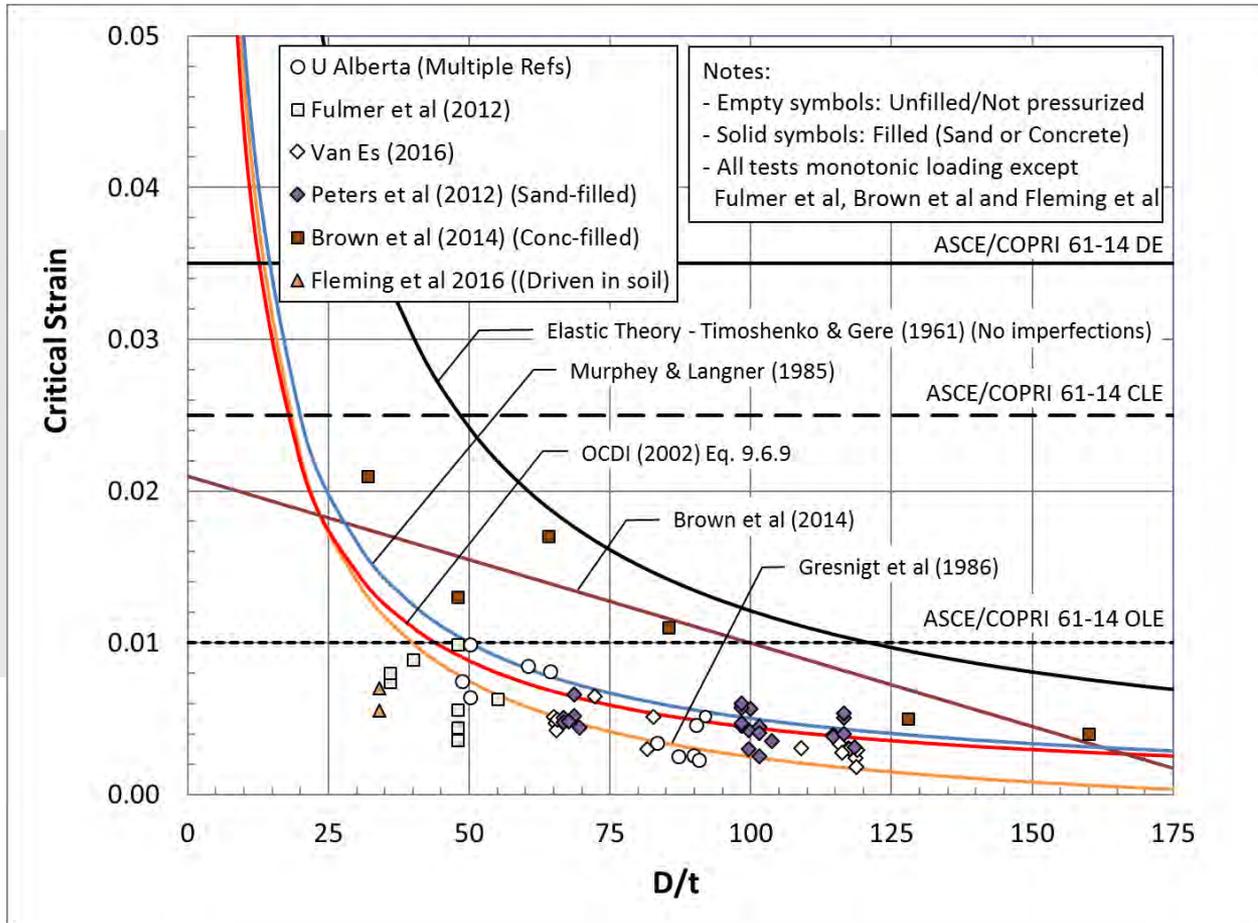


Respuesta de pilotes tubulares a flexión



- La deformación crítica (pandeo local) se define en función de D/t
- La clase estructural de la sección tubular importa porque, según la clase, la sección puede o no desarrollar M_y y M_p

Efecto de D/t en el pandeo local de tubos



Pandeo local: Experimentos

- Problema identificado hace mucho por la industria de tuberías
- Se destacan los programas experimentales en TU Delft y Alberta

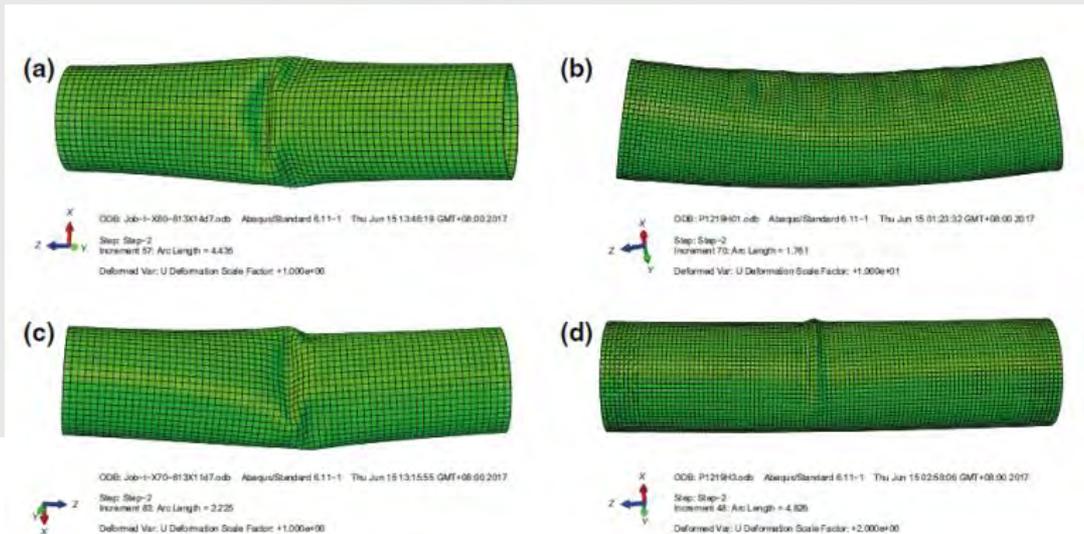


Fig. 4 Buckling shape obtained from FEM. a U70: X70 unpressurized pipe. b P70: X70 pressurized pipe. c U80: X80 unpressurized pipe. d P80: X80 pressurized pipe

Vacías/Sin presión

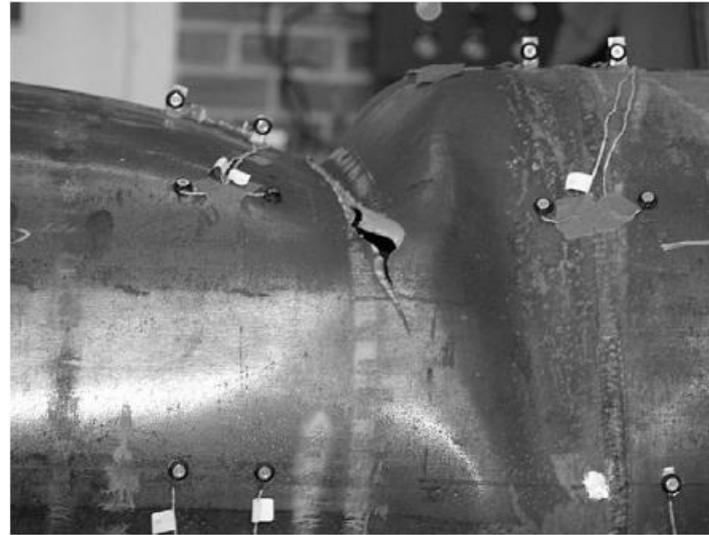
Llenas/Presurizadas

Ref. Li et al

Pandeo Local de Secciones Tubulares



Rotura de soldadura en espiral



Rotura a lo largo de costura simple

Metodología Propuesta

- Definir la clase de la sección tubular según AASHTO

- Elástica: $\frac{D}{t} \leq 0.09 \frac{E}{F_y}$

- Dúctil: $\frac{D}{t} \leq 0.044 \frac{E}{F_y}$

- Evaluar el límite de deformación para OLE, CLE y DE

- Base: $\varepsilon_{cr} = \frac{0.4}{\left(\frac{D}{t}\right)} - \varepsilon_Y$ (similar a Murphey & Langner (1985)
y Gresnigt (1986))

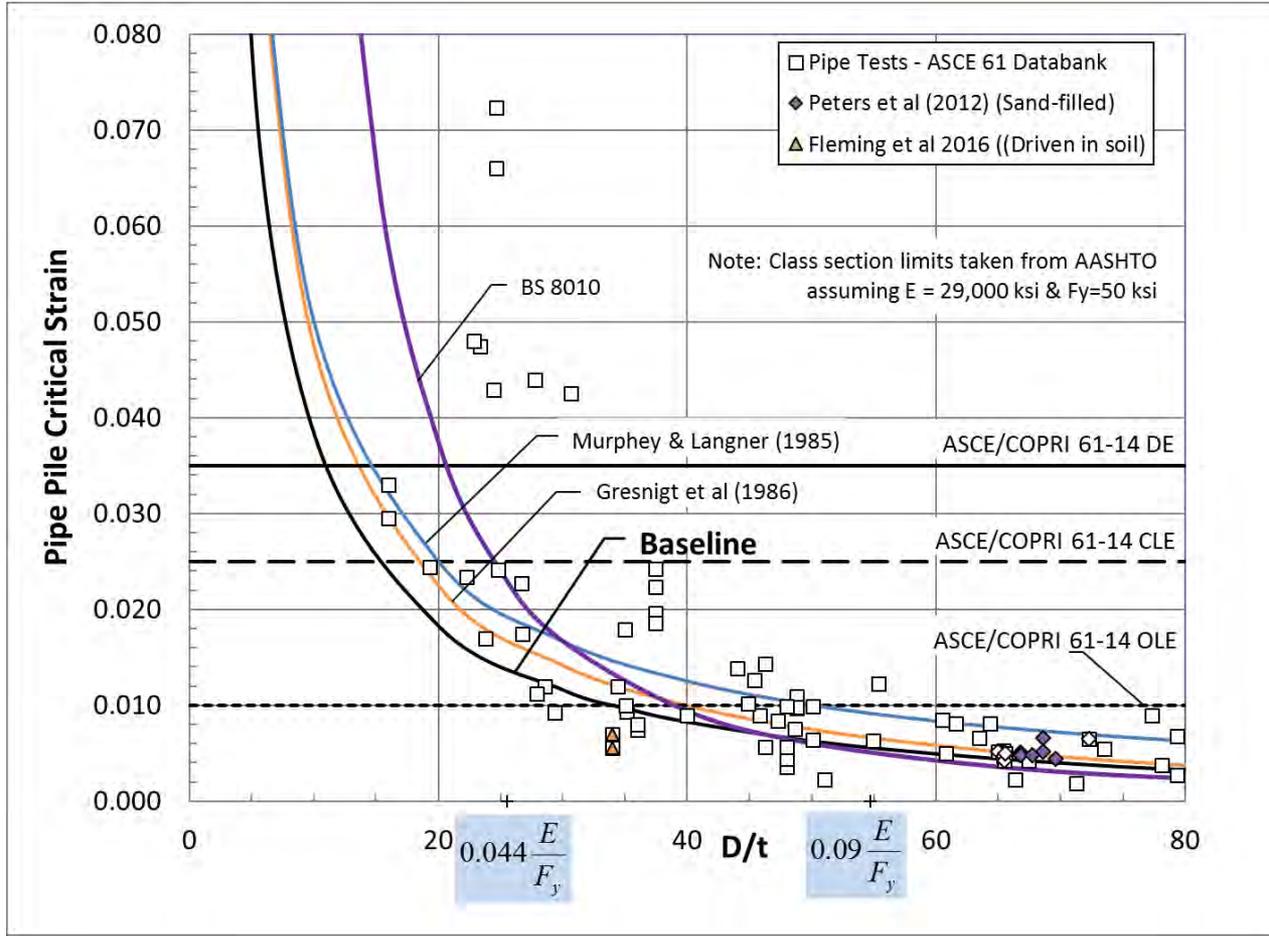
$$\varepsilon_{OLE} = 0.25 \varepsilon_{cr}$$

$$\varepsilon_{CLE} = 0.65 \varepsilon_{cr}$$

$$\varepsilon_{DE} = 0.8 \varepsilon_{cr}$$

(Ospina, Harn & Pachakis, ASCE Ports 2019)

Formulación Propuesta



Conclusiones

- La filosofía de diseño sismo-resistente de muelles abiertos difiere de la tradicional de diseño de edificios.
- Está basada en desplazamientos.
- De manera idem al diseño sismo-resistente de edificios, hace uso de la aplicación de principios de protección de capacidad, solo que protege otros elementos.
- La respuesta de un muelle abierto ante cargas laterales y el nivel asociado de daño están ligados a la manera como se detallan sus componentes.
- El ASCE/COPRI 61 es un estándar maduro, que se encuentra en constante evolución y que bien podría adoptarse en Colombia.

Preguntas?

