

**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

**FACULTAD DE INGENIERÍA  
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

**TEMA:**

**EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE MUELLES PORTUARIOS  
INCORPORANDO DISPOSITIVOS DE AISLACIÓN SÍSMICA**

**AUTOR:**

**Lascano Rodríguez, Alejandro Diego**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de  
INGENIERO CIVIL**

**TUTOR:**

**Hernández Barredo, Jaime Francisco**

**Guayaquil, Ecuador**

**28 de febrero del 2020**



UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

## **CERTIFICACIÓN**

Certificamos que el presente trabajo de titulación, fue realizado en su totalidad por **Lascano Rodríguez Alejandro Diego**, como requerimiento para la obtención del título de **Ingeniero Civil**.

### **TUTOR**

f. \_\_\_\_\_

**Hernández Barredo, Jaime Francisco**

### **DIRECTORA DE LA CARRERA**

f. \_\_\_\_\_

**Alcívar Bastidas, Stefany Esther**

**Guayaquil, a los 28 días del mes de febrero del año 2020**



UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

## **DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD**

Yo, **Lascano Rodríguez, Alejandro Diego**

### **DECLARO QUE:**

El Trabajo de Titulación, **EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE MUELLES PORTUARIOS INCORPORANDO DISPOSITIVOS DE AISLACIÓN SÍSMICA** previo a la obtención del título de **INGENIERO CIVIL**, ha sido desarrollado respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan en el documento, cuyas fuentes se incorporan en las referencias o bibliografías. Consecuentemente este trabajo es de mi total autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance del Trabajo de Titulación referido.

**Guayaquil, a los 28 días del mes de febrero del año 2020**

### **EL AUTOR**

f. \_\_\_\_\_

**Lascano Rodríguez, Alejandro Diego**



UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

## **AUTORIZACIÓN**

Yo, **Lascano Rodríguez, Alejandro Diego**

Autorizo a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil a la **publicación** en la biblioteca de la institución del Trabajo de Titulación, **EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE MUELLES PORTUARIOS INCORPORANDO DISPOSITIVOS DE AISLACIÓN SÍSMICA**, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

**Guayaquil, a los 28 días del mes de febrero del año 2020**

**EL AUTOR:**

f. \_\_\_\_\_

**Lascano Rodríguez, Alejandro Diego**

# REPORTE URKUND



## Urkund Analysis Result

**Analysed Document:** LASCANO\_ALEJANDRO\_FINAL.pdf (D63801661)  
**Submitted:** 2/12/2020 4:30:00 PM  
**Submitted By:** claglas@hotmail.com  
**Significance:** 3 %

### Sources included in the report:

submission.pdf (D62483044)  
Tesis Jose Suares.pdf (D41422290)  
[https://opensees.berkeley.edu/wiki/index.php/OpenSees\\_uniaxialMaterial\\_Arguments\\_-\\_Steel02\\_a23afeee-2a05-4e4d-8034-7a41b24a6463](https://opensees.berkeley.edu/wiki/index.php/OpenSees_uniaxialMaterial_Arguments_-_Steel02_a23afeee-2a05-4e4d-8034-7a41b24a6463)  
<https://core.ac.uk/download/pdf/156899039.pdf>  
<https://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/28524/1/Trabajo%20de%20titulaci%C3%B3n.pdf>  
<https://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/30349/1/Trabajo%20de%20titulaci%C3%B3n.pdf>

### Instances where selected sources appear:

30

The screenshot shows the URKUND interface with the following details:

- Documento:** LASCANO\_ALEJANDRO\_FINAL.pdf (D63801661)
- Presentado:** 2020-02-12 10:30 (-05:00)
- Presentado por:** Clara Glas (claglas@hotmail.com)
- Recibido:** clara.glas.ucsg@analysis.orkund.com
- Mensaje:** Trabajo de titulo Alejandro Lascano. [Mostrar el mensaje completo](#)

A yellow highlight indicates: 3% de estas 76 páginas, se componen de texto presente en 7 fuentes.

The 'Lista de fuentes' (List of sources) panel on the right contains the following entries:

Categoría	Enlace/nombre de archivo
	Tesis Jose Suares.pdf
	<a href="https://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/28524/1/Trabajo%20de%20titulaci%C3%B3n.pdf">https://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/28524/1/Trabajo%20de%20titulaci%C3%B3n.pdf</a>
	<a href="https://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/30349/1/Trabajo%20de%20titulaci%C3%B3n.pdf">https://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/30349/1/Trabajo%20de%20titulaci%C3%B3n.pdf</a>
	submission.pdf
	<a href="https://opensees.berkeley.edu/wiki/index.php/OpenSees_uniaxialMaterial_Arguments_-_Steel02_a23afeee-2a05-4e4d-8034-7a41b24a6463">a23afeee-2a05-4e4d-8034-7a41b24a6463</a>
	<a href="https://opensees.berkeley.edu/wiki/index.php/OpenSees_uniaxialMaterial_Arguments_-_Steel02_a23afeee-2a05-4e4d-8034-7a41b24a6463">https://opensees.berkeley.edu/wiki/index.php/OpenSees_uniaxialMaterial_Arguments_-_Steel02_a23afeee-2a05-4e4d-8034-7a41b24a6463</a>
	<a href="https://core.ac.uk/download/pdf/156899039.pdf">https://core.ac.uk/download/pdf/156899039.pdf</a>

100% # 1 Activo

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de INGENIERO CIVIL

TUTOR: Hernández Barredo, Jaime Francisco Guayaquil, Ecuador 28 de febrero del 2020

ÍNDICE INTRODUCCIÓN ..... 1

## AGRADECIMIENTOS

A mi madre, María Auxiliadora, por enseñarme a hacer las cosas con amor y a amar la vida.

A mi padre, Alejandro José, por enseñarme a trabajar duro y a ser lo suficientemente sabio como para saber cuándo escuchar, y cuándo liderar.

A mis hermanos, Nicolás, Lucas, Martín y Camila, por enseñarme a compartir, y por seguir enseñándome aún tantas cosas más.

Al resto de mi numerosa familia, tanto de padre, madre y padrastros, por enseñarme a ser perseverante, a nunca rendirse, y a saber aprovechar la vida junto a los seres queridos.

A mis mejores amigos, Mario, Gustavo, Carlos, Juan Diego y Sebastián, por enseñarme a ser mejor persona y llenar mis días de música y alegría.

A mi enamorada, Erika, por enseñarme a querer y a disfrutar la vida, y por no dejar de apoyarme en lo que me propongo, tanto con tus palabras de aliento y calma, como con tu cariño.

A mis amigos de la universidad, La Matadiza, por estos últimos 5 años de estudio, apoyo, sacrificio y entrega, que nos permitieron compartir conocimiento y momentos inolvidables. Especialmente agradezco a Fumarole (Frank y José Francisco) por permitirme compartir con ustedes durante este proceso de aprendizaje y por el surgimiento de este gran equipo que operó desde que nos conocimos.

A mis profesores de la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, y a todos quienes trabajan en Sinecuanon Cía Ltda., por enseñar con pasión y fervor cada aspecto de su materia y del campo profesional, y finalmente, por guiarme a ser un Ingeniero Civil.

## **DEDICATORIA**

A mis padres, Mariuxi y Alejandro, pues gracias a ellos he podido cursar por diversas experiencias en mi vida de las que surgieron las herramientas, conceptos y lecciones que coincidentemente me han servido para poder plantear, ejecutar, y definir este trabajo de titulación a profundidad y a total entendimiento. Esto es para ustedes.

**Alejandro Diego Lascano Rodríguez**



**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

**TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN**

f. \_\_\_\_\_  
**LILIA VALAREZO MORENO DE PAREJA, M.S.**  
DECANA DE LA FACULTAD

f. \_\_\_\_\_  
**JOSÉ BARROS CABEZAS, M. Sc.**  
COORDINADOR DEL ÁREA

f. \_\_\_\_\_  
**CARLOS CHON DÍAZ, M. Sc.**  
OPONENTE

# ÍNDICE

<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>2</b>
ANTECEDENTES .....	2
OBJETIVO GENERAL .....	2
OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	2
ALCANCE .....	3
<b>CAPÍTULO I</b> .....	<b>4</b>
<b>1 MARCO TEÓRICO</b> .....	<b>4</b>
1.1 ANÁLISIS PUSHOVER.....	4
1.2 MODELOS DE LOS MATERIALES .....	5
1.3 ANÁLISIS BASADOS EN FIBRAS .....	5
1.4 CONFINAMIENTO DEL HORMIGÓN.....	6
1.5 EFECTOS P- $\Delta$ .....	7
1.6 RÓTULA PLÁSTICA.....	7
1.7 CARGAS EN MUELLES .....	9
1.7.1 CARGAS MUERTAS.....	9
1.7.2 CARGAS MUERTAS SÚPER-IMPUESTAS .....	9
1.7.3 CARGAS VIVAS GRAVITACIONALES.....	9
1.7.4 CARGAS DE ATRAQUE .....	9
1.7.5 CARGAS DE AMARRE .....	10
1.7.6 CARGAS SÍSMICAS.....	11
1.8 LONGITUD EFECTIVA DE PILOTES EN UN MUELLE .....	12
1.9 DESEMPEÑO SÍSMICO DE ESTRUCTURAS .....	13

1.10	DESEMPEÑO SÍSMICO DE MUELLES CON PILOTES SEGÚN PIANC 14	
1.10.1	NIVEL 1: SERVICIO .....	14
1.10.2	NIVEL 2: CONTROL DE DAÑO .....	15
1.11	MÉTODOS NO-LINEALES DE EVALUACIÓN SÍSMICA .....	17
1.11.1	ASCE 41-13: MÉTODO DE LOS COEFICIENTES DE MODIFICACIÓN DE DESPLAZAMIENTOS .....	18
1.11.2	FEMA 440: MÉTODO DE ESPECTRO DE CAPACIDAD POR LINEARIZACIÓN EQUIVALENTE – MÉTODO A: ITERACIÓN DIRECTA 21	
1.11.3	FEMA 440: MÉTODO DE ESPECTRO DE CAPACIDAD POR LINEARIZACIÓN EQUIVALENTE – MÉTODO B: INTERSECCIÓN CON MADRS 24	
1.11.4	FEMA 440: MÉTODO DE ESPECTRO DE CAPACIDAD POR LINEARIZACIÓN EQUIVALENTE – MÉTODO C: LUGAR GEOMÉTRICO CON VARIOS MADRS .....	26
1.12	PELIGRO SÍSMICO DEL ECUADOR SEGÚN NEC-15 .....	27
1.12.1	FACTOR DE ZONA (Z).....	27
1.12.2	GEOLOGÍA LOCAL .....	28
1.12.3	COEFICIENTES DE PERFIL DE SUELO .....	29
1.12.4	PARÁMETROS ADICIONALES.....	29
1.13	CURVAS DE PELIGRO SÍSMICO DE NEC-15.....	31
1.14	NIVELES DE AMENAZA SÍSMICA SEGÚN LA NEC-15.....	32
1.15	AISLADORES SÍSMICOS .....	32
1.15.1	AISLADORES DE CAUCHO.....	33
	<b>CAPÍTULO II.....</b>	<b>35</b>
	<b>2 ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO Y DESEMPEÑO DE UN MUELLE CONVENCIONAL.....</b>	<b>35</b>

2.1	DESCRIPCIÓN DEL CASO DE ESTUDIO .....	35
2.2	DESCRIPCIÓN DEL MODELO ESTRUCTURAL .....	38
2.2.1	HIPÓTESIS DEL MODELO.....	41
2.2.2	MODELACIÓN DE SECCIONES POR FIBRAS.....	43
2.2.3	MODELOS DE LOS MATERIALES.....	46
2.2.4	CARGAS.....	52
2.2.5	FACTORES DE SOBRE-RESISTENCIA .....	55
2.3	DETERMINACIÓN DE CURVA DE CAPACIDAD .....	57
2.3.1	COMPORTAMIENTO NO-LINEAL.....	58
2.4	CRITERIOS DE ACEPTACIÓN DE DESEMPEÑO .....	66
2.4.1	LÍMITES DE DEFORMACIONES UNITARIAS.....	67
2.4.2	LÍMITES DE DESEMPEÑO .....	68
2.5	DETERMINACIÓN DE AMENAZA SÍSMICA.....	78
2.6	DESEMPEÑO DE LA ESTRUCTURA .....	83
2.6.1	PUNTOS DE DESEMPEÑO .....	84
<b>CAPÍTULO III.....</b>		<b>101</b>
<b>3 ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO Y DESEMPEÑO DEL MUELLE CON AISLACIÓN SÍSMICA .....</b>		<b>101</b>
3.1	PREDISEÑO DEL AISLADOR.....	101
3.2	MUELLE CON PLATAFORMA TOTALMENTE AISLADA .....	104
3.2.1	RESORTES SEMI-RÍGIDOS COMO AISLADORES SÍSMICOS 104	
3.2.2	DESCRIPCIÓN DEL MODELO ESTRUCTURAL .....	105
3.2.3	DETERMINACIÓN DE LA CURVA DE CAPACIDAD.....	107
3.2.4	LIMITES DE DESEMPEÑO .....	114
3.2.5	DESEMPEÑO DEL MUELLE CON PLATAFORMA TOTALMENTE AISLADA.....	123

3.3	MUELLE CON PLATAFORMA LOCALMENTE AISLADA.....	128
3.3.1	DESCRIPCIÓN DEL MODELO.....	128
3.3.2	DETERMINACIÓN DE LA CURVA DE CAPACIDAD.....	129
3.3.3	COMPORTAMIENTO NO LINEAL.....	130
3.3.4	LIMITES DE DESEMPEÑO .....	134
3.3.5	DESEMPEÑO DEL MUELLE CON PLATAFORMA LOCALMENTE AISLADA .....	140
<b>CAPÍTULO IV .....</b>		<b>148</b>
<b>4</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>148</b>
4.1	CONCLUSIONES .....	148
4.2	RECOMENDACIONES.....	152
<b>5</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>155</b>
<b>6</b>	<b>ANEXOS.....</b>	<b>158</b>
6.1	PUNTOS DE DESEMPEÑO DE MUELLE CON PLATAFORMA TOTALMENTE AISLADA .....	159
6.1.1	ASCE 41-13: Método de los Coeficientes .....	159
6.1.2	FEMA 440: Espectro de Capacidad – Método A: Iteración Directa 162	
6.1.3	FEMA 440: Espectro de Capacidad – Método B: Intersección con MADRS.....	165
6.1.4	FEMA 440: Espectro de Capacidad – Método C: Lugar geométrico con varios MADRS.....	168
6.2	PUNTOS DE DESEMPEÑO DE MUELLE CON PLATAFORMA LOCALMENTE AISLADA.....	171
6.2.1	ASCE 41-13: Método de los Coeficientes .....	171
6.2.2	FEMA 440: Espectro de Capacidad – Método A: Iteración Directa 174	

6.2.3	FEMA 440: Espectro de Capacidad – Método B: Intersección con MADRS.....	177
6.2.4	FEMA 440: Espectro de Capacidad – Método C: Lugar geométrico con varios MADRS.....	180
6.3	PLANOS ESTRUCTURALES DE MUELLE DISEÑADO CONVENCIONALMENTE .....	183

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla # 1 - Límites de deformaciones unitarias en pilotes - Nivel de Desempeño 1. Tomado del PIANC (International Navigation Association, 2001, p. 235).....	14
Tabla # 2 - Límites de defromaciones unitarias en pilotes – Nivel de Desempeño 2. Tomado del PIANC (International Navigation Association, 2001, p. 236).....	16
Tabla # 3 – Niveles de amenaza sísmica. Tomado de la NEC-15 (2015, p. 41). .....	32
Tabla # 4 - Propiedades mecánicas de los materiales utilizados en el muelle existente. Adaptado de (2017, p. 6).....	38
Tabla # 5 - Parámetros ingresados para modelar a cada tipo de hormigón.	49
Tabla # 6 - Parámetros ingresados para modelar los distintos tipos de acero. .....	51
Tabla # 7 – Magnitud y tipo de cargas analizadas en muelle existente. Adaptado de Memoria Estructural de Muelle (2017, p. 7).....	53
Tabla # 8 – Resistencias esperadas en los materiales del modelo estructural. .....	56
Tabla # 9 - Límites de deformaciones unitarias en pilotes - Nivel de Desempeño 1. Adaptado del PIANC (International Navigation Association, 2001, p. 235).....	67
Tabla # 10 – Límites de deformaciones unitarias en pilotes – Nivel de Desempeño 2. Adaptado del PIANC (International Navigation Association, 2001, p. 236).....	67
Tabla # 11 – Comparación entre límites de servicio de cada pilote. ....	72
Tabla # 12 – Comparación entre límites de control de daño de cada pilote.	77
Tabla # 13 – Selección de Niveles de amenaza sísmica para evaluación de desempeño. Adaptado de la NEC-15 (2015, p. 41). ....	79
Tabla # 14 – Parámetros obtenidos para determinación de demanda de aceleraciones para distintos niveles de amenaza sísmica. ....	82

Tabla # 15 – Parámetros utilizados y calculados en el método de los coeficientes.....	85
Tabla # 16 – Parámetros utilizados y calculados en el método de los coeficientes.....	86
Tabla # 17 – Parámetros utilizados y calculados en el método de los coeficientes.....	87
Tabla # 18 - Parámetros obtenidos en el método A del espectro de capacidad. ....	88
Tabla # 19 - Parámetros obtenidos en el método A del espectro de capacidad. ....	89
Tabla # 20 - Parámetros obtenidos en el método A del espectro de capacidad. ....	90
Tabla # 21 - Parámetros obtenidos en el método B del espectro de capacidad. ....	91
Tabla # 22 - Parámetros obtenidos en el método B del espectro de capacidad. ....	92
Tabla # 23 - Parámetros obtenidos en el método B del espectro de capacidad. ....	93
Tabla # 24 - Parámetros obtenidos en el método C del espectro de capacidad. ....	94
Tabla # 25 - Parámetros obtenidos en el método C del espectro de capacidad. ....	95
Tabla # 26 - Parámetros obtenidos en el método C del espectro de capacidad. ....	96
Tabla # 27 - Resumen de puntos de desempeño para distintos niveles de sismos en muelle convencional. ....	98
Tabla # 28 – Resumen de comparación de desempeño a nivel de Servicio ( $T_r = 75$ años).....	98
Tabla # 29 - Resumen de comparación de desempeño a nivel de Diseño ( $T_r = 475$ años).....	98
Tabla # 30 – Comparación entre límites de servicio de cada pilote. ....	118
Tabla # 31 – Comparación entre límites de control de daño de cada pilote. ....	122
Tabla # 32 - Resumen de comparación de desempeño a varios niveles...	125

Tabla # 33 – Comparación entre límites de servicio de cada pilote. ....	137
Tabla # 34 – Comparación entre límites de servicio de cada pilote. ....	139
Tabla # 35 - Resumen de puntos de desempeño para distintos niveles de sismos en muelle localmente aislado. ....	141
Tabla # 36 - Resumen de comparación de desempeño a nivel de Servicio. .....	142
Tabla # 37 - Resumen de comparación de desempeño a nivel de Control de Daño. ....	142
Tabla # 38 – Parámetros utilizados y calculados en el método de los coeficientes. ....	159
Tabla # 39 – Parámetros utilizados y calculados en el método de los coeficientes. ....	160
Tabla # 40 – Parámetros utilizados y calculados en el método de los coeficientes. ....	161
Tabla # 41 - Parámetros obtenidos en el método A del espectro de capacidad. .....	162
Tabla # 42 - Parámetros obtenidos en el método A del espectro de capacidad. .....	163
Tabla # 43 - Parámetros obtenidos en el método A del espectro de capacidad. .....	164
Tabla # 44 - Parámetros obtenidos en el método B del espectro de capacidad. .....	165
Tabla # 45 - Parámetros obtenidos en el método B del espectro de capacidad. .....	166
Tabla # 46 - Parámetros obtenidos en el método B del espectro de capacidad. .....	167
Tabla # 47 - Parámetros obtenidos en el método C del espectro de capacidad. .....	168
Tabla # 48 - Parámetros obtenidos en el método C del espectro de capacidad. .....	169
Tabla # 49 - Parámetros obtenidos en el método C del espectro de capacidad. .....	170
Tabla # 50 – Parámetros utilizados y calculados en el método de los coeficientes. ....	171

Tabla # 51 – Parámetros utilizados y calculados en el método de los coeficientes.....	172
Tabla # 52 – Parámetros utilizados y calculados en el método de los coeficientes.....	173
Tabla # 53 - Parámetros obtenidos en el método A del espectro de capacidad. .....	174
Tabla # 54 - Parámetros obtenidos en el método A del espectro de capacidad. .....	175
Tabla # 55 - Parámetros obtenidos en el método A del espectro de capacidad. .....	176
Tabla # 56 - Parámetros obtenidos en el método B del espectro de capacidad. .....	177
Tabla # 57 - Parámetros obtenidos en el método B del espectro de capacidad. .....	178
Tabla # 58 - Parámetros obtenidos en el método B del espectro de capacidad. .....	179
Tabla # 59 - Parámetros obtenidos en el método C del espectro de capacidad. .....	180
Tabla # 60 - Parámetros obtenidos en el método C del espectro de capacidad. .....	181
Tabla # 61 - Parámetros obtenidos en el método C del espectro de capacidad. .....	182

## ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. # 1 – Curva Cortante Basal vs Desplazamiento de estructura esquemática. Tomado de Elnashai (2008, p. 54). .....	4
Fig. # 2 - Ejemplo de ley constitutiva de acero dulce. Tomado de Karthik y Mander (2011, p. 1). .....	5
Fig. # 3 – Ejemplo de discretización de materiales por fibras en sección transversal de hormigón armado. Tomado de Elnashai (2008, p. 202). ....	6
Fig. # 4 – Leyes constitutivas de hormigón no confinado y confinado según Mander, Priestley y Park (1988, p. 5). .....	6
Fig. # 5 – Esquema de elemento bajo carga lateral y vertical presentando efecto P- $\Delta$ . Tomado de Naeim (1989, p. 174). .....	7
Fig. # 6 – Esquema de rótulas plásticas desarrolladas en viga continua de material homogéneo. Los puntos negros indican la ubicación de las rótulas plásticas. Tomado de Vrouwenvelder (2003, p. 33).....	8
Fig. # 7 – Diagrama Momento – Curvatura normalizado mostrando la incursión de una sección transversal rectangular en el rango inelástico. Tomado de Vrouwenvelder (2003, p. 15). .....	8
Fig. # 8 – Esquema de atraque de embarcación en muelle. Tomado de Gaythwaite (2004, p. 172). .....	10
Fig. # 9 – Esquema de disposición de cables de amarre de una embarcación a un puerto. Tomado de Gaythwaite (2004, p. 177). .....	11
Fig. # 10 – Esquema de profundidad de empotramiento efectivo de un pilote. Tomado de Gaythwaite (2004, p. 245). .....	12
Fig. # 11 – Esquema de niveles de desempeño a seleccionar. Tomado de Elnashai (2008, p. 245).....	13
Fig. # 12 – Diagrama Momento – Curvatura esquemático de pilote. $\Phi_y$ es la curvatura de fluencia, $\Phi_s$ la curvatura de servicio, $\Phi_{ls}$ la curvatura de estado límite y $\Phi_{dc}$ la curvatura de control de daño. Tomado del PIANC (2001, p. 235). .....	17
Fig. # 13 – Parámetros que intervienen en el Método de los Coeficientes. Obtenido de ASCE 41-13 (2013, p. 110). .....	20

Fig. # 14 – Esquema que muestra el coeficiente de masa modal, el factor de participación, y las amplitudes de los modos de vibración. Obtenido de ATC-40 (Applied Technology Council, 1996, pp. 8-10).....	23
Fig. # 15 - Parámetros que intervienen en el Método A de Linearización Equivalente. Obtenido de FEMA 440 (2005, pp. 6-1). .....	24
Fig. # 16 - Parámetros que intervienen en el Método B de Linearización Equivalente. Obtenido de FEMA 440 (2005, pp. 6-8). .....	26
Fig. # 17 - Parámetros que intervienen en el Método C de Linearización Equivalente. Obtenido de FEMA 440 (2005, pp. 6-9). .....	27
Fig. # 18 – Mapa de zonificación sísmica del Ecuador. Tomado de la NEC-15 (2015, p. 27). .....	28
Fig. # 19 – Esquema de elaboración de espectro elástico de aceleraciones de diseño. Tomado de NEC-15 (2014, p. 33).....	30
Fig. # 20 – Esquema de elaboración de espectro elástico de desplazamientos de diseño. Tomado de NEC-15 (2015, p. 36).....	30
Fig. # 21 – Curvas de peligro sísmico para la ciudad de Guayaquil, para periodos de 0.1, 0.2, 0.5, 1 segundo y PGA. Tomado de NEC-15 (2014, p. 117). .....	31
Fig. # 22 – Esquema de modelo bilineal para aisladores de caucho. Tomado de Naeim (1999, p. 104) .....	33
Fig. # 23 - Planta de muelle existente, disposición de pilotes. Tomado de Plano Estructural de Muelle (2017, p. EST 01). Dimensiones en mm. ....	35
Fig. # 24 - Planta de muelle existente, configuración de vigas cargadoras (negras) y secundarias. Dimensiones en mm. Tomado de Plano Estructural de Muelle (2017, p. EST 02).....	37
Fig. # 25 - Sección transversal de viga cargadora tipo T invertida. Dimensiones en mm. Tomado de Plano Estructural de Muelle (2017, p. EST 02).....	37
Fig. # 26 - Sección transversal de viga doble T con topping de 8 cm. Dimensiones en mm. Tomado de Plano Estructural de Muelle (2017, p. EST 02). .....	37
Fig. # 27 - Sección transversal de pilote pretensado. Dimensiones en mm. Tomado de Plano Estructural de Muelle (2017, p. EST 01).....	38
Fig. # 28 - Selección de pórtico para análisis estructural en 2D. Dimensiones en mm. Adaptado de Plano Estructural de Muelle (2017, p. EST 02).....	40

Fig. # 29 - Esquema de modelo estructural de pórtico equivalente. ....	41
Fig. # 30 – Discretización por fibras de Viga V1. ....	44
Fig. # 31 - Discretización por fibras de Viga V2. ....	44
Fig. # 32 - Discretización por fibras de Viga V3. ....	45
Fig. # 33 - Discretización por fibras de Pilotes P1, P2, P3 y P4.....	45
Fig. # 34 – Disposición de refuerzos en vigas para modelo de pórtico. Tomado de Plano Estructural de Muelle (2017, p. EST 03). Dimensiones en mm.	46
Fig. # 35 - Ley constitutiva del hormigón según Kent-Scott-Park (1980). ....	47
Fig. # 36 - Leyes constitutivas del hormigón utilizada por Open Sees Py....	48
Fig. # 37 - Ley constitutiva según Menegotto-Pinto (1973).....	50
Fig. # 38 - Ley constitutiva de acero de refuerzo implementada en Open Sees Py y revisión de deformaciones unitarias. ....	52
Fig. # 39 – Características de buque a atracar en muelle estudiado. ....	54
Fig. # 40 – Curva de Capacidad (Pushover) obtenida para muelle convencional.....	57
Fig. # 41 - Diagrama Momento – Curvatura de pilote presforzado de muelle para distintas cargas axiales.....	58
Fig. # 42 – Diagrama Momento – Curvatura de pilote presforzado de muelle para distintas cargas axiales considerando la influencia del núcleo confinado.....	60
Fig. # 43 – Fluencia en acero (varillas y cables) y falla a compresión de fibra extrema de hormigón en pilote 1, sección superior (t) e inferior (b).....	61
Fig. # 44 - Fluencia en acero (varillas y cables) y falla a compresión de fibra extrema de hormigón en pilote 2, sección superior (t) e inferior (b).....	62
Fig. # 45 - Fluencia en acero (varillas y cables) y falla a compresión de fibra extrema de hormigón en pilote 3, sección superior (t) e inferior (b).....	62
Fig. # 46 - Fluencia en acero (varillas y cables) y falla a compresión de fibra extrema de hormigón en pilote 4, sección superior (t) e inferior (b).....	63
Fig. # 47 - Fluencia en acero y falla a compresión de fibra extrema de hormigón en vigas, sección izquierda (l) y derecha (r). ....	64
Fig. # 48 - Comportamiento no-lineal de los elementos del muelle.....	65
Fig. # 49 – Puntos en curva de capacidad donde se producen deformaciones unitarias iguales a las límite en los materiales de P1. ....	69

Fig. # 50 – Puntos en curva de capacidad donde se producen deformaciones unitarias iguales a las límite en los materiales de P2. ....	70
Fig. # 51 – Puntos en curva de capacidad donde se producen deformaciones unitarias iguales a las límite en los materiales de P3. ....	70
Fig. # 52 - Puntos en curva de capacidad donde se producen deformaciones unitarias iguales a las límite en los materiales de P4. ....	71
Fig. # 53 - Desplazamiento límite de desempeño a nivel de Servicio para muelle convencional, comparando con todos los pilotes. $\Delta = 9,41$ cm....	72
Fig. # 54 - Puntos en curva de capacidad donde se producen deformaciones unitarias iguales a las límite en los materiales de P1. ....	73
Fig. # 55 - Puntos en curva de capacidad donde se producen deformaciones unitarias iguales a las límite en los materiales de P2. ....	74
Fig. # 56 - Puntos en curva de capacidad donde se producen deformaciones unitarias iguales a las límite en los materiales de P3. ....	75
Fig. # 57 - Puntos en curva de capacidad donde se producen deformaciones unitarias iguales a las límite en los materiales de P4. ....	76
Fig. # 58 - Desplazamiento límite de desempeño a nivel de Control de Daño para muelle convencional. $\Delta = 19,11$ cm.....	77
Fig. # 59 – Límites de desplazamientos para distintos niveles de desempeño en curva Pushover, 9,41 cm para Servicio y 19,11 cm para Control de Daño. ....	78
Fig. # 60 – Curvas de peligro sísmico para la ciudad de Guayaquil, para periodos de 0.1, 0.2, 0.5, 1 segundo y PGA. Tomado de NEC-15 (2014, p. 117). ....	80
Fig. # 61 - Obtención de $S_a(0.1s)$ y PGA para tasa anual de excedencia para nivel de amenaza 1 (Servicio). Adaptado de NEC-15 (2014, p. 117). ....	81
Fig. # 62 - Obtención de $S_a(0.1s)$ y PGA para tasa anual de excedencia para nivel de amenaza 4 (Extremo). Adaptado de NEC-15 (2014, p. 117).....	82
Fig. # 63 - Elaboración de espectros elásticos de aceleraciones para los niveles de amenaza sísmica a evaluar. ....	83
Fig. # 64 - Obtención del punto de desempeño en muelle convencional para sismo de servicio por el método de coeficientes.....	85
Fig. # 65 - Obtención del punto de desempeño en muelle convencional para sismo de diseño por el método de coeficientes. ....	86

Fig. # 66 - Obtención del punto de desempeño en muelle convencional para sismo extremo por el método de coeficientes.....	87
Fig. # 67 - Obtención del punto de desempeño en muelle convencional para sismo de servicio por el método A.....	88
Fig. # 68 - Obtención del punto de desempeño en muelle convencional para sismo de diseño por el método A.....	89
Fig. # 69 - Obtención del punto de desempeño en muelle convencional para sismo extremo por el método A.....	90
Fig. # 70 - Obtención del punto de desempeño en muelle convencional para sismo de servicio por el método B.....	91
Fig. # 71 - Obtención del punto de desempeño en muelle convencional para sismo de diseño por el método B.....	92
Fig. # 72 - Obtención del punto de desempeño en muelle convencional para sismo extremo por el método B.....	93
Fig. # 73 - Obtención del punto de desempeño en muelle convencional para sismo de servicio por el método C.....	94
Fig. # 74 - Obtención del punto de desempeño en muelle convencional para sismo de diseño por el método C.....	95
Fig. # 75 - Obtención del punto de desempeño en muelle convencional para sismo extremo por el método C.....	96
Fig. # 76 – Resultado de comparación entre puntos de desempeño y límites en muelle convencional. No hay cumplimiento en los niveles de Servicio y Control de Daño.....	97
Fig. # 77 – Comparación entre niveles de desempeño sísmico y carga de ataque del muelle con solución convencional.....	100
Fig. # 78 - Curva Pushover de muelle convencional con límites de desempeño. Límite de servicio ubicado en línea verde.....	101
Fig. # 79 - Elaboración de espectros de desplazamiento elástico y reducido por amortiguamiento.....	102
Fig. # 80 – Fuerza Lateral vs Desplazamiento de aislador de caucho propuesto para modelo con plataforma totalmente aislada. $K_1 = 800 \text{ kg/cm}$ , $K_2 = 80 \text{ kg/cm}$ , $Q = 3600 \text{ kg}$ , $T_{\text{eff}} = 2,21 \text{ s}$ , $\beta_{\text{eff}} = 23.13\%$ , $B = 1,63$ .....	103
Fig. # 81 - Propiedades mecánicas a ingresar para aislador en OpenSeesPy. Tomado de OpenSeesPy (University of California, Berkely, 2012).....	105

Fig. # 82 - Esquema de modelo estructural de pórtico equivalente con plataforma totalmente aislada.....	106
Fig. # 83 – Curva de capacidad de muelle con plataforma totalmente aislada. ....	107
Fig. # 84 - Fluencia en acero (varillas y cables) y falla a compresión de fibra extrema de hormigón en pilote 1, sección superior (t) e inferior (b).....	108
Fig. # 85 - Fluencia en acero (varillas y cables) y falla a compresión de fibra extrema de hormigón en pilote 2, sección superior (t) e inferior (b).....	109
Fig. # 86 - Fluencia en acero (varillas y cables) y falla a compresión de fibra extrema de hormigón en pilote 3, sección superior (t) e inferior (b).....	110
Fig. # 87 - Fluencia en acero (varillas y cables) y falla a compresión de fibra extrema de hormigón en pilote 4, sección superior (t) e inferior (b).....	111
Fig. # 88 – Fluencia en acero y falla a compresión de fibra extrema de hormigón en vigas, sección izquierda (l) y derecha (r). ....	112
Fig. # 89 - Comportamiento no-lineal de los elementos del muelle totalmente aislado. Primera fluencia dada por el aislador a $\Delta = 7.14$ cm. ....	113
Fig. # 90 - Puntos en curva de capacidad donde se producen deformaciones unitarias iguales a las límite en los materiales de P1. ....	114
Fig. # 91 - Puntos en curva de capacidad donde se producen deformaciones unitarias iguales a las límite en los materiales de P2. ....	115
Fig. # 92 - Puntos en curva de capacidad donde se producen deformaciones unitarias iguales a las límite en los materiales de P3. ....	116
Fig. # 93 - Puntos en curva de capacidad donde se producen deformaciones unitarias iguales a las límite en los materiales de P4. ....	116
Fig. # 94 - Desplazamiento límite de desempeño a nivel de Servicio para muelle con plataforma totalmente aislada. $\Delta = 120,90$ cm. ....	117
Fig. # 95 - Puntos en curva de capacidad donde se producen deformaciones unitarias iguales a las límite en los materiales de P1. ....	118
Fig. # 96 - Puntos en curva de capacidad donde se producen deformaciones unitarias iguales a las límite en los materiales de P2. ....	119
Fig. # 97 - Puntos en curva de capacidad donde se producen deformaciones unitarias iguales a las límite en los materiales de P3. ....	120
Fig. # 98 - Puntos en curva de capacidad donde se producen deformaciones unitarias iguales a las límite en los materiales de P4. ....	121

Fig. # 99 - Desplazamiento límite de desempeño a nivel de Control de Daño para muelle con plataforma totalmente aislada. $\Delta = 196,60$ cm. ....	122
Fig. # 100 - Límites de desplazamientos para distintos niveles de desempeño en curva Pushover, 120,90 cm para Servicio y 196,60 cm para Control de Daño.....	123
Fig. # 101 - Resultado de comparación entre puntos de desempeño y límites en muelle con plataforma totalmente aislada. Hay cumplimiento en todos los niveles de desempeño. ....	124
Fig. # 102 – Comparación entre niveles de desempeño sísmico y carga de atraque del muelle con plataforma totalmente aislada.....	126
Fig. # 103 - Esquema de modelo estructural de pórtico equivalente con plataforma localmente aislada. ....	129
Fig. # 104 – Curva de capacidad de muelle con plataforma localmente aislada. ....	130
Fig. # 105 - Fluencia en acero (varillas y cables) y falla a compresión de fibra extrema de hormigón en pilote 1, sección superior (t) e inferior (b).....	131
Fig. # 106 - Fluencia en acero (varillas y cables) y falla a compresión de fibra extrema de hormigón en pilote 2, sección superior (t) e inferior (b).....	132
Fig. # 107 – Revisión de fuerzas internas en los elementos resistentes a fuerzas laterales de la estructura.....	133
Fig. # 108 - Comportamiento no-lineal de los elementos del muelle localmente aislado. Primera fluencia dada por el aislador a $\Delta = 8,86$ cm. ....	134
Fig. # 109 - Puntos en curva de capacidad donde se producen deformaciones unitarias iguales a las límite en los materiales de P1. ....	135
Fig. # 110 - Puntos en curva de capacidad donde se producen deformaciones unitarias iguales a las límite en los materiales de P2. ....	136
Fig. # 111 - Desplazamiento límite de desempeño a nivel de Servicio para muelle con plataforma localmente aislada. $\Delta = 15,96$ cm.....	137
Fig. # 112 - Puntos en curva de capacidad donde se producen deformaciones unitarias iguales a las límite en los materiales de P1. ....	138
Fig. # 113 - Puntos en curva de capacidad donde se producen deformaciones unitarias iguales a las límite en los materiales de P2. ....	138
Fig. # 114 - Desplazamiento límite de desempeño a nivel de Control de Daño para muelle con plataforma localmente aislada. $\Delta = 23,46$ cm.....	139

Fig. # 115 - Límites de desplazamientos para distintos niveles de desempeño en curva Pushover, 15,96 cm para Servicio y 23,46 cm para Control de Daño.....	140
Fig. # 116 - Resultado de comparación entre puntos de desempeño y límites en el muelle con plataforma localmente aislada. No hay cumplimiento en los niveles de desempeño. ....	141
Fig. # 117 – Alternativa de muelle con plataforma localmente aislada con aislador más flexible ( $K = 0,3$ Ton/cm y $Q = 5,4$ Ton/cm). ....	144
Fig. # 118 - Comparación entre niveles de desempeño sísmico y carga de atraque del muelle con plataforma localmente aislada. ....	145
Fig. # 119 – Curva de capacidad con puntos importantes en secciones de pilotes P1 y P2 con inclinación, comparados con carga de atraque.....	146
Fig. # 120 - Obtención del punto de desempeño en muelle con plataforma totalmente aislada para sismo de servicio por el método de coeficientes. ....	159
Fig. # 121 - Obtención del punto de desempeño en muelle con plataforma totalmente aislada para sismo de diseño por el método de coeficientes. ....	160
Fig. # 122 - Obtención del punto de desempeño en muelle con plataforma totalmente aislada para sismo extremo por el método de coeficientes..	161
Fig. # 123 - Obtención del punto de desempeño en muelle con plataforma totalmente aislada para sismo de servicio por el método A. ....	162
Fig. # 124 - Obtención del punto de desempeño en muelle con plataforma totalmente aislada para sismo de diseño por el método A. ....	163
Fig. # 125 - Obtención del punto de desempeño en muelle con plataforma totalmente aislada para sismo extremo por el método A. ....	164
Fig. # 126 - Obtención del punto de desempeño en muelle con plataforma totalmente aislada para sismo de servicio por el método B. ....	165
Fig. # 127 - Obtención del punto de desempeño en muelle con plataforma totalmente aislada para sismo de diseño por el método B. ....	166
Fig. # 128 - Obtención del punto de desempeño en muelle con plataforma totalmente aislada para sismo extremo por el método B. ....	167
Fig. # 129 - Obtención del punto de desempeño en muelle con plataforma totalmente aislada para sismo de servicio por el método C. ....	168

Fig. # 130 - Obtención del punto de desempeño en muelle con plataforma totalmente aislada para sismo de diseño por el método C. ....	169
Fig. # 131 - Obtención del punto de desempeño en muelle con plataforma totalmente aislada para sismo extremo por el método C. ....	170
Fig. # 132 - Obtención del punto de desempeño en muelle con plataforma localmente aislada para sismo de servicio por el método de coeficientes. ....	171
Fig. # 133 - Obtención del punto de desempeño en muelle con plataforma localmente aislada para sismo de diseño por el método de coeficientes. ....	172
Fig. # 134 - Obtención del punto de desempeño en muelle con plataforma localmente aislada para sismo extremo por el método de coeficientes. ....	173
Fig. # 135 - Obtención del punto de desempeño en muelle con plataforma localmente aislada para sismo de servicio por el método A. ....	174
Fig. # 136 - Obtención del punto de desempeño en muelle con plataforma localmente aislada para sismo de diseño por el método A. ....	175
Fig. # 137 - Obtención del punto de desempeño en muelle con plataforma localmente aislada para sismo extremo por el método A. ....	176
Fig. # 138 - Obtención del punto de desempeño en muelle con plataforma localmente aislada para sismo de servicio por el método B. ....	177
Fig. # 139 - Obtención del punto de desempeño en muelle con plataforma localmente aislada para sismo de diseño por el método B. ....	178
Fig. # 140 - Obtención del punto de desempeño en muelle con plataforma localmente aislada para sismo extremo por el método B. ....	179
Fig. # 141 - Obtención del punto de desempeño en muelle con plataforma localmente aislada para sismo de servicio por el método C. ....	180
Fig. # 142 - Obtención del punto de desempeño en muelle con plataforma localmente aislada para sismo de diseño por el método C. ....	181
Fig. # 143 - Obtención del punto de desempeño en muelle con plataforma localmente aislada para sismo extremo por el método C. ....	182

## RESUMEN

La implementación de aisladores sísmicos es una solución estructural que ha estado despegando en los últimos años, pues se ofrece que después de un terremoto, una estructura no va a presentar daño, tanto en sus elementos como en sus componentes no estructurales. Esta propuesta es especialmente atractiva para estructuras de gran importancia, como pueden ser los muelles portuarios, tanto en la parte pública como privada. Este tipo de estructuras puede llegar a generar millones de dólares mensuales gracias a la eficiente operatividad en sus instalaciones, permitiendo la carga y descarga de productos importantes para fines específicos dentro de un país o una empresa.

Cuando se produce un evento sísmico de gran magnitud, el daño excesivo en una estructura portuaria puede llevar a su consecuente demolición, o a la ejecución de un proceso extenso y complicado de reparaciones que interrumpirá las actividades necesarias para generar ingresos monetarios y flujo de productos, y esto perjudica al desarrollo económico de la entidad propietaria del muelle.

En este trabajo de investigación se evaluará el desempeño (relacionado con el daño producido durante distintos eventos sísmicos) de una estructura portuaria con dos soluciones de aislación sísmica, y se comparará con la solución que se utiliza convencionalmente en el diseño estructural de muelles, con el fin de definir ventajas o desventajas de cada propuesta.

**Palabras claves:** PUERTO; DESEMBARCADERO; EMBARCADERO; ATRACADERO; AISLADOR DE CAUCHO; CAUCHO NATURAL; CAUCHO DE ALTO AMORTIGUAMIENTO; EVALUACIÓN DE DAÑO; DESEMPEÑO SÍSMICO; ANÁLISIS NO LINEAL; PUSHOVER; PILOTES PRESFORZADOS; AISLACIÓN LOCAL; AISLACIÓN TOTAL.

# **INTRODUCCIÓN**

## **ANTECEDENTES**

En el Ecuador, existen muchas obras portuarias que consisten en la implementación de muelles de atraque para distintas embarcaciones, los cuales permiten la carga y descarga de materia importante para la economía de un país o una empresa privada. Sin embargo, estas estructuras están proyectadas para que, bajo un evento sísmico de gran magnitud, sufran un gran nivel de daño, pues si bien puede ser reparable, afecta a la continuidad de las operaciones en las instalaciones del muelle, y ambas perjudican económicamente a un país o proyecto. Una solución para evitar posibles daños en las estructuras bajo sismos de gran magnitud es la implementación de aisladores sísmicos, lo cual se puede estudiar como alternativa para evitar las pérdidas económicas producidas por la discontinuidad en las operaciones después de los eventos sísmicos y las reparaciones requeridas en la estructura.

## **OBJETIVO GENERAL**

Evaluar el desempeño de un muelle incorporando dispositivos de aislación sísmica.

## **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- 1.- Evaluar el desempeño sísmico de un muelle sin aislación sísmica.
- 2.- Evaluar el desempeño sísmico de un muelle con aislación sísmica.
- 3.- Comparar el comportamiento del muelle con y sin dispositivos de aislación sísmica, definiendo ventajas y desventajas para cada caso.

## **ALCANCE**

- Realizar un análisis estático no-lineal (Pushover) de un muelle con diseño tradicional (sin aislación sísmica) y determinar su desempeño ante solicitaciones sísmicas y cargas de servicio.
- Realizar un análisis estático no-lineal (Pushover) de un muelle cuya estructura considera la incorporación de un sistema de aislación sísmica y determinar su desempeño ante solicitaciones sísmicas y cargas de servicio.
- Comparar el desempeño de los 2 muelles y mostrar los beneficios y desventajas obtenidas al incorporar el sistema de aislación sísmica.

# CAPÍTULO I

## 1 MARCO TEÓRICO

### 1.1 ANÁLISIS PUSHOVER

Es un análisis pseudo-estático no lineal que impone progresivamente fuerzas laterales monotónicas en una estructura, midiendo sus desplazamientos y considerando que los materiales, y por lo tanto sus elementos, pueden incursionar en el rango inelástico. Este tipo de análisis permite tener una idea sobre el posible mecanismo a desarrollarse cuando se presentan cargas laterales que producen rótulas plásticas en distintas zonas de los elementos, y permite medir su consecuente ductilidad, resistencia, y sobre-resistencia. El producto de este análisis es una curva de Cortante Basal vs Desplazamiento, la cual intenta representar la resistencia a cargas laterales y la capacidad de deformación de la estructura (Elnashai, 2008, p. 54).

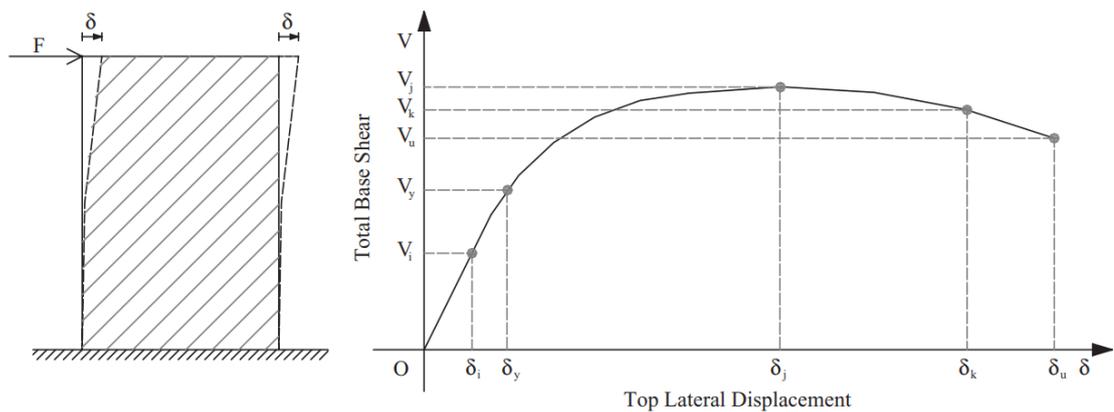


Fig. # 1 – Curva Cortante Basal vs Desplazamiento de estructura esquemática. Tomado de Elnashai (2008, p. 54).

## 1.2 MODELOS DE LOS MATERIALES

Son leyes constitutivas, o la representación de su comportamiento bajo variaciones de esfuerzos-deformaciones unitarias. Cada material tiene su ley constitutiva y varios autores han definido distintas curvas para modelar dichas leyes (Elnashai, 2008, p. 194).

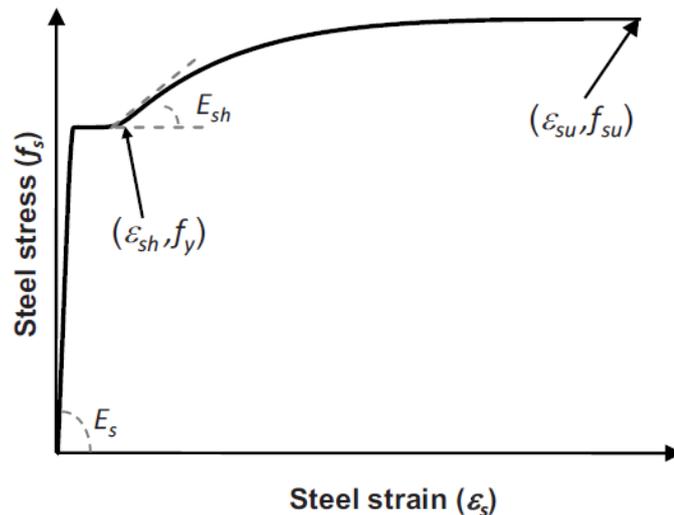


Fig. # 2 - Ejemplo de ley constitutiva de acero dulce. Tomado de Karthik y Mander (2011, p. 1).

## 1.3 ANÁLISIS BASADOS EN FIBRAS

La sección transversal de un elemento puede estar compuesta de uno o varios materiales, los cuales pueden presentar un comportamiento elástico o no-lineal dependiendo de los niveles de carga. Algunos análisis requieren conocer el estado de ciertos puntos de una sección transversal de forma directa, por lo que la sección se discretiza en áreas pequeñas denominadas Fibras. Estas fibras pueden contener una ley constitutiva representativa del material que las compone con el fin de seleccionar una fibra y conocer su estado de esfuerzos durante distintos niveles de carga, facilitando el modelamiento no-lineal de una sección con uno o varios materiales, y la estimación de la respuesta de una estructura durante eventos sísmicos (Elnashai, 2008, p. 201).

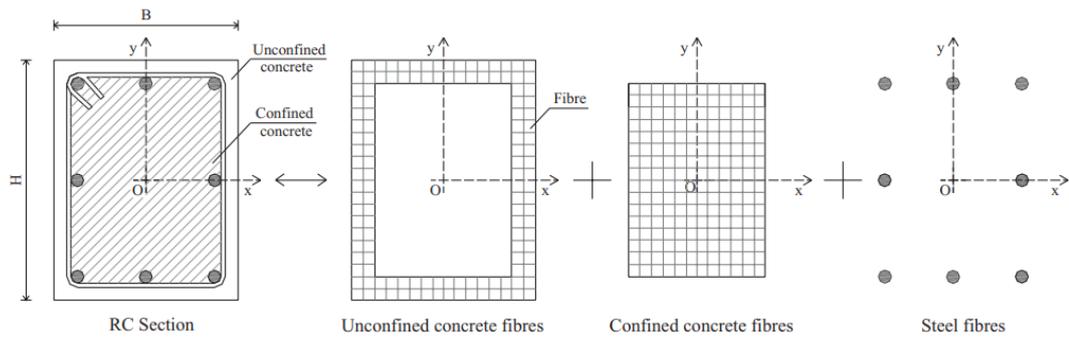


Fig. # 3 – Ejemplo de discretización de materiales por fibras en sección transversal de hormigón armado. Tomado de Elnashai (2008, p. 202).

## 1.4 CONFINAMIENTO DEL HORMIGÓN

Es una restricción parcial a la expansión lateral producida por efecto de Poisson en el hormigón a compresión. Se genera principalmente con la colocación de estribos cerrados de confinamiento con un determinado espaciamiento. Esto causa que el hormigón pueda alcanzar una mayor resistencia máxima a compresión y tenga una deformación unitaria última mucho mayor (Mander, Priestley, & Park, 1988, p. 2).

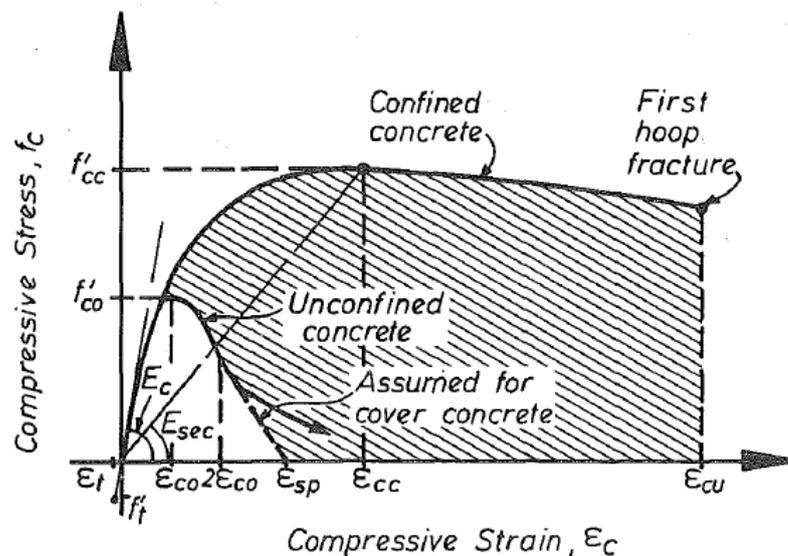


Fig. # 4 – Leyes constitutivas de hormigón no confinado y confinado según Mander, Priestley y Park (1988, p. 5).

## 1.5 EFECTOS P-Δ

Es una variación del estado de esfuerzos en los elementos por considerar la nueva posición de la carga al estar deformado uno o varios elementos. Esto causa una amplificación o disminución de esfuerzos en secciones determinadas la cual puede ser importante para estructuras bajo cargas laterales en conjunto a cargas gravitacionales. Se considera como una no-linealidad geométrica y un factor determinante en la estabilidad global de la estructura (Naeim, 1989, p. 174).

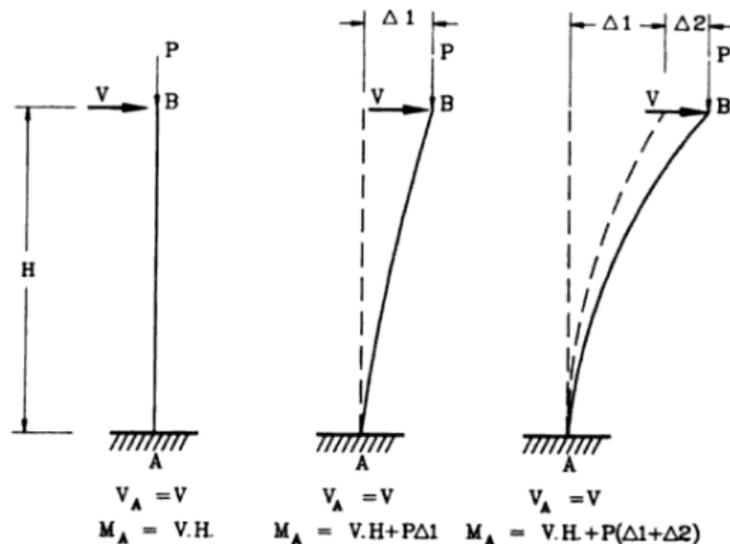


Fig. # 5 – Esquema de elemento bajo carga lateral y vertical presentando efecto P-Δ. Tomado de Naeim (1989, p. 174).

## 1.6 RÓTULA PLÁSTICA

Se define como una rótula (punto con alta flexibilidad rotacional) producida cuando una zona de un elemento estructural entra en un estado de esfuerzos que resulta en una degradación de rigidez a rotación, originada por la naturaleza de los materiales que componen dicho elemento a plastificarse (incursionar en el rango inelástico) bajo el nivel de fuerzas internas presente, producto de la carga aplicada. Se caracteriza por no degradar su resistencia a cargas externas a pesar de desarrollar rotaciones altas, hasta un punto denominado rotación plástica (cuando se refiere a rotaciones), o momento

plástico (cuando se refiere a fuerzas internas), que se presentan cuando el elemento falla. También se caracteriza por ocurrir cuando existe un nivel específico de fuerzas internas en una sección del elemento cargado (Neal, 1977, p. 1).

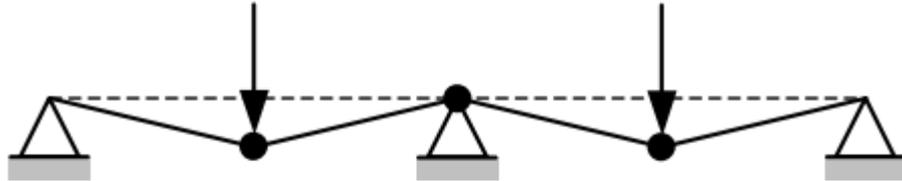


Fig. # 6 – Esquema de rótulas plásticas desarrolladas en viga continua de material homogéneo. Los puntos negros indican la ubicación de las rótulas plásticas. Tomado de Vrouwenvelder (2003, p. 33).

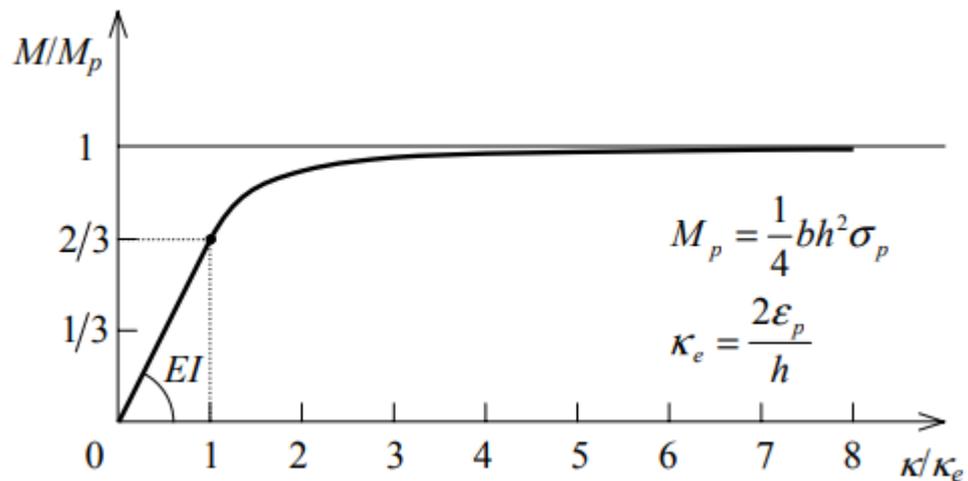


Fig. # 7 – Diagrama Momento – Curvatura normalizado mostrando la incursión de una sección transversal rectangular en el rango inelástico. Tomado de Vrouwenvelder (2003, p. 15).

## **1.7 CARGAS EN MUELLES**

Los muelles como cualquier estructura están sometidos a cargas gravitacionales en su estado de servicio. Sin embargo, también presentará cargas laterales debido a requerimientos operacionales, como se explica a continuación:

### **1.7.1 CARGAS MUERTAS**

Representan cargas gravitacionales producidas por el peso propio de los elementos estructurales que componen el muelle. Incluye el peso propio de vigas, losa y pilotes (Gaythwaite, 2004, p. 97).

### **1.7.2 CARGAS MUERTAS SÚPER-IMPUESTAS**

Representan cargas gravitacionales producidas por el peso propio de elementos no estructurales. Incluye el peso propio de elementos para acabados y constructivos (Gaythwaite, 2004, p. 97).

### **1.7.3 CARGAS VIVAS GRAVITACIONALES**

Representan cargas gravitacionales producidas por la operación o función de la estructura. En un muelle pueden incluirse (Gaythwaite, 2004, p. 97):

- Personal
- Camiones de transporte
- Vehículos montacargas
- Carga transportada (contenedores o similar)
- Grúas

### **1.7.4 CARGAS DE ATRAQUE**

Es una carga lateral producida durante el acercamiento de una embarcación al muelle portuario, con el fin de recargar o descargar uno o varios productos. Este acercamiento se produce con una velocidad determinada y cesa cuando la embarcación ha deformado el muelle y sus defensas, entonces el conjunto embarcación-muelle se encuentra en equilibrio y la energía cinética de la embarcación se ha disipado en energía de deformación (Gaythwaite, 2004, p. 134).

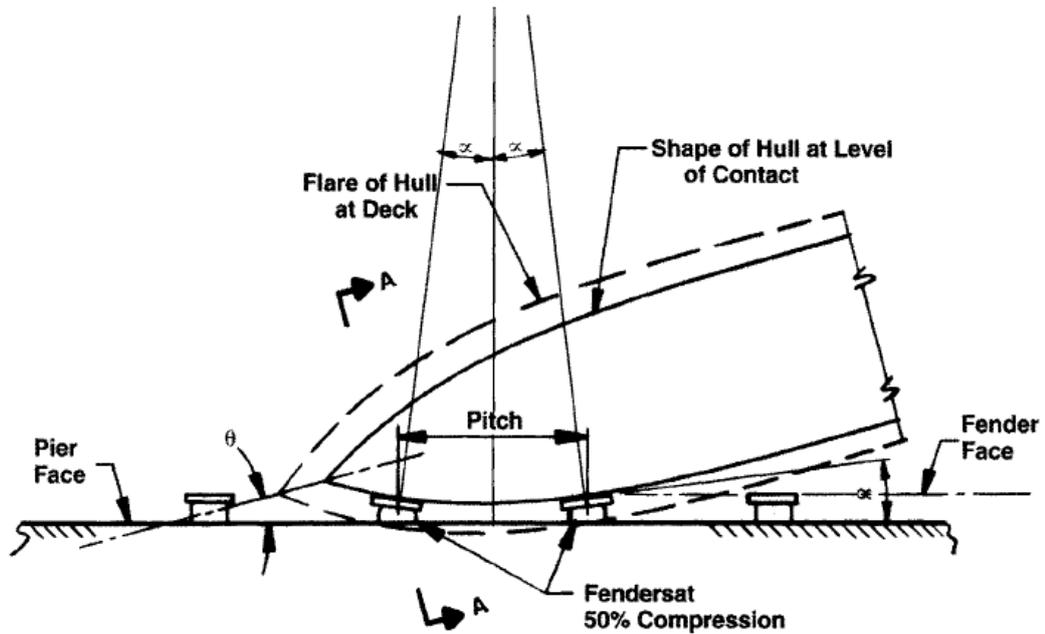


Fig. # 8 – Esquema de atraque de embarcación en muelle. Tomado de Gaythwaite (2004, p. 172).

### 1.7.5 CARGAS DE AMARRE

Es una carga lateral producida durante el estacionamiento de una embarcación en el muelle portuario. Es consecuencia de amarrar a la embarcación con el muelle a través de elementos tipo cable y por medio de bitas de amarre ancladas en la plataforma del muelle (Gaythwaite, 2004, p. 178).

Al estar estacionada la embarcación, pueden presentarse:

- Oleajes.
- Viento.
- Otras embarcaciones en movimiento.
- Alteraciones en el nivel del agua.
- Movimientos propios de la embarcación durante el intercambio de productos.

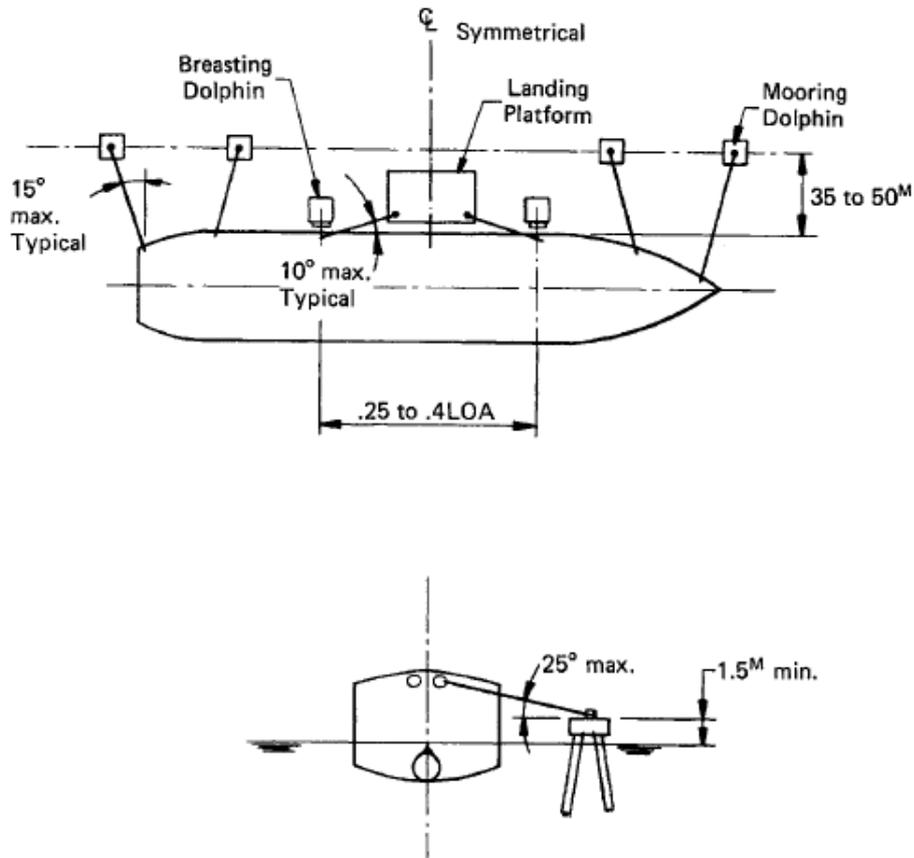


Fig. # 9 – Esquema de disposición de cables de amarre de una embarcación a un puerto. Tomado de Gaythwaite (2004, p. 177).

Estos factores pueden alterar el estado de equilibrio de la embarcación y por lo tanto pueden generar tensiones en los cables, los cuales producirían deformaciones en el muelle (Gaythwaite, 2004, p. 177).

### 1.7.6 CARGAS SÍSMICAS

Las estructuras en determinadas zonas del planeta pueden estar expuestas a aceleraciones inerciales producidas por desplazamientos del terreno, los cuales se originan por la liberación de energía acumulada durante el movimiento de las placas tectónicas. Estas aceleraciones se transmiten por medio de vibraciones y pueden presentarse en componentes verticales y horizontales, siendo las horizontales las que normalmente gobiernan en el diseño de estructuras, pudiendo generar daño estructural y no estructural dependiendo del nivel de sismo (Kramer, 1996, p. 2).

## 1.8 LONGITUD EFECTIVA DE PILOTES EN UN MUELLE

Los pilotes de un muelle a diferencia de los pilotes de edificaciones, tendrán una zona que estará expuesta al ambiente exterior (viento, agua, etc.) y una zona que estará rodeada de suelo. El límite entre estas dos zonas se marca en el lecho marino, donde pueden encontrarse a profundidad distintos tipos de suelo como arenas, limos, roca, entre otros (Gaythwaite, 2004, p. 244).

Sin embargo, se ha determinado que un pilote consigue un empotramiento efectivo en un punto específico dentro de la zona rodeada de suelo. La profundidad de este punto con respecto al lecho marino o estrato competente para resistir cargas se denomina profundidad de empotramiento efectivo, y permite determinar la longitud efectiva de un pilote, la cual se utilizará para su modelación estructural (Gaythwaite, 2004, p. 244).

La profundidad de empotramiento efectivo se determina de la mejor manera realizando un análisis de interacción suelo-estructura. Sin embargo, existen ecuaciones simplificadas y empíricas en función del tipo de suelo o las dimensiones del pilote (Gaythwaite, 2004, p. 245).

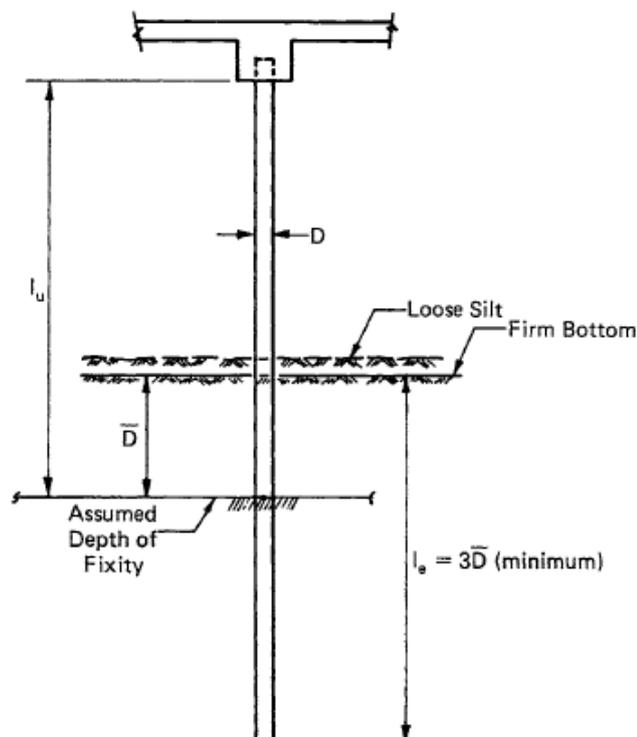


Fig. # 10 – Esquema de profundidad de empotramiento efectivo de un pilote. Tomado de Gaythwaite (2004, p. 245).

## 1.9 DESEMPEÑO SÍSMICO DE ESTRUCTURAS

Es el estado esperado de una estructura bajo un nivel específico de amenaza sísmica. Se mide a través de distintos parámetros, uno de los cuales es el nivel de deformaciones unitarias en los elementos que conforman a la estructura, los cuales no pueden superar determinados límites en función del desempeño seleccionado (Council on Tall Buildings and Urban Habitat, 2017, p. 22).

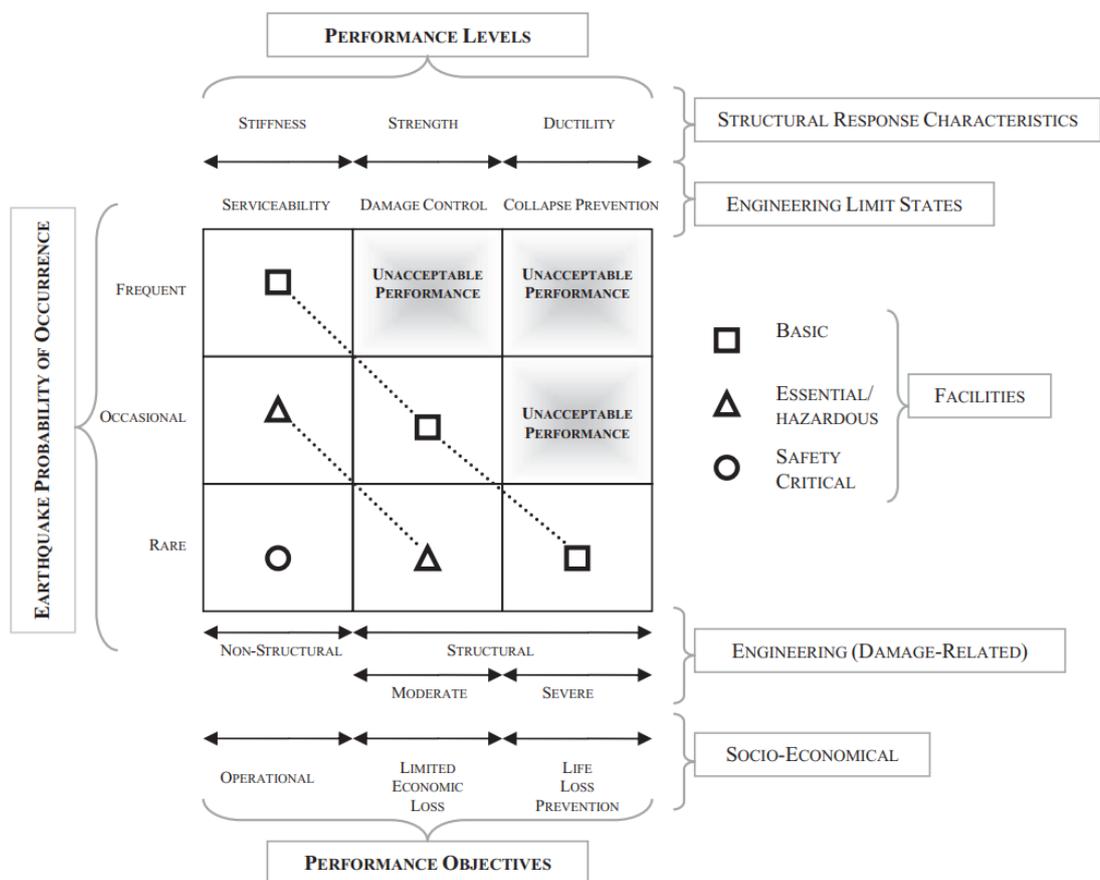


Fig. # 11 – Esquema de niveles de desempeño a seleccionar. Tomado de Elnashai (2008, p. 245).

## 1.10 DESEMPEÑO SÍSMICO DE MUELLES CON PILOTES SEGÚN PIANC

En un muelle con pilotes se deben de satisfacer ciertos criterios de comportamiento con la finalidad de se cumplan objetivos específicos, tales como permitir la operatividad continua del proyecto, ahorrar costos de reparación, o salvar vidas humanas. Se espera que estos objetivos se cumplan el momento que se presenten eventos que sometan a la estructura a esfuerzos que pueden perjudicar o no a cada objetivo, dependiendo de la intensidad del evento. En el caso de eventos sísmicos, el PIANC (International Navigation Association, 2001, p. 24), define para cada objetivo, también llamados niveles de desempeño, límites de deformaciones unitarias para distintos tipos de materiales. Los niveles de desempeño propuestos son:

### 1.10.1 NIVEL 1: SERVICIO

Que la estructura no presente daño estructural o presente daño estructural que no amerite reparación y por lo tanto permita la operación continua en el muelle. Se espera el cumplimiento de este objetivo para sismos con periodo de retorno ( $T_r$ ) de 75 años, que se considera de ocurrencia probable dentro de la vida útil de la estructura (International Navigation Association, 2001, p. 233).

*Tabla # 1 - Límites de deformaciones unitarias en pilotes - Nivel de Desempeño 1. Tomado del PIANC (International Navigation Association, 2001, p. 235).*

<b>Nudo de pilote</b>	<b>Material</b>	<b>Límite</b>
	Hormigón	-0.004
<b>Nudo superior e inferior</b>	Acero de refuerzo	+0.010
	Cables de presfuerzo	+(+0.005)
	Acero estructural	+0.008
	Acero estructural (relleno de hormigón)	+0.008

Cabe recalcar que el límite en el cable de presfuerzo es un incremental de deformaciones unitarias, y que el nudo inferior hace referencia a la rótula plástica esperada cerca del empotramiento efectivo del pilote. Esencialmente, se espera que los pilotes desarrollen niveles bajos de curvaturas inelásticas, de tal forma que el daño presente en la estructura no amerite ejecutar reparaciones y la estructura pueda seguir operando con normalidad luego de un evento de la magnitud descrita. Se resalta que los límites descritos para este nivel de desempeño buscan evitar el desprendimiento del recubrimiento en las secciones de hormigón y que las fisuras generadas por deformaciones residuales sean lo suficientemente pequeñas como para evitar posibles problemas de corrosión en el acero de una sección de hormigón armado. Estos límites consideran que cuando se producen los desplazamientos máximos en un evento sísmico, estos ocurren en ciertos instantes del tiempo, mas no necesariamente permanecen en esa magnitud al finalizar el evento. Las vigas y demás elementos de la plataforma deben permanecer elásticas (International Navigation Association, 2001, p. 233).

### **1.10.2 NIVEL 2: CONTROL DE DAÑO**

Que la estructura presente daño estructural moderado, considerado reparable en unos pocos meses o a corto plazo, con el fin de que no afecte la operatividad del muelle a largo plazo. Se espera el cumplimiento de este objetivo para sismos con  $T_r = 475$  años, que se considera de muy poca frecuencia dentro de la vida útil de la estructura (International Navigation Association, 2001, p. 234).

*Tabla # 2 - Límites de defromaciones unitarias en pilotes – Nivel de Desempeño 2. Tomado del PIANC (International Navigation Association, 2001, p. 236).*

<b>Nudo de pilote</b>	<b>Material</b>	<b>Límite</b>
	Hormigón	-0.025
<b>Nudo superior</b>	Acero de refuerzo	+0.050
	Cables de presfuerzo	+0.040
<b>Nudo inferior</b>	Hormigón	-0.008
	Acero de refuerzo	+0.010
	Cables de presfuerzo	+0.015
<b>Cualquier nudo</b>	Acero estructural	+0.035
	Acero estructural (tubular sin rellenar)	+0.025

Cabe recalcar que el límite en el hormigón corresponde a la fibra extrema a compresión del núcleo confinado en el nudo superior, mientras que en el nudo inferior corresponde a la fibra extrema a compresión incluyendo el recubrimiento. Se espera que el nudo superior presente daño reparable a corto plazo luego de haber incurrido moderadamente en el rango inelástico, presentando desprendimiento del recubrimiento y abertura de grietas mayores. Por otro lado, se espera que el daño sea limitado o nulo en los nudos inferiores con el fin de evitar su reparación, pues puede llegar a ser poco práctica por estar sumergidos en agua o rodeados de suelo. Los límites del nudo inferior en principio son los mismos que los límites para el Nivel de Desempeño 1 pero ajustados para considerar el confinamiento provisto por el suelo (International Navigation Association, 2001, p. 234).

Adicionalmente, en un muelle se espera que la disipación de energía durante un sismo fuerte se produzca a través del daño o respuesta inelástica en los pilotes, y las vigas de la plataforma se mantengan esencialmente elásticas. En otras palabras, se requiere un mecanismo Viga Fuerte – Columna Débil. Esto debido a que se considera que la reparación es más sencilla en la zona de los pilotes que en las vigas cuando fallan por flexión o en los nudos de

conexión cuando fallan por corte (International Navigation Association, 2001, p. 39).

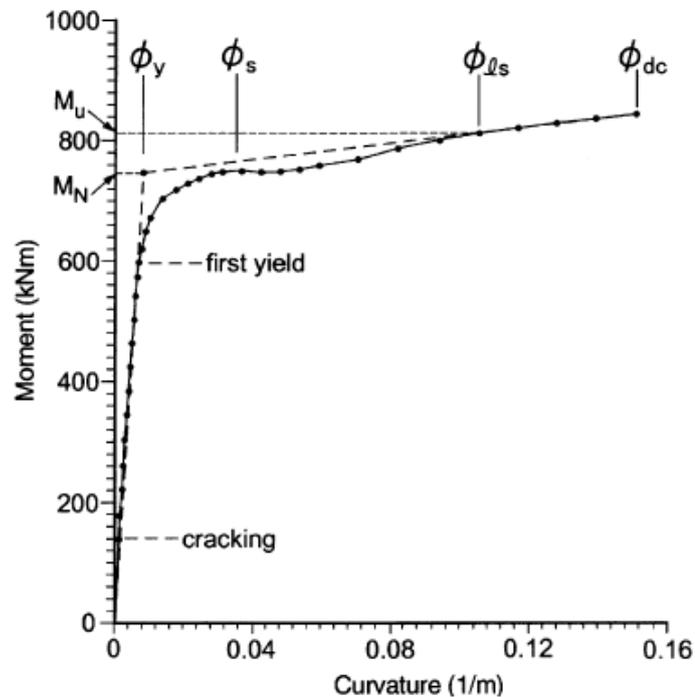


Fig. # 12 – Diagrama Momento – Curvatura esquemático de pilote.  $\phi_y$  es la curvatura de fluencia,  $\phi_s$  la curvatura de servicio,  $\phi_{ls}$  la curvatura de estado límite y  $\phi_{dc}$  la curvatura de control de daño. Tomado del PIANC (2001, p. 235).

## 1.11 MÉTODOS NO-LINEALES DE EVALUACIÓN SÍSMICA

Para determinar el comportamiento no-lineal de una estructura bajo acciones sísmicas, se presentan algunos métodos que trabajan en función de un análisis pseudo-estáticos no-lineales paso a paso (Pushover), los cuales permiten determinar el desplazamiento máximo que alcanzará una estructura bajo un nivel específico de amenaza sísmica. Los métodos son los siguientes:

### **1.11.1 ASCE 41-13: MÉTODO DE LOS COEFICIENTES DE MODIFICACIÓN DE DESPLAZAMIENTOS**

Propuesto por el ASCE 41-13 y obtenido del FEMA 440, este método estima el desplazamiento máximo de la estructura, o desplazamiento objetivo, modificando el desplazamiento de un sistema elástico de un grado de libertad equivalente al sistema no-lineal de varios grados de libertad, con un conjunto de coeficientes que representan diversos factores que pueden alterar la respuesta máxima de desplazamientos (Federal Emergency Management Agency, 2005, pp. 2-9).

El desplazamiento objetivo se calcula:

$$\delta_t = C_0 * C_1 * C_2 * S_a * \frac{T_e^2}{4\pi^2} g$$

Donde:

- $\delta_t$  es el desplazamiento objetivo.
- $T_e$  periodo efectivo, calculado con la rigidez efectiva del sistema ( $K_e$ ) que corresponde la pendiente que une el origen de la curva Cortante Basal vs Desplazamiento con un punto que contenga al cortante de fluencia y su correspondiente desplazamiento de fluencia.
- $C_0$  relaciona el desplazamiento espectral de un sistema de un grado de libertad al desplazamiento espectral de un sistema de múltiples grados de libertad. Se obtiene a través de una tabla en función del tipo de estructura y el número de pisos.
- $C_1$  relaciona el máximo desplazamiento inelástico del sistema con el desplazamiento elástico del sistema equivalente. Se obtiene a través de:

$$C_1 = 1 + \frac{\mu_{strength} - 1}{aT_e^2}$$

Donde  $a$  está en función del tipo de suelo y  $\mu_{strength}$  se obtiene con:

$$\mu_{strengh} = \frac{S_a}{V_y/W} * C_m$$

Donde  $V_y$  es el cortante de fluencia de la estructura,  $W$  es el peso sísmico efectivo, y  $C_m$  es el factor de masa efectiva, obtenido en función del número de pisos.

Cabe recalcar que  $\mu_{strengh}$  no puede ser mayor a  $\mu_{max}$ , el cual se obtiene a través de:

$$\mu_{max} = \frac{\Delta_d}{\Delta_y} + \frac{|\alpha_e|^{-h}}{4}$$

Donde  $\Delta_y$  es el desplazamiento de fluencia,  $\Delta_d$  es el mínimo entre el desplazamiento objetivo o el correspondiente al máximo cortante basal,  $\alpha_e$  es la pendiente negativa post-fluencia efectiva, y  $h$  es  $1 + 0.15 \ln(T_e)$ .

- $C_2$  representa la forma de histéresis, degradación de rigidez cíclica y degradación de resistencia en el sistema. Se obtiene a través de:

$$C_2 = 1 + \frac{1}{800} * \left( \frac{\mu_{strengh} - 1}{T_e} \right)^2$$

- $S_a$  aceleración espectral correspondiente a  $T_e$ .
- $g$  aceleración de la gravedad.

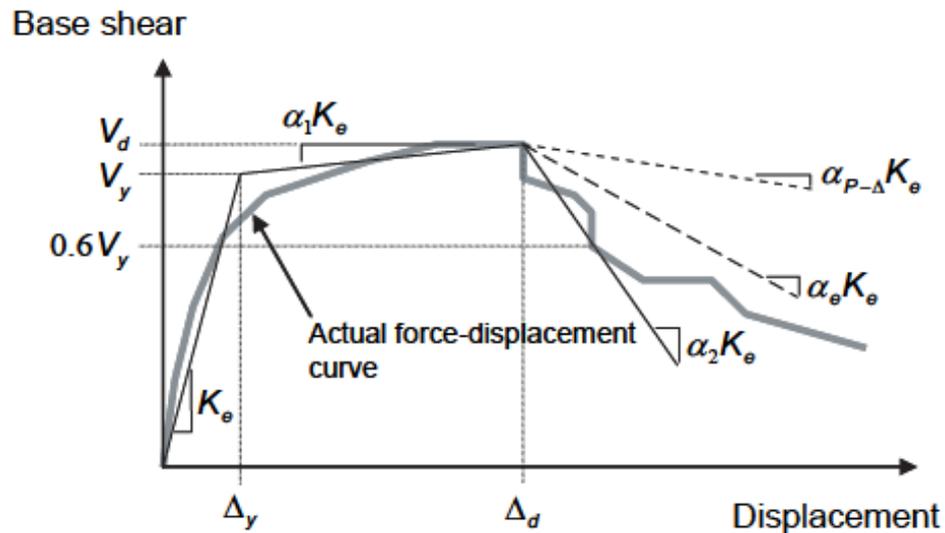


Fig. # 13 – Parámetros que intervienen en el Método de los Coeficientes. Obtenido de ASCE 41-13 (2013, p. 110).

Cabe recalcar que el cortante y desplazamiento de fluencia se asumen inicialmente con el fin de crear una idealización bilineal de la curva obtenida con el análisis paso a paso (Pushover), teniendo en cuenta que se debe de cumplir que el área bajo la idealización bilineal sea igual al área bajo la curva pushover (igualdad de energía), ambas elaboradas y cuantificadas hasta el desplazamiento objetivo (que también se asume inicialmente). También se debe de cumplir que, en la idealización bilineal, un punto correspondiente al 60% del cortante de fluencia debe intersectar con la curva pushover. Esto permite definir inicialmente los parámetros necesarios para obtener el valor de cada coeficiente, y por consiguiente obtener el desplazamiento objetivo. Con este nuevo desplazamiento, se ajusta la idealización bilineal siguiendo los lineamientos descritos anteriormente, realizando un proceso iterativo hasta encontrar la convergencia en el desplazamiento objetivo final, el cual se encuentra en el último punto de la idealización bilineal (American Society of Civil Engineers; Structural Engineering Institute, 2013, p. 111).

### **1.11.2 FEMA 440: MÉTODO DE ESPECTRO DE CAPACIDAD POR LINEARIZACIÓN EQUIVALENTE – MÉTODO A: ITERACIÓN DIRECTA**

El método de linearización equivalente integra la curva pushover y su idealización bilineal (convertido en un espectro de capacidad) con un espectro de demanda (convertido a un espectro de respuesta de aceleraciones y desplazamientos o ADRS). En este método, participan varios parámetros que permiten estimar el desplazamiento máximo elástico de un sistema equivalente al sistema no-lineal analizado (Federal Emergency Management Agency, 2005, pp. 2-10). Estos parámetros son:

- $\mu$  razón de ductilidad, igual a la razón entre el desplazamiento máximo y el desplazamiento de fluencia.
- $\beta_{eff}$  fracción de amortiguamiento crítico efectivo, calculado con:

*Para  $1.0 < \mu < 4.0$ :*

$$\beta_{eff} = 4.9 * (\mu - 1)^2 - 1.1(\mu - 1)^3 + \beta_0$$

*Para  $4.0 < \mu < 6.5$ :*

$$\beta_{eff} = 14.0 + 0.32(\mu - 1) + \beta_0$$

Donde  $\beta_0$  es la fracción de amortiguamiento crítico inicial, la cual se puede asumir como 5%.

- $T_{eff}$  periodo efectivo, calculado con:

*Para  $1.0 < \mu < 4.0$ :*

$$T_{eff} = \{0.20(\mu - 1)^2 - 0.038(\mu - 1)^3 + 1\}T_0$$

*Para  $4.0 < \mu < 6.5$ :*

$$T_{eff} = [0.28 - 0.13(\mu - 1) + 1]T_0$$

*Para  $\mu > 6.5$ :*

$$T_{eff} = \left\{ 0.89 \left[ \sqrt{\frac{\mu - 1}{1 + 0.05(\mu - 2)}} - 1 \right] + 1 \right\} T_0$$

Donde  $T_0$  es el periodo inicial de la estructura, calculado con:

$$T_0 = 2\pi\sqrt{m/K}$$

$m$  es la masa sísmica efectiva y  $K$  la rigidez inicial del sistema.

Para transformar el espectro de demanda de aceleraciones a un ADRS, se deben convertir las abscisas de periodo a desplazamientos espectrales ( $S_d$ ) con:

$$S_{di} = \frac{T_i^2}{4\pi^2} * S_{ai} * g$$

Y para transformar la curva pushover en un espectro de capacidad, se convierten las ordenadas de cortante basal a aceleraciones espectrales ( $S_a$ ) con:

$$S_a = \frac{V/W}{\alpha}$$

Donde  $\alpha$  es el coeficiente de masa modal.

Luego las abscisas de desplazamientos de la curva pushover ( $\Delta$ ) se convierten en desplazamientos espectrales ( $S_d$ ) con:

$$S_d = \frac{\Delta}{PF * \phi_1}$$

Donde  $PF$  es el factor de participación y  $\phi_1$  la amplitud del primer modo de vibración de la estructura.

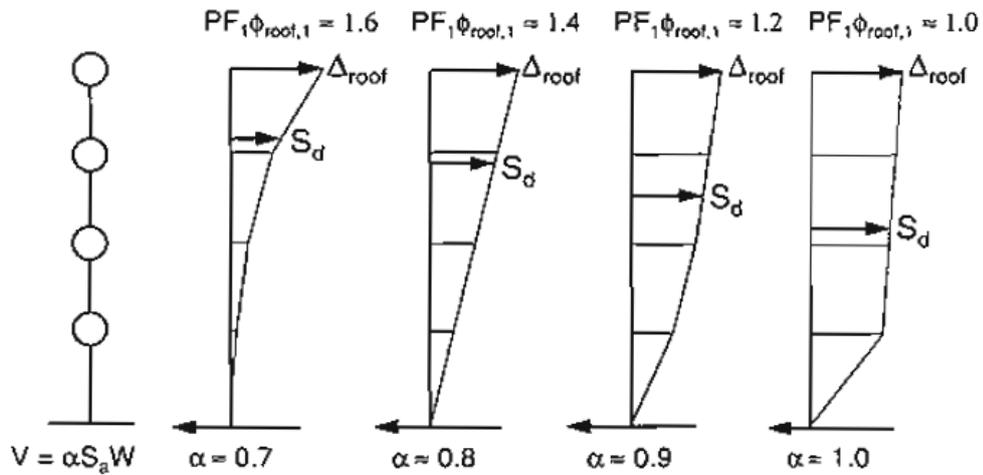


Fig. # 14 – Esquema que muestra el coeficiente de masa modal, el factor de participación, y las amplitudes de los modos de vibración. Obtenido de ATC-40 (Applied Technology Council, 1996, pp. 8-10).

El proceso es asumir un desplazamiento máximo, luego generar una idealización bilineal de la curva pushover asumiendo un desplazamiento y cortante de fluencia, conociendo la rigidez inicial y satisfaciendo la igualdad de energía. Se calcula la razón de ductilidad con la idealización bilineal y se obtiene  $\beta_{eff}$  y  $T_{eff}$ . Se dividen las ordenadas del espectro de aceleraciones para el factor B que considera la disminución de la respuesta de aceleraciones a causa de un aumento en la fracción de amortiguamiento crítico inicial, que se obtiene de:

$$B = \frac{4}{5.6 - \ln(\beta_{eff} \%)}$$

y se obtiene el desplazamiento espectral con:

$$S_d = \frac{T_{eff}^2}{4\pi^2} * S_a * g$$

Donde  $S_a$  es la aceleración espectral correspondiente a  $T_{eff}$  para el espectro de aceleraciones reducido por  $\beta_{eff}$ . Si el desplazamiento espectral resultante no es igual al asumido, se repite el procedimiento con secuencia iterativa hasta conseguir la convergencia. Gráficamente, el desplazamiento máximo se encuentra en la intersección entre la recta dada por el  $T_{eff}$  y el ADRS reducido por amortiguamiento, pero la aceleración correspondiente a dicho desplazamiento está en función del espectro de capacidad (Federal Emergency Management Agency, 2005, pp. 6-1).

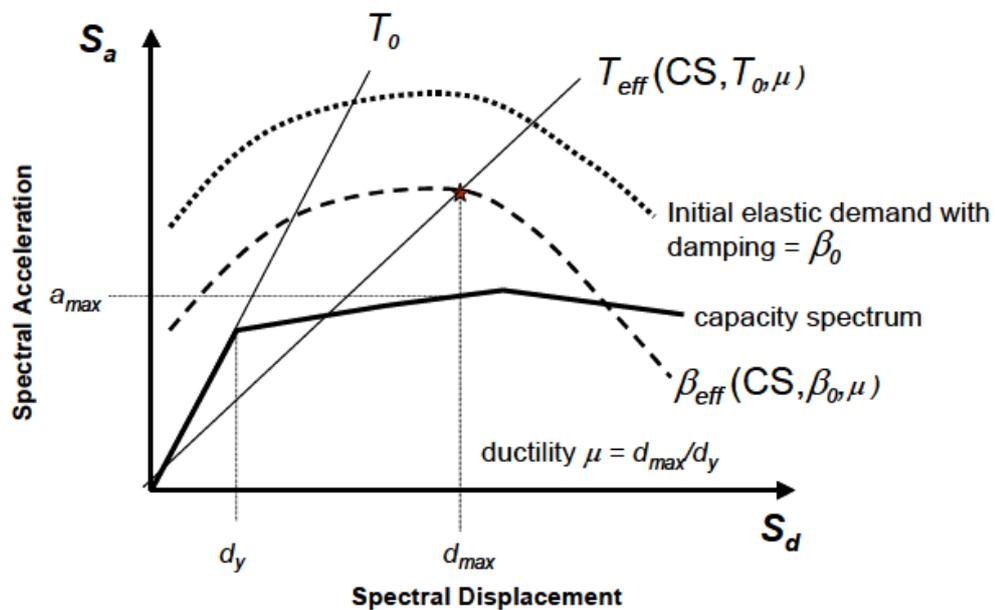


Fig. # 15 - Parámetros que intervienen en el Método A de Linearización Equivalente. Obtenido de FEMA 440 (2005, pp. 6-1).

### 1.11.3 FEMA 440: MÉTODO DE ESPECTRO DE CAPACIDAD POR LINEARIZACIÓN EQUIVALENTE – MÉTODO B: INTERSECCIÓN CON MADRS

Es un método muy similar al Método A, con la diferencia de que el punto de desempeño se encuentra en la intersección entre un espectro de demanda modificado (MADRS) y el espectro de capacidad. Esto se logra siguiendo los mismos pasos que en el Método A, pero adicionalmente se reducen las

ordenadas del espectro de aceleraciones dividiéndolas para un factor M, resultando en un espectro de respuesta de aceleraciones y desplazamientos modificado o MADRS (Federal Emergency Management Agency, 2005, pp. 6-5), como sigue:

$$M = \left( \frac{T_{eff}}{T_0} \right)^2 * \left( \frac{T_0}{T_{sec}} \right)^2$$

Donde

$$\left( \frac{T_0}{T_{sec}} \right)^2 = \frac{1 + \alpha(\mu - 1)}{\mu}$$

Y  $\alpha$  es la relación de rigidez post-fluencia, calculado como sigue:

$$\alpha = \frac{\frac{api - ay}{dpi - dy}}{\frac{ay}{dy}}$$

Donde:

- $api$  es la aceleración espectral de desempeño, obtenida de la idealización bilineal.
- $dpi$  es el desplazamiento espectral de desempeño, obtenido de la idealización bilineal.
- $ay$  es la aceleración espectral de fluencia, obtenida de la idealización bilineal.
- $dy$  es el desplazamiento espectral de fluencia, obtenido de la idealización bilineal.

Al reducir el espectro de aceleraciones para el factor M, este coincide en un punto con el espectro de capacidad, obteniendo el punto de desempeño nuevamente siguiendo un proceso iterativo (Federal Emergency Management Agency, 2005, pp. 6-5).

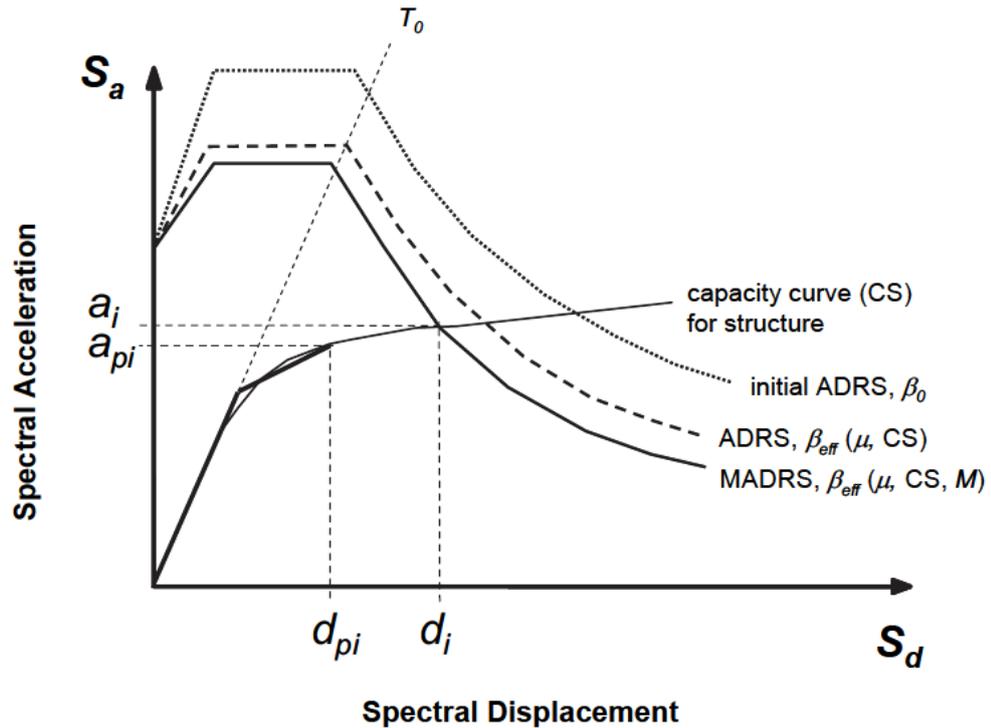


Fig. # 16 - Parámetros que intervienen en el Método B de Linearización Equivalente. Obtenido de FEMA 440 (2005, pp. 6-8).

#### 1.11.4 FEMA 440: MÉTODO DE ESPECTRO DE CAPACIDAD POR LINEARIZACIÓN EQUIVALENTE – MÉTODO C: LUGAR GEOMÉTRICO CON VARIOS MADRS

Este procedimiento es similar a los anteriores, con la diferencia de que no sigue un proceso iterativo, sino gráfico. Utilizando los mismos parámetros descritos anteriormente, se asumen distintos valores para  $\mu$ , obteniendo para cada uno su punto de desempeño probable. Estos puntos de desempeño intersectarán con sus respectivos espectros de demanda, pero no necesariamente con el espectro de capacidad. Luego, se unen los puntos de desempeño calculados con líneas rectas, generando una línea que proyecta la sucesión de varios puntos de desempeño. Esta sucesión se denomina lugar geométrico o LOCUS, e intersecta con los espectros de demanda modificados correspondientes a cada punto de desempeño calculado, pero el punto de desempeño real se encuentra en la intersección entre la línea de lugar

geométrico y el espectro de capacidad (Federal Emergency Management Agency, 2005, pp. 6-8).

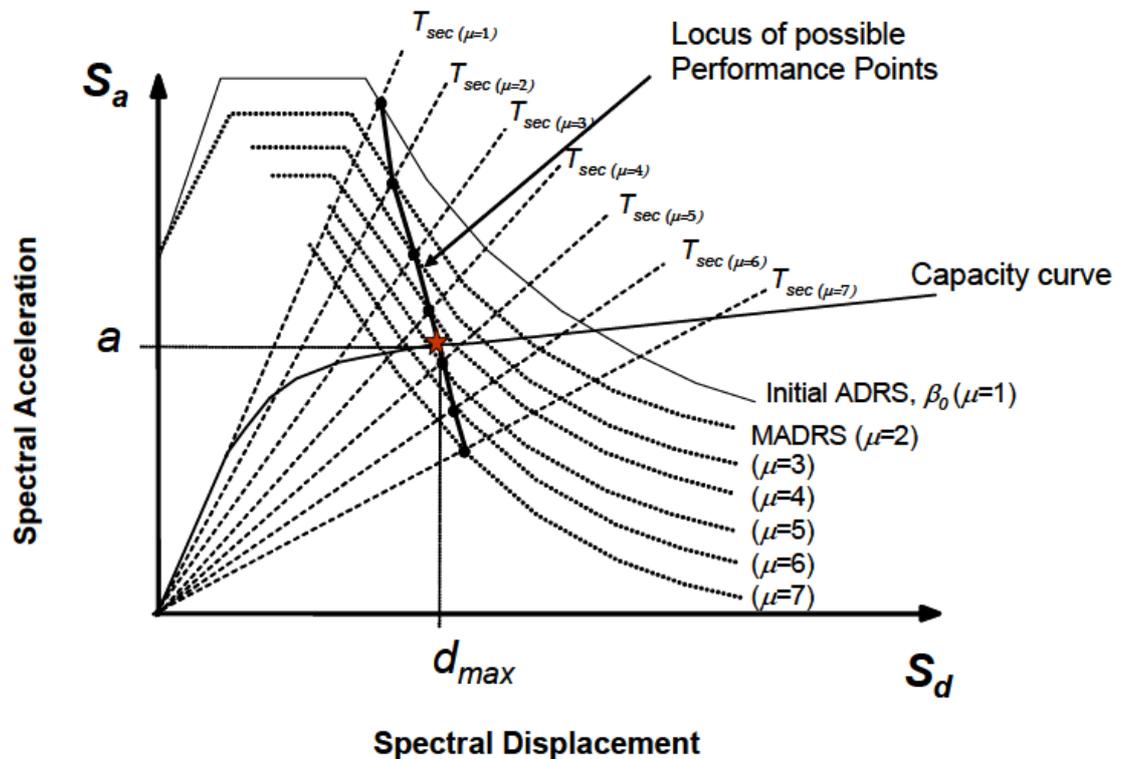


Fig. # 17 - Parámetros que intervienen en el Método C de Linearización Equivalente. Obtenido de FEMA 440 (2005, pp. 6-9).

## 1.12 PELIGRO SÍSMICO DEL ECUADOR SEGÚN NEC-15

La Norma Ecuatoriana de la Construcción del 2015 (NEC-15) ofrece una metodología para elaborar espectros de aceleraciones o desplazamientos de diseño para distintas zonas del Ecuador, en función de varios parámetros que se muestran a continuación:

### 1.12.1 FACTOR DE ZONA (Z)

Representa la máxima aceleración esperada en terreno de roca durante el sismo de diseño. Se expresa como porcentaje de la gravedad (2014, p. 27).

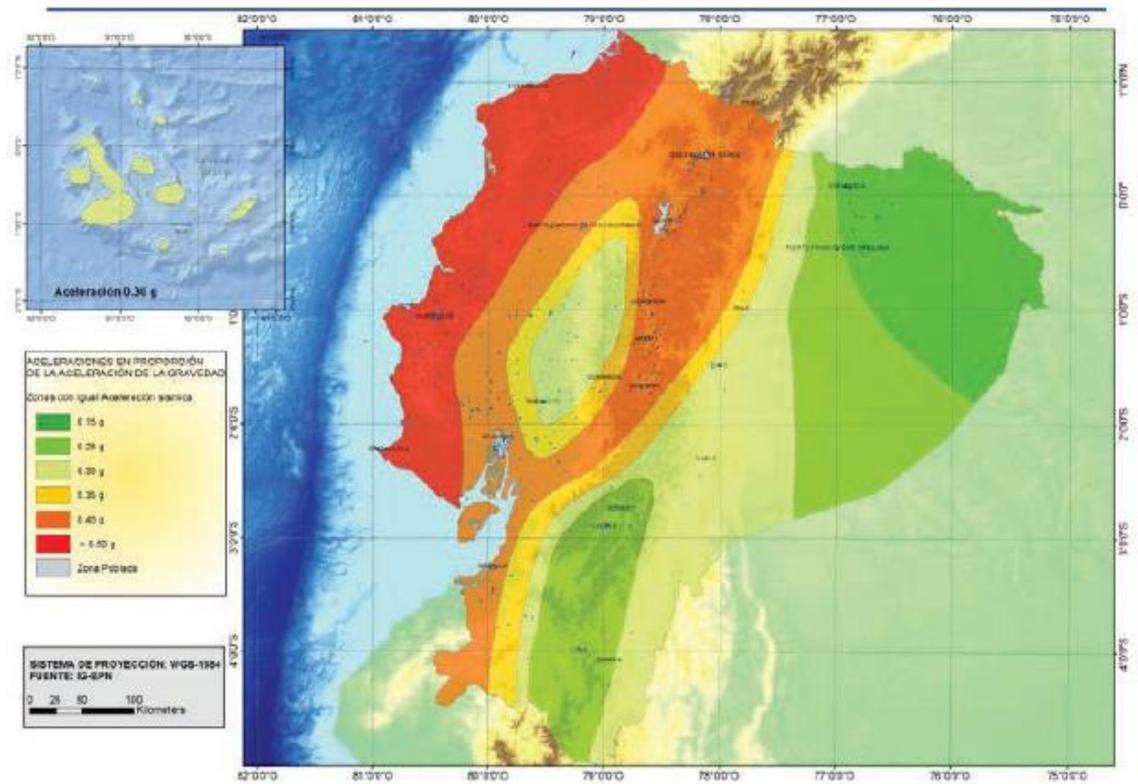


Fig. # 18 – Mapa de zonificación sísmica del Ecuador. Tomado de la NEC-15 (2015, p. 27).

### 1.12.2 GEOLOGÍA LOCAL

Corresponde a los distintos tipos de suelo que se pueden presentar en un proyecto. Estos pueden ser:

- A: Roca de alta rigidez o competente.
- B: Roca de rigidez intermedia.
- C: Suelos muy densos o roca de rigidez baja o blanda.
- D: Suelos rígidos.
- E: Suelos blandos o arcillas blandas con espesor de estrato mayor a 3 metros.
- F: Ninguno de los anteriores, y representan tipos de suelo susceptibles a una evaluación más detallada, especificada en la NEC-15.

Los criterios de selección del tipo de suelo se encuentran en la NEC-15 (2015, p. 29).

### **1.12.3 COEFICIENTES DE PERFIL DE SUELO**

Son los siguientes:

- Fa: Coeficiente de amplificación en zona de periodo corto.
- Fd: Coeficiente de amplificación para diseño en roca.
- Fs: Coeficiente de comportamiento inelástico del suelo.

Los valores de los factores descritos se encuentran en la NEC-15 en función del tipo de suelo y el factor Z (2014, p. 31).

### **1.12.4 PARÁMETROS ADICIONALES**

- $\eta$ : Relación entre la aceleración espectral correspondiente a un periodo de 0.1 segundos, y la aceleración máxima del terreno (PGA), dentro del periodo de retorno evaluado.
- Sa: Aceleración espectral elástica, representada como porcentaje de la gravedad.
- T: periodo fundamental de la estructura evaluada.
- $T_0 = 0.1 * F_s * F_d / F_a$ .
- $T_c = 0.55 * F_s * F_d / F_a$ .
- r: Factor relacionado al tipo de suelo.
- $T_I = 2.4 * F_d$ .
- Sd: Desplazamiento espectral elástico, igual a  $S_a * g * (T / 2\pi)^2$ .

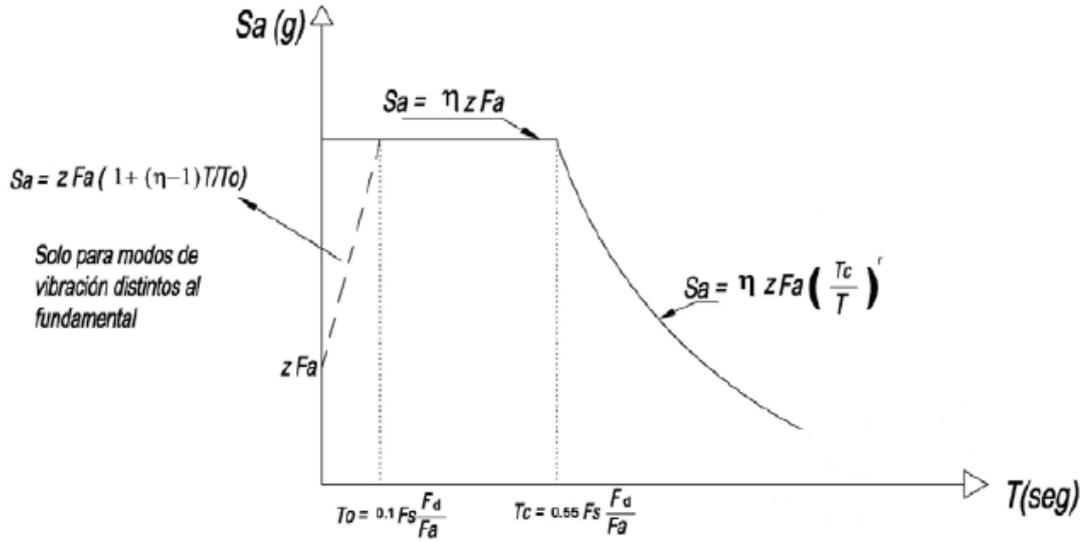


Fig. # 19 – Esquema de elaboración de espectro elástico de aceleraciones de diseño. Tomado de NEC-15 (2014, p. 33).

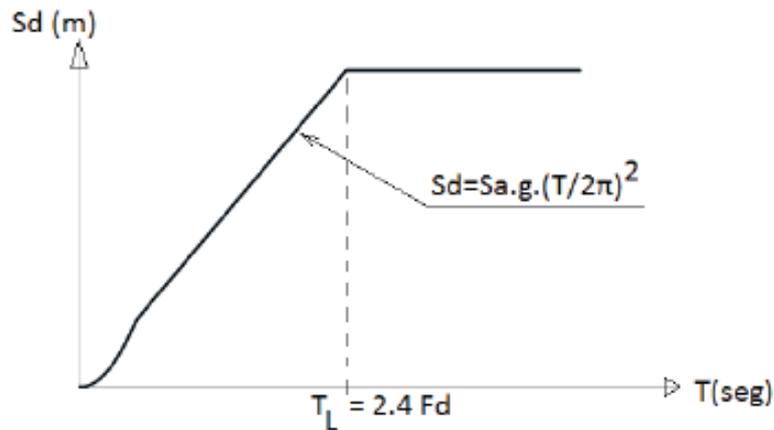


Fig. # 20 – Esquema de elaboración de espectro elástico de desplazamientos de diseño. Tomado de NEC-15 (2015, p. 36).

La obtención de los valores generales para los parámetros descritos con fines de diseño se detalla en la NEC-15, las cuales están en función del tipo de estructura, ubicación del proyecto, tipo de suelo en el proyecto, entre otros factores (Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda, 2015, p. 35).

### 1.13 CURVAS DE PELIGRO SÍSMICO DE NEC-15

Para definir niveles de peligro sísmico distintos a los provistos para diseño, la NEC-15 permite elegir otros niveles de amenaza sísmica y encontrar su correspondiente aceleración espectral elástica, en función de un periodo conocido. Esto se realiza a través de las curvas de peligro sísmico, las cuales se han elaborado para distintas regiones del país con la opción de encontrar las aceleraciones espectrales elásticas correspondientes a los periodos de 0.1, 0.2, 0.5 y 1 segundos (también para determinar el PGA), teniendo definido un nivel de amenaza sísmica específico o tasa anual de excedencia (Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda, 2014, p. 28).

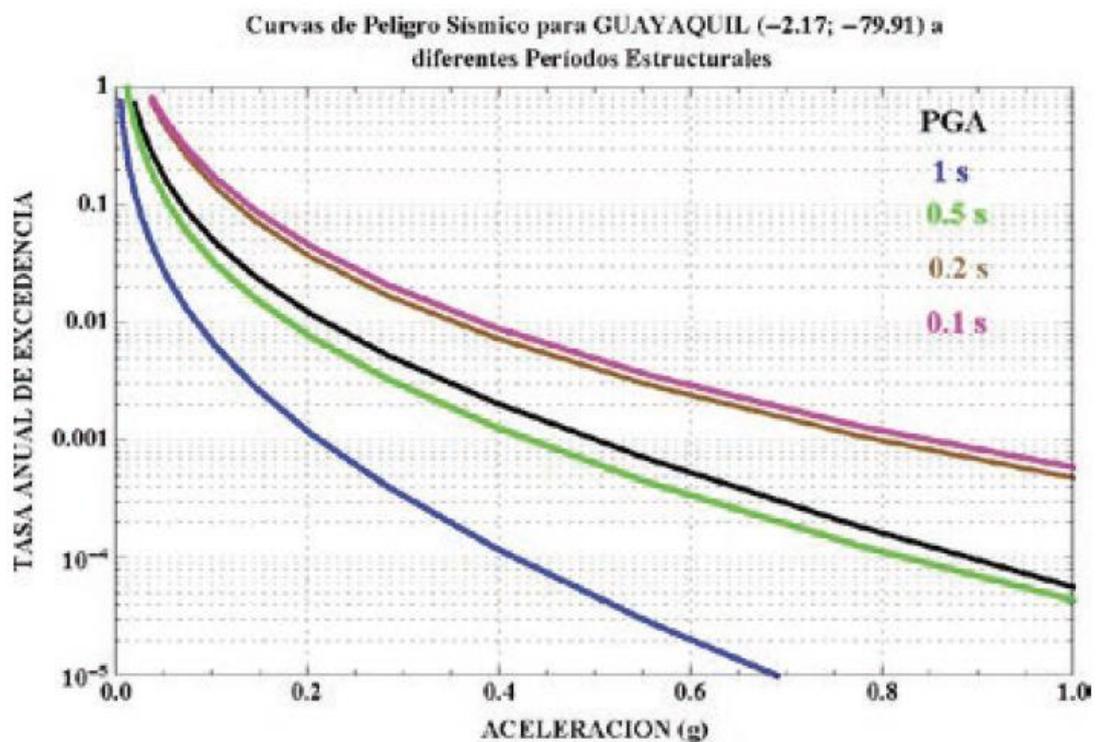


Fig. # 21 – Curvas de peligro sísmico para la ciudad de Guayaquil, para periodos de 0.1, 0.2, 0.5, 1 segundo y PGA. Tomado de NEC-15 (2014, p. 117).

## 1.14 NIVELES DE AMENAZA SÍSMICA SEGÚN LA NEC-15

La NEC-15 define distintos niveles de amenaza sísmica y sus correspondientes probabilidades de excedencia, periodos de retorno y tasa anual de excedencia, con el fin de que para cada uno se verifique el cumplimiento del objetivo de desempeño estructural (Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda, 2014, p. 41).

*Tabla # 3 – Niveles de amenaza sísmica. Tomado de la NEC-15 (2015, p. 41).*

<b>Nivel de sismo</b>	<b>Sismo</b>	<b>Probabilidad de excedencia en 50 años</b>	<b>Periodo de retorno Tr (años)</b>	<b>Tasa anual de excedencia (1/Tr)</b>
<b>1</b>	Frecuente (menor)	50%	72	0.01389
<b>2</b>	Ocasional (moderado)	20%	225	0.00444
<b>3</b>	Raro (severo)	10%	475	0.00211
<b>4</b>	Muy raro (extremo)	2%	2500	0.00040

## 1.15 AISLADORES SÍSMICOS

Son dispositivos cuya función es aislar local o totalmente a una estructura con el fin de separarla de los componentes horizontales del movimiento del terreno o del resto de la estructura durante un evento sísmico. Esto se logra configurando los dispositivos de aislación de manera que sean muy flexibles lateralmente, lo cual resulta en una estructura con periodos fundamentales mayores a los de estructuras con base o conexiones rígidas, y también resulta en frecuencias naturales en la estructura muy distintas a las frecuencias de movimiento durante el evento sísmico (Farzad Naeim, 1999, p. 3).

### 1.15.1 AISLADORES DE CAUCHO

Son dispositivos de aislación sísmica hechos de caucho natural. Este tipo de aisladores consisten en sistemas de alto amortiguamiento, pudiendo llegar a fracciones de amortiguamiento crítico de 10% a 20%, con módulos de corte de 0.34 MPa. Son muy rígidos axialmente y en general tienen sección redonda (Farzad Naeim, 1999, p. 50).

Las propiedades mecánicas de este sistema de aislación se pueden representar en un modelo bilineal, las cuales se denominan:

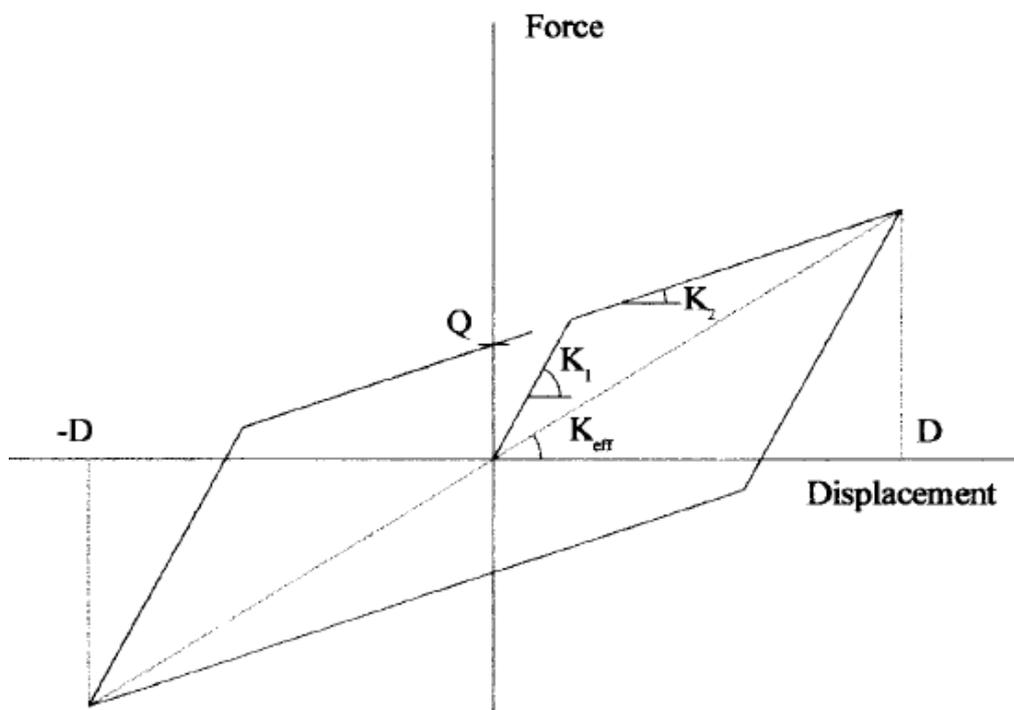


Fig. # 22 – Esquema de modelo bilineal para aisladores de caucho. Tomado de Naeim (1999, p. 104)

- Rigidez inicial o elástica –  $K_1$ .
- Rigidez post-fluencia –  $K_2$ .
- Resistencia característica –  $Q$ .
- Desplazamiento máximo –  $D$ .
- Rigidez efectiva –  $K_{eff}$ .

De las cuales se puede obtener:

- Periodo efectivo:

$$T_{eff} = 2\pi \sqrt{\frac{m}{K_{eff}}}$$

Donde  $m$  es la masa sobre el aislador.

- Energía disipada por ciclo:

$$E_m = 4Q(D - Dy)$$

Donde  $Dy$  es el desplazamiento de fluencia del aislador.

- Razón de amortiguamiento crítico efectivo:

$$\beta_{eff} = \frac{4Q(D - Dy)}{2\pi K_{eff} D^2}$$

- Factor de reducción de respuesta por disipación de energía por amortiguamiento (Federal Emergency Management Agency, 2005, pp. 6-5):

$$B = \frac{4}{5.6 - \ln(\beta_{eff} \%)}$$

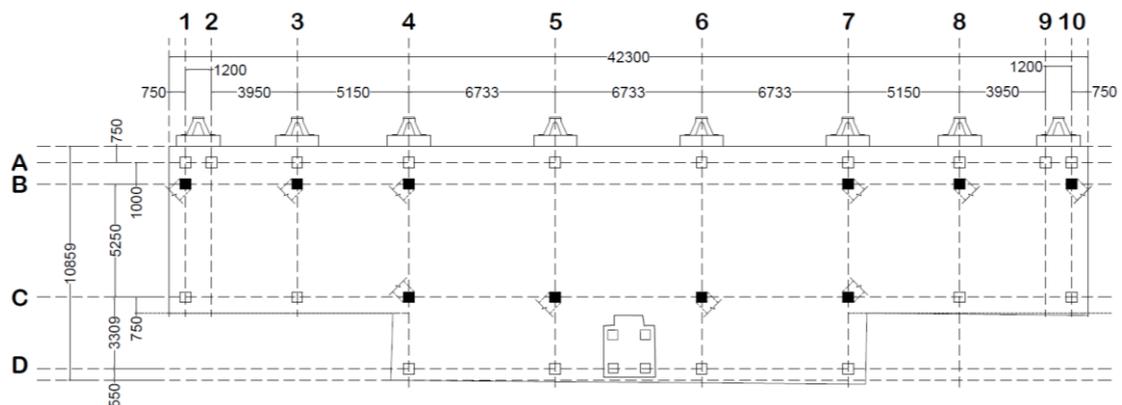
Estos parámetros permiten modelar el aislador como un resorte semi-rígido e incorporarlo en un modelo estructural (Farzad Naeim, 1999, p. 105).

## CAPÍTULO II

### 2 ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO Y DESEMPEÑO DE UN MUELLE CONVENCIONAL

#### 2.1 DESCRIPCIÓN DEL CASO DE ESTUDIO

El caso en estudio es un muelle marginal existente (no se menciona el nombre por indicaciones de los dueños) ubicado en la ciudad de Guayaquil, provincia del Guayas, República del Ecuador.



*Fig. # 23 - Planta de muelle existente, disposición de pilotes. Tomado de Plano Estructural de Muelle (2017, p. EST 01). Dimensiones en mm.*

El muelle en estudio consiste en una estructura de 42,3 metros de largo y 10,86 metros de ancho aproximadamente, con 8 pórticos principales en la dirección de atraque (perpendicular a la dimensión más larga) y 3 pórticos en la dirección perpendicular (paralelo a la dimensión más larga). Posee 32 pilotes, 22 verticales (en blanco – Ver Fig. #23) y 10 inclinados (en negro – Ver Fig. #23). Las luces en la dirección de atraque son de 6,25 m y 3,3 m, y en la dirección perpendicular varían de 6,733 m a 3,95 m, todas entre ejes de pilotes.

La estructura está conformada por elementos de hormigón reforzado construido en sitio, hormigón prefabricado y semi-prefabricado, el cual es un tipo de elemento que se construye parcialmente en planta y se termina de construir en sitio. Las vigas cargadoras (paralelas a la dirección de ataque, coloreadas en negro, ver Fig. #24) son elementos semi-prefabricados de tipo T invertida de 50/100x70 (ver Fig. #25) y las vigas de amarre son rectangulares de 40x70. El sistema de losa está compuesto por vigas doble T pretensadas de aproximadamente 113 cm de ancho de ala superior y 30 cm de peralte (ver Fig. #26), sobre las cuales se coloca un topping de hormigón de 8 cm de espesor con malla  $\varnothing 8\text{mm}$  c./150mm en dos sentidos. Estas vigas doble T se apoyarán sobre el ala inferior de las vigas cargadoras tipo T invertida (apoyo simple). Sobre el topping irán bloques de madera plástica como acabado de piso. Los pilotes están hechos de hormigón con varillas de acero dulce y cables pretensados. Cada pilote tiene una sección de 50x50, y longitud de 32 m con la punta llegando a un estrato resistente. Para más detalles, consulte el plano estructural en los Anexos.

Para el caso se revisó:

- Memoria técnica de análisis y diseño estructural.
- Planos estructurales.
- Información del modelo estructural utilizado para su diseño (rigidez lateral elástica, longitud efectiva de pilotes, etc.).

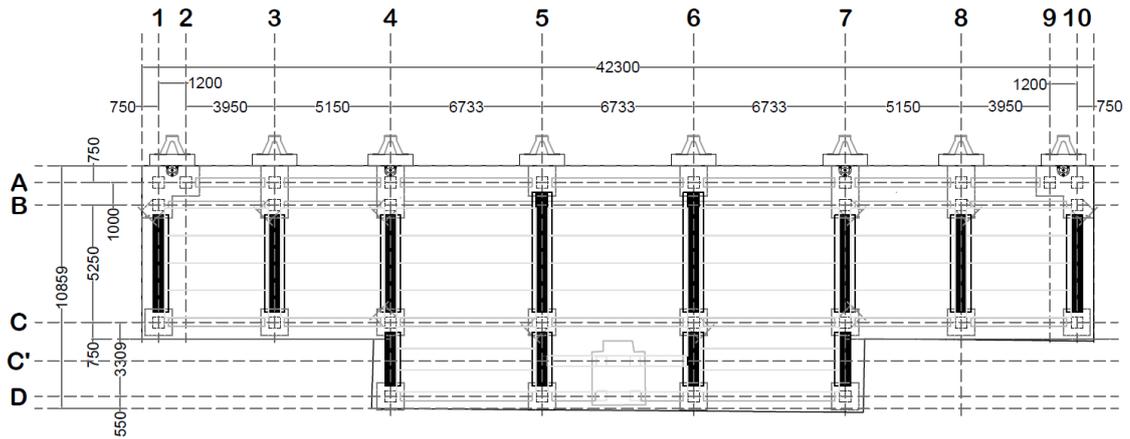


Fig. # 24 - Planta de muelle existente, configuración de vigas cargadoras (negras) y secundarias. Dimensiones en mm. Tomado de Plano Estructural de Muelle (2017, p. EST 02).

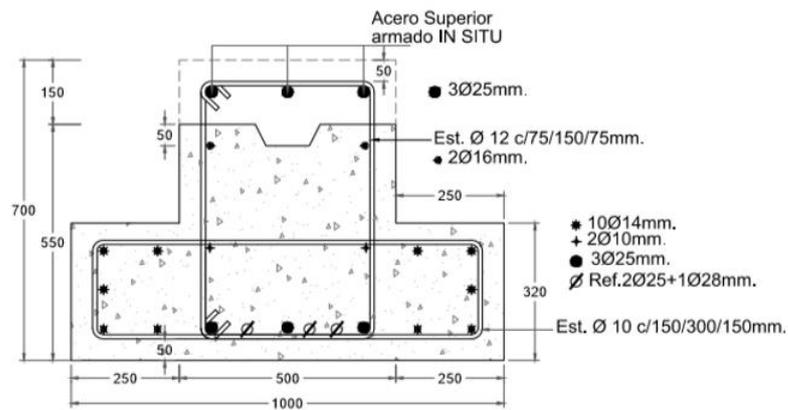


Fig. # 25 - Sección transversal de viga cargadora tipo T invertida. Dimensiones en mm. Tomado de Plano Estructural de Muelle (2017, p. EST 02).

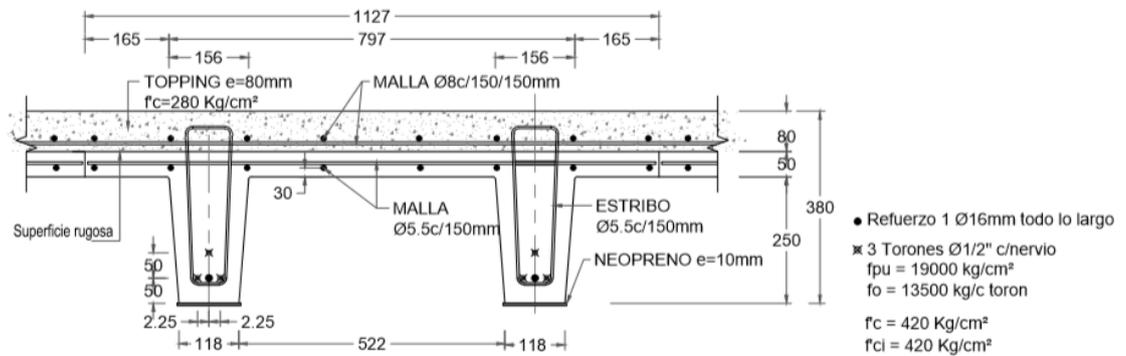


Fig. # 26 - Sección transversal de viga doble T con topping de 8 cm. Dimensiones en mm. Tomado de Plano Estructural de Muelle (2017, p. EST 02).

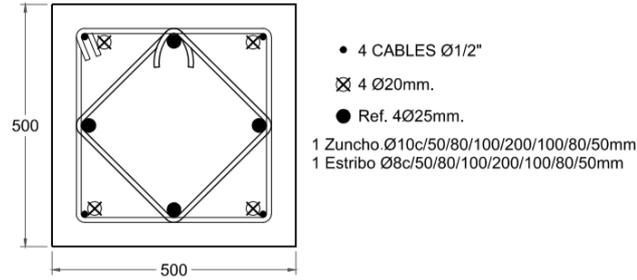


Fig. # 27 - Sección transversal de pilote pretensado. Dimensiones en mm. Tomado de Plano Estructural de Muelle (2017, p. EST 01).

Las propiedades mecánicas de los materiales se describen en la memoria técnica y los planos estructurales, las cuales son:

Tabla # 4 - Propiedades mecánicas de los materiales utilizados en el muelle existente. Adaptado de (2017, p. 6).

Materiales	Peso Específico (kg/m <sup>3</sup> )	Resistencia (kg/cm <sup>2</sup> )	Módulo de Elasticidad (kg/cm <sup>2</sup> )	Relación de Poisson
Homigón in situ	2400	280	250 000	0,20
Acero de refuerzo	7850	4200	2 100 000	0,30
Hormigón en pilotes	2400	420	300 000	0,20
Cables de presfuerzo	7850	18900	2 100 000	0,30

Se concluyó que hormigón in situ aplica tanto para vigas fundidas en sitio como vigas semi-prefabricadas.

## 2.2 DESCRIPCIÓN DEL MODELO ESTRUCTURAL

Se elaboró una plataforma de trabajo en el interpretador Spyder (Anaconda) para lenguaje Python, que permite realizar modelos matemáticos de

estructuras en dos dimensiones y su consecuente análisis estructural, a través de comandos de Open Sees. Estos se detallan en internet (University of California, Berkely, 2012) y son de uso libre.

Se busca que el modelo matemático permita conocer el estado de fuerzas y desplazamientos en los distintos nudos y elementos de una estructura bajo sollicitaciones de carga, considerando su geometría, secciones transversales, el comportamiento de sus materiales, tanto en el rango elástico como en el no-lineal. Adicionalmente, que permita cuantificar los esfuerzos en los que se encuentran los materiales dentro de las secciones transversales críticas de los elementos, por lo que las fuerzas deberán poder relacionarse con parámetros de comportamiento específicos de su sección transversal (deformaciones unitarias).

El modelo a analizar debe tener similitudes con el muelle existente, tales como rigidez lateral elástica, geometría en elevación, configuración de pilotes, y magnitud de cargas gravitacionales. Para simplificar el trabajo, se considerará un pórtico del muelle existente en la dirección donde se producen las cargas de atraque de buques, hasta tener la mayor similitud posible con respecto a las propiedades antes mencionadas. Esta dirección se seleccionó debido a que permite visualizar las ventajas y desventajas del sistema de aislación cuando se aplican cargas sísmicas o cargas laterales (atraque) durante la operación del muelle. Cabe recalcar que, al haber 8 pórticos principales en la estructura para la dirección considerada, las propiedades como rigidez lateral elástica y magnitud de cargas gravitacionales deben ajustarse a lo que le corresponde a 1 pórtico.

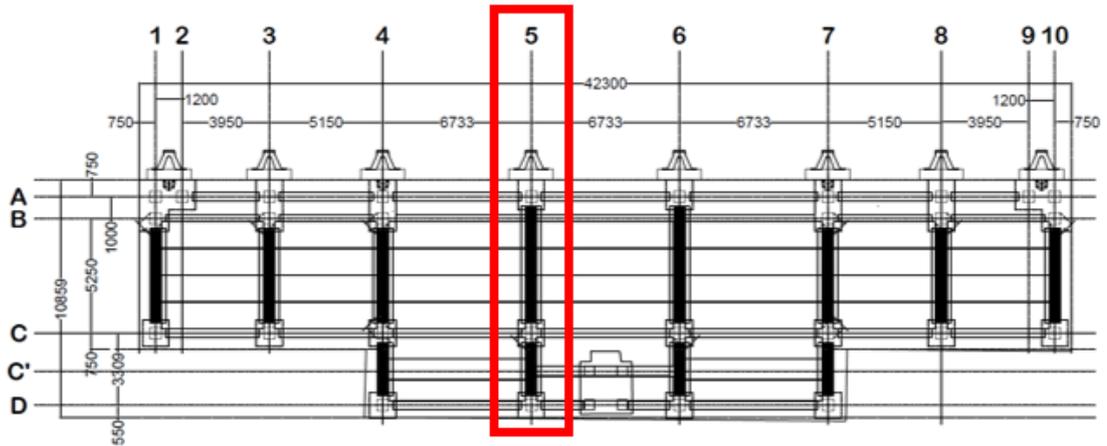


Fig. # 28 - Selección de pórtico para análisis estructural en 2D. Dimensiones en mm. Adaptado de Plano Estructural de Muelle (2017, p. EST 02).

Para el muelle sin aisladores, el pórtico seleccionado se ajustó para tener una rigidez lateral elástica lo más similar posible a la de un pórtico equivalente del muelle existente (rigidez del pórtico equivalente = rigidez del muelle dividido para el número de pórticos en el muelle), pues el pórtico por sí solo demostró ser muy flexible. El ajuste implicó modificar levemente la inclinación de ciertos pilotes y la adición de un pilote adyacente al que se encuentra en el extremo donde se ubica la defensa (el pórtico resultó similar al ubicado a la izquierda del pórtico seleccionado en la Fig. #28). A continuación, se muestra el cálculo y revisión de la rigidez requerida en el modelo matemático:

- Rigidez para cargas en sentido de ataque:

Obtenido de modelo estructural de muelle existente:

$$K_{\text{estructura}} = \frac{86,17 \text{ Ton}}{2 \text{ cm}} = 43,09 \frac{\text{Ton}}{\text{cm}} \quad ; \quad K_{\text{pórtico req.}} = \frac{43,09}{8 \text{ pórticos}} = 5,39 \frac{\text{Ton}}{\text{cm}}$$

Obtenido de modelo matemático de pórtico ajustado:

$$K_{\text{pórtico}} = \frac{10,8 \text{ Ton}}{2 \text{ cm}} = 5,4 \frac{\text{Ton}}{\text{cm}} \approx 5,39 \frac{\text{Ton}}{\text{cm}} \therefore \text{OK}$$

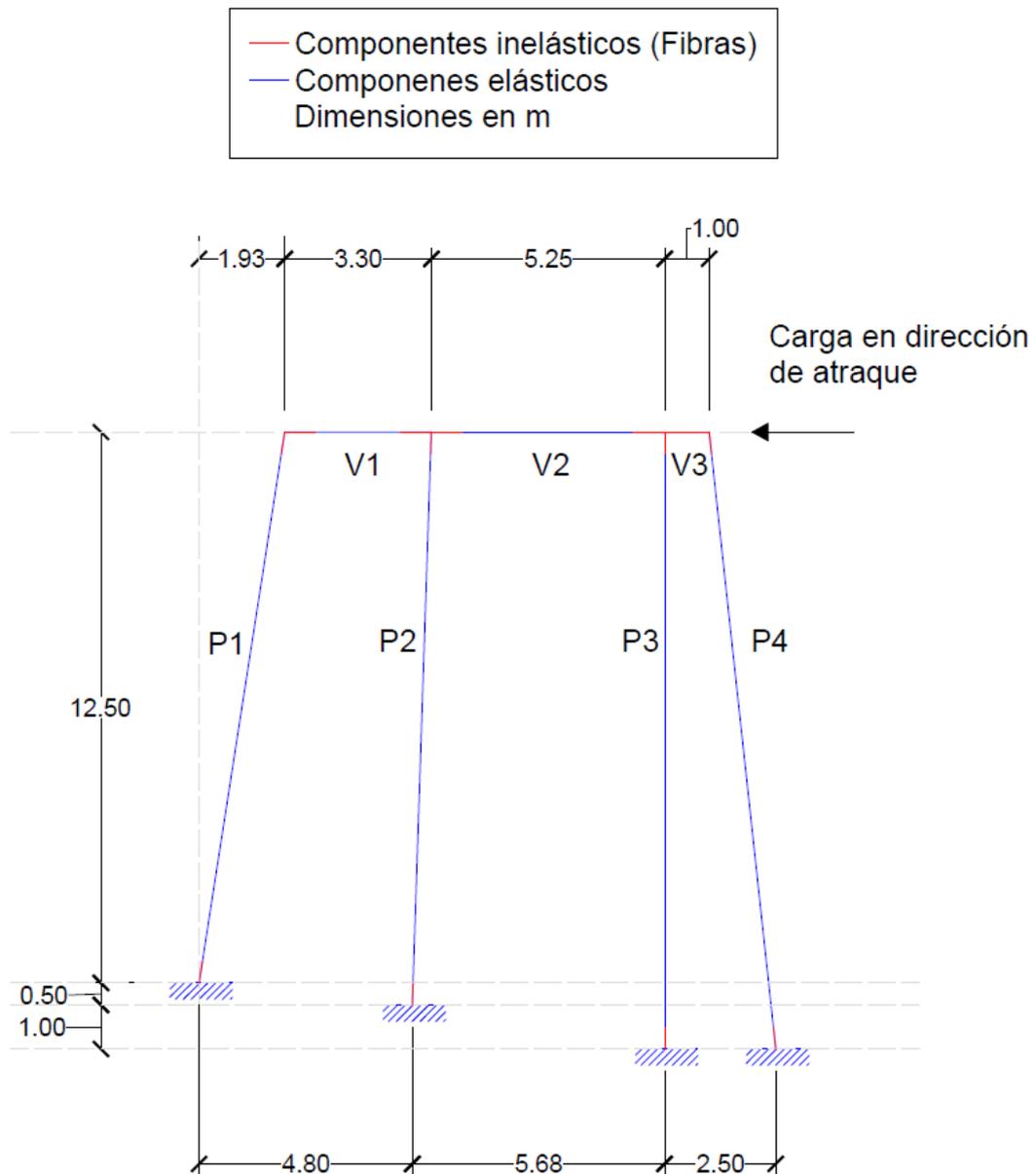


Fig. # 29 - Esquema de modelo estructural de pórtico equivalente.

### 2.2.1 HIPÓTESIS DEL MODELO

El modelo estructural considera dos dimensiones dentro del plano (direcciones globales X y Y) y una fuera del plano (dirección global Z). Los grados de libertad considerados fueron 3 en total, 2 de traslación en los ejes X y Y, y 1 de rotación con respecto al eje Z. Este tipo de modelo se denomina como "Básico" dentro de los comandos de Open Sees Py. Se optó por este tipo de modelación porque implica que se está asumiendo una distribución uniforme de fuerzas laterales en todos los pórticos del muelle existente en esta dirección, lo cual es consistente para cargas laterales que se apliquen

cerca del centro de rigidez en planta de la estructura y para estructuras con diafragma muy rígido, como son los muelles (Gaythwaite, 2004, pág. 254). Sin embargo, no se estaría considerando la posible torsión producida por cargas excéntricas que pueden originarse por causas no sísmicas (amarre y atraque). Fuera de esto, para estados de carga sísmica, no hay una excentricidad significativa entre el centro de masas y el centro de rigidez en planta para la dirección considerada, por lo que la evaluación del desempeño sísmico de la estructura puede hacerse con un análisis bidimensional, realizando los ajustes pertinentes con buen uso del criterio ingenieril.

Se incluyeron efectos  $P-\Delta$ , pues con cargas gravitacionales de magnitud importante junto a desplazamientos que podrían considerarse menores, es probable que se produzca una amplificación de esfuerzos significativa en los elementos.

Para la modelación de los pilotes, a pesar de ser de 32 metros de longitud, se modeló la porción que va desde la cabeza hasta donde se produzca el empotramiento efectivo (Ver sección 1.8 – Marco Teórico), por lo que la longitud modelada de los pilotes es de 14 metros aproximadamente.

Con el fin de simplificar la modelación de los elementos de la estructura, cada uno (pilotes y vigas) se dividió en 3 componentes (Ver Fig. #29), 2 componentes ubicados en los extremos compuestos por secciones transversales elaboradas con fibras, y en el interior se insertó un componente con sección transversal elástica cuyos parámetros corresponden a los de sus materiales y dimensiones, tales como módulo de elasticidad, área e inercia. Esto porque los esfuerzos y demandas de desplazamiento o rotación van a ser importantes en los extremos (para cargas laterales), mientras que en el interior se mantendrán en niveles menores. Para esto, se consideró que la longitud de los componentes hechos de fibras dentro de cada elemento, o también llamada longitud esperada de rótula plástica, es igual al peralte de su correspondiente sección transversal.

## 2.2.2 MODELACIÓN DE SECCIONES POR FIBRAS

La discretización de las fibras en las secciones transversales se realizó considerando propiedades geométricas y mecánicas de los materiales, donde se presentaba acero de refuerzo, cables de presfuerzo, hormigón sin confinar y hormigón confinado (Ver Fig. #30, 31, 32, 33). Cada zona resultante de la discretización se dividió en 10 fibras horizontales por 10 fibras verticales (discretización de 10x10). Las varillas y cables de acero se insertaron como fibras puntuales en base a su ubicación dentro de la sección. El hormigón sin confinar se utilizó para las secciones de las vigas y el recubrimiento de los pilotes. El núcleo de los pilotes se consideró como hormigón confinado, de acuerdo a la separación y disposición de estribos y zunchos detallada en los planos estructurales. La separación de estribos se consideró de 10 cm uniformemente dentro de la longitud de la rótula plástica esperada, pues si bien en la cabeza del pilote la separación es de 5 cm (en 50 cm de longitud) y en la zona adyacente de 8 cm (en 50 cm de longitud), el pilote luego de hincarse va a ser descabezado 95 cm, y quedaría la zona con separación de 10 cm, la cual es lo suficientemente larga para que la rótula plástica se produzca.

Para las vigas T invertida, se consideró que por la presencia de la losa de 8 cm, estas iban a trabajar como vigas I, con un ala superior cuyo ancho efectivo es definido por el ACI 318-14 (American Concrete Institute, 2014, p. 128) como:

*Aumento de ancho efectivo a cada lado del alma*

$$= \text{Mínimo entre } \left( 8h, \frac{s_w}{2}, \frac{l_n}{8} \right)$$

Donde:

- h es el peralte de la viga.
- $s_w$  es la separación libre entre almas adyacentes.
- $l_n$  es la luz libre del elemento.

Por consiguiente, los elementos resultaron discretizados y definidos como sigue:

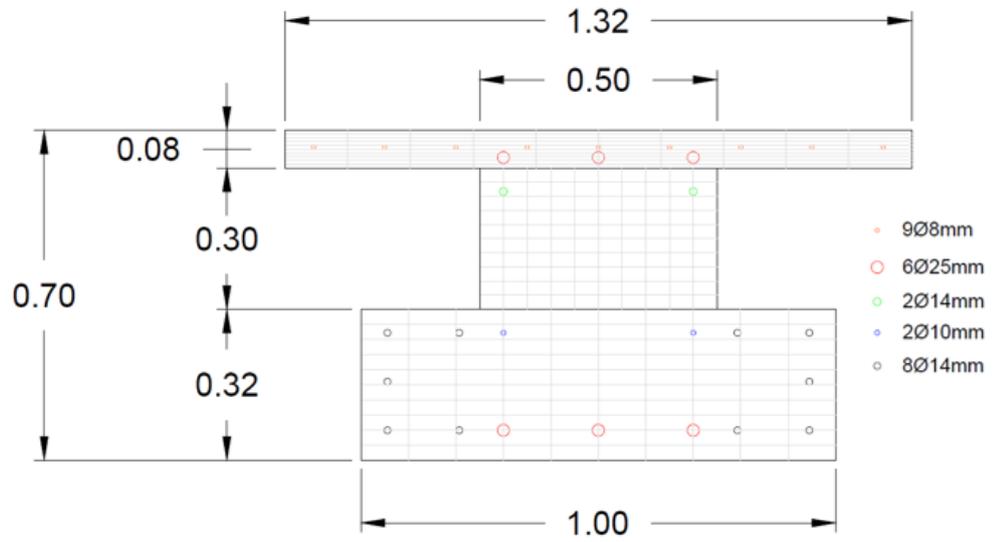


Fig. # 30 – Discretización por fibras de Viga V1.

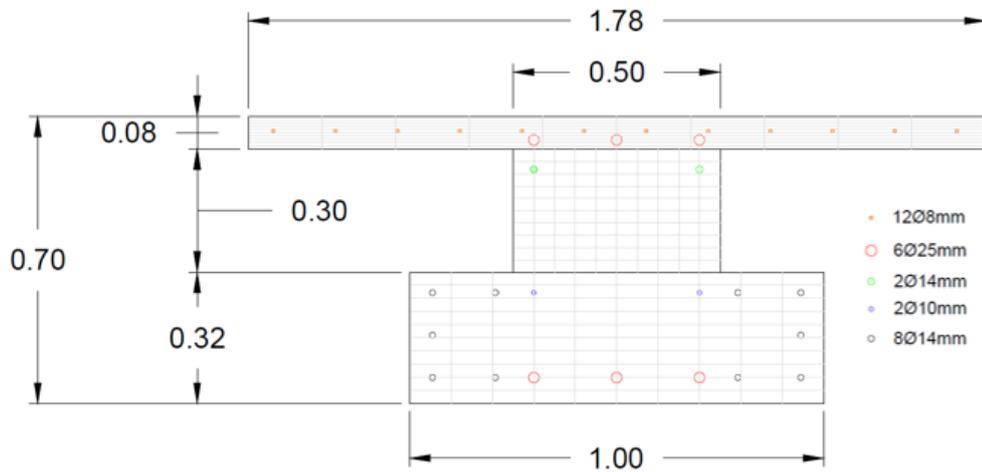


Fig. # 31 - Discretización por fibras de Viga V2.

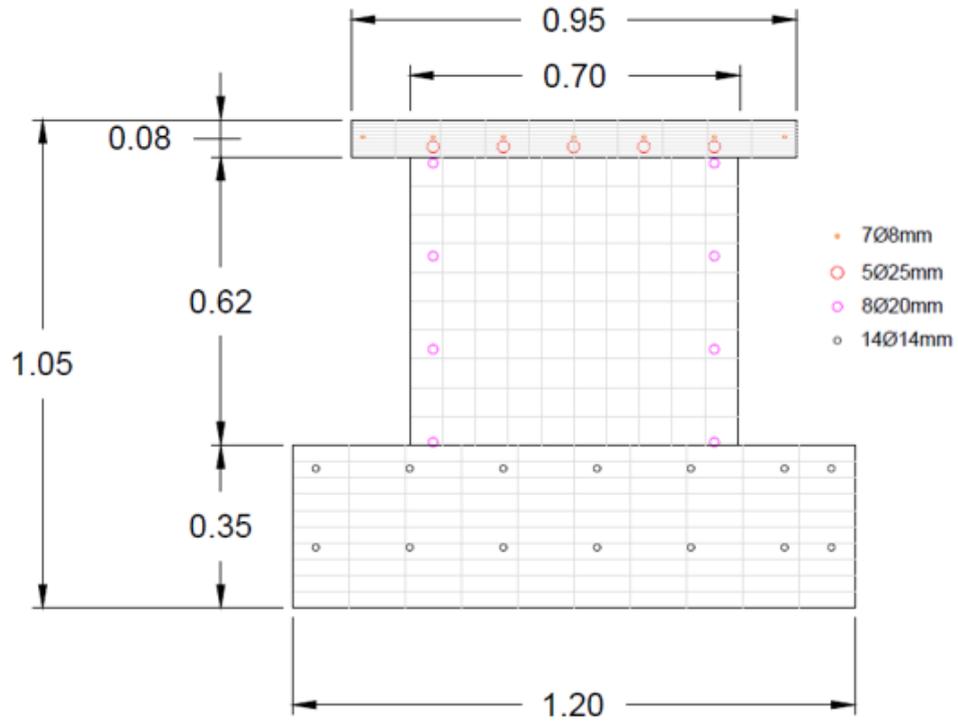


Fig. # 32 - Discretización por fibras de Viga V3.

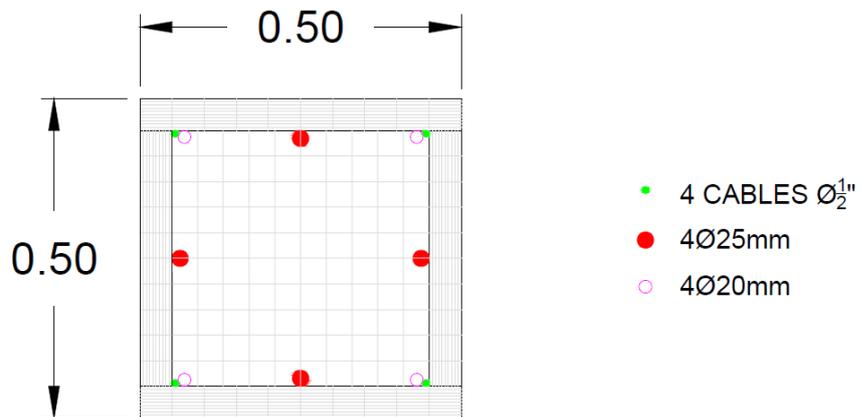


Fig. # 33 - Discretización por fibras de Pilotes P1, P2, P3 y P4.

Cabe recalcar que se agregaron refuerzos en las secciones transversales de fibras donde correspondía según el plano estructural (Ver Fig. #34).

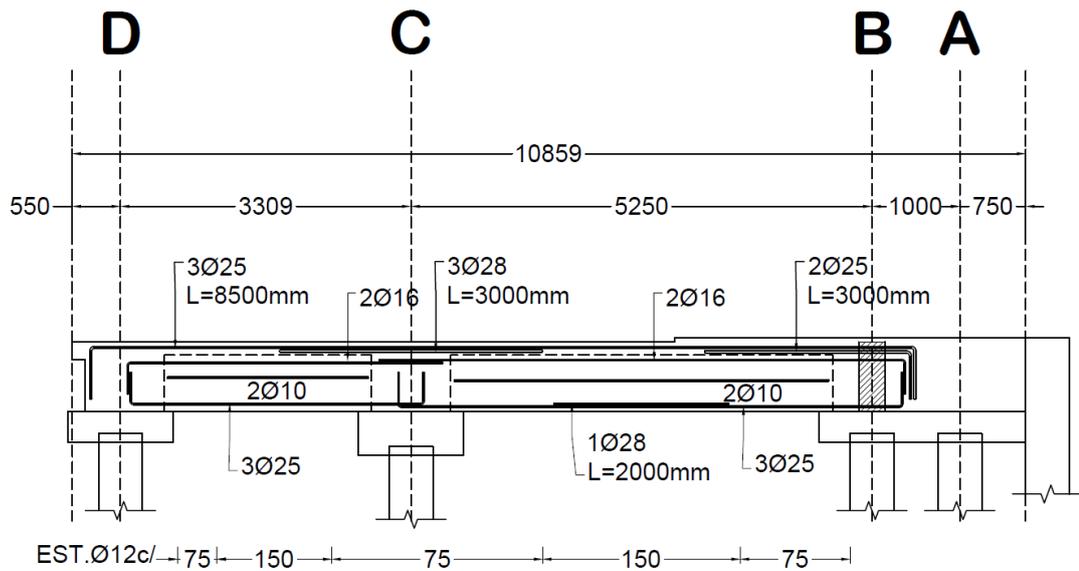


Fig. # 34 – Disposición de refuerzos en vigas para modelo de pórtico. Tomado de Plano Estructural de Muelle (2017, p. EST 03). Dimensiones en mm.

### 2.2.3 MODELOS DE LOS MATERIALES

Los materiales se modelaron en base a distintas leyes constitutivas que se describen a continuación:

#### 2.2.3.1 Hormigón

Open Sees Py utiliza el modelo de Kent-Scott-Park (1980, p. 92), el cual consiste en una variación de esfuerzos parabólica hasta llegar a la resistencia a compresión a 28 días ( $f'_c$ ), y luego tiene una variación lineal hasta llegar al esfuerzo último ( $f_{cu}$ ). Se considera que la resistencia a la tensión es nula.

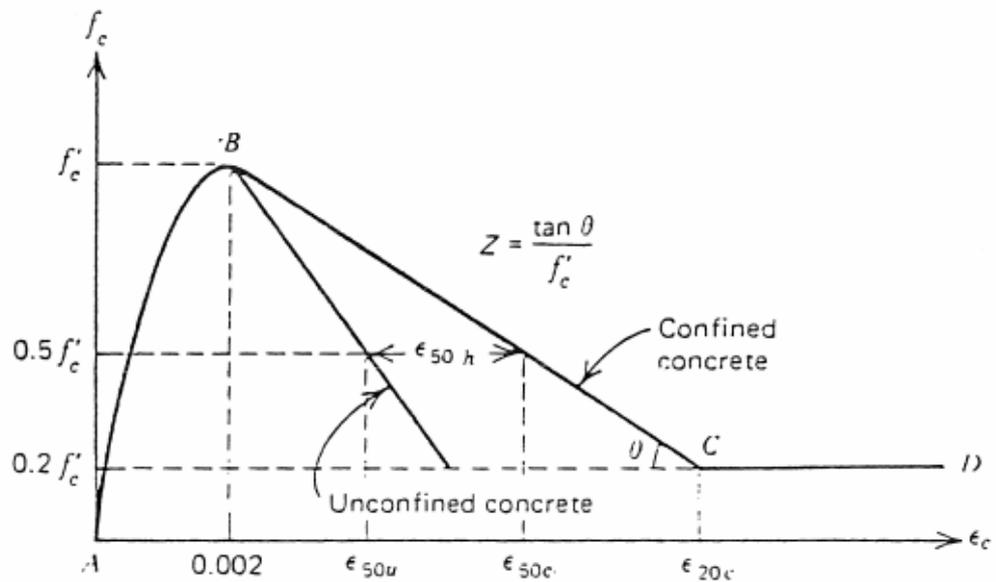


Fig. # 35 - Ley constitutiva del hormigón según Kent-Scott-Park (1980).

La curva se produce de acuerdo a:

Para  $\epsilon_c < \epsilon_0$

$$f_c = K f'_c * \left( \frac{2\epsilon_c}{\epsilon_0} - \left( \frac{\epsilon_c}{\epsilon_0} \right)^2 \right)$$

Para  $\epsilon_{20c} > \epsilon_c > \epsilon_0$

$$f_c = K f'_c * (1 - Z m * (\epsilon_c - \epsilon_0))$$

Donde:

- $f_c$  es el esfuerzo actuante a compresión en el hormigón.
- $\epsilon_c$  es la deformación unitaria actuante a compresión en el hormigón.
- $f'_c$  es la resistencia a compresión del hormigón a 28 días.
- $\epsilon_0$  es la deformación unitaria correspondiente al esfuerzo  $f'_c$ .
- $\epsilon_{20c}$  es la deformación unitaria a un esfuerzo igual al 20% de  $f'_c$ .
- $K$  es la relación es resistencia por confinamiento definida por Mander, Priestley y Park (1988).

- $Z_m$  es un factor de ajuste debido a la cuantía volumétrica de refuerzo transversal.

Para la determinación de  $K$  se siguieron los lineamientos descritos en el trabajo de Mander, Priestley y Park (1988), donde resultó en  $K=1.29$ .

Para generar la curva implementada por Open Sees Py, Karthik y Mander (2011) establecieron ecuaciones que permiten calcular  $\epsilon_0$ ,  $f_{cu}$  y  $\epsilon_{cu}$  para hormigón no confinado y  $f'_{cc}$ ,  $\epsilon_{cc}$ ,  $f_{cu}$  y  $\epsilon_{cu}$  para hormigón confinado. Los resultados obtenidos con estas ecuaciones se ingresaron en el modelo estructural como parámetros mecánicos para cada hormigón.

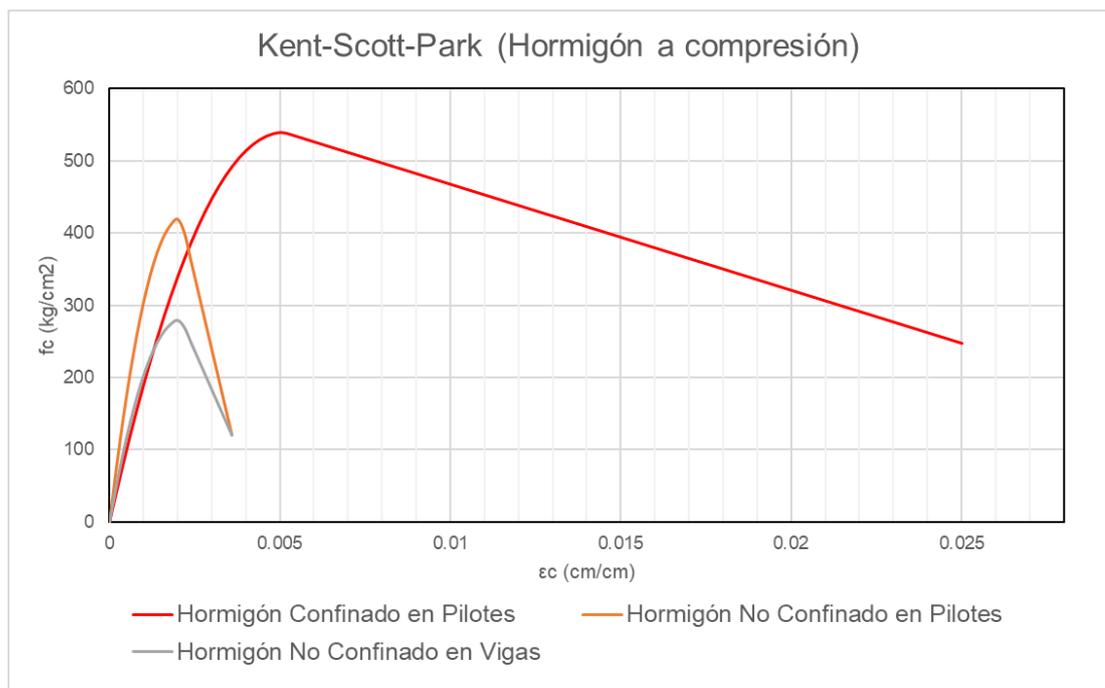


Fig. # 36 - Leyes constitutivas del hormigón utilizada por Open Sees Py.

Tabla # 5 - Parámetros ingresados para modelar a cada tipo de hormigón.

Hormigón	$\epsilon_0$ cm/cm	$f'_c$ kg/cm <sup>2</sup>	K	$E_c$ kg/cm <sup>2</sup>	n	$\epsilon_{cu}$ cm/cm	$f_{cu}$ kg/cm <sup>2</sup>
No confinado en vigas	0.0021	280	1	252671.33	1.9	0.0036	120
No confinado en pilotes	0.0021	420	1	309457.9	1.47	0.0036	120
Confinado en pilotes	0.0051	420	1.29	309457.9	2.92	0.00255	240

Cabe recalcar que la resistencia a compresión del hormigón confinado a los 28 días ( $f'_{cc}$ ) resultó de 540 kg/cm<sup>2</sup>.

### 2.2.3.2 Acero y Cables de Presfuerzo

Open Sees Py implementa el modelo de Menegotto-Pinto (1973), en el cual además de representar el comportamiento de un tipo de acero con un esfuerzo de fluencia  $f_y$  mediante dos rectas tangentes a la curva real, también incluye una degradación de rigidez cuando los esfuerzos llegan a un valor cercano a  $f_y$ , generada por incursionar en varios ciclos de deformación inelástica. Se consideró que el acero no ha sido deformado en varios ciclos dentro del modelo estructural, pero se incluye una degradación de rigidez correspondiente a una cercana a un ciclo inicial de desplazamiento.

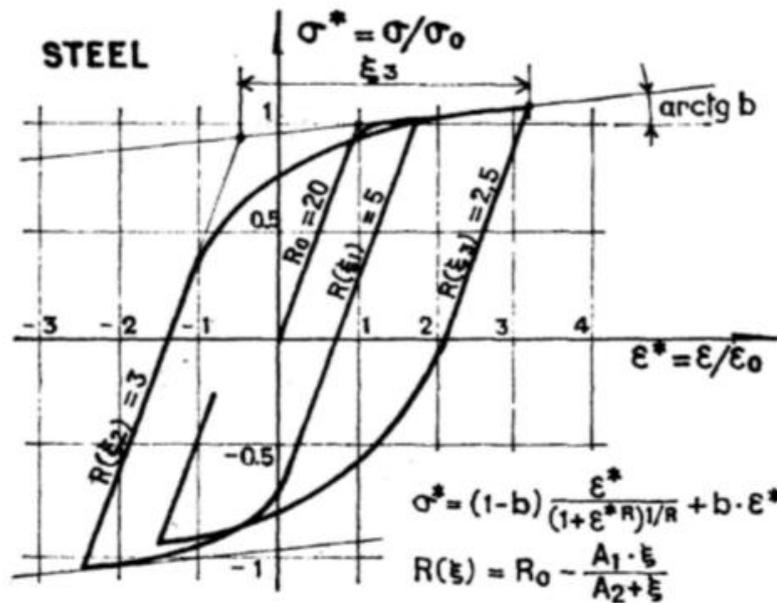


Fig. # 37 - Ley constitutiva según Menegotto-Pinto (1973).

El modelo obedece la siguiente ley constitutiva:

$$f_s = f_y * \left( (1 - b) * \frac{\frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_y}}{\left(1 + \left(\frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_y}\right)^R\right)^{\frac{1}{R}}} + b * \frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_y} \right)$$

Donde:

- $\varepsilon_s$  es la deformación unitaria actuante en el acero.
- $f_s$  es el esfuerzo actuante en el acero para la deformación unitaria  $\varepsilon_s$ .
- $\varepsilon_y$  es la deformación unitaria a fluencia del acero.
- $f_y$  es el esfuerzo de fluencia en el acero.
- $b$  representa la relación entre el módulo post-fluencia y el módulo elástico.
- $R$  influye en la curvatura cercana a la zona de fluencia en la curva.

Para ciclos iniciales de desplazamiento, se puede utilizar  $R = 18$ . Esto debido a que la variación que brinda  $\xi$  (el máximo desplazamiento entre ciclos) no es muy significativa, tal que se obtiene  $R = 17.99$  con  $R_0 = 18$ .

Los valores utilizados para representar los distintos tipos de acero son:

Tabla # 6 - Parámetros ingresados para modelar los distintos tipos de acero.

Material	$\epsilon_y$ (cm/cm)	$f_y$ (kg/cm <sup>2</sup> )	b	R
Acero dulce	0.002	4200	0.0118	18
Cables de presfuerzo	0.0084	17640	0.03	18

Para el acero dulce se consideró  $b = 0.0118$  como recomendación de la plataforma Open Sees Py (University of California, Berkely, 2012). Para los cables se utilizó  $b = 0.03$  porque el autor de este trabajo observó que con  $b = 0.0118$ , la deformación unitaria última resultaba muy alta para llegar a la resistencia última del cable, por lo que se ajustó el valor de  $b$  para que al llegar al esfuerzo último, la deformación unitaria sea cercana a 0.03 cm/cm, el cual es un nivel de deformación congruente con las curvas de comportamiento de Ramberg-Oswood para cables de baja relajación (Collins & Mitchel, 1997, p. 89).

La magnitud del esfuerzo de fluencia ( $f_y$ ) del cable de presfuerzo de baja relajación se obtiene a través de  $f_y = 0.9 \cdot f_{pu}$  (Collins & Mitchel, 1997, p. 90), donde  $f_{pu}$  es la resistencia a tensión del cable, en este caso igual a 18900 kg/cm<sup>2</sup>. Sin embargo, la ley constitutiva utilizada considera como fluencia a la intersección entre rectas tangentes a la curva real, la cual no necesariamente coincide con la fluencia descrita anteriormente, por lo que se calibró el modelo para adaptar el inicio de la recta post-fluencia siguiendo el comportamiento dado por Ramberg-Oswood para cables de baja relajación (Collins & Mitchel, 1997, p. 89). Se llegó a  $f_y = 17640$  kg/cm<sup>2</sup> (muy cercano al 90% del  $f_{pu}$ ). Adicionalmente, se consideró el presfuerzo inicial del cable igual a  $f_{pi} = 0.7 \cdot f_{pu} = 13230$  kg/cm<sup>2</sup>.

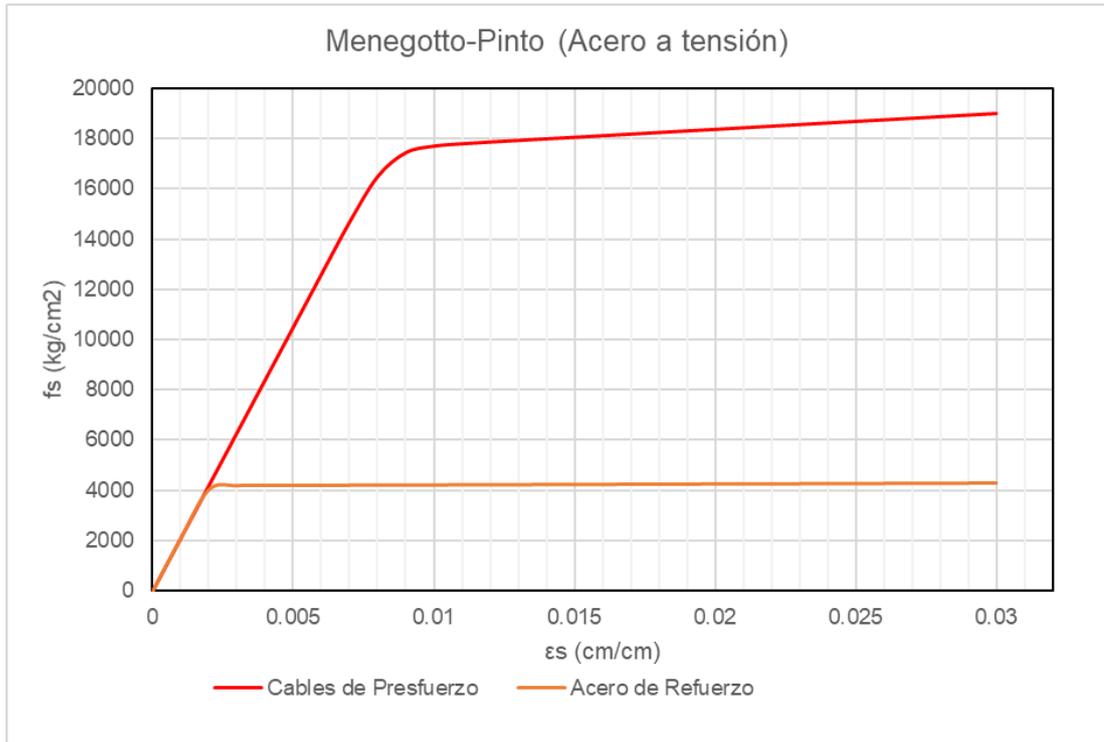


Fig. # 38 - Ley constitutiva de acero de refuerzo implementada en Open Sees Py y revisión de deformaciones unitarias.

#### 2.2.4 CARGAS

Para el análisis Pushover del muelle, se consideró que antes del primer desplazamiento lateral, el muelle debe estar sometido a cierto nivel de cargas gravitacionales con el fin de intentar representar un estado de esfuerzos inicial consistente con la existencia de la estructura y su ocupación. Estas cargas son las correspondientes a las cargas muertas, muertas súper impuestas y vivas.

El ASCE 61-14 (American Society of Civil Engineers; Coasts, Oceans, Ports and Rivers Institute, 2014, p. 6) indica que además de aplicar una carga sísmica a la estructura durante el análisis, se deberá aplicar una carga gravitacional equivalente a:

$$(1 \pm 0.5PGA)D + 0.1L$$

Donde:

- PGA es la aceleración máxima probable del terreno para un determinado nivel de evento sísmico (normalmente utilizado con el sismo de diseño).
- D es la carga muerta y muerta súper impuesta.
- L es la carga viva.

Se obtuvo de la memoria técnica de análisis y diseño estructural (Consultora, 2017, p. 7) que las cargas son las siguientes, indicando en paréntesis el tipo de carga:

*Tabla # 7 – Magnitud y tipo de cargas analizadas en muelle existente.  
Adaptado de Memoria Estructural de Muelle (2017, p. 7).*

<b>Tipo de carga</b>	<b>Magnitud de carga (kg/m<sup>2</sup>)</b>
Peso de vigas doble T (D)	
Peso de topping de 8 cm (D)	550
Peso de madera plástica (D)	
Ocupación del muelle (L)	2000
Carga lateral por Atraque	60 (Ton.)
Carga lateral por Amarre	30 (Ton.)

Considerando que:

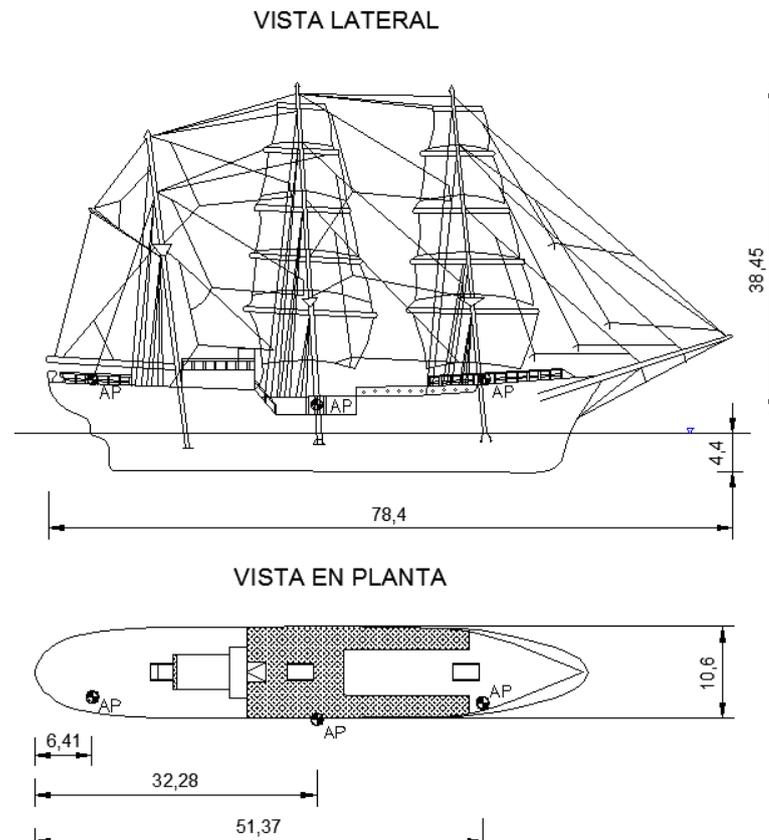
- El peso propio promedio de las vigas es en 12.24 kg/cm.
- El PGA en la ciudad de Guayaquil según la Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC-2015 es de 0.4g (Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda, 2014).
- El ancho de influencia de las vigas en el pórtico analizado es de 6.74 m.
- El atraque y amarre no constan dentro del análisis Pushover.

La carga por centímetro lineal a aplicar en las vigas es:

$$1.2 * \left( 550 * \frac{6.74}{100} + 12.24 \right) + 0.1 * \left( 2000 * \frac{6.74}{100} \right) = 72.65 \frac{kg}{cm} \approx 73 \frac{kg}{cm}$$

Adicionalmente se aplicó la carga por peso propio de los pilotes como cargas distribuidas a través de su longitud.

Cabe resaltar que la carga de atraque se obtuvo considerando que el buque a presentarse en servicio tiene las siguientes características:



SIMBOLOGÍA	
●	Puerta de acceso
▽	Nivel de agua
DIMENSIONES	
Eslora	78.40 m
Manga	10.60 m
Puntal	6.60 m
Calado	4.40 m
Cb	0.40
Desplazamiento	1199.40 Ton

Fig. # 39 – Características de buque a atracar en muelle estudiado.

### **2.2.5 FACTORES DE SOBRE-RESISTENCIA**

Las resistencias específicas de los materiales (tanto en tensión o compresión) no se deben modelar considerando valores mínimos para diseño (con factores de reducción de resistencia), sino reconociendo que es muy probable que su magnitud puede tener un incremento. Implementar un incremento a las resistencias específicas de los materiales es conveniente para fines de evaluación de una estructura, pues no se investiga que se cumplan criterios de resistencia de forma segura, sino una buena estimación del desempeño al que se puede llegar (Priestley, Seible, & Calvi, 1996). Por esto, normas como el ASCE 61-14 (American Society of Civil Engineers; Coasts, Oceans, Ports and Rivers Institute, 2014, p. 16) y el PIANC (International Navigation Association, 2001, p. 244) indican que para un análisis no-lineal, las propiedades mecánicas de los materiales deben ajustarse con factores de sobre-resistencia, convirtiendo las resistencias específicas en resistencias esperadas. Se ajustaron estas propiedades basándose en el PIANC como sigue:

$$f'_{ce} = 1.3f'_c$$

$$f_{ye} = 1.1f_y$$

$$f_{pue} = 1.0f_{pu}$$

Donde:

- $f'_c$  es la resistencia a compresión del hormigón a 28 días.
- $f'_{ce}$  es la resistencia a compresión esperada del hormigón.
- $f_y$  es el esfuerzo de fluencia del acero de refuerzo.
- $f_{ye}$  es el esfuerzo de fluencia esperado del acero de refuerzo.
- $f_{pu}$  es el esfuerzo último a tensión del cable de presfuerzo.
- $f_{pue}$  es el esfuerzo último esperado a tensión del cable de presfuerzo.

Las resistencias esperadas de los materiales resultaron como sigue:

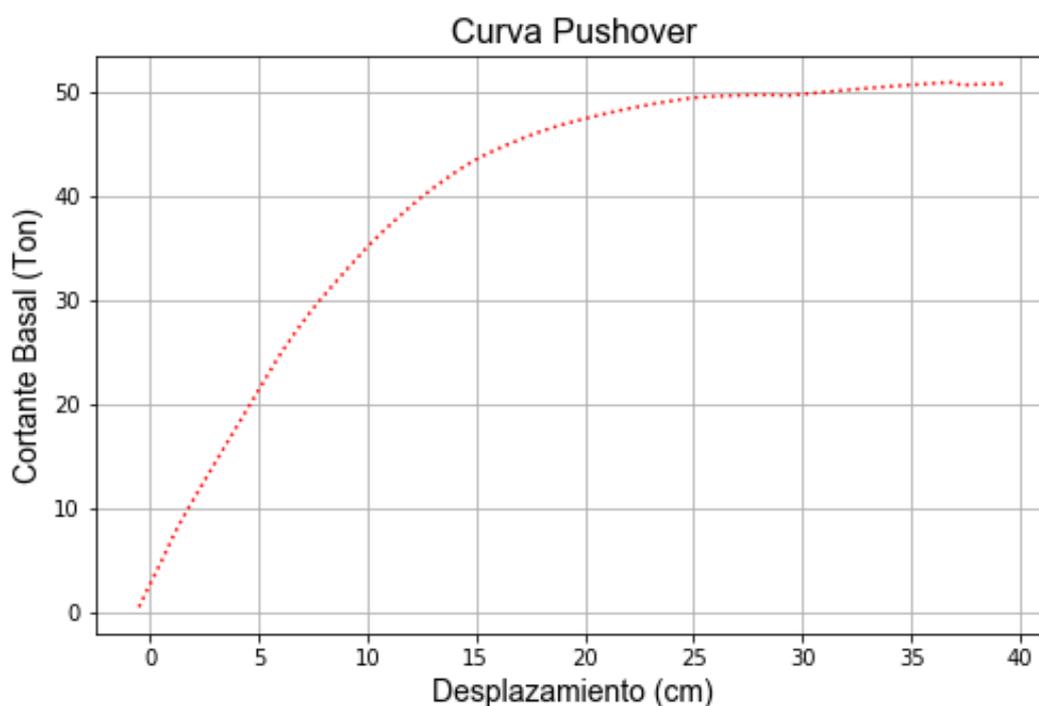
*Tabla # 8 – Resistencias esperadas en los materiales del modelo estructural.*

<b>Material</b>	<b>Resistencia Específica (kg/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Factor de Sobre-Resistencia</b>	<b>Resistencia Esperada (kg/cm<sup>2</sup>)</b>
<b>Hormigón en vigas f'c</b>	280	1.3	364
<b>Hormigón no confinado en pilotes f'c</b>	420	1.3	546
<b>Hormigón confinado en pilotes f'c</b>	540	1.3	702
<b>Acero de refuerzo fy</b>	4200	1.1	4620
<b>Cables de presfuerzo fpu</b>	18900	1.0	18900

Estas variaciones en los materiales se dan por distintas razones. El hormigón puede alcanzar una resistencia a compresión mayor debido a que el  $f'c$  aumenta con el tiempo, o por aleatoriedad durante su elaboración. El  $f_y$  puede llegar a ser mayor que lo especificado debido a la aleatoriedad en su fabricación. El cable de presfuerzo, por tener un proceso de fabricación más controlado, recibe un factor de sobre-resistencia igual a la unidad, aunque puede recibir factores ligeramente mayores. Cabe recalcar que, a pesar de ser incrementos de resistencia, estos valores son considerados como aumentos mínimos, y su incremento puede llegar a ser mucho mayor dependiendo de cada caso. Se recomienda que para tener menos incertidumbre con respecto a qué factor de sobre-resistencia utilizar, se realicen ensayos a los materiales para el caso del hormigón o se revisen las especificaciones de fábrica en el caso del acero (Priestley, Seible, & Calvi, 1996, p. 546).

## 2.3 DETERMINACIÓN DE CURVA DE CAPACIDAD

En el modelo estructural del muelle ensamblado en el interpretador Spyder con lenguaje Python (descrito en sección 2.2), se ingresaron comandos de Open Sees Py (University of California, Berkely, 2012) para aplicar cargas gravitacionales en los elementos y cargas laterales monotónicas en los nudos de la plataforma, que progresivamente van aumentando en magnitud hasta que se alcanza un desplazamiento determinado por el usuario. Se registran las reacciones horizontales en los nudos de apoyo para sumarlas y obtener el cortante basal correspondiente a cada desplazamiento medido. Para esto, el análisis se programa bajo Control en Desplazamientos (Zhu, 2020, p. 202).



*Fig. # 40 – Curva de Capacidad (Pushover) obtenida para muelle convencional.*

Para cada desplazamiento impuesto, se refleja la respuesta lineal o no-lineal de la estructura y sus elementos (dependiendo del nivel de desplazamientos), lo que va produciendo una respuesta estructural de cortante basal vs desplazamientos que es muy útil para la evaluación del desempeño sísmico. En el caso del muelle aislado, los desplazamientos registrados son los de la plataforma aislada. Los desplazamientos se midieron hasta llegar a una distorsión relativa de 3% aproximadamente. Sin embargo, este límite de

medición se ajustaba si se requería más información para la evaluación del desempeño.

### 2.3.1 COMPORTAMIENTO NO-LINEAL

#### 2.3.1.1 Comportamiento No-Lineal del Pilote

Para identificar las deformaciones unitarias más importantes a desarrollarse dentro de una sección de fibras y en qué orden se espera que se presenten, se elaboró un diagrama Momento – Curvatura de la sección del pilote para varias magnitudes de carga axial (los pilotes inclinados trabajarán principalmente resistiendo cargas axiales, lo cual afectará su diagrama Momento – Curvatura). El diagrama mostrará el agrietamiento de la sección considerando el presfuerzo aplicado y los puntos de fluencia y plastificación total.

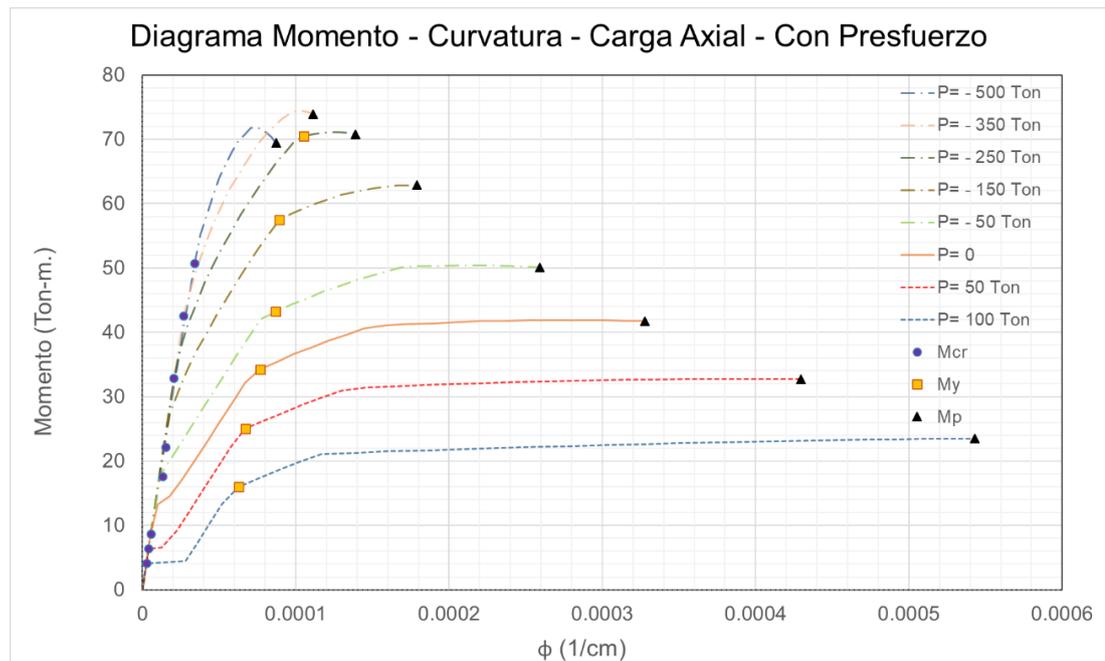


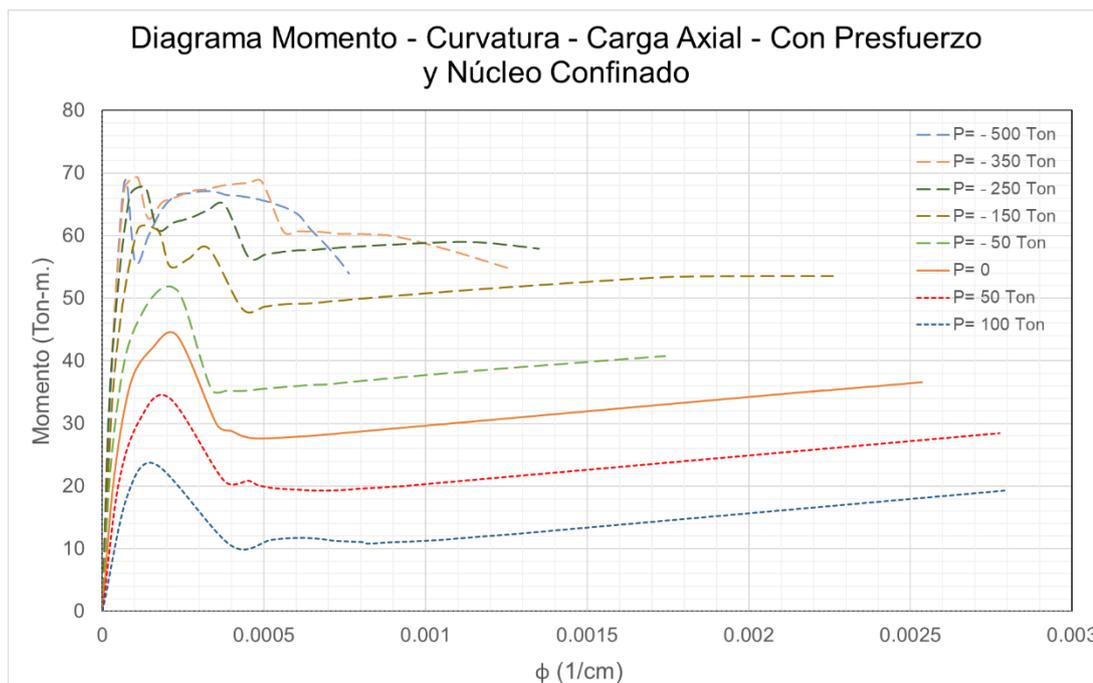
Fig. # 41 - Diagrama Momento – Curvatura de pilote presfuerzoado de muelle para distintas cargas axiales.

Se observa de la Fig. #41 que para cargas axiales menores a -250 Ton, la sección presenta una falla dúctil, donde primero se produce la fluencia en el acero (acero dulce y cables de presfuerzo al mismo tiempo -  $M_y$ ) y luego la

falla a compresión en la fibra extrema de hormigón, alcanzando el momento plástico ( $M_p$ ). El agrietamiento de la sección ( $M_{cr}$ ) se produce en momentos relativamente menores para cargas axiales nulas y de tensión. Para cargas axiales mayores a -250 Ton, la sección presenta una falla frágil, produciendo primero la falla a compresión de la fibra extrema de hormigón y alcanzando el  $M_p$  antes de que se produzca fluencia en el acero. El  $M_{cr}$  se produce en momentos mayores cuando las cargas axiales son de compresión.

Observando este comportamiento en la sección, se deduce que la rótula plástica se origina cuando se alcanza el  $M_y$ , y se desarrolla completamente cuando se alcanza  $M_p$ , para la mayoría de estados de carga axial. Por lo tanto, para interpretar el comportamiento de los pilotes dentro del muelle, se buscarán los desplazamientos en los que se produzca fluencia en las varillas y cables de acero para ubicar cuando se originan las rótulas plásticas en los pilotes, y también se buscarán los desplazamientos en los que se presente la falla a compresión de la fibra extrema de hormigón, considerando este estado como la rótula plástica totalmente desarrollada.

Analizando el comportamiento en curvaturas mayores (Ver Fig. #42), el núcleo confinado de hormigón participa en un rol importante dado que el recubrimiento se desprende cuando desarrolla deformaciones unitarias mayores a 0.003 – 0.004 cm/cm. Se puede interpretar que no hay incrementos significativos de resistencia a momento, pero sí es capaz de desarrollar gran ductilidad bajo cargas axiales de compresión altas (300 – 500 Ton) y aún mayores para cargas axiales de tensión o nulas. Sin embargo, el núcleo se aprovecha más eficientemente cuando hay cargas axiales de compresión altas, debido a que el área de hormigón a compresión también es alta. Cuando las cargas axiales a compresión son menores o de tensión, el área de hormigón a compresión se reduce a unos cuantos centímetros, desaprovechando el resto de área confinada.



*Fig. # 42 – Diagrama Momento – Curvatura de pilote presforzado de muelle para distintas cargas axiales considerando la influencia del núcleo confinado.*

La no-linealidad expuesta se investigará en las secciones transversales críticas de los elementos sometidos a cargas laterales, las cuales corresponden a las secciones en los extremos de los pilotes. Una se ubica cerca de la cabeza del pilote, y otra cerca del empotramiento efectivo (Ver sección 1.8), pudiéndose desarrollar rótulas plásticas a través de una longitud de 50 cm en cada extremo (Ver secciones 2.2.1).

### **2.3.1.2 Comportamiento No-Lineal del Muelle**

Se evaluó si se cumple con el requerimiento de desempeño de viga fuerte - columna débil, y se revisó bajo qué desplazamientos los elementos incursionan en el rango no-lineal. Esto se realizó insertando “grabadores” con comandos “recorder” de OpenSeesPy (Zhu, 2020, p. 214) en las fibras de las secciones transversales, de tal forma que se muestre cuando un material entra en fluencia ( $\epsilon = 0.0021$  como círculos amarillos en las varillas y  $\epsilon = 0.0084$  como cruces grises en los cables) o falla ( $\epsilon = 0.0036$  como círculos morados en el hormigón a compresión).

A continuación, se muestra la curva de capacidad del muelle, exponiendo cuando las rótulas plásticas en distintas secciones transversales críticas de los pilotes inician su desarrollo y su consecuente plastificación total.

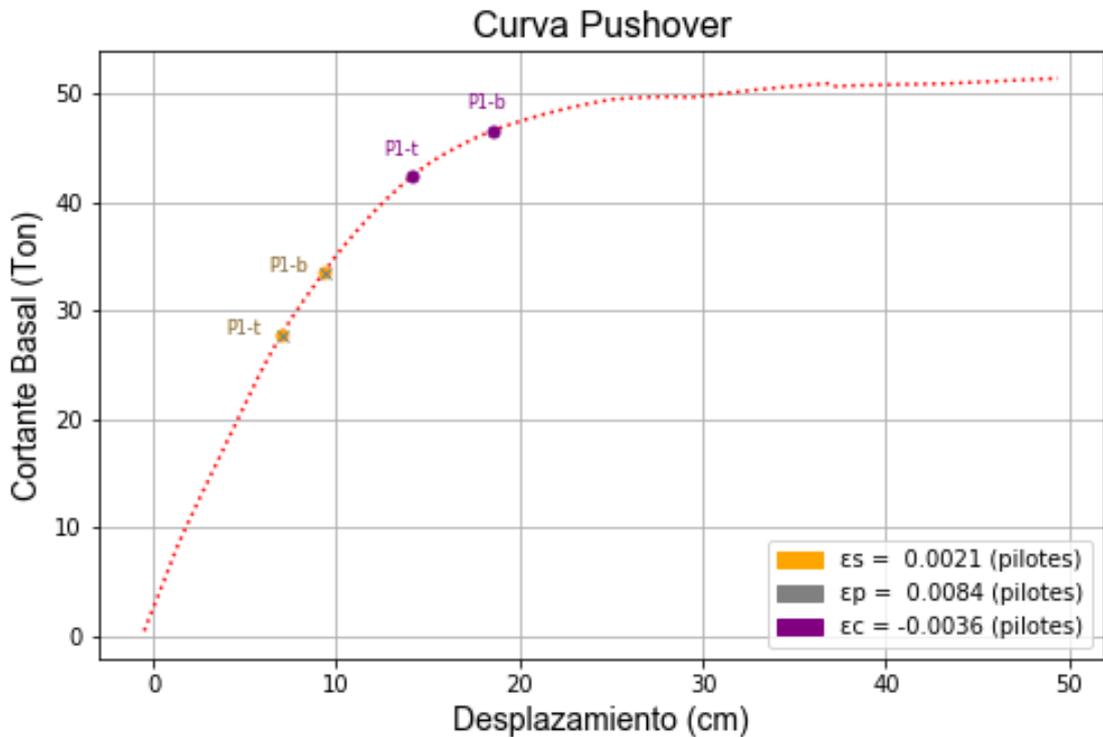


Fig. # 43 – Fluencia en acero (varillas y cables) y falla a compresión de fibra extrema de hormigón en pilote 1, sección superior (t) e inferior (b).

Se puede observar en la Fig. #43 que con respecto al pilote 1 (P1 – Ver sección 2.2 – Descripción del Modelo Estructural), la rótula plástica se origina en la sección superior (t) bajo un desplazamiento  $\Delta = 7.01$  cm, donde se produce fluencia en las varillas de acero y cables de presfuerzo al mismo tiempo (lo cual también sucede en el resto de pilotes). Luego los mismos materiales dentro de la sección inferior (b) inician su incursión en el rango inelástico a  $\Delta = 9.31$  cm. La rótula en la sección superior se desarrolla totalmente bajo  $\Delta = 14.11$  cm, a lo que la fibra extrema a compresión de hormigón llega a  $-0.0036$  cm/cm de deformación unitaria. Lo mismo sucede con la sección inferior bajo  $\Delta = 18.61$  cm.

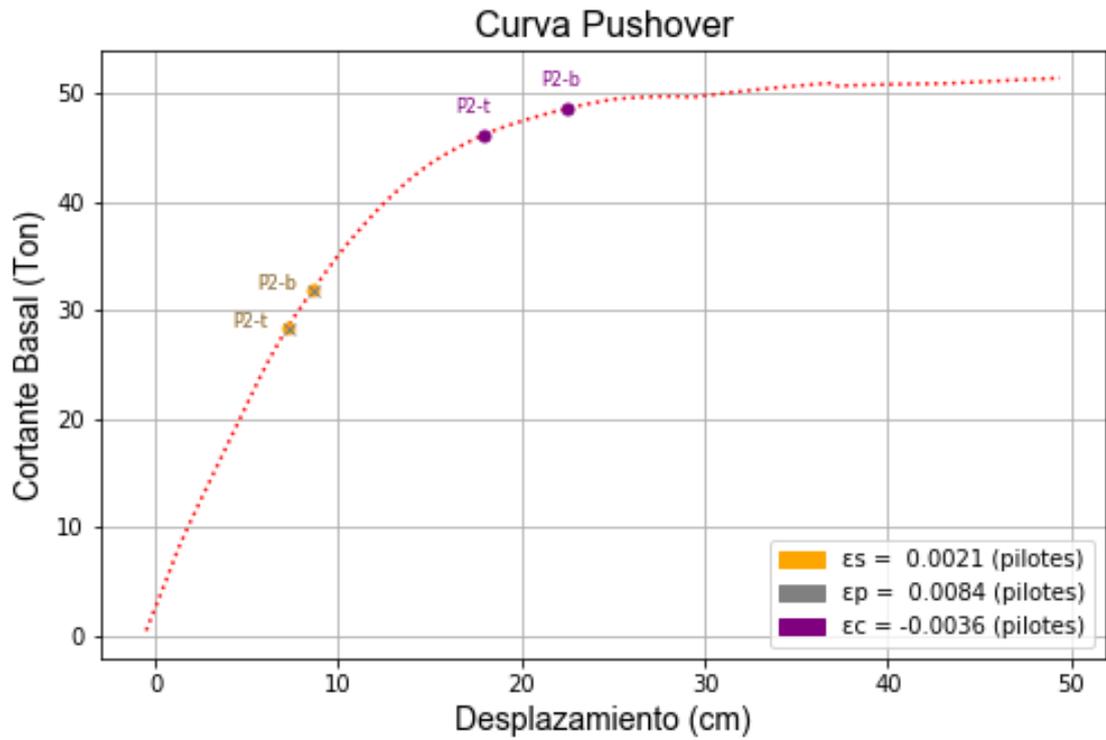


Fig. # 44 - Fluencia en acero (varillas y cables) y falla a compresión de fibra extrema de hormigón en pilote 2, sección superior (t) e inferior (b).

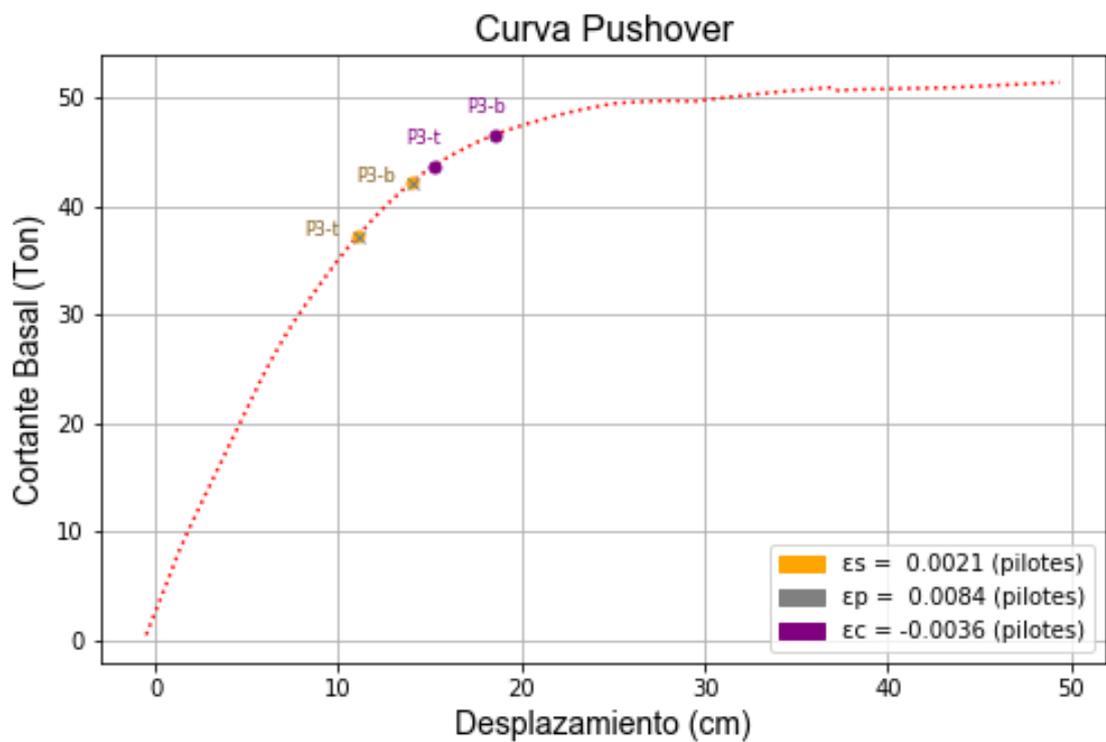


Fig. # 45 - Fluencia en acero (varillas y cables) y falla a compresión de fibra extrema de hormigón en pilote 3, sección superior (t) e inferior (b).

En la Fig. #44 en cambio, se observa que el pilote 2 (P2) tiene su primera fluencia en la sección superior (t) a  $\Delta = 7.21$  cm y luego otra en la sección inferior (b) a  $\Delta = 8.61$  cm. La rótula superior se desarrolla totalmente a  $\Delta = 17.91$  cm y la inferior a  $\Delta = 22.51$  cm.

De la Fig. #45 se observa que en el pilote 3 (P3), la rótula en la sección superior (t) se origina a  $\Delta = 11.11$  cm y en la sección inferior (b) a  $\Delta = 14.01$  cm. La rótula plástica totalmente desarrollada en la sección superior se presenta a  $\Delta = 15.21$  cm y en la sección inferior a  $\Delta = 18.51$  cm. Este es el último pilote en iniciar su incursión en el rango inelástico.

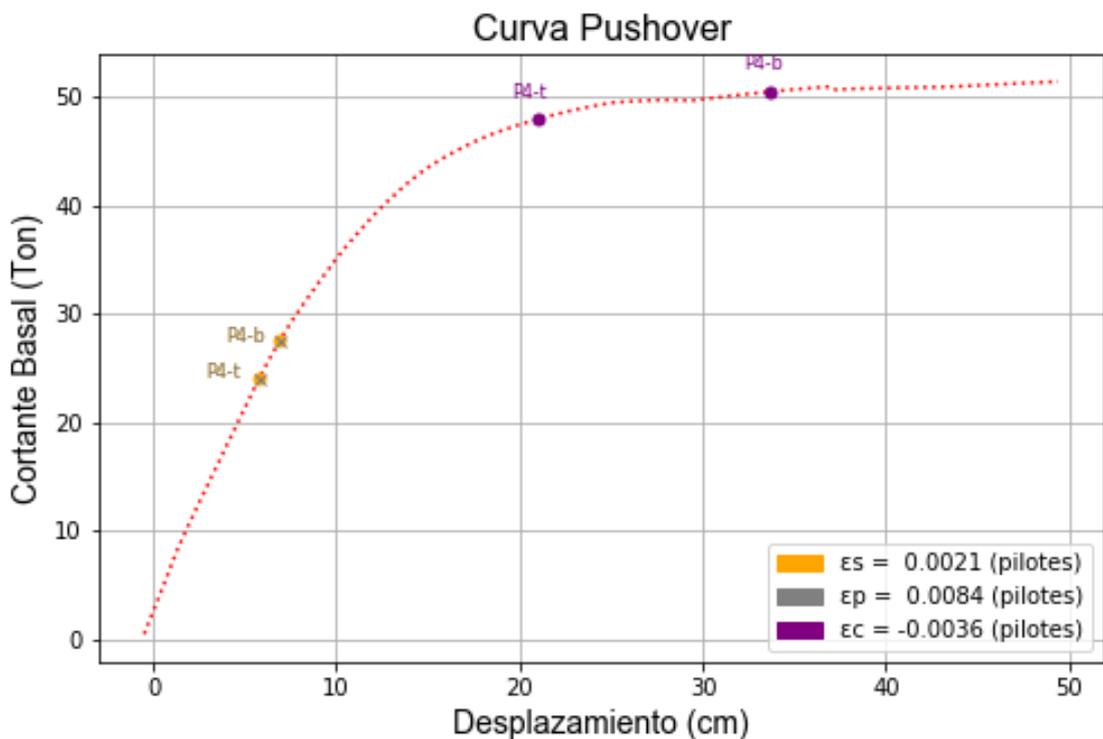


Fig. # 46 - Fluencia en acero (varillas y cables) y falla a compresión de fibra extrema de hormigón en pilote 4, sección superior (t) e inferior (b).

En la Fig. #46 se observan los puntos importantes del pilote 4 (P4). Su primera fluencia se da en  $\Delta = 5.81$  cm en la sección superior (t) y a  $\Delta = 6.91$  cm en la sección inferior (b). La rótula totalmente desarrollada se presenta a  $\Delta = 21.01$  cm en la sección superior y a  $\Delta = 33.71$  cm en la sección inferior. Nótese que este es el primer pilote en entrar en fluencia, por lo tanto, es el que produce la primera fluencia de la estructura. Esto porque la orientación del pilote hace

que trabaje principalmente a tensión, razón por la cual también el desarrollo completo de sus rótulas plásticas requiere de mayor desplazamiento que el resto de pilotes.

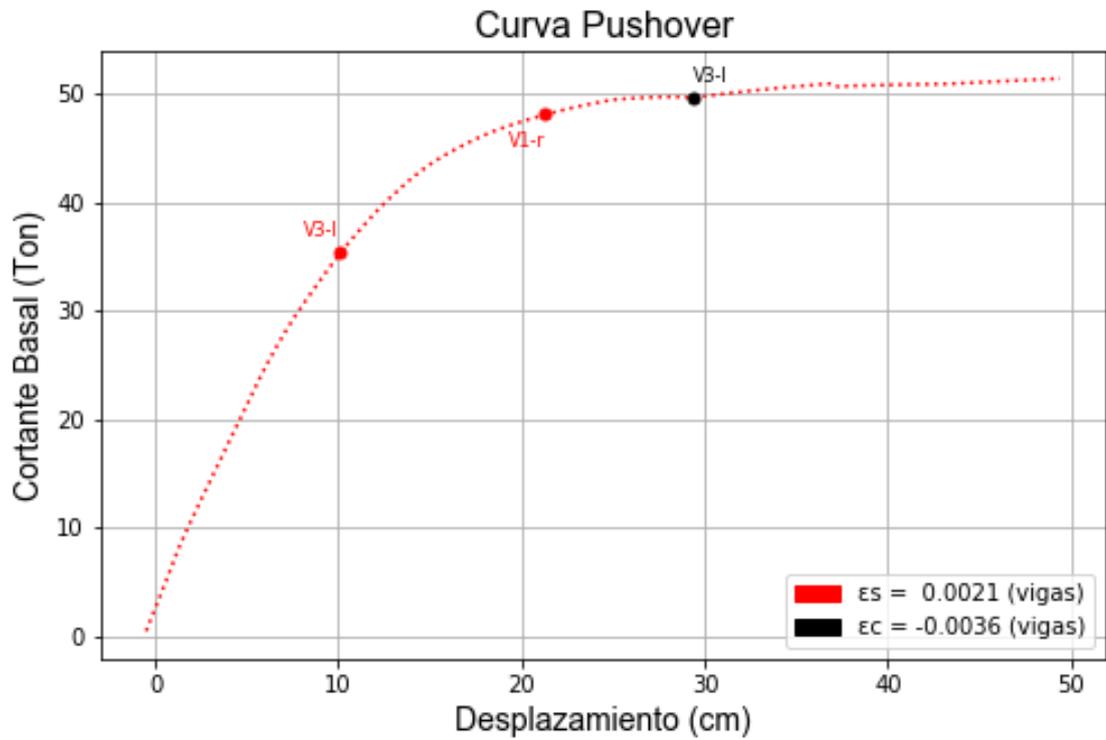


Fig. # 47 - Fluencia en acero y falla a compresión de fibra extrema de hormigón en vigas, sección izquierda (l) y derecha (r).

Finalmente, en las vigas de la plataforma se identificaron 2 secciones (1 sección de 2 elementos) que alcanzan a producir rótulas plásticas, según la Fig. #47. Estas son la viga 1 (V1) y viga 3 (V3). La V3 tiene su primera fluencia en la sección izquierda (l) a  $\Delta = 10.11$  cm, y la V1 en su sección derecha (r) a  $\Delta = 21.31$  cm. La sección izquierda (l) de la V3 desarrolla totalmente su rótula plástica a  $\Delta = 29.41$  cm. El resto de secciones de vigas permanecen elásticas durante todo el análisis. La causa del desarrollo de rótulas en las vigas se explica por una interacción de esfuerzos causada por la carga lateral sumados a los esfuerzos causados por la rotación de la plataforma, también llamado levantamiento o "uplift" (American Society of Civil Engineers; Coasts, Oceans, Ports and Rivers Institute, 2014, p. 42) a lo que los pilotes inclinados resisten la carga lateral, y lo cual se puede verificar obteniendo los desplazamientos

verticales de los nudos extremos de la V1 cuando se produce la primera fluencia ( $\Delta_{lateral} = 21.31 \text{ cm}$ ):

- Desplazamiento en extremo izquierdo: +3.51 cm.
- Desplazamiento en extremo derecho: +1.13 cm.

Con esto se obtiene un desplazamiento relativo en la viga de 2.38 cm. Siendo la longitud de la viga 3.30 m:

$$Distorsión = \frac{330}{2.38} \approx 139 \frac{cm}{cm}$$

Según Viviescas (2010, p. 54), una distorsión entre 120 y 175 puede implicar la aparición de fisuras largas y visibles, lo cual es congruente con el estado de primera fluencia en la viga.

Adicionalmente, hay pilotes que resisten las cargas laterales por compresión, lo que implica que sus momentos de fluencia serán mayores y por lo tanto compromete el mecanismo viga fuerte-columna débil (Ver Fig. #41 – Momento – curvatura).

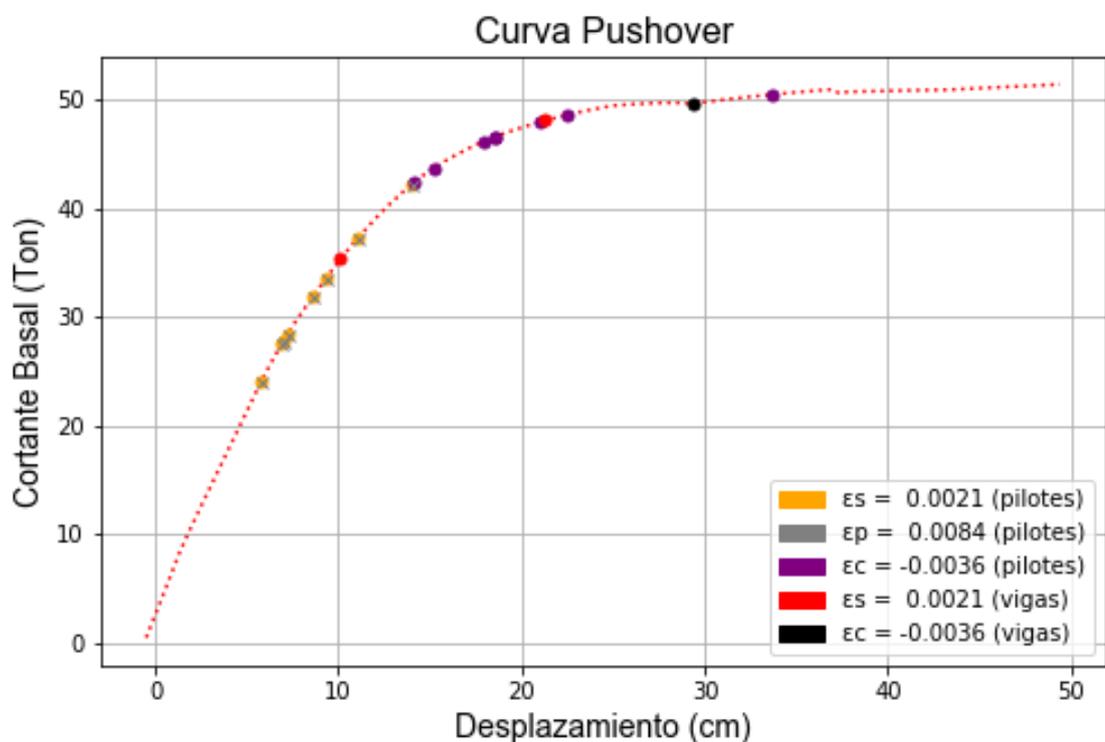


Fig. # 48 - Comportamiento no-lineal de los elementos del muelle.

El comportamiento descrito implica un mecanismo viga fuerte-columna débil no muy eficiente, pues las vigas V1 y V3 producen rótulas plásticas durante el desarrollo de las rótulas de los pilotes. Sin embargo, se puede interpretar que la mayoría de la disipación de energía es producida por los pilotes.

De las Fig. #48 se puede verificar la presencia y calidad del mecanismo viga fuerte – columna débil, así como bajo qué desplazamiento o cortante basal los pilotes y vigas inician su incursión en el rango inelástico, y en qué desplazamiento estarían presentes rótulas plásticas más desarrolladas.

## **2.4 CRITERIOS DE ACEPTACIÓN DE DESEMPEÑO**

El desempeño esperado del muelle seleccionado debe regirse según lineamientos dispuestos en las normativas correspondientes o los seleccionados por el dueño del proyecto. En este caso se seleccionó como referencia los niveles de desempeño provistos por el PIANC (International Navigation Association, 2001, p. 24), los cuales son:

- Nivel 1: Servicio: nivel de desempeño en el que se esperan daños menores o que no haya daño en la estructura, a satisfacer luego de un evento sísmico que es probable que ocurra durante la vida útil de la estructura, normalmente de un periodo de retorno (Tr) de 75 años.
- Nivel 2: Control de Daño: nivel de desempeño en el que se espera daño controlado y reparable a corto plazo, en función de una respuesta inelástica limitada en la estructura, a satisfacer luego de un evento sísmico muy poco frecuente o raro, que corresponde a un fuerte movimiento del terreno, normalmente de un periodo de retorno (Tr) de 475 años.

### 2.4.1 LÍMITES DE DEFORMACIONES UNITARIAS

Cada nivel de desempeño tiene como consigna que las deformaciones unitarias en distintas zonas de los pilotes de un muelle no superen límites determinados. Los límites de deformaciones unitarias en los pilotes del muelle para el nivel de desempeño 1 – Servicio son:

*Tabla # 9 - Límites de deformaciones unitarias en pilotes - Nivel de Desempeño 1. Adaptado del PIANC (International Navigation Association, 2001, p. 235).*

<b>Nudo de pilote</b>	<b>Material</b>	<b>Límite</b>
<b>Nudo superior e inferior</b>	Hormigón	-0.004
	Acero de refuerzo	0.010
	Cables de presfuerzo	0.0113

Los límites de deformaciones unitarias en los pilotes del muelle para el nivel de desempeño 2 – Control de Daño son:

*Tabla # 10 – Límites de deformaciones unitarias en pilotes – Nivel de Desempeño 2. Adaptado del PIANC (International Navigation Association, 2001, p. 236).*

<b>Nudo de pilote</b>	<b>Material</b>	<b>Límite</b>
<b>Nudo superior</b>	Hormigón	-0.025
	Acero de refuerzo	0.050
	Cables de presfuerzo	0.040
<b>Nudo inferior</b>	Hormigón	-0.008
	Acero de refuerzo	0.010
	Cables de presfuerzo	0.015

Adicionalmente, se requiere un mecanismo Viga Fuerte – Columna Débil en cualquier nivel de desempeño, donde los pilotes disipen energía por deformación inelástica y las vigas de la plataforma se mantengan elásticas.

## **2.4.2 LÍMITES DE DESEMPEÑO**

Según los criterios de aceptación de desempeño, se definirán desplazamientos que la estructura no puede superar para cumplir con el objetivo requerido en dicho nivel de desempeño. Estos desplazamientos límite se obtendrán a través de un registro de las deformaciones unitarias en los materiales de las secciones de fibras de los pilotes (Ver sección 2.2.2). Cuando la deformación unitaria de una fibra en cualquier sección alcance el valor estipulado en el criterio de aceptación, se revisará cuál es el desplazamiento (medido en la plataforma) con el que se producirá esta deformación unitaria, y dicho desplazamiento será el desplazamiento límite. Siendo así que, para cualquier desplazamiento mayor, se producirán deformaciones unitarias superiores al límite en la fibra evaluada, por lo que no cumpliría con el criterio de aceptación de desempeño.

Debido a que cada material tiene su límite de deformación unitaria, se revisaron todos los materiales en las secciones críticas de los pilotes y se definió como desplazamiento límite al mínimo desplazamiento que cause que la deformación unitaria en un material sea igual al límite estipulado por el respectivo nivel de desempeño.

### **2.4.2.1 Límite de Servicio**

Se muestran los puntos dentro de la curva de capacidad del muelle (Ver Fig. #49) donde se producen deformaciones unitarias iguales a los respectivos límites en el hormigón no confinado o recubrimiento (**morado**), núcleo de hormigón confinado (**rojo**), acero dulce (**amarillo**) y cables de presfuerzo (**cruces grises**) del pilote 1 (P1) tanto en la sección crítica superior (t) e inferior (b), correspondientes al nivel de desempeño de Servicio ( $T_r = 75$  años).

Se observa que el desplazamiento mínimo donde se alcanza el límite estipulado en el elemento es  $\Delta = 12,21$  cm, donde los cables de presfuerzo de la sección superior (t) controlan el criterio de aceptación. Adicionalmente, se observa que los cables también controlan en la sección inferior. Le siguen el hormigón no confinado y luego el acero dulce, siendo el núcleo confinado el menos crítico de los materiales en las dos secciones revisadas. Cabe recalcar que el núcleo confinado nunca va a gobernar bajo el criterio de Servicio debido a que se revisa principalmente el desprendimiento del recubrimiento del pilote. Sin embargo, su revisión permite observar cuando el recubrimiento ya no aporta en la sección.

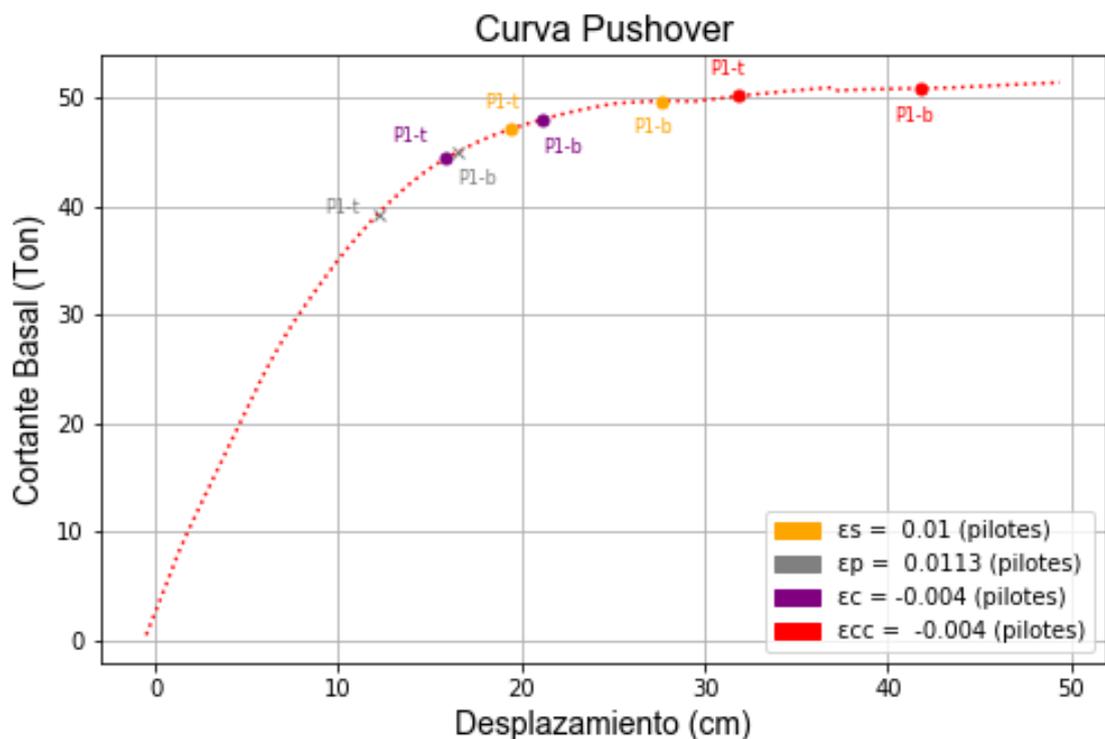


Fig. # 49 – Puntos en curva de capacidad donde se producen deformaciones unitarias iguales a las límite en los materiales de P1.

Luego, en el pilote 2 (P2 – Ver Fig. #50), gobiernan los cables de presfuerzo de la sección superior (t) con un desplazamiento de  $\Delta = 12,31$  cm. Adicionalmente, los cables también son críticos en la sección inferior y le siguen el acero dulce y el recubrimiento de hormigón en ese orden para ambas secciones.

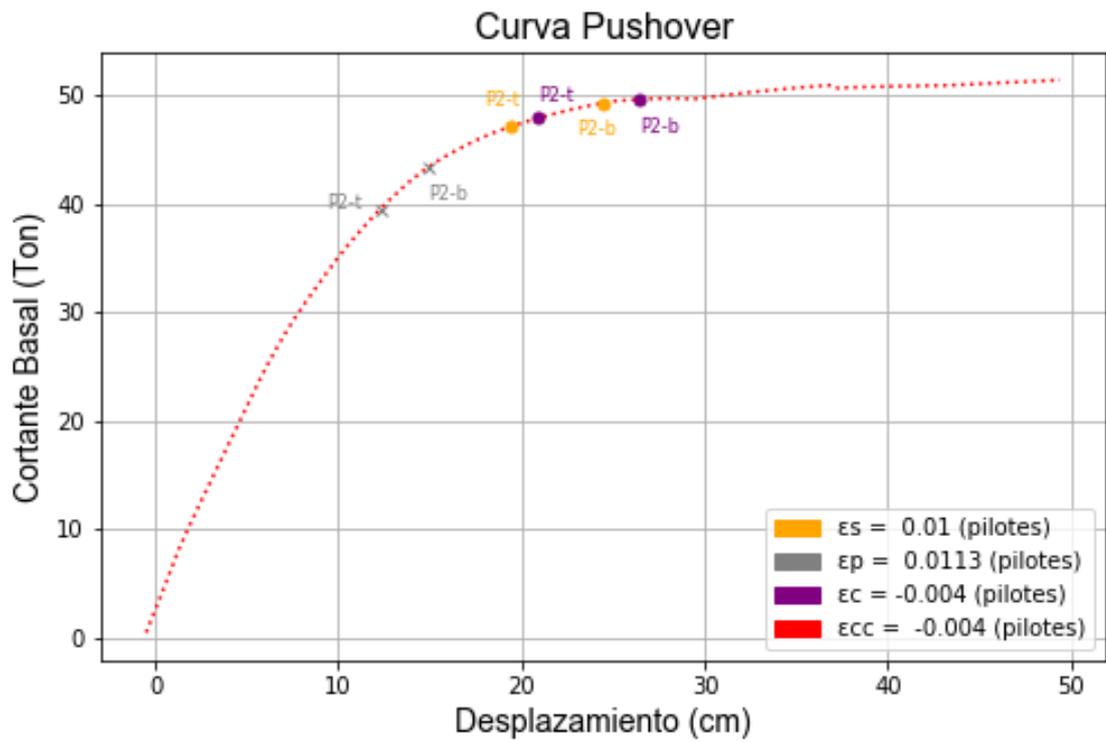


Fig. # 50 – Puntos en curva de capacidad donde se producen deformaciones unitarias iguales a las límite en los materiales de P2.

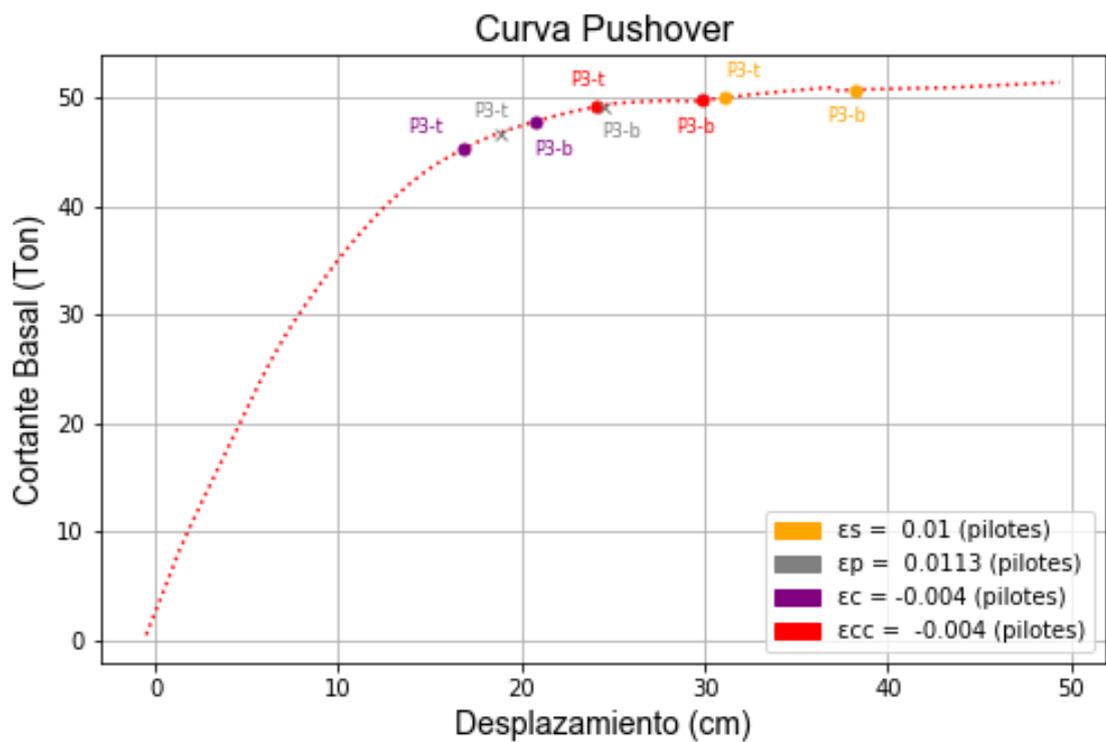
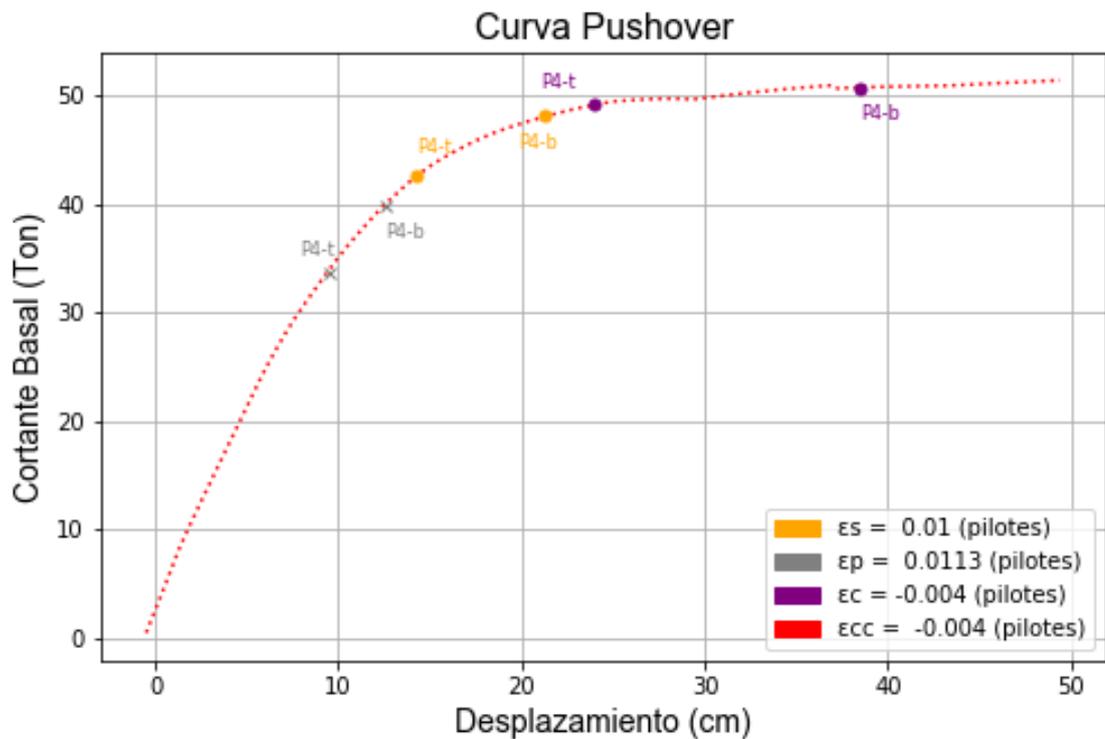


Fig. # 51 – Puntos en curva de capacidad donde se producen deformaciones unitarias iguales a las límite en los materiales de P3.

En el pilote 3 (P3 – Ver Fig. #51) gobierna el hormigón de recubrimiento en la sección superior (t) para  $\Delta = 16,81$  cm. Así mismo este material gobierna en la sección inferior (b). Secundariamente, son críticos los cables de presfuerzo, el núcleo confinado y el acero dulce en ese orden. Como el núcleo confinado no es significativo, el orden correcto sería recubrimiento de hormigón, cables de presfuerzo y acero dulce.

En este caso, el hormigón controla el desempeño en Servicio debido a que el pilote trabaja principalmente a compresión, lo cual se da porque el pilote 4 (P4 - inclinado), que trabaja a tensión, impone un desplazamiento vertical hacia abajo sobre el P3, que por estar orientado verticalmente responde con esfuerzos axiales de compresión.



*Fig. # 52 - Puntos en curva de capacidad donde se producen deformaciones unitarias iguales a las límite en los materiales de P4.*

El pilote 4 (P4 – Ver Fig. #52) trabaja principalmente a tensión, por lo cual su desempeño lo controlan los cables de presfuerzo en la sección superior (t) a  $\Delta = 9,41$  cm. Luego son críticos el acero dulce y el recubrimiento de hormigón, en ese orden. La misma tendencia se da en la sección inferior (b).

Comparando los desplazamientos límite de cada elemento (Ver Tabla #11), se concluye que el desplazamiento que gobierna el desempeño a nivel de Servicio en la estructura es  $\Delta = 9,41$  cm, correspondiente a los cables de presfuerzo en la sección superior (t) del P4.

Tabla # 11 – Comparación entre límites de servicio de cada pilote.

Elemento	Desplazamiento (cm)	Material que controla	Sección que controla
P1	12,21	Cables de presfuerzo	Superior
P2	12,31	Cables de presfuerzo	Superior
P3	16,81	Recubrimiento de hormigón	Superior
P4	9,41	Cables de presfuerzo	Superior

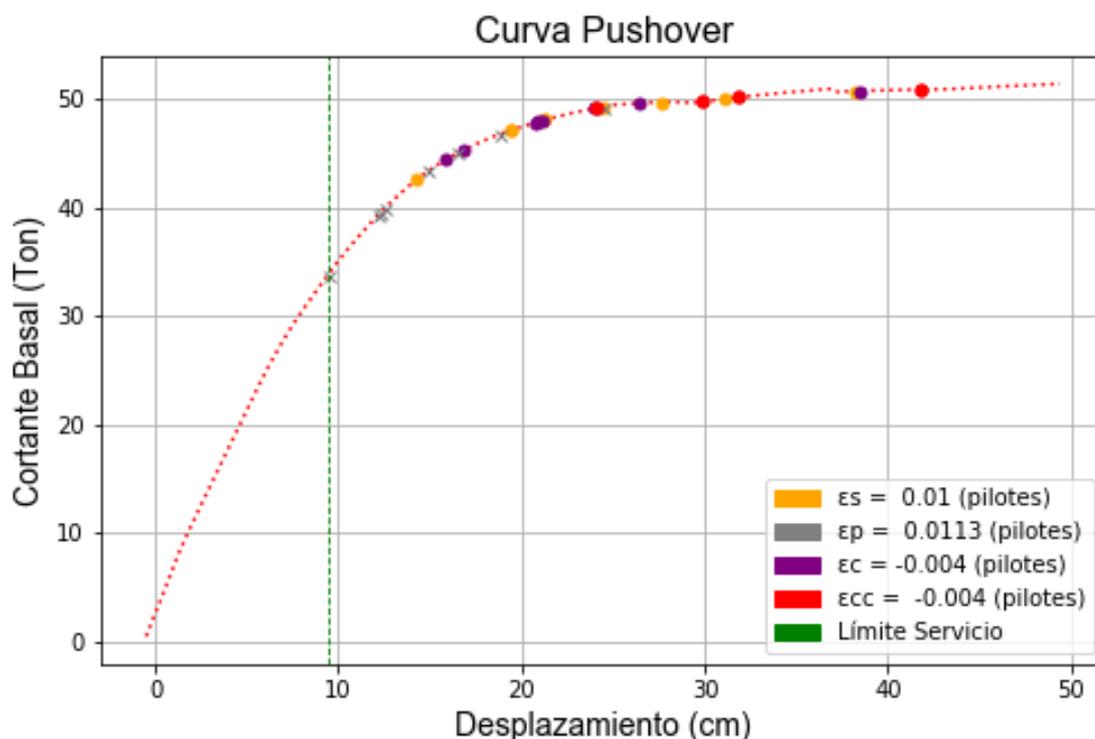


Fig. # 53 - Desplazamiento límite de desempeño a nivel de Servicio para muelle convencional, comparando con todos los pilotes.  $\Delta = 9,41$  cm.

### 2.4.2.2 Límite de Control de Daño

Para el nivel de desempeño de control de daño, hay que tener en cuenta que la sección superior (t) tiene distintos requerimientos que la sección inferior (b) en un pilote. Por lo tanto, se utilizó la misma simbología que en los límites de servicio para la sección inferior [hormigón no confinado o recubrimiento (**morado**), núcleo de hormigón confinado (**rojo**), acero dulce (**amarillo**) y cables de presfuerzo (**cruces grises**)], mientras que para la sección superior: núcleo de hormigón confinado (**negro**), acero dulce (**café**) y cables de presfuerzo (**cruces verdes**).

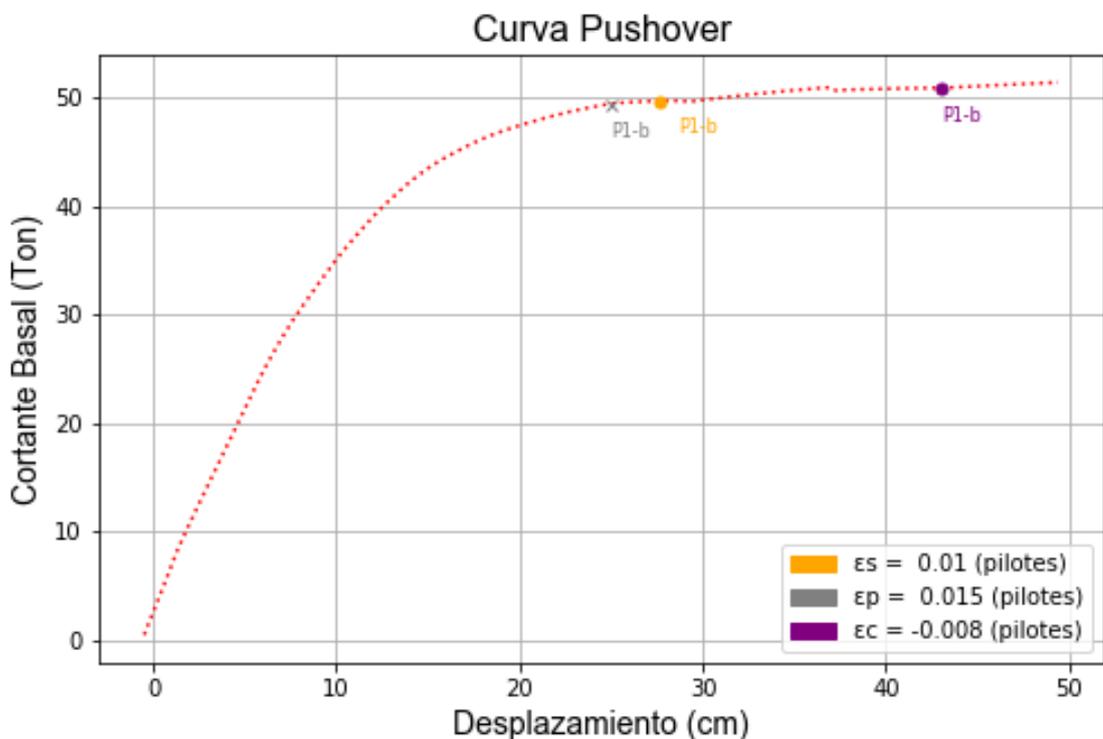


Fig. # 54 - Puntos en curva de capacidad donde se producen deformaciones unitarias iguales a las límite en los materiales de P1.

En la Fig. #54 se observa que en el pilote 1 (P1) controlan los cables de presfuerzo en la sección inferior (b) a  $\Delta = 25,01$  cm, sobre el acero dulce y el recubrimiento en ese orden. La sección superior no gobierna en la limitación de desplazamientos debido a que no se presentan deformaciones unitarias

iguales al límite aun cuando el desplazamiento es de 50 cm (máximo medido en análisis debido a que se alcanzan derivas del 3,60%).

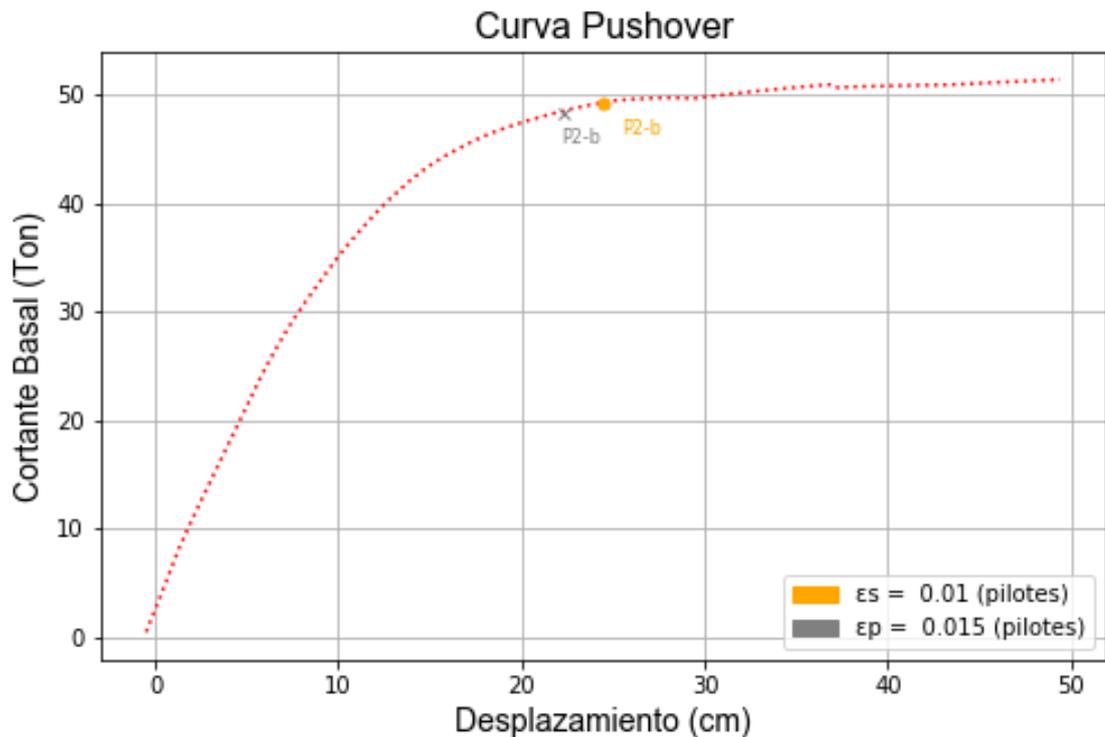
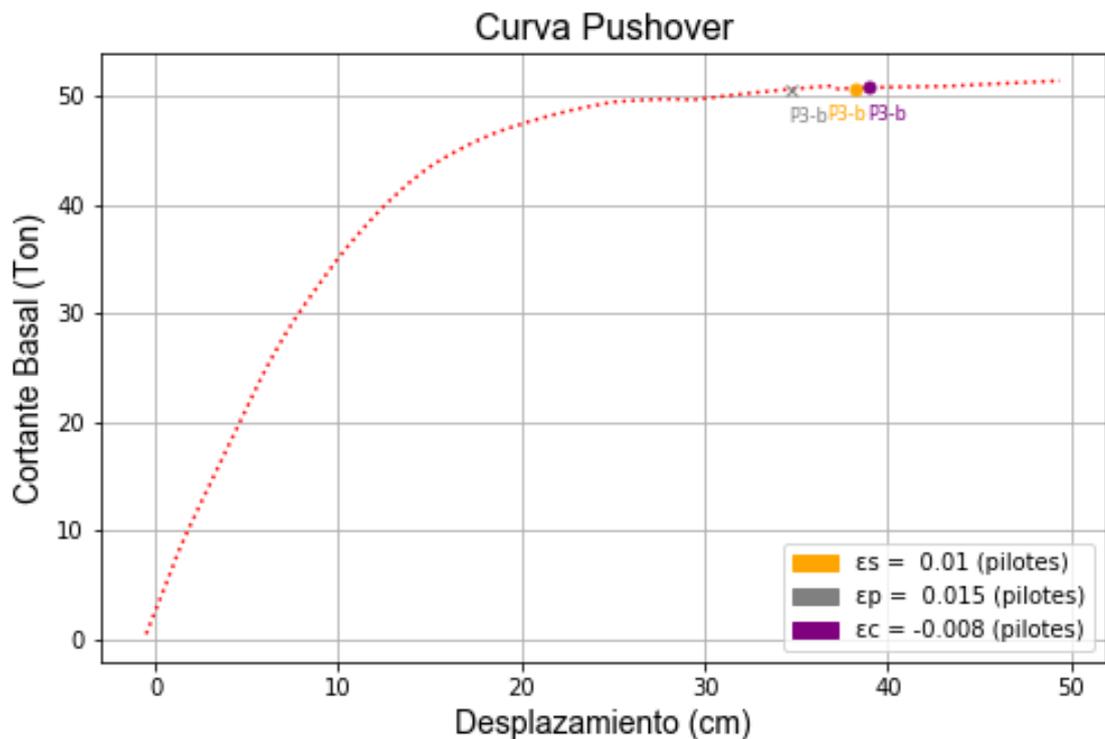


Fig. # 55 - Puntos en curva de capacidad donde se producen deformaciones unitarias iguales a las límite en los materiales de P2.

El pilote 2 (P2 – Ver Fig. #55) registra dos puntos críticos en la sección inferior (b), los cuales son el cable de presfuerzo y el acero dulce, gobernando el cable de presfuerzo con  $\Delta = 22,21$  cm. El resto de materiales no registraron deformaciones unitarias superiores a sus respectivos límites hasta el desplazamiento, por lo que no se observan en la gráfica. Se considera que el P2 no trabaja mucho a este nivel de desplazamientos, tanto por ser vertical y porque otros elementos definen la flexibilidad del sistema, tales como el pilote a tensión (P4) y la viga 1 (V1), los cuales ya a este punto tienen un grado considerable de plastificación. También hay que considerar que este pilote es el que más carga axial a compresión soporta, por lo que será más complicado que fluyan el acero dulce y los cables de presfuerzo. Sin embargo, el pilote al ser prácticamente vertical, produciría momentos similares en las dos

secciones críticas, y como los límites son más exigentes para la sección inferior, esta controla.



*Fig. # 56 - Puntos en curva de capacidad donde se producen deformaciones unitarias iguales a las límite en los materiales de P3.*

Se observa en la Fig. #56 que el pilote 3 (P3) en su sección inferior (b) se alcanza primero el límite de desempeño en los cables, a  $\Delta = 34,61$  cm. Nuevamente los límites en la sección superior (t) no se encuentran hasta el desplazamiento medido, en este caso porque el pilote al ser vertical producirá momentos similares tanto en la sección superior e inferior, y como los límites son más restrictivos en la sección superior, la sección inferior controla. Debido a que este elemento debe soportar la compresión impuesta por el pilote 4 (P4 a tensión), se alcanzan los límites a desplazamientos mayores que en el caso de los otros pilotes.

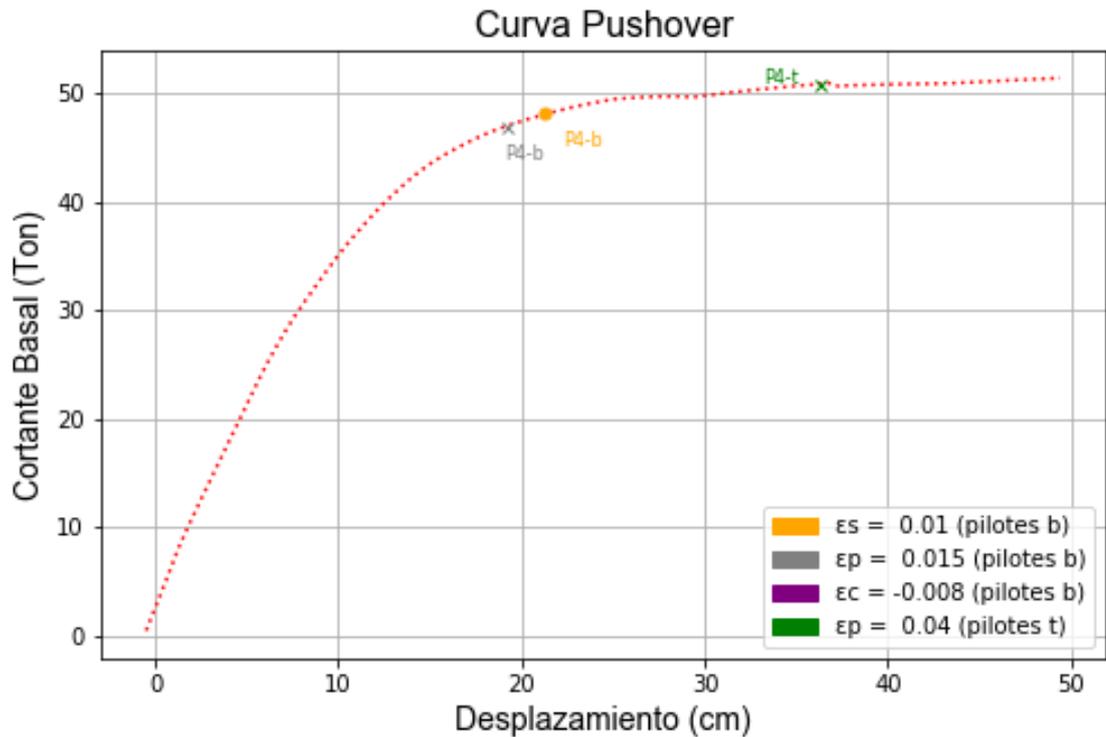


Fig. # 57 - Puntos en curva de capacidad donde se producen deformaciones unitarias iguales a las límite en los materiales de P4.

En el pilote 4 (P4 – Ver Fig. #57) se observa que en la sección inferior (b) controlan los cables de presfuerzo a  $\Delta = 19,11$  cm. Luego es crítico el acero dulce, y no se registró que el hormigón supere su respectivo límite hasta el desplazamiento medido. Nótese que ahora si se registra un punto crítico en la sección superior (t), que corresponde a los cables de presfuerzo (límite de deformación unitaria = 0,04). Esto sucede porque el P4 trabaja principalmente a tensión, lo cual facilita que se generen esfuerzos de tensión en los cables, además del pretensado, y que la sección superior soporta menos carga muerta que la sección inferior. El resto de materiales no registraron puntos límites de desempeño hasta el desplazamiento medido.

Tabla # 12 – Comparación entre límites de control de daño de cada pilote.

Elemento	Desplazamiento (cm)	Material que controla	Sección que controla
P1	25,01	Cables de presfuerzo	Inferior
P2	22,21	Cables de presfuerzo	Inferior
P3	34,61	Cables de presfuerzo	Inferior
P4	19,11	Cables de presfuerzo	Inferior

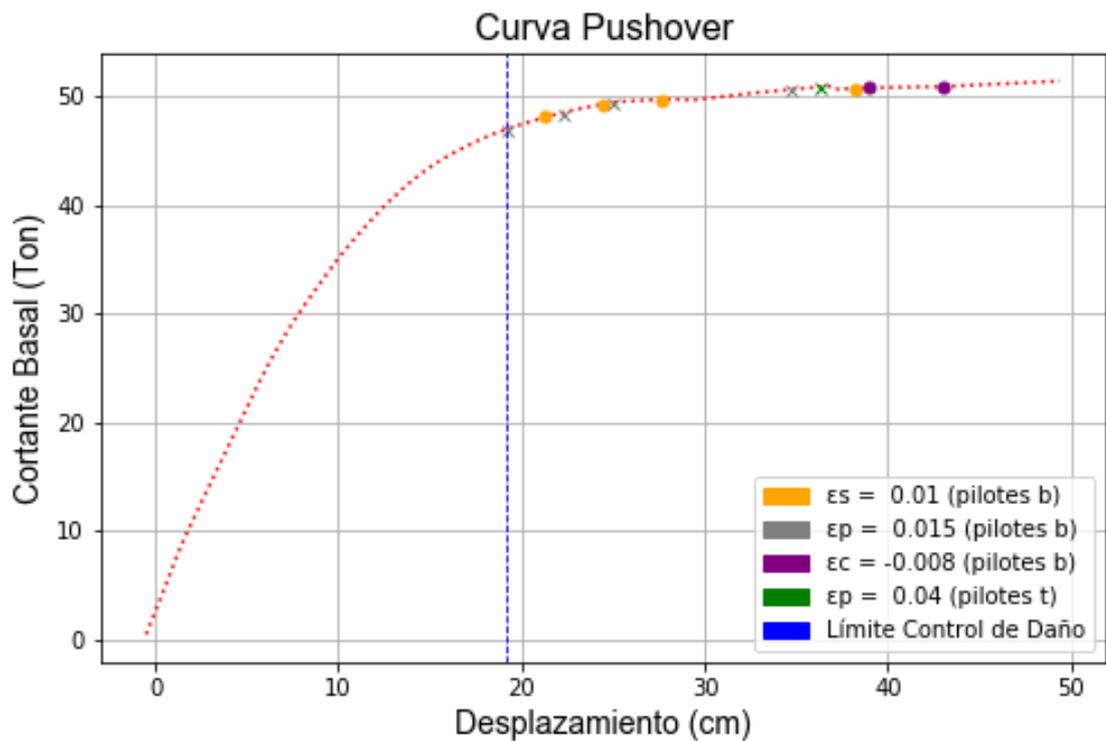


Fig. # 58 - Desplazamiento límite de desempeño a nivel de Control de Daño para muelle convencional.  $\Delta = 19,11$  cm.

Con estos resultados, se definieron los límites de desplazamiento de desempeño con los cuales se satisfacen los requisitos correspondientes a cada nivel de desempeño evaluado, los cuales se pueden observar en la Fig. #59.

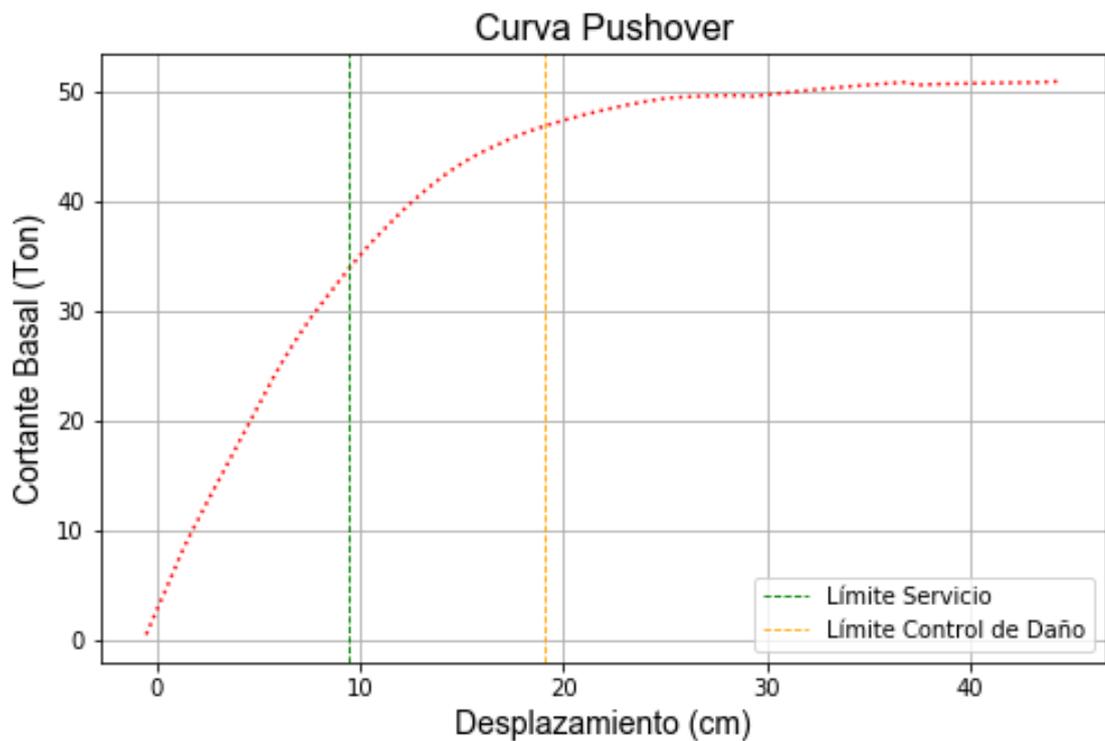


Fig. # 59 – Límites de desplazamientos para distintos niveles de desempeño en curva Pushover, 9,41 cm para Servicio y 19,11 cm para Control de Daño.

## 2.5 DETERMINACIÓN DE AMENAZA SÍSMICA

Los criterios de aceptación se evalúan bajo niveles determinados de amenaza sísmica, los cuales se relacionan con la ubicación de la estructura, las características del suelo, entre otros factores. Para el caso de estudio, se utilizarán las herramientas dispuestas en la NEC-15 en conjunto con unas extrapolaciones, con el objetivo de determinar la demanda de aceleraciones que le corresponde a cada nivel de desempeño.

El PIANC indica que los niveles de desempeño a satisfacer en muelles con pilotes son los siguientes (Ver Sección 2.4 – Criterios de Aceptación de Desempeño):

- Nivel 1: Servicio – Tr = 75 años
- Nivel 2: Control de Daño – Tr = 475 años

Adicionalmente, se evaluará un nivel de sismo Extremo de Tr = 2500 años, con el fin de que la revisión del comportamiento de la estructura tenga un mayor alcance pudiendo verificarse el desempeño para una amenaza sísmica mayor.

La NEC-15 indica que los niveles de amenaza sísmica correspondientes a determinados periodos de retorno son los mostrados en la Tabla #13. Se concluyó que el nivel de Servicio del PIANC corresponde al nivel de amenaza 1 de la NEC-15 (**verde**), mientras que el nivel de Control de Daño del PIANC corresponde al nivel de amenaza 3 de la NEC-15 (**amarillo**). Finalmente, el sismo extremo corresponde al nivel de amenaza 4 de la Nec-15 (**rojo**).

*Tabla # 13 – Selección de Niveles de amenaza sísmica para evaluación de desempeño. Adaptado de la NEC-15 (2015, p. 41).*

Nivel de sismo	Sismo	Probabilidad de excedencia en 50 años	Periodo de retorno Tr (años)	Tasa anual de excedencia (1/Tr)
1	Frecuente (menor)	50%	72	0.01389
2	Ocasional (moderado)	20%	225	0.00444
3	Raro (severo)	10%	475	0.00211
4	Muy raro (extremo)	2%	2500	0.00040

Adicionalmente, se obtuvo de la memoria de cálculo del muelle, datos del espectro de diseño utilizado y de los parámetros correspondientes a la amenaza sísmica en la ciudad de Guayaquil:

- Tipo de suelo = E.
- Factor dependiente del suelo  $r = 1.5$ .
- PGA Guayaquil = 0.4 (Sismo de diseño).
- Relación entre  $S_a(T = 0.1 \text{ s})$  y PGA,  $\eta = 1.8$  (Sismo de diseño).
- Coeficientes de perfil de suelo:
  - $F_a = 1.0$
  - $F_d = 1.6$
  - $F_s = 1.9$

De las curvas de peligro sísmico de la NEC-15 para la ciudad de Guayaquil, se puede obtener la PGA, y la  $S_a$  correspondiente a 0.1 segundos hasta 1 segundo.

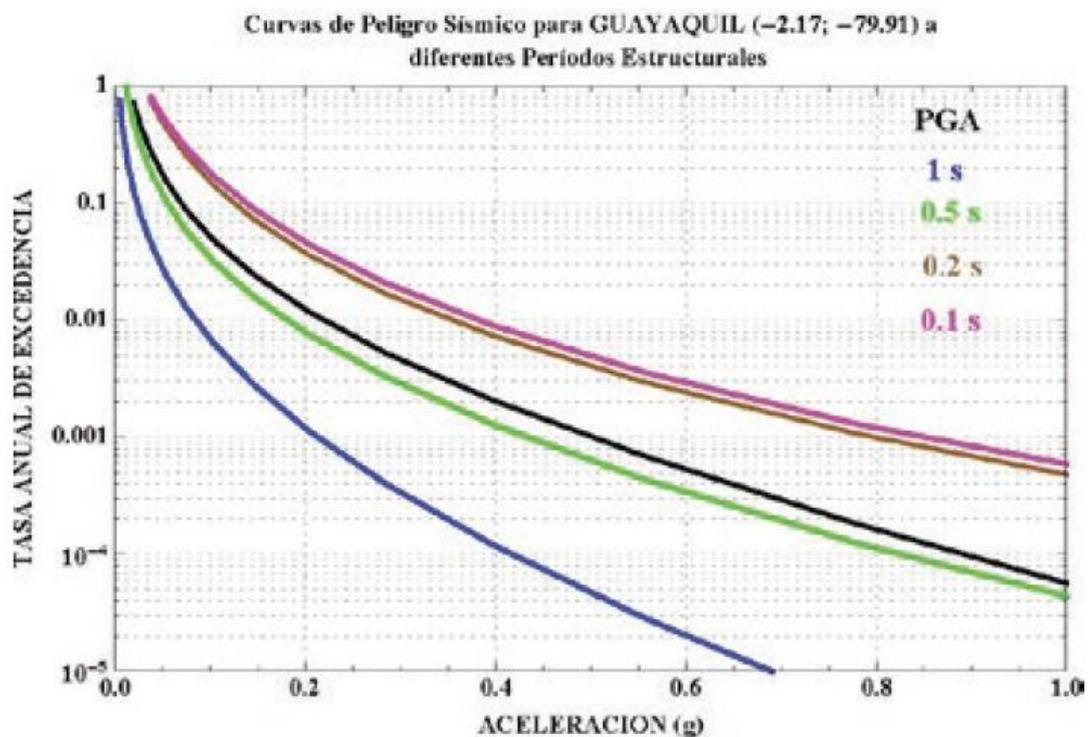


Fig. # 60 – Curvas de peligro sísmico para la ciudad de Guayaquil, para períodos de 0.1, 0.2, 0.5, 1 segundo y PGA. Tomado de NEC-15 (2014, p. 117).

Como no es posible encontrar valores de  $S_a$  para periodos mayores a 1 segundo con las herramientas dadas (los cuales son importantes para estructuras con aisladores sísmicos), se utilizará la metodología para armar espectros elásticos de aceleraciones de diseño de la NEC-15 en función del PGA, los coeficientes de perfil de suelo y modificando como corresponda el valor de  $\eta$  (Relación entre  $S_a$  correspondiente a un periodo de 0.1 segundos, sobre PGA).

Los correspondientes parámetros para el nivel de amenaza 3 (Sismo de Diseño – Control de Daño) son los mismos que los estipulados para diseño en la NEC-15, por lo que se obtuvieron de tablas y mapas de zonificación sísmica dados por la norma.

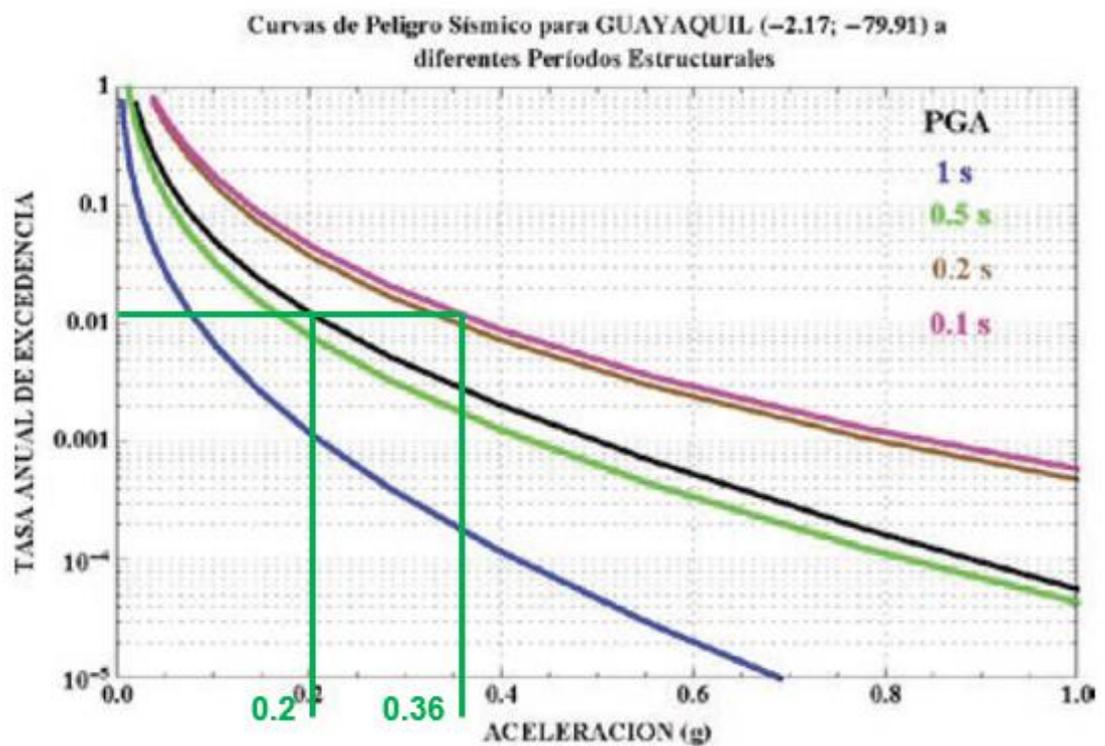


Fig. # 61 - Obtención de  $S_a(0.1s)$  y PGA para tasa anual de excedencia para nivel de amenaza 1 (Servicio). Adaptado de NEC-15 (2014, p. 117).

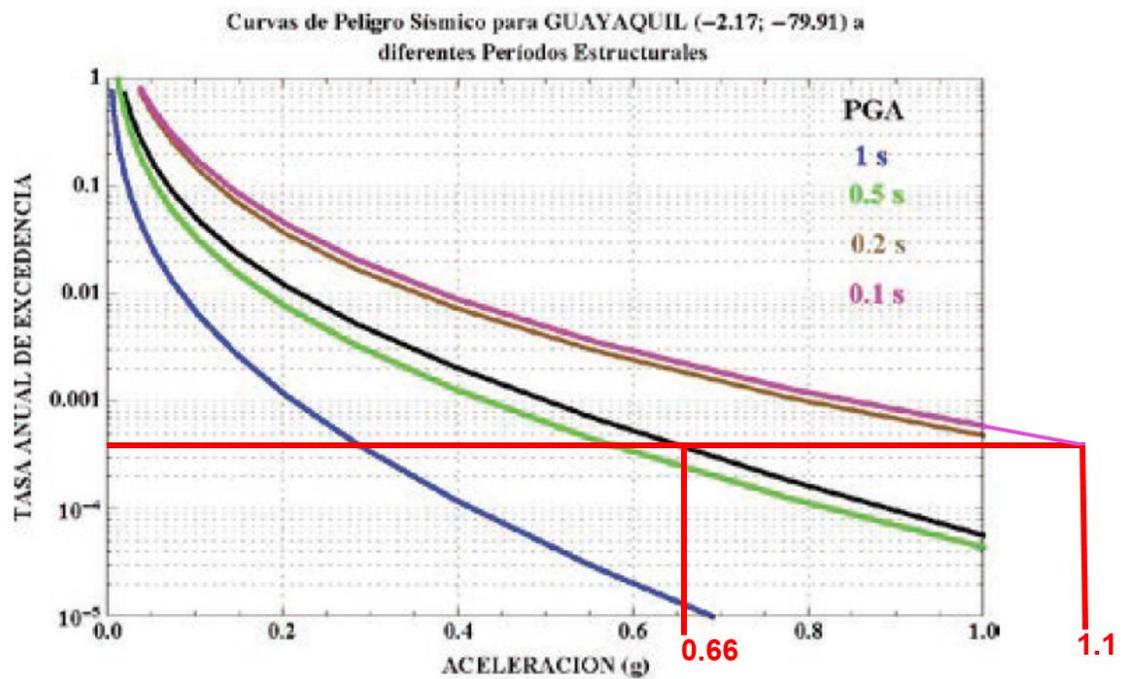


Fig. # 62 - Obtención de  $S_a(0.1s)$  y PGA para tasa anual de excedencia para nivel de amenaza 4 (Extremo). Adaptado de NEC-15 (2014, p. 117).

Tabla # 14 – Parámetros obtenidos para determinación de demanda de aceleraciones para distintos niveles de amenaza sísmica.

Nivel de Amenaza/ Nivel de Desempeño	Tr (años)	PGA	$S_a(0.1s)$	$\eta$
Servicio	72	0,2	0,36	1,85
Control de Daño	475	0,4*	0,72*	1,8
Extremo	2500	0,66	1,1	1,67

\*Nota: Valor no obtenido de curva de peligro sísmico porque NEC-15 provee un valor de PGA y  $\eta$  para este nivel.

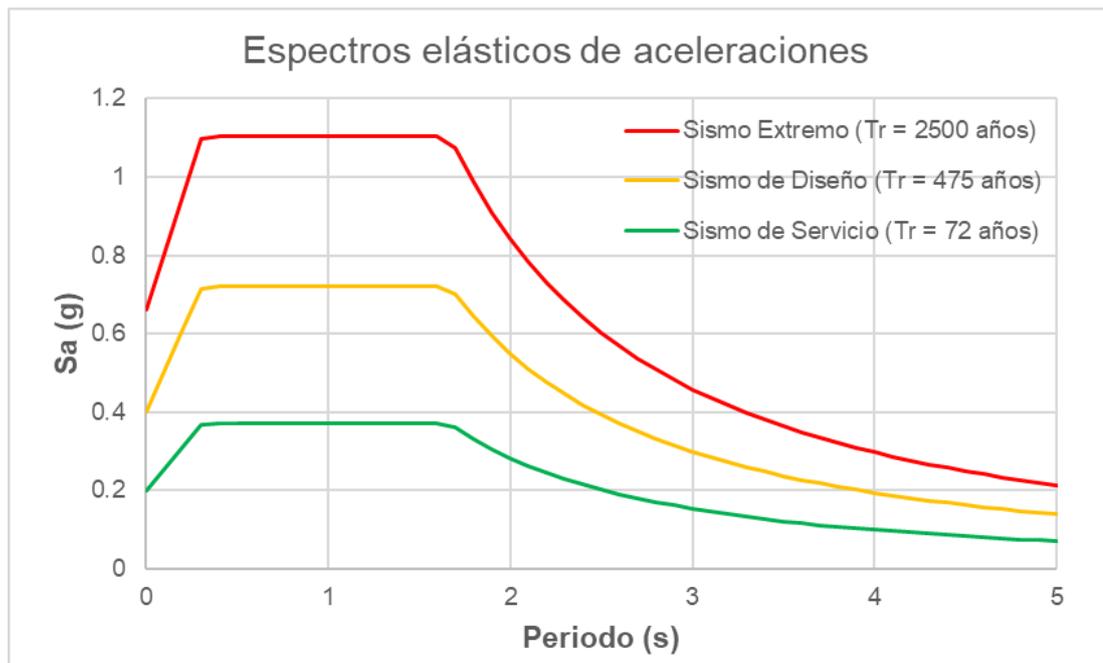


Fig. # 63 - Elaboración de espectros elásticos de aceleraciones para los niveles de amenaza sísmica a evaluar.

## 2.6 DESEMPEÑO DE LA ESTRUCTURA

Para determinar si una estructura satisface el desempeño esperado para una demanda específica, se calcula el denominado “punto de desempeño” mediante métodos estáticos no-lineales especificados en las siguientes normas:

- ASCE 41-13: Método de los Coeficientes por Modificación de Desplazamientos.
- FEMA 440: Método del Espectro de Capacidad por Linearización Equivalente – Método A: Iteración Directa.
- FEMA 440: Método del Espectro de Capacidad por Linearización Equivalente – Método B: Intersección con MADRS.

- FEMA 440: Método del Espectro de Capacidad por Linearización Equivalente – Método C: Lugar geométrico con varios MADRS.

Ver Sección 1.11 – Marco Teórico.

### **2.6.1 PUNTOS DE DESEMPEÑO**

Para estimar los puntos de desempeño de la estructura (definidos como la máxima respuesta de fuerza-desplazamiento a producirse durante un evento sísmico), se utilizarán los métodos descritos anteriormente con los siguientes datos obtenidos del modelo estructural:

- Coeficiente de masa modal  $\alpha_1 = 1$ .
- Factor de participación  $PF = 0,02643$ .
- Amplitud del primer modo de vibración en la plataforma  $\Phi_1 = 37,84$ .
- Periodo elástico  $T_0 = 0,97$  s.

Aplicando los métodos de análisis considerados en este estudio, señalados anteriormente, se obtuvieron los puntos de desempeño del muelle para el sismo de Servicio, Diseño y Máximo.

#### **2.6.1.1 ASCE 41-13: Método de los Coeficientes**

El punto de desempeño se encuentra en el último punto de la idealización bilineal (graficada en líneas negras), generada con el principio de igualdad de energía entre la misma y la curva de capacidad.

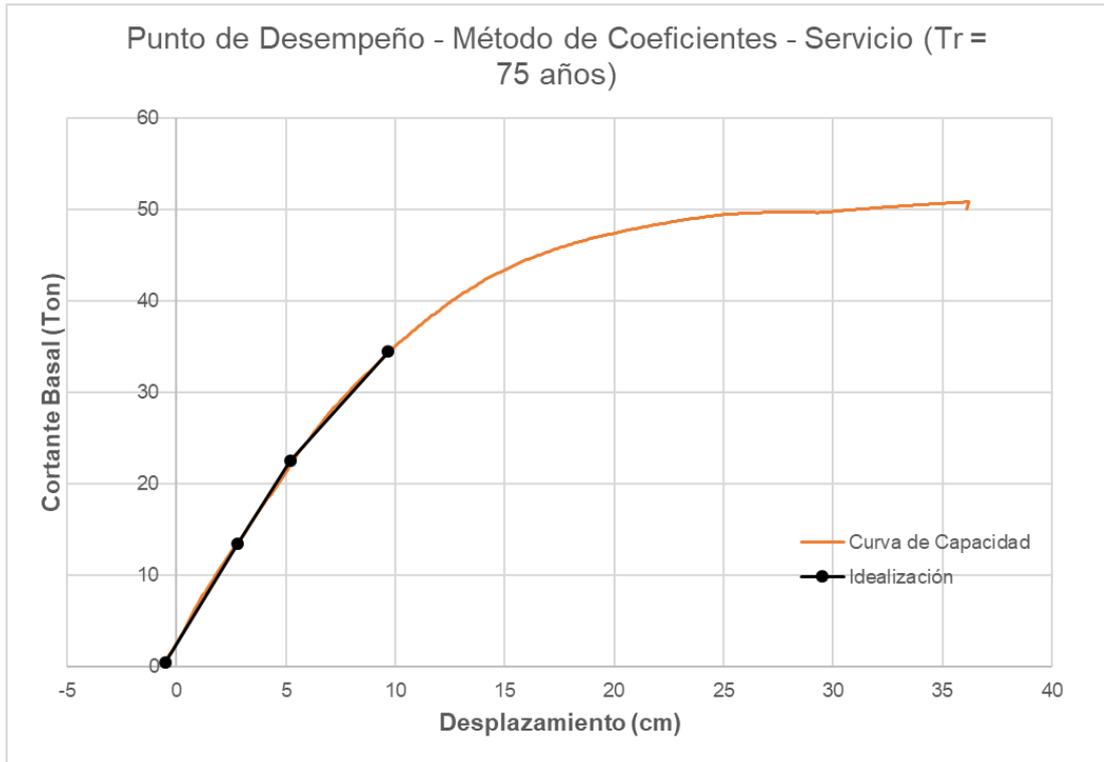


Fig. # 64 - Obtención del punto de desempeño en muelle convencional para sismo de servicio por el método de coeficientes.

Tabla # 15 – Parámetros utilizados y calculados en el método de los coeficientes.

Parámetros de Método de los Coeficientes – Sismo de servicio			
<b>Ki</b>	4,40 Ton/cm	<b>Ti</b>	0,97 s
<b>Ke</b>	3,952 Ton/cm	<b>Te</b>	1,024 s
<b><math>\alpha_1</math></b>	0,68	<b>C0</b>	1,00
<b>C1</b>	1,005	<b>C2</b>	1,00
<b>Sa</b>	0,37 g	<b>a</b>	60
<b><math>\mu_{strength}</math></b>	1,305	<b><math>\mu_{max}</math></b>	1,867
<b>W</b>	79,33 Ton	<b><math>\epsilon</math> (error relativo)</b>	1,76%
<b><math>\delta(0.6*Vy)</math></b>	2,80 cm	<b>0.6*Vy</b>	13,50 Ton
<b><math>\delta_y</math></b>	5,19 cm	<b>Vy</b>	22,50 Ton
<b><math>\delta_t</math></b>	9,68 cm	<b>Vb</b>	34,50 Ton

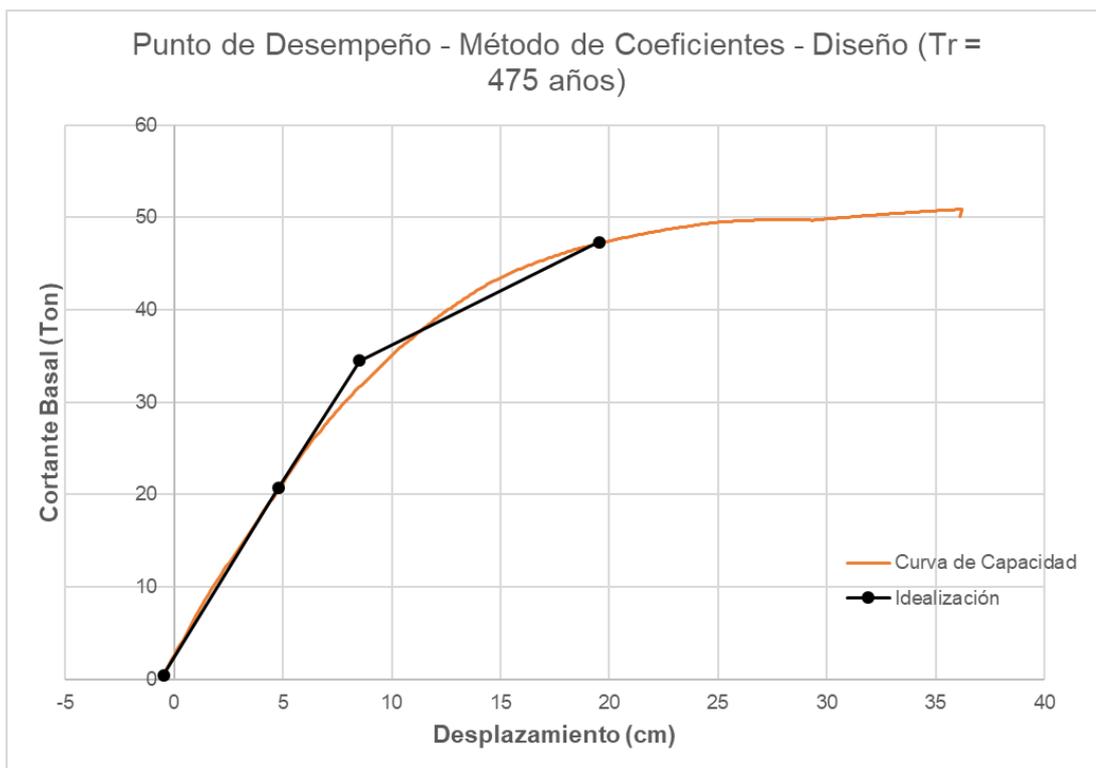


Fig. # 65 - Obtención del punto de desempeño en muelle convencional para sismo de diseño por el método de coeficientes.

Tabla # 16 – Parámetros utilizados y calculados en el método de los coeficientes.

Parámetros de Método de los Coeficientes – Sismo de diseño			
<b>Ki</b>	4,40 Ton/cm	<b>Ti</b>	0,97 s
<b>Ke</b>	3,831 Ton/cm	<b>Te</b>	1,040 s
<b><math>\alpha_1</math></b>	0,07	<b>C0</b>	1,00
<b>C1</b>	1,01	<b>C2</b>	1,00
<b>Sa</b>	0,72 g	<b>a</b>	60
<b><math>\mu_{strength}</math></b>	1,656	<b><math>\mu_{max}</math></b>	2,295
<b>W</b>	79,33 Ton	<b><math>\epsilon</math> (error relativo)</b>	1,25%
<b><math>\delta(0.6 \cdot V_y)</math></b>	4,80 cm	<b><math>0.6 \cdot V_y</math></b>	20,70 Ton
<b><math>\delta_y</math></b>	8,51 cm	<b><math>V_y</math></b>	34,50 Ton
<b><math>\delta_t</math></b>	19,54 cm	<b><math>V_b</math></b>	47,30 Ton

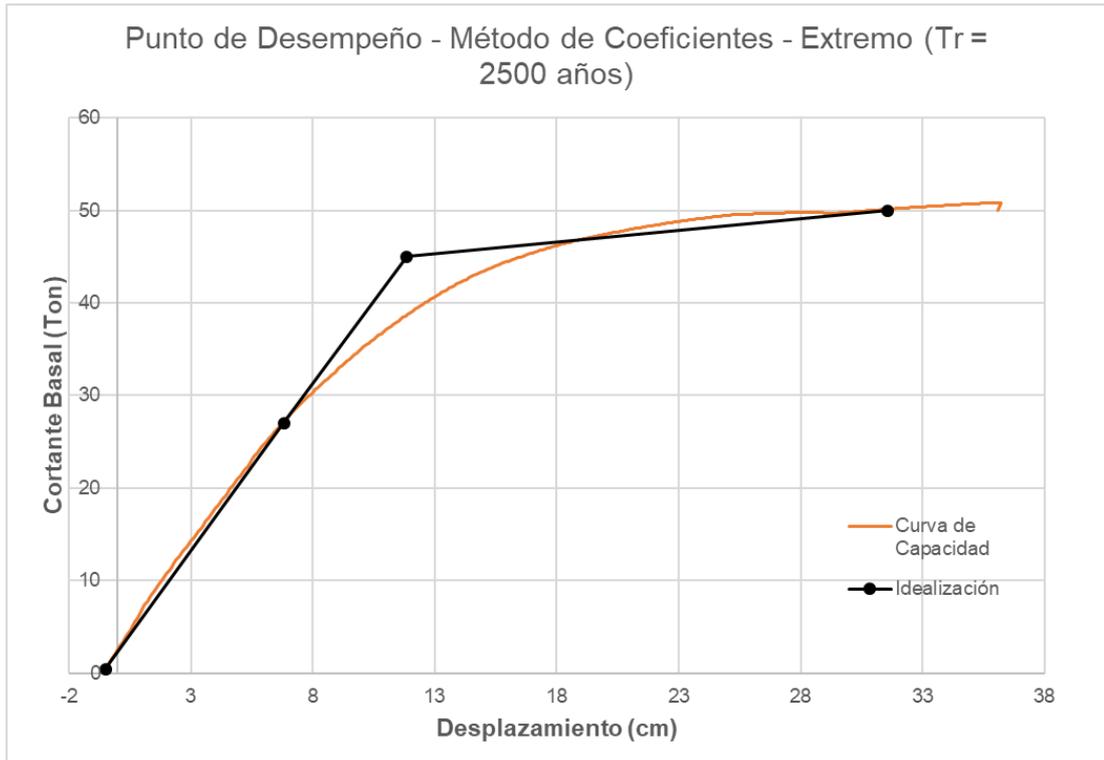


Fig. # 66 - Obtención del punto de desempeño en muelle convencional para sismo extremo por el método de coeficientes.

Tabla # 17 – Parámetros utilizados y calculados en el método de los coeficientes.

Parámetros de Método de los Coeficientes - Sismo extremo			
<b>Ki</b>	4,40 Ton/cm	<b>Ti</b>	0,97 s
<b>Ke</b>	3,644 Ton/cm	<b>Te</b>	1,066 s
<b><math>\alpha_1</math></b>	0,07	<b>C0</b>	1,00
<b>C1</b>	1,014	<b>C2</b>	1,001
<b>Sa</b>	1,1022 g	<b>a</b>	60
<b><math>\mu_{\text{strenght}}</math></b>	1,943	<b><math>\mu_{\text{max}}</math></b>	2,663
<b>W</b>	79,33 Ton	<b><math>\epsilon</math> (error relativo)</b>	0,83%
<b><math>\delta(0.6 \cdot V_y)</math></b>	6,80 cm	<b><math>0.6 \cdot V_y</math></b>	27,00 Ton
<b><math>\delta_y</math></b>	11,86 cm	<b><math>V_y</math></b>	45,00 Ton
<b><math>\delta_t</math></b>	31,58 cm	<b><math>V_b</math></b>	50,00 Ton

### 2.6.1.2 FEMA 440: Espectro de Capacidad – Método A: Iteración Directa

El punto de desempeño se encuentra en el desplazamiento que interseca la recta de periodo efectivo (recta con pendiente  $4\pi^2/T_{eff}^2$ ) con el ADRS (Espectro de respuesta de aceleraciones y desplazamientos reducido por amortiguamiento).

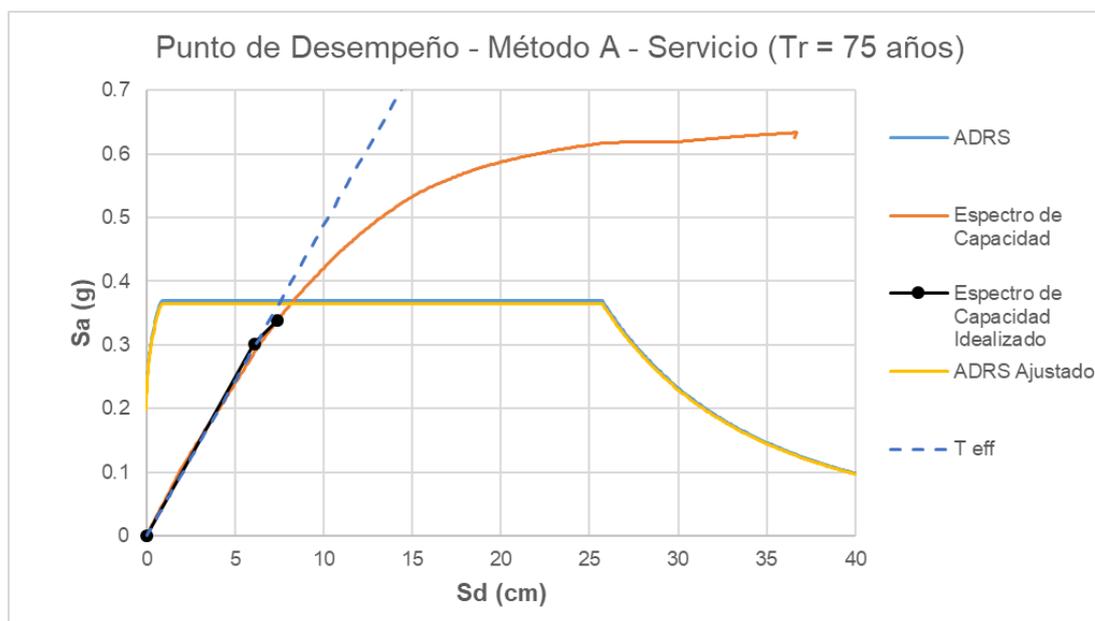


Fig. # 67 - Obtención del punto de desempeño en muelle convencional para sismo de servicio por el método A.

Tabla # 18 - Parámetros obtenidos en el método A del espectro de capacidad.

Parámetros de Método de Espectro de Capacidad A – Sismo de servicio			
<b>K<sub>i</sub></b>	4,40 Ton/cm	<b>T<sub>i</sub></b>	0,90 s
<b>α<sub>1</sub></b>	1	<b>PF1</b>	0,02643
<b>Φ<sub>1 roof</sub></b>	37,84	<b>ε (error relativo)</b>	0,23%
<b>W</b>	79,33 Ton	<b>α</b>	0,028
<b>β<sub>eff</sub></b>	5,22%	<b>T<sub>eff</sub></b>	0,908 s
<b>μ</b>	1,22	<b>B</b>	1,013
<b>a<sub>y</sub></b>	0,300 g	<b>d<sub>y</sub></b>	6,08 cm
<b>a<sub>p</sub></b>	0,339 g	<b>d<sub>p</sub></b>	7,40 cm

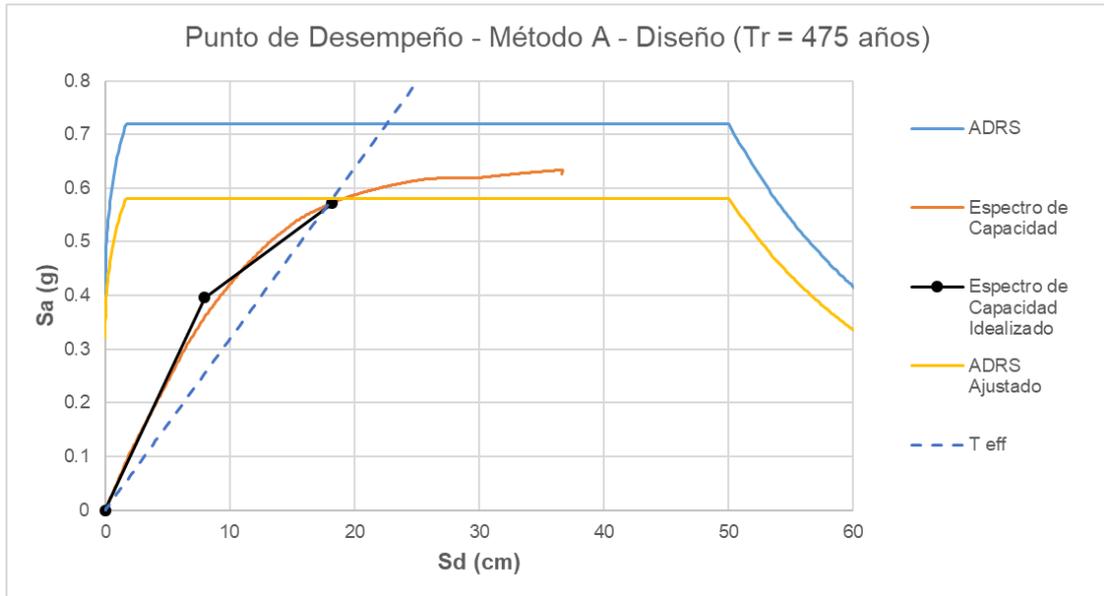


Fig. # 68 - Obtención del punto de desempeño en muelle convencional para sismo de diseño por el método A.

Tabla # 19 - Parámetros obtenidos en el método A del espectro de capacidad.

Parámetros de Método de Espectro de Capacidad A – Sismo de diseño			
<b>Ki</b>	4,40 Ton/cm	<b>Ti</b>	0,90 s
<b>α1</b>	1	<b>PF1</b>	0,02643
<b>Φ1 roof</b>	37,84	<b>ε (error relativo)</b>	0,0002%
<b>W</b>	79,33 Ton	<b>α</b>	0,346
<b>β<sub>eff</sub></b>	10,73%	<b>T<sub>eff</sub></b>	1,123 s
<b>μ</b>	2,28	<b>B</b>	1,239
<b>a<sub>y</sub></b>	0,400 g	<b>d<sub>y</sub></b>	7,98 cm
<b>a<sub>p</sub></b>	0,572 g	<b>d<sub>p</sub></b>	18,20 cm

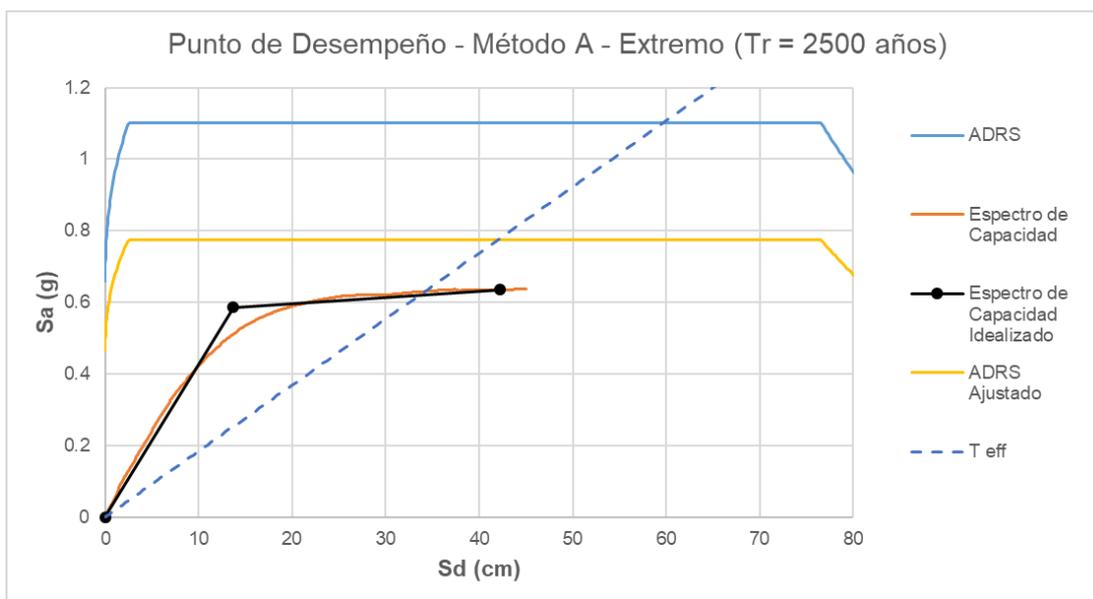


Fig. # 69 - Obtención del punto de desempeño en muelle convencional para sismo extremo por el método A.

Tabla # 20 - Parámetros obtenidos en el método A del espectro de capacidad.

Parámetros de Método de Espectro de Capacidad A – Sismo extremo			
<b>Ki</b>	4,40 Ton/cm	<b>Ti</b>	0,97 s
<b>α1</b>	1	<b>PF1</b>	0,02643
<b>Φ1 roof</b>	37,84	<b>ε (error relativo)</b>	0,00001%
<b>W</b>	79,33 Ton	<b>α</b>	0,040
<b>β<sub>eff</sub></b>	16,29%	<b>T<sub>eff</sub></b>	1,477 s
<b>μ</b>	3,08	<b>B</b>	1,424
<b>a<sub>y</sub></b>	0,590 g	<b>d<sub>y</sub></b>	13,71 cm
<b>a<sub>p</sub></b>	0,635 g	<b>d<sub>p</sub></b>	42,20 cm

### 2.6.1.3 FEMA 440: Espectro de Capacidad – Método B: Intersección con MADRS

El punto de desempeño se encuentra en la intersección entre el MADRS (ADRS modificado por amortiguamiento y por el factor M) y el espectro de capacidad.

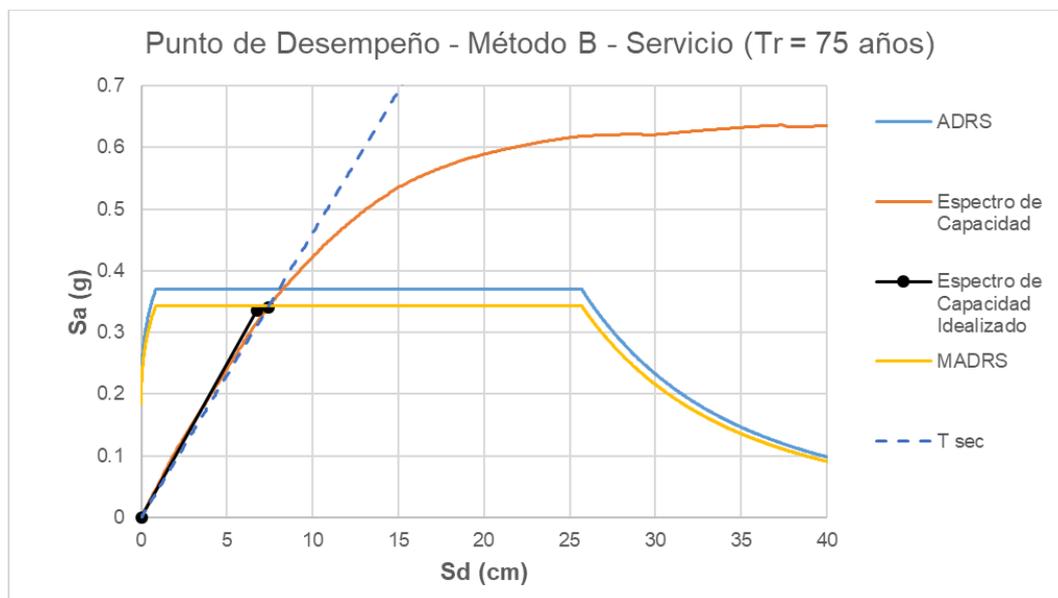


Fig. # 70 - Obtención del punto de desempeño en muelle convencional para sismo de servicio por el método B.

Tabla # 21 - Parámetros obtenidos en el método B del espectro de capacidad.

Parámetros de Método de Espectro de Capacidad B – Sismo de servicio			
<b>Ki</b>	4,40 Ton/cm	<b>Ti</b>	0,90 s
<b>α1</b>	1	<b>PF1</b>	0,02643
<b>Φ1 roof</b>	37,84	<b>ε (error relativo)</b>	0,048%
<b>W</b>	79,33 Ton	<b>α</b>	0,176
<b>βeff</b>	5,04%	<b>Teff</b>	0,902 s
<b>μ</b>	1,10	<b>B</b>	1,005
<b>M</b>	0,931	<b>Tsec</b>	0,9345
<b>ay</b>	0,340 g	<b>dy</b>	6,75 cm
<b>ap</b>	0,341 g	<b>dp</b>	7,40 cm

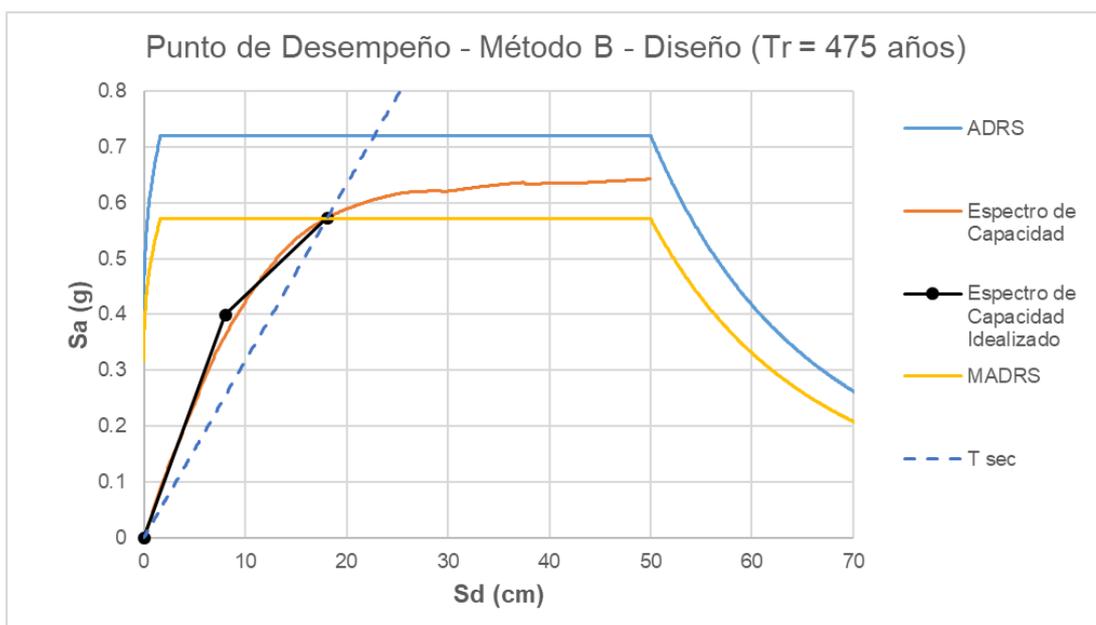


Fig. # 71 - Obtención del punto de desempeño en muelle convencional para sismo de diseño por el método B.

Tabla # 22 - Parámetros obtenidos en el método B del espectro de capacidad.

Parámetros de Método de Espectro de Capacidad B – Sismo de diseño			
<b>Ki</b>	4,40 Ton/cm	<b>Ti</b>	0,90 s
<b>α1</b>	1	<b>PF1</b>	0,02643
<b>Φ1 roof</b>	37,84	<b>ε (error relativo)</b>	0,0005%
<b>W</b>	79,33 Ton	<b>α</b>	0,347
<b>β<sub>eff</sub></b>	10,51%	<b>T<sub>eff</sub></b>	1,115 s
<b>μ</b>	2,25	<b>B</b>	1,232
<b>M</b>	0,977	<b>T<sub>sec</sub></b>	1,127
<b>a<sub>y</sub></b>	0,40 g	<b>d<sub>y</sub></b>	8,04 cm
<b>a<sub>p</sub></b>	0,573 g	<b>d<sub>p</sub></b>	18,10 cm

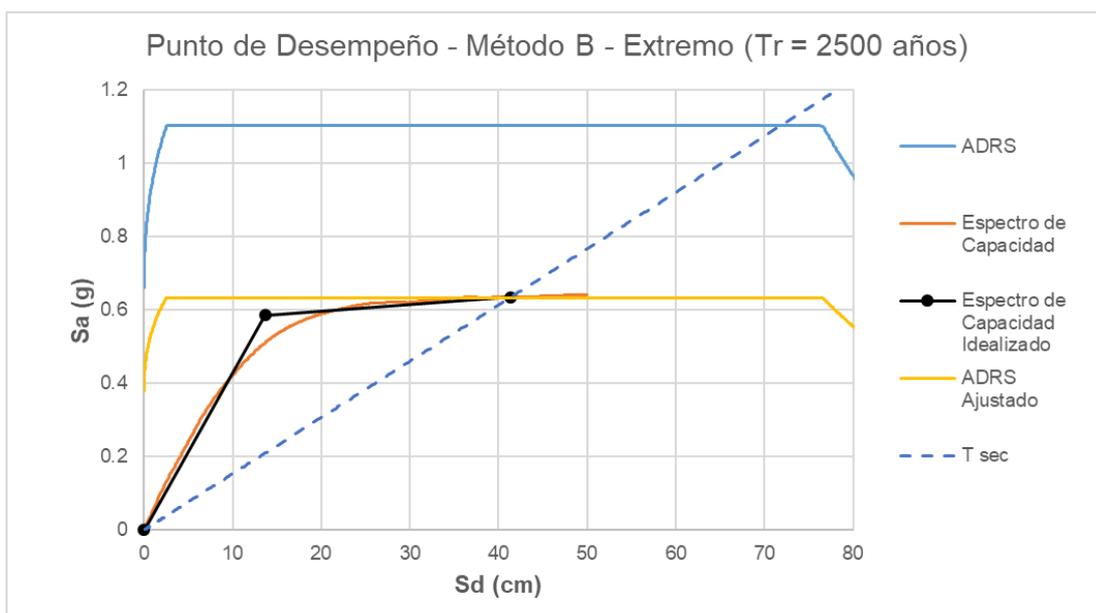


Fig. # 72 - Obtención del punto de desempeño en muelle convencional para sismo extremo por el método B.

Tabla # 23 - Parámetros obtenidos en el método B del espectro de capacidad.

Parámetros de Método de Espectro de Capacidad B – Sismo extremo			
<b>Ki</b>	4,40 Ton/cm	<b>Ti</b>	0,97 s
<b><math>\alpha_1</math></b>	1	<b>PF1</b>	0,02643
<b><math>\Phi_1</math> roof</b>	37,84	<b><math>\epsilon</math> (error relativo)</b>	0,0009%
<b>W</b>	79,33 Ton	<b><math>\alpha</math></b>	0,042
<b><math>\beta_{eff}</math></b>	15,97%	<b><math>T_{eff}</math></b>	1,460 s
<b><math>\mu</math></b>	3,03	<b>B</b>	1,414
<b>M</b>	0,813	<b><math>T_{sec}</math></b>	1,620
<b><math>a_y</math></b>	0,58 g	<b><math>d_y</math></b>	13,68 cm
<b><math>a_p</math></b>	0,635 g	<b><math>d_p</math></b>	41,40 cm

### 2.6.1.4 FEMA 440: Espectro de Capacidad – Método C: Lugar geométrico con varios MADRS

El punto de desempeño se encuentra en la intersección entre la línea de lugar geométrico o LOCUS (sucesión de puntos de desempeño probables), y el espectro de capacidad.

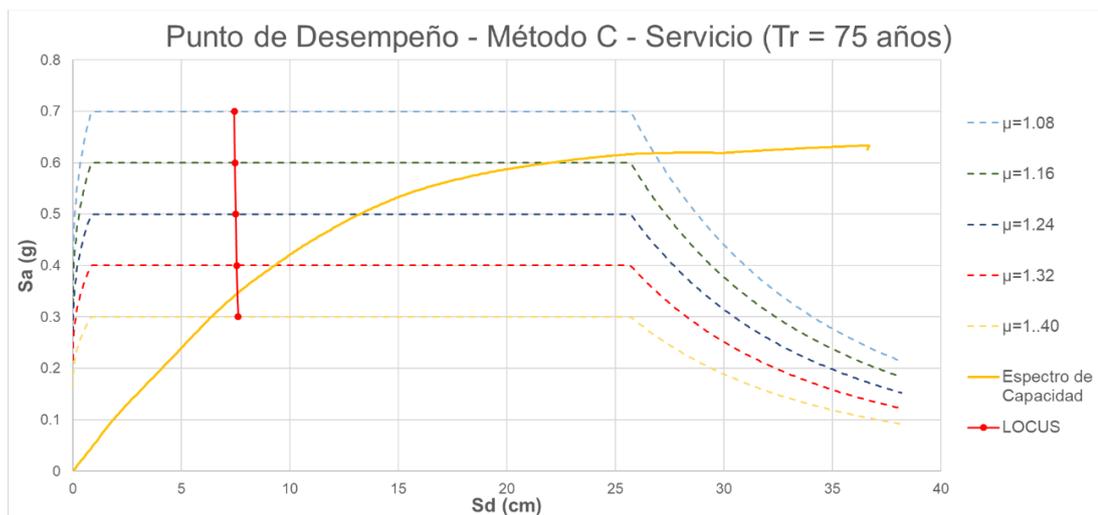


Fig. # 73 - Obtención del punto de desempeño en muelle convencional para sismo de servicio por el método C.

Tabla # 24 - Parámetros obtenidos en el método C del espectro de capacidad.

Parámetros de Método de Espectro de Capacidad C – Sismo de servicio										
$\mu$	$\beta_{eff}$ (%)	$T_{eff}$ (s)	$\alpha$	B	M	$T_{sec}$ (s)	$a_p$ (g)	$d_p$ (cm)	$\epsilon$ (%) Error relativo	
1,08	5,03	0,901	13,065	1,004	1,899	0,654	0,7	7,44	-9,04	
1,16	5,12	0,904	5,487	1,088	1,635	0,707	0,6	7,46	-11,6	
1,24	5,27	0,910	2,766	1,016	1,372	0,777	0,5	7,50	-8,05	
1,32	5,47	0,917	1,274	1,025	1,108	0,872	0,4	7,55	-4,35	
1,40	5,71	0,927	0,277	1,037	0,841	1,010	0,3	7,61	4,23	
		$a_p$	0,34 g					$d_p$	7,57 cm	

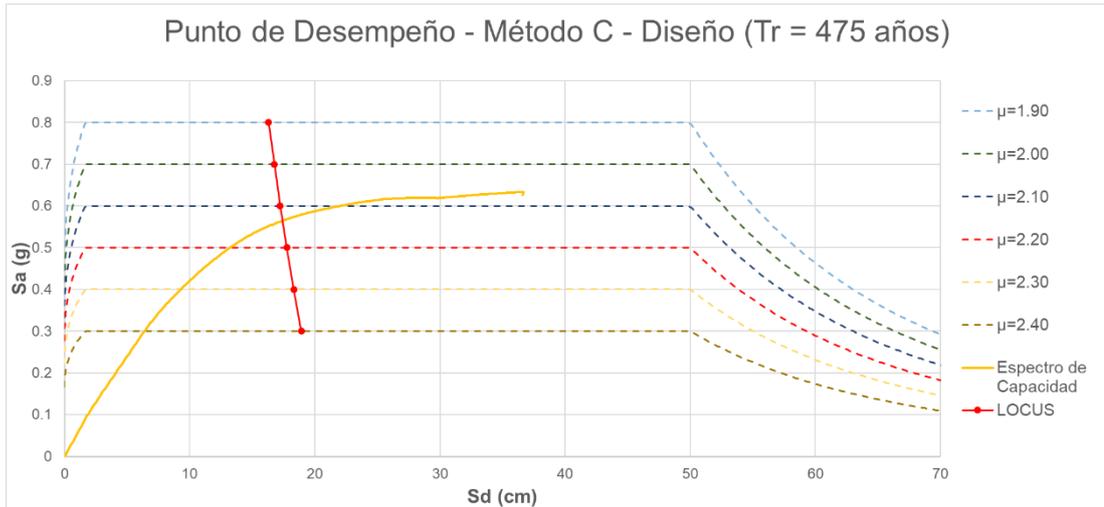


Fig. # 74 - Obtención del punto de desempeño en muelle convencional para sismo de diseño por el método C.

Tabla # 25 - Parámetros obtenidos en el método C del espectro de capacidad.

Parámetros de Método de Espectro de Capacidad C – Sismo de diseño									
$\mu$	$\beta_{eff}$ (%)	$T_{eff}$ (s)	$\alpha$	B	M	$T_{sec}$ (s)	$a_p$ (g)	$d_p$ (cm)	$\epsilon$ (%) Error relativo
1,90	8,17	1,021	0,973	1,143	1,270	0,906	0,8	16,31	-20,3
2,00	8,80	1,046	0,681	1,168	1,135	0,982	0,7	16,76	-13,0
2,10	9,46	1,072	0,428	1,193	0,994	1,075	0,6	17,24	-4,39
2,20	10,16	1,100	0,205	1,219	0,846	1,196	0,5	17,77	4,11
2,30	10,86	1,129	0,008	1,244	0,691	1,358	0,4	18,33	13,47
2,40	11,59	1,159	-0,167	1,270	0,529	1,594	0,3	18,93	22,62
$a_p$			0,57 g			$d_p$			17,60 cm

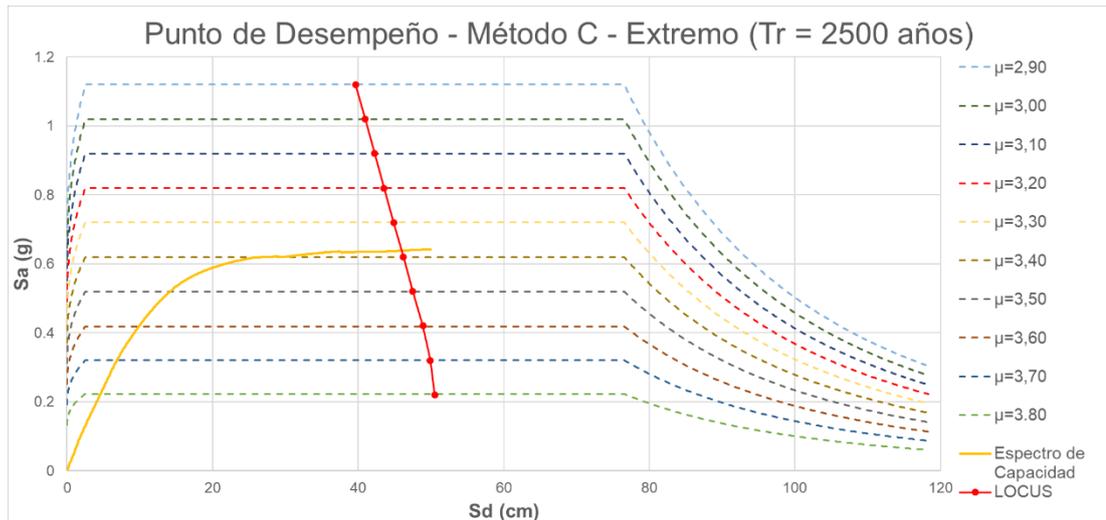


Fig. # 75 - Obtención del punto de desempeño en muelle convencional para sismo extremo por el método C.

Tabla # 26 - Parámetros obtenidos en el método C del espectro de capacidad.

Parámetros de Método de Espectro de Capacidad C – Sismo extremo										
$\mu$	$\beta_{eff}$ (%)	$T_{eff}$ (s)	$\alpha$	B	M	$T_{sec}$ (s)	$a_p$ (g)	$d_p$ (cm)	$\epsilon$ (%) Error relativo	
2,90	15,14	1,418	0,481	1,388	1,410	1,194	1,12	39,66	-32,3	
3,00	15,80	1,451	0,374	1,408	1,303	1,271	1,02	40,95	-25,7	
3,10	16,42	1,484	0,275	1,428	1,192	1,359	0,92	42,25	-18,9	
3,20	17,00	1,516	0,186	1,446	1,076	1,462	0,82	43,56	-12,2	
3,30	17,54	1,548	0,103	1,462	0,955	1,584	0,72	44,88	-5,4	
3,40	18,02	1,578	0,028	1,477	0,830	1,732	0,62	46,20	1,8	
3,50	18,44	1,607	-0,042	1,489	0,702	1,917	0,52	47,50	8,8	
3,60	18,79	1,634	-0,107	1,500	0,570	2,165	0,42	48,90	15,8	
3,70	19,07	1,659	-0,165	1,508	0,438	2,505	0,32	49,90	23,2	
3,80	19,27	1,682	-0,219	1,514	1,514	3,039	0,22	50,50	30,9	
$a_p$			0,64 g		$d_p$			46,00 cm		

Es suficiente comparar los puntos de desempeño con su respectivo desplazamiento límite, pues ambos representan un estado determinado de deformaciones unitarias en las secciones de fibras de los pilotes. Si los puntos de desempeño son menores que los límites de desplazamiento, para el mismo marco de evaluación de desempeño (es decir, comparar puntos de desempeño producidos por un sismo de servicio, con los límites de desempeño definidos para el mismo sismo de servicio), entonces se concluye que el desempeño requerido se alcanza satisfactoriamente. Caso contrario, si por lo menos uno de los puntos de desempeño es mayor al límite, no se alcanza el desempeño requerido.

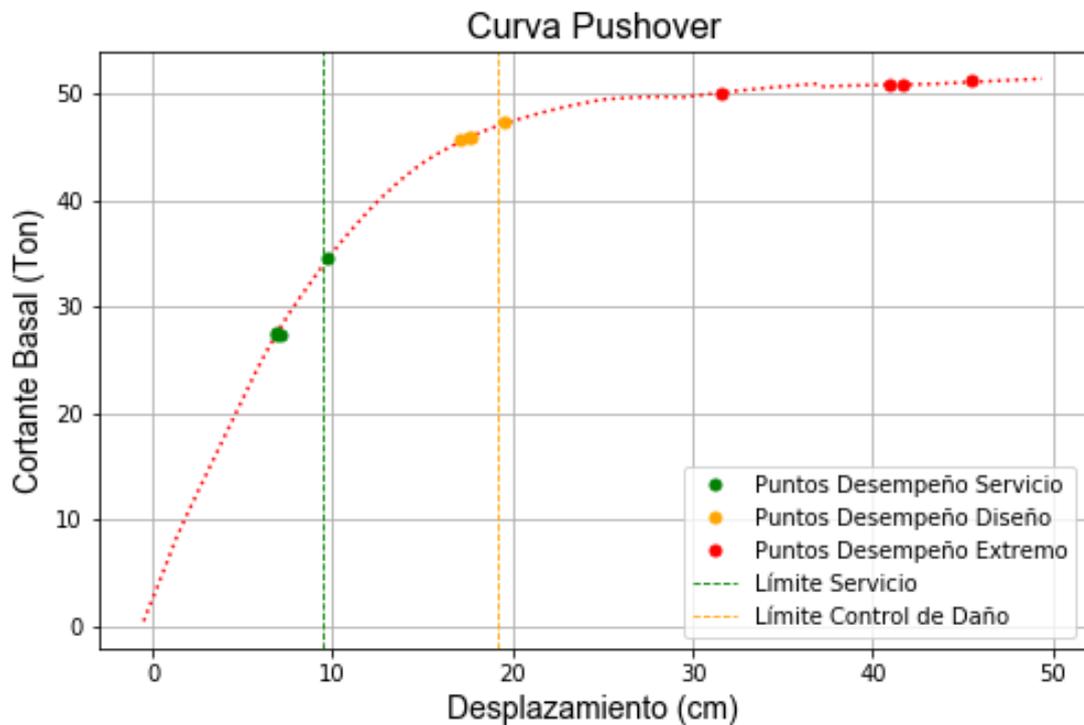


Fig. # 76 – Resultado de comparación entre puntos de desempeño y límites en muelle convencional. No hay cumplimiento en los niveles de Servicio y Control de Daño.

Tabla # 27 - Resumen de puntos de desempeño para distintos niveles de sismos en muelle convencional.

Método	Puntos de Desempeño					
	Servicio		Diseño		Extremo	
	Vb (Ton)	$\Delta$ (cm)	Vb (Ton)	$\Delta$ (cm)	Vb (Ton)	$\Delta$ (cm)
<b>ASCE 41-13 – Mét. Coef.</b>	34,07	10,17	46,87	20,03	49,57	32,07
<b>FEMA 440 A (ADRS)</b>	26,89	7,40	45,38	18,20	50,37	42,20
<b>FEMA 440 B (MADRS)</b>	26,89	7,40	45,30	18,10	50,27	41,40
<b>FEMA 440 C (LOCUS)</b>	26,97	7,57	45,22	17,60	50,77	46,00

Tabla # 28 – Resumen de comparación de desempeño a nivel de Servicio ( $Tr = 75$  años).

Método	Servicio		Límite	Estado
	Vb (Ton)	$\Delta$ (cm)	$\Delta_{m\acute{a}x}$ (cm)	
<b>ASCE 41-13 – Mét, Coef,</b>	34,07	10,17	9,41	<b>ERROR</b>
<b>FEMA 440 A (ADRS)</b>	26,89	7,40	9,41	<b>OK</b>
<b>FEMA 440 B (MADRS)</b>	26,89	7,40	9,41	<b>OK</b>
<b>FEMA 440 C (LOCUS)</b>	26,97	7,57	9,41	<b>OK</b>

Tabla # 29 - Resumen de comparación de desempeño a nivel de Diseño ( $Tr = 475$  años).

Método	Diseño		Límite	Estado
	Vb (Ton)	$\Delta$ (cm)	$\Delta_{m\acute{a}x}$ (cm)	
<b>ASCE 41-13 – Mét, Coef,</b>	46,87	20,03	19,11	<b>ERROR</b>
<b>FEMA 440 A (ADRS)</b>	45,38	18,20	19,11	<b>OK</b>
<b>FEMA 440 B (MADRS)</b>	45,46	18,10	19,11	<b>OK</b>
<b>FEMA 440 C (LOCUS)</b>	45,22	17,60	19,11	<b>OK</b>

Se puede observar de la Fig. #76 que no se satisface los requisitos para los niveles de desempeño de Servicio y Control de Daño en el muelle. Inclusive,

las vigas no se mantienen elásticas para el sismo de diseño y extremo, lo que perjudica la calidad de su desempeño obligando a ejecutar reparaciones complicadas y duraderas.

Para el sismo extremo, se observa que la estructura puede desarrollar desplazamientos y resistencia con un gran nivel de daño, pues la inelasticidad en los materiales llega a ser alta. Esto implica que la reparación será extensa, obstruyendo la continuidad en las operaciones del muelle, pero tal vez salvando vidas.

El mecanismo de disipación de energía es adecuado, pero no el preferido, pues las vigas participan en dicho mecanismo generando daño en la plataforma y posibles reparaciones tanto estructurales como en la infraestructura operacional. Sin embargo, se observa que los pilotes son la fuente principal (pero no la única) de disipación de energía durante sismos fuertes, generando daño estructural en sus secciones transversales críticas.

Para el nivel de Servicio, son críticos los cables de presfuerzo de las secciones superiores (cerca del nudo pilote-viga) de los pilotes inclinados del muelle que trabajen a tensión. Los elementos que controlan el desempeño en el nivel de Control de Daño del muelle también son los pilotes inclinados que trabajan a tensión, específicamente sus cables de presfuerzo en las secciones inferiores (cerca del empotramiento efectivo), debido a que los límites de deformaciones unitarias son más restrictivos para esta zona que para la sección superior.

Hay que resaltar que, en el nivel de Control de Daño, aunque se produzcan deformaciones unitarias superiores al límite tanto en las secciones inferiores de los pilotes como en las vigas, el límite de desempeño será mayor si se ejecuta un reforzamiento en estas zonas o si se diseñan con más resistencia, causando que la estructura cumpla con el objetivo de desempeño.

Finalmente, se comparó la carga de ataque aplicada al muelle con los distintos niveles de desempeño sísmico con el fin de determinar el estado en el que están los elementos bajo cargas operacionales en comparación con las cargas sísmicas.

Se obtuvo del modelo estructural del muelle que la carga de atraque (60 Ton) produce un cortante basal máximo de 13,75 Ton sobre un pórtico. Este cortante se muestra en la Fig. #77.

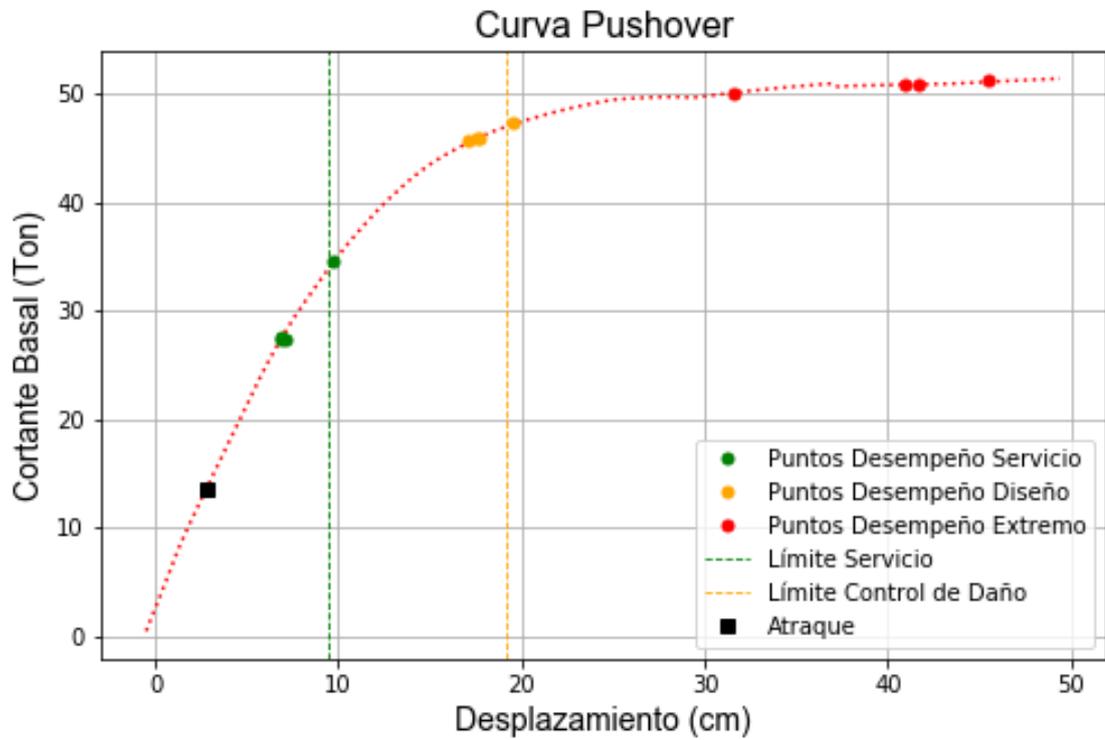


Fig. # 77 – Comparación entre niveles de desempeño sísmico y carga de atraque del muelle con solución convencional.

Se observa que el muelle se comporta bien bajo cargas de atraque, no presenta inelasticidad ( $\Delta_{\text{atraque}} = 2,81 \text{ cm} < \Delta_{\text{primera fluencia}} = 5,81 \text{ cm}$ ). Adicionalmente, se obtuvo de la memoria técnica (Consultora, 2017, p. 13) que el muelle no debe superar deflexiones laterales superiores a  $h/200$  para cargas de atraque, lo cual resulta en  $1400/200 = 7 \text{ cm}$ . Esto resulta mayor al desplazamiento efectuado y por lo tanto la estructura es apta para cumplir con sus requisitos operacionales.

## CAPÍTULO III

### 3 ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO Y DESEMPEÑO DEL MUELLE CON AISLACIÓN SÍSMICA

#### 3.1 PREDISEÑO DEL AISLADOR

La comparación de las distintas soluciones estructurales en el muelle evaluado implica la implementación de aisladores sísmicos de caucho con el fin de verificar mejoras o perjuicios en su comportamiento. Para determinar de forma preliminar los parámetros mecánicos del aislador y que este genere beneficios, se realizó lo siguiente:

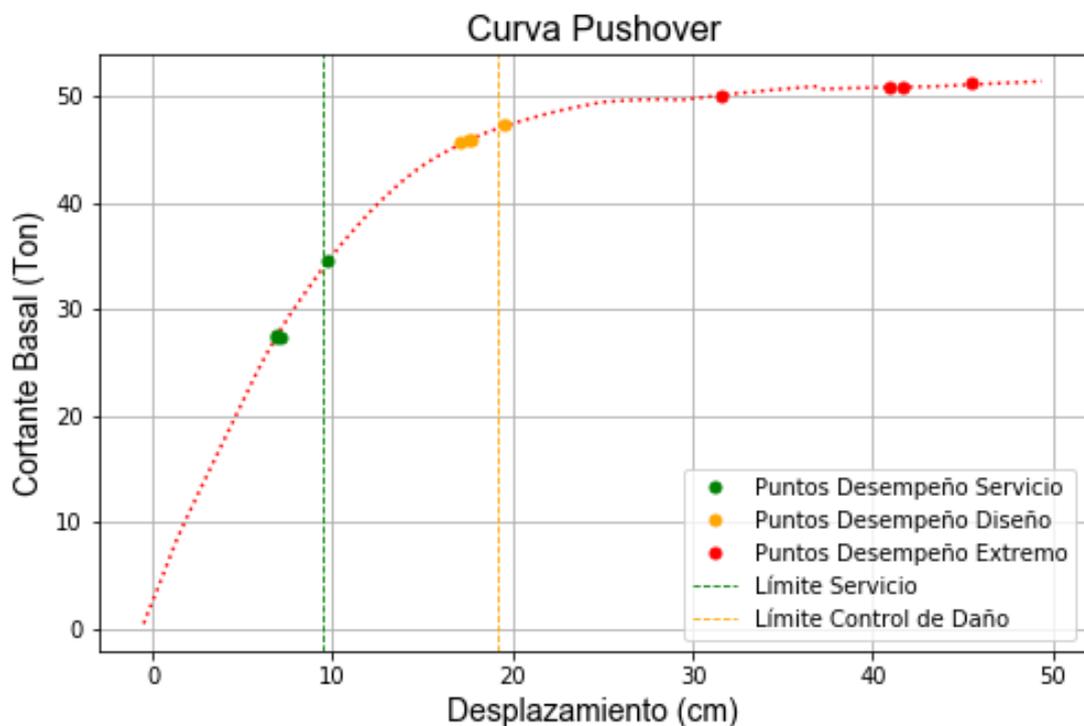


Fig. # 78 - Curva Pushover de muelle convencional con límites de desempeño. Límite de servicio ubicado en línea verde.

Observando la curva Pushover del muelle convencional con sus respectivos límites de desempeño (Ver Fig. #78), se observa que en el límite de servicio se produce un cortante basal de aproximadamente 33.7 Ton.

Se optó a que las fuerzas laterales desarrolladas por el conjunto de aisladores a instalar no alcancen 33.7 Ton, con el fin de que la implementación de los mismos evite que se produzca daño estructural importante. Para esto se propuso que el conjunto de aisladores no desarrolle fuerzas mayores a 30 Ton. Si se utilizan 3 aisladores, cada aislador deberá producir una fuerza máxima de 10 Ton en su desplazamiento máximo.

Se elaboró un espectro elástico de aceleraciones para el sismo extremo, de acuerdo a los lineamientos provistos por la NEC-15 y la metodología propuesta en este trabajo (Ver sección 2.5 – Determinación de Amenaza Sísmica). A partir del espectro de aceleraciones para el sismo extremo, se obtuvo su correspondiente espectro elástico de desplazamientos (Ver Fig. #79).

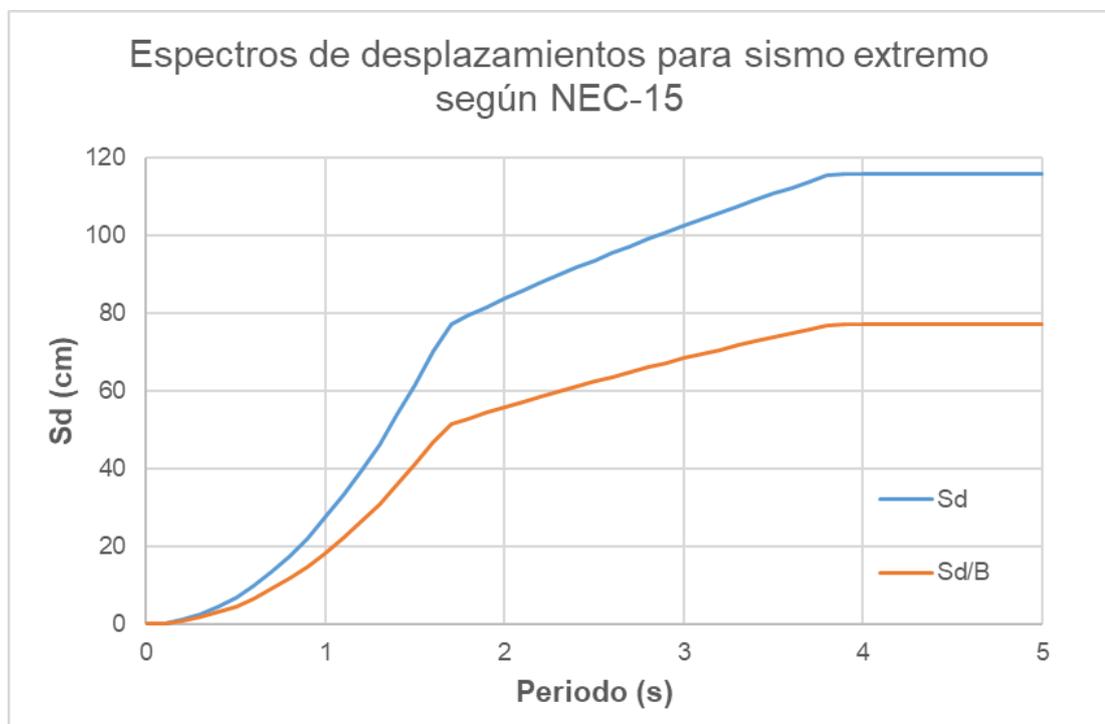
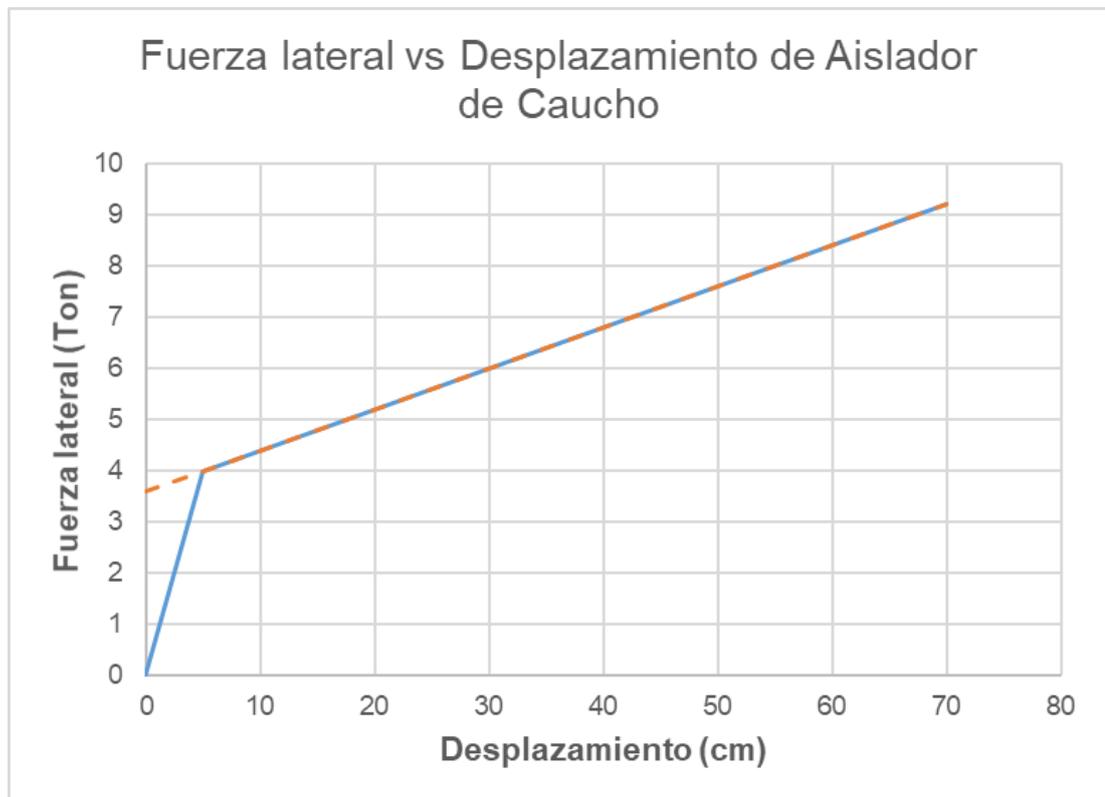


Fig. # 79 - Elaboración de espectros de desplazamiento elástico y reducido por amortiguamiento.

Preliminarmente fue considerado que el aislador iba a tener las siguientes propiedades:  $T_{eff} = 3$  segundos,  $\beta_{eff} = 20\%$ , y un factor de disipación por amortiguamiento  $B = 1.5$  (American Society of Civil Engineers, 2016, p. 173). Las ordenadas de desplazamientos se dividen para  $B$ , con las que se obtiene el desplazamiento espectral ( $S_d$ ) correspondiente al periodo considerado. Se obtuvo que  $S_d \approx 70$  cm para  $T_{eff} = 3$  s. Entonces se propondrá un aislador que bajo 70 cm de desplazamiento desarrolle máximo 10 Ton.



*Fig. # 80 – Fuerza Lateral vs Desplazamiento de aislador de caucho propuesto para modelo con plataforma totalmente aislada.  $K_1 = 800$  kg/cm,  $K_2 = 80$  kg/cm,  $Q = 3600$  kg,  $T_{eff} = 2,21$  s,  $\beta_{eff} = 23.13\%$ ,  $B = 1,63$ .*

Las propiedades como rigidez inicial, desplazamiento de fluencia y relación de rigidez post-fluencia se determinan tratando que los parámetros asumidos inicialmente ( $T_{eff}$ ,  $\beta_{eff}$ , y  $B$ ) alcancen magnitudes similares a las asumidas. Finalmente, se obtienen todos los parámetros del aislador calibrado, siendo estos los descritos anteriormente y la resistencia característica  $Q$  (Ver sección

1.15.1 – Marco Teórico). Se espera que al determinar todos los puntos de desempeño de la estructura con aisladores (niveles de servicio, control de daño y para sismo extremo), las fuerzas resultantes no superen la fuerza límite de desempeño de servicio de 30 Ton.

Siguiendo esta metodología, se definieron las propiedades mecánicas de los aisladores a implementar en los modelos estructurales de:

- Muelle con plataforma totalmente aislada
- Muelle con plataforma localmente aislada

Los cuales estarán sujetos al mismo criterio de aceptación implementado para la revisión del muelle convencional (Ver sección 2.4).

## **3.2 MUELLE CON PLATAFORMA TOTALMENTE AISLADA**

El objetivo de implementar aisladores sísmicos en todos los nudos plataforma-pilote (aislando totalmente la plataforma), es proteger a la plataforma del daño estructural producto de eventos sísmicos fuertes, manteniéndose elástica; y evitar que las fuerzas transmitidas a los pilotes sean lo suficientemente altas como para causar daño estructural importante en los mismos. Se espera que, con el sistema de aislación, los pilotes permanezcan en niveles de inelasticidad iguales o menores a los correspondientes al nivel de desempeño de Servicio, y que la disipación de energía durante sismos fuertes sea provista principalmente por los aisladores.

### **3.2.1 RESORTES SEMI-RÍGIDOS COMO AISLADORES SÍSMICOS**

Para la modelación de los aisladores sísmicos y su incorporación en el modelo estructural, se implementó el comando Element para crear un elemento y configurarlo como “elastomericBearingPlasticity”, el cual es un elemento semi-rígido (tipo resorte) que se conecta a otros elemento o apoyos a través de dos nudos, que determinan su longitud en función de su separación. Para definir este elemento, se debe ingresar:

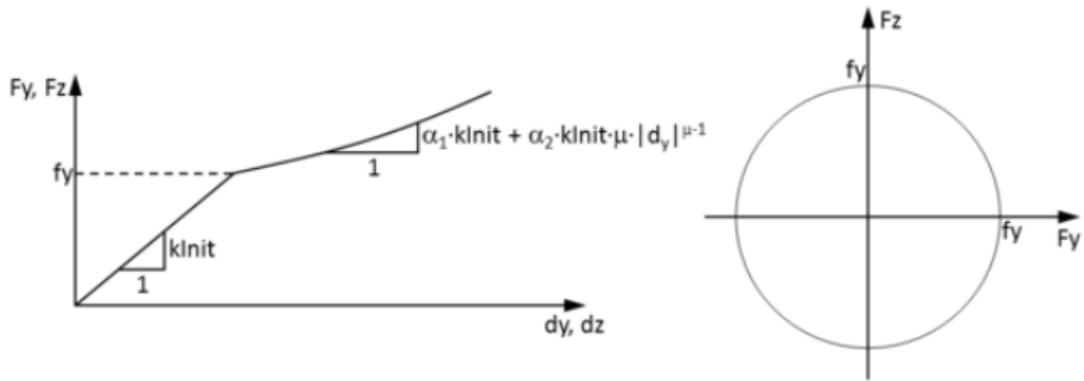


Fig. # 81 - Propiedades mecánicas a ingresar para aislador en OpenSeesPy. Tomado de OpenSeesPy (University of California, Berkely, 2012).

- Rigidez inicial – knit
- Relación entre rigidez post-fluencia para componente lineal –  $\alpha_1$
- Relación entre rigidez post-fluencia para componente no-lineal –  $\alpha_2$
- Factor de endurecimiento en componente no-lineal -  $\mu$
- Resistencia característica – qd

Estos parámetros se obtienen a través de un diagrama que muestre la relación entre fuerza lateral y desplazamiento del aislador (Zhu, 2020, p. 47). Se utilizaron los parámetros obtenidos en la sección 3.1.

### 3.2.2 DESCRIPCIÓN DEL MODELO ESTRUCTURAL

Utilizando de base al modelo estructural del muelle (Sección 2.2), se modelaron 3 aisladores de caucho sobre la plataforma (Ver Fig. #82), con una longitud de 50 cm. Las propiedades mecánicas de cada aislador son las descritas en la sección 3.1. Para propósitos de modelado, la viga V2 se extendió hasta el extremo para ser soportado por el nuevo aislador. Se colocaron vigas de amarre sobre la cabeza de los pilotes (debajo de los aisladores) con el fin de rigidizar la sub-estructura, pues sin las vigas el sistema resultaba muy flexible y los aisladores no trabajaban eficientemente. Las vigas colocadas tienen la misma sección que las colocadas en la plataforma del muelle analizado en el capítulo anterior.

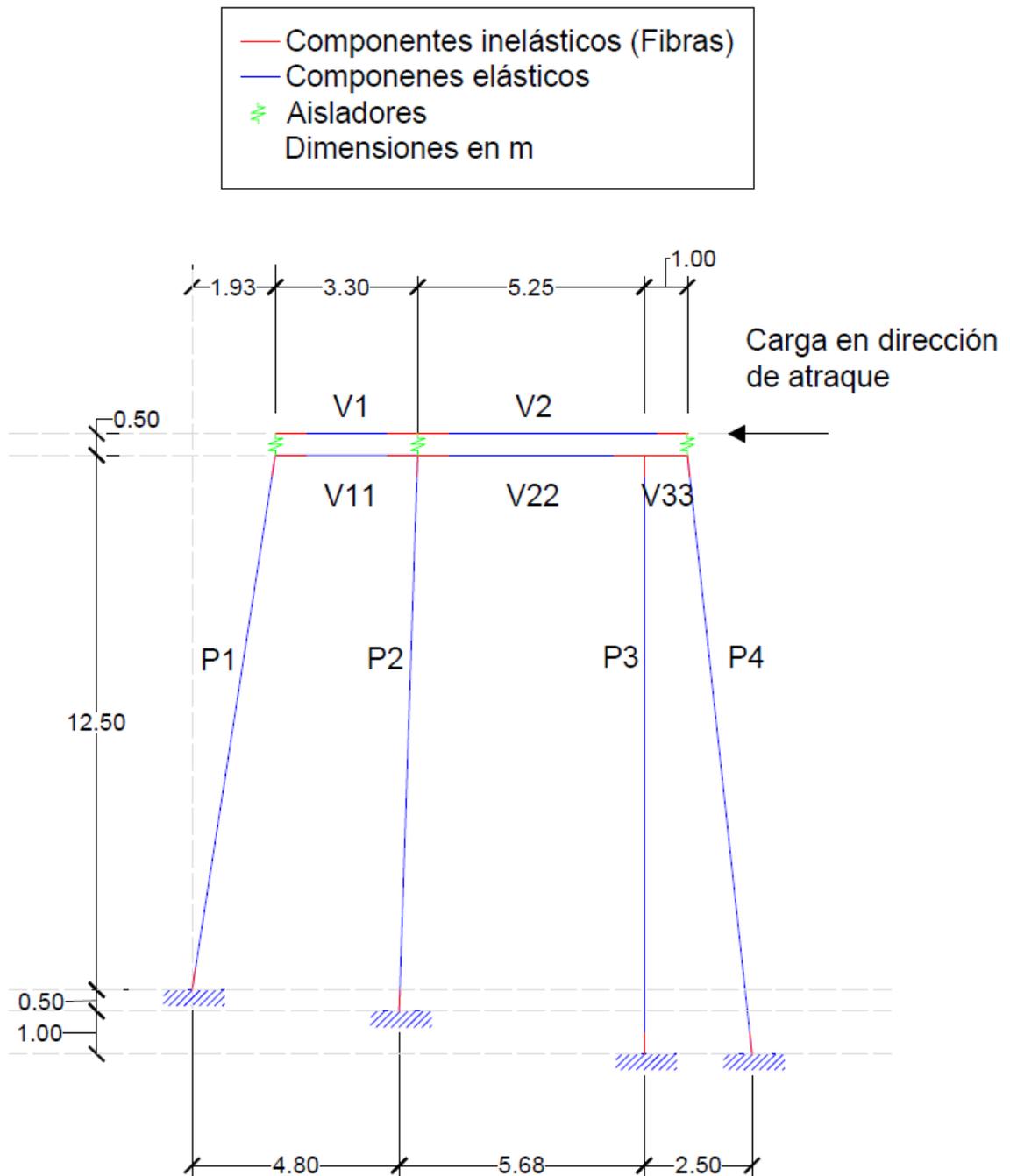


Fig. # 82 - Esquema de modelo estructural de pórtico equivalente con plataforma totalmente aislada.

Las hipótesis del modelo, los modelos de secciones de fibras y de los materiales, factores de carga, factores de sobre-resistencia y dirección de carga lateral son las mismas que se describieron en el capítulo 2 (Ver sección 2.2 – Descripción del Modelo Estructural).

### 3.2.3 DETERMINACIÓN DE LA CURVA DE CAPACIDAD

Se realizó el mismo procedimiento que en el muelle sin aislación (Ver sección 2.3) para determinar la curva de capacidad o cortante basal vs desplazamiento del muelle con plataforma totalmente aislada. Para este caso, se aplicaron las fuerzas laterales en los nodos de la plataforma aislada y se midieron los desplazamientos de la misma en el extremo opuesto (nudo izquierdo en Fig. #82).

La curva de capacidad resultante fue:

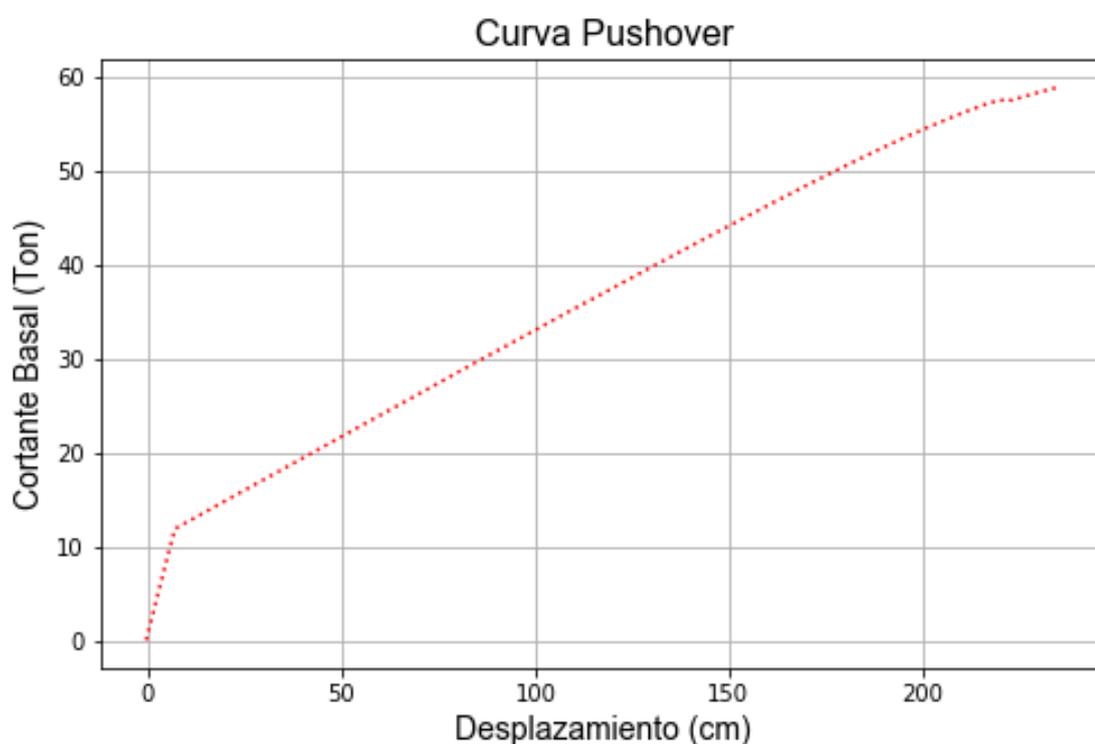


Fig. # 83 – Curva de capacidad de muelle con plataforma totalmente aislada.

#### 3.2.3.1 COMPORTAMIENTO NO LINEAL

Se inspeccionó el comportamiento de los pilotes y vigas de amarre debajo de los aisladores, los cuales conforman la sub-estructura, y de las vigas de la plataforma. Se identificaron puntos claves en las secciones críticas (extremo superior e inferior de elementos modelados) tales como fluencia en el acero dulce y cables de presfuerzo, y deformación unitaria última en el hormigón (recubrimiento), así como en la sección 2.3.1.2.

Se muestra lo siguiente:

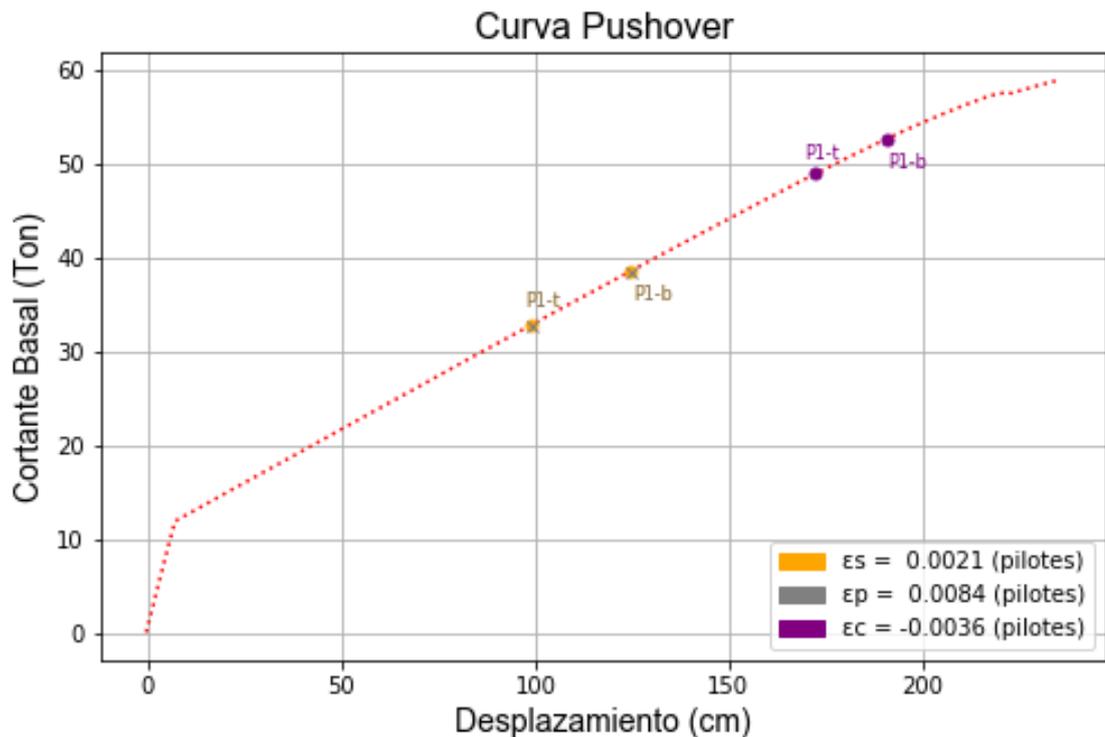
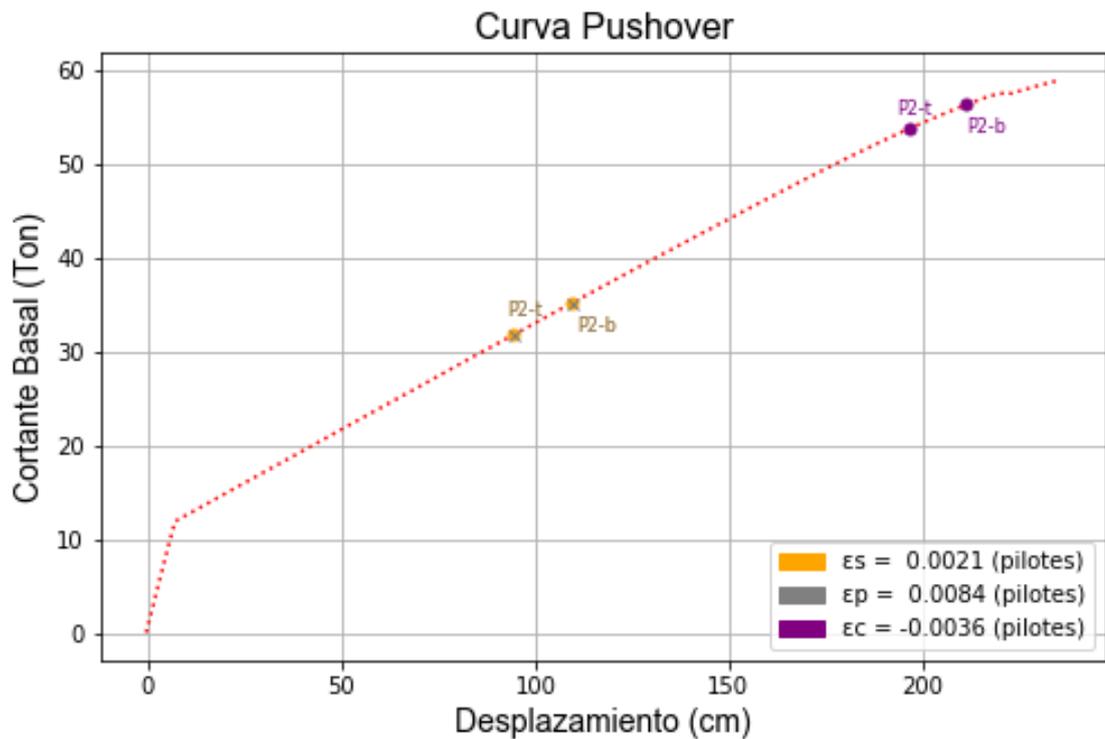


Fig. # 84 - Fluencia en acero (varillas y cables) y falla a compresión de fibra extrema de hormigón en pilote 1, sección superior (t) e inferior (b).

En la Fig. #84 se muestra la primera fluencia en el acero y cables en la sección superior (t) a  $\Delta = 98,99$  cm e inferior (b) a  $\Delta = 124,30$  cm del pilote 1 (P1). Las rotulas de estas secciones se desarrollan a  $\Delta = 172,40$  cm en (t) y a  $\Delta = 190,70$  cm en (b). Se observa que la respuesta es esencialmente del aislador en conjunto con los pilotes (estos en menor proporción). Por esto las rótulas requieren de tanto desplazamiento para presentarse y desarrollarse.



*Fig. # 85 - Fluencia en acero (varillas y cables) y falla a compresión de fibra extrema de hormigón en pilote 2, sección superior (t) e inferior (b).*

En el pilote 2 (P2 – Ver Fig. #85), nuevamente inicia la fluencia del acero en las secciones superior (t) a  $\Delta = 94,20$  cm e inferior (b) a  $\Delta = 109,50$  cm, y la falla a compresión del recubrimiento de hormigón en la sección superior a  $\Delta = 196,40$  cm y en la inferior a  $\Delta = 211,10$  cm. La deformación de los aisladores gobierna en el comportamiento pues el pilote parece desarrollar sus rótulas a desplazamientos muy altos. Esto también se evidencia con el desplazamiento requerido para desarrollar totalmente la rótula plástica en las dos secciones del pilote.

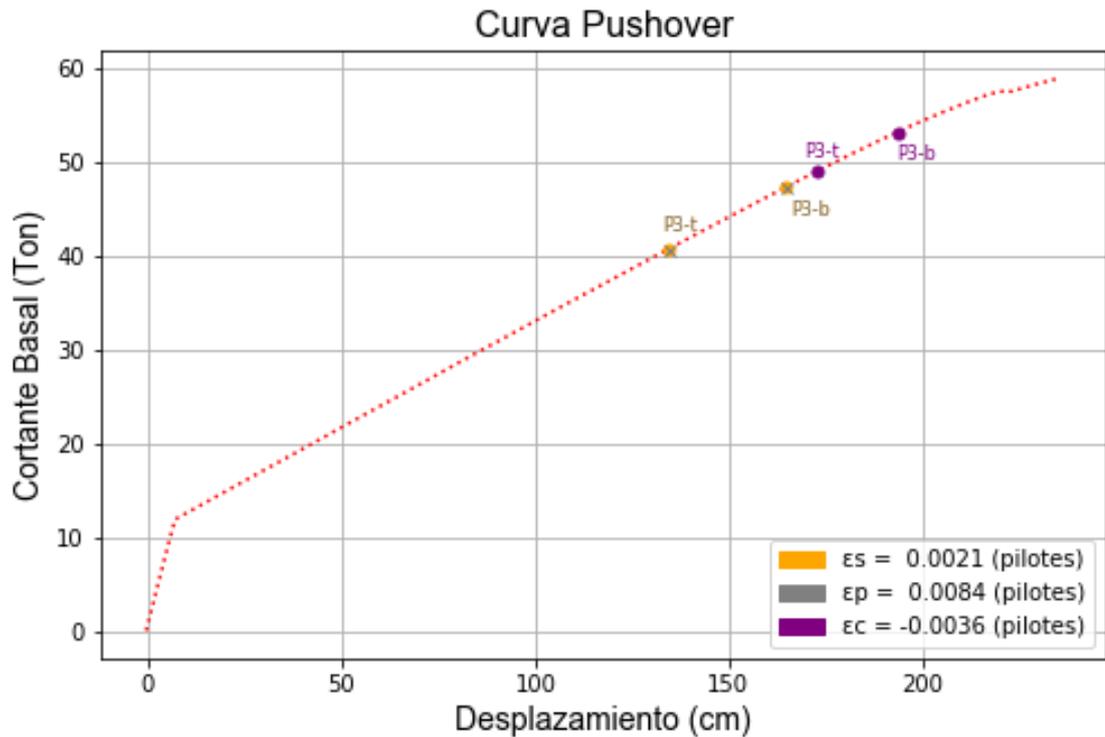
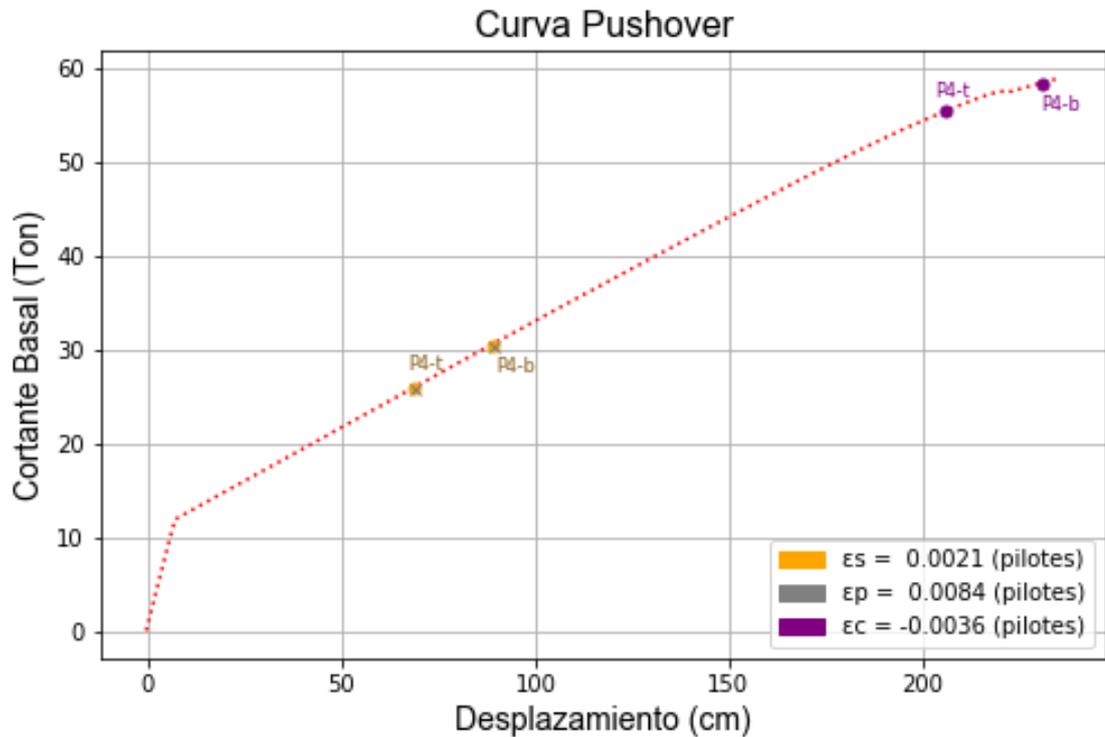


Fig. # 86 - Fluencia en acero (varillas y cables) y falla a compresión de fibra extrema de hormigón en pilote 3, sección superior (t) e inferior (b).

Luego, en el pilote 3 (P3 – ver Fig. #86) se observa que la primera fluencia y el desarrollo de las rótulas no requieren de tanto desplazamiento como en los pilotes 1 y 2. La primera fluencia en el acero de la sección superior (t) se da a  $\Delta = 134,20$  cm y en la sección inferior (b) a  $\Delta = 164,80$  cm. Las rótulas se desarrollan en la sección superior a  $\Delta = 172,60$  cm y en la sección inferior a  $\Delta = 193,40$  cm. Sin embargo, estas rótulas se presentan a desplazamientos mayores a los de los pilotes 1 y 2. Se quiere resaltar que este es el último par de rótulas a originarse entre los pilotes.



*Fig. # 87 - Fluencia en acero (varillas y cables) y falla a compresión de fibra extrema de hormigón en pilote 4, sección superior (t) e inferior (b).*

En la Fig. #87 se muestran las rótulas del pilote 4 (P4). La primera fluencia de la sección superior (t) es la primera en presentarse entre todos los pilotes, originándose a  $\Delta = 68,60$  cm. En la sección inferior (b) se da a  $\Delta = 88,80$  cm. Luego, la rótula en la sección superior se desarrolla a  $\Delta = 205,99$  cm y en la inferior a  $\Delta = 230,60$  cm, la cual es la última en desarrollarse entre todas las rótulas. En este caso, las rótulas se originan a desplazamientos mucho menores que los de los pilotes 1, 2 y 3 debido a que el P4 trabaja principalmente a tensión, lo cual facilita la fluencia del acero dulce y los cables de presfuerzo. Nuevamente el desplazamiento necesario para desarrollar totalmente las rótulas plásticas es muy alto.

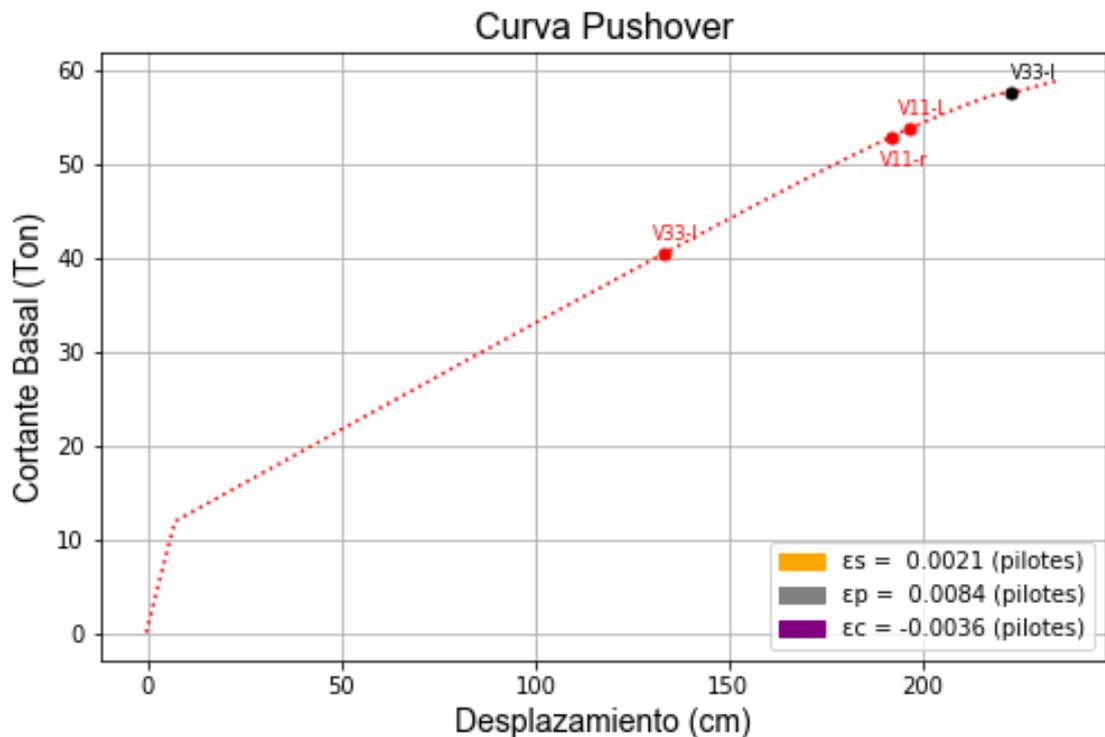


Fig. # 88 – Fluencia en acero y falla a compresión de fibra extrema de hormigón en vigas, sección izquierda (l) y derecha (r).

Se muestra en la Fig. #88 que no se registraron esfuerzos iguales a la fluencia en el acero o esfuerzos últimos en el hormigón de las vigas de la plataforma, lo cual indica que se mantuvieron elásticas durante todo el análisis. Esto sugiere que un objetivo de desempeño en la estructura es satisfecho, el cual implica que la plataforma esté protegida por capacidad. Sin embargo, en este caso las vigas de la plataforma no están exactamente protegidas por capacidad, sino que por el aislamiento provisto ya no trabajan rígidamente conectadas a otros elementos, sino como una viga continua con apoyos simples.

Las vigas de amarre alcanzan fluencia en las varillas de acero, siendo a  $\Delta = 133,20$  cm para la sección izquierda (l) de la viga 33 (V33),  $\Delta = 191,90$  cm para la sección derecha (r) de la viga 11 (V11), y  $\Delta = 196,70$  cm de la sección izquierda (l) de la V11. Se presenta la falla a compresión del hormigón a  $\Delta = 222,99$  cm en la sección (l) de la V33. Se recalca que estas rótulas se producen a desplazamientos muy altos.

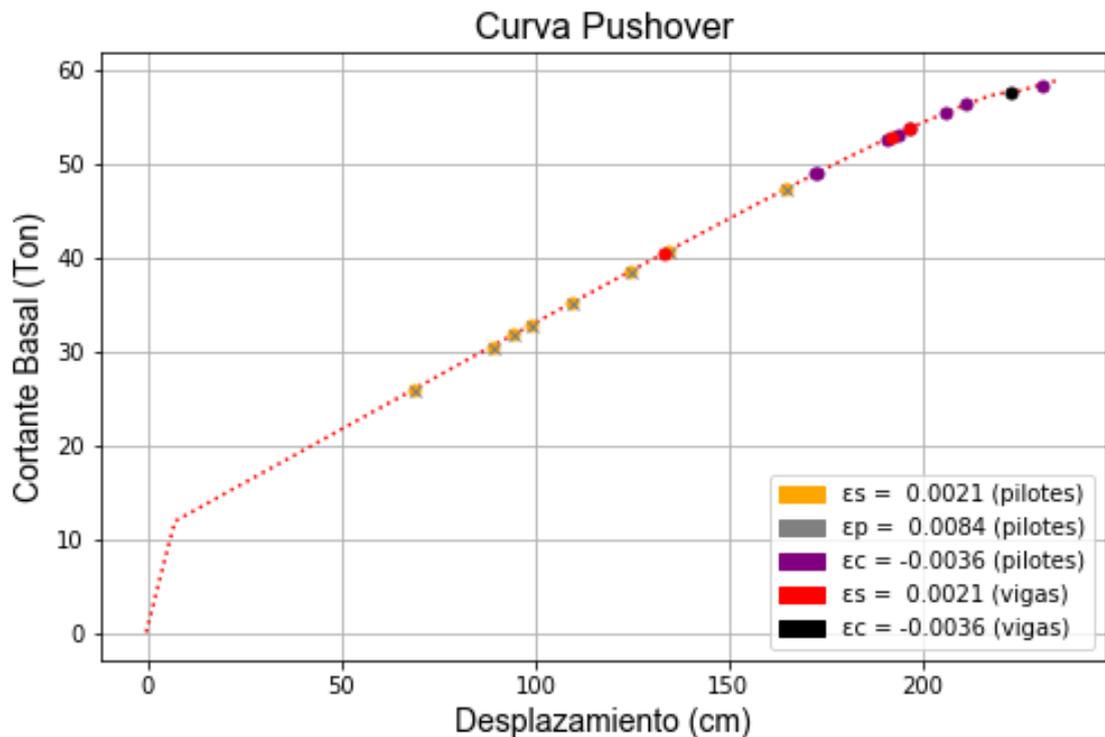


Fig. # 89 - Comportamiento no-lineal de los elementos del muelle totalmente aislado. Primera fluencia dada por el aislador a  $\Delta = 7.14$  cm.

Interpretando el comportamiento provisto por las gráficas mostradas, se determinó que los elementos participan en el mecanismo de disipación de energía una vez que el conjunto aislador-pilotes presente desplazamientos muy altos. Si se cumple o no el objetivo de viga fuerte-columna débil, depende de las demandas sísmicas y los desplazamientos que se produzcan con las mismas.

Adicionalmente, se quiere hacer énfasis en que la primera fluencia real de la estructura corresponde a la fluencia del aislador, generando 12 Ton a  $\Delta = 7.14$  cm, como se muestra en la Fig. #89. La eficacia del aislador se midió de acuerdo a los desplazamientos resultantes de las demandas sísmicas.

### 3.2.4 LIMITES DE DESEMPEÑO

Se delimitaron los límites de desplazamientos para los niveles de Servicio y Control de Daño, de acuerdo a los límites de deformaciones unitarias provistos por el PIANC tal como se hizo con el muelle sin aislación sísmica (Ver sección 2.4 – Criterios de Aceptación de Desempeño).

#### 3.2.4.1 Límite de Servicio

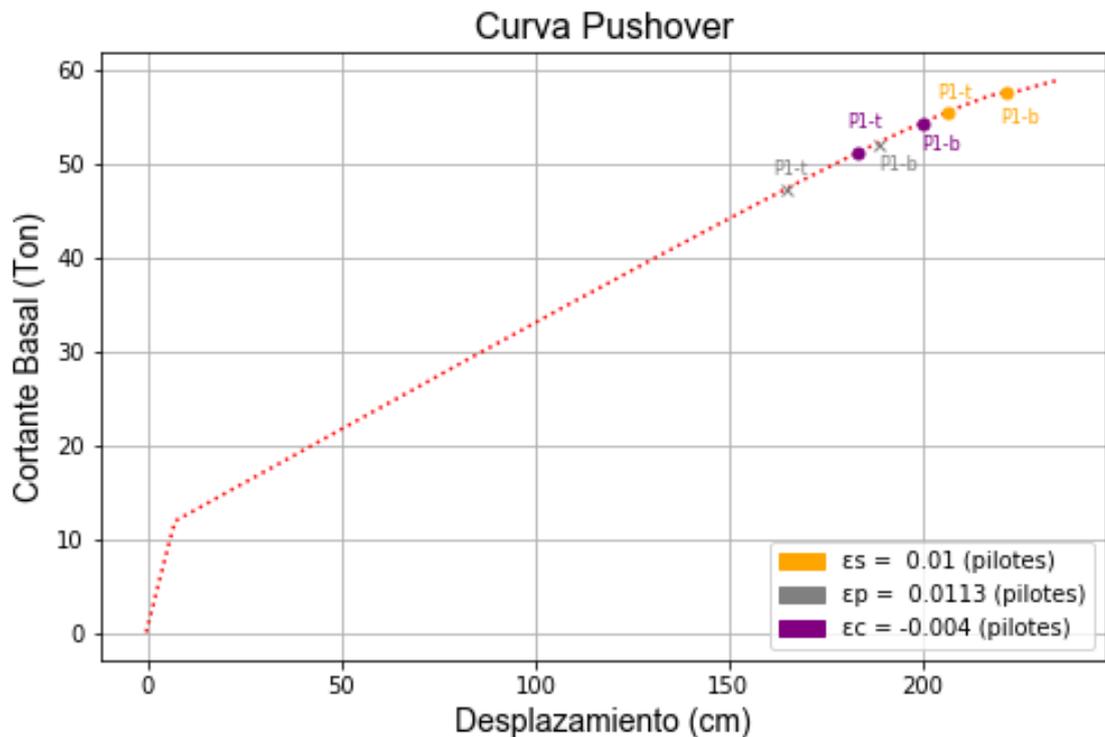


Fig. # 90 - Puntos en curva de capacidad donde se producen deformaciones unitarias iguales a las límite en los materiales de P1.

Inspeccionando el pilote 1 (P1 – Ver Fig. #90), se encontró que en la sección superior (t) los cables de presfuerzo controlan el desempeño a nivel de servicio a un desplazamiento de  $\Delta = 164,60$  cm, luego el hormigón a compresión y finalmente el acero dulce. Ese mismo orden se presenta en la sección inferior (b). Sin embargo, la sección (t) gobierna con respecto a todo el elemento.

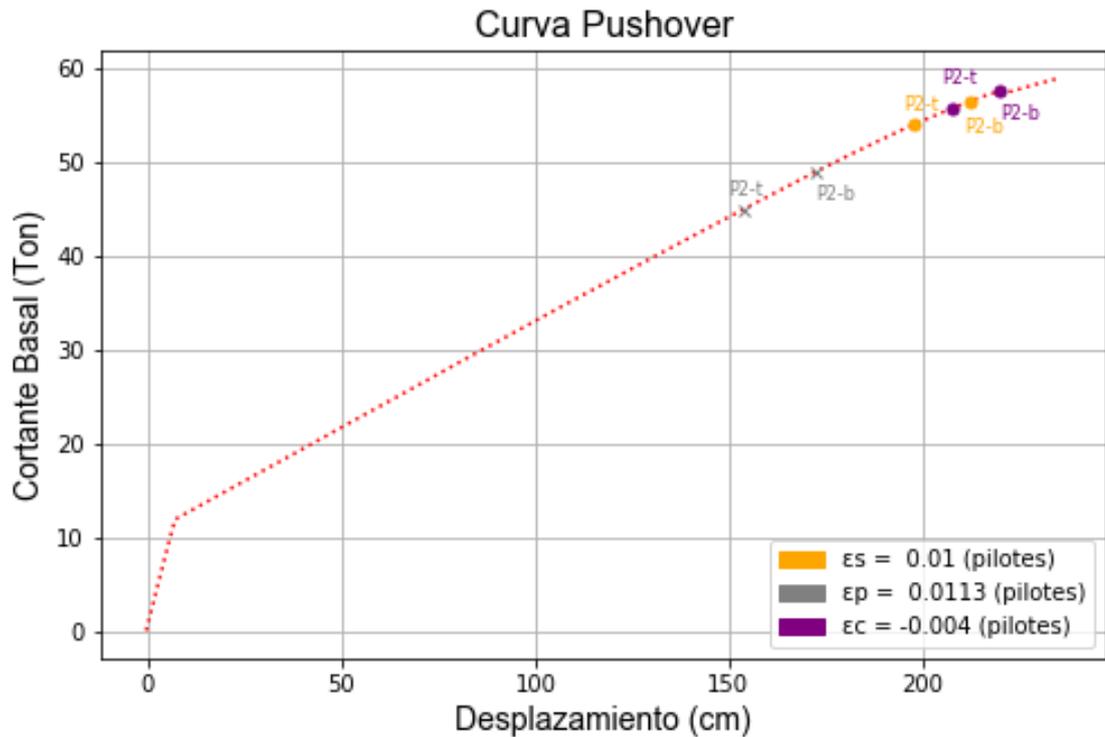


Fig. # 91 - Puntos en curva de capacidad donde se producen deformaciones unitarias iguales a las límite en los materiales de P2.

En la Fig. #91 se muestra que en el pilote 2 (P2) gobierna nuevamente la sección superior (t) con los cables de presfuerzo a  $\Delta = 153,50$  cm. Le siguen el acero dulce y el hormigón de recubrimiento. El mismo orden se da en la sección inferior (b).

En la Fig. #92 el pilote 3 (P3) tiene en la sección superior (t) al recubrimiento de hormigón como material que controla el límite de desempeño en servicio a  $\Delta = 182,90$  cm, siguiéndole los cables de presfuerzo y luego el acero dulce. Esto se da porque (como fue explicado en la sección 2.4.2.1), el elemento recibe una deformación a compresión impuesta por la deformación del pilote 4 que trabaja a tensión. La sección inferior presenta una tendencia similar con respecto al orden de materiales críticos. Nótese que la sección (b) es la última en la que se origina una rótula entre todos los pilotes.

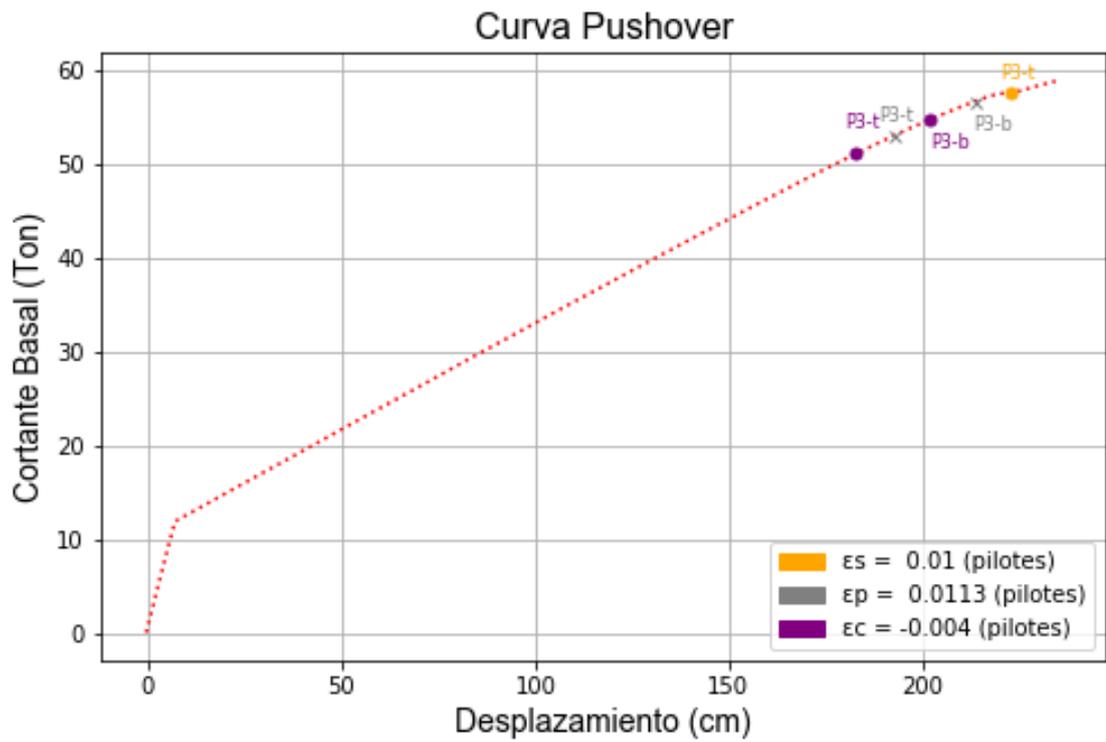


Fig. # 92 - Puntos en curva de capacidad donde se producen deformaciones unitarias iguales a las límite en los materiales de P3.

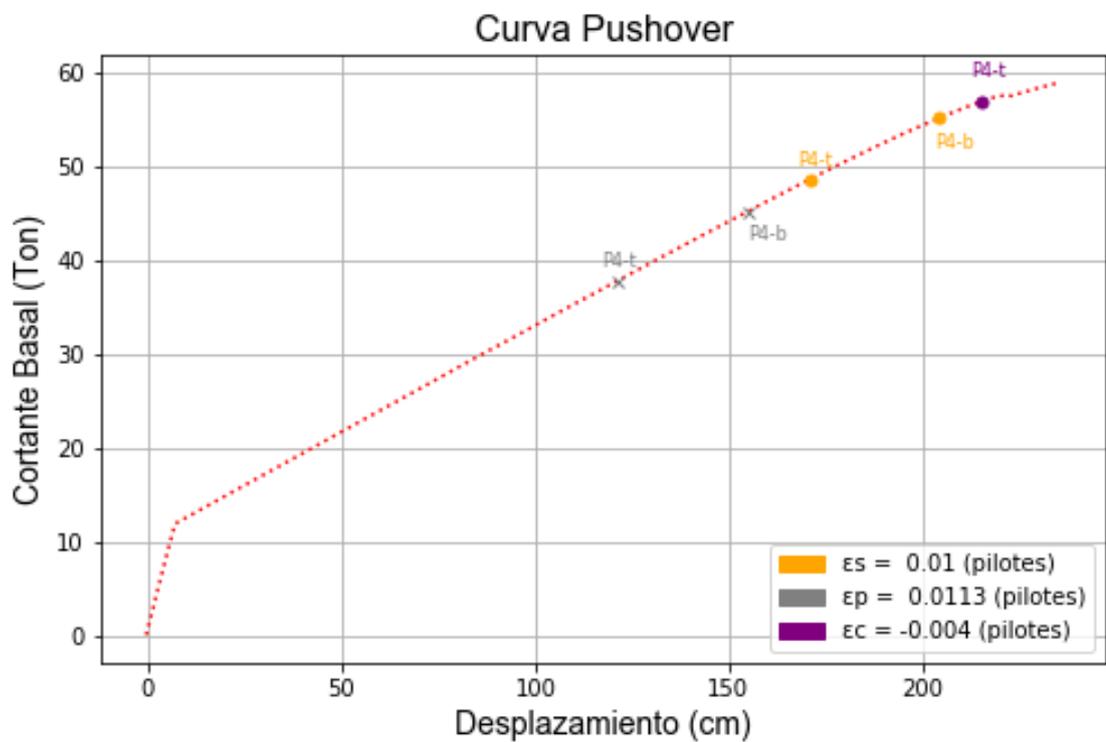


Fig. # 93 - Puntos en curva de capacidad donde se producen deformaciones unitarias iguales a las límite en los materiales de P4.

En el pilote 4 (P4 – Ver Fig. #93), se reporta que en la sección superior (t) controlan los cables de presfuerzo a  $\Delta = 120,90$  cm, siguiéndole el acero de refuerzo y luego el recubrimiento de hormigón. Lo mismo parece suceder en la sección inferior a unos desplazamientos superiores, aunque no se registra si el hormigón alcanza su límite de deformación unitaria hasta el desplazamiento medido. Esta medición se realizó hasta aproximadamente 235,5 cm debido a que ya no se pueden obtener más datos en el programa, probablemente por inestabilidad en la estructura (a este punto ya se han desarrollado algunas rótulas y los aisladores se han desplazado una cantidad importante).

Nótese que la sección (t) del P4 es la primera sección en superar el límite de Servicio entre todos los pilotes, por lo que es la que controla el estado de servicio en la estructura. Entonces el límite de desplazamientos al nivel de desempeño de servicio se determinó como  $\Delta = 120,90$  cm.

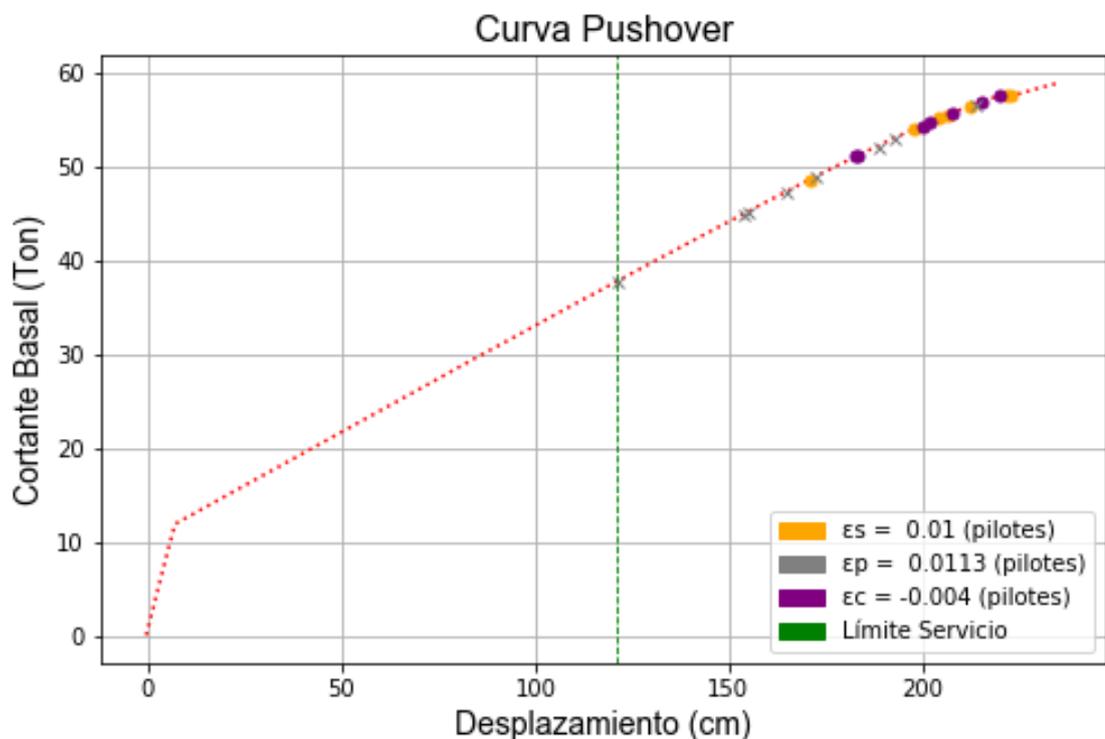


Fig. # 94 - Desplazamiento límite de desempeño a nivel de Servicio para muelle con plataforma totalmente aislada.  $\Delta = 120,90$  cm.

Tabla # 30 – Comparación entre límites de servicio de cada pilote.

Elemento	Desplazamiento (cm)	Material que controla	Sección que controla
P1	164,60	Cables de presfuerzo	Superior
P2	153,50	Cables de presfuerzo	Superior
P3	182,90	Recubrimiento de hormigón	Superior
P4	120,90	Cables de presfuerzo	Superior

### 3.2.4.2 Límite de Control de Daño

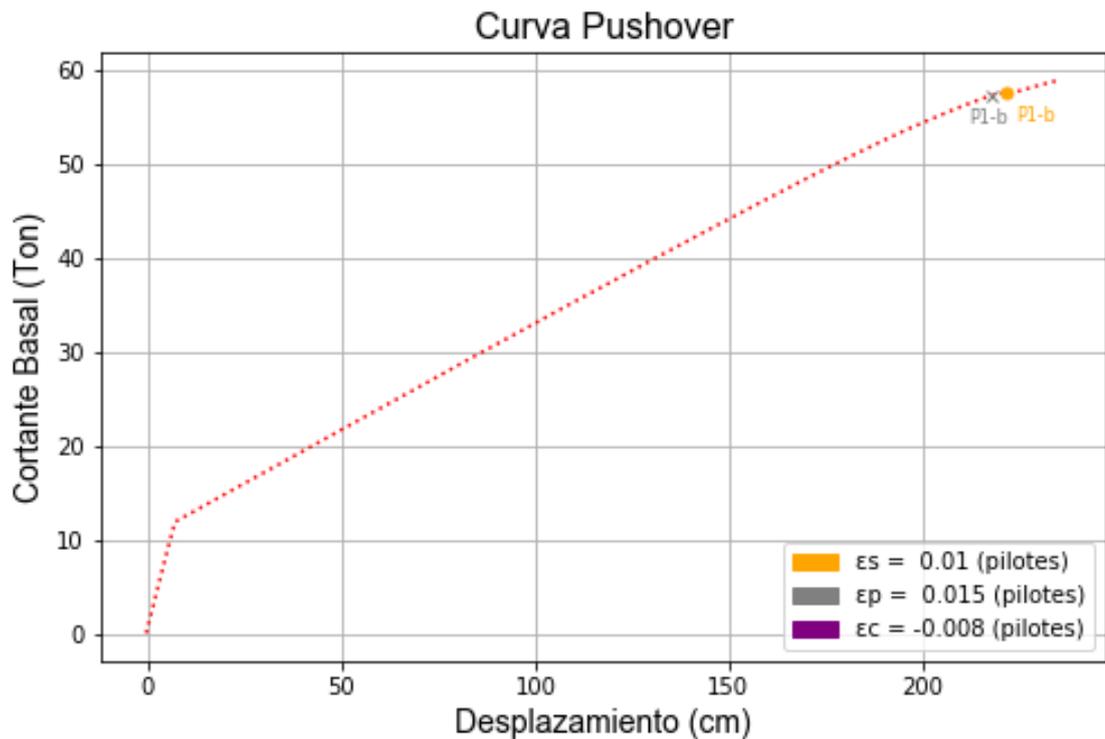
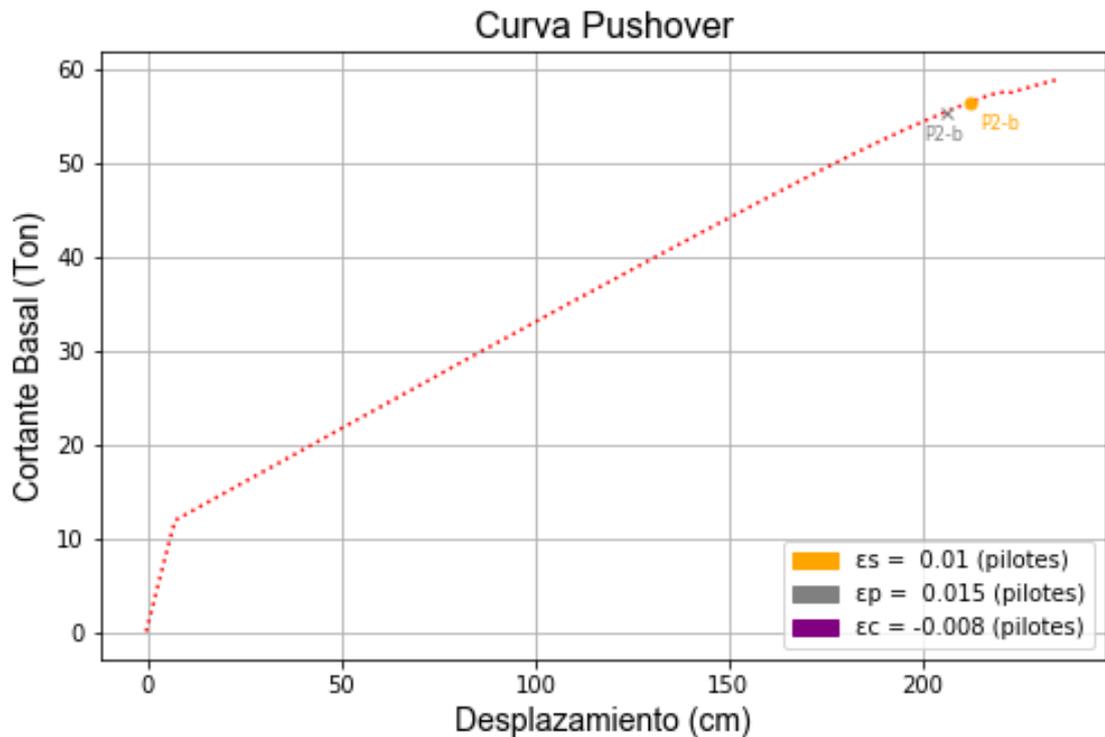


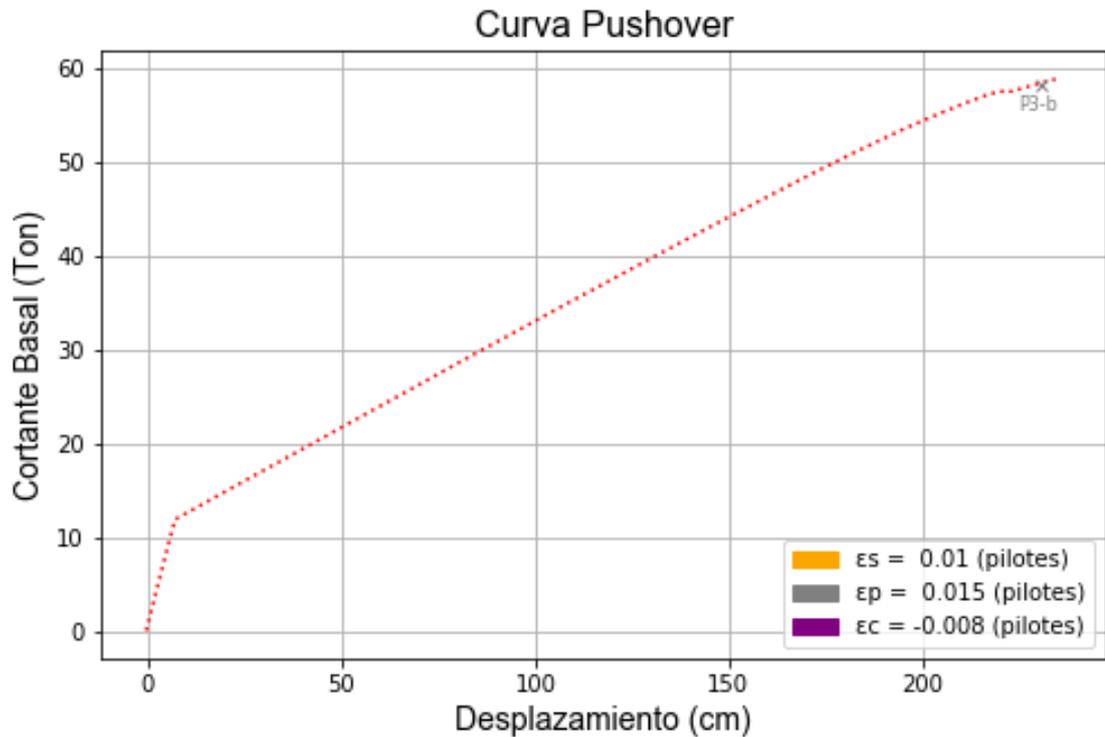
Fig. # 95 - Puntos en curva de capacidad donde se producen deformaciones unitarias iguales a las límite en los materiales de P1.

En la Fig. #95 se muestran los desplazamientos a los que los materiales de la sección inferior (b) del pilote 1 (P1) llegan a sus respectivos límites, donde controla el cable de presfuerzo a  $\Delta = 217,49$  cm, y luego el acero dulce. El hormigón en la sección inferior y los materiales de la sección superior (t) no se muestran debido a la capacidad de generar información del modelo.



*Fig. # 96 - Puntos en curva de capacidad donde se producen deformaciones unitarias iguales a las límite en los materiales de P2.*

Se observa en la Fig. #96 que en la sección inferior (b) del pilote 2 (P2), gobiernan los cables de presfuerzo a  $\Delta = 205,70$  cm, mientras que el acero dulce le sigue. Nuevamente, el hormigón y los materiales de la sección superior (t) no se pudieron registrar.



*Fig. # 97 - Puntos en curva de capacidad donde se producen deformaciones unitarias iguales a las límite en los materiales de P3.*

El pilote 3 (P3 – Ver Fig. #97) sólo registró la excedencia del límite de desempeño en los cables de presfuerzo de la sección inferior (b) a  $\Delta = 230,30$  cm. Otros materiales, tanto de esta sección como de la sección superior (t) no pudieron ser registrados.

Nótese que el comportamiento de este pilote es similar al de la estructura sin aislación bajo la revisión de excedencia de límites al nivel de Control de Daño, pues controla el cable de presfuerzo por tener un límite de deformaciones unitarias más restrictivo. Otro factor importante a considerar es que la rotación (uplift) ya no se da precisamente en la plataforma, sino a nivel de las vigas de amarre, pero a desplazamientos medidos mayores que en el caso de la estructura sin aislación. Esto es causado esencialmente porque los aisladores desarrollan fuerzas resistentes bajas a altas deformaciones, lo cual permite que la plataforma se desplace sin transmitir fuerzas importantes a la subestructura, evitando la rotación en esta zona hasta cierto punto.

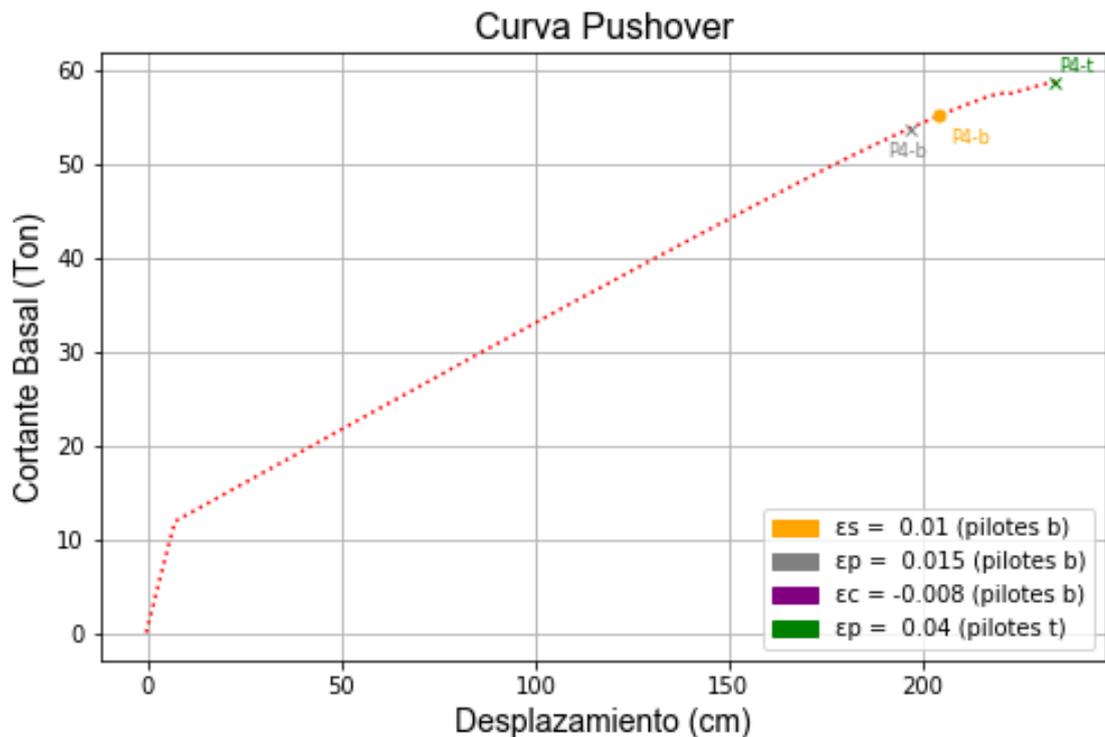


Fig. # 98 - Puntos en curva de capacidad donde se producen deformaciones unitarias iguales a las límite en los materiales de P4.

El pilote 4 (P4) muestra en la Fig. #98 que gobiernan nuevamente los cables de presfuerzo de la sección inferior (b) a  $\Delta = 196,60$  cm, siguiéndole el acero dulce. Luego en la sección superior (t) se registró una excedencia en los límites de desempeño en los cables de presfuerzo, mas no en el resto de materiales. La presencia de este punto en la sección t se da debido a que el elemento trabaja principalmente a tensión para este sentido de la carga lateral, lo cual facilita que los esfuerzos en el acero sean altos. También hay que considerar que los cables estaban pretensados, y los límites de deformaciones unitarias en dicho material son más restrictivos que en el resto de materiales.

Al comparar los desplazamientos a los que ocurren las deformaciones unitarias límite en los materiales de las secciones de cada pilote, se obtuvo el desplazamiento máximo para el cual la estructura cumple con los requisitos de desempeño a nivel de Control de Daño.

Tabla # 31 – Comparación entre límites de control de daño de cada pilote.

Elemento	Desplazamiento (cm)	Material que controla	Sección que controla
P1	217,49	Cables de presfuerzo	Inferior
P2	205,70	Cables de presfuerzo	Inferior
P3	230,30	Cables de presfuerzo	Inferior
P4	196,60	Cables de presfuerzo	Inferior

Se obtuvo que el límite de desplazamientos para el nivel de Control de Daño es  $\Delta = 196,60$  cm.

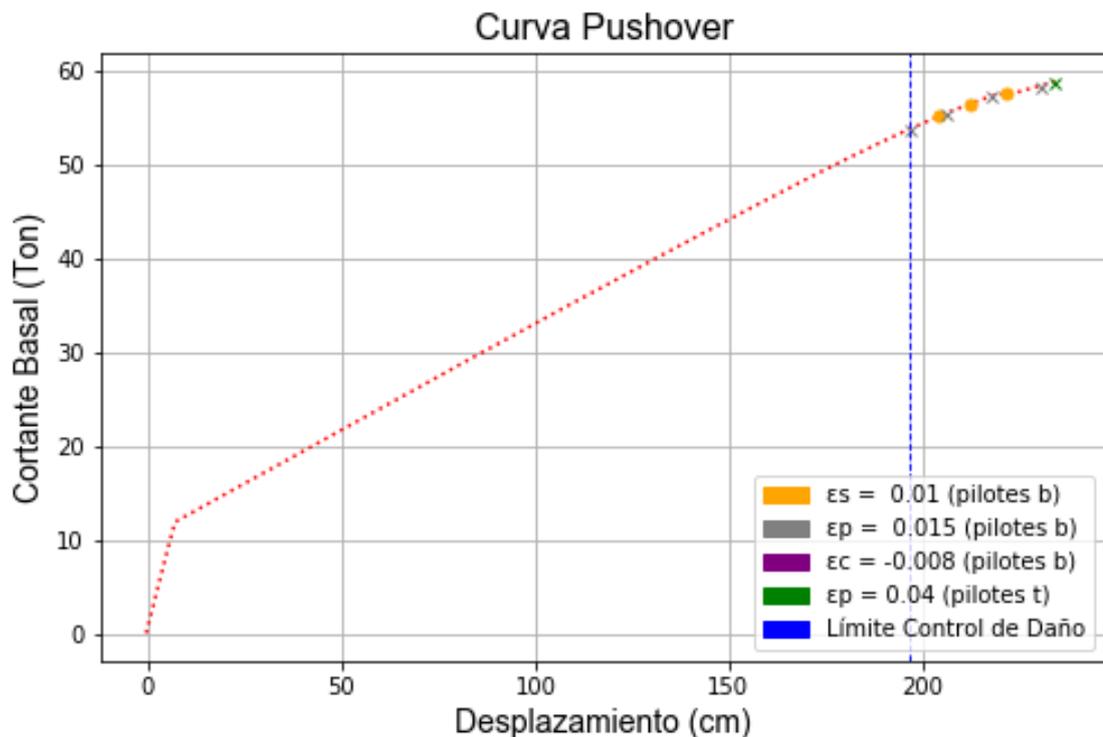


Fig. # 99 - Desplazamiento límite de desempeño a nivel de Control de Daño para muelle con plataforma totalmente aislada.  $\Delta = 196,60$  cm.

En base a estos resultados, se definieron los desplazamientos límite calculados para los niveles de desempeño evaluados, los cuales se pueden observar en la Fig. #100.

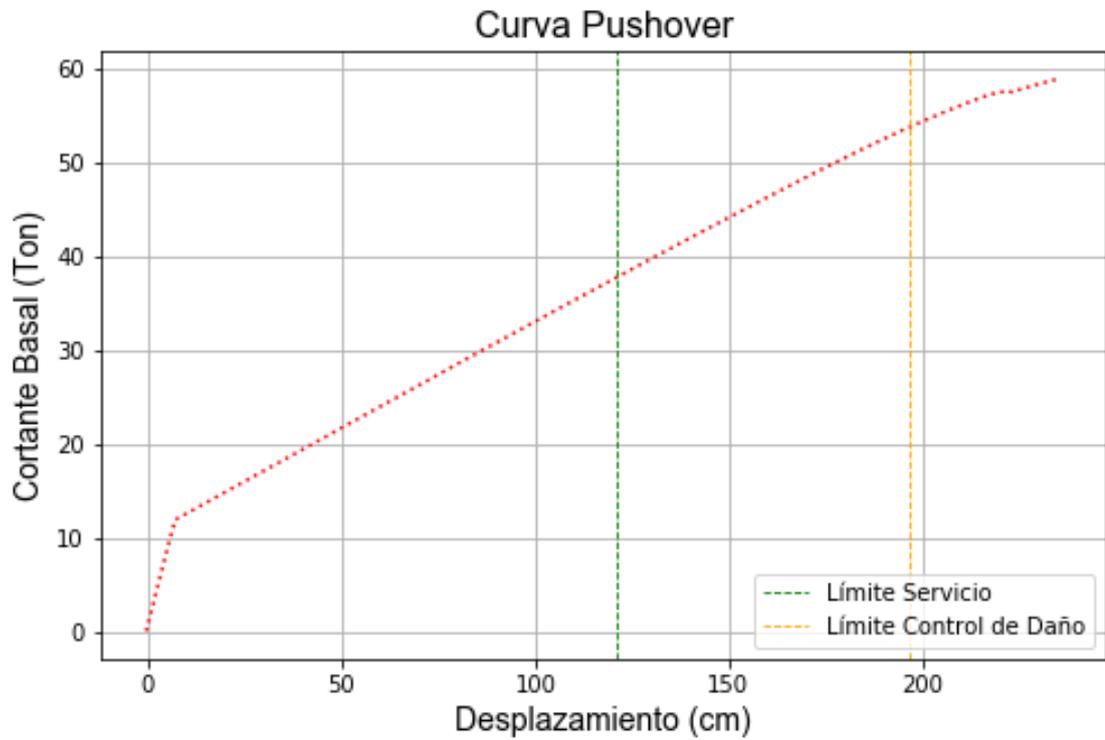


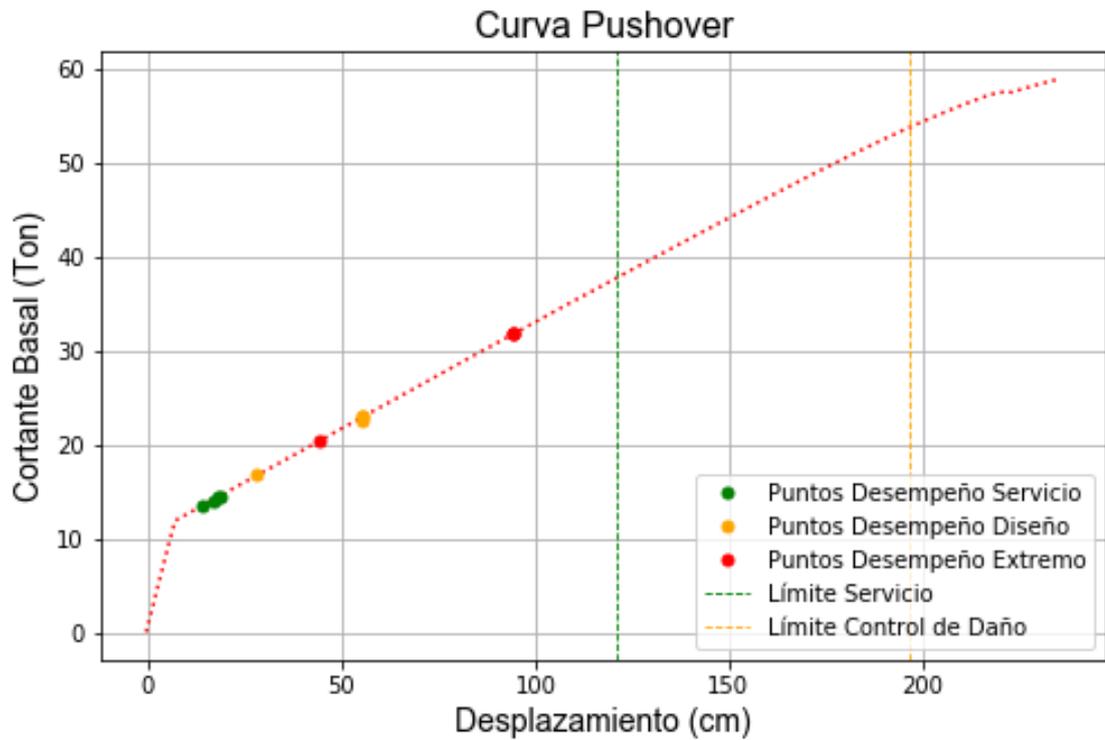
Fig. # 100 - Límites de desplazamientos para distintos niveles de desempeño en curva Pushover, 120,90 cm para Servicio y 196,60 cm para Control de Daño.

### 3.2.5 DESEMPEÑO DEL MUELLE CON PLATAFORMA TOTALMENTE AISLADA

Para la determinación del desempeño del muelle con plataforma totalmente aislada, se utilizaron los límites de desplazamiento encontrados en la sección anterior y se compararon con los puntos de desempeño obtenidos bajo los métodos descritos en la sección 2.6 y la demanda sísmica correspondiente a la sección 2.5. Cabe recalcar que de los parámetros en la sección 2.6.1 se ajustó el periodo elástico a  $T_0 = 1,23$  s.

Los puntos de desempeño obtenidos para los distintos métodos se muestran en los anexos. A continuación, se muestra la curva de capacidad del muelle

con plataforma totalmente aislada con los respectivos puntos de desempeño calculados y con los límites de desempeño obtenidos.



*Fig. # 101 - Resultado de comparación entre puntos de desempeño y límites en muelle con plataforma totalmente aislada. Hay cumplimiento en todos los niveles de desempeño.*

Observando la Fig. #101 todos los puntos de desempeño (demanda de sismo de servicio, diseño y extremo) son menores al límite de desplazamientos para el nivel de desempeño de servicio, lo cual implica que la estructura con sistema de aislación sísmica satisface los requisitos de operatividad especificados para el dicho nivel, tanto con el sismo de servicio como con el sismo extremo. Obsérvese que la fuerza generada en el desplazamiento máximo de la estructura es de 31,70 Ton (a  $\Delta = 94,80$  cm), la cual es ligeramente mayor a lo propuesto en el pre-diseño de los aisladores (30 Ton) pero igualmente menor al límite de fuerzas para el nivel de servicio (33,7 Ton). Esto implica que el procedimiento de pre-diseño de los aisladores resultó preciso y efectivo con respecto al control de fuerzas a transmitir en la estructura.

Tabla # 32 - Resumen de comparación de desempeño a varios niveles.

Método	Servicio		Diseño		Extremo		Límite	Estado
	Vb (Ton)	$\Delta$ (cm)	Vb (Ton)	$\Delta$ (cm)	Vb (Ton)	$\Delta$ (cm)	$\Delta_{\text{máx}}$ (cm)	
<b>ASCE 41-13 – Mét. Coef.</b>	13,41	14,20	16,71	28,54	20,31	44,85	120,9	<b>OK</b>
<b>FEMA 440 A (ADRS)</b>	14,49	19,10	22,90	56,00	31,70	94,80	120,9	<b>OK</b>
<b>FEMA 440 B (MADRS)</b>	14,38	18,70	22,92	56,00	31,70	94,80	120,9	<b>OK</b>
<b>FEMA 440 C (LOCUS)</b>	13,83	17,50	22,56	55,85	31,70	94,80	120,9	<b>OK</b>

Adicionalmente, se puede observar que la implementación de aisladores en toda la plataforma permite que no se genere daño estructural significativo en el muelle para cualquier evento sísmico menor o igual al sismo extremo con  $T_r = 2500$  años.

Interpretando el comportamiento inelástico de la estructura, para el sismo máximo se desarrollará fluencia en los cables y acero dulce de la sección superior del P2 y las dos secciones críticas del P4. Sin embargo, las deformaciones unitarias desarrolladas no son lo suficientemente altas como para que excedan los requerimientos en el nivel de desempeño a Servicio, lo cual implica que su reparación puede llegar a ser no importante o nula, y no afectará la continuidad en la operación del muelle, por lo cual la inelasticidad producida es aceptable.

Para el desplazamiento máximo de los aisladores, las vigas se mantuvieron elásticas, por lo que para eventos sísmicos iguales o menores al sismo extremo los objetivos de desempeño se cumplen satisfactoriamente, consiguiendo no sólo que los límites de deformaciones unitarias sean menores a lo exigido, sino que las vigas no participen en el mecanismo de disipación de energía.

Técnicamente hablando, el mecanismo viga fuerte – columna débil no se presenta debido a que la respuesta esencialmente la controla la deformación del conjunto de aisladores. Esto se puede verificar revisando los desplazamientos concurrentes de la plataforma o aisladores, y de la subestructura (sistema vigas de amarre – pilotes):

- $\Delta_{\text{plataforma}} = 94,80 \text{ cm}$
- $\Delta_{\text{subestructura}} = 7,00 \text{ cm}$

Lo que implica que la deformación de los aisladores realmente es 87,80 cm, produciendo una fuerza resistente de 10,62 Ton por aislador o 31,87 Ton en total. Comparando el desplazamiento de la subestructura contra el de los aisladores, este representa menos del 10% del mayor, lo cual según el autor es aceptable e indica que el sistema de aislación es eficiente.

Finalmente se comparó la carga de atraque con los niveles de desempeño obtenidos para esta propuesta estructural. Se obtuvo lo mostrado en la Fig. #102.

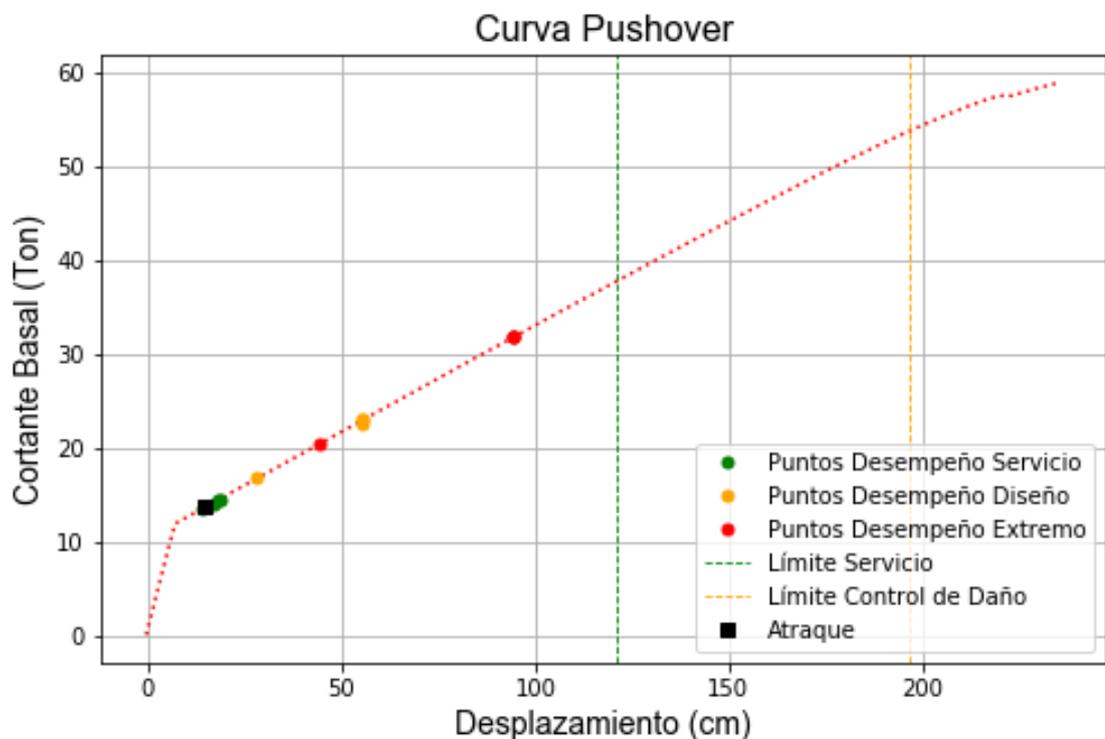


Fig. # 102 – Comparación entre niveles de desempeño sísmico y carga de atraque del muelle con plataforma totalmente aislada.

La magnitud de la carga de atraque sobre el pórtico se definió en la sección 2.6.1, de 13,75 Ton, y en este caso superando la primera fluencia de la estructura ( $\Delta_{\text{atraque}} = 14,60 \text{ cm} > \Delta_{\text{primera fluencia}} = 7,14 \text{ cm}$ ). Sin embargo, como la primera fluencia es del aislador, en realidad no se presenta daño estructural en los elementos del muelle, lo cual se puede verificar revisando la primera

fluencia de los pilotes ( $\Delta = 68,60$  cm, ver sección 3.2.3.1). Por esto, el sistema estructural propuesto es adecuado para resistir cargas operacionales, aunque requiere de revisiones de deriva lateral.

Se obtuvo de la sección 2.6 que el muelle no debe superar deflexiones laterales superiores a  $h/200$  para cargas de atraque, lo cual resulta en  $1400/200 = 7$  cm. Debido a que el desplazamiento por atraque es de 14,60 cm, la rigidez no es adecuada. Sin embargo, esto puede modificarse cambiando la trayectoria de esfuerzos o carga, desviando el atraque directamente hacia los pilotes y vigas de amarre en vez de la plataforma, o modificando las propiedades del aislador teniendo precaución con que no se pierdan los beneficios encontrados para sollicitaciones sísmicas.

### **3.3 MUELLE CON PLATAFORMA LOCALMENTE AISLADA**

Se realizó el análisis no-lineal de una solución alternativa a la disposición de aisladores sísmicos en toda la plataforma, la cual consiste en colocar uno o varios aisladores en ciertos nudos plataforma-pilote, manteniendo en el resto de nudos una conexión rígida y monolítica entre el pilote y la viga de la plataforma. En esta solución, se propone que los pilotes y vigas debajo de los aisladores se mantengan elásticos, mientras que el resto de pilotes disipen energía a través de daño estructural en conjunto con los aisladores, trabajando como sistema en paralelo. En principio, la plataforma se debe mantener elástica para sismos fuertes, a través de un mecanismo viga fuerte-columna débil con los pilotes que estén rígidamente conectados, y a través de una aislación local de rigidez en los nudos donde se encuentren los aisladores.

#### **3.3.1 DESCRIPCIÓN DEL MODELO**

Se colocó un aislador debajo del nudo extremo derecho, apoyado sobre los pilotes P3 y P4 conectados por una viga de amarre V33. Se ajustó la inclinación del P3 para brindar más rigidez a la subestructura y mejorar la eficacia del aislador. Los pilotes P1 y P2 se conectan rígidamente a las vigas de la plataforma y se removió su inclinación para que se comporten como pilotes verticales.

El aislador sísmico se modeló con resortes semi-rígidos cuyas propiedades se describen en la sección 3.1. Su altura es de 50 cm y soporta al extremo derecho de la viga V2 del tablero, la cual se extendió de la misma forma que en el modelo del muelle con plataforma totalmente aislada (Ver sección 3.2.2). La viga V1 permaneció en su posición inicial.

Las dimensiones y configuración de las secciones transversales de los elementos permanecen igual a los del muelle estructurado convencionalmente. Las hipótesis del modelo, los modelos de secciones de fibras y de los materiales, factores de carga, factores de sobre-resistencia y dirección de carga lateral son las mismas que se describieron en el capítulo 2 (Ver sección 2.2 – Descripción del Modelo Estructural).

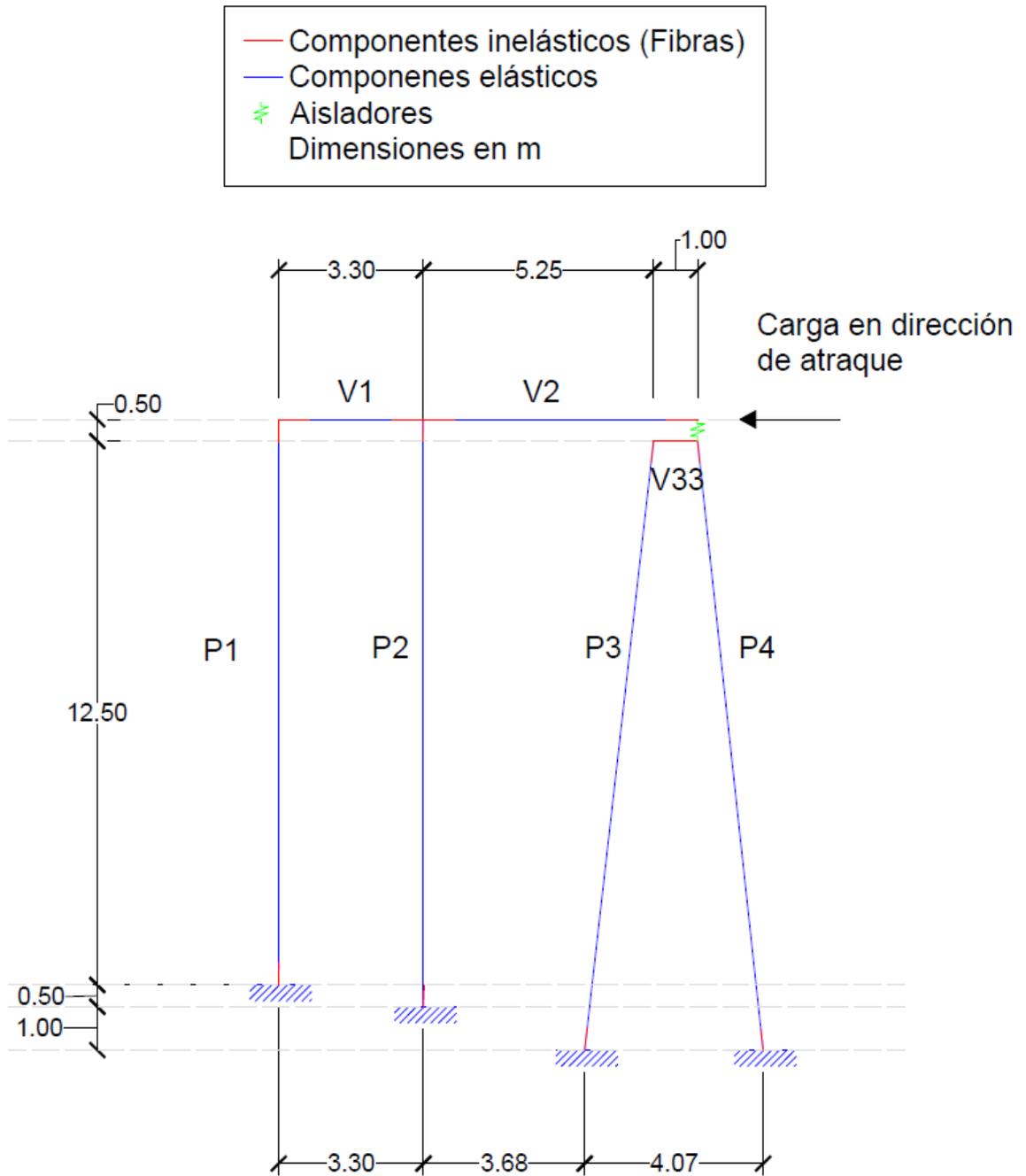
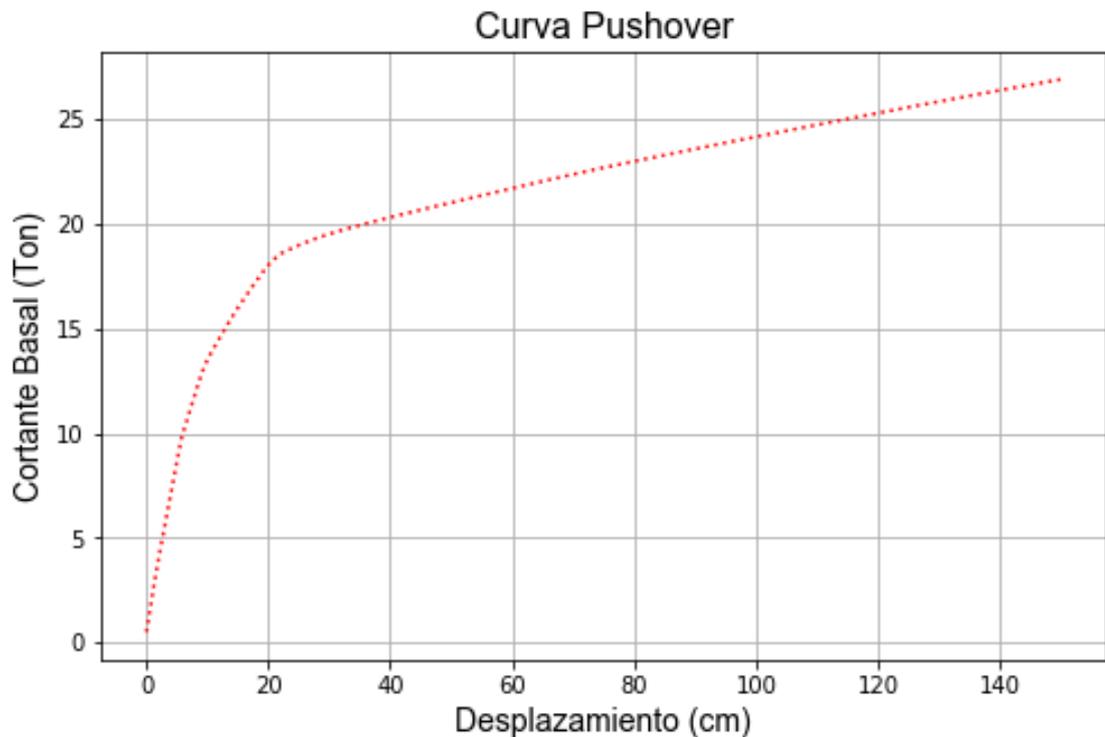


Fig. # 103 - Esquema de modelo estructural de pórtico equivalente con plataforma localmente aislada.

### 3.3.2 DETERMINACIÓN DE LA CURVA DE CAPACIDAD

La curva de capacidad o diagrama Cortante basal vs Desplazamiento para la estructura con la solución propuesta, se desarrolló siguiendo los pasos descritos en la sección 2.3 utilizando el programa OpenSees Py, realizando

los ajustes pertinentes al modelo numérico (coordenadas de nudos, ubicación de aisladores, etc.). La curva de capacidad obtenida fue la siguiente:



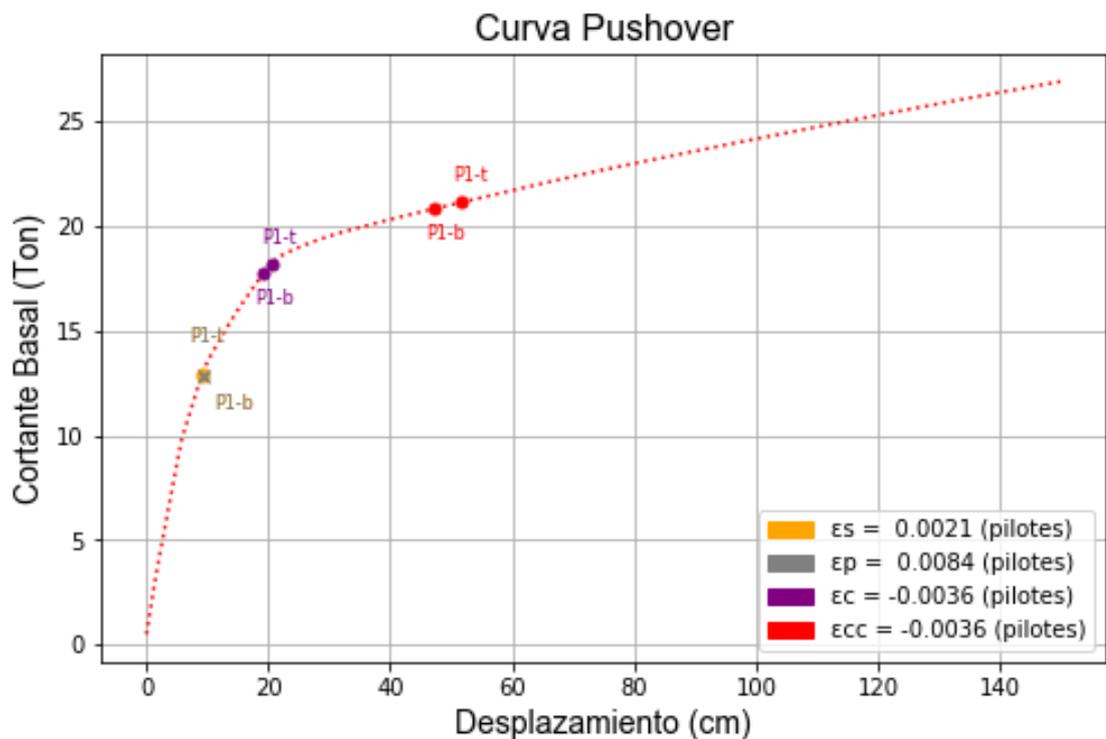
*Fig. # 104 – Curva de capacidad de muelle con plataforma localmente aislada.*

Se observa una mayor rigidez inicial comparada al del muelle con plataforma totalmente aislada, principalmente porque ahora los pilotes tienen influencia directa sobre la rigidez global de la estructura.

### **3.3.3 COMPORTAMIENTO NO LINEAL**

Para esta configuración estructural, se revisaron los mismos puntos importantes de deformación unitaria en las secciones críticas de fibras de los pilotes. Estos puntos nuevamente son: fluencia en acero y cables, y esfuerzo último en el recubrimiento de hormigón.

Se muestra en la Fig. #105 que en el pilote 1 (P1) se desarrolla la primera fluencia en el acero dulce y cables de presfuerzo en las secciones superior (t) e inferior (b) prácticamente al mismo desplazamiento de  $\Delta = 9,00$  cm aproximadamente (9,06 cm en b y 9,26 cm en t). Luego, el recubrimiento de hormigón llega a su esfuerzo último en la sección b a  $\Delta = 19,36$  cm y en la sección t a  $\Delta = 20,56$  cm, donde las rótulas están totalmente desarrolladas. El núcleo empieza a trabajar prácticamente sin recubrimiento a  $\Delta = 47,26$  cm en la sección b y a  $\Delta = 51,86$  cm en la sección b.



*Fig. # 105 - Fluencia en acero (varillas y cables) y falla a compresión de fibra extrema de hormigón en pilote 1, sección superior (t) e inferior (b).*

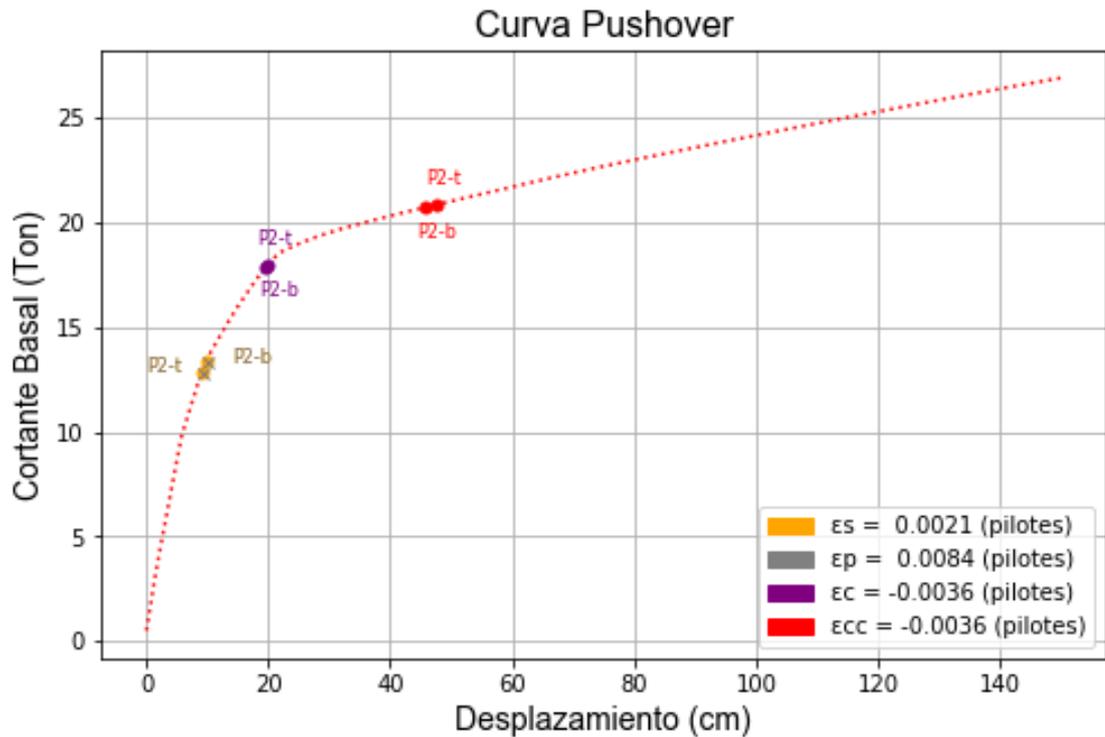


Fig. # 106 - Fluencia en acero (varillas y cables) y falla a compresión de fibra extrema de hormigón en pilote 2, sección superior (t) e inferior (b).

En el pilote 2 (P2 – Ver Fig. #106), se muestra que la primera fluencia en el acero y cables se da en la sección superior (t) a  $\Delta = 9,16$  cm y a  $\Delta = 9,76$  cm en la sección inferior (b). La rótula se desarrolla totalmente (se alcanza el esfuerzo último en el recubrimiento de hormigón) en las secciones b y t a prácticamente el mismo desplazamiento de  $\Delta = 19,80$  cm aproximadamente. Finalmente se alcanza el esfuerzo último en todo el recubrimiento a  $\Delta = 45,86$  cm en la sección b y a  $\Delta = 47,46$  cm en la sección t.

Al continuar con la investigación en el resto de pilotes, se observó que los pilotes P3 y P4 no presentaron deformaciones unitarias mayores o iguales a las correspondientes a las de fluencia o falla en ningún material, lo cual implica que se mantuvieron elásticas durante todo el análisis. Lo mismo sucedió con todas las vigas, tanto de la plataforma como de amarre en subestructura.

Observando el comportamiento global de la estructura, se intuye que la primera fluencia corresponde a la del pilote 1 (P1) en la sección inferior (b) a

$\Delta = 9,06$  cm. Sin embargo, hay que determinar bajo qué desplazamiento se produce la fluencia en el aislador de caucho. Para esto se revisó lo siguiente:

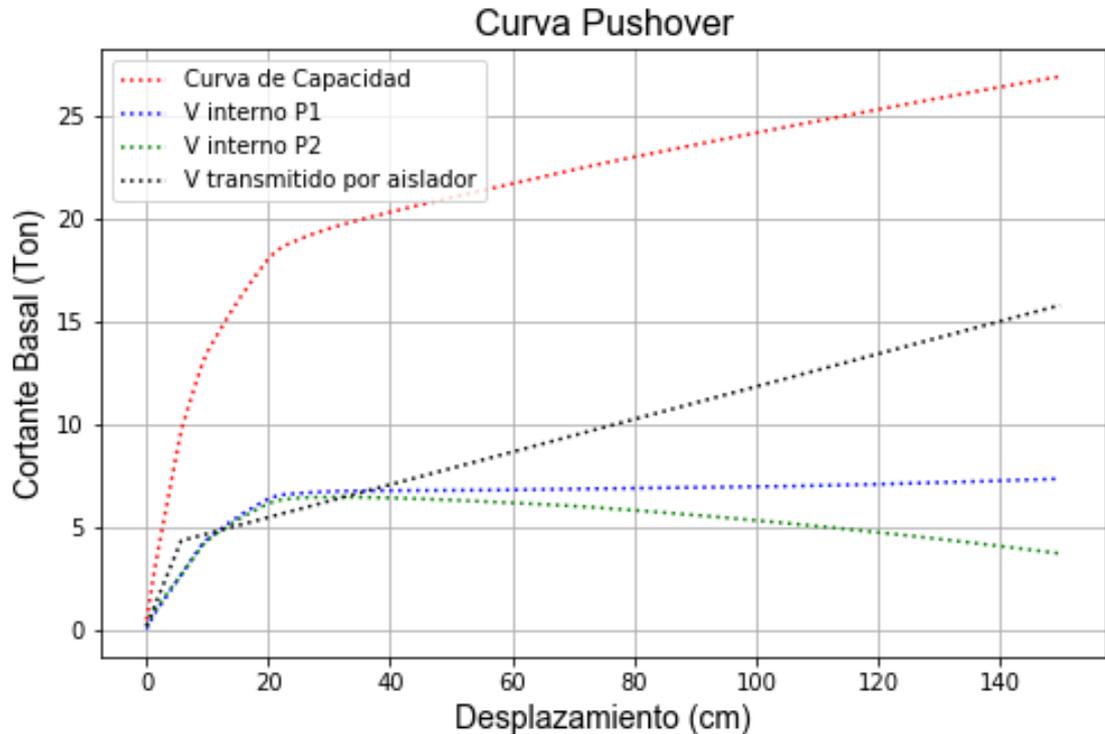
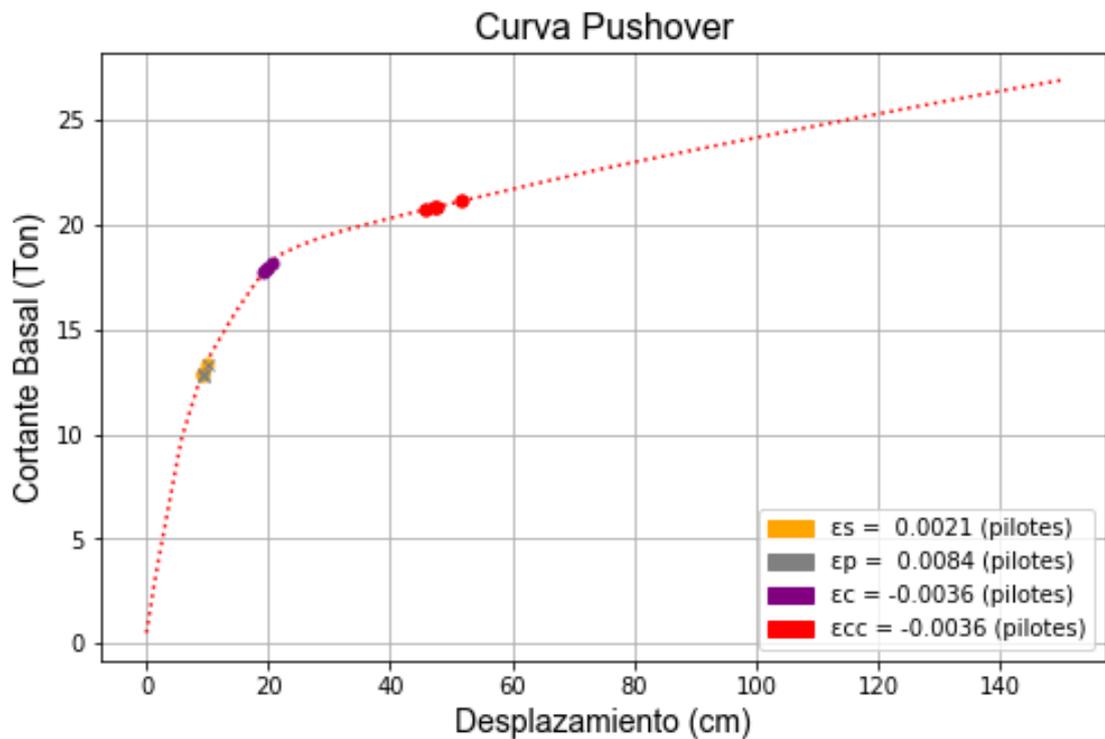


Fig. # 107 – Revisión de fuerzas internas en los elementos resistentes a fuerzas laterales de la estructura.

Se obtuvo el cortante que aporta cada elemento (P1, P2 y aislador) al cortante basal para cada desplazamiento en el análisis. Se observa en las curvas azul y verde que los pilotes P1 y P2 desarrollan fluencia en el acero y cables a los desplazamientos observados anteriormente dentro de la curva de capacidad (alrededor de  $\Delta = 9$  cm) produciendo cortante de 5 Ton cada uno aproximadamente. Luego estos presentan el esfuerzo último a compresión en su fibra extrema del recubrimiento de hormigón a alrededor de  $\Delta = 20$  cm y produciendo cortante de 6,30 Ton cada uno aproximadamente. Sin embargo, se observa que el aislador (curva de cortante transmitido por el aislador a los pilotes P3 y P4) alcanza la fluencia a  $\Delta = 8,86$  cm produciendo un cortante de 4 Ton aproximadamente. Por lo tanto, la primera fluencia de la estructura llega a ser la del dispositivo de aislación sísmica. Consecuentemente, se muestra

que los quiebres en la curva de capacidad se presentan debido a la fluencia del aislador, luego por la fluencia del acero y cables, y finalmente por el esfuerzo último en el recubrimiento del hormigón.



*Fig. # 108 - Comportamiento no-lineal de los elementos del muelle localmente aislado. Primera fluencia dada por el aislador a  $\Delta = 8,86$  cm.*

### 3.3.4 LIMITES DE DESEMPEÑO

Se realizó el mismo procedimiento mostrado en la sección 2.4 a base de los criterios de aceptación, con el fin de definir los desplazamientos límites con los que la estructura satisface los requerimientos de los niveles de desempeño de Servicio y Control de Daño. A continuación, se muestran los resultados.

### 3.3.4.1 Límite de Servicio

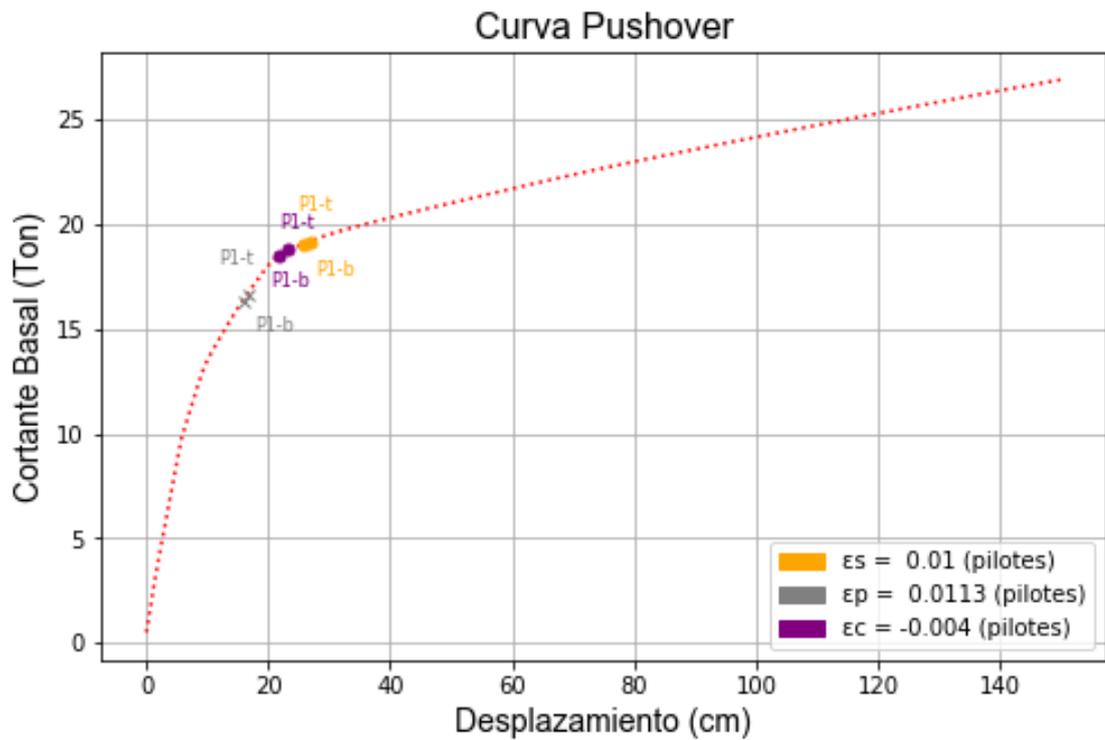
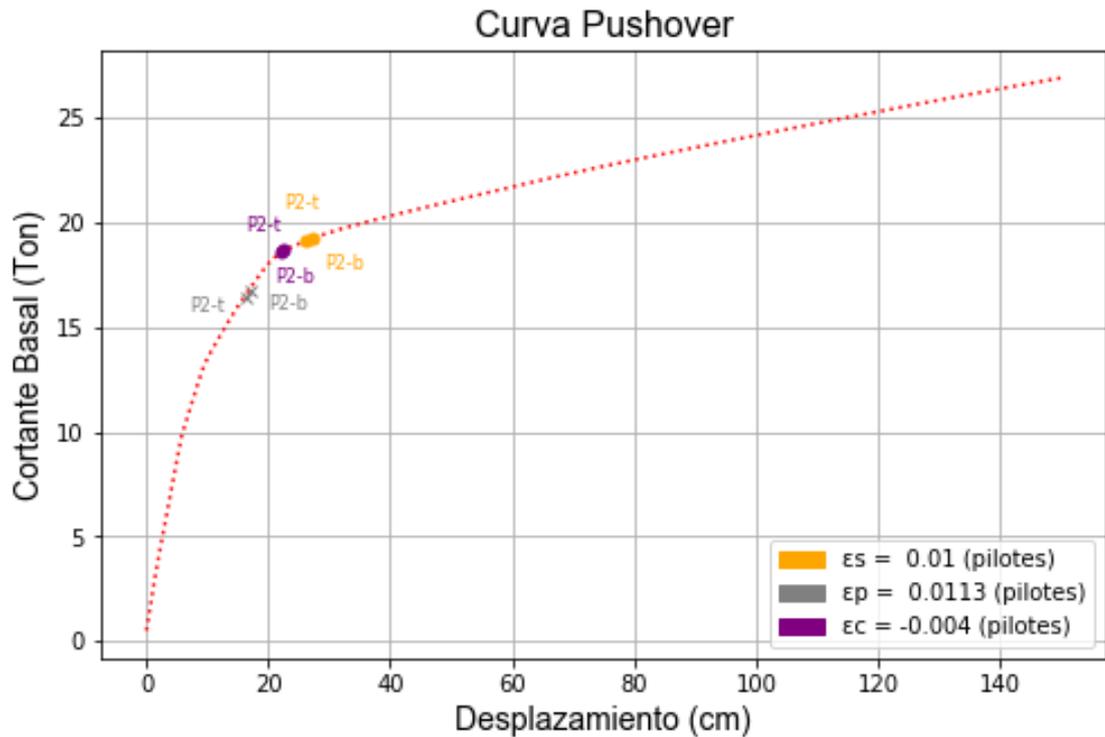


Fig. # 109 - Puntos en curva de capacidad donde se producen deformaciones unitarias iguales a las límite en los materiales de P1.

En la Fig. #109 se muestra que en el pilote 1 (P1) gobierna la sección inferior (b) con los cables de prefuerzo a  $\Delta = 15,96$  cm. Luego son importantes el recubrimiento de hormigón y el acero de refuerzo, en ese orden. La misma tendencia se da en la sección superior (t) pero para desplazamientos ligeramente mayores.



*Fig. # 110 - Puntos en curva de capacidad donde se producen deformaciones unitarias iguales a las límite en los materiales de P2.*

En el pilote 2 (P2 – Ver Fig. #110), se observa que controla el cable de presfuerzo de la sección superior (t) a  $\Delta = 16,16$  cm. Luego gobiernan el recubrimiento de hormigón y el acero de refuerzo. Esto se repite en la sección inferior (b) pero para desplazamientos distintos.

Tal como se explicó en la sección 3.3.3, no se registraron deformaciones unitarias que impliquen plasticidad en los pilotes P3 y P4, por lo cual tampoco se registran deformaciones unitarias mayores a los límites del nivel de Servicio.

Al comparar todos los desplazamientos de cada sección crítica, se encontró que el desplazamiento máximo correspondiente al límite para el nivel de desempeño de Servicio en toda la estructura corresponde al cable de presfuerzo de la sección b del P1.

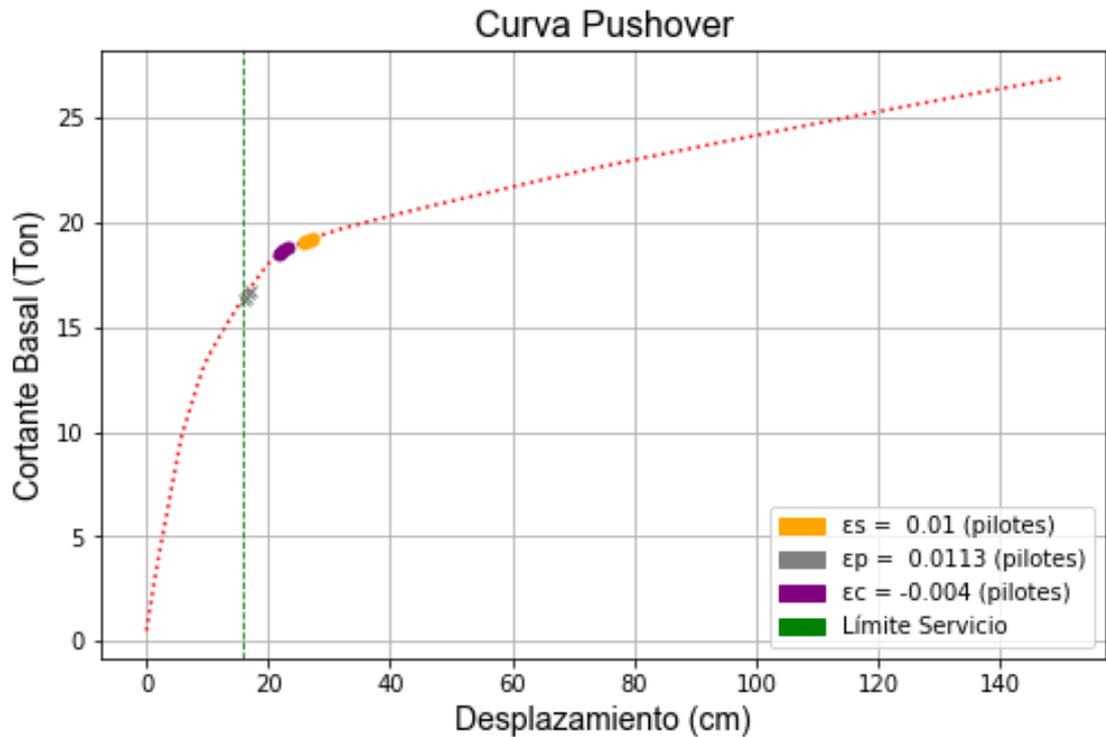


Fig. # 111 - Desplazamiento límite de desempeño a nivel de Servicio para muelle con plataforma localmente aislada.  $\Delta = 15,96$  cm.

Tabla # 33 – Comparación entre límites de servicio de cada pilote.

Elemento	Desplazamiento (cm)	Material que controla	Sección que controla
P1	15,96	Cables de presfuerzo	Inferior
P2	16,16	Cables de presfuerzo	Superior

### 3.3.4.2 Límite de Control de Daño

Para el pilote 1 (P1 – Ver Fig. #112), controlan los cables de presfuerzo en la sección inferior (b) a  $\Delta = 23,46$  cm. Luego controlan el acero de refuerzo y el recubrimiento de hormigón. Se registra excedencia dentro de la sección superior (t) en los cables de presfuerzo y el acero dulce, mas no en el hormigón.

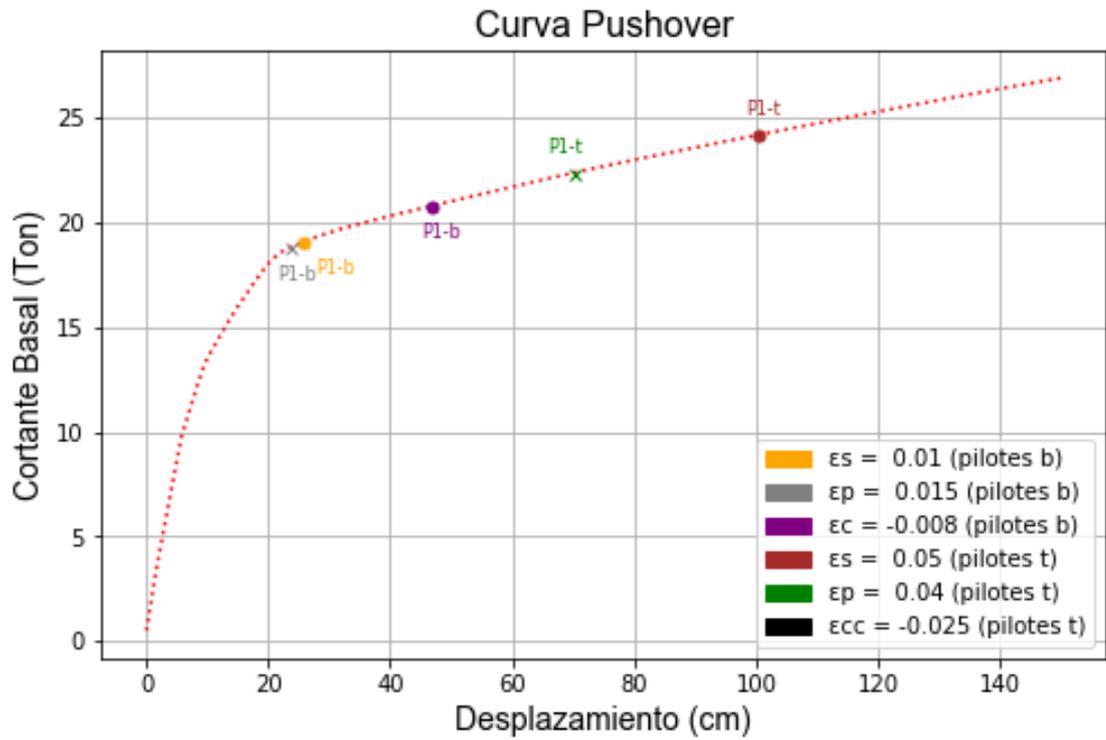


Fig. # 112 - Puntos en curva de capacidad donde se producen deformaciones unitarias iguales a las límite en los materiales de P1.

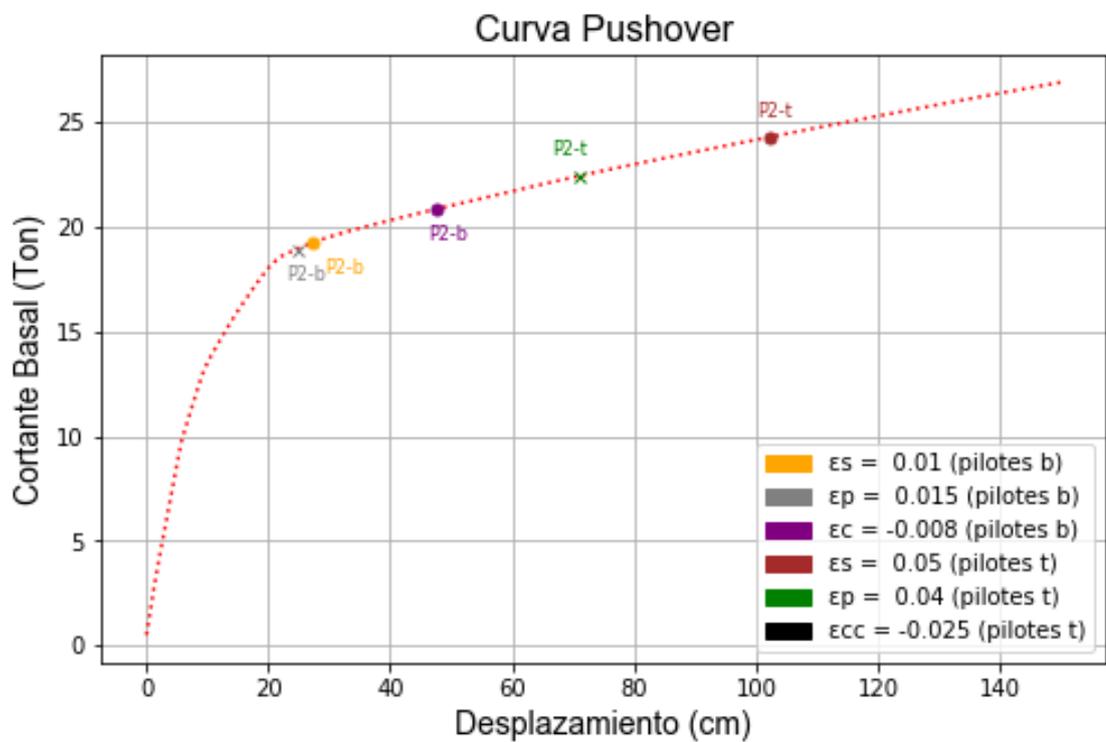


Fig. # 113 - Puntos en curva de capacidad donde se producen deformaciones unitarias iguales a las límite en los materiales de P2.

En el pilote 2 (P2 – Ver Fig. #113) se observa que controla nuevamente el acero de refuerzo en la sección inferior (b) a  $\Delta = 24,86$  cm, luego el acero de refuerzo y el recubrimiento de hormigón, en ese orden. Se registran nuevamente excedencias en los cables y acero dulce de la sección superior (t), pero no del hormigón.

Por lo observado en las gráficas anteriores, se determinó que el material que controla el desempeño a nivel de Control de Daño es el cable de presfuerzo de la sección inferior del P1. Este desplazamiento se definió como límite de desempeño en la estructura bajo el nivel de desempeño correspondiente.

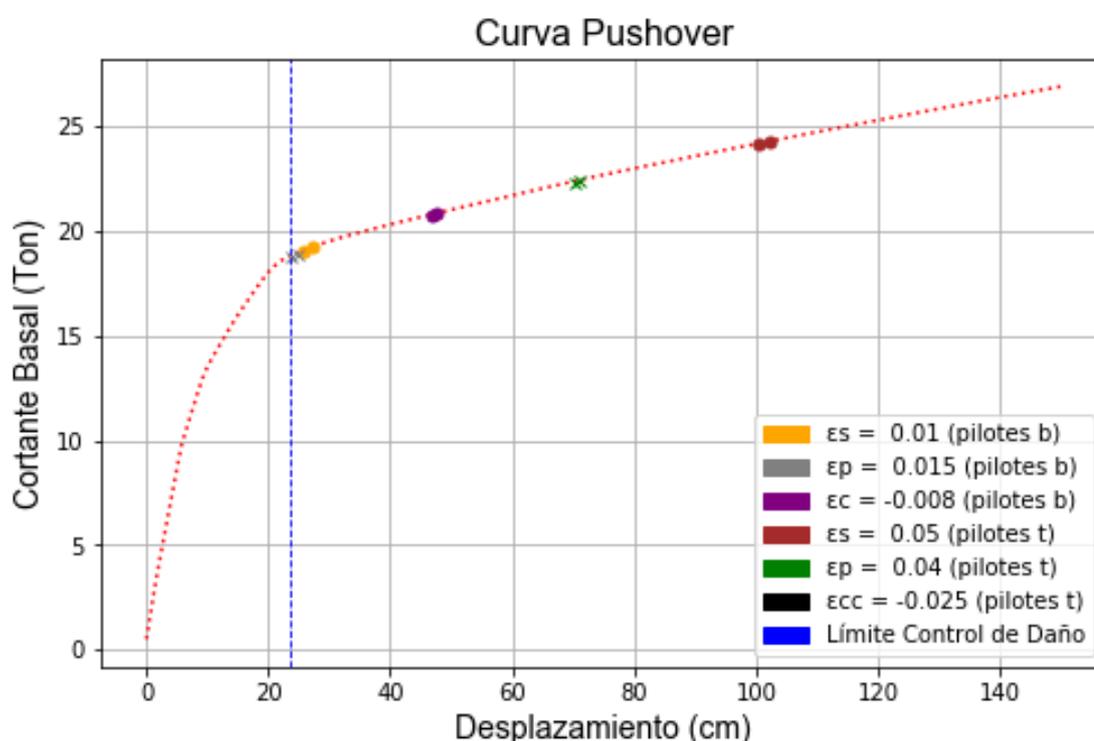


Fig. # 114 - Desplazamiento límite de desempeño a nivel de Control de Daño para muelle con plataforma localmente aislada.  $\Delta = 23,46$  cm.

Tabla # 34 – Comparación entre límites de servicio de cada pilote.

Elemento	Desplazamiento (cm)	Material que controla	Sección que controla
P1	23,46	Cables de presfuerzo	Inferior
P2	24,86	Cables de presfuerzo	Inferior

Con estos datos, se obtuvieron los límites de desempeño para la correspondiente evaluación de la estructura, mostrados en la Fig. #115.

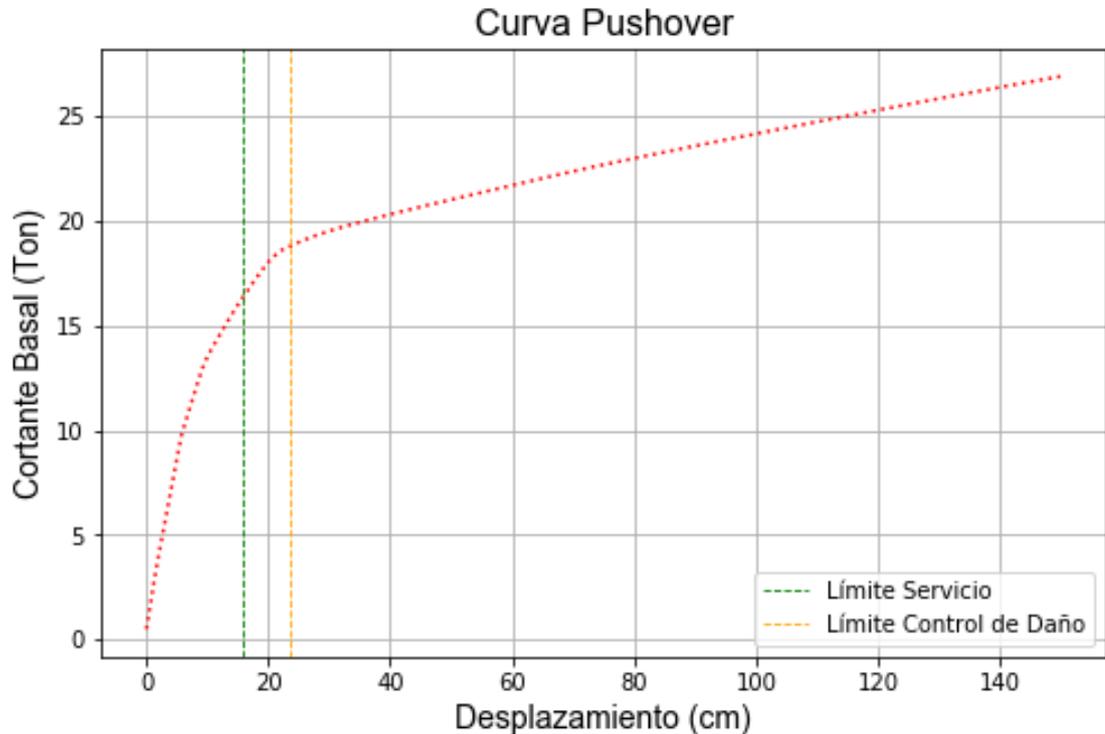


Fig. # 115 - Límites de desplazamientos para distintos niveles de desempeño en curva Pushover, 15,96 cm para Servicio y 23,46 cm para Control de Daño.

### 3.3.5 DESEMPEÑO DEL MUELLE CON PLATAFORMA LOCALMENTE AISLADA

Dentro de esta sección, se evaluará el desempeño del muelle con plataforma localmente aislada al nivel de Servicio y Control de Daño, utilizando los límites de desplazamientos obtenidos en la sección anterior, la demanda sísmica determinada en la sección 2.5 y los métodos de evaluación descritos en la sección 2.6. De los parámetros utilizados para el trabajo provenientes de esta sección, se ajustó el periodo elástico  $T_0 = 1,32$  s.

La obtención de los puntos de desempeño con los distintos métodos de evaluación se detalla en los anexos de este trabajo. La comparación entre los puntos de desempeño y sus respectivos límites de desplazamiento se muestra a continuación, sobre la curva de capacidad de la estructura:

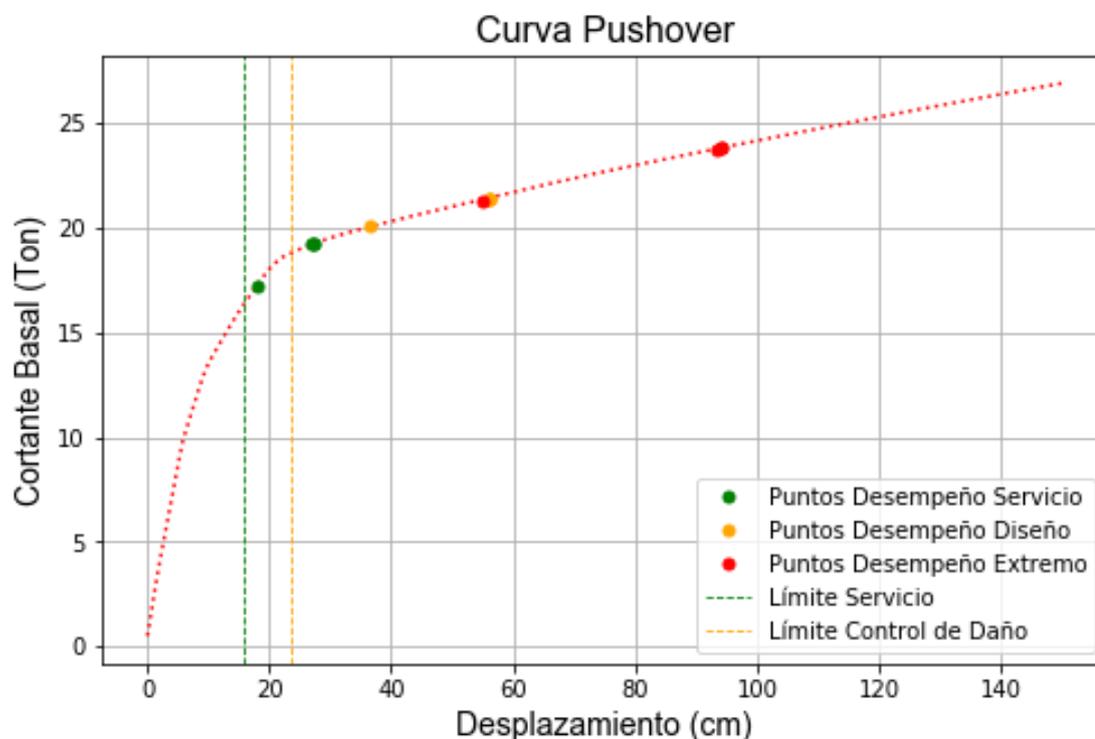


Fig. # 116 - Resultado de comparación entre puntos de desempeño y límites en el muelle con plataforma localmente aislada. No hay cumplimiento en los niveles de desempeño.

Tabla # 35 - Resumen de puntos de desempeño para distintos niveles de sismos en muelle localmente aislado.

Método	Servicio		Diseño		Extremo	
	Vb (Ton)	$\Delta$ (cm)	Vb (Ton)	$\Delta$ (cm)	Vb (Ton)	$\Delta$ (cm)
ASCE 41-13 - Mét, Coef,	16,68	17,92	19,53	36,33	20,78	55,12
FEMA 440 A (ADRS)	18,72	27,20	20,91	56,00	23,30	94,00
FEMA 440 B (MADRS)	18,70	27,10	20,89	56,20	23,30	94,10
FEMA 440 C (LOCUS)	18,70	26,80	20,81	55,90	23,22	93,50

Se observa que los puntos de desempeño del sismo de servicio superan el desplazamiento máximo correspondiente, por lo que el objetivo de desempeño a nivel de Servicio no se satisface.

*Tabla # 36 - Resumen de comparación de desempeño a nivel de Servicio.*

Método	Servicio		Límite	Estado
	Vb (Ton)	$\Delta$ (cm)	$\Delta_{\text{máx}}$ (cm)	
<b>ASCE 41-13 - Mét, Coef,</b>	16,68	17,92	15,96	<b>ERROR</b>
<b>FEMA 440 A (ADRS)</b>	18,72	27,20	15,96	<b>ERROR</b>
<b>FEMA 440 B (MADRS)</b>	18,70	27,10	15,96	<b>ERROR</b>
<b>FEMA 440 C (LOCUS)</b>	18,70	26,80	15,96	<b>ERROR</b>

Adicionalmente, los puntos de desempeño del sismo de diseño superan al desplazamiento máximo correspondiente, indicando que el desempeño a nivel de Control de Daño no es adecuado y no se cumplen con los objetivos estipulados.

*Tabla # 37 - Resumen de comparación de desempeño a nivel de Control de Daño.*

Método	Diseño		Límite	Estado
	Vb (Ton)	$\Delta$ (cm)	$\Delta_{\text{máx}}$ (cm)	
<b>ASCE 41-13 - Mét, Coef,</b>	19,53	36,33	23,46	<b>ERROR</b>
<b>FEMA 440 A (ADRS)</b>	20,91	56,00	23,46	<b>ERROR</b>
<b>FEMA 440 B (MADRS)</b>	20,89	56,20	23,46	<b>ERROR</b>
<b>FEMA 440 C (LOCUS)</b>	20,81	55,90	23,46	<b>ERROR</b>

Sin embargo, hay que acotar que el daño estructural se origina únicamente en las secciones críticas de los pilotes P1 y P2, mientras que los pilotes P3 y P4 debajo del aislador se mantienen elásticos. Lo mismo sucede con la viga de amarre que conecta a estos pilotes (V33) y con las vigas de la plataforma durante todo el análisis, por lo que estos elementos se mantendrán elásticos para cualquier evento sísmico con igual o menor magnitud al sismo extremo ( $T_r = 2500$  años). Esto facilita la mejora de esta solución estructural, pues lo que quedaría de ajustar son netamente los pilotes P1 y P2.

Debido a que la estructura trabaja como un sistema en paralelo (pilotes P1, P2 y aislador), es importante destacar que la implementación del dispositivo de aislación sísmica en 1 de 3 nudos del tablero sólo consigue proteger a los pilotes y vigas debajo del dispositivo y al extremo de la viga de la plataforma que se apoya sobre el dispositivo. Las otras zonas de la viga de plataforma y el resto de estas vigas sufren esfuerzos considerables al estar rígidamente conectadas con los pilotes, pero no superan sus respectivos límites de elasticidad debido a que los pilotes se plastifican primero, produciendo un mecanismo viga fuerte-columna débil efectivo. Esto se facilita por la verticalidad de los pilotes (inclinación nula), pues al estar inclinados como en el caso del muelle convencional, se observó que las vigas producen esfuerzos mayores (Ver sección 2.3.1.2) y por lo tanto tendrían un grado importante de plastificación.

El aislador al proteger al resto de elementos, limitando la fuerza transmitida hacia ellos, genera desplazamientos que naturalmente serán altos y que serán impuestos a los pilotes P1 y P2, obligándolos a generar esfuerzos que los llevarán a producir rótulas plásticas (nótese en la Fig. #107 que a lo que el aislador entra en fluencia, luego se rotulan los pilotes). Sin embargo, este comportamiento no depende de las propiedades del aislador, pues al ser un sistema en serie, la generación de fuerzas internas en los elementos depende de los desplazamientos en la plataforma. Si se selecciona un aislador más rígido o que fluya a desplazamientos mayores, los límites de desempeño no cambiarían porque eventualmente los pilotes se someterán a los desplazamientos que originan sus rótulas plásticas. Lo mismo podría pasar con un aislador más flexible o que fluya a desplazamientos menores. Lo que

realmente varía, es la forma de la curva de capacidad, pues el cortante basal será distinto si tan sólo 1 elemento es distinto.

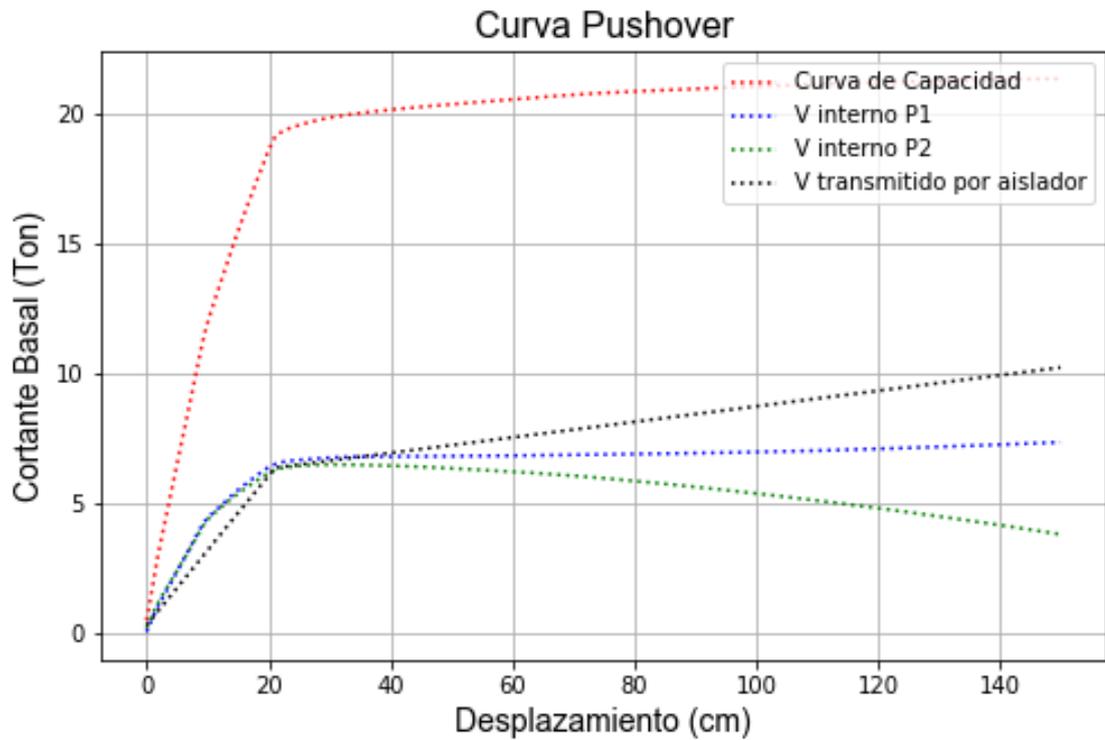


Fig. # 117 – Alternativa de muelle con plataforma localmente aislada con aislador más flexible ( $K = 0,3 \text{ Ton/cm}$  y  $Q = 5,4 \text{ Ton/cm}$ ).

Nótese del ejemplo gráfico en la Fig. #117 que, a pesar del cambio en las propiedades del aislador en el mismo modelo estructural evaluado en esta sección, las curvas de capacidad de los pilotes P1 y P2 son iguales a las de la Fig. #107, que corresponden a la estructura estudiada, obteniendo entonces los mismos límites de desplazamiento para cada nivel de desempeño. Sin embargo, la curva de capacidad sí es distinta, pues la curva del aislador es distinta.

Adicionalmente, se verificó la eficiencia del aislador para el sismo extremo, para lo cual se obtuvieron los desplazamientos concurrentes en los nudos sobre el aislador (plataforma) y debajo (subestructura):

- $\Delta_{\text{plataforma}} = 94,10 \text{ cm}$
- $\Delta_{\text{subestructura}} = 1,73 \text{ cm}$

Lo cual indica que la deformación del aislador es de 92,37 cm. El desplazamiento de la subestructura comparado con el de la plataforma representa un 1,84%, indicando según el autor que el sistema de aislación es muy eficiente.

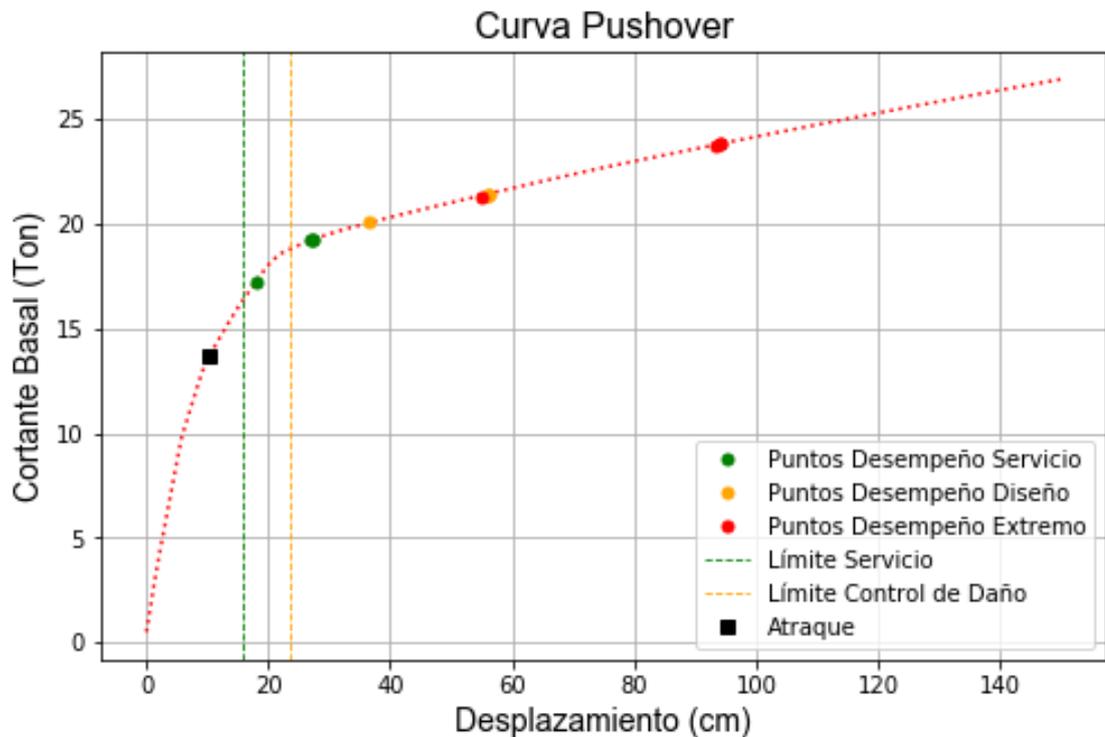
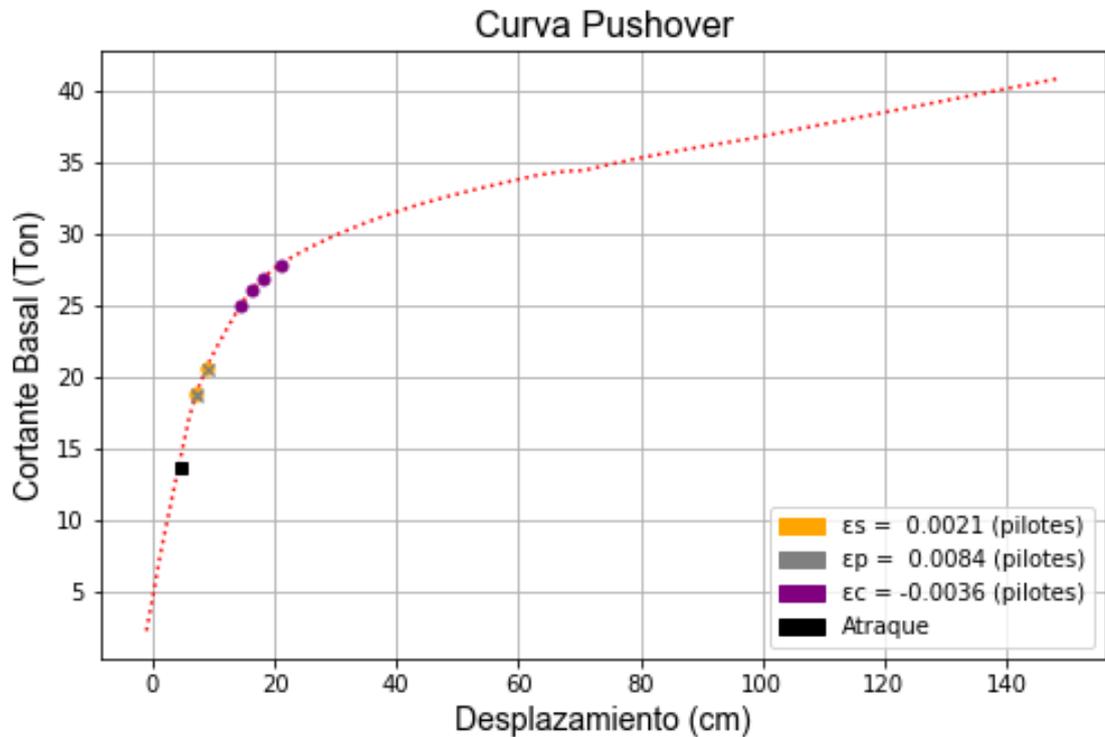


Fig. # 118 - Comparación entre niveles de desempeño sísmico y carga de atraque del muelle con plataforma localmente aislada.

Finalmente, se comparó la carga de atraque con los niveles de desempeño de la estructura (Ver Fig. #118), así como se hizo en las secciones 2.6 y 3.2.5. Se recalca que la magnitud de la carga de atraque sobre el pórtico modelado es de 13,75 Ton. Se observa que la carga de atraque produce daño en los pilotes P1 y P2 ( $\Delta_{\text{atraque}} = 10,46 \text{ cm} > \Delta_{\text{primera fluencia pilotes}} = 9,06 \text{ cm}$ ), además de superar la primera fluencia de la estructura ( $\Delta_{\text{primera fluencia}} = 8,86 \text{ cm}$ ). El daño se concentra en las secciones críticas de cada pilote presentando fluencia en el acero de refuerzo y cables de presfuerzo, lo cual implica que la sección se ha agrietado y está expuesta a agentes externos corrosivos, perjudicando la integridad de los materiales del elemento. Sin embargo, esta deformación será temporal debido a que la embarcación se retirará en su debido tiempo, pero la incógnita es si la duración del estacionamiento de la embarcación es larga

o no. En el caso de que lo sea, deberán tomarse las medidas pertinentes para evitar que los agentes corrosivos afecten al elemento. Una solución es inclinar a uno o a los dos pilotes rígidamente conectados, con el fin de que haya más resistencia a carga lateral, causando que los pilotes presenten agrietamiento a fuerzas mayores.



*Fig. # 119 – Curva de capacidad con puntos importantes en secciones de pilotes P1 y P2 con inclinación, comparados con carga de atraque.*

En la Fig. #119 se muestra la curva de capacidad del modelo estudiado en esta sección, pero con la inclinación de los pilotes P1 y P2 ajustadas de forma tal que tengan la inclinación indicada en el modelo de la sección 2.2. La curva muestra la fluencia del acero de refuerzo, cables de presfuerzo, y esfuerzo último en el recubrimiento de hormigón como se ha tratado en las secciones anteriores. Se observa que ahora la carga de atraque es menor a la carga necesaria para que las secciones de los pilotes incurrieran en el rango inelástico, por lo que esta propuesta sería óptima para los requerimientos operacionales del muelle.

También se considera mejor propuesta por consideraciones de rigidez, pues con los pilotes verticales se obtuvo un desplazamiento por atraque de 10,46 cm el cual es mayor al límite de deriva operacional de 7,00 cm (Ver sección 2.6). Sin embargo, cuando se usan pilotes inclinados el desplazamiento por atraque resulta en 4,30 cm, menor al límite de 7,00 cm y por lo tanto óptimo con respecto a la serviciabilidad de la estructura.

Estos pilotes inclinados pueden funcionar como fusibles, de tal forma que se mantengan elásticos durante cargas de atraque, y produzcan rótulas plásticas durante sismos fuertes al trabajar el paralelo con el aislador. Sin embargo, si esto no es viable o no se encuentra una forma de aumentar la resistencia a carga lateral significativamente, lo mejor es optar por no colocar aisladores sísmicos, pues efectivamente estaría gobernando el diseño por operatividad más que el diseño sísmico, y los aisladores perderían su funcionalidad.

## CAPÍTULO IV

### 4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este capítulo se muestran las conclusiones encontradas en este trabajo de investigación, y las recomendaciones referentes a los problemas observados en el desempeño de las estructuras evaluadas y sus posibles soluciones.

#### 4.1 CONCLUSIONES

Los puntos de desempeño obtenidos tanto por modificación de desplazamiento como por linearización equivalente, demostraron estar en buen acuerdo en el muelle convencional. Sin embargo, en las estructuras con aislación sísmica se obtuvieron desplazamientos que no sólo variaban entre cada método (entre método de coeficientes y el del espectro de capacidad), sino que resultaron en magnitudes muy altas (alrededor de 1 m.) llegando a ser impráctico el diseño físico del aislador y su implementación dentro de la estructura.

Se observó que en general el desempeño de los muelles a nivel de Control de Daño es gobernado por las secciones críticas inferiores de los pilotes. Esto pudiese cambiar si la zona empotrada del pilote no desarrolla fuerzas y momentos similares a las de un apoyo perfectamente empotrado, sino a las de un apoyo articulado. En tal caso, no hubiera momentos muy grandes (en el caso de un apoyo semi-rígido flexible) y la demanda de deformaciones se daría principalmente en la sección superior, probablemente alterando los límites de desplazamiento y mejorando el desempeño en la estructura, pues las reparaciones se enfocarían en zonas de daño identificables y accesibles. Sin embargo, habría que revisar también la variación en su respuesta dinámica, pues desplazamientos mayores también serían de esperarse, así como el daño en las vigas o la posible inestabilidad en la estructura, por lo que habría que proveer de mayor capacidad de deformación a la sección superior y al mismo tiempo asegurar un mecanismo viga fuerte-columna débil.

El desempeño del muelle estructurado convencionalmente no es el adecuado de acuerdo a las evaluaciones realizadas, pues durante los desplazamientos máximos en sismos de servicio se presentaría daño en los cables de presfuerzo cerca la cabeza del pilote P4 (pilote a tensión). Posiblemente este daño no se presente como una rótula plástica, sino como un fusible a fluencia (American Society of Civil Engineers; Coasts, Oceans, Ports and Rivers Institute, 2014, p. 42). Esto implica que en el elemento habrá una pérdida de presfuerzo considerable, más no necesariamente una abertura de grietas significativa por la fluencia en el acero de refuerzo, o el desprendimiento del recubrimiento del hormigón, pues estos se dan a desplazamientos mayores. Sin embargo, estas tensiones excesivas pueden conllevar a un proceso de reparación un poco más exigente en las fisuras visibles, que implica el relleno de las mismas con mortero, lo cual no es deseable porque interrumpe la operatividad continua en la estructura.

Así mismo, durante los desplazamientos máximos en sismos de diseño se presenta un nivel de daño moderado en los cables de presfuerzo cercanos al empotramiento efectivo del pilote P4 (y daño leve en el resto de materiales), que podría perjudicar la integridad del elemento, debido a que los requerimientos en esta zona son a nivel de servicio para este tipo de sismos. Esto si es que se escoge inspeccionar esta zona de los pilotes, la cual está sumergida en agua y enterrada en suelo. Como es común que el daño no se pueda observar en estas zonas, no se ejecutarían reparaciones y posiblemente el acero de refuerzo y cables de presfuerzo eventualmente se vean afectados por corrosión. En efecto, como el daño se produjo en la zona inferior y no en la zona superior, inspecciones netamente visuales pueden reportar incorrectamente el estado real en el muelle.

Aun así, ciertas vigas presentan daño, lo cual no es aceptable para los niveles de desempeño evaluados e implica procesos de reparación complicados. Adicionalmente, se observó que el muelle está apto para soportar cargas de ataque, demostrando que no se presenta daño en ningun elemento estructural.

En el muelle con plataforma totalmente aislada, se observó que se satisface el desempeño a nivel de Servicio y Control de Daño para todos los sismos evaluados, lo que puede traducirse a que la solución es efectiva para cualquier sismo concebido en la práctica, que corresponden a eventos menores al sismo extremo ( $T_r = 2500$  años). No se presentan daños en los pilotes, en las vigas de amarre, ni de la plataforma. La disipación de energía se origina a través de la deformación inelástica del conjunto de aisladores de caucho. Sin embargo, el sistema no es muy eficiente para las máximas cargas de ataque esperadas debido a su alta flexibilidad.

En la evaluación del muelle con plataforma localmente aislada, se demostró que no se cumplen con los requisitos de los niveles de desempeño de Servicio y Control de Daño. Para los desplazamientos máximos en sismos de servicio, se obtuvo que los pilotes P1 y P2 (inicialmente el P1) presentarán rótulas totalmente desarrolladas en sus secciones críticas (las que son cercanas a la cabeza y al empotramiento efectivo) causando fluencia en varillas de acero y cables de presfuerzo, y desprendimiento del recubrimiento de hormigón, lo cual se puede verificar al notar que los desplazamientos obtenidos superan los límites de control de daño. Por lo tanto, la operatividad continua se verá comprometida sustancialmente.

Para los desplazamientos máximos en sismos de diseño se observa que se producen altos desplazamientos en el aislador, y así mismo en los pilotes P1 y P2, los cuales han desarrollado totalmente las rótulas plásticas en sus secciones críticas, y en donde todo el espesor de recubrimiento de hormigón ha fallado y se ha desprendido totalmente. La inelasticidad en los pilotes excede los límites especificados para el nivel de Control de Daño. Por esto, se concluye que las consecuentes reparaciones en los pilotes finalizarán a largo plazo, generando pérdidas económicas en las operaciones del muelle y probablemente problemas de corrosión en el acero de la sección inferior, causados por no examinar estas zonas de la estructura luego de sismos fuertes. Para el sismo extremo, se observa que trabaja únicamente el núcleo de hormigón en conjunto con las varillas y cables de acero, los cuales no presentan falla. Adicionalmente, las cargas de ataque producen daño estructural en las secciones críticas de los pilotes P1 y P2, lo cual no es

aceptable, pues bajo cargas de servicio se requieren elementos que respondan elásticamente. Los demás elementos, tanto vigas de plataforma y amarre como los pilotes P3 y P4, se mantienen elásticos para todas las cargas sísmicas aplicadas y la carga de atraque.

Comparando las zonas a reparar (reparación importantes o no cosméticas) para cada solución estructural evaluada, se tiene que para sismos de servicio:

- En el muelle convencional se requiere la reparación de 1 extremo (superior) de 1 pilote, en total 8 reparaciones en el muelle (por ser 8 pórticos).
- En el muelle con plataforma totalmente aislada no se requiere la reparación de ningún elemento estructural.
- En el muelle con plataforma localmente aislada se requiere la reparación de los 2 extremos (superior e inferior) de 2 pilotes, en total 32 reparaciones.

En cambio, para sismos de diseño:

- En el muelle convencional se requiere la reparación de 1 extremo (inferior) de 1 pilote, y adicionalmente 1 extremo de 1 viga, en total 16 reparaciones.
- En el muelle con plataforma totalmente aislada no se requieren reparaciones en ningún elemento estructural.
- En el muelle con plataforma localmente aislada, se requiere reparar 2 extremos de 2 pilotes, en total 32 reparaciones.

Por lo que la solución con plataforma totalmente aislada es la mejor con respecto a la que ofrece menos reparaciones para sismos severos, siguiéndole el muelle convencional y luego el muelle con plataforma localmente aislada. Sin embargo, hay que reconocer que también puede originarse daño no estructural (líneas de tuberías, juntas, cables eléctricos), que tenderá a ser mayor a medida que los desplazamientos de la plataforma incrementen. Esto se debe estudiar para cada proyecto y revisar si hay un

riesgo de perjudicar a la infraestructura necesaria para la operación del muelle.

Finalmente, observando los desplazamientos obtenidos para cada solución estructural, se nota que los puntos de desempeño del muelle totalmente aislado son muy similares a los del localmente aislado bajo el sismo de diseño y extremo, y medianamente similares para el sismo de servicio. Eso implica que en estas soluciones la demanda de desplazamientos es producto de las propiedades dinámicas del aislador (periodo y amortiguamiento) sin importar cuantos se coloquen, pues para estos desplazamientos los pilotes adyacentes en el muelle localmente aislado son lo suficientemente flexibles (plastificación completa de la sección) como para permitir el desplazamiento semi-libre del aislador, y al mismo tiempo mantienen la estabilidad global en la estructura soportando cargas axiales.

## **4.2 RECOMENDACIONES**

Los desplazamientos obtenidos a base del análisis Pushover resultaron muy altos en los modelos con aislación sísmica, por lo que se recomienda realizar un análisis historia-tiempo no-lineal con el fin de verificar estos desplazamientos, el cual es preferible realizarlo con un espectro de sitio. Adicionalmente, el PIANC (2001, p. 233) argumenta que los límites en las deformaciones de los elementos para cada nivel de desempeño se verifican durante los desplazamientos máximos de la estructura, y que al finalizar el evento sísmico las deformaciones residuales van a ser menores. Esto se podría revisar minuciosamente con el análisis historia-tiempo no-lineal, verificando que los desplazamientos máximos sean mayores al desplazamiento residual de la estructura.

Para próximos estudios de muelles, se recomienda incluir el efecto del suelo realizando un análisis de interacción suelo-estructura, o implementando resortes semi-rígidos que obedezcan las leyes constitutivas del estrato correspondiente. Esto porque podría presentarse una flexibilidad mayor en las zonas donde se asumió que habrá un empotramiento perfecto, la cual ayudaría a prevenir una rótula plástica en esta zona, y por lo tanto ayudaría a

que el desempeño lo controle la rótula plástica cerca de la cabeza del pilote. En contraste, con el análisis de interacción suelo-estructura se puede verificar la profundidad a la que se producirá el empotramiento efectivo, y los esfuerzos en las partes del pilote que están debajo.

Debido a que el desempeño al nivel de Control de Daño en el muelle convencional y en el muelle localmente aislado está controlado esencialmente por los cables de presfuerzo en la rótula plástica cercana al empotramiento efectivo, se recomienda para futuros proyectos reforzar esta zona o proveerla con más resistencia, agregando más varillas de acero, con el propósito de que la plastificación inicie en la zona cercana a la cabeza del pilote (pues los momentos en ambos extremos son muy similares en un elemento bajo cargas laterales) y el daño pueda ser observado y reparado, evitando problemas de corrosión que probablemente no se puedan identificar en zonas más profundas del pilote. Otra opción es utilizar materiales que no se agrieten y tengan más resistencia y capacidad de deformación, tal como al utilizar pilotes tubulares de acero estructural.

Se debe resaltar que el muelle con plataforma totalmente aislada no presentó daño estructural en su evaluación, por lo tanto, no necesitaría la adición de resistencia o refuerzo cerca del empotramiento efectivo.

Al evaluar el muelle con plataforma localmente aislada, se observó que con pilotes verticales no se satisfacen los requerimientos tanto de Servicio y de Control de Daño. Sin embargo, hay otros niveles de desempeño que podría satisfacer, por lo que se recomienda investigar el desempeño de esta solución estructural para el nivel de Seguridad de Vida, para lo cual hay lineamientos en el ASCE 61-14: Seismic Design of Piers and Wharves.

También se observó que la carga de atraque produce daño estructural en los pilotes P1 y P2 del muelle localmente aislado, de lo que se propone modificar la inclinación de estos pilotes (rígidamente conectados a la plataforma) brindando mayor resistencia a carga lateral durante este estado de carga, y trabajando como fusible durante eventos sismos fuertes (que producirían mayores esfuerzos) a través de deformación inelástica. La inclinación de los

pilotes también incrementa la rigidez durante cargas de atraque, la cual fue insuficiente cuando los pilotes eran verticales.

En el caso del muelle con plataforma totalmente aislada, se encontró que, para desplazamientos altos en la plataforma, las varillas de acero y cables de presfuerzo del pilote P4 en la subestructura entran en fluencia. Aunque no se excede ningún límite de desempeño, el sistema de aislación es más eficiente si los elementos de la subestructura se mantuviesen elásticos, por lo que se recomienda proveer de mayor resistencia a esta zona, pues el conjunto de aisladores seguirá generando altos desplazamientos, pero sin producir fluencia en la subestructura.

Adicionalmente, aunque el sistema de aislación en la plataforma totalmente aislada es eficiente con respecto a los desplazamientos relativos entre la plataforma y la subestructura, donde se obtuvo alrededor del 7%, se recomienda rigidizar la subestructura para alcanzar eficiencias similares a las del muelle con aislación local, donde se obtuvo alrededor del 1% de desplazamiento relativo.

Finalmente, los desplazamientos por la carga de atraque en la plataforma totalmente aislada excedieron el límite de servicio, por lo que se recomienda cambiar las propiedades del aislador (teniendo precaución de no perder los beneficios encontrados para estados de carga sísmica), colocar trabes o amortiguadores que trabajen como fusibles posicionados alrededor del aislador, o redirigir la carga de atraque para que no sea recibida por los aisladores, sino directamente por la subestructura, a través de un ajuste en la construcción de las pantallas de las defensas. Esta última opción se recomienda como siguiente línea de investigación para complementar al desarrollo de esta propuesta estructural.

## 5 BIBLIOGRAFÍA

- American Concrete Institute. (2014). *Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary - ACI 318-14*. American Concrete Institute.
- American Society of Civil Engineers. (2016). *Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures*. American Society of Civil Engineers.
- American Society of Civil Engineers; Coasts, Oceans, Ports and Rivers Institute. (2014). *Seismic Design of Piers and Wharves - ASCE 61-14*. American Society of Civil Engineers; Coasts, Oceans, Ports and Rivers Institute.
- American Society of Civil Engineers; Structural Engineering Institute. (2013). *Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings - ASCE 41-13*. American Society of Civil Engineers; Structural Engineering Institute.
- Applied Technology Council. (1996). *Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings*. Applied Technology Council.
- Collins, M., & Mitchel, D. (1997). *Prestressed Concrete Structures*. Response Publications, Canada.
- Consultora . (2017, Marzo). Planos Estructurales de Muelle. *Implantación*. Guayaquil, Guayas, Ecuador.
- Consultora. (2017). *Apéndice B - Memoria de Análisis y Diseño Estructural de Plataforma de Atraque PAT-01*.
- Council on Tall Buildings and Urban Habitat. (2017). *Performance-Based Seismic Design for Tall Buildings*. CTBUH Academic Office.
- Elnashai, A. S. (2008). *Fundamentals of Earthquake Engineering*. John Wiley & Sons Ltd.
- Farzad Naeim, J. K. (1999). *Design of Seismic Isolated Structures*. Canada: John Wiley and Sons.
- Federal Emergency Management Agency. (2005). *Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures*. Redwood City: Applied Technology Council.

- Gaythwaite, J. W. (2004). *Design of Marine Facilities for the Berthing, Mooring and Repairing of Vessels*. American Society of Civil Engineers.
- International Navigation Association. (2001). *Seismic Design Guidelines for Port Structures*. Swets and Zeitlinger B.V., Lisse.
- Karthik, M., & Mander, J. (2011). *Stress-Block Parameters for Unconfined and Confined*. Journal of Structural Engineering, American Society of Civil Engineers.
- Kramer, S. (1996). *Geotechnical Earthquake Engineering*. Prentice-Hall International Series in Civil Engineering and Engineering Mechanics.
- Mander, J. B., Priestley, M., & Park, R. (1988). *Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete*. Journal of Structural Engineering, American Society of Civil Engineers.
- Menegotto, M. / . (1973). *Method of analysis for cyclically loaded R.C. plane frames including changes in geometry and non-elastic behaviour of elements under combined normal force and bending*. IABSE Reports of the Working Commissions.
- Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda. (2014). *NEC-SE-DS - Peligro Sísmico - Diseño Sismo Resistente*. Dirección de Comunicación Social, MIDUVI.
- Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda. (2015). Norma Ecuatoriana de la Construcción 2015. *Peligro Sísmico - Diseño Sismo Resistente*. Ecuador: Dirección de Comunicación Social, MIDUVI.
- Naeim, F. (1989). *The Seismic Design Handbook*. New York: Chapman and Hall.
- Neal, B. (1977). *The Plastic Methods of Structural Analysis*. Londres: Chapman and Hall Ltd.
- Priestley, J., Seible, F., & Calvi, G. (1996). *Seismic Design and Retrofit of Bridges*. New York: John Wiley and Sons Inc.
- Scott, B. (1980). *Stress - strain relationships for confined concrete: rectangular sections*. Christchurch: University of Canterbury.
- University of California, Berkely. (2012). *Open Sees Wiki* . Retrieved from [https://opensees.berkeley.edu/wiki/index.php/OpenSees\\_uniaxialMaterial\\_Arguments\\_--\\_Steel02](https://opensees.berkeley.edu/wiki/index.php/OpenSees_uniaxialMaterial_Arguments_--_Steel02)
- Viviescas, J. (2010). *Grietas en Construcciones Ocasionadas por Problemas Geotécnicos*. Medellín: Universidad EAFIT.

Vrouwenvelder, A. (2003). *Plasticity*. Delft: Technical University Delft.

Zhu, M. (2020, Enero 11). OpenSeesPy Documentation. EEUU: Oregon State University.

## **6 ANEXOS**

## 6.1 PUNTOS DE DESEMPEÑO DE MUELLE CON PLATAFORMA TOTALMENTE AISLADA

### 6.1.1 ASCE 41-13: Método de los Coeficientes

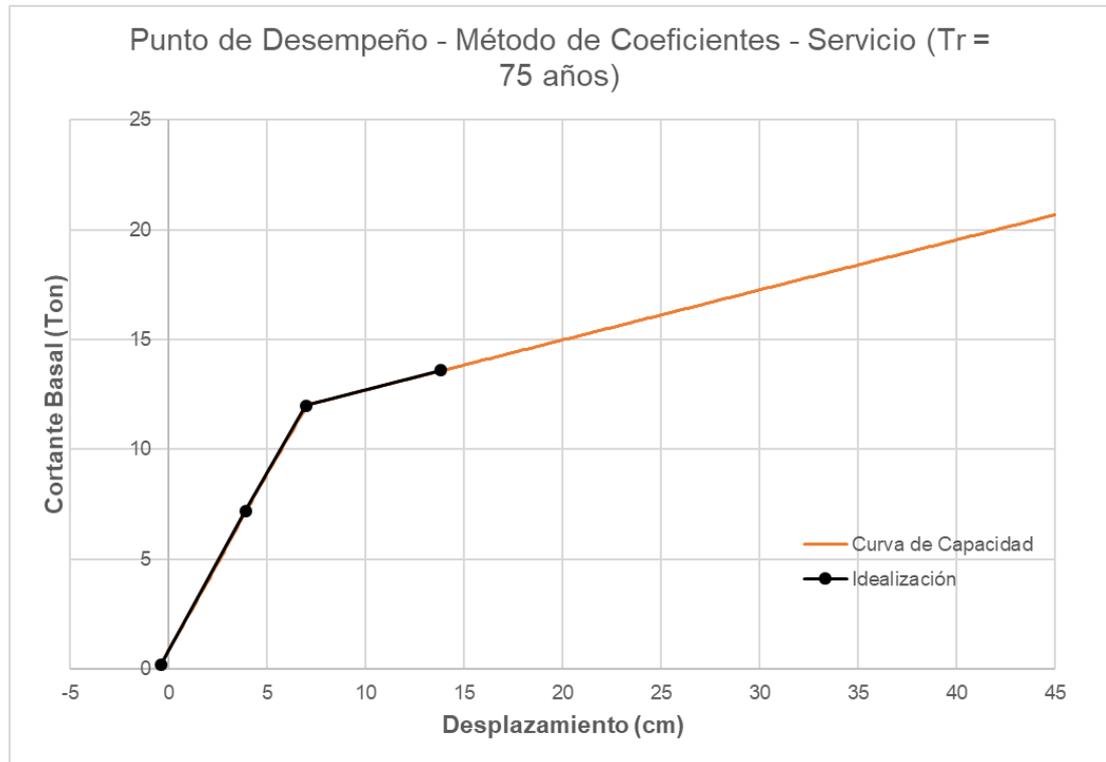


Fig. # 120 - Obtención del punto de desempeño en muelle con plataforma totalmente aislada para sismo de servicio por el método de coeficientes.

Tabla # 38 – Parámetros utilizados y calculados en el método de los coeficientes.

Parámetros de Método de los Coeficientes – Sismo de servicio			
<b>Ki</b>	1,60 Ton/cm	<b>Ti</b>	1,23 s
<b>Ke</b>	1,629 Ton/cm	<b>Te</b>	1,219 s
<b><math>\alpha_1</math></b>	0,14	<b>C0</b>	1,00
<b>C1</b>	1,01	<b>C2</b>	1,001
<b>Sa</b>	0,37 g	<b>a</b>	60
<b><math>\mu_{\text{strenght}}</math></b>	1,855	<b><math>\mu_{\text{max}}</math></b>	1,982
<b>W</b>	60,15 Ton	<b><math>\epsilon</math> (error relativo)</b>	1,53%
<b><math>\delta(0.6 \cdot V_y)</math></b>	3,90 cm	<b><math>0.6 \cdot V_y</math></b>	7,20 Ton
<b><math>\delta_y</math></b>	6,97 cm	<b><math>V_y</math></b>	12,00 Ton
<b><math>\delta_t</math></b>	13,80 cm	<b><math>V_b</math></b>	13,60 Ton

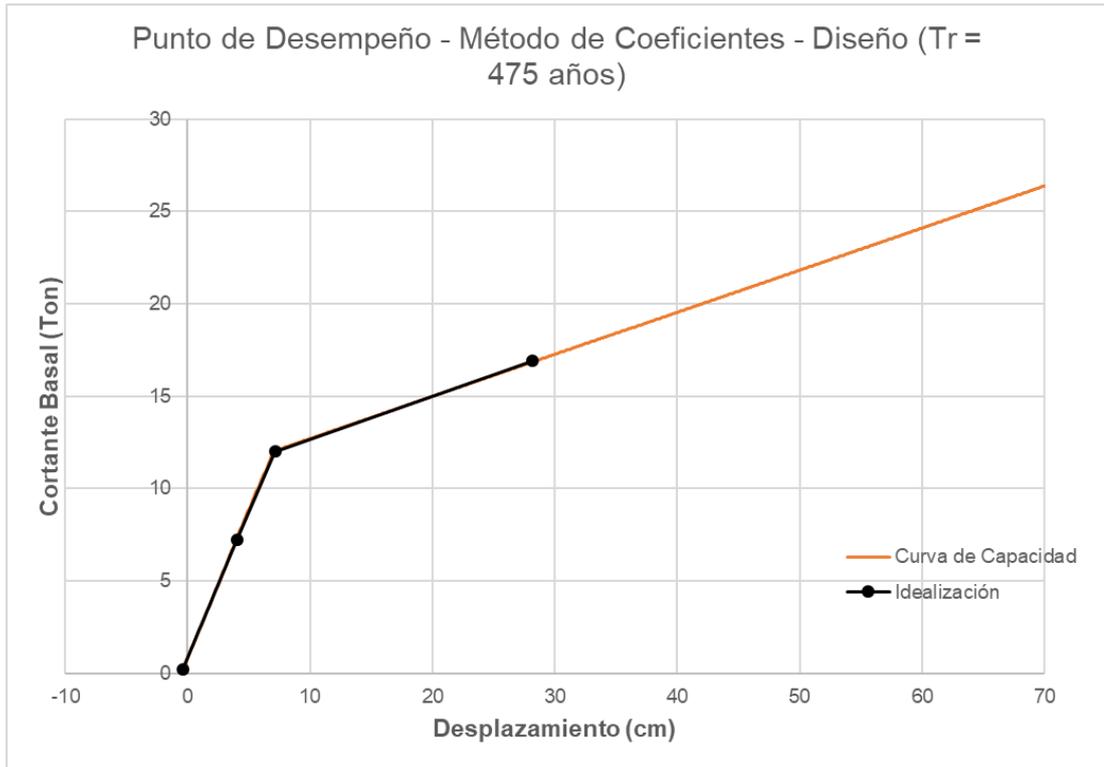


Fig. # 121 - Obtención del punto de desempeño en muelle con plataforma totalmente aislada para sismo de diseño por el método de coeficientes.

Tabla # 39 – Parámetros utilizados y calculados en el método de los coeficientes.

Parámetros de Método de los Coeficientes – Sismo de diseño			
<b>Ki</b>	1,60 Ton/cm	<b>Ti</b>	1,23 s
<b>Ke</b>	1,592 Ton/cm	<b>Te</b>	1,233 s
<b><math>\alpha_1</math></b>	0,15	<b>C0</b>	1,00
<b>C1</b>	1,029	<b>C2</b>	1,006
<b>Sa</b>	0,72 g	<b>a</b>	60
<b><math>\mu_{strength}</math></b>	3,609	<b><math>\mu_{max}</math></b>	3,943
<b>W</b>	60,15 Ton	<b><math>\epsilon</math> (error relativo)</b>	0,71%
<b><math>\delta(0.6 \cdot V_y)</math></b>	4,00 cm	<b><math>0.6 \cdot V_y</math></b>	7,20 Ton
<b><math>\delta_y</math></b>	7,14 cm	<b><math>V_y</math></b>	12,00 Ton
<b><math>\delta_t</math></b>	28,14 cm	<b><math>V_b</math></b>	16,90 Ton

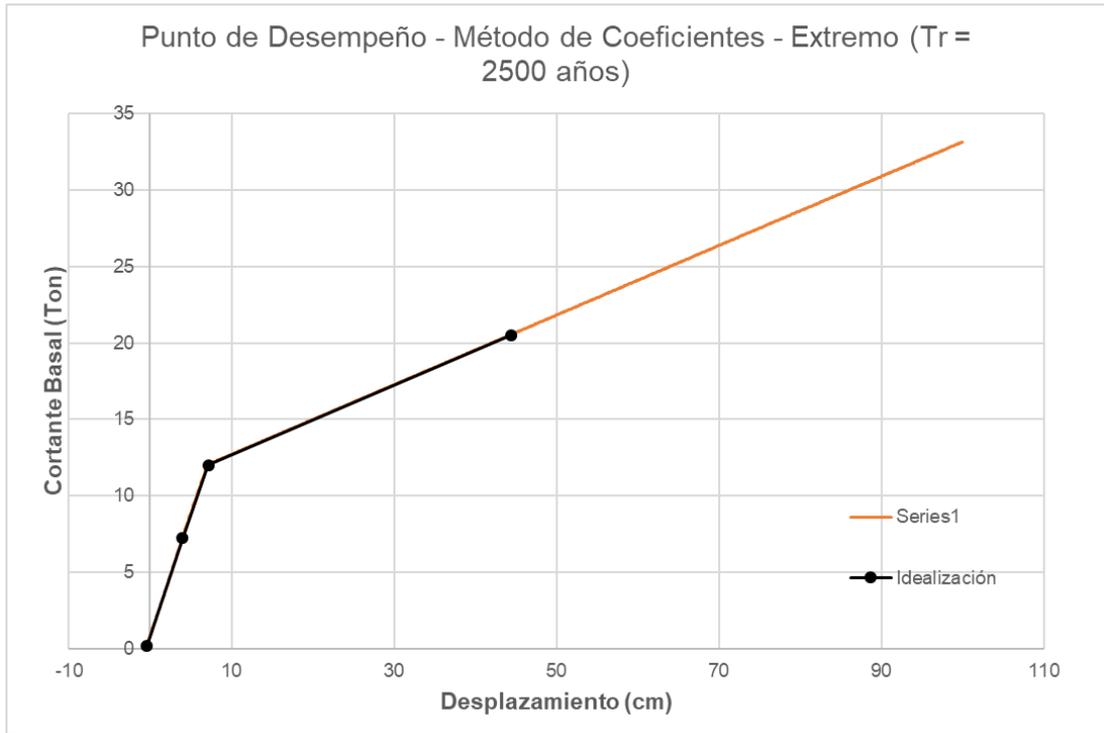


Fig. # 122 - Obtención del punto de desempeño en muelle con plataforma totalmente aislada para sismo extremo por el método de coeficientes.

Tabla # 40 – Parámetros utilizados y calculados en el método de los coeficientes.

Parámetros de Método de los Coeficientes – Sismo extremo			
<b>Ki</b>	1,60 Ton/cm	<b>Ti</b>	1,23 s
<b>Ke</b>	1,592 Ton/cm	<b>Te</b>	1,233 s
<b>α1</b>	0,14	<b>C0</b>	1,00
<b>C1</b>	1,05	<b>C2</b>	1,017
<b>Sa</b>	1,1022 g	<b>a</b>	60
<b>μstrenght</b>	5,525	<b>μmax</b>	6,228
<b>W</b>	60,15 Ton	<b>ε (error relativo)</b>	0,67%
<b>δ(0.6*Vy)</b>	4,00 cm	<b>0.6*Vy</b>	7,20 Ton
<b>δy</b>	7,14 cm	<b>Vy</b>	12,00 Ton
<b>δt</b>	44,45 cm	<b>Vb</b>	20,50 Ton

### 6.1.2 FEMA 440: Espectro de Capacidad – Método A: Iteración Directa

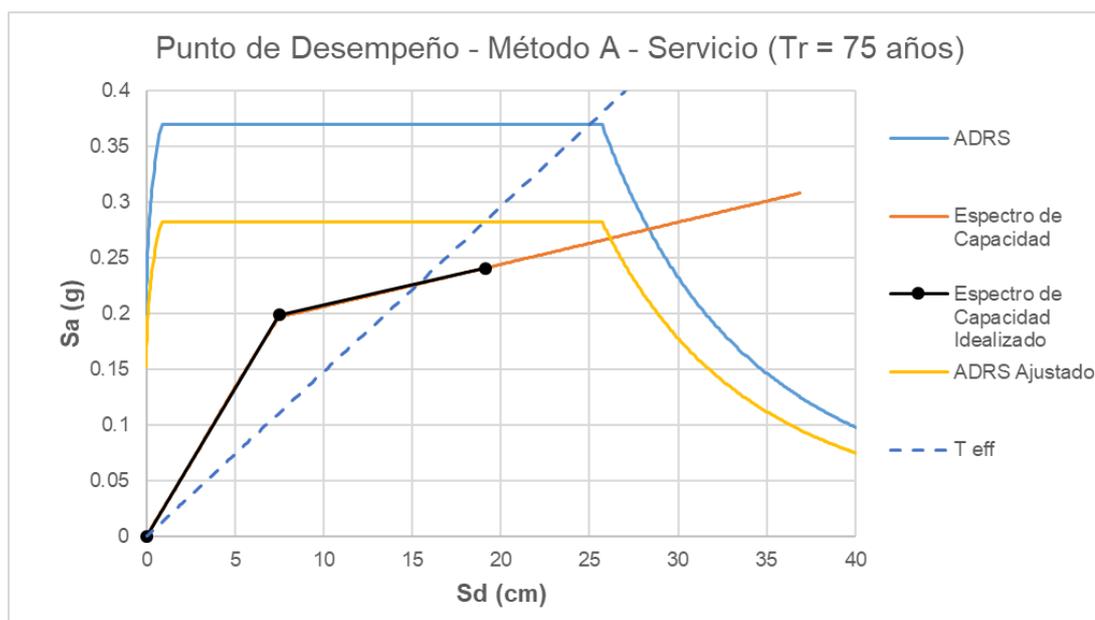


Fig. # 123 - Obtención del punto de desempeño en muelle con plataforma totalmente aislada para sismo de servicio por el método A.

Tabla # 41 - Parámetros obtenidos en el método A del espectro de capacidad.

Parámetros de Método de Espectro de Capacidad A – Sismo de servicio			
<b>Ki</b>	1,60 Ton/cm	<b>Ti</b>	1,23 s
<b><math>\alpha_1</math></b>	1	<b>PF1</b>	0,02643
<b><math>\Phi_1</math> roof</b>	37,84	<b><math>\epsilon</math> (error relativo)</b>	0,00013%
<b>W</b>	60,15 Ton	<b><math>\alpha</math></b>	0,136
<b><math>\beta_{eff}</math></b>	12,70%	<b><math>T_{eff}</math></b>	1,648 s
<b><math>\mu</math></b>	2,55	<b>B</b>	1,308
<b><math>a_y</math></b>	0,200 g	<b><math>d_y</math></b>	7,48 cm
<b><math>a_p</math></b>	0,241 g	<b><math>d_p</math></b>	19,10 cm

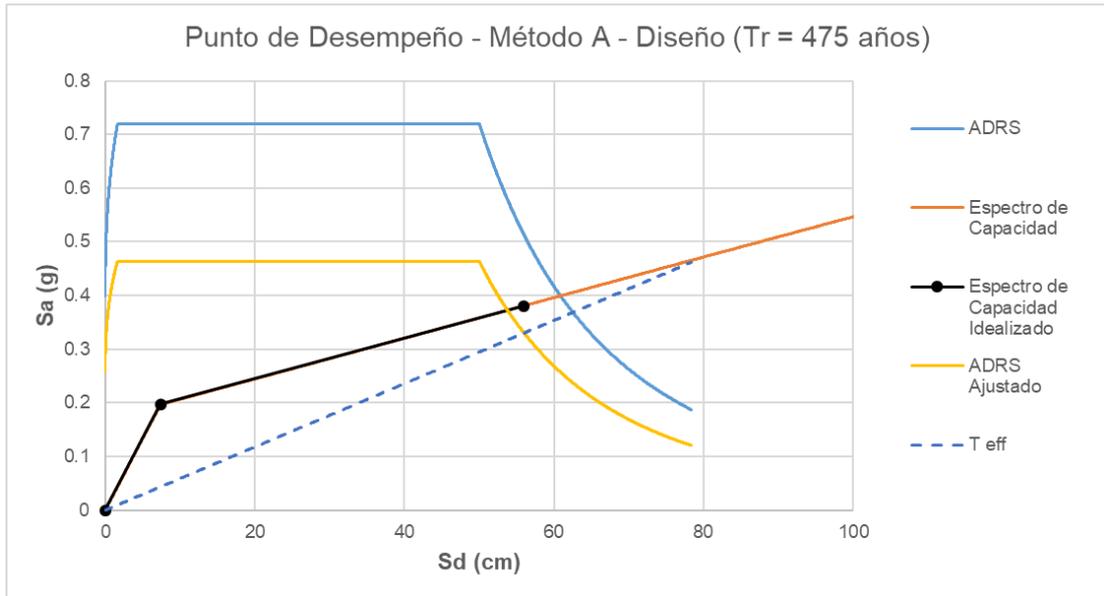


Fig. # 124 - Obtención del punto de desempeño en muelle con plataforma totalmente aislada para sismo de diseño por el método A.

Tabla # 42 - Parámetros obtenidos en el método A del espectro de capacidad.

Parámetros de Método de Espectro de Capacidad A – Sismo de diseño			
<b>Ki</b>	1,60 Ton/cm	<b>Ti</b>	1,23 s
<b><math>\alpha_1</math></b>	1	<b>PF1</b>	0,02643
<b><math>\Phi_1</math> roof</b>	37,84	<b><math>\epsilon</math> (error relativo)</b>	0,000001%
<b>W</b>	60,15 Ton	<b><math>\alpha</math></b>	0,142
<b><math>\beta_{eff}</math></b>	20,59%	<b><math>T_{eff}</math></b>	2,614 s
<b><math>\mu</math></b>	7,55	<b>B</b>	1,553
<b><math>a_y</math></b>	0,200 g	<b><math>d_y</math></b>	7,42 cm
<b><math>a_p</math></b>	0,38 g	<b><math>d_p</math></b>	56,00 cm

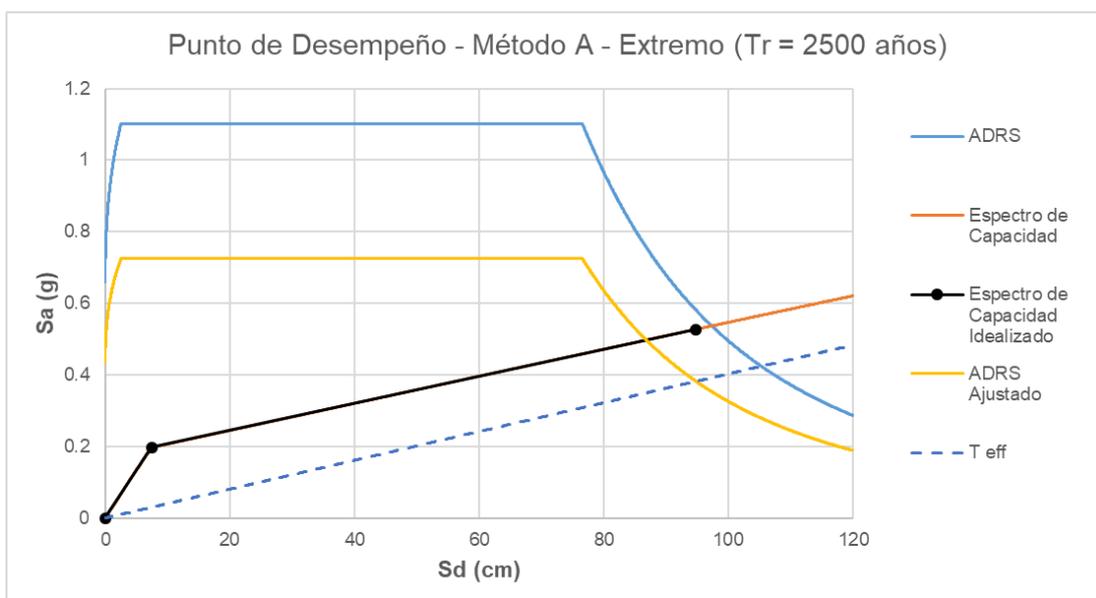


Fig. # 125 - Obtención del punto de desempeño en muelle con plataforma totalmente aislada para sismo extremo por el método A.

Tabla # 43 - Parámetros obtenidos en el método A del espectro de capacidad.

Parámetros de Método de Espectro de Capacidad A – Sismo extremo			
<b>Ki</b>	1,60 Ton/cm	<b>Ti</b>	1,23 s
<b><math>\alpha_1</math></b>	1	<b>PF1</b>	0,02643
<b><math>\Phi_1</math> roof</b>	37,84	<b><math>\epsilon</math> (error relativo)</b>	0,000002%
<b>W</b>	60,15 Ton	<b><math>\alpha</math></b>	0,142
<b><math>\beta_{eff}</math></b>	19,47%	<b><math>T_{eff}</math></b>	3,162 s
<b><math>\mu</math></b>	12,75	<b>B</b>	1,52
<b><math>a_y</math></b>	0,200 g	<b><math>d_y</math></b>	7,43 cm
<b><math>a_p</math></b>	0,527 g	<b><math>d_p</math></b>	94,80 cm

### 6.1.3 FEMA 440: Espectro de Capacidad – Método B: Intersección con MADRS

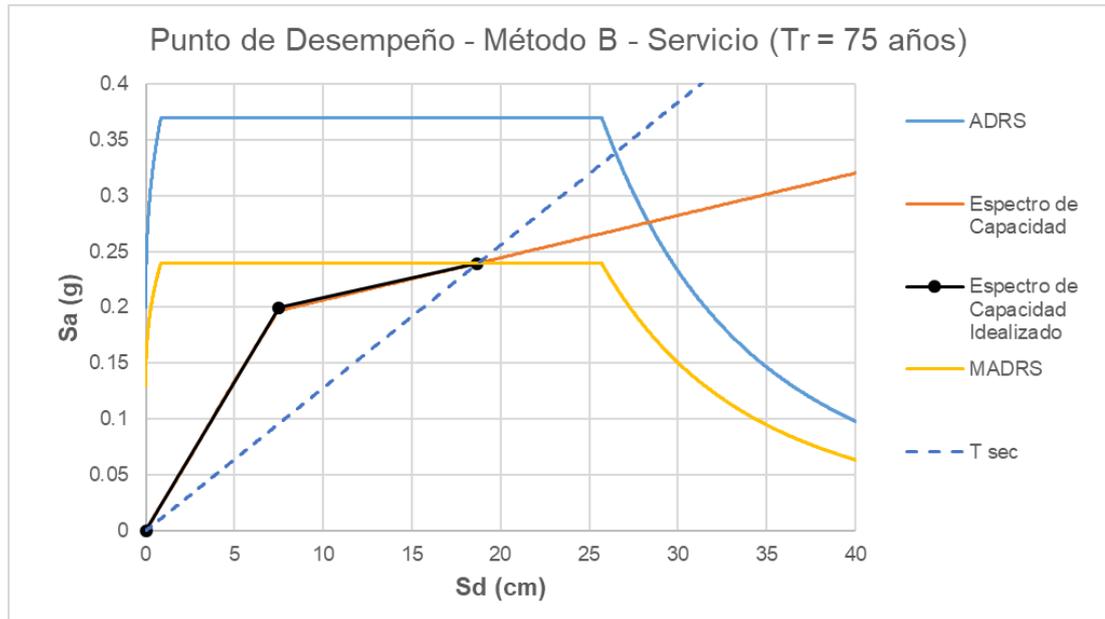


Fig. # 126 - Obtención del punto de desempeño en muelle con plataforma totalmente aislada para sismo de servicio por el método B.

Tabla # 44 - Parámetros obtenidos en el método B del espectro de capacidad.

Parámetros de Método de Espectro de Capacidad B – Sismo de servicio			
<b>Ki</b>	1,60 Ton/cm	<b>Ti</b>	1,23 s
<b>α1</b>	1	<b>PF1</b>	0,02643
<b>Φ1 roof</b>	37,84	<b>ε (error relativo)</b>	0,0007%
<b>W</b>	60,15 Ton	<b>α</b>	0,132
<b>β<sub>eff</sub></b>	12,26%	<b>T<sub>eff</sub></b>	1,623 s
<b>μ</b>	2,49	<b>B</b>	1,293
<b>M</b>	0,836	<b>T<sub>sec</sub></b>	1,775
<b>a<sub>y</sub></b>	0,200 g	<b>d<sub>y</sub></b>	7,50 cm
<b>a<sub>p</sub></b>	0,239 g	<b>d<sub>p</sub></b>	18,70 cm

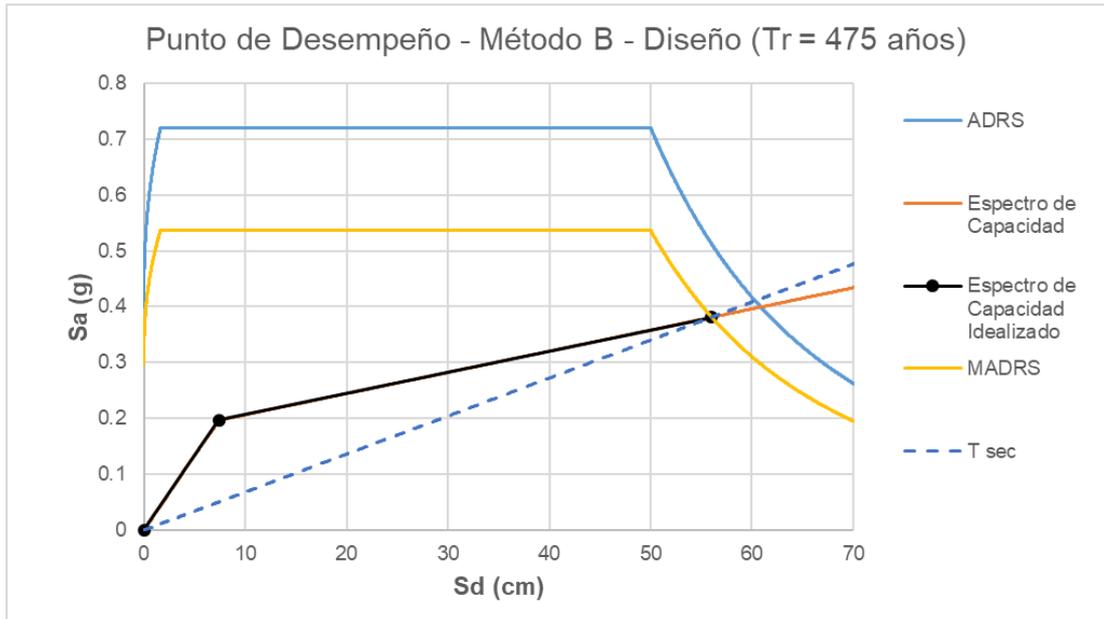


Fig. # 127 - Obtención del punto de desempeño en muelle con plataforma totalmente aislada para sismo de diseño por el método B.

Tabla # 45 - Parámetros obtenidos en el método B del espectro de capacidad.

Parámetros de Método de Espectro de Capacidad B – Sismo de diseño			
<b>Ki</b>	1,60 Ton/cm	<b>Ti</b>	1,23 s
<b><math>\alpha_1</math></b>	1	<b>PF1</b>	0,02643
<b><math>\Phi_1</math> roof</b>	37,84	<b><math>\epsilon</math> (error relativo)</b>	0,0007%
<b>W</b>	60,15 Ton	<b><math>\alpha</math></b>	0,142
<b><math>\beta_{eff}</math></b>	20,59%	<b><math>T_{eff}</math></b>	2,615 s
<b><math>\mu</math></b>	7,56	<b>B</b>	1,553
<b>M</b>	1,156	<b><math>T_{sec}</math></b>	2,432
<b><math>a_y</math></b>	0,200 g	<b><math>d_y</math></b>	7,41 cm
<b><math>a_p</math></b>	0,381 g	<b><math>d_p</math></b>	56,00 cm

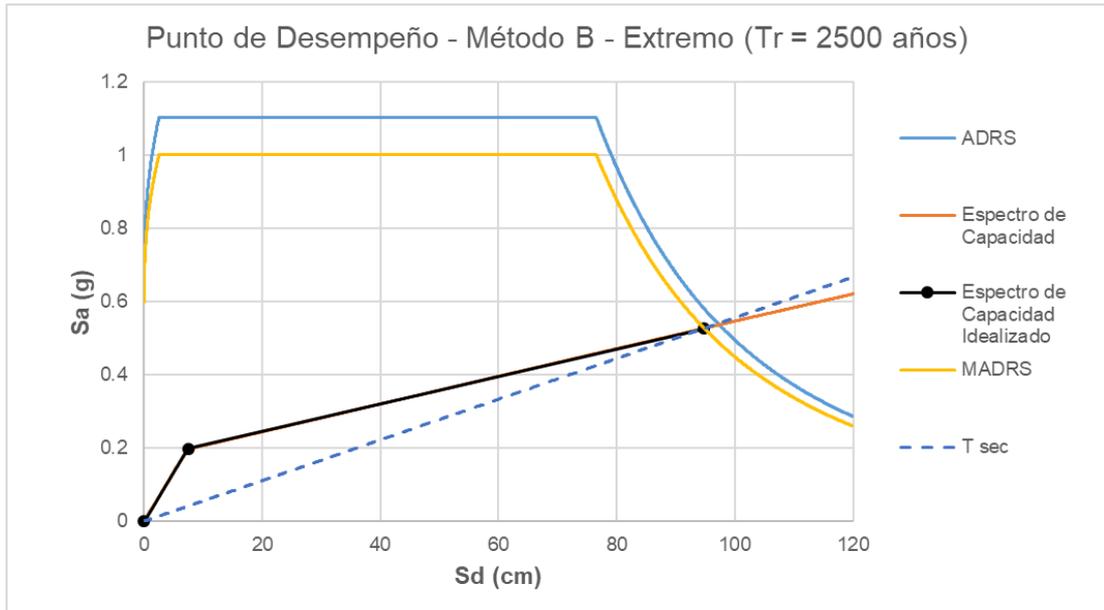


Fig. # 128 - Obtención del punto de desempeño en muelle con plataforma totalmente aislada para sismo extremo por el método B.

Tabla # 46 - Parámetros obtenidos en el método B del espectro de capacidad.

Parámetros de Método de Espectro de Capacidad B – Sismo extremo			
<b>Ki</b>	1,60 Ton/cm	<b>Ti</b>	1,23 s
<b><math>\alpha_1</math></b>	1	<b>PF1</b>	0,02643
<b><math>\Phi_1</math> roof</b>	37,84	<b><math>\epsilon</math> (error relativo)</b>	0,0002%
<b>W</b>	60,15 Ton	<b><math>\alpha</math></b>	0,142
<b><math>\beta_{eff}</math></b>	19,47%	<b><math>T_{eff}</math></b>	3,161 s
<b><math>\mu</math></b>	12,75	<b>B</b>	1,52
<b>M</b>	1,38	<b><math>T_{sec}</math></b>	2,69
<b><math>a_y</math></b>	0,200 g	<b><math>d_y</math></b>	7,44 cm
<b><math>a_p</math></b>	0,527 g	<b><math>d_p</math></b>	94,80 cm

**6.1.4 FEMA 440: Espectro de Capacidad – Método C: Lugar geométrico con varios MADRS**

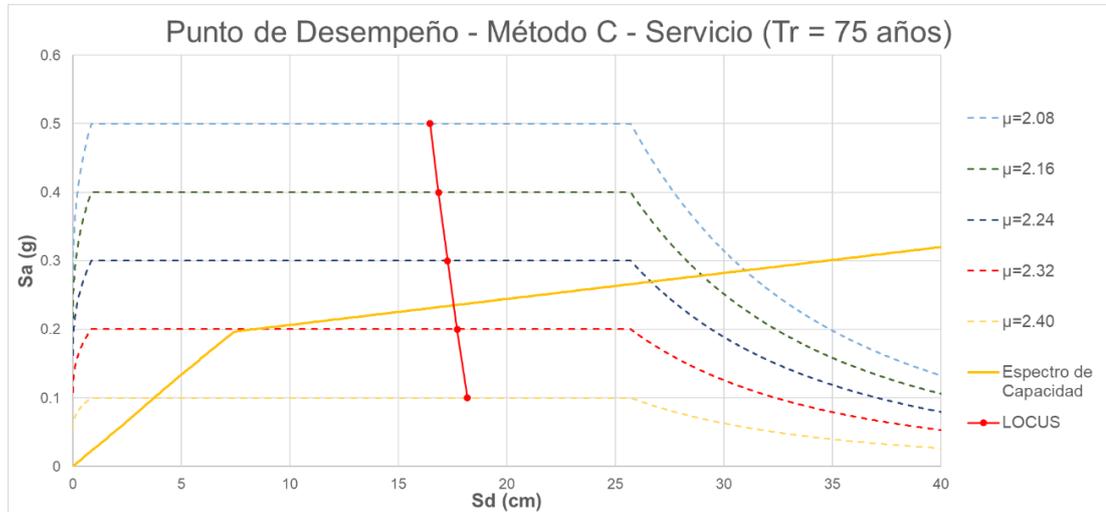


Fig. # 129 - Obtención del punto de desempeño en muelle con plataforma totalmente aislada para sismo de servicio por el método C.

Tabla # 47 - Parámetros obtenidos en el método C del espectro de capacidad.

Parámetros de Método de Espectro de Capacidad C – Sismo de servicio									
$\mu$	$\beta_{eff}$ (%)	$T_{eff}$ (s)	$\alpha$	B	M	$T_{sec}$ (s)	$a_p$ (g)	$d_p$ (cm)	$\epsilon$ (%) Error relativo
2,08	9,33	1,458	1,275	1,188	1,606	1,150	0,5	16,45	-45,2
2,16	9,88	1,488	0,800	1,209	1,306	1,302	0,4	16,85	-29,1
2,24	10,44	1,519	0,374	1,229	0,997	1,522	0,3	17,26	-12,4
2,32	11,01	1,551	-0,011	1,249	0,676	1,887	0,2	17,70	5,50
2,40	11,59	1,584	-0,36	1,270	0,343	2,704	0,1	18,71	22,9
$a_p$		0,23 g				$d_p$		17,50 cm	

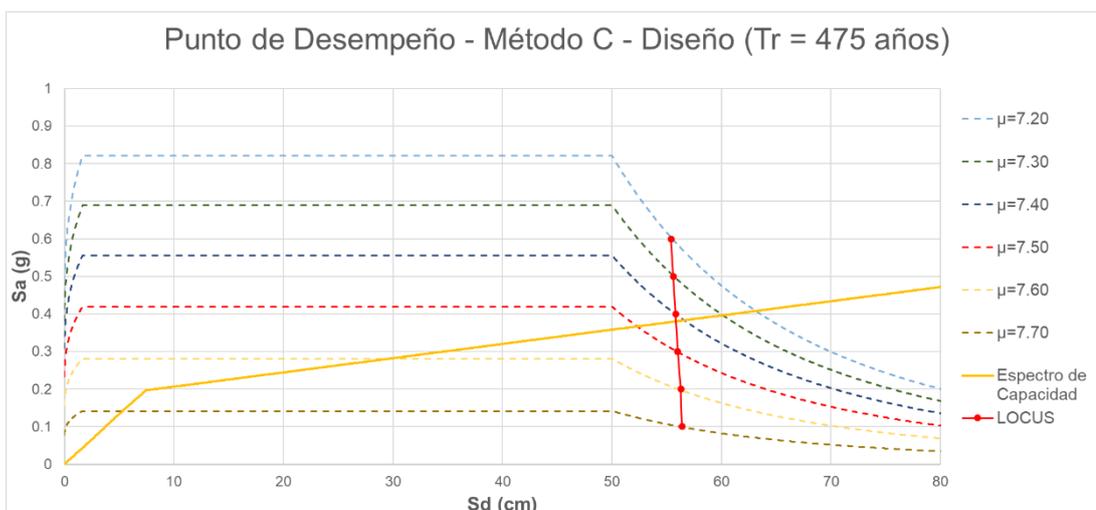


Fig. # 130 - Obtención del punto de desempeño en muelle con plataforma totalmente aislada para sismo de diseño por el método C.

Tabla # 48 - Parámetros obtenidos en el método C del espectro de capacidad.

Parámetros de Método de Espectro de Capacidad C – Sismo de diseño									
$\mu$	$\beta_{eff}$ (%)	$T_{eff}$ (s)	$\alpha$	B	M	$T_{sec}$ (s)	$a_p$ (g)	$d_p$ (cm)	$\epsilon$ (%) Error relativo
7,20	20,56	2,564	0,312	1,552	1,769	1,928	0,6	55,40	-37,4
7,30	20,57	2,578	0,233	1,553	1,485	2,115	0,5	55,60	-20,6
7,40	20,58	2,593	0,155	1,553	1,197	2,369	0,4	55,80	-3,74
7,50	20,59	2,607	0,079	1,553	0,905	2,741	0,3	56,00	13,09
7,60	20,59	2,621	0,002	1,553	0,606	3,366	0,2	56,30	29,91
7,70	20,59	2,635	-0,073	1,553	0,306	4,764	0,1	56,40	46,76
$a_p$			0,375 g			$d_p$			55,85 cm

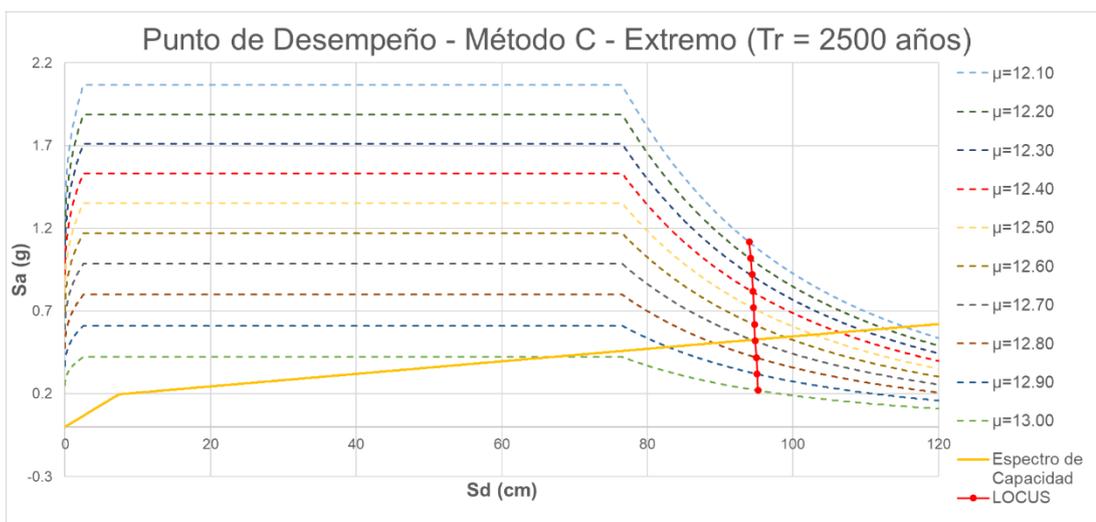


Fig. # 131 - Obtención del punto de desempeño en muelle con plataforma totalmente aislada para sismo extremo por el método C.

Tabla # 49 - Parámetros obtenidos en el método C del espectro de capacidad.

Parámetros de Método de Espectro de Capacidad C – Sismo extremo									
$\mu$	$\beta_{eff}$ (%)	$T_{eff}$ (s)	$\alpha$	B	M	$T_{sec}$ (s)	$a_p$ (g)	$d_p$ (cm)	$\epsilon$ (%) Error relativo
12,10	19,68	3,108	0,398	1,526	2,860	1,838	1,12	94,00	-81,4
12,20	19,64	3,117	0,354	1,525	2,614	1,928	1,02	94,20	-67,6
12,30	19,61	3,125	0,310	1,525	2,365	2,032	0,92	94,40	-53,9
12,40	19,58	3,133	0,267	1,524	2,117	2,154	0,82	94,50	-40,2
12,50	19,55	3,141	0,224	1,523	1,866	2,299	0,72	94,60	-26,5
12,60	19,52	3,150	0,181	1,522	1,614	2,479	0,62	94,70	-12,8
12,70	19,49	3,158	0,138	1,521	1,359	2,709	0,52	94,80	0,86
12,80	19,46	3,166	0,096	1,520	1,101	3,017	0,42	95,00	14,6
12,90	19,43	3,173	0,053	1,519	0,842	3,458	0,32	95,10	28,2
13,00	19,39	3,181	0,011	1,518	0,581	4,173	0,22	95,20	41,9
$a_p$			0,527 g			$d_p$			94,80 cm

## 6.2 PUNTOS DE DESEMPEÑO DE MUELLE CON PLATAFORMA LOCALMENTE AISLADA

### 6.2.1 ASCE 41-13: Método de los Coeficientes

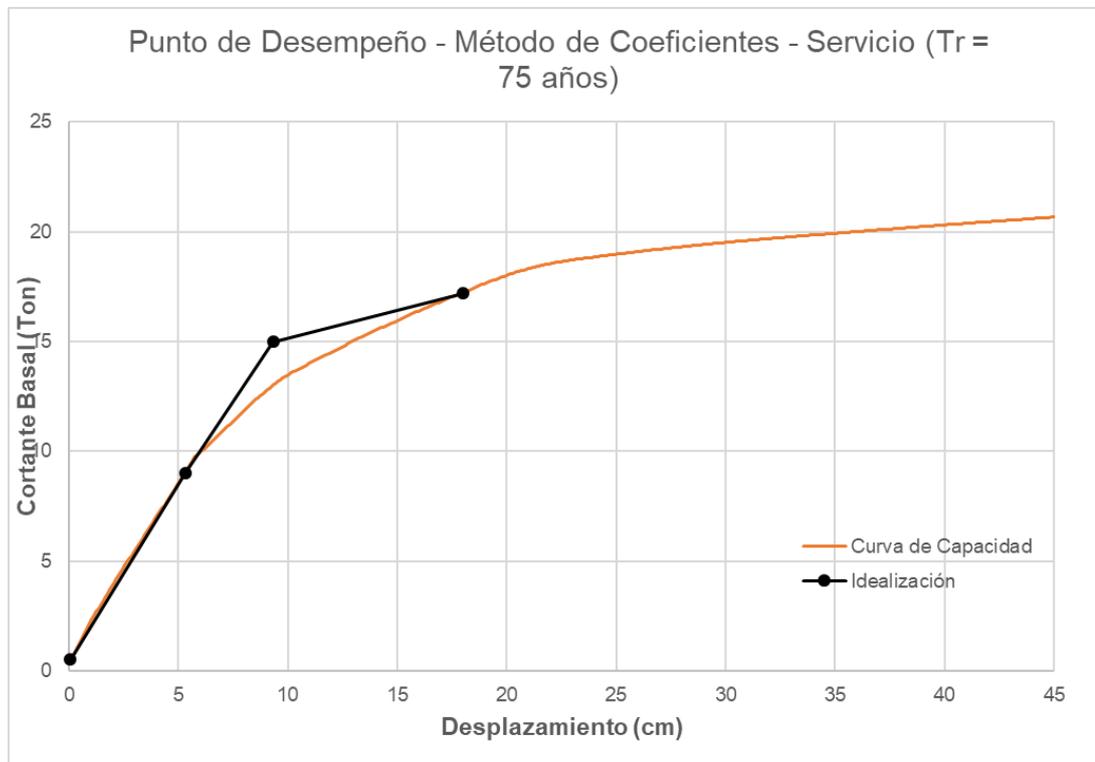


Fig. # 132 - Obtención del punto de desempeño en muelle con plataforma localmente aislada para sismo de servicio por el método de coeficientes.

Tabla # 50 – Parámetros utilizados y calculados en el método de los coeficientes.

Parámetros de Método de los Coeficientes – Sismo de servicio			
<b>Ki</b>	1,80 Ton/cm	<b>Ti</b>	1,32 s
<b>Ke</b>	1,617 Ton/cm	<b>Te</b>	1,393 s
<b>α1</b>	0,16	<b>C0</b>	1,00
<b>C1</b>	1,008	<b>C2</b>	1,001
<b>Sa</b>	0,37 g	<b>a</b>	60
<b>μ<sub>strenght</sub></b>	1,922	<b>μ<sub>max</sub></b>	1,927
<b>W</b>	77,93 Ton	<b>ε (error relativo)</b>	1,41%
<b>δ(0.6*Vy)</b>	5,30 cm	<b>0.6*Vy</b>	9,00 Ton
<b>δy</b>	9,33 cm	<b>Vy</b>	15,00 Ton
<b>δt</b>	17,98 cm	<b>Vb</b>	17,20 Ton

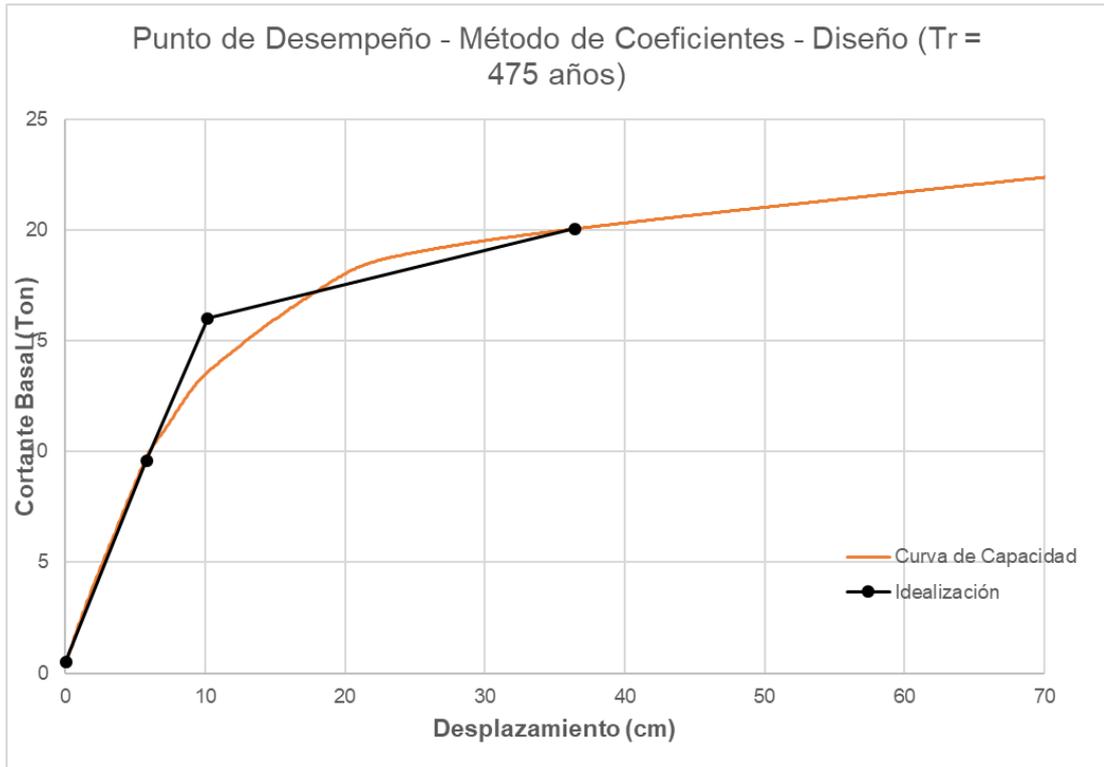


Fig. # 133 - Obtención del punto de desempeño en muelle con plataforma localmente aislada para sismo de diseño por el método de coeficientes.

Tabla # 51 – Parámetros utilizados y calculados en el método de los coeficientes.

Parámetros de Método de los Coeficientes – Sismo de diseño			
<b>Ki</b>	1,80Ton/cm	<b>Ti</b>	1,32 s
<b>Ke</b>	1,581 Ton/cm	<b>Te</b>	1,409 s
<b><math>\alpha_1</math></b>	0,10	<b>C0</b>	1,00
<b>C1</b>	1,021	<b>C2</b>	1,004
<b>Sa</b>	0,72 g	<b>a</b>	60
<b><math>\mu_{strenght}</math></b>	3,507	<b><math>\mu_{max}</math></b>	3,576
<b>W</b>	77,93 Ton	<b><math>\epsilon</math> (error relativo)</b>	0,70%
<b><math>\delta(0.6*Vy)</math></b>	5,80 cm	<b>0.6*Vy</b>	9,60 Ton
<b><math>\delta_y</math></b>	10,18 cm	<b>Vy</b>	16,00 Ton
<b><math>\delta_t</math></b>	36,39 cm	<b>Vb</b>	20,05 Ton

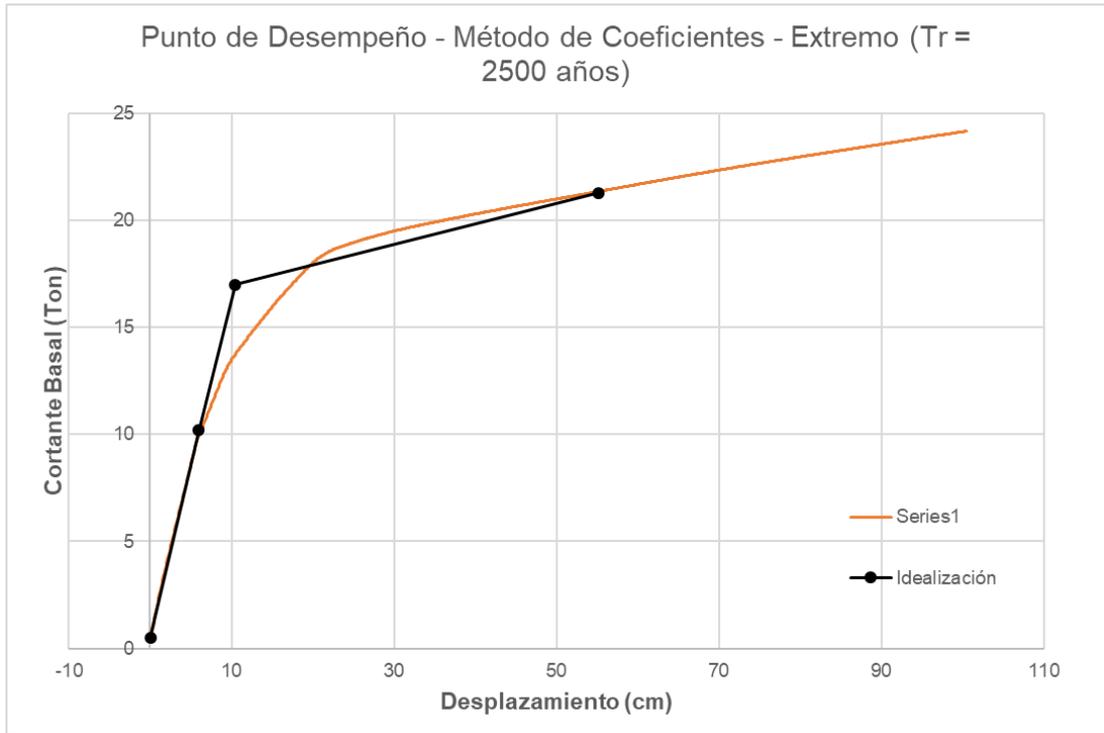


Fig. # 134 - Obtención del punto de desempeño en muelle con plataforma localmente aislada para sismo extremo por el método de coeficientes.

Tabla # 52 – Parámetros utilizados y calculados en el método de los coeficientes.

<b>Parámetros de Método de los Coeficientes – Sismo extremo</b>			
<b>Ki</b>	1,80Ton/cm	<b>Ti</b>	1,32 s
<b>Ke</b>	1,629 Ton/cm	<b>Te</b>	1,388 s
<b><math>\alpha_1</math></b>	0,06	<b>C0</b>	1,00
<b>C1</b>	1,035	<b>C2</b>	1,011
<b>Sa</b>	1,1022 g	<b>a</b>	60
<b><math>\mu_{strenght}</math></b>	5,053	<b><math>\mu_{max}</math></b>	5,258
<b>W</b>	77,93 Ton	<b><math>\epsilon</math> (error relativo)</b>	0,26%
<b><math>\delta(0.6 \cdot V_y)</math></b>	6,00 cm	<b><math>0.6 \cdot V_y</math></b>	10,20 Ton
<b><math>\delta_y</math></b>	10,49 cm	<b><math>V_y</math></b>	17,00 Ton
<b><math>\delta_t</math></b>	55,18 cm	<b><math>V_b</math></b>	21,30 Ton

## 6.2.2 FEMA 440: Espectro de Capacidad – Método A: Iteración Directa

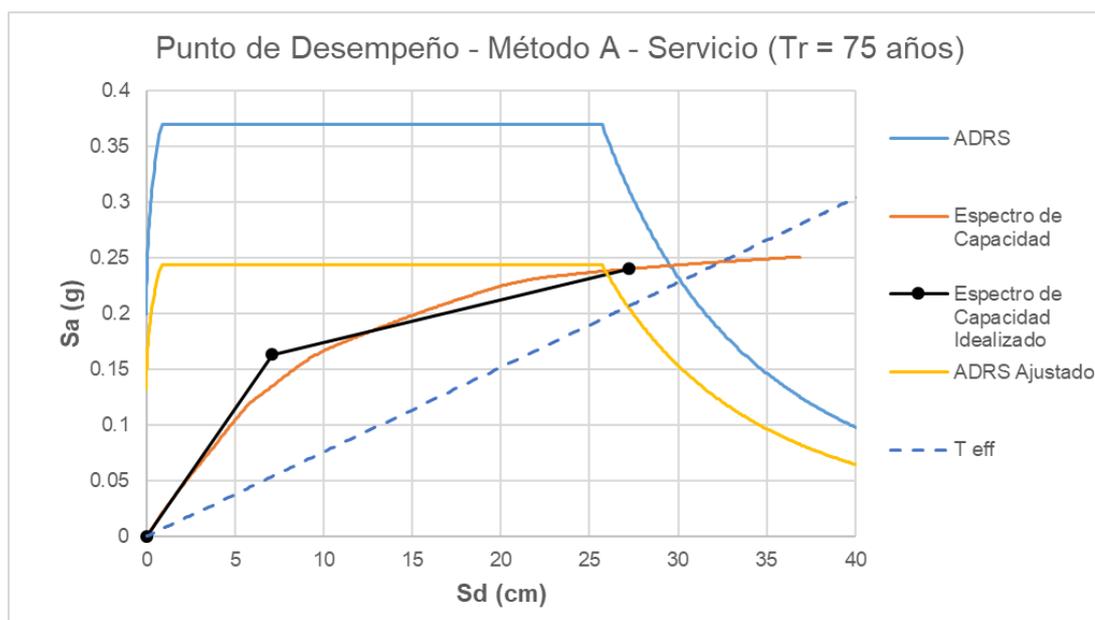


Fig. # 135 - Obtención del punto de desempeño en muelle con plataforma localmente aislada para sismo de servicio por el método A.

Tabla # 53 - Parámetros obtenidos en el método A del espectro de capacidad.

Parámetros de Método de Espectro de Capacidad A – Sismo de servicio			
<b>Ki</b>	1,80 Ton/cm	<b>Ti</b>	1,32 s
<b><math>\alpha_1</math></b>	1	<b>PF1</b>	0,02643
<b><math>\Phi_1</math> roof</b>	37,84	<b><math>\epsilon</math> (error relativo)</b>	0,00001%
<b>W</b>	77,93 Ton	<b><math>\alpha</math></b>	0,165
<b><math>\beta_{eff}</math></b>	19,33%	<b><math>T_{eff}</math></b>	2,301 s
<b><math>\mu</math></b>	3,84	<b>B</b>	1,516
<b><math>a_y</math></b>	0,160 g	<b><math>d_y</math></b>	7,08 cm
<b><math>a_p</math></b>	0,240 g	<b><math>d_p</math></b>	27,20 cm

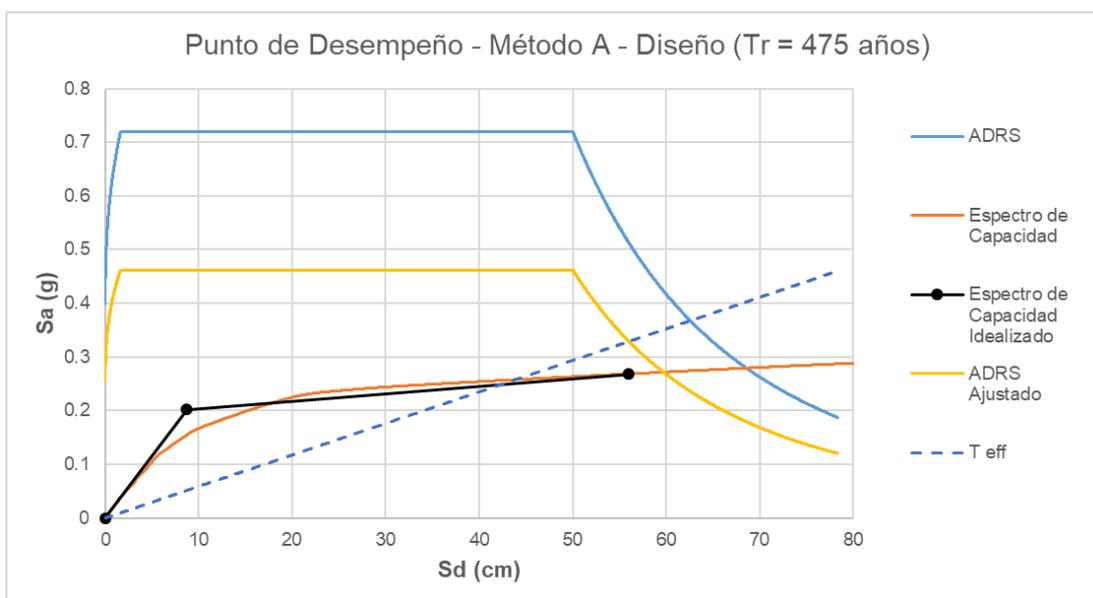


Fig. # 136 - Obtención del punto de desempeño en muelle con plataforma localmente aislada para sismo de diseño por el método A.

Tabla # 54 - Parámetros obtenidos en el método A del espectro de capacidad.

Parámetros de Método de Espectro de Capacidad A – Sismo de diseño			
<b>Ki</b>	1,80 Ton/cm	<b>Ti</b>	1,32 s
<b><math>\alpha_1</math></b>	1	<b>PF1</b>	0,02643
<b><math>\Phi_1</math> roof</b>	37,84	<b><math>\epsilon</math> (error relativo)</b>	0,00004%
<b>W</b>	77,93 Ton	<b><math>\alpha</math></b>	0,061
<b><math>\beta_{eff}</math></b>	20,73%	<b><math>T_{eff}</math></b>	2,618 s
<b><math>\mu</math></b>	6,41	<b>B</b>	1,557
<b><math>a_y</math></b>	0,200 g	<b><math>d_y</math></b>	8,73 cm
<b><math>a_p</math></b>	0,268 g	<b><math>d_p</math></b>	56,00 cm

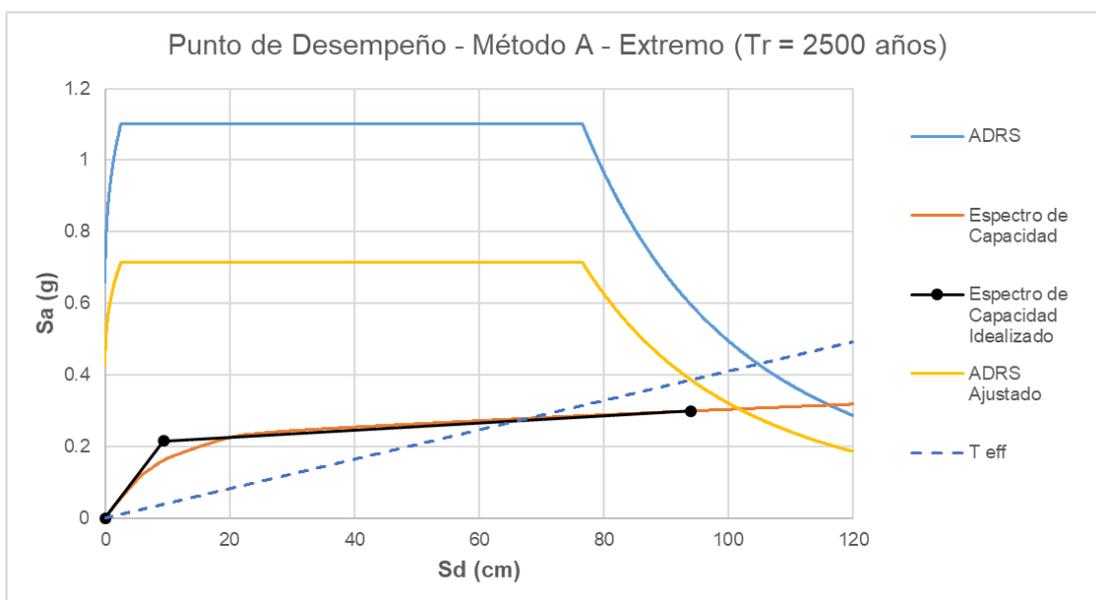


Fig. # 137 - Obtención del punto de desempeño en muelle con plataforma localmente aislada para sismo extremo por el método A.

Tabla # 55 - Parámetros obtenidos en el método A del espectro de capacidad.

Parámetros de Método de Espectro de Capacidad A – Sismo extremo			
<b>Ki</b>	1,80 Ton/cm	<b>Ti</b>	1,32 s
<b>α1</b>	1	<b>PF1</b>	0,02643
<b>Φ1 roof</b>	37,84	<b>ε (error relativo)</b>	0,000004%
<b>W</b>	77,93 Ton	<b>α</b>	0,043
<b>βeff</b>	20,25%	<b>Teff</b>	3,132 s
<b>μ</b>	10,07	<b>B</b>	1,543
<b>ay</b>	0,220 g	<b>dy</b>	9,33 cm
<b>ap</b>	0,299 g	<b>dp</b>	94,00 cm

### 6.2.3 FEMA 440: Espectro de Capacidad – Método B: Intersección con MADRS

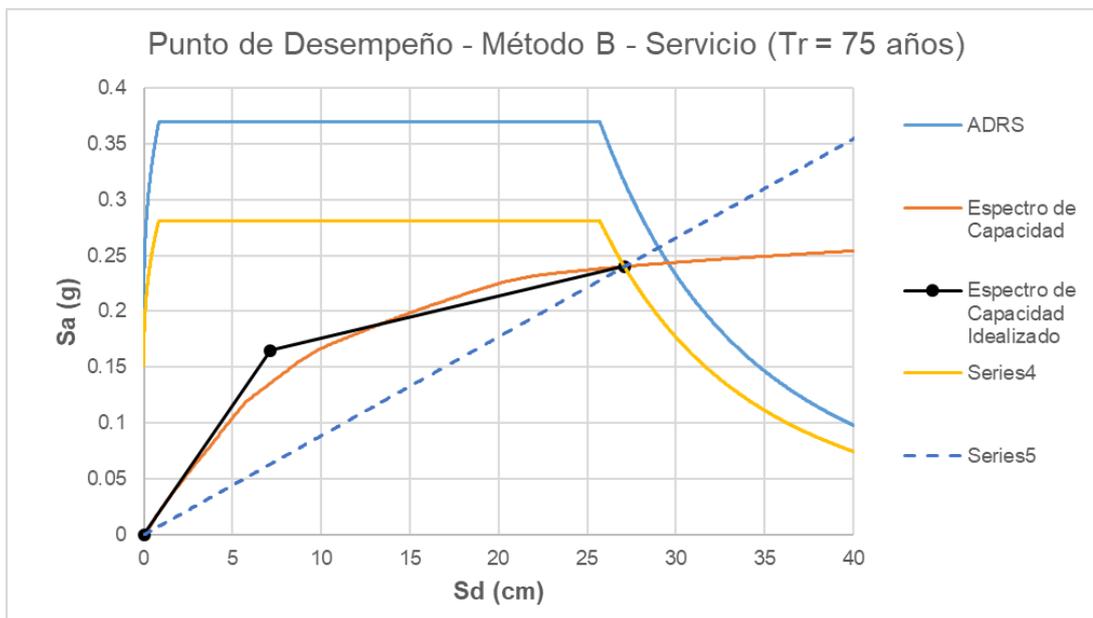


Fig. # 138 - Obtención del punto de desempeño en muelle con plataforma localmente aislada para sismo de servicio por el método B.

Tabla # 56 - Parámetros obtenidos en el método B del espectro de capacidad.

Parámetros de Método de Espectro de Capacidad B – Sismo de servicio			
<b>Ki</b>	1,80 Ton/cm	<b>Ti</b>	1,32 s
<b>α1</b>	1	<b>PF1</b>	0,02643
<b>Φ1 roof</b>	37,84	<b>ε (error relativo)</b>	0,32%
<b>W</b>	77,93 Ton	<b>α</b>	0,163
<b>β<sub>eff</sub></b>	19,26%	<b>T<sub>eff</sub></b>	2,287 s
<b>μ</b>	3,79	<b>B</b>	1,514
<b>M</b>	1,151	<b>T<sub>sec</sub></b>	2,132
<b>a<sub>y</sub></b>	0,170 g	<b>d<sub>y</sub></b>	7,14 cm
<b>a<sub>p</sub></b>	0,240 g	<b>d<sub>p</sub></b>	27,10 cm

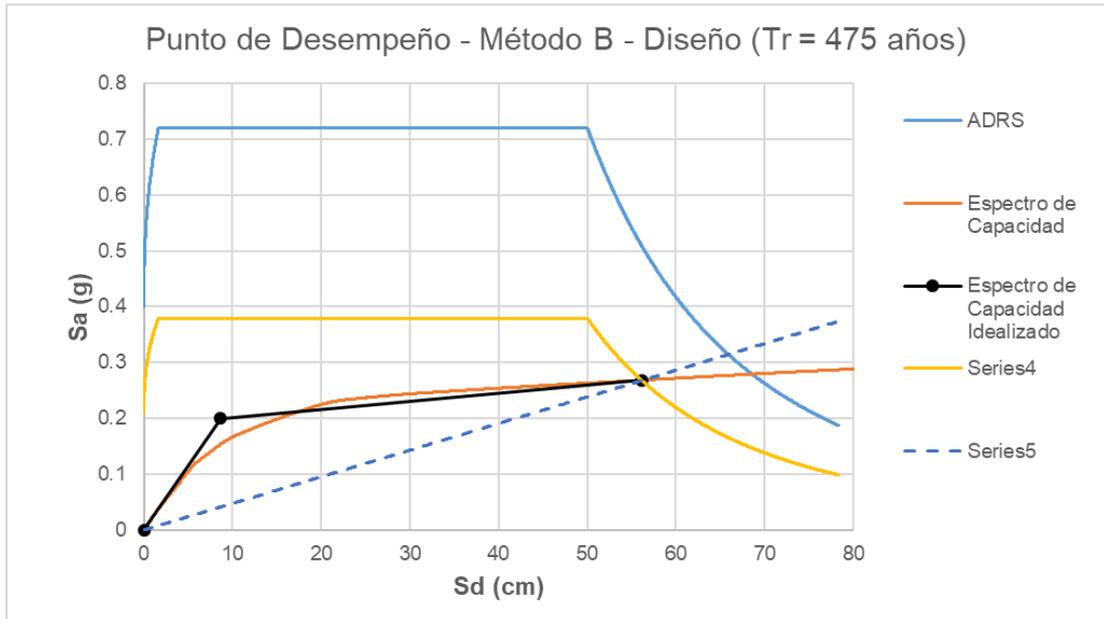


Fig. # 139 - Obtención del punto de desempeño en muelle con plataforma localmente aislada para sismo de diseño por el método B.

Tabla # 57 - Parámetros obtenidos en el método B del espectro de capacidad.

Parámetros de Método de Espectro de Capacidad B – Sismo de diseño			
<b>Ki</b>	1,80 Ton/cm	<b>Ti</b>	1,32 s
<b><math>\alpha_1</math></b>	1	<b>PF1</b>	0,02643
<b><math>\Phi_1</math> roof</b>	37,84	<b><math>\epsilon</math> (error relativo)</b>	0,39%
<b>W</b>	77,93 Ton	<b><math>\alpha</math></b>	0,062
<b><math>\beta_{eff}</math></b>	20,75%	<b><math>T_{eff}</math></b>	2,631 s
<b><math>\mu</math></b>	6,48	<b>B</b>	1,558
<b>M</b>	0,82	<b><math>T_{sec}</math></b>	2,905
<b><math>a_y</math></b>	0,200 g	<b><math>d_y</math></b>	8,67 cm
<b><math>a_p</math></b>	0,268 g	<b><math>d_p</math></b>	56,20 cm

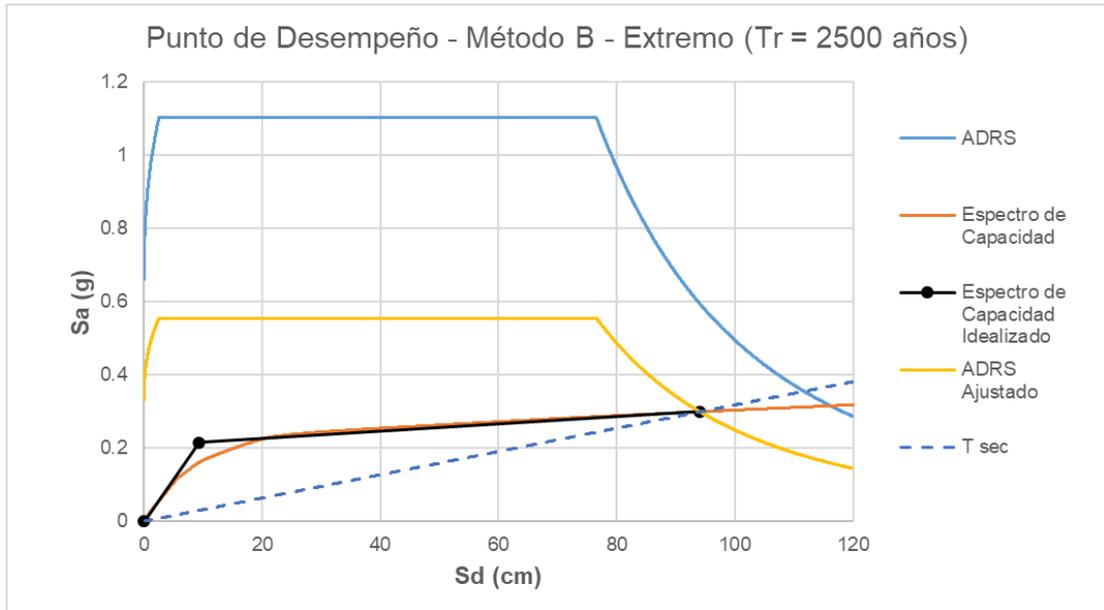
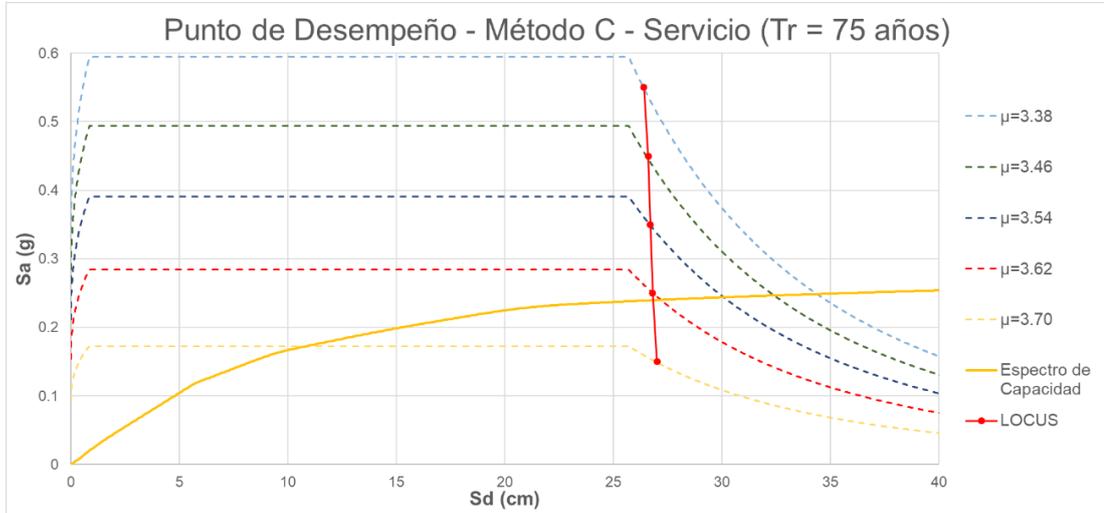


Fig. # 140 - Obtención del punto de desempeño en muelle con plataforma localmente aislada para sismo extremo por el método B.

Tabla # 58 - Parámetros obtenidos en el método B del espectro de capacidad.

Parámetros de Método de Espectro de Capacidad B – Sismo extremo			
<b>Ki</b>	1,80 Ton/cm	<b>Ti</b>	1,32 s
<b>α1</b>	1	<b>PF1</b>	0,02643
<b>Φ1 roof</b>	37,84	<b>ε (error relativo)</b>	0,14%
<b>W</b>	77,93 Ton	<b>α</b>	0,043
<b>β<sub>eff</sub></b>	20,24%	<b>T<sub>eff</sub></b>	3,137 s
<b>μ</b>	10,12	<b>B</b>	1,543
<b>M</b>	0,777	<b>T<sub>sec</sub></b>	3,559
<b>a<sub>y</sub></b>	0,210 g	<b>d<sub>y</sub></b>	9,30 cm
<b>a<sub>p</sub></b>	0,299 g	<b>d<sub>p</sub></b>	94,10 cm

**6.2.4 FEMA 440: Espectro de Capacidad – Método C: Lugar geométrico con varios MADRS**



*Fig. # 141 - Obtención del punto de desempeño en muelle con plataforma localmente aislada para sismo de servicio por el método C.*

*Tabla # 59 - Parámetros obtenidos en el método C del espectro de capacidad.*

**Parámetros de Método de Espectro de Capacidad C – Sismo de servicio**

$\mu$	$\beta_{eff}$ (%)	$T_{eff}$ (s)	$\alpha$	B	M	$T_{sec}$ (s)	$a_p$ (g)	$d_p$ (cm)	$\epsilon$ (%) Error relativo
<b>3,38</b>	17,93	2,139	0,861	1,474	2,369	1,389	0,55	26,40	-68,5
<b>3,46</b>	18,28	2,171	0,624	1,485	1,981	1,542	0,45	26,60	-47,2
<b>3,54</b>	18,59	2,201	0,397	1,494	1,578	1,752	0,35	26,70	-25,6
<b>3,62</b>	18,85	2,230	0,176	1,502	1,153	2,077	0,25	26,80	-3,79
<b>3,70</b>	19,07	2,257	-0,041	1,508	0,703	2,691	0,15	27,00	18,3
	$a_p$		0,24 g			$d_p$		26,80 cm	

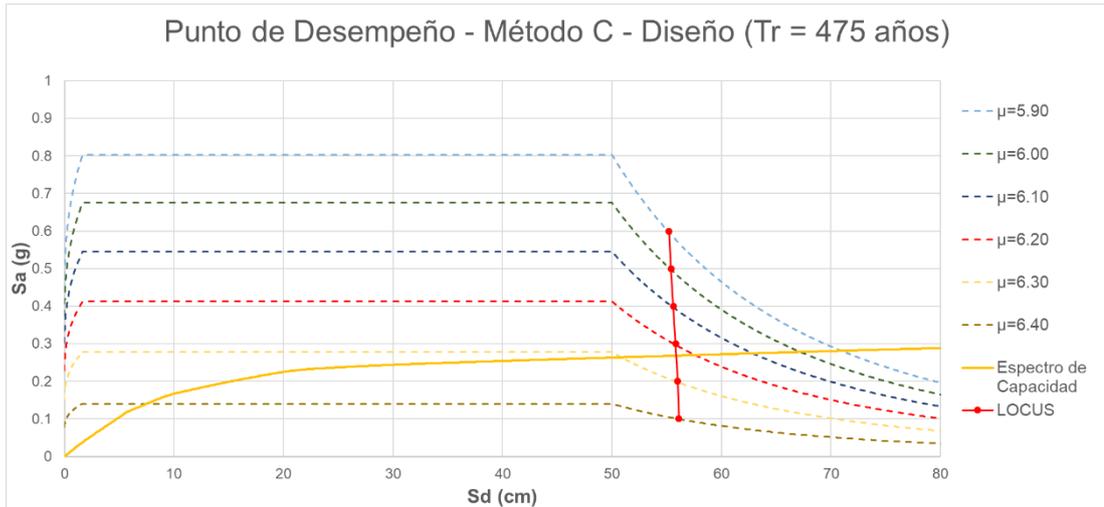


Fig. # 142 - Obtención del punto de desempeño en muelle con plataforma localmente aislada para sismo de diseño por el método C.

Tabla # 60 - Parámetros obtenidos en el método C del espectro de capacidad.

Parámetros de Método de Espectro de Capacidad C – Sismo de diseño									
$\mu$	$\beta_{eff}$ (%)	$T_{eff}$ (s)	$\alpha$	B	M	$T_{sec}$ (s)	$a_p$ (g)	$d_p$ (cm)	$\epsilon$ (%) Error relativo
5,90	20,57	2,530	0,363	1,55	1,729	1,924	0,6	55,20	-67,5
6,00	20,60	2,548	0,269	1,55	1,456	2,112	0,5	55,40	-47,5
6,10	20,63	2,565	0,176	1,55	1,176	2,365	0,4	55,60	-27,5
6,20	20,66	2,582	0,085	1,55	0,891	2,735	0,3	55,80	-7,41
6,30	20,70	2,599	-0,005	1,55	0,600	3,357	0,2	56,00	12,8
6,40	20,73	2,616	-0,094	1,55	0,303	4,751	0,1	56,10	33,1
$a_p$			0,267 g			$d_p$			55,90 cm

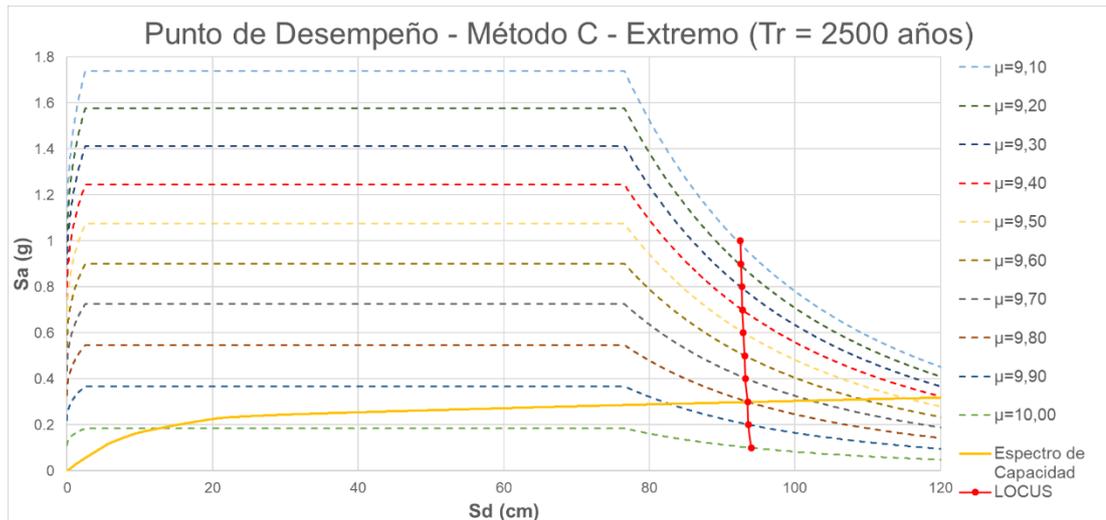


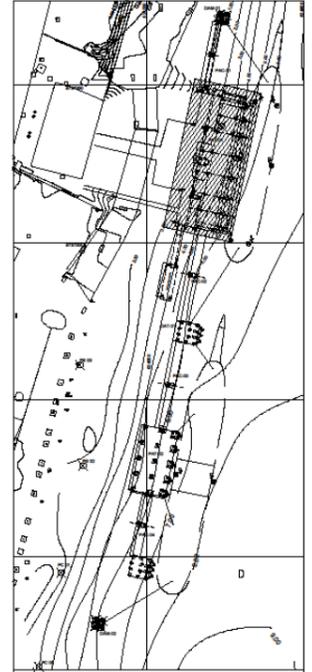
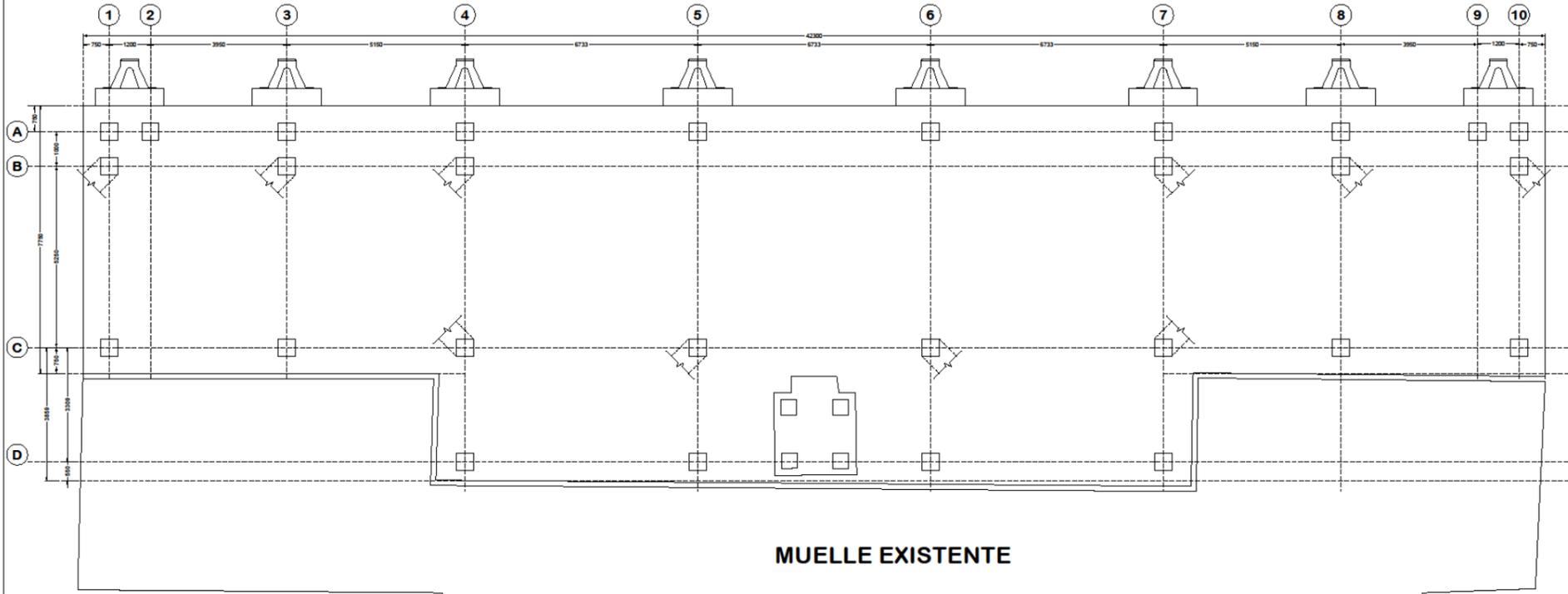
Fig. # 143 - Obtención del punto de desempeño en muelle con plataforma localmente aislada para sismo extremo por el método C.

Tabla # 61 - Parámetros obtenidos en el método C del espectro de capacidad.

Parámetros de Método de Espectro de Capacidad C – Sismo extremo										
$\mu$	$\beta_{eff}$ (%)	$T_{eff}$ (s)	$\alpha$	B	M	$T_{sec}$ (s)	$a_p$ (g)	$d_p$ (cm)	$\epsilon$ (%) Error relativo	
9,10	20,46	3,018	0,402	1,549	2,446	1,929	1,00	92,50	-133	
9,20	20,44	3,030	0,350	1,549	2,217	2,035	0,90	92,60	-114	
9,30	20,42	3,042	0,298	1,548	1,985	2,159	0,80	92,70	-95,4	
9,40	20,40	3,054	0,246	1,548	1,748	2,309	0,70	92,80	-76,6	
9,50	20,38	3,066	0,195	1,547	1,509	2,496	0,60	92,90	-57,8	
9,60	20,36	3,078	0,143	1,547	1,264	2,737	0,50	93,10	-38,9	
9,70	20,34	3,090	0,092	1,546	1,018	3,062	0,40	93,20	-20,0	
9,80	20,31	3,101	0,041	1,545	0,767	3,541	0,30	93,50	-1,15	
9,90	20,29	3,113	-0,009	1,545	0,514	4,339	0,20	93,60	17,8	
10,00	20,27	3,124	-0,060	1,544	0,258	6,150	0,10	94,00	36,7	
$a_p$			0,298 g			$d_p$		93,50 cm		

## **6.3 PLANOS ESTRUCTURALES DE MUELLE DISEÑADO CONVENCIONALMENTE**

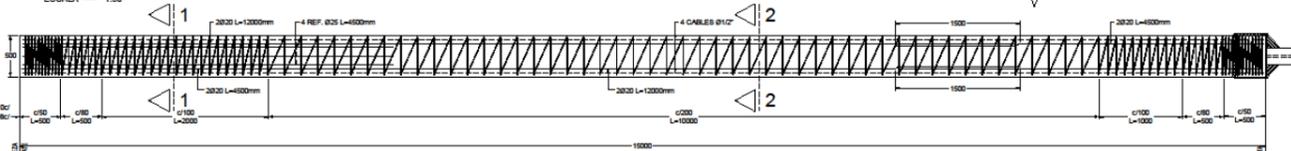
PLANTA DE UBICACION DE PILOTES  
ESCALA 1:50



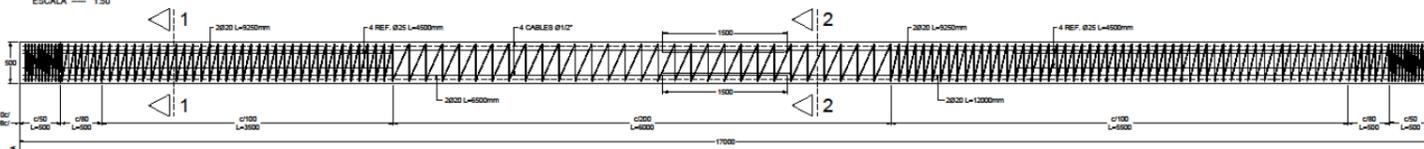
NOTAS GENERALES

- \* SISTEMA DE COORDENADAS UTM WGS 84 ZONA 17M.
- \* CURVAS BATIMETRICAS REFERIDOS AL SISTEMA MLWS.

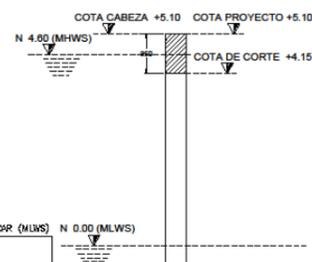
PILOTE EMPATADO (500x500mm) L=15000mm TRAMO 1 (L=32000mm)  
ESCALA 1:50



PILOTE EMPATADO (500x500mm) L=17000mm TRAMO 2  
ESCALA 1:50



ALZADO DE PILOTE CORTE DE CABEZA  
SIN ESCALA

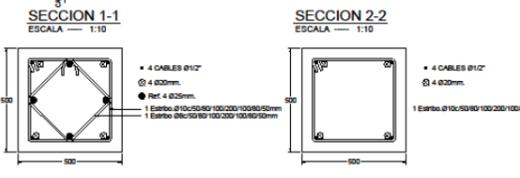


ESPECIFICACIONES

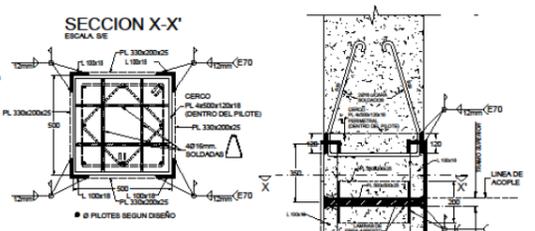
- \* HORMIGÓN PILOTES  $f_c = 420 \text{ Kg/cm}^2$
- \* HORMIGÓN DE VIGAS DOBLE T  $f_c = 420 \text{ Kg/cm}^2$
- \* HORMIGÓN FUNDIDO IN SITU  $f_c = 280 \text{ Kg/cm}^2$
- \* ACERO DE REFUERZO  $f_y = 4200 \text{ Kg/cm}^2$
- \* CABLES PREFORZADOS  $f_{pu} = 19000 \text{ Kg/cm}^2$
- \* RECUBRIMIENTO=50mm A MENOS QUE SE ESPECIFIQUE LO CONTRARIO.
- \* EN EL HORMIGÓN COLOCAR ADITIVO INHIBIDOR DE CORROSION MIGRATORIO DE AMINA TIPO CORTEC MCI 2005 NIS ANÓDICO CÁTODICO A BASE DE CARBOXILATO DE AMINA TIPO CORTEC MCI 2005NS 6 SIMILAR, DOSIFICACION 1 LT. X m<sup>3</sup>.
- \* ELECTRODOS 70 KSI

\* : COTA INOCCR (MLWS)

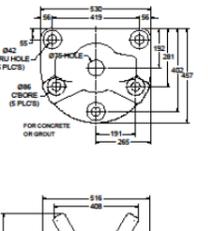
PILOTE #	SECCIÓN DE PILOTES (cm)	LONGITUD TOTAL (mts)	COTA DE HILCA (mts)	COTA DE CORTE (mts)	COTA DE PUNTA (mts)
A1	50x50	32.00	+ 5.10	+ 4.15	- 28.90
A2	50x50	32.00	+ 5.10	+ 4.15	- 28.90
A3	50x50	32.00	+ 5.10	+ 2.85	- 28.90
A4	50x50	32.00	+ 5.10	+ 2.85	- 28.90
A5	50x50	32.00	+ 5.10	+ 2.85	- 28.90
A6	50x50	32.00	+ 5.10	+ 2.85	- 28.90
A7	50x50	32.00	+ 5.10	+ 2.85	- 28.90
A8	50x50	32.00	+ 5.10	+ 2.85	- 28.90
A9	50x50	32.00	+ 5.10	+ 4.15	- 28.90
A10	50x50	32.00	+ 5.10	+ 4.15	- 28.90
B1	50x50	32.00	+ 5.10	+ 4.15	- 28.90
B3	50x50	32.00	+ 5.10	+ 4.15	- 28.90
B4	50x50	32.00	+ 5.10	+ 4.15	- 28.90
B7	50x50	32.00	+ 5.10	+ 4.15	- 28.90
B8	50x50	32.00	+ 5.10	+ 4.15	- 28.90
B10	50x50	32.00	+ 5.10	+ 4.15	- 28.90
C1	50x50	32.00	+ 5.10	+ 4.15	- 28.90
C3	50x50	32.00	+ 5.10	+ 4.15	- 28.90
C4	50x50	32.00	+ 5.10	+ 4.15	- 28.90
C5	50x50	32.00	+ 5.10	+ 4.15	- 28.90
C6	50x50	32.00	+ 5.10	+ 4.15	- 28.90
C7	50x50	32.00	+ 5.10	+ 4.15	- 28.90
C8	50x50	32.00	+ 5.10	+ 4.15	- 28.90
D4	50x50	32.00	+ 5.10	+ 4.15	- 28.90
D5	50x50	32.00	+ 5.10	+ 4.15	- 28.90
D6	50x50	32.00	+ 5.10	+ 4.15	- 28.90
D7	50x50	32.00	+ 5.10	+ 4.15	- 28.90



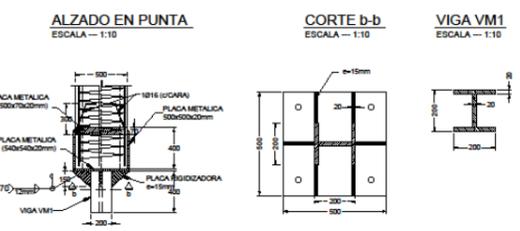
DETALLE DE ACOPLE DE PILOTES  
ESCALA 1:50



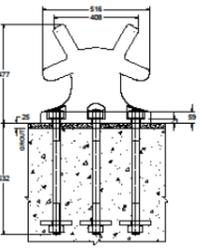
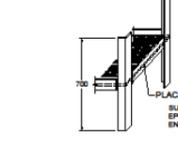
DETALLE DE BITA  
ESCALA 1:10



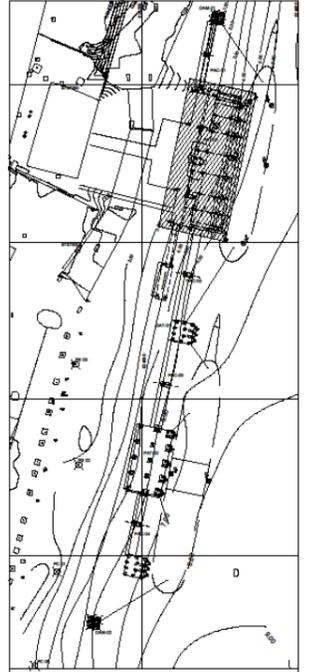
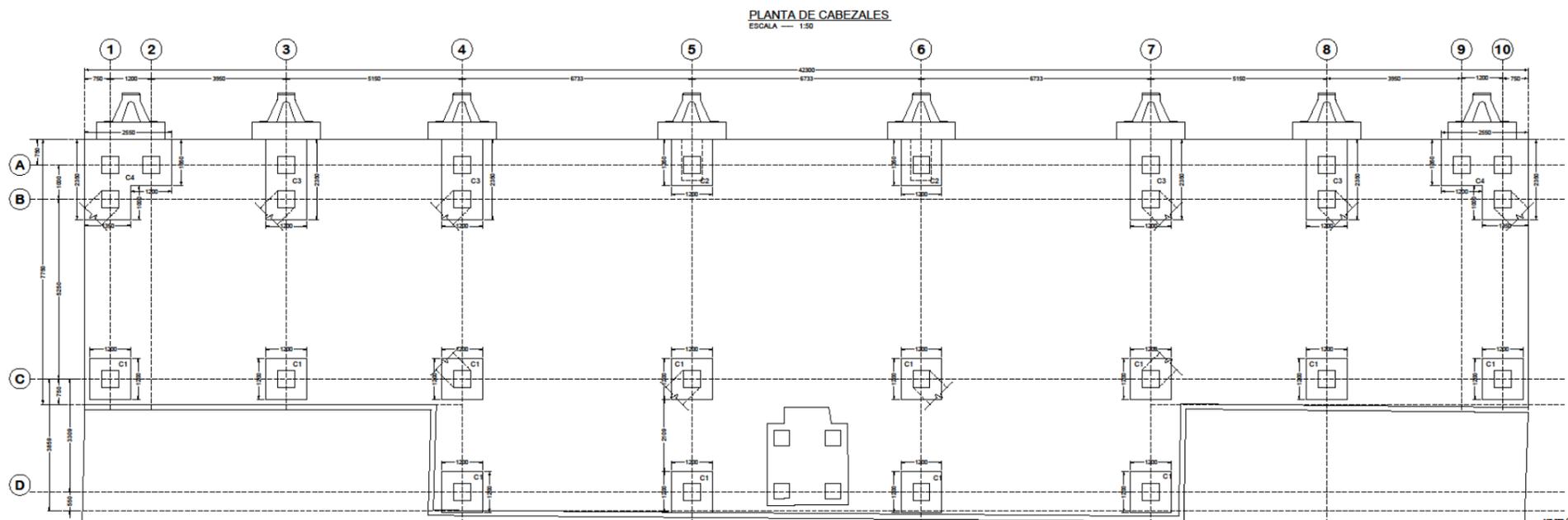
DETALLE DE AZUCHE PARA PILOTES



ISOMETRIA  
ESCALA 1:50



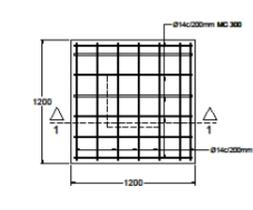
COTA PUNTA - 28.90



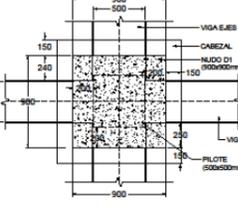
**NOTAS GENERALES**

- \* SISTEMA DE COORDENADAS UTM WGS 84 ZONA 17M.
- \* CURVAS BATIMETRICAS REFERIDOS AL SISTEMA MLWS.

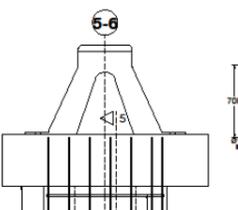
**PLANTA DE CABEZAL C1**  
ESCALA 1:20



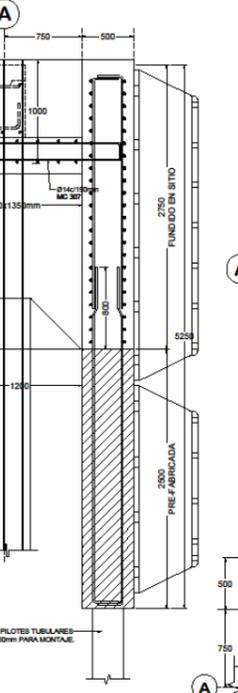
**GEOMETRIA DE NUDO D1**  
ESCALA 1:20



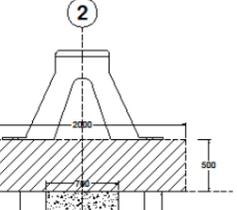
**PLANTA DE CABEZAL C2**  
ESCALA 1:20



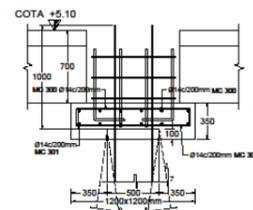
**CORTE 5-5**  
ESCALA 1:20



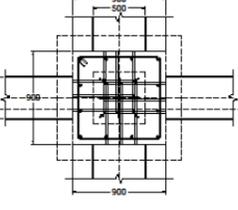
**GEOMETRIA DE NUDO D2**  
ESCALA 1:20



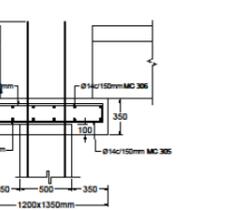
**CORTE 1-1**  
ESCALA 1:20



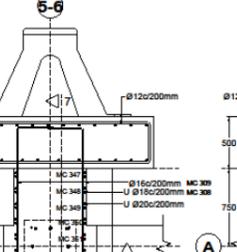
**ARMADURA DE NUDO D1**  
ESCALA 1:20



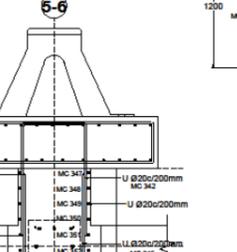
**CORTE 4-4**  
ESCALA 1:20



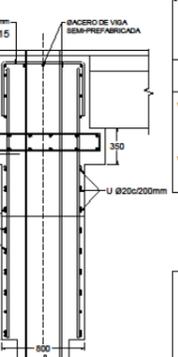
**CORTE 6-6**  
ESCALA 1:20



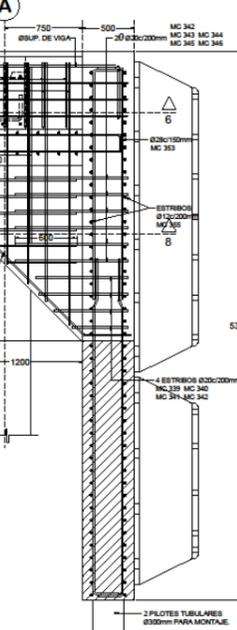
**CORTE 8-8**  
ESCALA 1:20



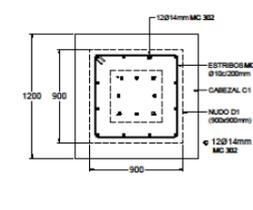
**CORTE 9-9**  
ESCALA 1:20



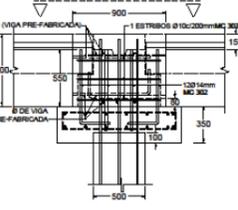
**CORTE 7-7**  
ESCALA 1:20



**CORTE 3-3**  
ESCALA 1:20



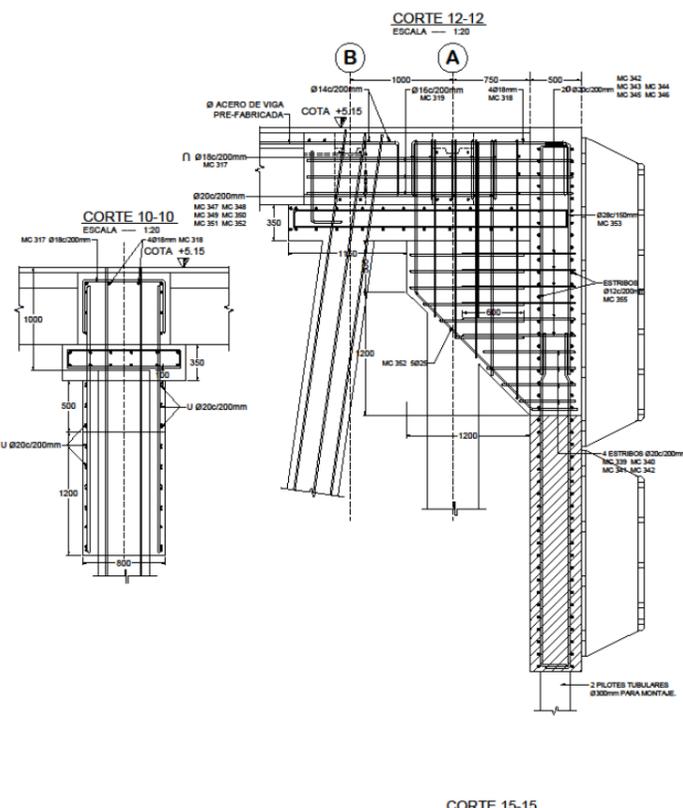
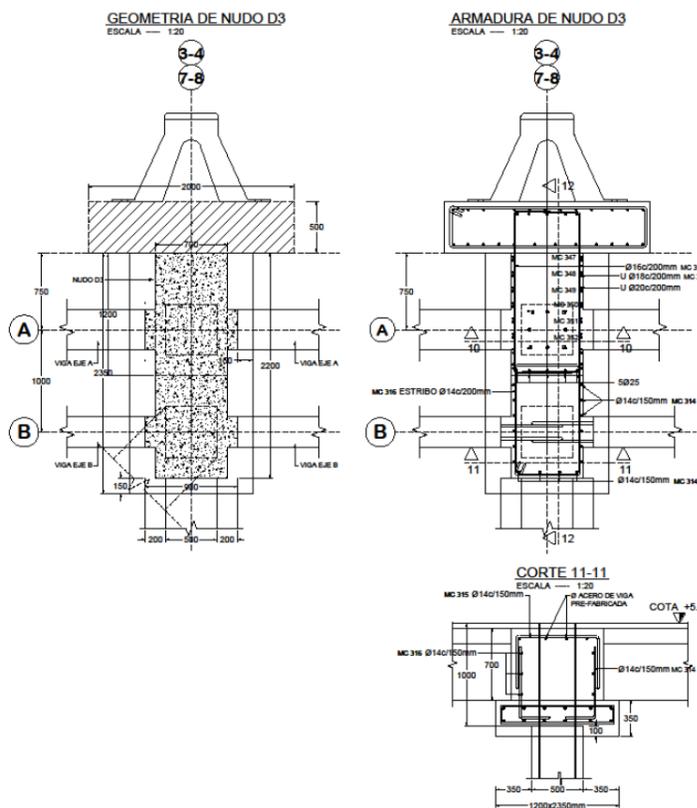
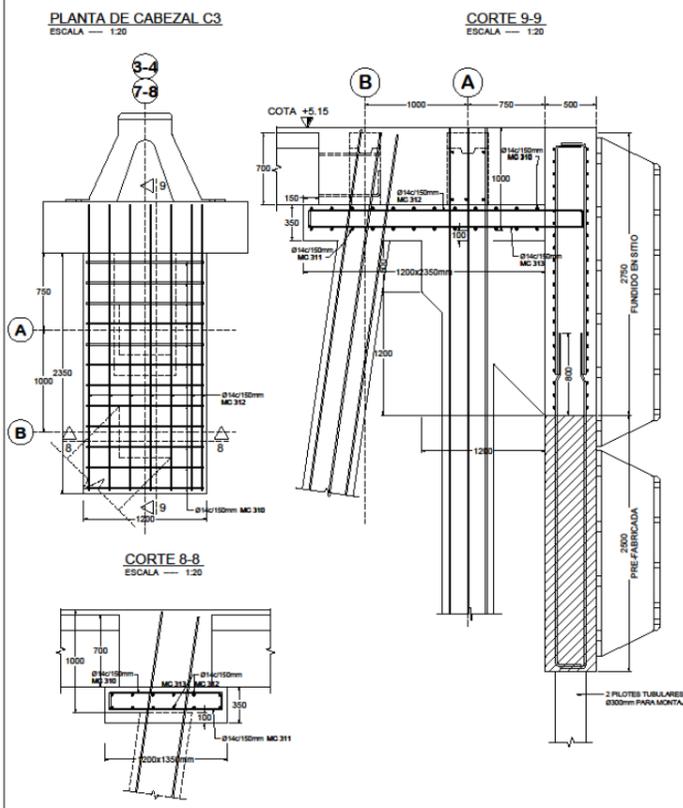
**CORTE 2-2**  
ESCALA 1:20



**ESPECIFICACIONES**

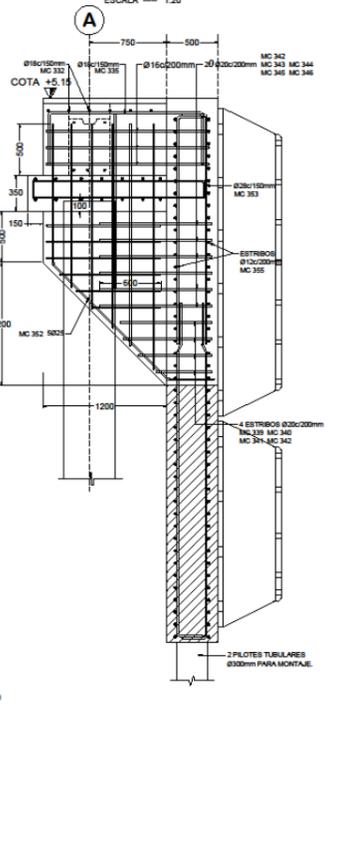
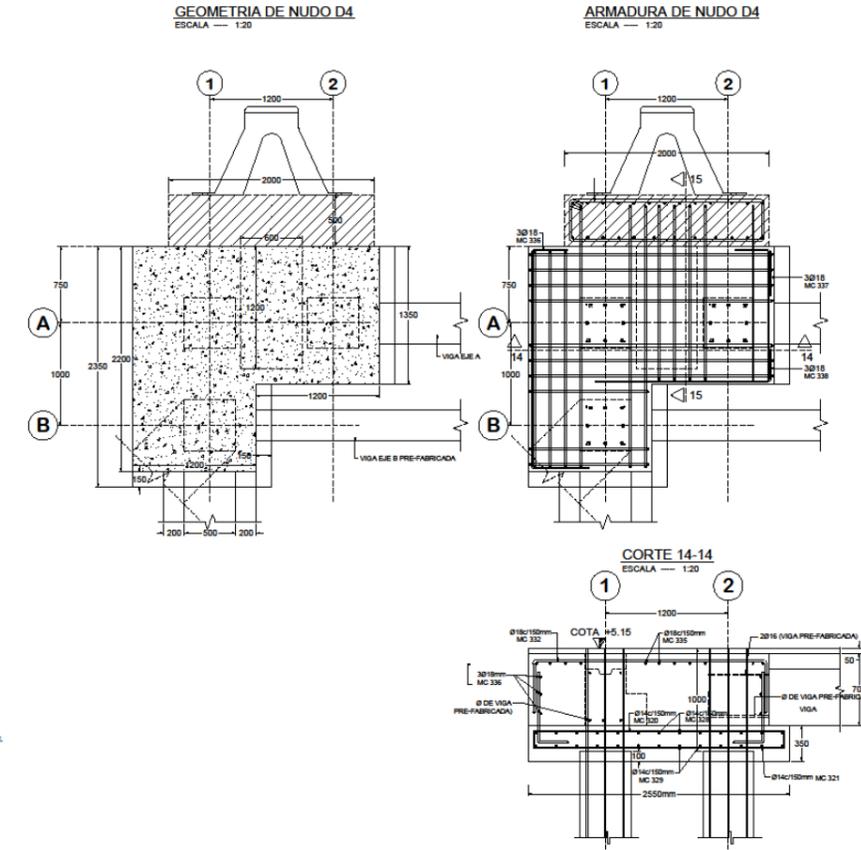
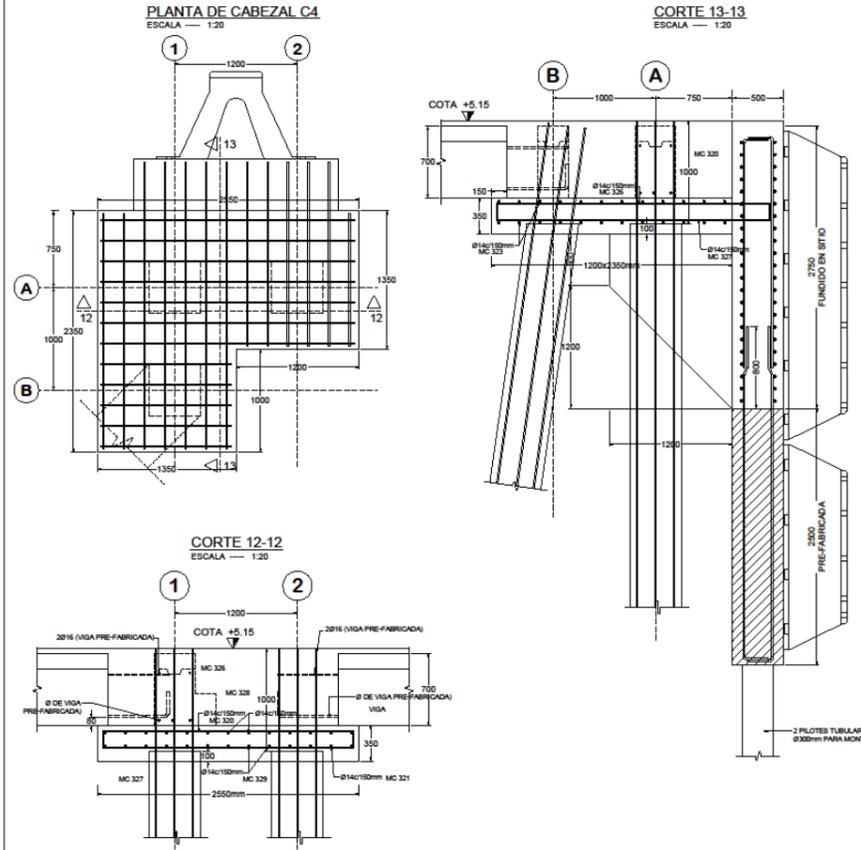
- \* HORMIGÓN PILOTES  $f_c = 420 \text{ Kg/cm}^2$
- \* HORMIGÓN DE VIGAS DOBLE T  $f_c = 420 \text{ Kg/cm}^2$
- \* HORMIGÓN FUNDIDO IN SITU  $f_c = 280 \text{ Kg/cm}^2$
- \* ACERO DE REFUERZO  $f_y = 4200 \text{ Kg/cm}^2$
- \* CABLES PREFORZADOS  $f_{pu} = 19000 \text{ Kg/cm}^2$
- \* RECUBRIMIENTO = 50mm A MENOS QUE SE ESPECIFIQUE LO CONTRARIO.
- \* EN EL HORMIGÓN COLOCAR ADITIVO INHIBIDOR DE CORROSION MIGRATORIO DE AMINA TIPO CORTEC MCI 2005 NS ANÓDICO CÁTODICO A BASE DE CARBOXILATO DE AMINA TIPO CORTEC MCI 2005NS ó SIMILAR, DOSIFICACIÓN 1 LT. X m<sup>3</sup>.
- \* ELECTRODOS 70 KSI

CIBRA				
CONTENIDO				
PLANTA DE UBICACION DE CABEZALES				
DETALLES DE CABEZALES C1 Y C2				
ESCALA	FECHA	DISEÑO	FILEO	LAMINA N°
REVISADO				PAT-EST. 02
CALCULADO POR	REVISADO POR	APROBADO POR		



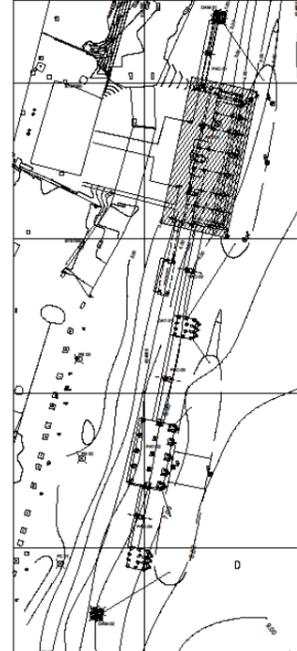
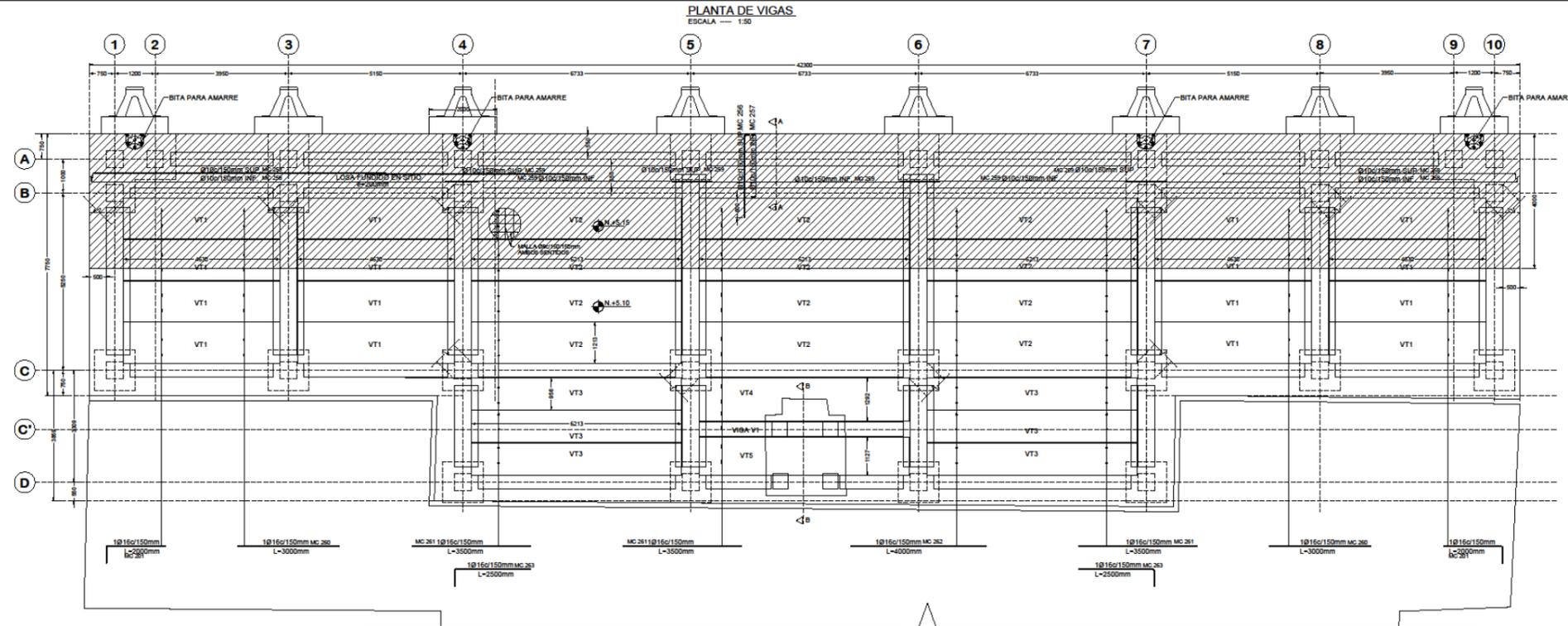
**NOTAS GENERALES**

- \* SISTEMA DE COORDENADAS UTM WGS 84 ZONA 17M.
- \* CURVAS BATIMÉTRICAS REFERIDOS AL SISTEMA MLWS.



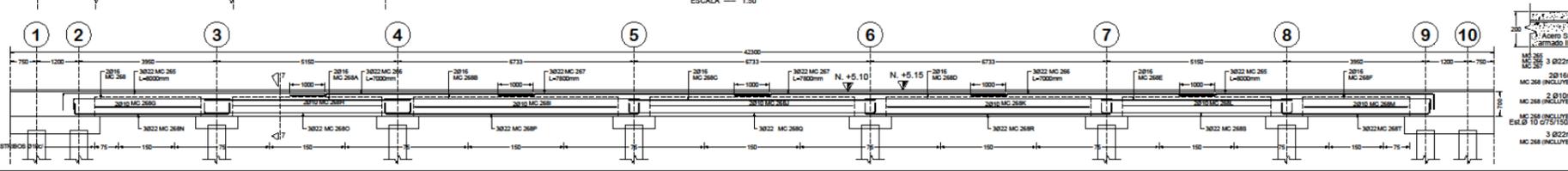
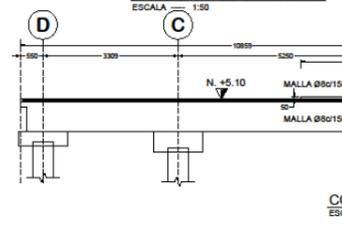
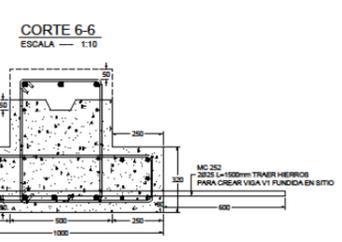
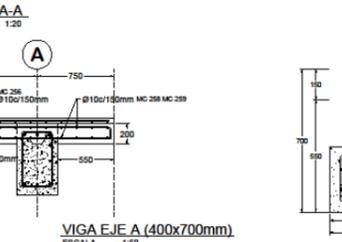
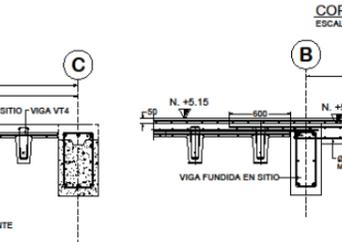
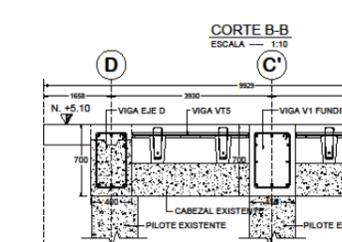
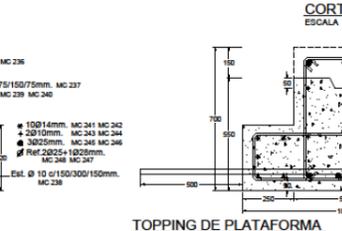
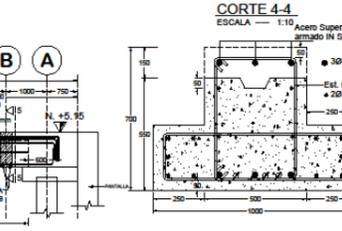
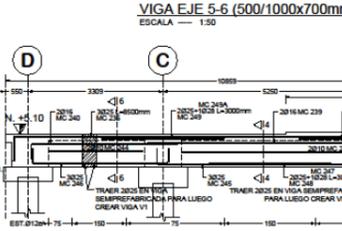
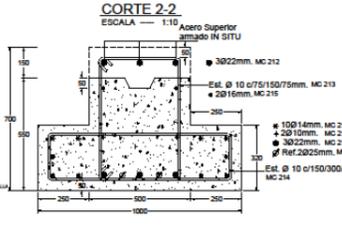
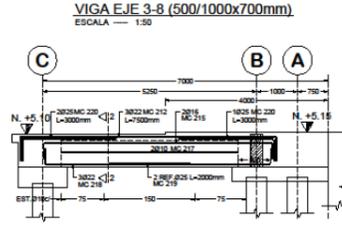
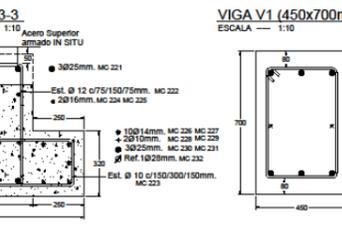
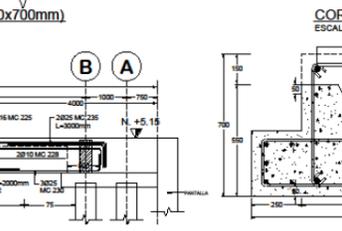
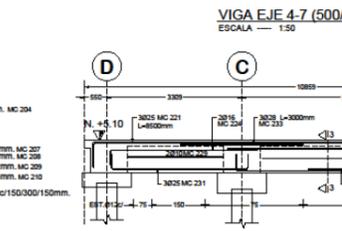
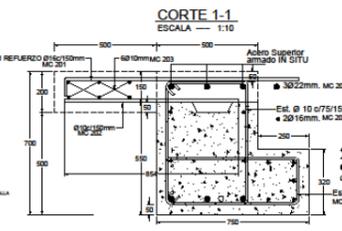
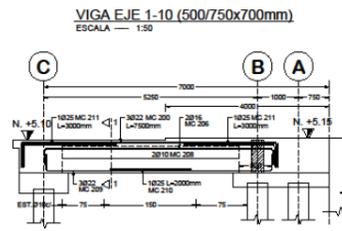
- ESPECIFICACIONES**
- \* HORMIGÓN PILOTES  $f_c = 420 \text{ Kg/cm}^2$
  - \* HORMIGÓN DE VIGAS DOBLE T  $f_c = 420 \text{ Kg/cm}^2$
  - \* HORMIGÓN FUNDIDO IN SITU  $f_c = 280 \text{ Kg/cm}^2$
  - \* ACERO DE REFUERZO  $f_y = 4200 \text{ Kg/cm}^2$
  - \* CABLES PREFORZADOS  $F_{pu} = 19000 \text{ Kg/cm}^2$
  - \* RECUBRIMIENTO = 50mm A MENOS QUE SE ESPECIFIQUE LO CONTRARIO.
  - \* EN EL HORMIGÓN COLOCAR ADITIVO INHIBIDOR DE CORROSIÓN MIGRATORIO DE AMINA TIPO CORTEC MCI 2005 NS ANÓDICO CÁTODICO A BASE DE CARBOXILATO DE AMINA TIPO CORTEC MCI 2005NS ó SIMILAR, DOSIFICACIÓN 1 LT. X  $\text{m}^3$ .
  - \* ELECTRODOS 70 KSI

OBS:				
CONTENIDO				
DETALLES DE CABEZALES C3 y C4				
ESCALA	FECHA	DESBLO	FILE #	LÁMINA N.º
INDICADAS				PAT-EST.03
CALCULADO POR	REVISADO POR	APROBADO POR		



**NOTAS GENERALES**

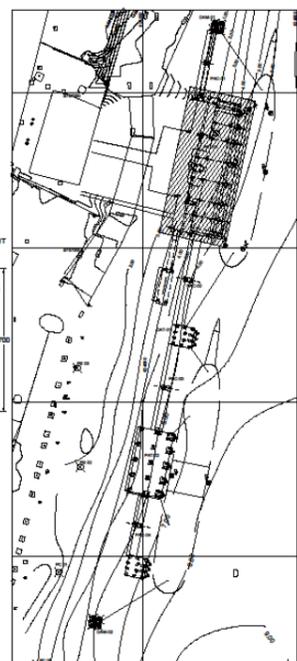
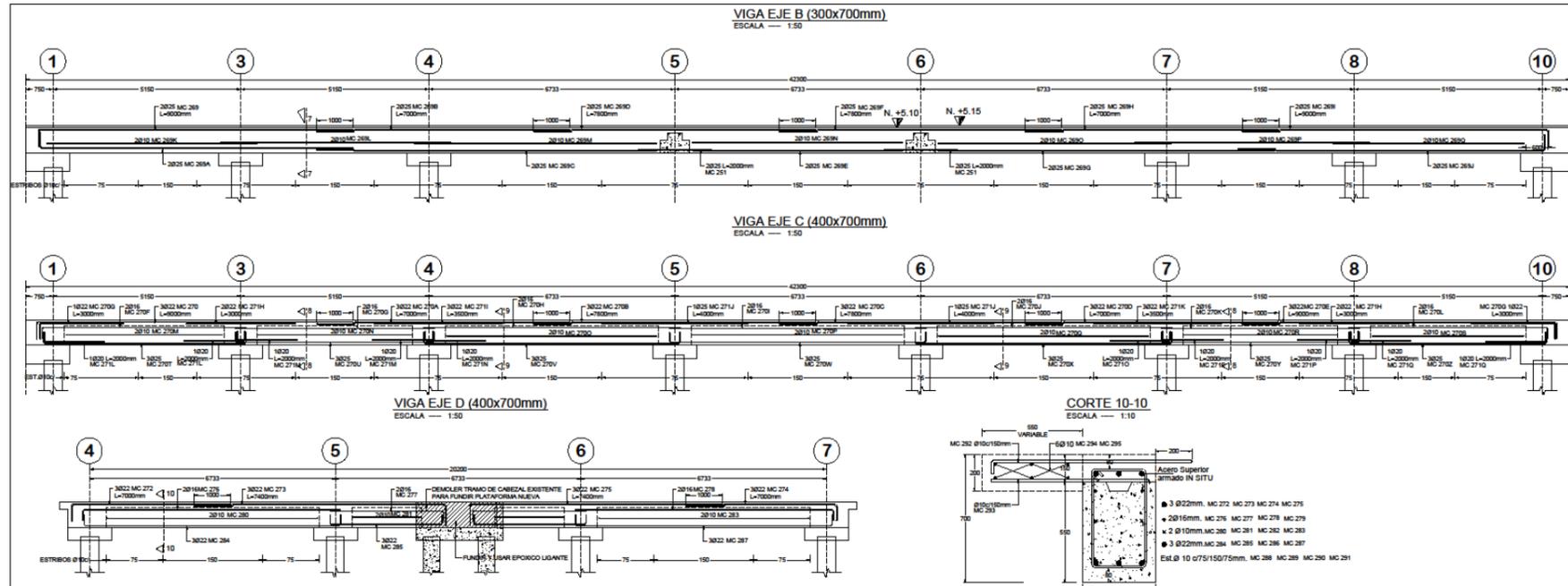
\* SISTEMA DE COORDENADAS  
UTM WGS 84  
ZONA 17M.  
\* CURVAS BATIMÉTRICAS REFERIDOS AL  
SISTEMA MLWS.



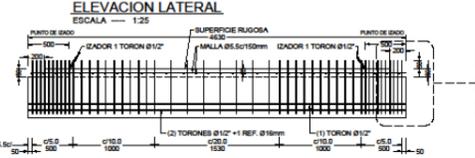
**ESPECIFICACIONES**

- \* HORMIGÓN PILETES  $f_c = 420 \text{ Kg/cm}^2$
- \* HORMIGÓN DE VIGAS DOBLE T  $f_c = 420 \text{ Kg/cm}^2$
- \* HORMIGÓN FUNDIDO IN SITU  $f_c = 280 \text{ Kg/cm}^2$
- \* ACERO DE REFUERZO  $f_y = 4200 \text{ Kg/cm}^2$
- \* CABLES PREFORZADOS  $f_{pu} = 19000 \text{ Kg/cm}^2$
- \* RECUBRIMIENTO=50mm A MENOS QUE SE ESPECIFIQUE LO CONTRARIO.
- \* EN EL HORMIGÓN COLOCAR ADITIVO INHIBIDOR DE CORROSIÓN MIGRATORIO DE AMINA TIPO CORTEC MCI 2005 MS ANÓDICO CÁTODICO A BASE DE CARBOXILATO DE AMINA TIPO CORTEC MCI 2005NS ó SIMILAR, DOSIFICACIÓN 1 LT. X m<sup>3</sup>.
- \* ELECTRODOS 70 KSI

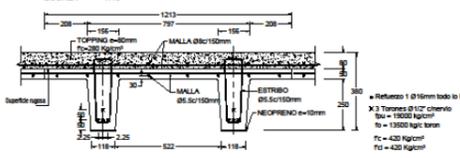
OBRA			
CONTENIDO			
PLANTA DE UBICACION DE VIGAS			
DETALLE DE VIGAS, LOSA			
ESCALA	TITULO	FECHA	FILEO
INDICADAS	INDICADAS	INDICADAS	INDICADAS
CALCULADO POR	REVISADO POR	APROBADO POR	



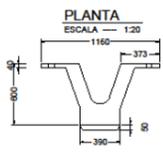
**DETALLE ESTRUCTURAL DE VIGA DOBLE T VT1**



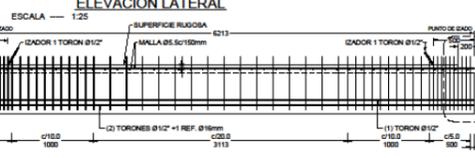
**SECCION TRANSVERSAL DE VIGA VT1**



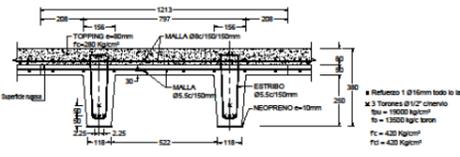
**DEFENSA TIPO ARCO ANP 600 E.3.0 ó SIMILAR**



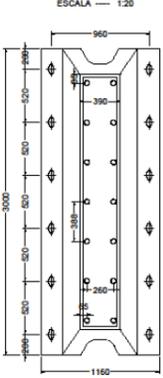
**DETALLE ESTRUCTURAL DE VIGA DOBLE T VT2**



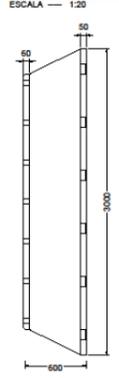
**SECCION TRANSVERSAL DE VIGA VT2**



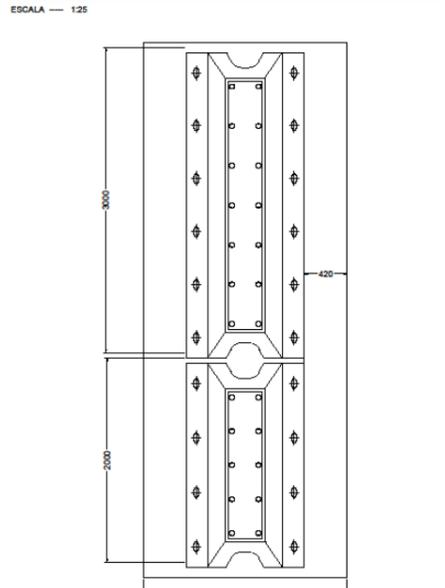
**ALZADO**



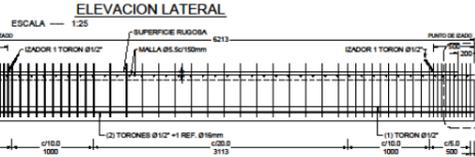
**VISTA LATERAL**



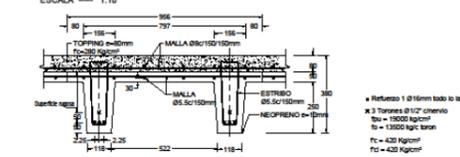
**VISTA FRONTAL - DISPOSICION DE DEFENSAS EN PANTALLA**



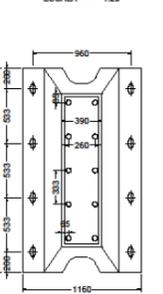
**DETALLE ESTRUCTURAL DE VIGA DOBLE T VT3**



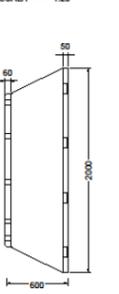
**SECCION TRANSVERSAL DE VIGA VT3**



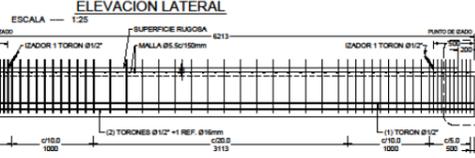
**ALZADO**



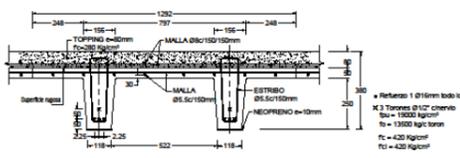
**VISTA LATERAL**



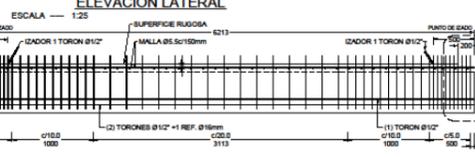
**DETALLE ESTRUCTURAL DE VIGA DOBLE T VT4**



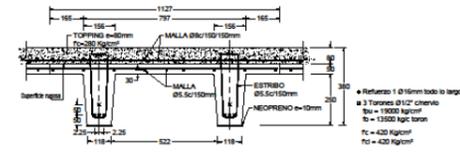
**SECCION TRANSVERSAL DE VIGA VT4**



**DETALLE ESTRUCTURAL DE VIGA DOBLE T VT5**



**SECCION TRANSVERSAL DE VIGA VT5**



**NOTAS GENERALES**

- \* SISTEMA DE COORDENADAS UTM WGS 84 ZONA 17M.
- \* CURVAS BATIMETRICAS REFERIDOS AL SISTEMA MLWS.

**ESPECIFICACIONES**

- \* HORMIGÓN PILOTES  $f_c = 420 \text{ Kg/cm}^2$
- \* HORMIGÓN DE VIGAS DOBLE T  $f_c = 420 \text{ Kg/cm}^2$
- \* HORMIGÓN FUNDIDO IN SITU  $f_c = 280 \text{ Kg/cm}^2$
- \* ACERO DE REFUERZO  $f_y = 4200 \text{ Kg/cm}^2$
- \* CABLES PREFORZADOS  $f_{pu} = 19000 \text{ Kg/cm}^2$
- \* RECUBRIMIENTO = 50mm A MENOS QUE SE ESPECIFIQUE LO CONTRARIO.
- \* EN EL HORMIGÓN COLOCAR ADITIVO INHIBIDOR DE CORROSION MIGRATORIO DE AMINA TIPO CORTEC MCI 2005 NS ANÓDICO CATÓDICO A BASE DE CARBOXILATO DE AMINA TIPO CORTEC MCI 2005NS ó SIMILAR.

OBRA				
CONTENIDO				
PLANTA DE UBICACION DE VIGAS				
DETALLE DE VIGAS, LOGA				
ESCALA INDICADAS	FECHA	DISEÑO	FILEO	LÁMINA N° PAT-EST.05
CALCULADO POR	REVISADO POR	APROBADO POR		



## DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN

Yo, **Lascano Rodríguez, Alejandro Diego**, con C.C: # 0918787490 autor/a del trabajo de titulación: **EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE MUELLES PORTUARIOS INCORPORANDO DISPOSITIVOS DE AISLACIÓN SÍSMICA** previo a la obtención del título de **INGENIERO CIVIL** en la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.

1.- Declaro tener pleno conocimiento de la obligación que tienen las instituciones de educación superior, de conformidad con el Artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior, de entregar a la SENESCYT en formato digital una copia del referido trabajo de titulación para que sea integrado al Sistema Nacional de Información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública respetando los derechos de autor.

2.- Autorizo a la SENESCYT a tener una copia del referido trabajo de titulación, con el propósito de generar un repositorio que democratice la información, respetando las políticas de propiedad intelectual vigentes.

Guayaquil, **28 de febrero de 2020**

f. \_\_\_\_\_

Nombre: **Lascano Rodríguez, Alejandro Diego**

C.C: **0918787490**



## **REPOSITORIO NACIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA**

### **FICHA DE REGISTRO DE TESIS/TRABAJO DE TITULACIÓN**

<b>TEMA Y SUBTEMA:</b>	<b>EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE MUELLES PORTUARIOS INCORPORANDO DISPOSITIVOS DE AISLACIÓN SÍSMICA</b>		
<b>AUTOR(ES)</b>	<b>Alejandro Diego Lascano Rodríguez</b>		
<b>REVISOR(ES)/TUTOR(ES)</b>	<b>Jaime Francisco Hernández Barredo</b>		
<b>INSTITUCIÓN:</b>	<b>Universidad Católica de Santiago de Guayaquil</b>		
<b>FACULTAD:</b>	<b>FACULTAD DE INGENIERÍA</b>		
<b>CARRERA:</b>	<b>CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL</b>		
<b>TÍTULO OBTENIDO:</b>	<b>Ingeniero Civil</b>		
<b>FECHA DE PUBLICACIÓN:</b>	<b>28 de febrero de 2020</b>	<b>No. DE PÁGINAS:</b>	<b>217</b>
<b>ÁREAS TEMÁTICAS:</b>	<b>Ingeniería Civil, Ingeniería Estructural, Ingeniería Sísmica</b>		
<b>PALABRAS CLAVES/ KEYWORDS:</b>	<b>PUERTO; DESEMBARCADERO; EMBARCADERO; ATRACADERO; AISLADOR DE CAUCHO; CAUCHO NATURAL; CAUCHO DE ALTO AMORTIGUAMIENTO; EVALUACIÓN DE DAÑO; DESEMPEÑO SÍSMICO; ANÁLISIS NO LINEAL; PUSHOVER; PILOTES PRESFORZADOS; AISLACIÓN LOCAL; AISLACIÓN TOTAL</b>		
<b>RESUMEN/ABSTRACT (150-250 palabras):</b>			
<p>La implementación de aisladores sísmicos es una solución estructural que ha estado despegando en los últimos años, pues se ofrece que después de un terremoto, una estructura no va a presentar daño, tanto en sus elementos como en sus componentes no estructurales. Esta propuesta es especialmente atractiva para estructuras de gran importancia, como pueden ser los muelles portuarios, tanto en la parte pública como privada. Este tipo de estructuras puede llegar a generar millones de dólares mensuales gracias a la eficiente operatividad en sus instalaciones, permitiendo la carga y descarga de productos importantes para fines específicos dentro de un país o una empresa.</p> <p>Cuando se produce un evento sísmico de gran magnitud, el daño excesivo en una estructura portuaria puede llevar a su consecuente demolición, o a la ejecución de un proceso extenso y complicado de reparaciones que interrumpirá las actividades necesarias para generar ingresos</p>			



monetarios y flujo de productos, y esto perjudica al desarrollo económico de la entidad propietaria del muelle.

En este trabajo de investigación se evaluará el desempeño (relacionado con el daño producido durante distintos eventos sísmicos) de una estructura portuaria con dos soluciones de aislación sísmica, y se comparará con la solución que se utiliza convencionalmente en el diseño estructural de muelles, con el fin de definir ventajas o desventajas de cada propuesta.

<b>ADJUNTO PDF:</b>	<input checked="" type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO
<b>CONTACTO CON AUTOR/ES:</b>	<b>CON</b>	<b>Teléfono:</b> +593-99-098-5283 <b>E-mail:</b> alejandrolascano@hotmail.es
<b>CONTACTO CON LA INSTITUCIÓN (COORDINADOR DEL PROCESO UTE)::</b>	<b>LA</b>	<b>Nombre: Clara Glas</b>
	<b>DEL</b>	<b>Teléfono:</b> +593-98-461-6792
	<b>PROCESO UTE)::</b>	<b>E-mail:</b> clara.glas@cu.ucsg.edu.ec
<b>SECCIÓN PARA USO DE BIBLIOTECA</b>		
<b>Nº. DE REGISTRO (en base a datos):</b>		
<b>Nº. DE CLASIFICACIÓN:</b>		
<b>DIRECCIÓN URL (tesis en la web):</b>		