

# INFORME TECNICO CIVIL-ESTRUCTURAL

PROYECTO:  
EXTENSIÓN DEL SITIO 3 DEL FRENTE DE ATRAQUE  
N°1 DEL PUERTO DE VALPARAÍSO.

VERIFICACIÓN DEL DISEÑO SÍSMICO DEL MUELLE

INFORME DE REVISION INDEPENDIENTE

DOCUMENTO N°: 000-CIT-001

REV.	FECHA	DESCRIPCIÓN DE LA REVISIÓN	POR	REV.	APR. 1	APR. 2	CLIENTE
0	17/05/2016	APROBADO	C.P.L.				
B	16/05/2016	EMITIDO PARA APROBACION	C.P.L.				
A	14/05/2016	EMITIDO PARA REVISION INTERNA	C.P.L.				

## **RESUMEN EJECUTIVO**

El presente Informe Técnico fue solicitado por PMI Energy Services S.A., al Ingeniero Carlos Peña López a modo de opinión técnica especializada e independiente sobre el diseño estructural sismorresistente del nuevo Muelle del Sitio 3 del frente de atraque N°1 del Puerto de Valparaíso.

Los diferentes temas tratados en el presente informe y las discusiones que se desarrollan se basan en la revisión de los documentos entregados por PMI Energy Services S.A. al especialista independiente, cuyo contenido se considera representativo y veraz a todo efecto práctico. El especialista independiente no ha realizado cálculos paralelos o complementarios de ningún tipo, por lo que los temas se analizan de manera conceptual y en base a los datos numéricos proporcionados.

De los aspectos analizados en el presente informe se concluye lo siguiente:

- A juicio del especialista independiente, los análisis y verificaciones estructurales se han desarrollado de manera correcta después de que se han definido todas las solicitaciones de diseño necesarias y las combinaciones entre ellas que deben aplicarse, en particular luego de definida la demanda sísmica. Esto significa que en general los factores de seguridad usados para validar la elección de los elementos estructurales cumplen con los mínimos que establece el proyecto y la normativa aplicable.
- El muelle ha sido verificado en el Informe N°5 de SyS (ver sección 1.3) utilizando un nivel de demanda sísmica lateral que es un 25% menor al que debiera resistir de acuerdo a la normativa aplicable (NCh2369) considerada en conjunto con las actuales especificaciones que se han definido por el comité de expertos encargado de estos temas dentro del contexto de la actualización que se encuentra en curso para esta norma. Es importante aclarar que la solicitación sísmica que resulta de acoger las modificaciones en curso de la norma es menor (parámetros:  $R=3.5$ ,  $\xi=4\%$ ) a la que impone de forma rigurosa la versión actualmente vigente (parámetros:  $R=2.0$ ,  $\xi=2\%$ ). A juicio del especialista independiente, el adoptar para el diseño esta solicitación corregida (menor a la rigurosamente normativa) es correcto desde el punto de vista técnico ya que constituye un acuerdo en relación a una interpretación más certera y específica de los criterios normativos vigentes. La reducción general de un 25% que se ha realizado sobre la solicitación sísmica lateral de diseño, si bien se encuentra permitida por la normativa (sección 5.8.1.3 de NCh2369), tiene como requisito el contar con un estudio de Riesgo Sísmico local que avale y justifique esta medida desde un punto de vista teórico. Al momento de la elaboración del presente informe no se ha tenido a la vista dicho estudio de Riesgo Sísmico.
- La verificación estructural ha sido controlada por la demanda de corte basal mínimo, y sobre este valor se ha realizado la reducción del 25% mencionada anteriormente. Sin embargo, la normativa no permite reducciones sobre dicho valor mínimo. A juicio del especialista independiente, aun cuando en la práctica el estudio de Riesgo Sísmico no podría disminuir el valor mínimo de diseño estándar, podría entregar información valiosa para la realización de análisis avanzados que den cuenta del desempeño realista que se puede esperar en la estructura, de forma que sea posible verificar si los objetivos del proyecto pueden cumplirse aun cuando puedan existir desviaciones normativas.

- De la revisión de la información que se ha realizado se desprende que la resistencia de diseño que puede entregar el fondo marino (proveniente del estudio geotécnico actualizado) se encuentra utilizada en su totalidad por algunos pilotes, tanto en condición de tracción como de compresión. Para las condiciones que ha considerado el diseño esta situación es correcta. Sin embargo, a juicio del especialista independiente, en el caso en que las cargas de diseño no puedan ser reducidas (en relación a las estándar) en la magnitud que se ha considerado, es altamente probable que las resistencias de diseño del fondo marino se vean sobrepasadas. Esta situación podría conducir a requerir anclajes a la roca en algunos pilotes o mejoramientos en la capacidad de punta.

## INDICE

	Pág.
<b>1.0 ASPECTOS GENERALES</b> .....	<b>5</b>
1.1 INTRODUCCION .....	5
1.2 ALCANCE Y OBJETIVOS .....	6
1.3 REFERENCIAS.....	6
<b>2.0 TEMAS EVALUADOS</b> .....	<b>7</b>
2.1 ESTADOS DE CARGA Y COMBINACIONES DE DISEÑO .....	7
2.2 ANEXO VIII .....	7
2.3 PARAMETROS SISMICOS Y ESPECTROS DE DISEÑO .....	8
2.4 EVALUACIÓN DE LA DEMANDA SÍSMICA.....	9
2.5 VERIFICACION DE PILOTES, VIGAS, Y RESISTENCIA DISPONIBLE DEL SUELO.....	10
<b>3.0 CONCLUSIONES</b> .....	<b>11</b>

## **1.0 ASPECTOS GENERALES**

El presente Informe Técnico fue solicitado por PMI Energy Services S.A. (PMI), al Ingeniero Carlos Peña López a modo de opinión técnica especializada e independiente sobre el diseño estructural sismorresistente del nuevo Muelle del Sitio 3 del frente de Atraque N°1 del Puerto de Valparaíso.

Dentro del presente informe se exponen juicios del especialista relacionados a las formas de solución de problemas específicos en cuanto a su cumplimiento tanto de la normativa actualmente aplicable como a la consistencia de las decisiones a la luz del estado de la práctica de la profesión. Todo lo anterior, dentro de un contexto exclusivo de diseño estructural sismorresistente.

Se aclara que el Ingeniero Especialista que emite el presente informe no ha tenido participación de ningún tipo en el diseño original de la estructura ni en sus posteriores revisiones hasta el momento en que se elabora este documento.

Los diferentes temas tratados en el presente informe y las discusiones que se desarrollan se basan en la revisión de los documentos entregados por PMI al especialista independiente, cuyo contenido se considera representativo y veraz a todo efecto práctico. El especialista independiente no ha realizado cálculos paralelos o complementarios de ningún tipo, por lo que los temas se analizan de manera conceptual y en base a los datos numéricos proporcionados.

## **1.1 INTRODUCCION**

El muelle de la extensión del Sitio 3 del Frente de Atraque N°1 del Puerto de Valparaíso, fue diseñado por la empresa de Ingeniería PRDW Consulting Port and Coastal Engineers (PRDW), y construido por la Empresa Constructora BELFI (BELFI). Los estudios de suelos del proyecto estuvieron a cargo de la empresa GEOVENOR Ingenieros Consultores en Geotecnia (GEOVENOR).

A solicitud de la Empresa Portuaria Valparaíso (EPV), la empresa SyS Ingenieros Consultores Ltda. (SyS) ha realizado una verificación del diseño sismorresistente del muelle citado, concluyendo esencialmente que se ha dado cumplimiento tanto a las condiciones del contrato como a la normativa nacional aplicable. Las condiciones técnicas que fueron consideradas para el desarrollo de dicha revisión y las conclusiones específicas obtenidas se exponen en el siguiente documento:

- Informe N°5 - Extensión del Sitio 3 del Frente de Atraque N°1 Del puerto de Valparaíso. Verificación del diseño sísmico del Muelle según contrato de concesión (Anexo VIII). Interacción muelle-grúas (Suelo tipo III). Revisión 0, SyS Ingenieros Consultores Ltda.

## 1.2 ALCANCE Y OBJETIVOS

El alcance de los trabajos realizados por el especialista independiente corresponde a la revisión desde el punto de vista del diseño estructural sismorresistente de los documentos provistos por PMI. El objetivo de dicha revisión es emitir una opinión técnica fundada sobre el cumplimiento de la normativa nacional vigente y el estado de la práctica de la profesión.

Se excluye del alcance de los trabajos la realización de verificaciones paralelas o complementarias de cualquier tipo.

## 1.3 REFERENCIAS

Para el desarrollo de los trabajos de revisión se han tenido a la vista los siguientes documentos proporcionados por PMI:

- Informe N°5 - Extensión del Sitio 3 del Frente de Atraque N°1 Del puerto de Valparaíso. Verificación del diseño sísmico del Muelle según contrato de concesión (Anexo VIII). Interacción muelle-grúas (Suelo tipo III). Revisión 0, SyS Ingenieros Consultores Ltda.
- Anexo VIII. Criterios de Diseño de Obras y Mejoras. Documento que forma parte del Contrato de Concesión de 1999 y su modificación del 9 de Enero de 2012.
- Norma Chilena NCh2369 Of.2003 "Diseño Sísmico de Estructuras e Instalaciones Industriales".

Adicionalmente, se ha considerado la siguiente información complementaria en el estado en que se encuentra al momento de la elaboración del presente documento:

- Proposición actualización Norma NCh2369. Nuevo Capítulo: Estructuras Marítimo-Portuarias de tipo Muelle Transparente.
- Proposición actualización Norma NCh2369. Actualización Capítulo 5: Análisis sísmico.

A juicio del especialista independiente es importante considerar las actualizaciones normativas que se encuentran en curso debido a que se trata de mejoras y precisiones que incorporan la experiencia y el avance técnico que se ha generado desde la oficialización de NCh2369 en el año 2003. Si bien es cierto que no se trata de información que sea de uso obligatorio por la vía legal al momento de la elaboración del presente informe, se trata de acuerdos generados entre profesionales competentes y reconocidos dentro del ámbito nacional en las materias correspondientes. Es claro que existe la posibilidad de que esta información sea corregida de manera previa a la oficialización de la nueva edición de NCh2369. No obstante, al día de hoy se trata de temas cerrados y aprobados por el panel de expertos que conforman el comité central del trabajo de actualización encargado por el Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU) al Instituto de la Construcción (IC).

## **2.0 TEMAS EVALUADOS**

### **2.1 ESTADOS DE CARGA Y COMBINACIONES DE DISEÑO**

A juicio del especialista independiente tanto los estados de cargas considerados como las combinaciones de las mismas que han sido utilizadas para la realización de las verificaciones en el Informe N° 5 de SyS se encuentran correctos y obedecen a la normativa nacional aplicable.

Los valores de las solicitaciones consideradas como cargas permanentes, sobrecargas de uso, y exigencia de grúas tanto desde el punto de vista de la magnitud como de la ubicación de las cargas no revelan inconvenientes de ningún tipo.

En cuanto al valor de la solicitación sísmica utilizada en las verificaciones, se discute en extenso en las siguientes secciones.

### **2.2 ANEXO VIII**

El documento Anexo VIII comienza estableciendo que impone requerimientos mínimos para el diseño. Desde este punto de vista, se entiende que cualquier requerimiento superior que sea necesario usar cumple con estas disposiciones. Sin embargo, a juicio del especialista independiente también deja claro que no se acepta un estándar menor bajo ninguna circunstancia.

En principio, el documento no cita directamente como referencia a NCh2369. Sin embargo la menciona en su sección 3.4 Solicitación sísmica. Probablemente esta situación obedece a que se trata de un documento emitido previamente a la oficialización de la normativa en el año 2003. No obstante, la oficialización de la normativa la hace aplicable al día de hoy de manera obligatoria, de manera que no es requerido el que sea citada en el documento para hacer exigible su cumplimiento (mínimo legal).

A juicio del especialista independiente, el escenario descrito indica que deben adoptarse como mínimos para el diseño las condiciones más exigentes entre ambos documentos en todo aquello que no resulte contradictorio, y en caso de contradicción debiera prevalecer NCh2369 en el entendido que se trata de un documento legalmente mandatorio. Esta también pareciera ser la intención de la sección 3.4 del Anexo VIII dada la forma en que se establece la demanda de diseño.

Se aclara que NCh2369 en su sección 1.2 declara como excepción de alcance únicamente a muelles de tipo gravitacional. Por esta razón, se hace exigible el uso de NCh2369 en el caso en estudio.

Con todo lo anterior, el espectro de diseño del Anexo VIII define un nivel mínimo para la demanda sísmica de  $S_a=0.1$ . El cuál se establece que podría ser corregido sólo mediante un Estudio de Riesgo Sísmico.

## 2.3 PARAMETROS SÍSMICOS Y ESPECTROS DE DISEÑO

En el caso del Espectro de diseño definido por el Anexo VIII, la sollicitación sísmica depende únicamente del periodo fundamental de análisis. Dada esta situación se entiende que otros parámetros de los cuales depende esta sollicitación ya han sido elegidos y se encuentran incorporados en el espectro. Debido a que no se aclara la dirección de la sollicitación sísmica que se define, debe entenderse en virtud de la magnitud de los valores que se entregan que se trata de la dirección horizontal.

En el Anexo VIII no se aclara la magnitud ni la forma de uso de la sollicitación sísmica vertical. Siendo de esta forma, a juicio del especialista independiente debe utilizarse todo aquello que se encuentra expuesto en NCh2369 en relación a esta materia. En consecuencia existe coincidencia con lo considerado por SyS.

En el caso del Espectro de diseño definido por NCh2369, la sollicitación sísmica horizontal depende de parámetros que provienen de cuatro orígenes diferentes: Tipo de suelo, Zona sísmica, Categoría estructural, Tipo de estructuración. La clasificación de suelos proviene de los estudios geotécnicos desarrollados para el lugar específico de emplazamiento. La zona sísmica se define de acuerdo a la ubicación geográfica de la estructura. La categoría estructural se define de acuerdo a la importancia de la estructura. El tipo de estructuración se define en función del comportamiento que debe desarrollar la estructura ante eventos sísmicos severos.

NCh2369 define valores para todos los parámetros que deben considerarse en función de lo expuesto en el párrafo anterior. A juicio del especialista independiente, en el Informe N° 5 de SyS todos los parámetros correspondientes a los tres primeros orígenes mencionados se encuentran correctos. En el caso de los parámetros asociados al tipo de estructuración, específicamente R (Factor de modificación de la respuesta) y  $\xi$  (Razón de amortiguamiento) conviene aclarar lo siguiente.

En líneas generales las estructuras portuarias del tipo de la que se encuentra en discusión suelen ser difíciles de asimilar de manera clara a uno de los sistemas estructurales definidos en las Tablas 5.5 y 5.6 de NCh2369, por este motivo y en estricto rigor debieran usarse los parámetros  $R=2.0$ ,  $\xi=2\%$ , de acuerdo a la sección 4.7 de la normativa citada. No obstante, como ya se ha mencionado en la sección 1.3, se encuentra en trabajo una actualización de NCh2369 que incluye un Capítulo con disposiciones específicas aplicables a estructuras portuarias. En particular dicho Capítulo incorpora una nueva tabla de parámetros de diseño correspondientes a estructuraciones típicas de muelles y que por lo tanto resultan adecuados para su uso dentro del territorio nacional. Para el caso de la estructura en estudio los parámetros que la nueva tabla indica son  $R=3.5$ ,  $\xi=4\%$ . El uso de estos parámetros conduce a una demanda sísmica de diseño menor a la rigurosamente vigente ( $R=2.0$ ,  $\xi=2\%$ ), no obstante a juicio del especialista independiente, el adoptar para el diseño esta sollicitación corregida es correcto desde el punto de vista técnico ya que constituye un acuerdo entre los especialistas en relación a una interpretación más certera y específica de los criterios normativos vigentes.

Sin perjuicio de lo anterior, debe tenerse en cuenta que el adoptar parcialmente las disposiciones de diseño que se exponen en el nuevo Capítulo en estudio de la normativa podría conducir a una aplicación inconsistente e incluso errónea de los mismos. Es decir, a juicio del



especialista independiente la decisión a tomar debiera ser el uso del nuevo Capítulo como un todo, lo cual impone un contexto consistente de requisitos de diseño complementarios.

## 2.4 EVALUACIÓN DE LA DEMANDA SÍSMICA

En el Informe N°5 de SyS el muelle ha sido verificado utilizando un nivel de demanda sísmica lateral que es igual al 75% de aquel que debiera resistir de acuerdo a la normativa aplicable (NCh2369) considerada en conjunto con las actuales especificaciones ( $R=3.5$ ,  $\xi=4\%$ ) que se han definido por el comité de expertos (ver sección 1.3).

Esta reducción de un 25% que se ha realizado sobre la sollicitación sísmica lateral de diseño "estándar" se encuentra permitida por la normativa en su sección 5.8, y tiene como requisito el contar con un estudio de Riesgo Sísmico local que avale y justifique esta medida desde un punto de vista teórico. El concepto de fondo es demostrar que efectivamente es razonable reducir la demanda estándar de diseño (de la norma) sin comprometer los niveles de seguridad establecidos para el proyecto específico. Como ya se ha dicho, el Anexo VIII también impone como requisito la existencia de un estudio de Riesgo sísmico para corregir la demanda "estándar".

Al momento de la elaboración del presente informe no se ha tenido a la vista el estudio de Riesgo Sísmico mencionado. Es importante señalar que la actualización de NCh2369 que se encuentra en desarrollo toca este punto en particular. En concreto, mejora y extiende la redacción de manera que sea claro el objetivo y condiciones que debe cumplir el estudio de Riesgo Sísmico. A Juicio del especialista independiente, es altamente deseable que se desarrolle el estudio de Riesgo Sísmico al amparo de las nuevas disposiciones aclaratorias, aun cuando por el momento no se trate de un documento con fuerza de ley.

Dicho lo anterior, la verificación estructural realizada por SyS declara que el diseño ha sido controlado por la condición de corte basal mínimo en todos los escenarios. Y es esta sollicitación de corte basal mínimo la que ha sido reducida en un 25% bajo el nivel "estándar" en el Informe N° 5 de SyS. Este aspecto resulta muy importante desde el punto de vista práctico, ya que actualmente NCh2369 en su sección 5.8.3 no permite reducciones sobre el nivel de corte basal mínimo para análisis espectrales, que es la metodología que se ha utilizado.

A modo de comentario, la actualización de NCh2369 a este respecto, limita la reducción de la sollicitación sísmica mencionada a un 20% y mantiene la condición de no reducción sobre el nivel de corte basal mínimo estándar.

De lo anterior se desprende que aún en presencia de un estudio de Riesgo Sísmico local "favorable" no podría reducirse la sollicitación de diseño al nivel que se ha utilizado en la verificación desarrollada por SyS en su Informe N°5, al menos no con una base rigurosa en las disposiciones normativas.

Con todo lo anterior, a juicio del especialista independiente continúa siendo importante contar con el estudio de Riesgo Sísmico local. Esto debido a que basándose en la información que defina el estudio y con el uso de análisis no convencionales de tipo tiempo historia e incluso incorporando inelasticidades al sistema podría concluirse que la estructura cumple con los

objetivos de desempeño que se esperan para niveles de demanda sísmica de una determinada recurrencia, aun cuando no se cumplan estrictamente todos los requisitos normativos. Esta alternativa podría constituir una forma de validación del diseño técnicamente aceptable, sin embargo su exploración se encuentra más allá del alcance del presente informe y de lo establecido en el Contrato de Concesión.

## **2.5 VERIFICACION DE PILOTES, VIGAS, Y RESISTENCIA DISPONIBLE DEL SUELO**

Para las condiciones que la verificación estructural de SyS en su Informe N°5 ha considerado, el diseño de pilotes de acero y de vigas de hormigón armado cumple. Sin embargo, existen elementos que cumplen de manera ajustada. En principio esta situación puede llevar a pensar que ante un aumento de las solicitaciones sísmicas de diseño (ver sección anterior) dichos elementos verían sobrepasada su resistencia disponible.

A juicio del especialista independiente, un aumento en las solicitaciones sísmicas no debiera elevar demasiado las demandas de diseño en las vigas de hormigón armado del tablero. Esta situación podría conducir a refuerzos menores o incluso a que eventualmente no se requieran refuerzos. En el caso de los pilotes de acero, a juicio del especialista independiente, un aumento en las solicitaciones sísmicas podría elevar significativamente las demandas de diseño. Sin embargo, al tratarse de una estructura altamente redundante es posible aplicar métodos avanzados de estabilidad de piso que podrían conducir a elevar considerablemente la resistencia de los pilotes logrando su aceptación o conduciendo a requerimientos menores de refuerzo. En todos los casos el detalle dependería de las variaciones específicas de la demanda sobre cada elemento.

Desde el punto de vista de la resistencia disponible del suelo, un aumento en la demanda de los pilotes significa un aumento directo en la resistencia requerida de la unión. A diferencia de los casos anteriores, de acuerdo al informe de GEOVENOR más reciente, la capacidad última tanto en compresión como en tracción de los pilotes se encuentra definida para cada elemento de una manera que se entiende inamovible. Siendo de esta forma, es posible que un aumento en las solicitaciones sísmicas de diseño conduzca a una necesidad de mejora en la unión suelo-pilote. Dado el caso, y en virtud que se cuenta con información sobre cada una de las uniones, sería posible definir de manera certera cuales requerirían mejoras y cuales se encuentran dentro de un rango aceptable.

### 3.0 CONCLUSIONES

Considerando lo anteriormente expuesto en el presente documento se concluye lo siguiente:

- A juicio del especialista independiente, los análisis y verificaciones estructurales se han desarrollado de manera correcta después de que se han definido todas las solicitaciones de diseño necesarias y las combinaciones entre ellas que deben aplicarse, en particular luego de definida la demanda sísmica. Esto significa que en general los factores de seguridad usados para validar la elección de los elementos estructurales cumplen con los mínimos que establece el proyecto y la normativa aplicable.
- El muelle ha sido verificado en el Informe N°5 de SyS (ver sección 1.3) utilizando un nivel de demanda sísmica lateral que es un 25% menor al que debiera resistir de acuerdo a la normativa aplicable (NCh2369) considerada en conjunto con las actuales especificaciones que se han definido por el comité de expertos encargado de estos temas dentro del contexto de la actualización que se encuentra en curso para esta norma. Es importante aclarar que la solicitud sísmica que resulta de acoger las modificaciones en curso de la norma es menor (parámetros:  $R=3.5$ ,  $\xi=4\%$ ) a la que impone de forma rigurosa la versión actualmente vigente (parámetros:  $R=2.0$ ,  $\xi=2\%$ ). A juicio del especialista independiente, el adoptar para el diseño esta solicitud corregida (menor a la rigurosamente normativa) es correcto desde el punto de vista técnico ya que constituye un acuerdo en relación a una interpretación más certera y específica de los criterios normativos vigentes. La reducción general de un 25% que se ha realizado sobre la solicitud sísmica lateral de diseño, si bien se encuentra permitida por la normativa (sección 5.8.1.3 de NCh2369), tiene como requisito el contar con un estudio de Riesgo Sísmico local que avale y justifique esta medida desde un punto de vista teórico. Al momento de la elaboración del presente informe no se ha tenido a la vista dicho estudio de Riesgo Sísmico.
- La verificación estructural ha sido controlada por la demanda de corte basal mínimo, y sobre este valor se ha realizado la reducción del 25% mencionada anteriormente. Sin embargo, la normativa no permite reducciones sobre dicho valor mínimo. A juicio del especialista independiente, aun cuando en la práctica el estudio de Riesgo Sísmico no podría disminuir el valor mínimo de diseño estándar, podría entregar información valiosa para la realización de análisis avanzados que den cuenta del desempeño realista que se puede esperar en la estructura, de forma que sea posible verificar si los objetivos del proyecto pueden cumplirse aun cuando puedan existir desviaciones normativas.
- De la revisión de la información que se ha realizado se desprende que la resistencia de diseño que puede entregar el fondo marino (proveniente del estudio geotécnico actualizado) se encuentra utilizada en su totalidad por algunos pilotes, tanto en condición de tracción como de compresión. Para las condiciones que ha considerado el diseño esta situación es correcta. Sin embargo, a juicio del especialista independiente, en el caso en que las cargas de diseño no puedan ser reducidas (en relación a las estándar) en la magnitud que se ha considerado, es altamente probable que las resistencias de diseño del fondo marino se vean sobrepasadas. Esta situación podría conducir a requerir anclajes a la roca en algunos pilotes o mejoramientos en la capacidad de punta.



Carlos Peña López  
Revisor Estructural y Sísmico  
Ingeniero Civil Estructural  
Pontificia Universidad Católica de Chile  
Magister en Ingeniería Estructural y Geotécnica  
Pontificia Universidad Católica de Chile