



X SEMINARIO INTERNACIONAL DE INGENIERÍA Y OPERACIÓN PORTUARIA

RESONANCIA EN DÁRSENAS PORTUARIAS Y PEQUEÑAS BAHÍAS, Y SU EFECTO EN EMBARCACIONES MAYORES

ANDRÉS PUELMA MÜLLER

RESUMEN

La resonancia en cuerpos de agua relativamente pequeños como dársenas de puerto y pequeñas bahías es un aspecto poco estudiado en el ámbito nacional, menos aún su efecto en las operaciones portuarias. La resonancia, o bien la oscilación de la superficie libre por resonancia, se caracteriza típicamente como un movimiento oscilatorio vertical de las masas de agua en cuerpos cerrados o semicerrados. Estas ondas son estacionarias y presentan periodos largos por lo que caben en la clasificación de ondas largas u ondas de infragravedad. Por continuidad, dichos movimientos oscilatorios verticales inducen también movimientos horizontales, que corresponden a corrientes también oscilatorias, de largo periodo. Las corrientes inducidas no son detectadas en los estudios de corriente, así como las ondas largas son rara vez bien analizadas estudios de oleaje. Su detección y cuantificación requieren de metodologías particulares.

En diversos estudios, se ha podido verificar la presencia de este fenómeno, cuantificar su magnitud en distintos lugares, y, en ausencia de mediciones específicas de movimiento de naves, inferir su efecto en las embarcaciones mediante percepciones, y estimarlo mediante modelado. Así, existe evidencia directa e indirecta de la ocurrencia de este fenómeno y de que puede ser el principal agente en la reducción de los tiempos operacionales y en la eficiencia en la transferencia de carga.

Dada su importancia, se han realizado esfuerzos por medir y pronosticar la amplitud de la resonancia en distintos puertos, lo que puede contribuir a la planificación operacional.

¹Director Técnico, PRDW Chile, apuelma@prdw.com

1. INTRODUCCIÓN

Existe un sinnúmero de estudios y publicaciones respecto de la importancia de la resonancia en la operación portuaria. Sin embargo, son escasos los estudios que se conocen en Chile respecto de dicho fenómeno y sus efectos. El presente trabajo se ciñe al espíritu de la creación del Seminario Internacional de Ingeniería y Operación Portuaria como un lugar de encuentro y diálogo entre los organismos vinculados al quehacer, por lo que está dirigido principalmente a los operadores portuarios y actores relacionados, con la finalidad de relevar la importancia del fenómeno de la resonancia.

En este trabajo se presentan algunos ejemplos de detección directa e indirecta de la presencia de resonancia, la cuantificación de su amplitud (o su altura significativa $H_{s,LW}$) en función de mediciones, la relación con la amplitud de oscilación de naves o con esfuerzos en sistema de amarre/atraque, y la capacidad de pronosticar tanto las ondas largas como sus efectos.

Los estudios de oleaje se enfocan comúnmente en caracterizar el oleaje incidente, y su contenido de ondas largas ($T > 30$ s) asociadas a los grupos de ondas que se producen en la propagación del oleaje ($T < 30$ s). En el caso de dársenas o pozas de abrigo portuarias, existen escasos ejemplos en los que se realicen mediciones de oleaje dentro de éstas, y no se tiene antecedentes de mediciones de ondas largas (por resonancia) en ese tipo de instalaciones. Sin embargo, en algunos limitados casos de mediciones de oleaje en dársenas, en los que incluso los equipos no fueron configurados para la correcta medición de ondas larga, se han podido obtener estas últimas mediante adecuados postprocesos.

Una excepción a dicha escasez la constituyen las mediciones de oleaje en instalaciones portuarias que no se emplazan dentro de dársenas o pozas de abrigo, sino en bahías en las que las mediciones pueden capturar tanto ondas largas incidentes (asociadas a grupos de olas incidentes) como ondas libres, que corresponden a aquellas que se liberan del oleaje una vez que este rompe, y que pueden reflejarse en la costa, incluso en playas.

En el caso de cuerpos de agua semicerrados como dársenas y bahías, estos pueden ser excitados y entrar en resonancia con aquellas frecuencias del espectro de ondas largas que sean afines, y no necesariamente iguales, a la frecuencia natural de dicho cuerpo de agua, dando lugar al efecto de oscilación por resonancia. Dichos cuerpos semicerrados tienen frecuencias naturales de oscilación dadas por sus dimensiones, de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$T = \frac{4L}{(2n + 1)\sqrt{gh}} \quad (1)$$

donde: T es el periodo natural del cuerpo de agua, L es la longitud del cuerpo de agua (en el sentido de la onda), g es la aceleración de gravedad, h es la profundidad, y n es el modo de oscilación (0, 1, 2, 3, ...). Modo asociado $n=0$ corresponde al modo fundamental, y puede ser excitado por oleaje cuya frecuencia sea múltiplo de la frecuencia fundamental.

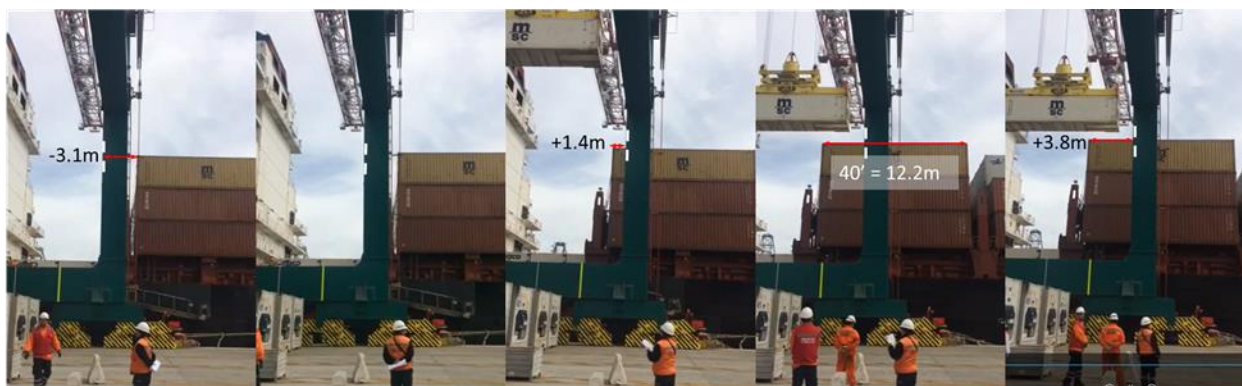
En tanto no existen mediciones directas, permanentes, y en tiempo real de onda larga, la existencia del fenómeno de resonancia aparece a partir de la interpretación de efectos tales como el movimiento oscilatorio de naves, con periodos de minutos, y/o la percepción de corrientes que dificultan maniobras.

2. DETECCIÓN INDIRECTA DE RESONANCIA

Una primera inferencia de la presencia de ondas largas es la percepción de corrientes que dificultan las maniobras y permanencias de naves en los sitios de atraque, acusadas por las áreas de operaciones de puertos y respectivos cuerpos de prácticos, en bahías tales como La Herradura de Guayacán, Quintero y Mejillones. En estas bahías, en particular en el norte donde los vientos son de menor magnitud, es poco probable que las corrientes percibidas (no medidas) estén asociadas a la acción del viento. Las mediciones de corriente no han evidenciado corrientes de magnitud relevante, al menos no en las capas profundas que son las que afectan a las naves. Esto es debido a que la configuración habitual para mediciones de corriente es un promedio de 10 min, sobre la base de una interpretación de las instrucciones Oceanográficas N°3201 del SHOA¹, en las que no se establece una duración específica para el cálculo del promedio móvil de la corriente, sino que solo se establece un intervalo de muestreo máximo de 10 min. Dichos 10 min son entonces adoptados como la duración del muestreo, filtrando con ello los periodos típicos de las oscilaciones por resonancia.

Otra indicación indirecta es, por ejemplo, la observación en 2016 de una amplitud estimada de 6.9 m de movimiento longitudinal en el lapso de 1 (un) minuto (periodo de 2 min), en un portacontenedores de 267 m atracado en un puerto de la zona central, donde se produjo cortes de espías, incluso habiendo condiciones de oleaje moderado fuera de la dársena (H_{m0} en percentil 80%).

Figura 1. Amplitud de movimiento de portacontenedores en 2016.



Fuente: Elaboración propia, sobre la base de video proporcionado por cliente.

3. DETECCIÓN DIRECTA

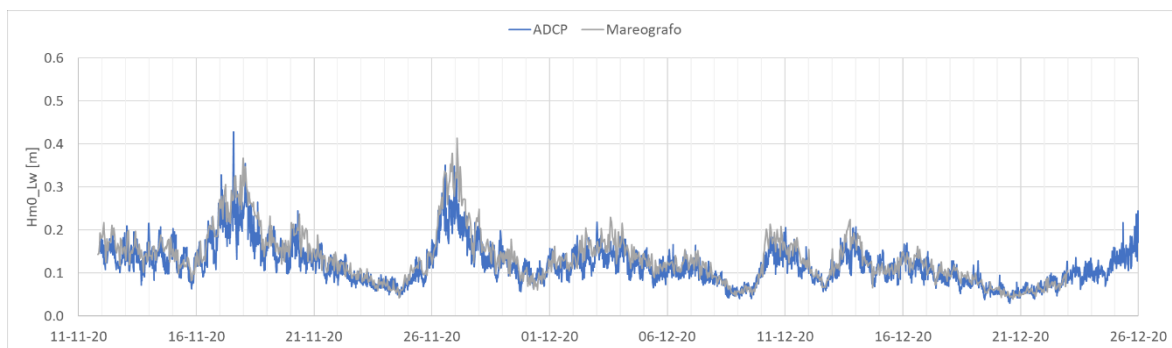
Se han realizado análisis para verificar la existencia de oscilación por resonancia en distintos puertos y bahías del país, mediante el postproceso de mediciones de marea. En efecto, en anteriores SIOP², Cortés (Cortés & Catalán, 2016) y Aguilera (Aguilera & Catalán, 2022) presentaron resultados de la evaluación de la respuesta de ciertas bahías ante la incidencia de ondas de tsunami, junto con los cuales se evidenció la presencia de energía en las frecuencias de los modos propios de cada bahía, incluso sin la incidencia de tsunami.

¹ Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada

² Seminario Internacional de Ingeniería y Operación Portuaria

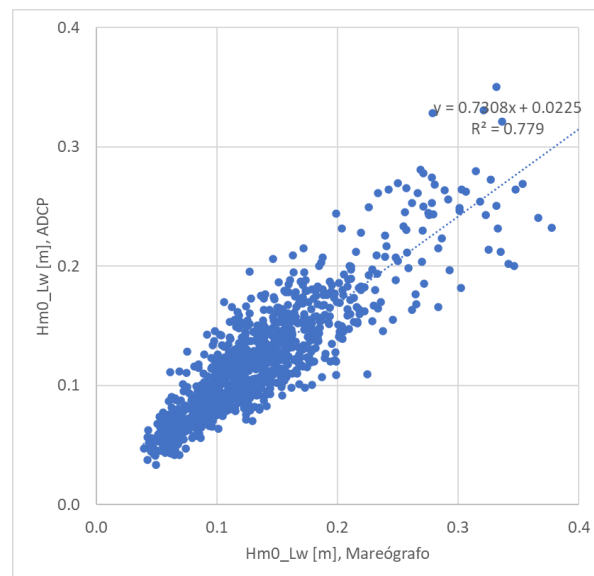
A su vez, el autor ha realizado verificaciones de la existencia de resonancia en dársenas y bahías a partir de mediciones orientadas originalmente a la evaluación de la marea o el oleaje, así como de mediciones continuas de la variación del nivel de la superficie libre, orientadas específicamente a la detección de resonancia. En aquellas ocasiones en las que ha existido simultaneidad de distintos tipos de medición, se ha hallado que las respectivas metodologías de postproceso conducen a resultados coincidentes. Tal es el ejemplo de la Figura 2 y Figura 3, en las que se compara el resultado de un análisis espectral a mediciones de relativa alta frecuencia (2 Hz) con ADCP³, versus un análisis más rudimentario sobre la base de mediciones de marea a muy baja frecuencia (0.017 Hz). Ambos instrumentos están distantes en 830 m uno del otro, y en posiciones totalmente opuestas de la poza de abrigo en la que se encuentran.

Figura 2. Series de tiempo comparadas entre tecnologías de medición de altura significativa de ondas largas, H_{m0_LW} .



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3. Correlación de resultados entre tecnologías de medición de altura significativa de ondas largas, H_{m0_LW} .



Fuente: Elaboración propia.

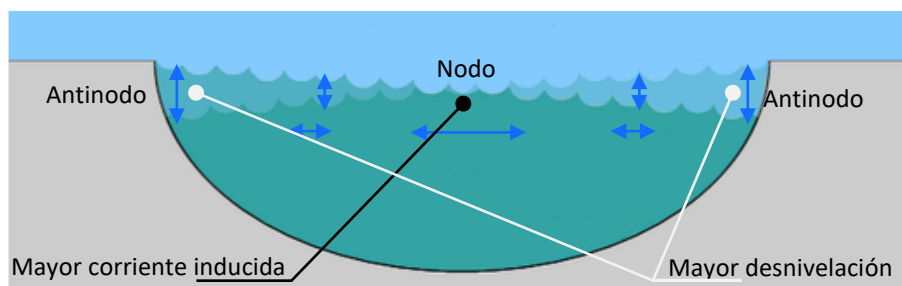
³ Acoustic Doppler Current Profiler

No se tiene conocimiento de mediciones directas, en puertos chilenos, de la máxima magnitud de corriente que puede ser inducida por oscilación por resonancia, que afecta a toda la columna de agua, y que en un escenario ideal responde a la ecuación (2):

$$V = A \sqrt{\frac{g}{h}} \quad (2)$$

donde: V es la velocidad horizontal inducida en un nodo (Figura 4), A es la amplitud de oscilación vertical de la superficie libre en un antinodo, g es la aceleración de gravedad, y h es la profundidad.

Figura 4. Diagrama de oscilación de un cuerpo de agua.



Fuente: Elaboración propia.

Considerando que las amplitudes de oscilación vertical de superficie libre detectadas son normalmente menores a 0.1 m, y las profundidades comúnmente superiores a 15 o 20 m, se puede inferir que las velocidades inducidas tienden a ser menores a 0.07 m/s. Sin embargo, en eventos en que las amplitudes verticales han alcanzado hasta 0.4 m, las velocidades pueden alcanzar del orden de 0.5 m/s (1 nudo). Aunque las magnitudes indicadas están en el rango de detección de la mayoría de los ADCP, estas corrientes solo pueden ser detectadas mediante análisis espectral de cada *burst* o ráfaga de muestreo. Cabe destacar que el emplazamiento de un sitio de atraque o amarre no necesariamente se ubicará en un nodo de un cuerpo de agua oscilante, y por lo tanto en el punto de mayores velocidades.

Sin embargo, la relación directa entre amplitudes verticales y velocidades horizontales permite desestimar la necesidad de resolver las segundas para establecer relaciones causa-efecto entre resonancia de un cuerpo de agua y respuesta dinámica de naves (movimientos y esfuerzos), pudiendo establecer relaciones directas entre amplitud vertical de la oscilación por resonancia y dichas respuestas.

4. PRONÓSTICO DE LA RESONANCIA

En el SIOP de 2016, Bellotti (2016) presentó la fórmula de Bowers (1992) para determinar la altura significativa de ondas largas LWH_{Si} asociadas a oscilación por resonancia en función de las condiciones del oleaje (Ec. 3),

$$LWH_{Si} = k \frac{H_S^\alpha T_P^\beta}{d^\gamma} \quad (3)$$

donde, H_s es la altura de oleaje local, T_P es el periodo pico y d es la profundidad; mientras que k , α , β y γ son coeficientes para el ajuste de la fórmula.

Por su parte, en el SIO P de 2018, McComb (2018) presentó las siguientes dos fórmulas para el mismo propósito que Bellotti (2016), en las cuales se introducen términos adicionales que dan cuenta de la modulación que introduce el cambio en la altura de marea.

$$H_{s\ LPW(res)} = m \left[H_{S(swell)}^\alpha T_{P(swell)}^\beta \right] + C \quad (4)$$

$$H_{s\ LPW} = H_{s\ LPW(res)} \gamma h \quad (5)$$

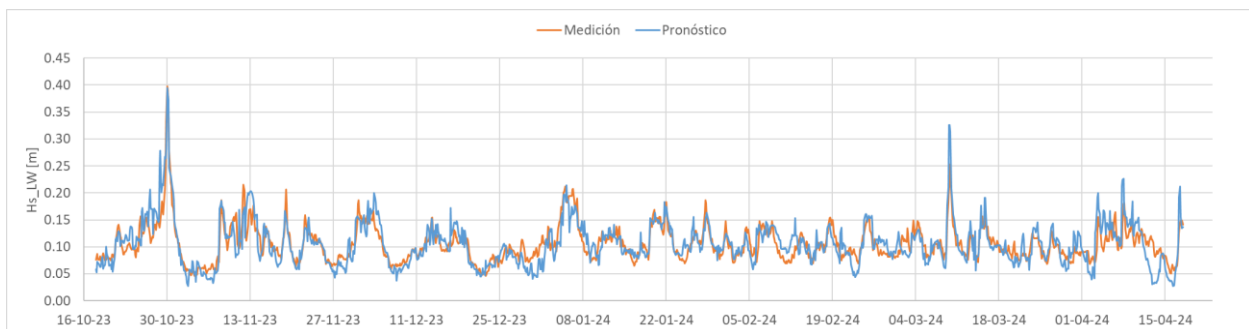
En ambos casos, los coeficientes deben ser hallados mediante metodologías de ajuste multivariado, debiendo contar tanto con mediciones de oleaje local u *offshore*, así como mediciones de amplitud de resonancia coincidentes en el tiempo.

Sobre la base de las formulaciones anteriores, el autor ha utilizado formulaciones similares en el pronóstico de resonancia en algunos puertos y bahías del país, de manera exitosa. A su vez, se desarrollaron metodologías sobre la base del método de Newton-Raphson para determinar funciones de transferencia empíricas, que permiten establecer con gran precisión la amplitud de resonancia, no solo dependientes de la altura y periodo del oleaje *offshore*, sino también de la dirección de incidencia.

Se ha obviado la mención de metodologías tales como el modelado numérico o técnicas de *machine learning*. El modelado numérico es en efecto utilizada como una primera aproximación, pero en la medida que existan mediciones, se prefiere el método empírico utilizando los resultados del modelo como punto de partida para asegurar la convergencia del método empírico. Por su parte, las técnicas de *machine learning* suelen ser costosas en términos de la preparación de datos para el entrenamiento, son difíciles de interpretar o son una caja negra. La metodología basada en la obtención de funciones empíricas según se describe, es simple y es además una preferencia de carácter práctico, debido uso particular dado a dichas funciones.

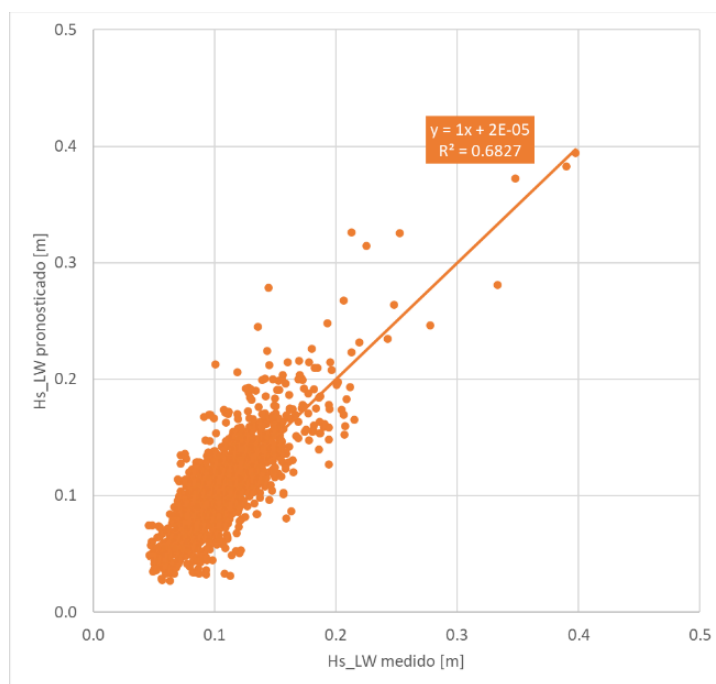
En la Figura 5 y la Figura 6 se presenta un ejemplo de la implementación de esta metodología empírica, que corresponde a una comparación de 6 meses de pronósticos y mediciones de resonancia en la poza del puerto de Valparaíso.

Figura 5. Series de tiempo de alturas significativas de onda larga H_{s_LW} (por resonancia), medidas y pronosticadas en la poza de abrigo del puerto de Valparaíso.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 6. Correlación entre alturas significativas de onda larga H_{S_LW} (por resonancia), medidas y pronosticadas en la poza de abrigo del puerto de Valparaíso.



Fuente: Elaboración propia.

5. EFECTOS ESTUDIADOS

En el ámbito de la operación portuaria, también se puede dar el efecto de resonancia entre la oscilación de una dársena o bahía y el periodo natural de oscilación de una embarcación, amarrada o atracada. El periodo natural de oscilación de las embarcaciones depende del sentido de la oscilación (p.ej.: longitudinal o transversal) y de la rigidez del sistema de amarre en dichos sentidos.

En el SIOP de 2018, McComb (2018) plantea que *"los efectos (de la resonancia) pueden ser catastróficos"*. Un ejemplo, aunque no necesariamente catastrófico, es el caso del corte de espías de 2016, antes mencionado.

McComb (2018) también establece que existen 2 tipos de ondas de largo periodo: las IG u ondas de infragravedad con periodos en el rango de 30 a 150 s; y las FIG u ondas de infragravedad lejana, con periodos superiores a 120 o 150 s. Según McComb, estas últimas no afectarían a los barcos, y además establece una escala de amplitudes de oscilación o alturas de onda larga a las cuales se asocian advertencias o acciones (McComb, 2016) y (McComb, 2018):

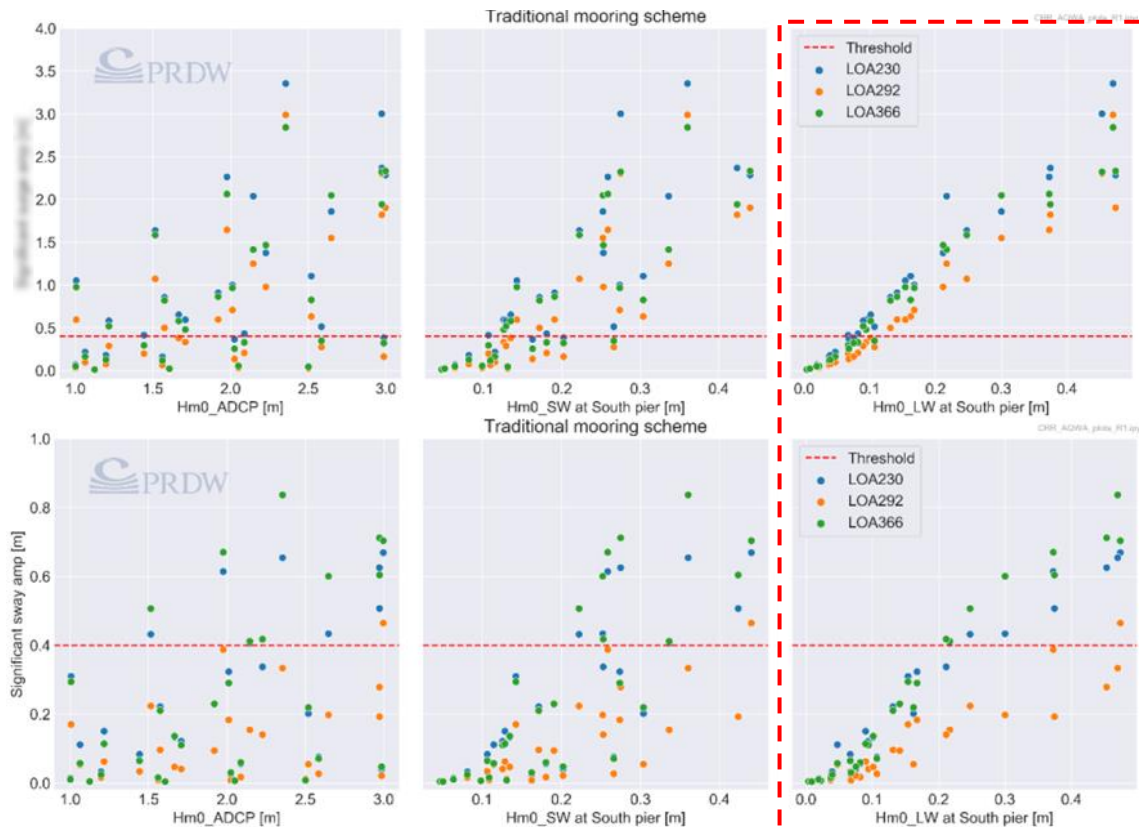
Tabla 1: Umbrales de seguridad genéricos para ondas largas (resonancia).

Generic LPW safety thresholds:	
<0.10 m	– not usually a problem
0.10 m	– first threshold of concern
0.10-0.15 m	– management is recommended
0.15-0.20 m	– management is required
>0.20 m	– safety is compromised

Fuente: (McComb, 2016).

En estudios realizados por PRDW en puertos chilenos se han hallado relaciones directas entre la amplitud de la resonancia y la respuesta de naves. Tal el caso del puerto de San Antonio, en el que en un estudio de la efectividad del uso de dispositivos MoorMaster en portacontenedores de 230, 292, y 366 m de eslora, demostró la evidente relación de las respuestas de las naves con la amplitud de resonancia de la bahía y no así con la altura, periodo o dirección de incidencia del oleaje.

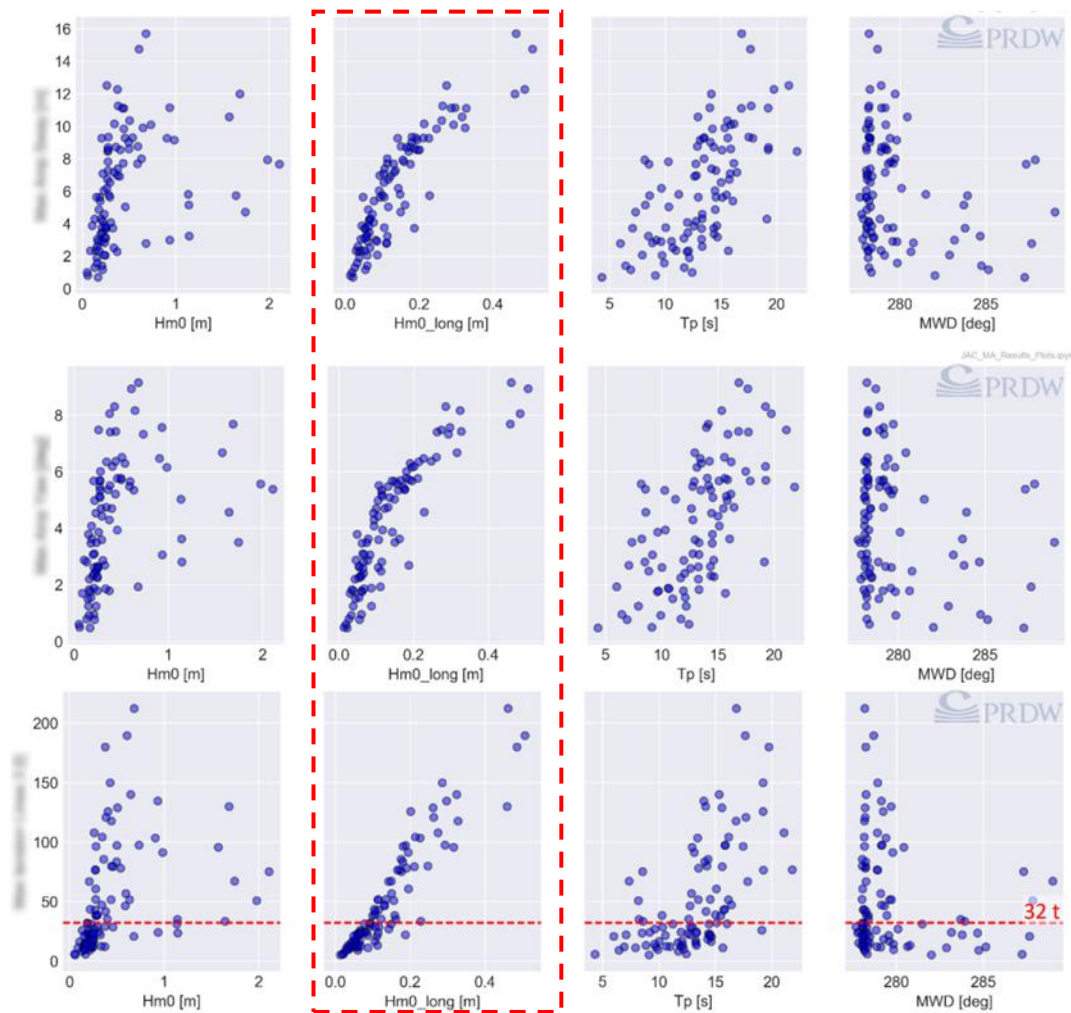
Figura 7. Ejemplos de mejor correlación entre respuestas de naves y amplitudes de resonancia en Puerto San Antonio (parámetros ocultos deliberadamente).



Fuente: Estudio PRDW.

Otro caso de ejemplo es el de Puerto Guayacán, de la Compañía Minera del Pacífico, en la bahía la Herradura de Guayacán, en el que las amplitudes de la mayoría de los grados de libertad de movimiento, tensiones en amarras y cadenas, así como compresión de defensas para 2 *bulk carriers* estudiados, de 209,000 y 38,000 DWT, evidenciaron el mismo tipo de relaciones (Figura 8) que en el caso de San Antonio.

Figura 8. Ejemplos de mejor correlación entre respuestas de naves y amplitudes de resonancia en Puerto Guayacán (parámetros ocultos deliberadamente).



Fuente: Estudio PRDW.

La conclusión es la misma en ambos ejemplos: la amplitud de la resonancia es inequívocamente el mejor predictor de las amplitudes de movimiento, tensiones en amarras, compresión de defensas, cargas en bitas, etc. A esto se suma la dependencia que tiene la eficiencia en la transferencia de carga respecto de las amplitudes de movimiento de los barcos y, por lo tanto, respecto de la amplitud de oscilación del puerto o bahía.

Considerado que también es posible establecer esfuerzos en sistemas auxiliares para el amarre o atraque (MoorMaster, ShoreTension, etc.), altamente correlacionados con la altura significativa

de la resonancia, es posible entonces establecer umbrales de amplitud de resonancia para los cuales la capacidad o efectividad de estos dispositivos puedan verse comprometidas.

6. CONCLUSIONES

Aunque en la bibliografía existe un amplio espectro de estudios y publicaciones al respecto, a la fecha son pocos los estudios realizados en Chile orientados a la identificación, medición, y cuantificación de los efectos de la resonancia en puertos y bahías. En general, su existencia o importancia se basa en percepciones o interpretaciones de sus efectos, sin que se lleven a cabo estudios acabados del fenómeno y la consecuente la implementación de medidas de mitigación de dichos efectos, ya sea por la vía de un adecuado manejo de la operación portuaria (restricciones), o la incorporación de tecnología y equipamiento.

En el ámbito nacional, existe la experiencia y la capacidad técnica para abordar el problema de la resonancia, desde la implementación de adecuadas metodologías de medición y análisis de ondas largas u oscilaciones por resonancia, alta precisión en el pronóstico de éstas y análisis cuantitativo de relación causa-efecto entre la resonancia y la respuesta dinámica de barcos amarrados o atracados.

Estos análisis permitirían al operador y otros actores una mayor comprensión del funcionamiento de su sistema portuario, y establecer así un conjunto de umbrales para la operación segura, o en su defecto, la evaluación de la efectividad de implementar tecnologías para la mitigación de dichos efectos, tales como dispositivos ShoreTension, MoorMaster, DynaMoor, AutoMoor, etc., antes de incurrir en intervenciones mayores tales como la reconfiguración geométrica de una dársena o un molo de abrigo.

En defecto de estos análisis, hoy en día la operatividad portuaria se fundamenta mayormente en las condiciones de viento y oleaje ($T < 30$ s) que no dan una respuesta completa a los efectos observados en las operaciones tales como amplitudes excesivas de movimiento o cortes de espías. Como se indica, la resonancia o las ondas largas han resultado ser un mejor predictor para estos efectos.

La capacidad de predecir de manera precisa la amplitud de resonancia, permitiría predecir con similar precisión los riesgos en la operación portuaria que puedan asociarse a este fenómeno.

7. REFERENCIAS

Aguilera, V. & Catalán, P., 2022. Análisis de sensibilidad en la respuesta resonante de bahías de Chile al rol de la fuente tsunamigénica. IX Seminario Internacional de Ingeniería y Operación Portuaria, Valparaíso, Chile.

Bellotti, G., 2016. Harbour resonance under long bound waves attack. VII Seminario Internacional de Ingeniería y Operación Portuaria, San Antonio, Chile.

Bowers, E. C., 1992. Low frequency waves in intermediate water depths. Proc. 23rd Int. Conf. On Coast. Eng., ASCE, Venecia, Italia.



X Seminario Internacional de
Ingeniería y Operación Portuaria

ANTOFAGASTA 2024

Cortés, P. & Catalán, P., 2016. Resonancia de ondas de tsunami en puertos y bahías de la zona norte y centro de Chile. VII Seminario Internacional de Ingeniería y Operación Portuaria, San Antonio, Chile.

McComb, P., 2016. Long wave surge. Understanding infragravity wave energy in ports. VII Seminario Internacional de Ingeniería y Operación Portuaria, San Antonio, Chile.

McComb, P., 2018. Long Period Waves. VIII Seminario Internacional de Ingeniería y Operación Portuaria, Talcahuano, Chile