



VII Seminario Internacional de
Ingeniería y Operación Portuaria

San Antonio

2016

Puertos sostenibles: el gran desafío

ANÁLISIS TIEMPO HISTORIA DE UN MUELLE MARGINAL PARA NAVES POST-PANAMAX

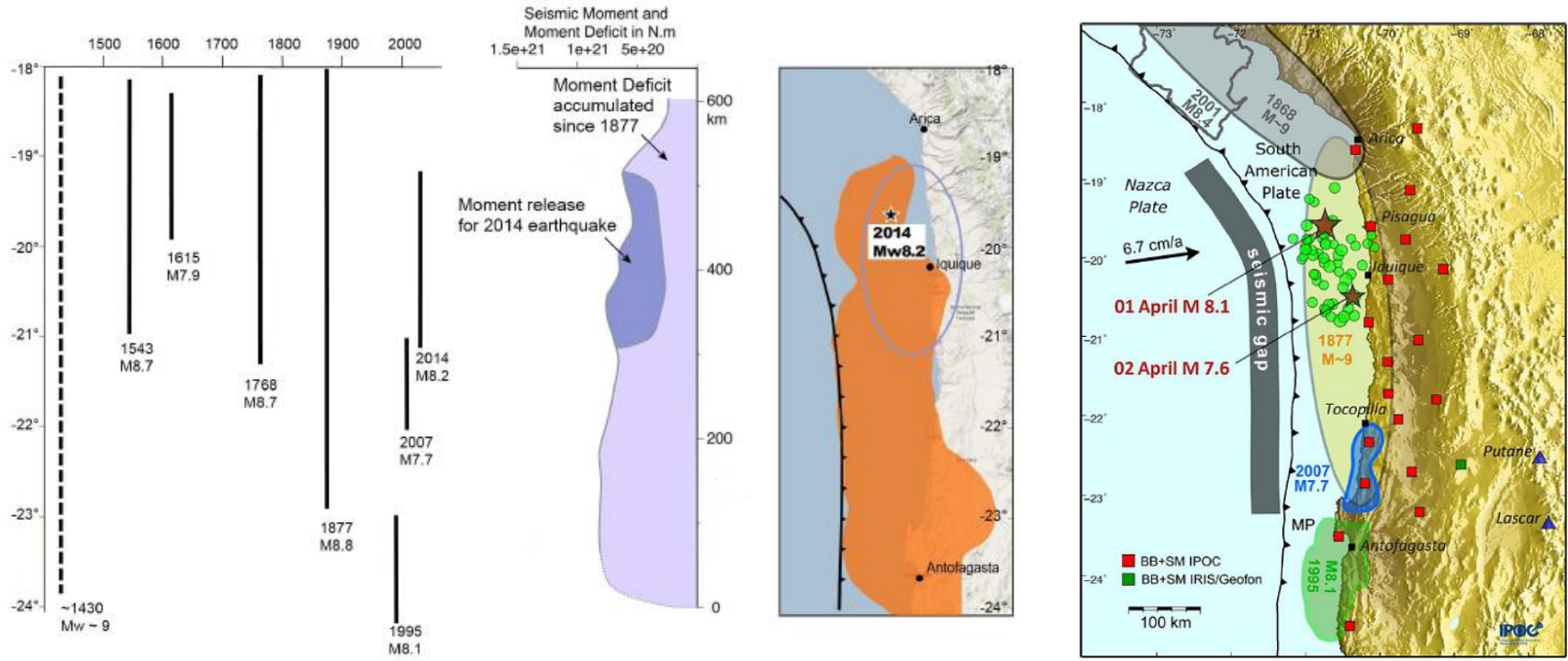
EXPOSITOR: ALVARO GONZÁLEZ SERSEN
agonzalezsersen@gmail.com

OCTUBRE - 2016

INTRODUCCIÓN

TERREMOTO DE IQUIQUE 2014

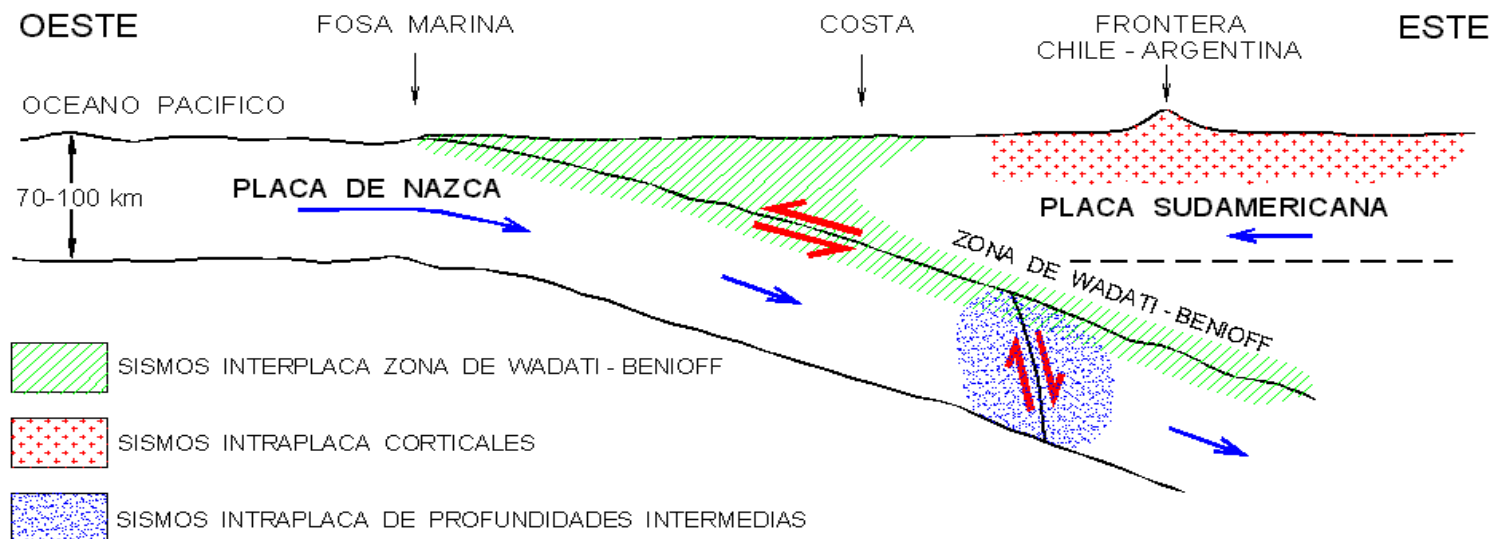
- Sismo de magnitud $M_s=8.2$ y distancia hipocentral $R=38.9\text{km}$ con epicentro en las costas de Iquique y Pisagua.



INTRODUCCIÓN

TERREMOTO DE IQUIQUE 2014

- Terremoto interplaca subductivo costero.
- Desplazamiento placa de Nazca bajo la placa Sudamericana.



INTRODUCCIÓN

TERREMOTO DE IQUIQUE 2014

- Ruiz y Saragoni (2005):

Roca y suelo duro ($360\text{m/s} < V_s < 1500\text{m/s}$)

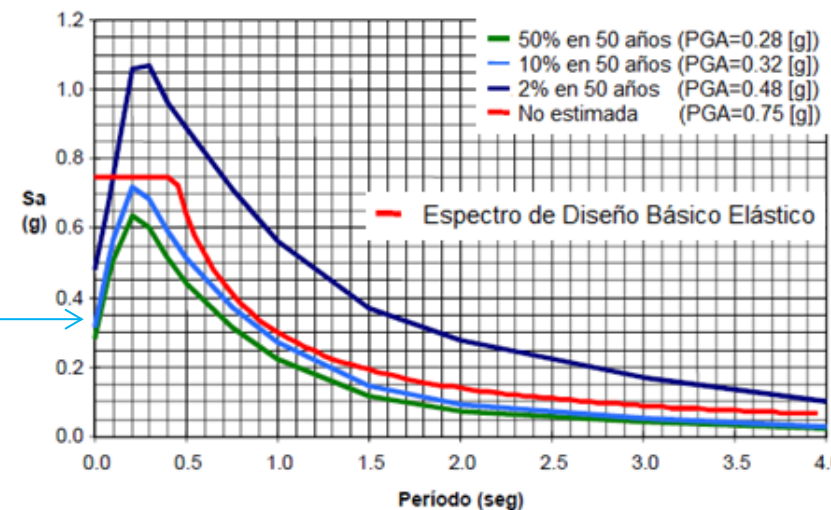
Rocas duras ($V_s > 1500\text{m/s}$)

$$a_{hor\text{m}\acute{a}x} = \frac{2 \cdot e^{1.28 \cdot M_s}}{(R + 30)^{1.09}} = 0.73 \text{ [g]}$$

$$a_{hor\text{m}\acute{a}x} = \frac{4 \cdot e^{1.3 \cdot M_s}}{(R + 30)^{1.43}} = 0.41 \text{ [g]}$$

- Estudio de riesgo sísmico (2003):

Roca dura: Dif.=22%



INTRODUCCIÓN

TERREMOTO DE IQUIQUE 2014

- Araya y Saragoni (1984):

Potencial destructivo

$$P_D = \frac{3.02 \cdot 10^{-3} \cdot e^{2 \cdot M_s} \cdot e^{-0.001R}}{(R + 60)^{1.39}} = 65 [10^{-4} \cdot g \cdot s^3]$$

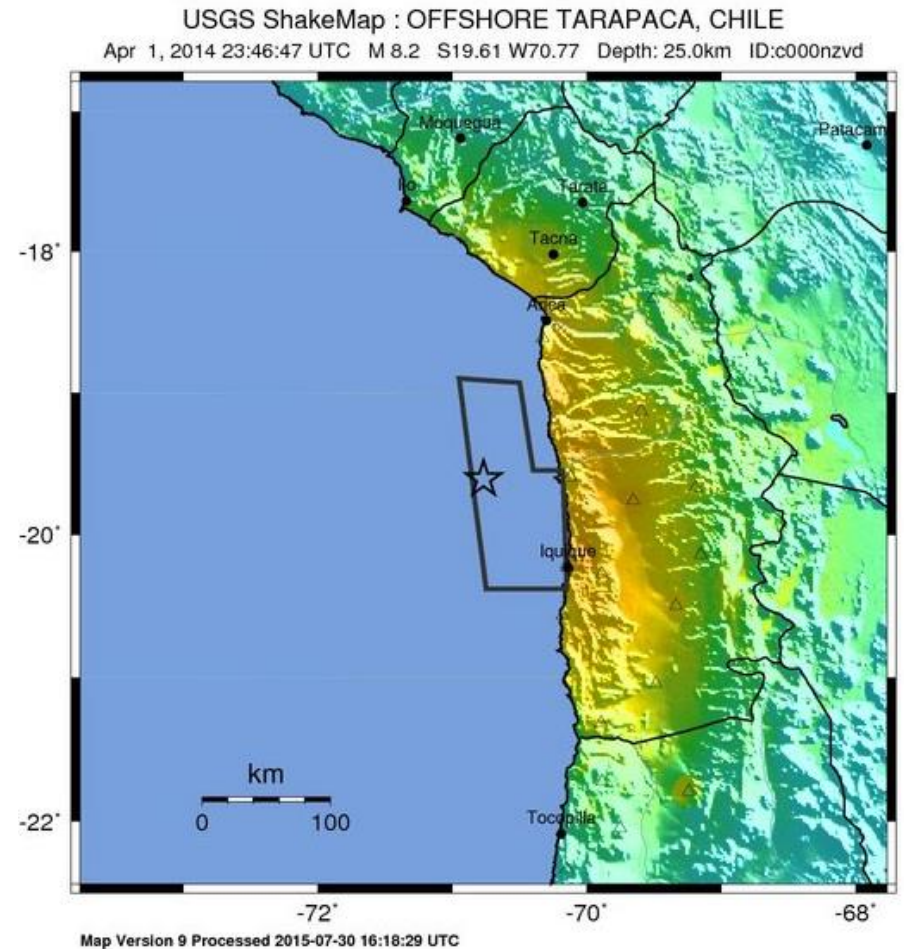
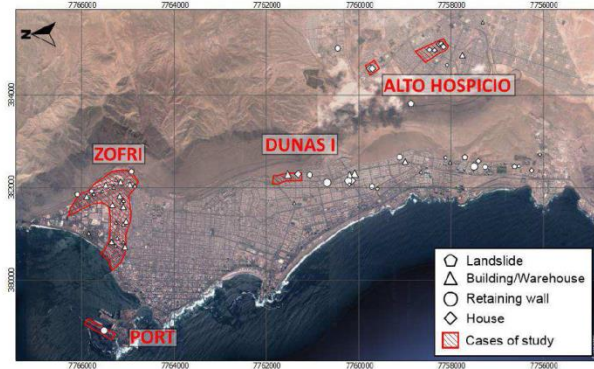
- Saragoni et al. (1989):

Intensidad de mercalli modificada

$$IMM = 4.86 + 1.35 \log(2 \cdot P_D) = 7.7$$

————> Daño Real

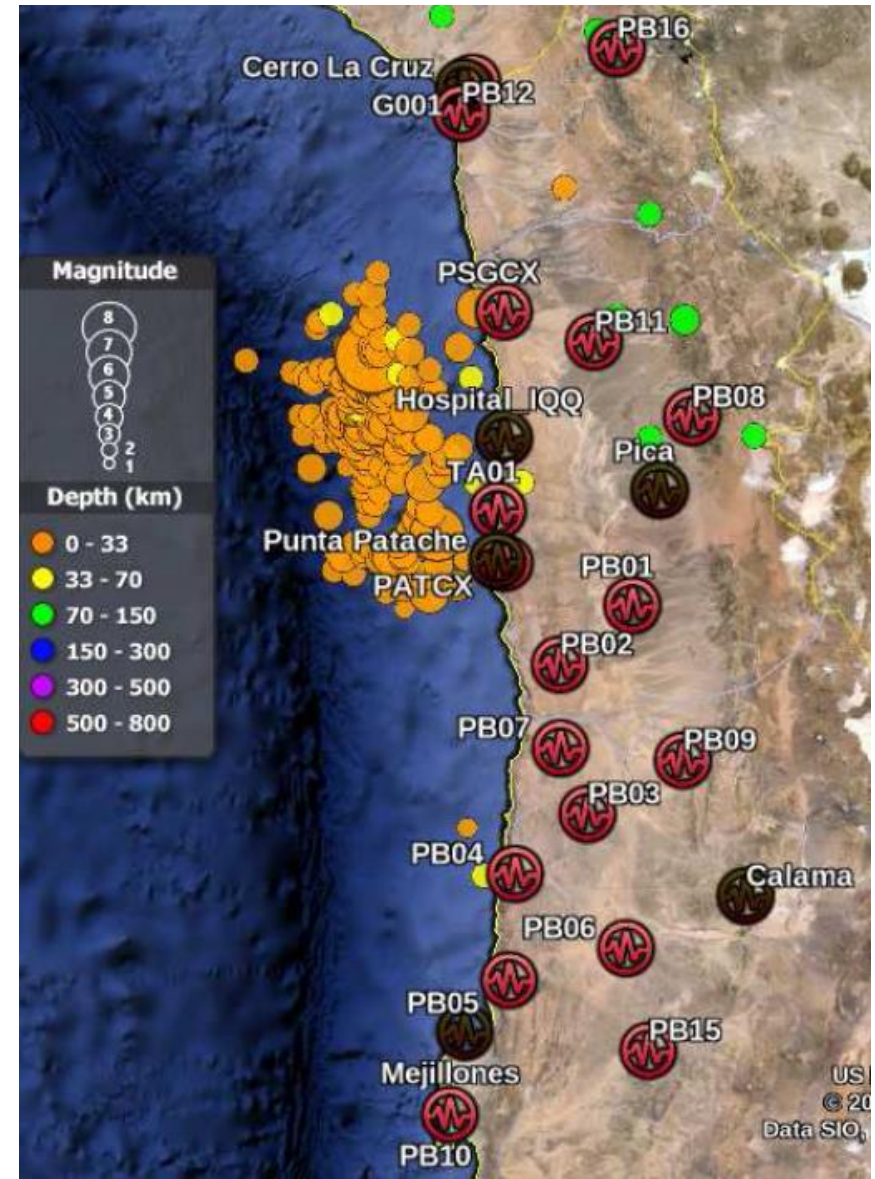
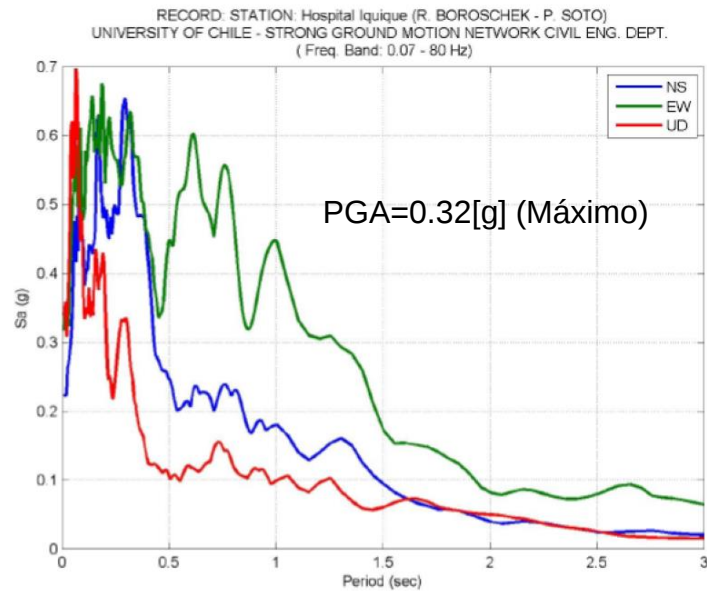
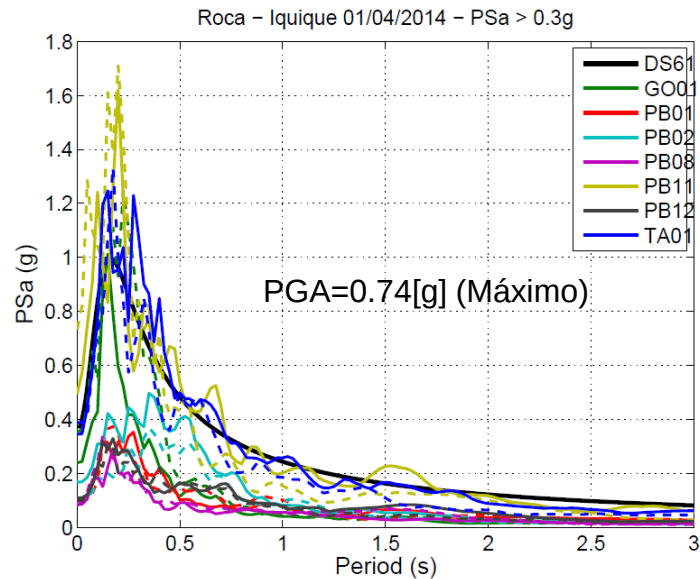
DAÑOS OBSERVADOS



PERCEIVED SHAKING	Not felt	Weak	Light	Moderate	Strong	Very strong	Severe	Violent	Extreme
POTENTIAL DAMAGE	none	none	none	Very light	Light	Moderate	Mod./Heavy	Heavy	Very Heavy
PEAK ACC.(%g)	<0.05	0.3	2.8	6.2	12	22	40	75	>139
PEAK VEL.(cm/s)	<0.02	0.1	1.4	4.7	9.6	20	41	86	>178
INSTRUMENTAL INTENSITY	I	II-III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X+

Scale based upon Worden et al. (2012)

ESTACIONES REGISTRADAS EN ROCA



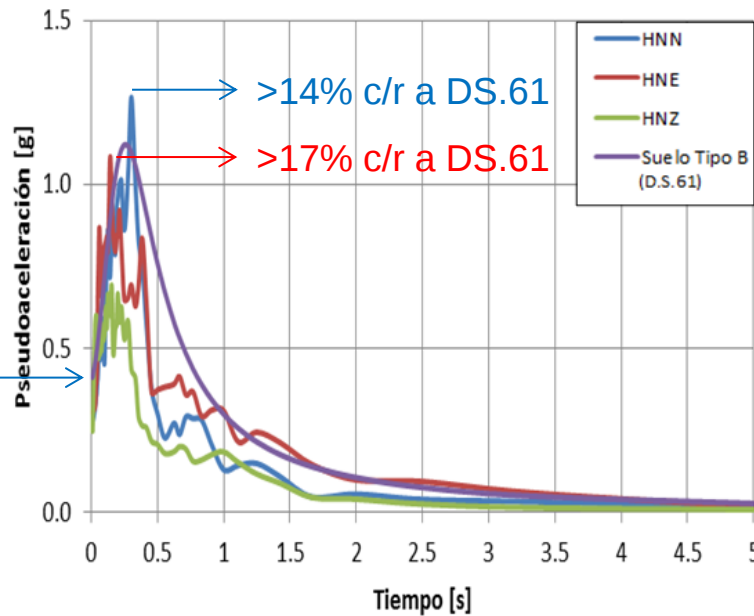
OBJETIVOS

- Realizar un análisis tiempo-historia de un muelle marginal para naves Post-Panamax sometido a un registro representativo donde se hincaron los pilotes, cuyo espectro arroje valores mayores que el definido en la norma de diseño.
- Analizar los desplazamientos relativos reales durante el Terremoto de Iquique 2014 ($M_s=8.2$).
- Comparar el corte basal en las dos direcciones horizontales.
- Obtener la máxima carga admisible en los pilotes.
- Estudiar la formación de rótulas plásticas en los pilotes.

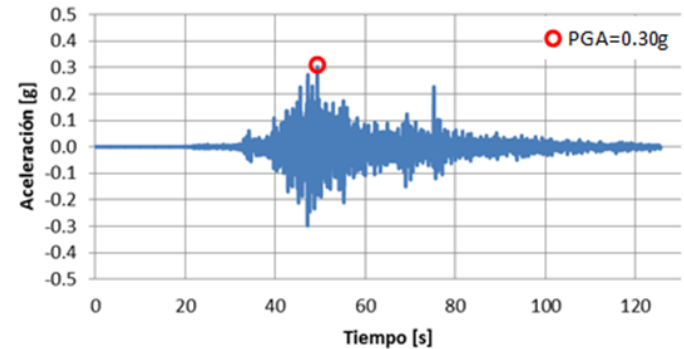
REGISTROS ESTACIÓN T05A



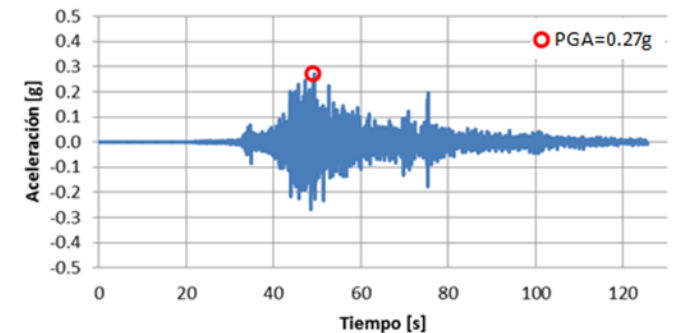
Componente: HNE, HNN y HNZ
Tasa de muestreo: 200 [muestras/seg]
Filtro: Pasabanda tipo Butterworht entre 0.01 y 45 [Hz]
Fuente: www.sismologia.cl



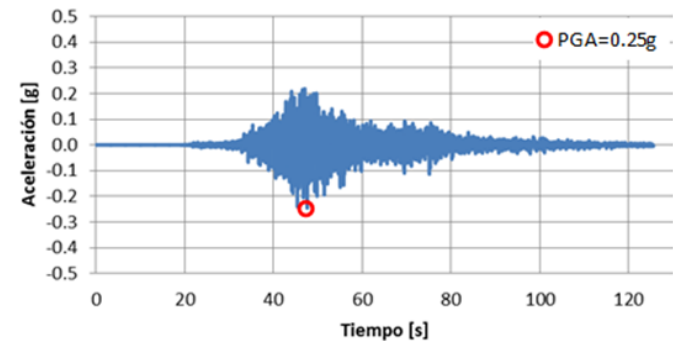
Componente: HNE



Componente: HNN



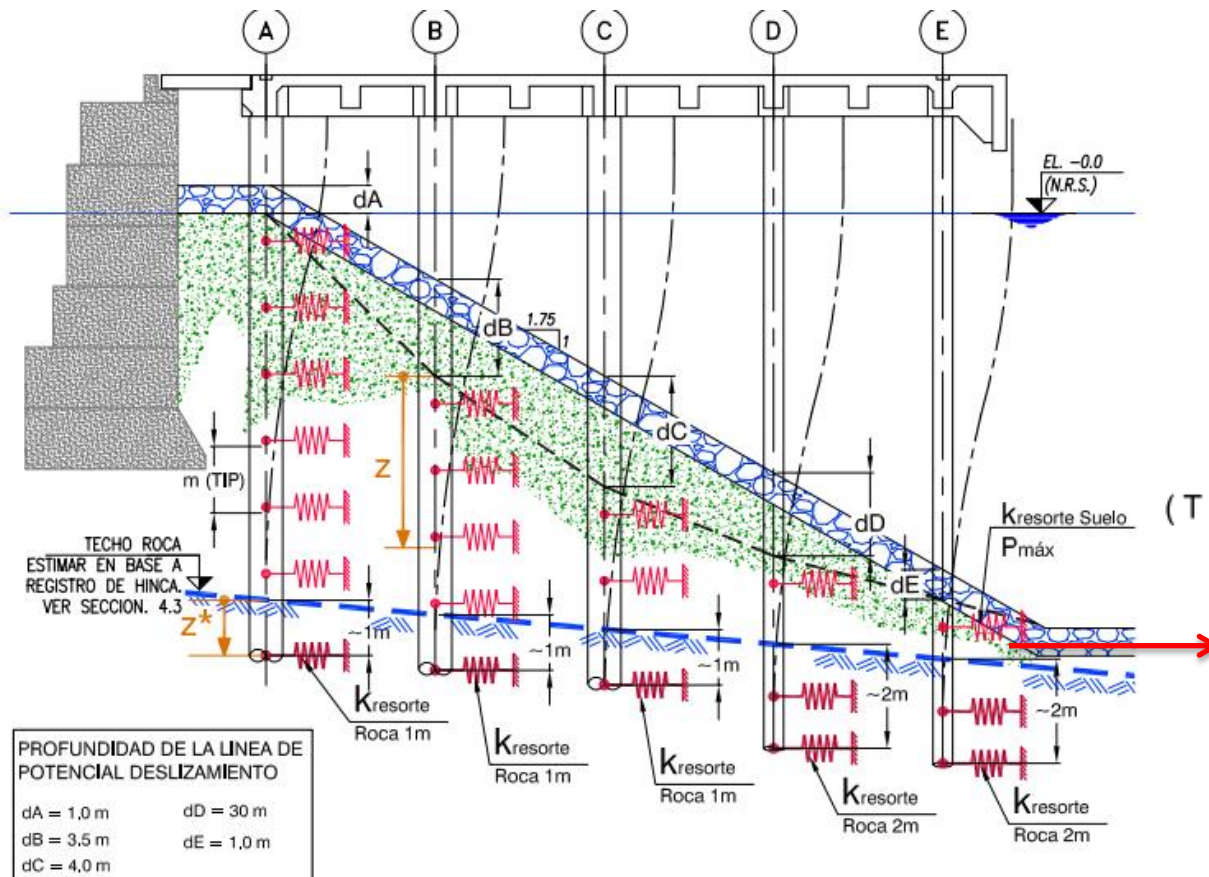
Componente: HNZ



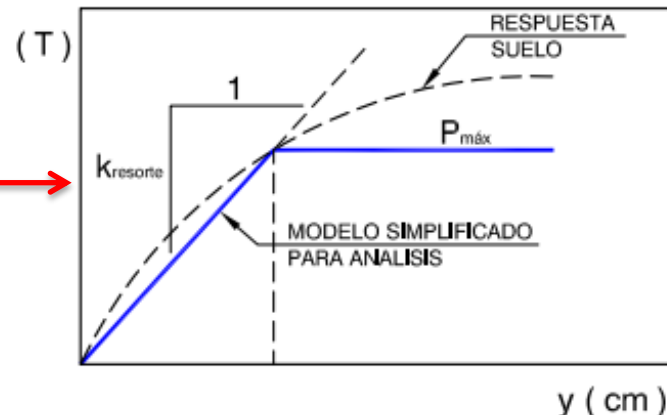
DESCRIPCIÓN DEL MODELO

CONDICIONES GEOTÉCNICAS

- Interacción suelo-pilote mediante modelos de respuesta bilineal

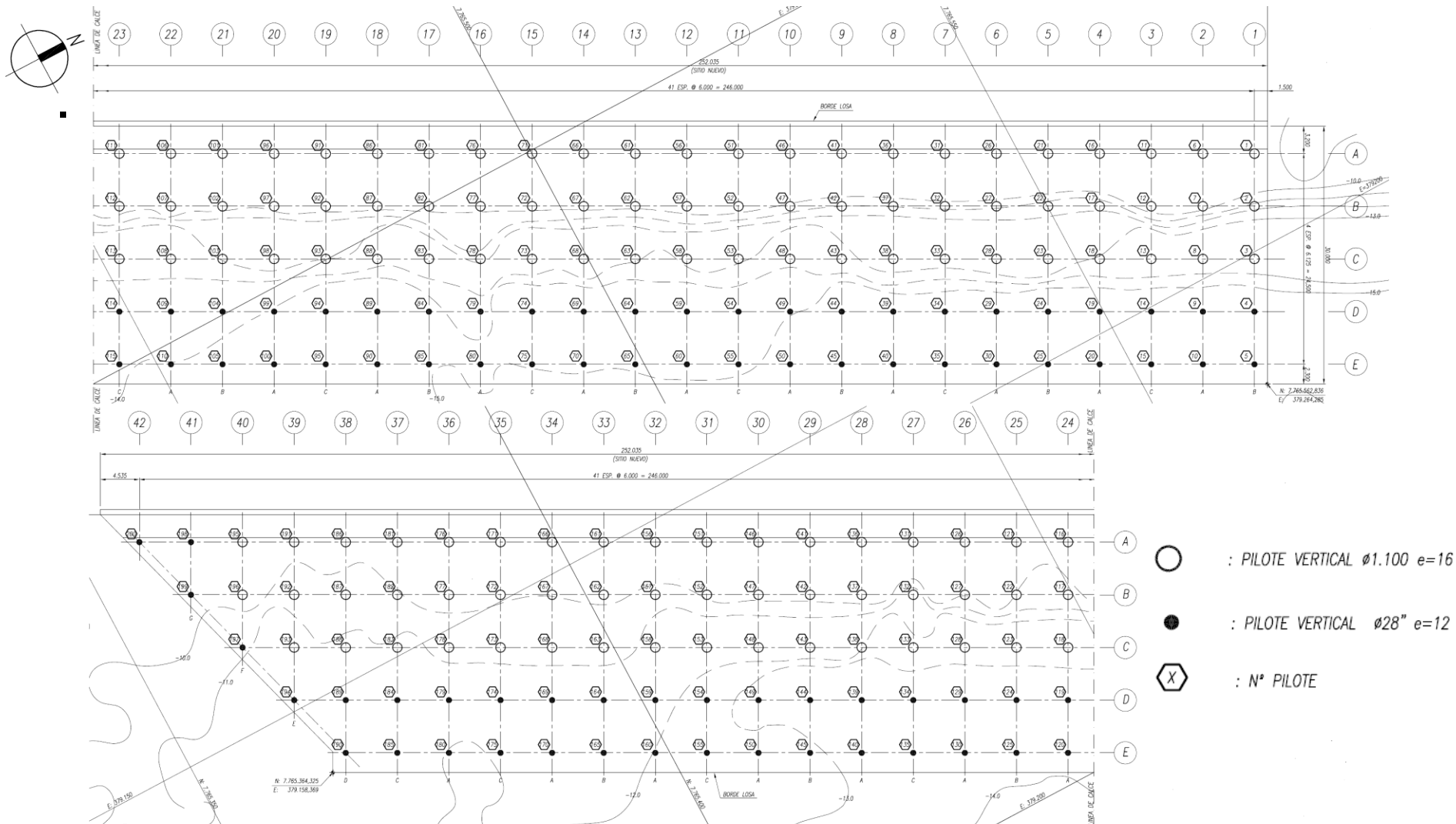


Los pilotes fueron hincados hasta el rechazo en un roca de mala calidad geotécnica ($RQD=0$).



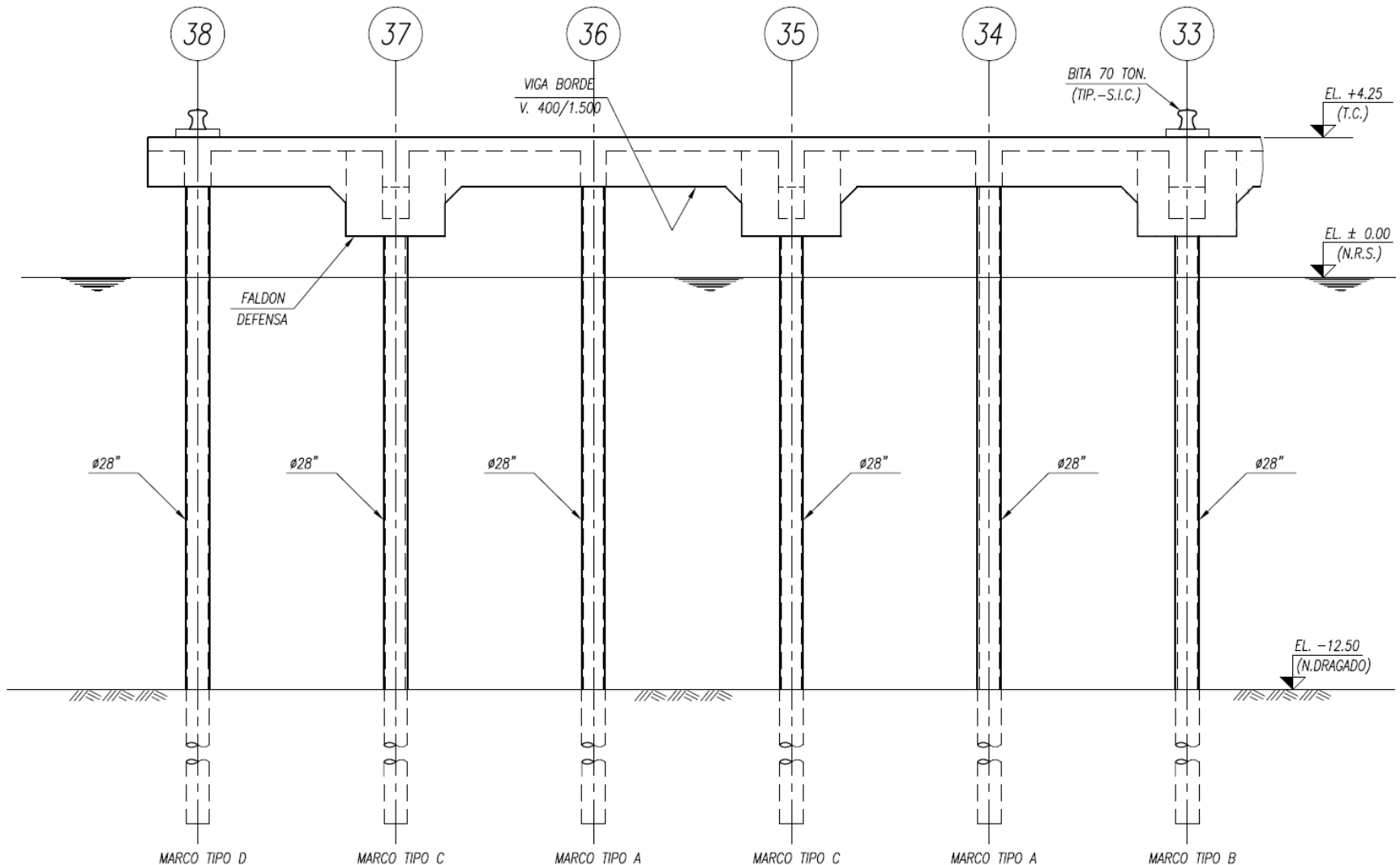
DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

DISPOSICIÓN DE PILOTES



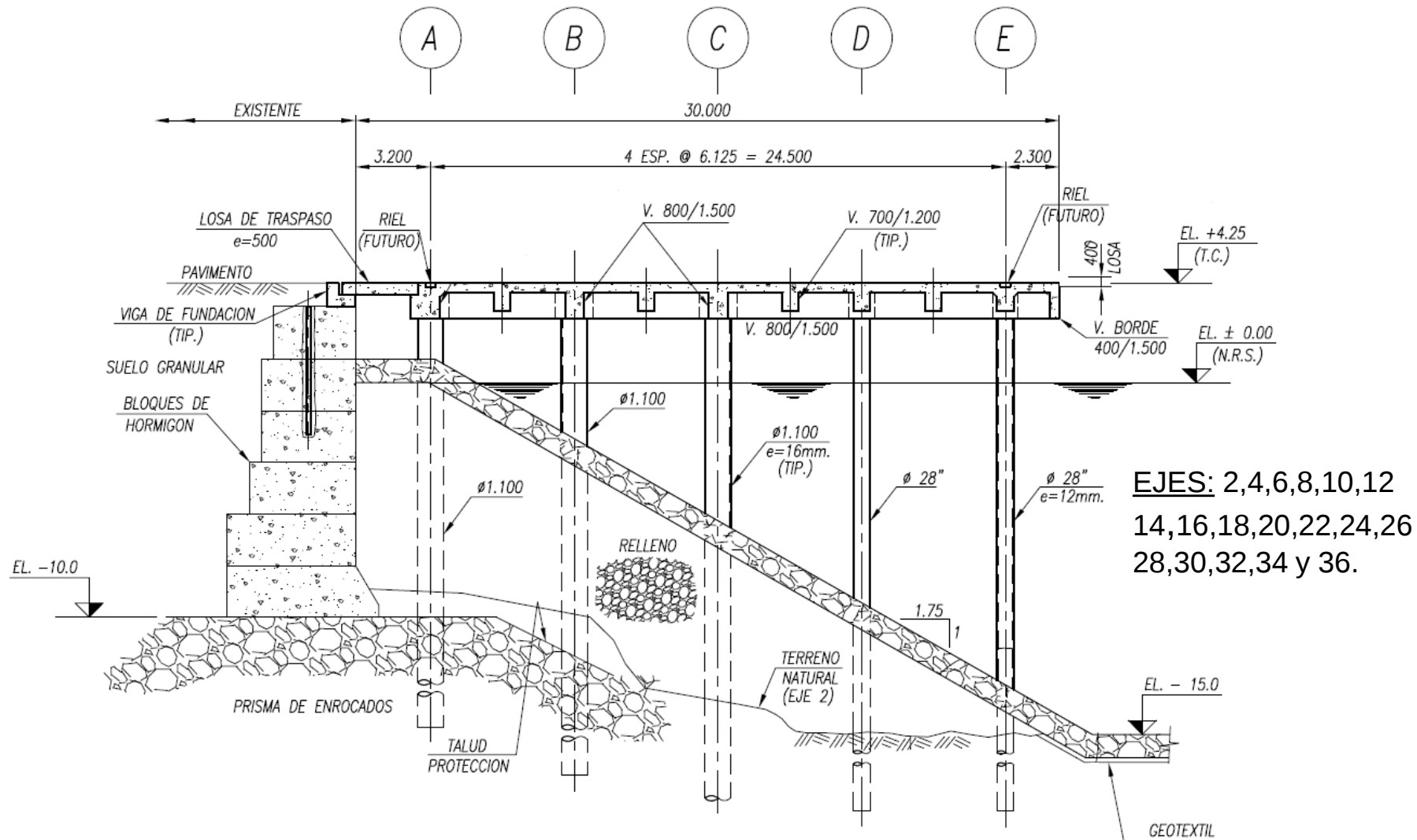
DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

ELEVACIÓN LONGITUDINAL - EJE E



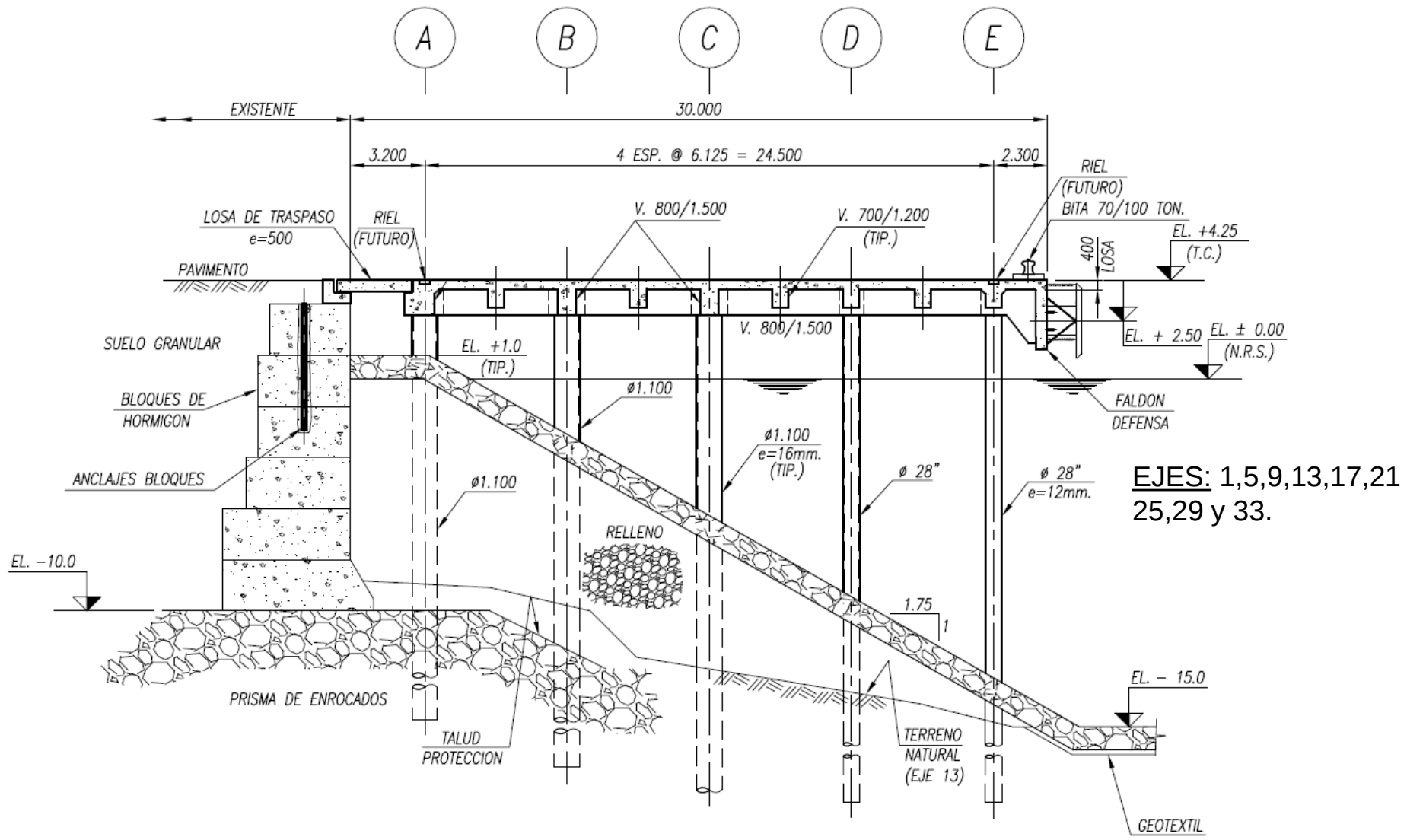
DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

ELEVACIÓN MARCO TÍPICO A



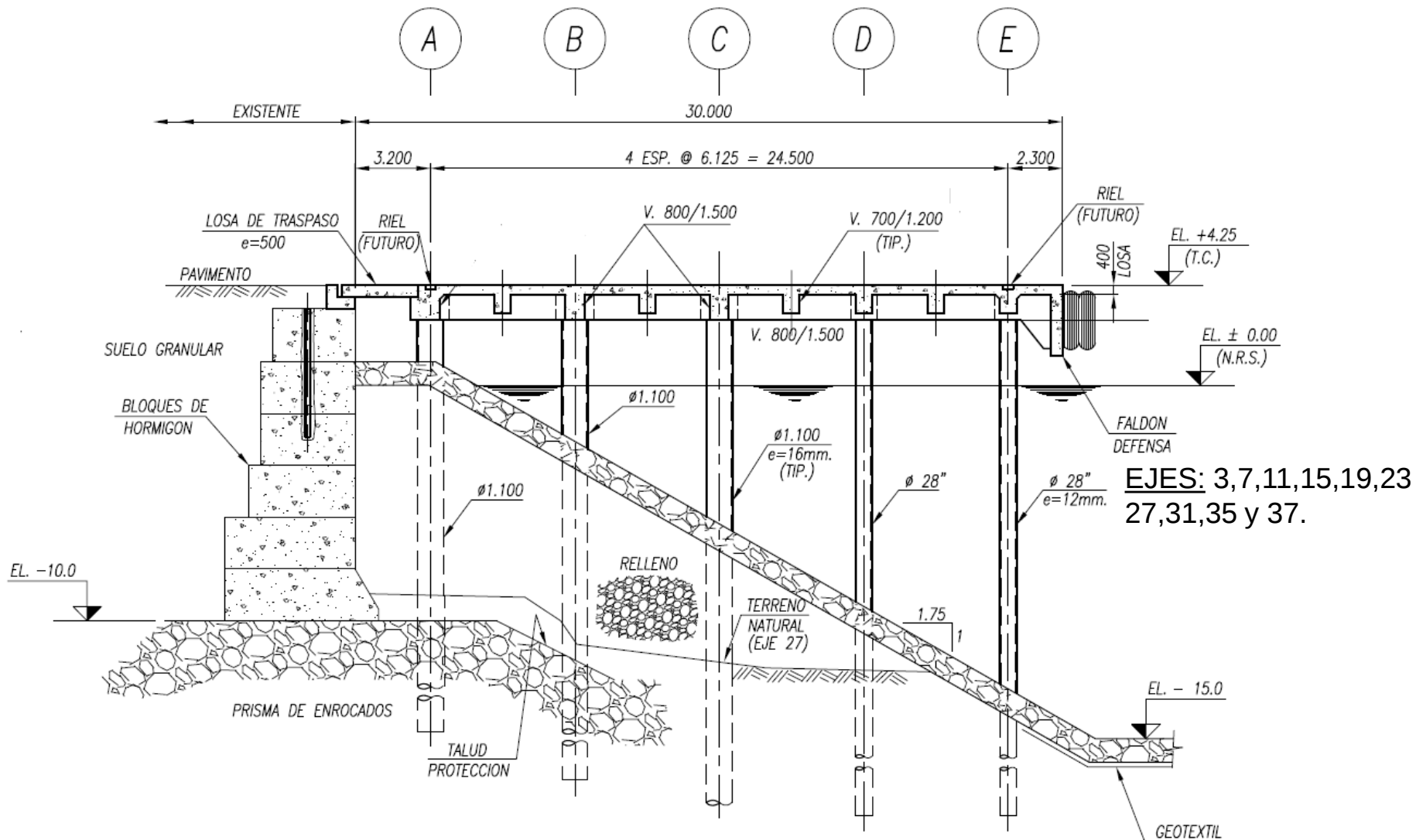
DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

ELEVACIÓN MARCO TÍPICO B



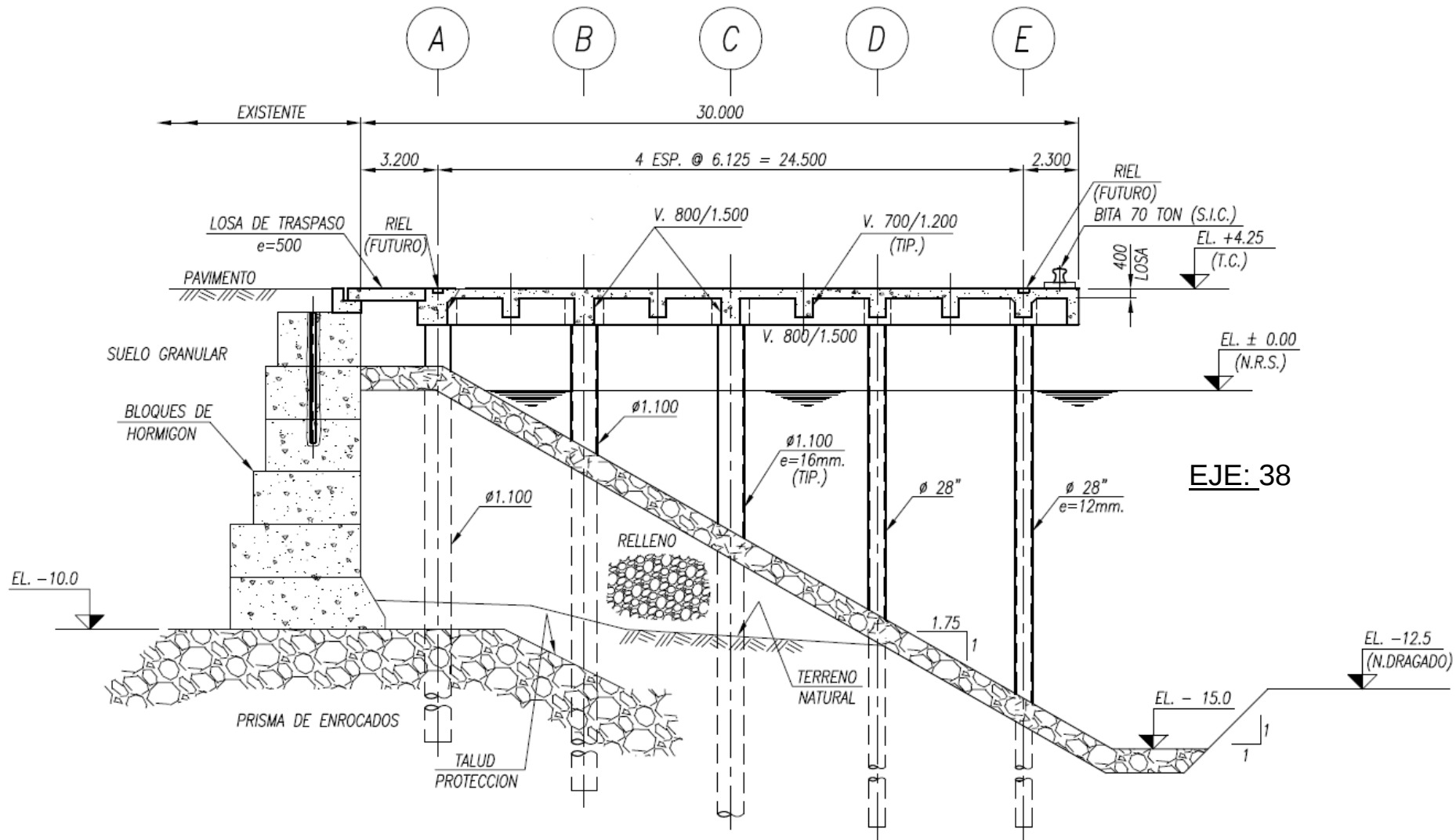
DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

ELEVACIÓN MARCO TÍPICO C



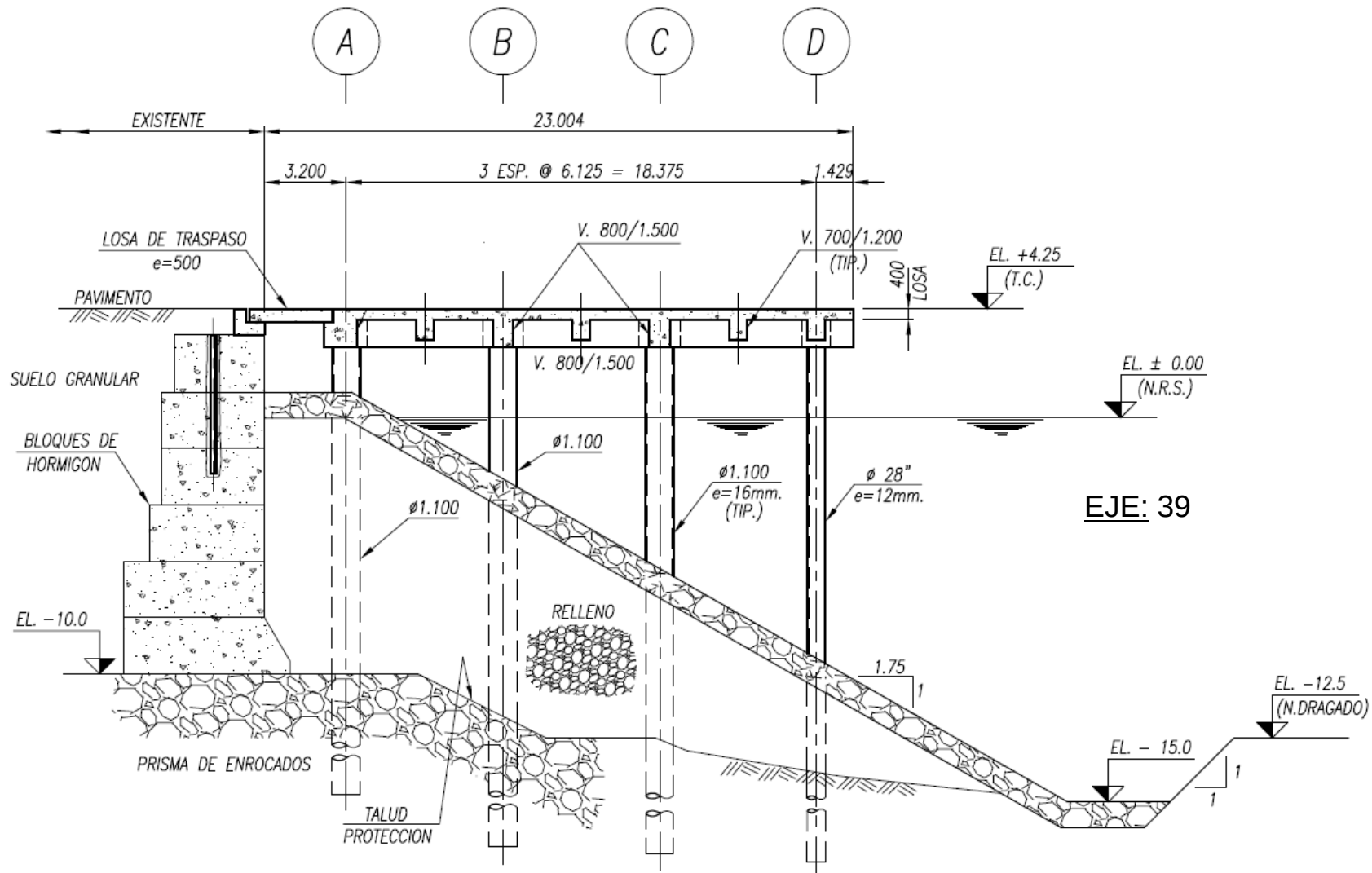
DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

ELEVACIÓN MARCO TÍPICO D



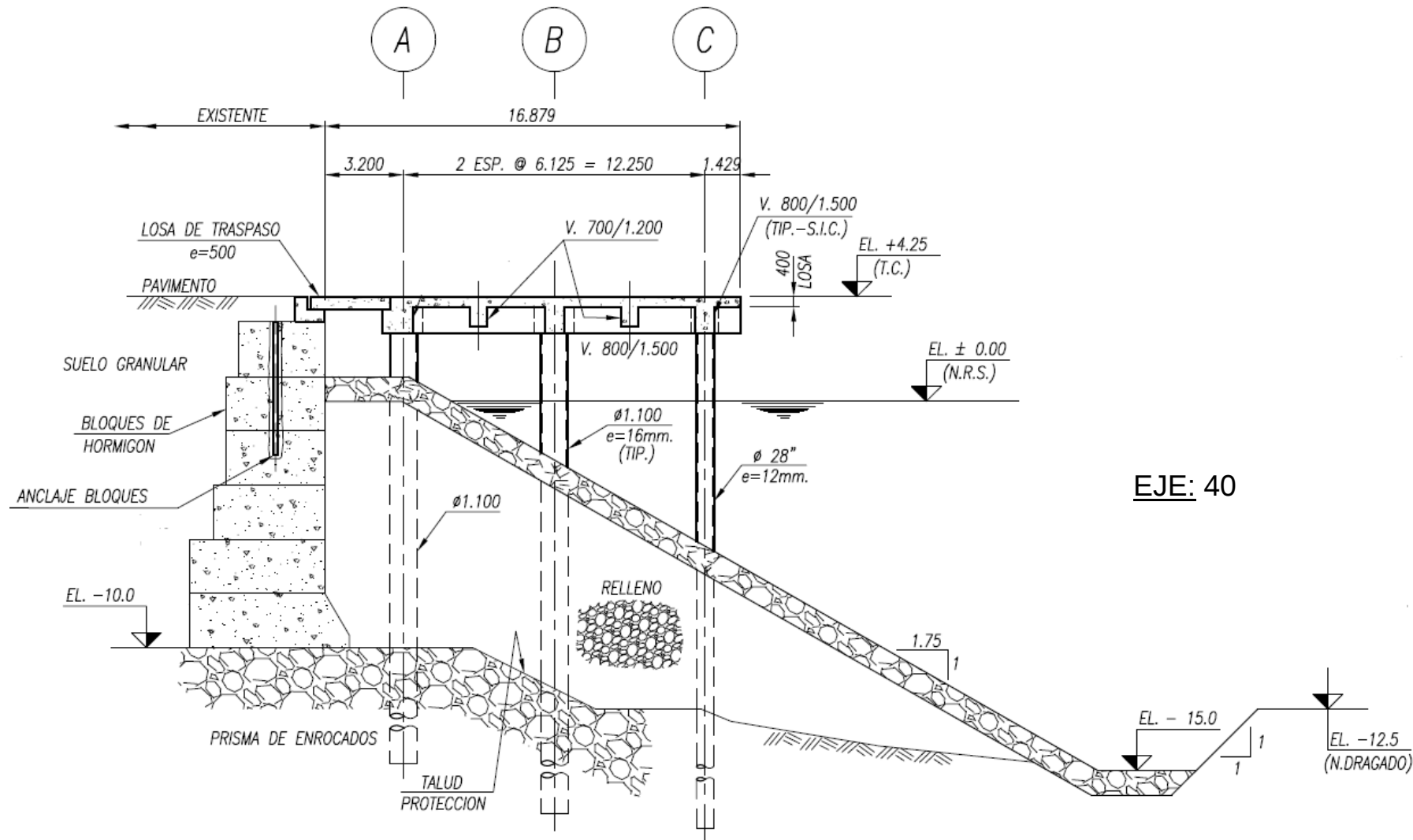
DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

ELEVACIÓN MARCO TÍPICO E



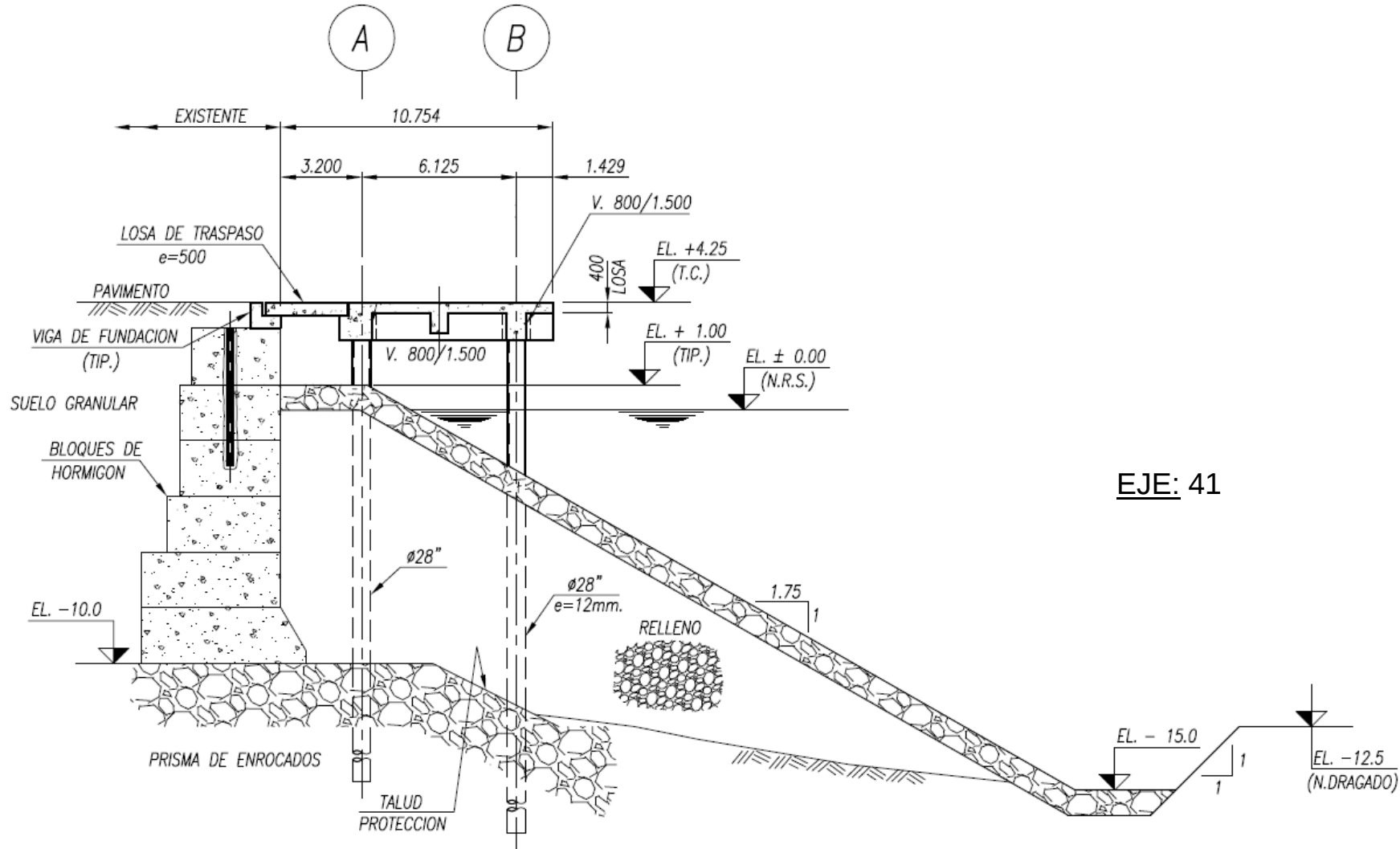
DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

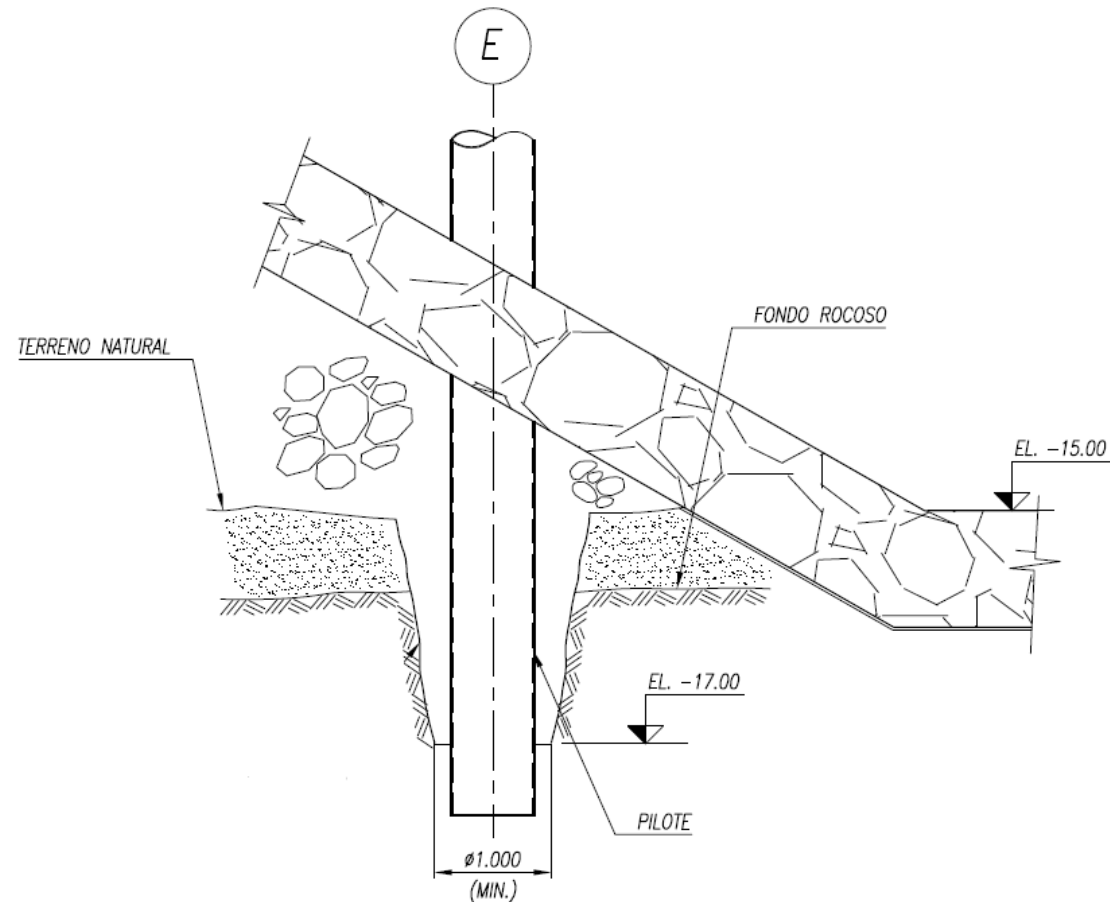
ELEVACIÓN MARCO TÍPICO F



DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

ELEVACIÓN MARCO TÍPICO G

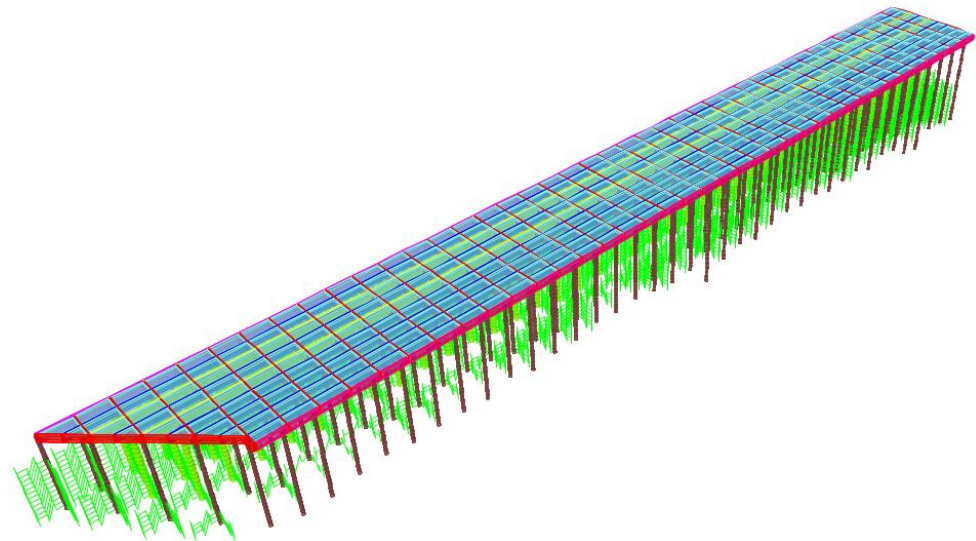




DESCRIPCIÓN DEL MODELO

ANÁLISIS ESTRUCTURAL

- SAP2000 Versión 16.0.0.
- Modelo elemento finitos.
- Elementos tipo barra:
 - Pilotes tubulares de acero.
 - Vigas de hormigón.
- Elementos tipo shell:
 - Losa de hormigón.
- Elementos tipo link:
 - Conectan el nodo al “suelo”.
- Diafragma rígido en el tablero.
- Segmentos rígidos en los tarugos.



DESCRIPCIÓN DEL MODELO

RÓTULAS ELASTOPLÁSTICAS A FLEXIÓN

Frame Hinge Property Data for M22 - Moment M2

Edit

Displacement Control Parameters

Point	Moment/SF	Rotation/SF
E	-1	-6
D	-1	-5
C	-1	-4
B	-1	0
A	0	0
B	1	0
C	1	4
D	1	5
E	1	6

☒ Symmetric

Type

☒ Moment - Rotation

☐ Moment - Curvature

Hinge Length

☐ Relative Length

Hysteresis Type And Parameters

Hysteresis Type

No Parameters Are Required For This Hysteresis Type

Load Carrying Capacity Beyond Point E

☒ Drops To Zero

☐ Is Extrapolated

Scaling for Moment and Rotation

☒ Use Yield Moment

Moment SF

☒ Use Yield Rotation (Steel Objects Only)

Rotation SF

Acceptance Criteria (Plastic Rotation/SF)

☒ Immediate Occupancy

1.

☒ Life Safety

2.

☒ Collapse Prevention

3.

☐ Show Acceptance Criteria on Plot

OK Cancel

Frame Hinge Property Data for M33 - Moment M3

Edit

Displacement Control Parameters

Point	Moment/SF	Rotation/SF
E	-1	-6
D	-1	-5
C	-1	-4
B	-1	0
A	0	0
B	1	0
C	1	4
D	1	5
E	1	6

☒ Symmetric

Type

☒ Moment - Rotation

☐ Moment - Curvature

Hinge Length

☐ Relative Length

Hysteresis Type And Parameters

Hysteresis Type

No Parameters Are Required For This Hysteresis Type

Load Carrying Capacity Beyond Point E

☒ Drops To Zero

☐ Is Extrapolated

Scaling for Moment and Rotation

☒ Use Yield Moment

Moment SF

☒ Use Yield Rotation (Steel Objects Only)

Rotation SF

Acceptance Criteria (Plastic Rotation/SF)

☒ Immediate Occupancy

1.

☒ Life Safety

2.

☒ Collapse Prevention

3.

☐ Show Acceptance Criteria on Plot

OK Cancel

PERFIL P110" e=16

$Z = 18802,261 \text{ [cm}^3\text{]}$

$F_y = 3,4 \text{ [Tonf/cm}^2\text{]}$

$M_p = F_y \cdot Z = 63927,69 \text{ [Tonf}\cdot\text{cm]}$

PERFIL P28" e=2

$Z = 5867,14 \text{ [cm}^3\text{]}$

$F_y = 3,4 \text{ [Tonf/cm}^2\text{]}$

$M_p = F_y \cdot Z = 19948,289 \text{ [Tonf}\cdot\text{cm]}$

ROTACIONES

$B = 1 \cdot \theta_y$, $IO = 2 \cdot \theta_y$, $LS = 3 \cdot \theta_y$, $CP = 4 \cdot \theta_y$

$C = 5 \cdot \theta_y$, $D = 6 \cdot \theta_y$, $E = 7 \cdot \theta_y$

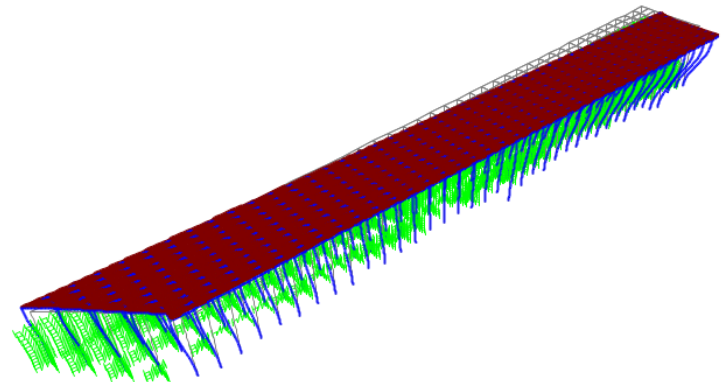
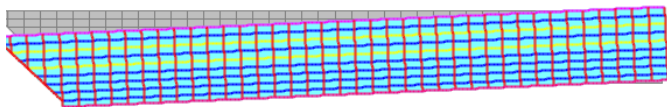
RESULTADOS DEL ANÁLISIS

ANÁLISIS MODAL

- Análisis EigenVector: Permite obtener las formas modales y las frecuencias considerando vibración libre sin amortiguamiento ($[K - \Omega^2 M] \Phi = 0$).

Modo	Período [s]	U_x [%]	U_y [%]	R_z [%]	Dirección
1	0.64	8.16	41.91	45.86	Torsional
2	0.62	8.12	54.56	34.45	Transversal
3	0.50	80.20	0.08	16.02	Longitudinal

Peso sísmico=15500 [ton]



RESULTADOS DEL ANÁLISIS

ANÁLISIS TIEMPO HISTORIA NO-LINEAL

- Es un análisis paso-paso de la respuesta en el tiempo de la estructura cuando se somete a una carga que varia en el tiempo (Ej. Registro Sísmico de Iquique).
- Se modela el amortiguamiento de sistema como amortiguamiento de Rayleigh considerando que el coeficiente de amortiguamiento modal es igual al 5% para los modos laterales 1° y 2° ($[C] = a_M [M] + a_K [K]$).
- Se utiliza el método de integración directa.
- Se analiza el efecto P-delta.
- Se desarrolla un análisis dinámico no-lineal.

$$M\ddot{u}(t) + C\dot{u}(t) + Ku(t) + F(t)_{NL} = F(t)$$

RESULTADOS DEL ANÁLISIS

ANÁLISIS TIEMPO HISTORIA NO-LINEAL

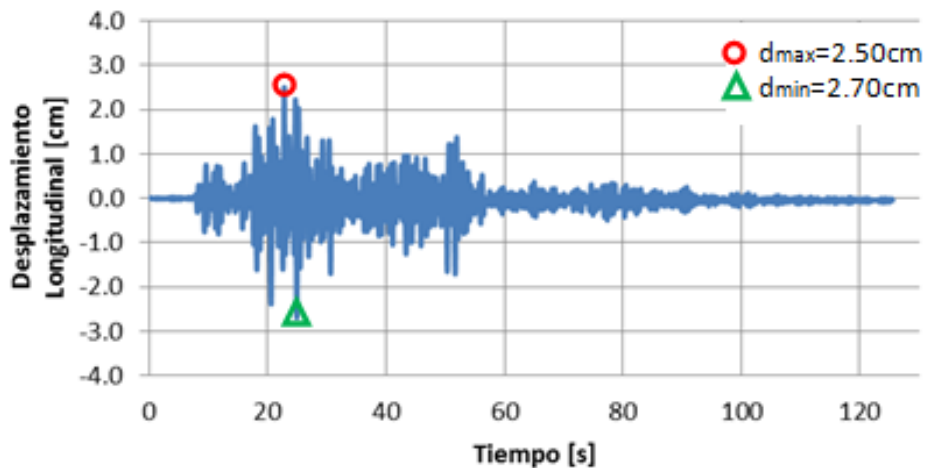
THNL —→ Los registros deben aplicarse al mismo tiempo.

- THNL_U1: La componente HNE del registro se aplica en la dirección longitudinal al mismo tiempo que la componente HNN en la dirección transversal y la componente HNZ en la dirección vertical.
- THNL_U2: La componente HNN del registro se aplica en la dirección longitudinal al mismo tiempo que la componente HNE en la dirección transversal y la componente HNZ en la dirección vertical.

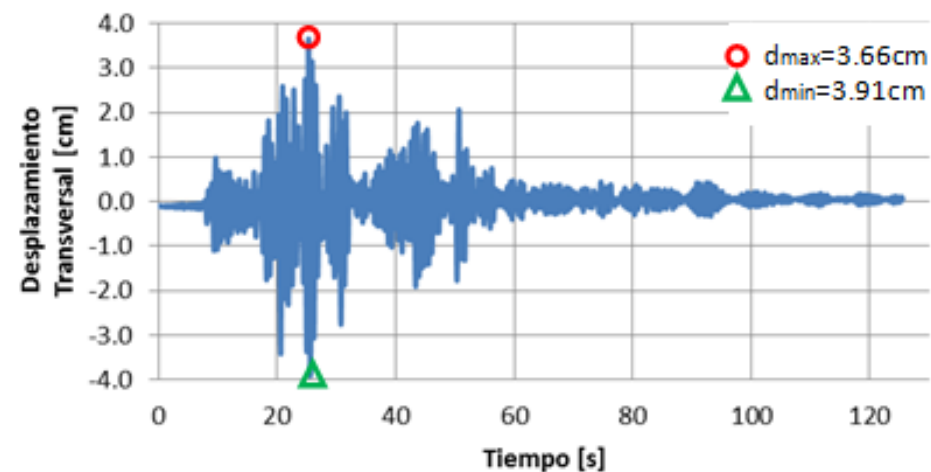
RESULTADOS DEL ANÁLISIS

DESPLAZAMIENTO DEL CENTRO DE MASAS

Respuesta CM



Respuesta CM

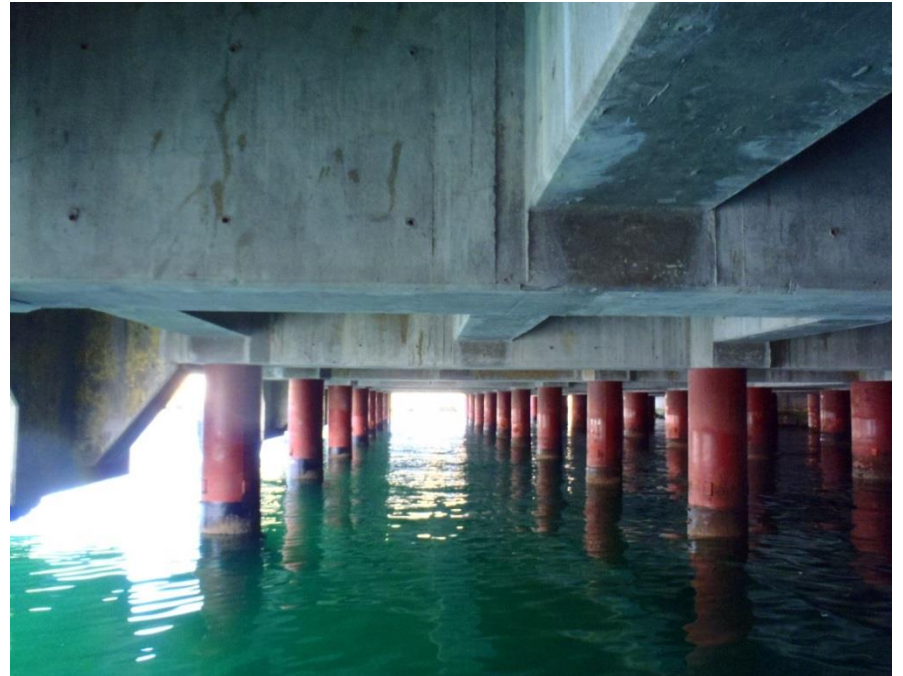


$$\delta_{adm} = 0.015 \cdot h = 0.015 \cdot 1525 = 23 \text{ [cm]} \leq d_{max}$$

⇒ Buen desempeño durante el sismo

RESULTADOS DEL ANÁLISIS

OBSERVACIONES LUEGO DEL SISMO



—> Se pudo mantener las operaciones portuarias luego del sismo

RESULTADOS DEL ANÁLISIS

COEFICIENTE SÍSMICO ELÁSTICO

Combinación	Tipo	Reacción Long. [Ton]	Reacción Transv. [Ton]
THNL_U1	Max	6036.57	4464.89
THNL_U1	Min	-5385.57	-5134.10
THNL_U2	Max	3979.95	5592.89
THNL_U2	Min	-5043.26	-6897.42

Reacciones Sísmicas (SAP2000)

$$C_{longitudinal}^{SAP2000} = \frac{Q_{max}}{P_{sism}} = \frac{\sqrt{6036.57^2 + 4464.89^2}}{15500} = \frac{7508.36}{15500} = 0.48$$

$$C_{transversal}^{SAP2000} = \frac{Q_{max}}{P_{sism}} = \frac{\sqrt{5043.26^2 + 6897.42^2}}{15500} = \frac{8544.53}{15500} = 0.55$$

DS.61 (Diseño)

$$C = \frac{2.75 \cdot S \cdot A_0}{g} \cdot \left(\frac{T'}{T^*} \right)^n$$

$$\rightarrow C_{longitudinal}(T^* = 0.50) = 0.69 > C_{longitudinal}^{SAP2000}$$

$$\rightarrow C_{transversal}(T^* = 0.62) = 0.51 < C_{transversal}^{SAP2000}$$

Saragoni (1993)

$$k_n = \begin{cases} 0.30 \frac{a_{max}}{g}; & a_{max} \leq 0.67 [g] \\ 0.22 \sqrt[3]{\frac{a_{max}}{g}}; & a_{max} > 0.67 [g] \end{cases}$$

$$k_n(a_{max} = 0.41g) = 0.123 \text{ (roca dura)}$$

$$\rightarrow C_H = R \cdot k_n = 5 \cdot 0.123 \approx 0.62$$

$$\rightarrow C_{transversal}^{SAP2000} < C_H < C_{longitudinal}^{SAP2000}$$

RESULTADOS DEL ANÁLISIS

REACCIONES MÁXIMAS SOBRE LOS PILOTES

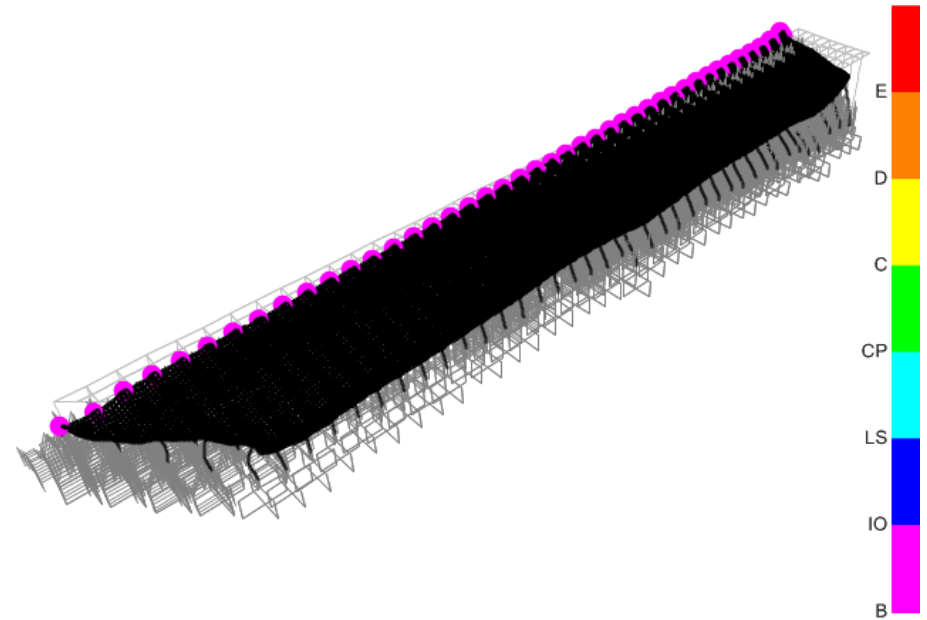
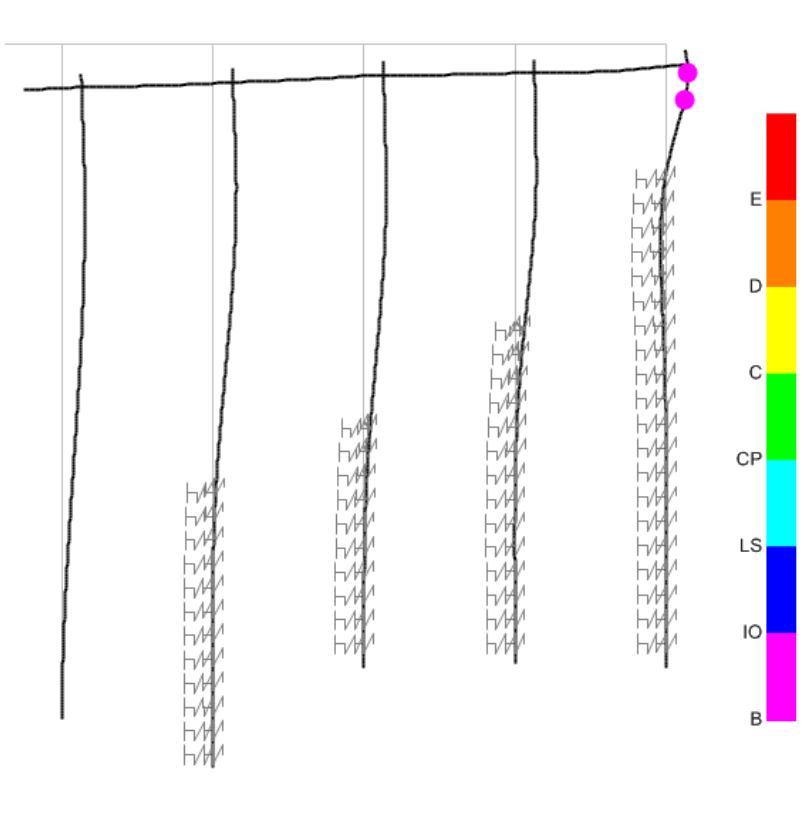
Combinación	Tipo	F ₁ [Ton]	F ₂ [Ton]	F ₃ [Ton]	M ₁ [Ton·m]	M ₂ [Ton·m]	M ₃ [Ton·m]
THNL_U1	Max	14.853	15.673	224.917	118.024	105.328	1.626
THNL_U1	Min	-16.520	-18.968	-159.235	-126.381	-97.844	-1.568
THNL_U2	Max	14.045	22.309	230.288	163.590	73.551	1.801
THNL_U2	Min	-11.169	-27.287	-141.516	-162.840	-90.559	-1.933

- Combinación : THNL_U1
- Compresión Máxima: 224.92 [Ton]
- Área Punta de Pilote: 0.055 [m²]
- Factor de Seguridad : 2.0
- Esfuerzo Admisible : 8256 [Ton/m²]

- Combinación : THNL_U2
- Compresión Máxima: 230.29 [Ton]
- Área Punta de Pilote: 0.055 [m²]
- Factor de Seguridad : 2.0
- Esfuerzo Admisible : 8453 [Ton/m²]

RESULTADOS DEL ANÁLISIS

RÓTULAS PLÁSTICAS



CONCLUSIONES

- La estructura fue capaz de tolerar el desplazamiento relativo producido por el tercer mayor terremoto de Chile, resultando segura independiente del nivel de resistencia suministrado.
- Formación de rótulas plásticas en la cabeza de los pilotes del lado tierra debido al empuje del terraplén y a las mayores demandas de desplazamientos en los pilotes cortos.
- Las rótulas plásticas sólo llegan a un punto de ocupación inmediata y nunca siquiera se acercan al colapso (no fallan).
- El terraplén permaneció estable durante el sismo porque tuvo la capacidad suficiente de acumular las demandas de desplazamientos, no obstante, pudo haber estado sometido a algo de movimiento pero sin colapsar.
- Se verifica que no hubo una pérdida significativa de resistencia al corte debido al aumento de la presión de poros por tratarse de un relleno granular grueso bien compactado.

RECOMENDACIONES

- Realizar siempre análisis no lineales en el tiempo, ya que éstos determinan el real comportamiento de la estructura al calcular en cada paso de tiempo las matrices de masa, rigidez y amortiguamiento.
- Para estimar la ductilidad μ (cociente entre la deformación plástica en donde se alcanza el mecanismo de colapso y la máxima deformación elástica) y el factor de reducción R en muelles portuarios, se sugiere realizar un análisis estático no lineal Pushover en función del tipo de suelo de fundación (Miranda,1993).
- Para determinar el daño estructural luego de un sismo, se recomienda realizar una inspección basada en vibraciones ambientales para estimar las propiedades dinámicas de la estructura porque los parámetros físicos de la estructura pueden haber variado considerablemente (Andersen, 1997).

BIBLIOGRAFÍA

- Andersen, P. (1997). Identification of Civil Engineering Structures using Vector ARMA Models. *PhD. Thesis. Aalborg, Denmark. Aalborg University, Department of Building Technology and Structural Engineering. 258 p.*
- Araya, R. y Saragoni, G.R. (1984). Earthquake acelerogram destructiviness potential factor. *8th World Conference on Eartquake Engineering, San Francisco, USA.*
- Barrientos, S. (2014). Informe Técnico: Terremoto de Iquique, Mw=8.2. *Centro Sismológico Nacional. Universidad de Chile.*
- Miranda, E. (1993). Site-dependent strength reduction factors. *Journal of Structural Engineering. ASCE, 119 (12), 3503-3519.*

BIBLIOGRAFÍA

- Ruiz, S. y Saragoni, G.R. (2005). Fórmulas de atenuación para la subducción de Chile considerando los dos mecanismos de sismogénesis y los efectos del suelo. *IX Jornadas Chilenas de Sismología e Ingeniería Antisísmica, Concepción, 16-19 Noviembre 2005.*
- Saragoni, G.R., Sáez, A. y Holmberg, A. (1989). Factor Potencial Destructivo y Potencial Destructivo del Terremoto de Chile de 1985. *5tas Jornadas Chilenas de Sismología e Ingeniería Antisísmica, Viña del mar, Chile, 1989, Vol. 1, pp. 369-378.*
- Saragoni, G.R. (1993). Análisis de Riesgo Sísmico para la Reconstrucción del Puerto de Valparaíso. *6tas Jornadas Chilenas de sismología e Ingeniería Antisísmica, Santiago, Chile, 1993, Vol. II, pp. 165-178.*