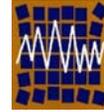




Universidad de Concepción
Departamento de Ingeniería Civil



Asociación Chilena de Sismología e
Ingeniería Antisísmica

CÓDIGO N° A14-10 DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE PROPIEDADES MODALES DEL PUERTO DE VENTANAS

R.L. Boroschek¹, H. Baesler², P.T. Valdés³ y C. Vega⁴

1.- Departamento de Ingeniería Civil Universidad de Chile

Blanco Encalada 2002, Santiago, Chile

e-mail: rborosch@ing.uchile.cl

2.- Departamento de Ingeniería Civil Universidad de Chile

Blanco Encalada 2002, Santiago, Chile

e-mail: hbaesler@pmingenieros.cl

3.- Departamento de Ingeniería Civil Universidad de Chile

Blanco Encalada 2002, Santiago, Chile

e-mail: pvaldes@idiem.uchile.cl

4.- Departamento de Ingeniería Civil Universidad de Chile

Blanco Encalada 2002, Santiago, Chile

e-mail: carlos_vega@ghd.cl

RESUMEN

PM Ingenieros y la Universidad de Chile realizaron una serie de ensayos para determinar el amortiguamiento presente en el tramo 4 del muelle del Puerto de Ventanas. Se desarrollaron tres tipos de mediciones para la determinación del amortiguamiento: vibraciones ambientales y ensayo de Pull – Back e impacto.

Como primera aproximación, la identificación de los períodos fundamentales de vibración de la estructura se realizó con señales de microvibración estructural, producidas por la marea, viento y microtremores (naturales o artificiales). Para evaluar la variación de las propiedades dinámicas con el nivel de respuesta se aplicaron impactos, producidos por el frenado brusco de vehículos sobre el muelle y posteriormente mediante un sistema reactivo se aplicaron fuerzas y desplazamientos iniciales. Las fuerza aplicadas varían entre 10 y 42 toneladas.

Del estudio de las propiedades identificadas, bajo los distintos niveles de excitación se determinó que el Muelle presenta un comportamiento relativamente lineal y que la variación de las propiedades puede ser modelada mediante un proceso lineal equivalente.

1 INTRODUCCIÓN

Existen varias técnicas de identificación de sistemas a través de registros ambientales. Las técnicas actuales utilizadas en el proceso de identificación se pueden dividir en dos grandes áreas: las que utilizan identificación paramétrica y las no paramétricas. La identificación paramétrica utiliza un modelo previo de la estructura, el cual se ajusta mediante técnicas de optimización. En el proceso de identificación no paramétrica, como lo indica su nombre, inicialmente no se establece un modelo de la estructura, simplemente se identifican variables típicas de los registros y posteriormente estas se asocian con parámetros de la estructura. Adicionalmente, las técnicas paramétricas y las no paramétricas, se pueden subdividir en aquellas que realizan la identificación en el espacio del tiempo y aquellas que la efectúan en el espacio de la frecuencia.

Para estructuras de ingeniería civil el método más utilizado es el de dominio en frecuencia, basados en el espectro potencia, coherencia y amplitud y fase entre canales. Recientemente, se ha comenzado a utilizar la técnica de identificación del subespacio estocástico (SSI), la cual es una técnica paramétrica de dominio en tiempo.

2 DESCRIPCIÓN DEL MUELLE

PM Ingenieros decidió realizar unas pruebas para determinar el amortiguamiento equivalente en el muelle del puerto de Ventanas. Los estudios fueron realizados por el Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile.

El muelle del Puerto de Ventanas se encuentra ubicado en la bahía de Quinteros a 130 Km. de la ciudad de Santiago, Chile. El muelle está compuesto por un puente de acceso y los sitios de embarque. El puente de acceso, tiene 375 metros de largo por 8,3 metros de ancho. Consta de 5 tramos independientes, cuatro de 76 metros y uno de 71, con estructuras similares que adquieren mayor profundidad, a medida que el puente se interna en el mar (Ver Figura 2. 1). Los tramos se encuentran separados por una junta de dilatación de 125 milímetros. La estructura de cada tramo está compuesta por una losa de hormigón armado de 30 centímetros de espesor apoyada sobre 3 vigas metálicas embebidas en hormigón, que descansan sobre cepas ubicadas cada 4 metros.

Para cada tramo se utilizaron dos tipos de cepas, las cuales se encuentran intercaladas a lo largo del tramo. Las tipo A, están formadas por cinco pilotes metálicos de estructura tubular, tres verticales (18'' de diámetro) y dos inclinados (12'' de diámetro), unidos a nivel de losa por una viga metálica embebida en hormigón. Las tipo B, poseen una estructura similar a las cepas tipo A, pero sin los pilotes inclinados. (Ver Figura 2. 3). Para los tramos 1, 2 y 3, el diámetro de los pilotes verticales, disminuye a 16 pulgadas. Sobre la losa del muelle se encuentran varias estructuras metálicas que sirven de apoyo para tres correas transportadoras, dos ductos de refrigeración y tres líneas de transporte de líquido (Ver Figura 2. 2). Las tres correas transportadoras conducen graneles sólidos, carbón, granos limpios, concentrado de cobre, y clinker. Las líneas sirven, una, para el transporte del combustible y sus derivados; la segunda, para graneles líquidos; y la última para ácido sulfúrico.

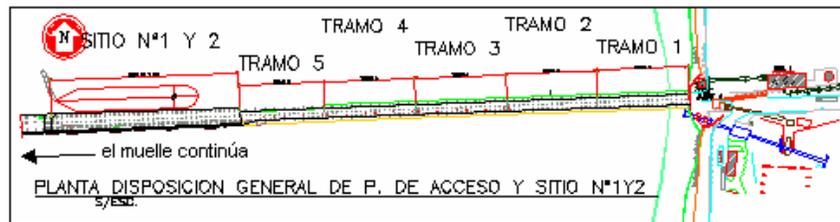


Figura 2. 1: Ubicación de muelle Puerto ventanas



Figura 2. 2: Vista del Puente de Acceso

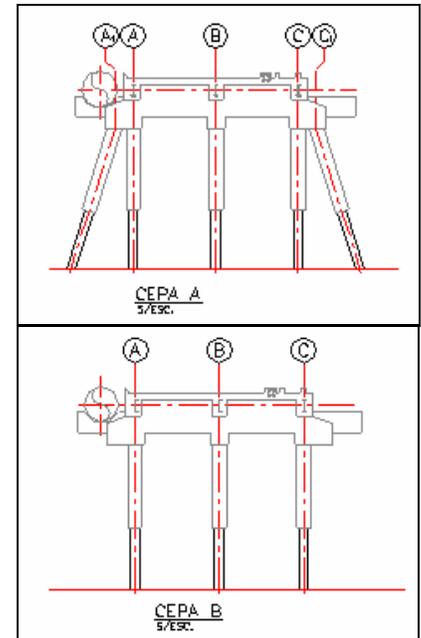


Figura 2. 3: Cepa tipo A y tipo B

3 DESCRIPCIÓN DE LOS ENSAYOS

3.1 Pull Back

El ensayo de Pull Back, consiste, básicamente, en generar condiciones iniciales (desplazamiento y velocidad) a una estructura, con el objetivo de generar un movimiento apreciable y decreciente del sistema, que permita, a través del análisis del decaimiento, determinar las propiedades dinámicas de la estructura.

3.1.1 Diseño del sistema de tiro

Para realizar este ensayo se diseñó un sistema de tiro (Vega 2003) que se ubicó entre los tramos 3 y 4 del puente de acceso (Ver Figura 3. 1). El sistema está compuesto de dos placas base apernadas a la losa, una

sobre y otra bajo la losa, en cada tramo (Ver Figura 3. 2). Sobre una de las placas superiores va ubicado un cilindro hidráulico, y como único conector entre los dos tramos, se utiliza un fusible.

El experimento consiste en que el cilindro hidráulico traccione el fusible, hasta que éste falle, y mediante este desplazamiento y liberación súbita, se produzca una vibración en la estructura. Este sistema colocado en el puente, se diseñó para una fuerza del cilindro de 50 Ton como fuerza estática y una fuerza de impacto debido al corte del fusible de 100 Ton.

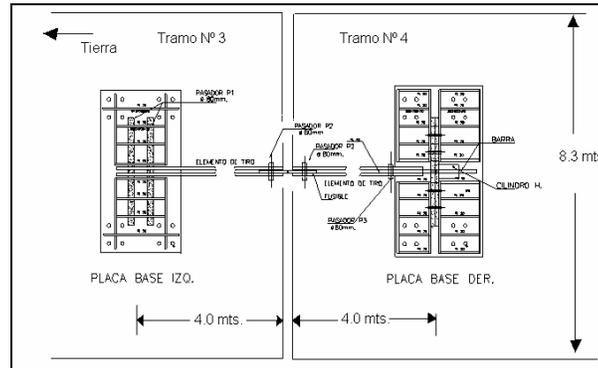


Figura 3. 1: Ubicación en planta del sistema de tiro.



Figura 3. 2: Proceso de montaje del Sistema de tiro

3.1.2 Diseño de los fusibles

Los Fusibles se diseñaron para evitar la falla por tracción en los orificios del borde (Vega 2003), donde tiene un diámetro de 83 mm. (Ver Figura 3.3) y para tener la menor deformación por fluencia en el centro del fusible. En esa zona se debía producir la rotura del fusible a una fuerza específica de tracción por lo que se diseñó un entalle especial.

TABLA 3.1: ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL MATERIAL DEL FUSIBLE.

Fusible	
Marca	Thyssen
Material	Acero aleado
Nombre	XAR Prime
Abreviación	20MnCr6-5
Tensión de fluencia	7.0 Ton /cm ²
Deformación	13 %
Tensión de rotura	10.0 Ton/cm ²

Se ensayaron fusibles con distintos espesores, anchos y formas de entalle, hasta lograr que la fuerza de rotura coincidiera con la de diseño.

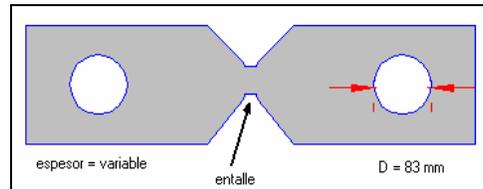


Figura 3. 3: Diseño de fusible utilizado.

3.2 *Microvibraciones ambientales*

Las estructuras se encuentran excitadas permanentemente por distintas fuentes de origen natural (viento, marea, etc.). A través del análisis de estas microvibraciones, es posible determinar las propiedades dinámicas de la estructura. Para registrar condiciones ambientales, sólo se necesita montar un equipamiento suficientemente sensible, que permita detectar las pequeñas alteraciones en la estructura. A continuación se describe la teoría de dos de estos métodos.

3.2.1 *Método de frecuencia no paramétrico (FNP)*

El método se basa en transformar la señal de salida de los sensores al espacio de la frecuencia y así trabajar con las frecuencias predominantes que aparecen.

La identificación de las propiedades dinámicas se realiza calculando los espectros de densidad de potencia o PSD (*Power Spectrum Density*) para cada registro. El PSD es el promedio normalizado del valor absoluto al cuadrado de la Transformada Rápida de Fourier o FFT (*Fast Fourier Transform*) de un registro o un tramo de un registro. El detalle de este método se encuentra en Boroschek y Yáñez, 2000.

3.2.2 *SSI*

SSI (Stochastic Subspace Identification) o identificación del subespacio estocástico, es una técnica paramétrica que utiliza un modelo matemático previo de la estructura, asumiendo además, para el caso del análisis de mediciones ambientales, que la estructura se encuentra excitada por ruido blanco.

Este método se basa en el estudio de un sistema de dos ecuaciones, donde la primera se encuentra asociada a la ecuación de equilibrio dinámico (ecuación de estado); y la segunda, a los datos obtenidos de la estructura real (ecuación de datos observados). Este sistema se ajusta mediante técnicas de optimización, permitiendo determinar además de las frecuencias propias, la razón de amortiguamiento asociada a dichas frecuencias.

A continuación se detalla el proceso que relaciona las ecuaciones nombradas anteriormente.

Ecuación de equilibrio dinámico:

$$M\ddot{q}(t) + C\dot{q}(t) + Kq(t) = f(t) \quad (3.1)$$

$q(t), \dot{q}(t), \ddot{q}(t)$ representan el vector desplazamiento, velocidad y aceleración respectivamente.

$f(t)$ simboliza la fuerza de excitación.

Podemos reescribir la ecuación anterior como una ecuación de 1° orden.

$$\Rightarrow \dot{x}(t) = A_c x(t) + f_c(t) \quad (3.2)$$

Donde:

$$A_c = \begin{pmatrix} 0 & I \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{pmatrix}, \quad f_c(t) = \begin{pmatrix} 0 \\ M^{-1}f(t) \end{pmatrix}, \quad x(t) = \begin{pmatrix} q(t) \\ \dot{q}(t) \end{pmatrix} \quad (3.3)$$

La ecuación (3.2) representa la ecuación de estado en el sistema state-space; y el subíndice c, denota tiempo continuo.

Ecuación de datos observados

$$y(t) = C_a \ddot{q}(t) + C_v \dot{q}(t) + C_d q(t) \quad (3.4)$$

donde $y(t)$ representa a los datos de salida

C_a, C_v, C_d son las matrices de ubicación de los datos de salida para aceleración, velocidad y desplazamiento respectivamente. Son matrices compuestas de ceros y unos únicamente, dónde los unos representan el lugar donde se están tomando datos.

Podemos despejar $\ddot{q}(t)$ de la ecuación de comportamiento dinámico $\therefore \ddot{q}(t) = M^{-1} [f(t) - C\dot{q}(t) - Kq(t)]$

Remplazando en la ecuación (3.4) obtenemos:

$$y(t) = \begin{pmatrix} C_d - C_a M^{-1}K & C_v - C_a M^{-1}C \end{pmatrix} \begin{pmatrix} q(t) \\ \dot{q}(t) \end{pmatrix} + C_a M^{-1} f(t) \quad (3.5)$$

$f(t)$ simboliza la fuerza de excitación y lo podemos escribir a su vez como $Bu(t)$, donde B representa la ubicación de los *datos de entrada*; y $u(t)$ los *m datos de entrada* en el tiempo.

Para nuestro caso continuo $f_c(t) = B_c u(t)$

$$\therefore y(t) = C_c x(t) + D_c u(t) \quad (3.6)$$

donde

$$\begin{aligned} C_c &= (C_d - C_a M^{-1} K \quad C_v - C_a M^{-1} C) \\ D_c &= C_a M^{-1} B_c \end{aligned} \quad (3.7)$$

Modelo State - Space

Combinando las ecuaciones (3.2) y (3.6), obtenemos el sistema de ecuaciones del método SSI.

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= A_c x(t) + B_c u(t) \\ y(t) &= C_c x(t) + D_c u(t) \end{aligned} \quad (3.8)$$

Este sistema nos permite determinar las propiedades dinámicas de la estructura a través de la ecuación de estado, gracias a los datos aportados por la ecuación de datos observados. Sin embargo los datos observados (registros de datos), no son continuos, por lo tanto debemos discretizar este sistema.

Por lo tanto, para un período fijo de muestreo Δt tenemos:

$$\begin{aligned} x_{k+1} &= A x_k + B u_k \\ y_k &= C x_k + D u_k \end{aligned} \quad (3.9)$$

Las matrices A , B , C , D se relacionan con sus contrapartes continuas para el caso en que la señal de entrada es constante por parte entre las muestras (zoh¹), de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} A &= e^{A_c \Delta t} \quad , \quad B = \int_0^{\Delta t} e^{A_c \delta t} \delta t B_c = (A - I) A_c^{-1} B_c \\ C &= C_c \quad , \quad D = D_c \end{aligned} \quad (3.10)$$

Determinación de los valores y vectores propios discretos.

$$A = e^{A_c \Delta t} = e^{\Psi \Lambda_c \Psi^{-1} \Delta t} = \Psi e^{\Lambda_c \Delta t} \Psi^{-1} = \Psi \Lambda_d \Psi^{-1} = \Psi \begin{pmatrix} \ddots & & \mathbf{0} \\ & \mu_i & \\ \mathbf{0} & & \ddots \end{pmatrix} \Psi^{-1} \quad (3.11)$$

El desarrollo de la ecuación anterior proviene de la expansión de la función exponencial en serie de McLaurin.

Los vectores propios discretos son iguales a los continuos y los valores propios discretos se relacionan con los continuos de la siguiente forma:

$$\mu_i = e^{\lambda_i \Delta t} \quad \Rightarrow \quad \lambda_i = \frac{\ln(\mu_i)}{\Delta t} \quad (3.12)$$

¹ De las siglas en inglés de **Z**ero **O**rders **H**old

Donde μ_i , λ_i representan el i-ésimo valor propio en tiempo discreto y continuo, respectivamente.

Las propiedades dinámicas de la estructura se obtienen como sigue.

$$\omega_i = |\lambda_i| = \left| \frac{\ln(\mu_i)}{\Delta t} \right| = \frac{|\ln(\mu_i)|}{\Delta t} \quad (3.13)$$

$$\beta_i = -\frac{\text{Real}(\lambda_i)}{\omega_i} = -\frac{\text{Real}(\ln(\mu_i))}{|\ln(\mu_i)|} \quad (3.14)$$

Componentes estocásticas del modelo State Space

La componente estocástica del modelo State Space está relacionada con el ruido presente en el sistema. Al considerar esta componente, nuestro sistema discreto representado en la ecuación (3.9) queda como:

$$\begin{aligned} x_{k+1} &= Ax_k + Bu_k + w_k \\ y_k &= Cx_k + Du_k + v_k \end{aligned} \quad (3.15)$$

Donde w_k es el proceso de ruido debido a las perturbaciones e incertidumbres del modelo, y v_k es la medida de ruido asociada a la incertidumbre del sensor.

Para el caso de las estructuras, es casi imposible conocer la señal de excitación ambiental, o datos de entrada del sistema, lo que obliga a trabajar sólo con la información de la salida, o output. Para el caso en que sólo conocemos la señal de salida del sistema, el sistema state-space de la ecuación (3.15) queda de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} x_{k+1} &= Ax_k + w_k \\ y_k &= Cx_k + v_k \end{aligned} \quad (3.16)$$

Donde la señal de entrada, está implícita en los términos de ruido, suponiendo así, que la estructura es excitada por ruido blanco. Un análisis más detallado de este método se puede encontrar en Valdés 2004.

4 DESCRIPCIÓN Y MONTAJE DEL EQUIPO DE MEDICIÓN

Para la medición de las microvibraciones se utilizaron cuatro sensores de velocidad, conjuntamente con un sistema de adquisición. El sistema descrito anteriormente registra la historia de velocidad de cada sensor en forma paralela, y las almacena en forma digital, para su posterior procesamiento.

Para la medición de la prueba de Pull Back, se utilizó instrumentación inercial y relativa. Las mediciones relativas se utilizaron para medir desplazamientos. Los sensores de desplazamiento fueron ubicados en las juntas de dilatación, entre los tramos 3-4; y 4-5.

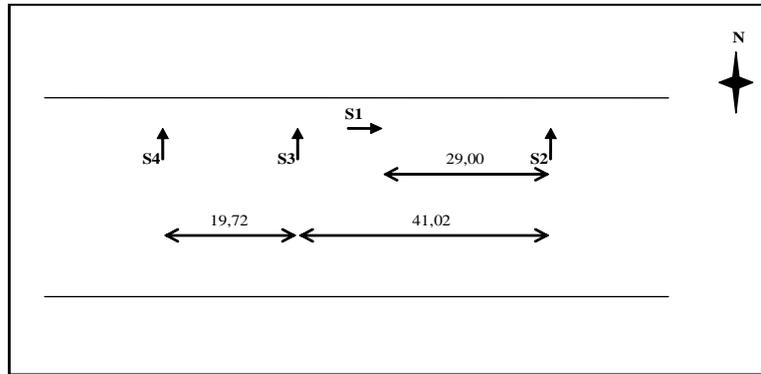


Figura 4. 1: Ubicación de los sensores de aceleración y desplazamiento

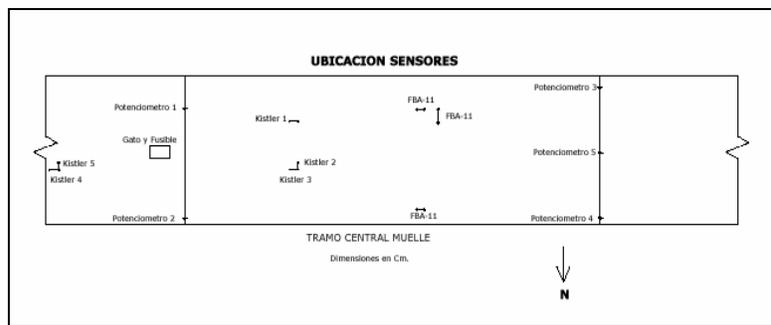


Figura 4. 2: Ubicación de los sensores de aceleración y desplazamiento

5 PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Es importante señalar, que tanto para los estudios de microvibraciones como para los de pull back con cargas bajas, las frecuencias identificadas no lograron diferenciarse en forma importante del movimiento del tablero debido al oleaje, por esta razón, previo al análisis, se filtraron los datos bajo una banda de 1 Hz, o no se estudiaron las frecuencias asociadas al oleaje.

Para este muelle se realizaron dos tipos de estimaciones de las propiedades dinámicas, la primera, a través del análisis del registro de vibraciones; y la segunda, con registros obtenidos a través de un ensayo de Pull-Back aplicado a la estructura. Las propiedades dinámicas determinadas a través del análisis del decaimiento logarítmico de los registros generados por el ensayo de Pull Back, son las que se consideran como propiedades confiables, y nos sirven para comparar los resultados obtenidos a través del análisis de los registros de vibraciones ambientales.

5.1 Pull Back

Para el caso del análisis de los registros de Pull Back, se asume, para el caso del desplazamiento, que los tramos se comportaban como estructuras independientes, sin embargo, en la práctica, se observó movimiento en el tramo 5, tanto por el oleaje, como por la interacción entre tramos. A continuación se

presenta un detalle con los desplazamientos relativos entre los tableros 4 y 5, y un detalle de los gráficos para el análisis del decaimiento logarítmico producido por el rompimiento del fusible de 33 T.

TABLA 5.1: DESPLAZAMIENTOS RELATIVOS ENTRE LOS TABLEROS 4 Y 5.

Carga Aplicada [Ton]	Máximo [mm]	Mínimo [mm]	D [mm]	D/2 [mm]
10	0.42	-0.45	0.87	0.44
10	0.60	-0.53	1.13	0.57
21	0.77	-0.74	1.51	0.76
33	1.30	-1.01	2.31	1.16
32	1.04	-1.42	2.46	1.23
42	2.06	-1.11	3.17	1.58
42	1.75	-1.63	3.38	1.69

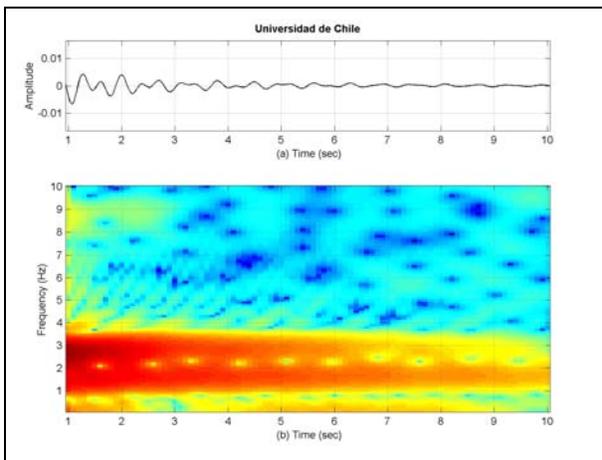


Figura 5. 1: Señal Original y Espectrograma

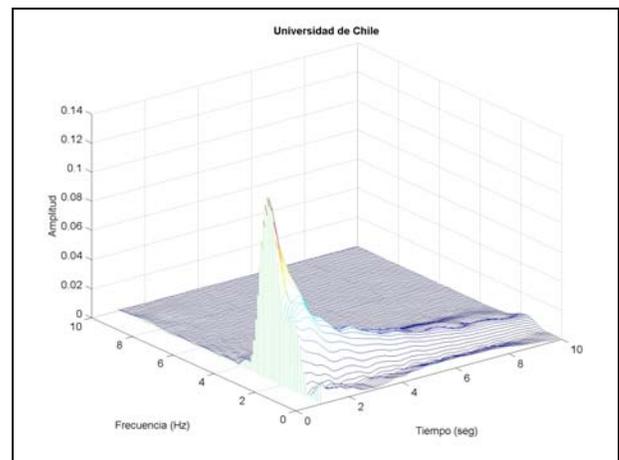


Figura 5. 2: Espectrograma 3-D Señal Original

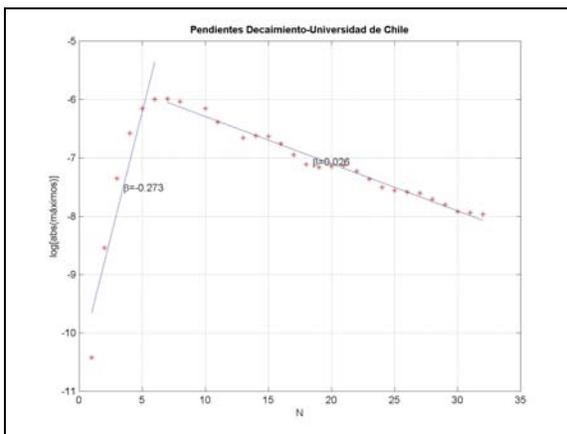


Figura 5. 3: Amortiguamiento Señal Bajo 2 Hz

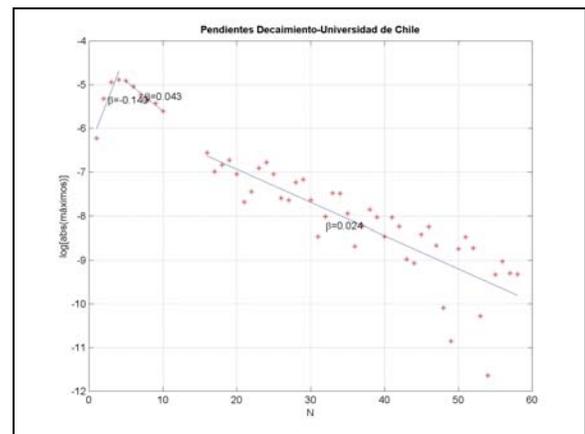


Figura 5. 4: Amortiguamiento Señal Sobre 2 Hz

De la Tabla 5.1 se observa que el desplazamiento máximo registrado es cercano a los 1,7 mm, mucho menor al esperado a partir del modelo analítico, diseñado con tramos independientes, lo cual indica mayor rigidez.

La vinculación entre tramos implica que el muelle, al menos entre los tramos 3 y 4 se mueva longitudinalmente en conjunto. Esto puede ocurrir por la presencia de elementos, por ahora no identificados, pero de suficiente rigidez y resistencia como para controlar el movimiento entre tramos del muelle.

El período longitudinal asociado al movimiento conjunto de segmentos de muelle es de 0.61 segundos (1.6 Hz). Este movimiento se puede asumir como que los tramos involucrados oscilan en la misma dirección, (la fase entre ellos es cero grados). El número de segmentos que participan en el movimiento con este período no se ha determinado.

El amortiguamiento para esta forma de vibrar se ubica en una banda de 2,3% a 3,1% con una media de 2,7%. La banda de variación es pequeña y no muestra una tendencia con respecto a la magnitud de la carga y por lo tanto es conveniente establecer un único valor para el sistema.

El decaimiento observado en los ensayos indica que la disipación de energía para este modo se puede asociar a un sistema viscoelástico.

El período longitudinal asociado al movimiento relativo entre segmentos de muelle varía entre los 0.36 y 0.38 segundos (2.6 – 2.8 Hz). Este movimiento se puede asumir como que los tramos involucrados oscilan en dirección contraria pero corresponde al mismo modo, (la fase entre ellos es 180 grados). El número de segmentos que participan en el movimiento con este período no se ha determinado.

El amortiguamiento para esta forma de vibrar se ubica en una banda de 4,3% a 4,5% con una media de 4,4%. La banda de variación es lo suficientemente pequeña y no muestra una tendencia con respecto a la magnitud de la carga y por tanto es conveniente establecer un único valor para el sistema. Bajo esta misma frecuencia existe un cambio de estado en disipación el cual corresponde a amplitudes más bajas con una razón de amortiguamiento crítico equivalente de 2,0% a 2,5%.

TABLA 5.2: FRECUENCIAS PREDOMINANTES Y AMORTIGUAMIENTOS OBSERVADOS.

Carga Aplicada [Ton]	Frecuencia 1 [Hz]	Amortiguamiento 1	Frecuencia 1 [Hz]	Amortiguamiento 2
10	1.633	**	2.857	**
10	1.664	0.028	2.796	0.043
21	1.613	0.023	2.765	0.043
33	1.633	0.026	2.722	0.043
32	1.635	0.031	2.754	0.045
42	1.602	0.026	2.686	0.043
42	1.598	0.029	2.634	0.044

* Frecuencia de baja respuesta en excitación ambiente, no se reporta amortiguamiento.

** No identificado en forma confiable.

5.2 FNP

El análisis de microvibraciones se hizo utilizando el espectro de potencia obtenido del registro longitudinal (Ver Figura 5. 5). En él, se presentan cuatro frecuencias predominantes: 0.8-0.85 Hz, asociado al oleaje; 1.66 Hz, con un amortiguamiento crítico equivalente de aproximadamente $3.0\% \pm 0.5\%$, asociado al movimiento longitudinal del tablero; 2.15 Hz, asociada a equipos sobre el tablero; y 2.77-2.81 Hz, asociado al movimiento longitudinal relativo del tablero y con un amortiguamiento no determinado en esta etapa debido a la interacción con otra frecuencia predominante. En general el espectro de potencia indica que para el nivel de vibraciones presente existe no-linealidad en el comportamiento del tramo.

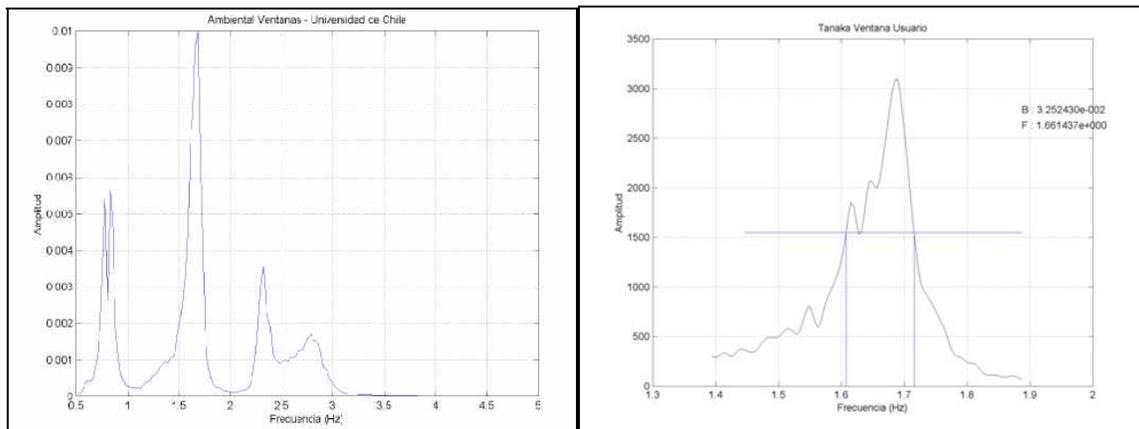


Figura 5. 5: Espectro de potencia y estimación de amortiguamiento mediante microvibraciones

5.3 SSI

La presentación de resultados se hace, en primer lugar, en forma gráfica, a través de un diagrama de estabilidad entre las tres componentes estimadas. En este diagrama sólo se encuentran graficadas las frecuencias que cumplen con al menos una de las condiciones de estabilidad.

Dentro del gráfico se presenta también un histograma que incluye todas las frecuencias estables, que a pesar de no cumplir necesariamente con las tres condiciones de estabilidad son estimadas por el modelo. Se incluye el gráfico del espectro de potencia asociado a uno de los canales del registro, que nos ayuda a identificar las frecuencias más importantes del sistema. Para finalizar, se entrega un resumen con las frecuencias estables contenidas en el primer gráfico, el cual presenta la frecuencia media, su desviación estándar, y el número de muestras asociada a ésta.

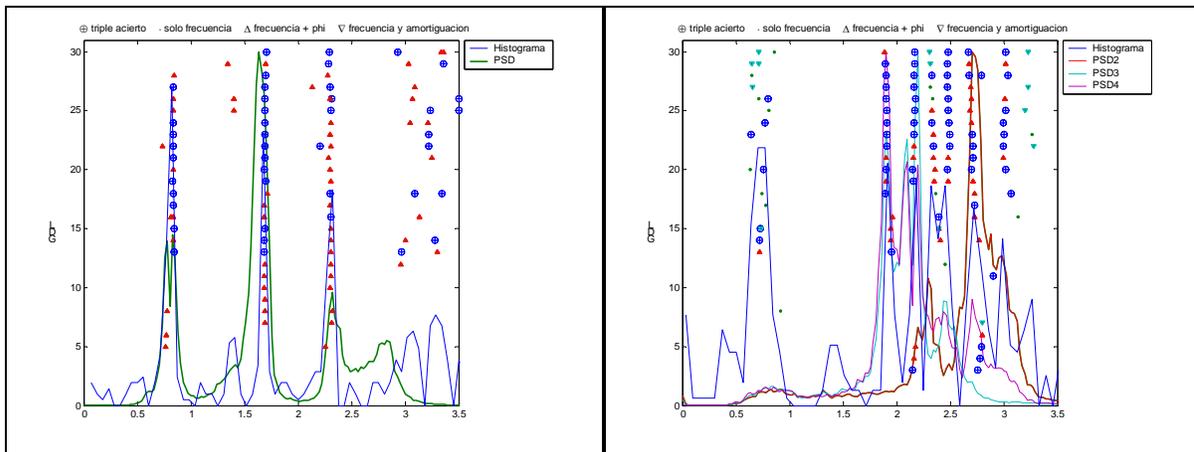


Figura 5. 6: Diagrama de Estabilidad Registro Vibraciones. Caso 1 sensor ubicado en sentido longitudinal.

Figura 5. 7: Diagrama de Estabilidad Registro Vibraciones. Caso 3 sensores ubicados en sentido transversal.

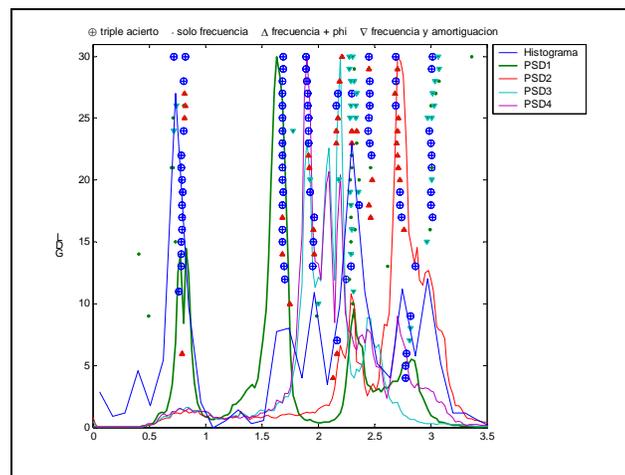


Figura 5. 8: Diagrama de Estabilidad Registro Vibraciones. Caso todos los sensores.

En la Figura 5. 6 se presentan dos frecuencias (0,83 y 1,69 Hz) que se pueden asociar al oleaje y al modo longitudinal de la estructura, puesto que éstas no se presentan en la Figura 5. 7, donde los sensores están ubicados en la dirección transversal.

La frecuencia correspondiente a 2.15 Hz, mostrada en la Figura 5. 6, se presenta estable en frecuencia y formas modales, pero no en amortiguamiento, esto se puede deber principalmente a estructuras sobre la superficie del tablero e interacción entre los tramos del muelle.

En la Figura 5. 7 notamos que se presentan varias frecuencias entre 1.9 y 2.5 Hz con amortiguamientos que oscilan entre 2.8 y 3.5%. Aparecen, además, dos frecuencias cercanas a los 2.7 Hz que presentan amortiguamientos muy distintos. Si nos fijamos en la Figura 5. 7, podemos notar que estas frecuencias cercanas tienden a una sola frecuencia, y que la diferencia producida en el amortiguamiento, puede

deberse a la interacción (roce) de los tramos aladaños, lo que hace poco probable una estimación certera del amortiguamiento.

Finalmente para el caso en que se ocupa la totalidad de los sensores (Figura 5. 8) la frecuencia que predomina, es la asociada al movimiento longitudinal, además aparece una frecuencia cercana a los 3 Hz que podría estar asociada al modo torsional.

5.4 COMPARACIÓN DE LOS MÉTODOS

TABLA 5.3: RESUMEN PROPIEDADES DINÁMICAS ESTIMADAS PARA AMBOS REGISTROS

Descripción	Estimación Registro Ambiental Método Dominio Frecuencia		Estimación Registro Pull-Back Método Decaimiento Logarítmico				Estimación Registro Ambiental Método SSI			
	Frec. [Hz]	β	Frec. [Hz]	Desviación Estándar	β	Desviación Estándar	Frec. [Hz]	Desviación Estándar	β	Desviación Estándar
Oleaje	0.8-0.85	*					0.8363	3.74E-03	0.0451	1.40E-03
Longitudinal Global	1.660	0.03±0.005	1.6254	2.29e-02	0.0272	2.78e-03	1.6927	3.85E-03	0.0210	5.09E-04
							1.9117	1.02E-03	0.0283	7.81E-04
Equipamiento	2.15	*					2.1586	8.79E-03	0.0343	1.11E-03
							2.4799	7.42E-03	0.0294	9.59E-04
Longitudinal Relativo	2.77 - 2.81	*	2.7449	7.29e-02	0.0435	8.36e-04	2.7103-2.7762		**	
							3.0137	4.67E-03	0.0249	5.92E-04

*Frecuencia de baja respuesta en excitación ambiente, no se reporta amortiguamiento.

** No estimado en forma confiable

En la Tabla 5.3 podemos apreciar que las dos frecuencias detectadas a través del análisis del decaimiento logarítmico del Pull Back, son muy similares a las estimadas por el método SSI, sin embargo, para la frecuencia cercana a los 2.7 Hz los registros ambientales no fueron capaces de detectar el amortiguamiento asociado en forma confiable.

6 CONCLUSIONES

El método SSI y el FNP logran ser eficaces y de fácil utilización para la estimación de propiedades dinámicas fundamentales de estructuras excitadas bajo condiciones ambientales, ya que no necesitan conocer la fuerza de excitación.

Entre sus ventajas, el SSI, destaca la disminución del tiempo de medición necesario para una buena estimación de las propiedades de una estructura. Esto resulta muy útil para analizar estructuras con actividad intensa, como puentes y muelles, donde no se puede detener el tráfico para hacer la medición. A pesar de que no logra hacer una estimación de las propiedades de la estructura tan exacta como la del

análisis por Pull Back, no requiere de la instalación de maquinarias tan complejas para la toma de datos como las requeridas por este ensayo. Adicionalmente es efectivo en la detección de frecuencias, incluso, en estructuras con comportamiento no lineal leve. A diferencia del PSD, el método SSI logra identificar con claridad frecuencias cercanas entre sí o peaks dobles y sus amortiguamientos asociados.

7 AGRADECIMIENTOS

Agradecemos por su colaboración, a Pedro Soto, Ingeniero Civil a cargo del Laboratorio Experimental de Estructuras del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile.

REFERENCIAS

- [Boroschek and Yáñez, 2000] Rubén Boroschek, Fernando Yáñez. Experimental Verification of Basic Analytical Assumptions used in the Analysis of Buildings Structured With Walls. *Engineering Structures* 22 pp. 657-669.
- [Peeters, 2000] Bart Peeters. System Identification and Damage Detection in Civil Engineering. Katholieke Universiteit Leuven – Faculteit Toegepaste Wetenschappen Arenbergkasteel, B-3001 Herlee (Belgium).
- [Tanaka et al, 1966] Tanaka T., Yoshizawa S, Osawa Y., Morishita T. Period and damping of vibration in actual building modes, *Bull. of Seism. Soc. Am.* 56, 1966, pp. 793-813.
- [Valdés, 2004] Perla Valdés. Identificación Paramétrica de Sistemas Utilizando el Método del Subespacio Estocástico, Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile, Santiago, Chile.
- [Vega, 2003] Carlos Vega. Determinación del Amortiguamiento de un Muelle Transparente de Pilotes de Acero y Tablero de Hormigón Armado, Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile, Santiago, Chile.