



Universidad de Valladolid

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID
ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES
Grado en Ingeniería Mecánica

Trabajo Fin de Grado:

**Simulación del tránsito peatonal en pasarelas
esbeltas. Aplicación a la pasarela del Museo de la
Ciencia de Valladolid**

Autor:

MARTÍNEZ ARIAS, Andrés

Supervisado y dirigido por:
LORENZANA IBÁN, Antolín

Departamento: Construcciones Arquitectónicas, Ingeniería del Terreno,
Mecánica de los medios Continuos y Teoría de Estructuras

Valladolid, Septiembre de 2015

Resumen

El diseño esbelto y estilizado de las pasarelas peatonales actuales las convierte en sistemas especialmente sensibles a cargas dinámicas externas de carácter periódico de bajas frecuencias.

El tránsito de un peatón se puede aproximar a una fuerza de este tipo.

Un ejemplo de este tipo de pasarela es la Pasarela del Museo de la Ciencia de Valladolid.

Analizamos el caso concreto de esta pasarela basándonos en documentos teóricos sobre dinámica estructuras, con el apoyo y análisis de guías de diseño y empleando un software de cálculo programado en Matlab y desarrollado por un alumno de la EII.

Se estudian cuáles son los parámetros influyentes en la respuesta dinámica del sistema y de qué manera actúan. Se valora la respuesta y compara con valores máximos admisibles desde el punto de vista del confort. Estos datos se extraen de distintas normativas.

keywords estado límite de servicio, vibración, análisis dinámico, estructuras, análisis modal

Índice general

Resumen	I
Lista de figuras	v
Índice de figuras	v
Lista de tablas	vii
Índice de tablas	vii
Lista de símbolos y abreviaturas	ix
1. Introducción	1
1.1. Descripción de la Problemática	1
1.2. Objetivos del Trabajo	3
2. Caso Práctico	5
2.1. Pasarela del Museo de la Ciencia	5
2.2. Método de Trabajo	6
2.3. Herramienta de Trabajo	9
2.3.1. Breve descripción del software	9
2.3.2. Decisión de uso	10
2.4. Caracterización de la Estructura	11
2.4.1. Modelo de Sección Única	11
2.4.2. Modelo de Sección Variable	23
2.4.3. Elección Final	27
2.5. Caracterización del Peatón	29
2.5.1. Estudio Antropométrico	29
2.5.2. El peatón como carga dinámica	32
2.6. Corolario	34
3. Experimentación	35
3.1. Validez del Modelo de Sección Única	35
3.2. Situación de Confort	41

3.2.1. Otros Criterios de Confort	43
3.3. Respuesta Dinámica del Sistema	45
3.3.1. Velocidad de Paso	46
3.3.2. Masa del Peatón	48
3.3.3. Frecuencia de Paso	51
3.3.4. Corolario	53
3.4. Estudio Multipersona	54
3.4.1. Frente Peatonal	55
3.4.2. Flujo Peatonal Regular	56
3.4.3. Flujo Aleatorio	58
3.4.4. Corolario	59
4. Conclusiones	61
Bibliografía	63

Índice de figuras

2.1. Pasarela del Museo de la Ciencia (Valladolid)	5
2.2. Vano 2 (PMC)	6
2.3. Frecuencias propias del Vano 2 en la PMC.	7
2.4. Esquema simplificado. Modelo de Sección Única	11
2.5. Variación de $f_i = f[\log_{10}K_\theta]$ para $\mu = cte = 6,38 \cdot 10^6 m^4/s^2$. .	16
2.6. Variación de $K_{ij} = f[\log_{10}K_\theta]$ para $\mu = cte = 6,38 \cdot 10^6 m^4/s^2$.	17
2.7. Variación de $f_i = f[\log_{10}K_\theta]$ para $\mu = cte = 1,38 \cdot 10^7 m^4/s^2$. .	18
2.8. Variación de $K_{ij} = f[\log_{10}K_\theta]$ para $\mu = cte = 1,38 \cdot 10^7 m^4/s^2$.	19
2.9. Variación de $f_1 = f[\log_{10}K_\theta]$ para varios valores de μ	20
2.10. Variación de $K_{21} = f[\log_{10}K_\theta]$ para varios valores de μ	20
2.11. Representación del 1 ^{er} Modo Propio de Vibración de la PMC [Simulación]	21
2.12. Variación de $f_1 = f[\log_{10}\mu]$ para $K_\theta = 10^{40} Nm/rad$	22
2.13. Esquema simplificado. Modelo de Sección Variable	23
2.14. Parámetros estudiados en el Estudio Antropométrico	31
2.15. Evolución de la fuerza realizada por un peatón a lo largo del tiempo	33
3.1. Stana caminando por el vano 2 durante el test 076	36
3.2. Test 76 - Aceleración en función del tiempo en MV y en QV . . .	37
3.3. Test 76 - Comparación Respuesta Real - Respuesta Simulada . .	39
3.4. Test 75 - Comparación Respuesta Real - Respuesta Simulada . .	40
3.5. Metodología de estudio de pasarelas propuesta por SETRA . . .	41
3.6. Limite para aceleraciones verticales recomendado por ISO 10137	44
3.7. Respuesta de la PMC. Mismo individuo y frecuencia, diferente velocidad	47
3.8. Respuesta de la PMC. Individuos con distinta masa caminando a la misma frecuencia	50
3.9. Respuesta de la PMC. Mismo individuo caminando a la misma velocidad pero a distintas frecuencias de paso	52
3.10. Aceleración vertical en MV para flujos peatonales	55
3.11. Aceleración vertical en MV . Entrada de peatones cada 10 segundos	57

3.12. Aceleración vertical en MV . Flujo peatonal aleatorio 58

Índice de tablas

2.1. Resultados cercanos al objetivo para el Modelo de Sección Única	14
2.2. Resultados escogidos en el Modelo de Sección Única	23
2.3. Resultados escogidos en el Modelo de Sección Variable	26
2.4. Resultados del Estudio Antropométrico	31
3.1. Aceleraciones máximas aceptables recomendadas por HIVOSS y SETRA	42
3.2. Aceleraciones máximas aceptables recomendadas por EUROCODE	43
3.3. Comparación entre valores máximos de aceleración Simulación - Aproximación SETRA	56

*

Lista de símbolos y abreviaturas

L_T	Longitud total del <i>vano 2</i> de la PMC (m).
M_T	Masa total del <i>vano 2</i> de la PMC (kg).
c	Amortiguamiento del sistema ($-$).
K_θ	Constante de rigidez del resorte torsional situado en el segundo apoyo del esquema simplificado de la PMC ($N \cdot m/rad$).
b_i	Anchura de la sección transversal de la viga, o de la sub-barra i -ésima en el modelo multisección (m).
h_i	Altura de la sección transversal de la viga, o de la sub-barra i -ésima en el modelo multisección (m).
A_i	Área de la sección transversal de la viga, o de la sub-barra i -ésima en el modelo multisección (m^2).
ρ	Densidad (kg/m^3)
I_i	Momento de Inercia de la viga, o de la sub-barra i -ésima en el modelo multisección (m^4).
f_1	Frecuencia natural del primer modo propio del sistema (Hz).
f_2	Frecuencia natural del segundo modo propio del sistema (Hz).
f_3	Frecuencia natural del tercer modo propio del sistema (Hz).
K_{21}	Indicador adimensional, $K_{21} = f_2/f_1$ ($-$).
K_{31}	Indicador adimensional, $K_{31} = f_3/f_1$ ($-$).
μ	Indicador $\mu = \frac{E \cdot I}{\rho \cdot A}$ (m^4/s^2).
X	Posición en la PMC (m)
SB_i	Sub-barra i -ésima en el Modelo Multisección.

L_{pierna}	Longitud de la pierna del peatón (m).
L_{zan}	Longitud de la zancada del peatón (m).
M	Masa del peatón (kg).
H	Altura del peatón (m).
v	Velocidad de paso del peatón (m/s).
f	Frecuencia de paso del peatón (Hz).

α_{zan}	Ángulo de apertura entre las piernas ($^{\circ}$).
MV	Punto de Control $X = L_T/2$ (m).
QV	Punto de Control $X = 0,75L_T$ (m).
u	Desplazamiento vertical (mm).
v	Velocidad vertical (mm/s).
a	Aceleración vertical (m/s^2).
RMS	Root Mean Square.
$f_{critica}$	$f_{critica} = f_1/2 = 1,75$ Hz
t_r	Tiempo que tarda un peatón en recorrer el Vano 2 de la PMC
T_{rep}	Tiempo que tarda el sistema desde que está libre de carga hasta que alcanza el estado de reposo

Capítulo 1

Introducción

1.1. Descripción de la Problemática

En los últimos años, el empleo de nuevos materiales de construcción, el desarrollo metalotécnico y los avances científicos en el campo de la construcción y de la ingeniería civil han dotado a las estructuras de tránsito (puentes, pasarelas, etc) de nuevas posibilidades de diseño.

Las estructuras robustas y generalmente sobredimensionadas han ido dando paso a otras mucho más ligeras y esbeltas. Éstas nos permiten diseños arquitectónicos más imaginativos y estéticos y suponen una ventaja económica brutal en cuanto al ahorro de materiales y recursos se refiere.

Sin embargo, este cambio de dirección ha supuesto que estructuras como puentes, pasarelas y forjados, ahora de amplios vanos y geometrías estilizadas, sean susceptibles a acciones externas que antes se consideraban insignificantes. La acción del viento sobre la estructura o el propio tránsito peatonal son cargas externas de carácter dinámico que ahora deben estudiarse detenidamente durante la fase de diseño.

La esbeltez estructural implica una pérdida masa y de rigidez estructural, lo cual implica frecuencias naturales del sistema más bajas, lo que la hace mucho más sensible a la excitación por cargas externas y supone un mayor riesgo de resonancia. El fenómeno de resonancia ocurre si la frecuencia del sistema coincide con la frecuencia de excitación, por ejemplo la frecuencia de paso de los peatones.

El tránsito peatonal puede ocasionar mayores amplitudes de vibración en este tipo de pasarelas más ligeras. En general, esta situación no tiene efectos adversos sobre la estructura, sin embargo el usuario puede experimentar cierta

incomodidad a su paso por el tramo.

Los análisis modales, estudios dinámicos y ensayos experimentales tratan de determinar y cuantificar la percepción de las vibraciones por parte del peatón y la probabilidad de percibir dichas vibraciones, siendo el objetivo principal valorar el confort del usuario.

Por definición, las cargas estáticas son constantes o cuasi constantes. Por otro lado, las cargas dinámicas dependen del tiempo y pueden ser agrupadas en cuatro categorías:

- Armónicas o puramente senoidales
- Cargas recurrentes repetidas en intervalos determinados de tiempo que definimos como periodos.
- Cargas aleatorias con variaciones arbitrarias en periodo, intensidad y dirección.
- Cargas breves y puntuales en determinados instantes de tiempo.

Generalmente, cuando hablamos de la carga inducida por un peatón estamos hablando de cargas dependientes del instante temporal en el que nos encontremos y pueden ser clasificadas como 'cargas periódicas'. Una de las principales características de la carga dinámica peatonal es su pequeña intensidad. La aplicación de estas cargas sobre estructuras rígidas de gran tamaño difícilmente puede suponer una repercusión vibracional significativa. Sin embargo, la tendencia estética arquitectónica seguida por las pasarelas actuales genera cada vez más la necesidad de un análisis dinámico exhaustivo.

Habitualmente los ensayos se realizan estudiando el efecto causado en el sistema por el tránsito un único peatón, para más tarde extrapolar el resultado a casos multipersona mediante aproximaciones y modelos probabilísticos. Es especialmente importante el efecto que puede llegar a ocasionar el tránsito de grandes multitudes. En dichos casos la amplitud máxima de vibración crece proporcionalmente con el número de transeúntes que estén ocupando la pasarela en dicho momento.

En situaciones excepcionales como marchas o eventos deportivos en los que los individuos caminen en fase y a una frecuencia de paso cercana a la natural del sistema, el efecto de resonancia se amplificará ocasionando situaciones de gran incomodidad o incluso de inseguridad.

1.2. Objetivos del Trabajo

A la hora de escoger este Trabajo de Fin de Grado, el motivo principal es conseguir los siguientes objetivos:

- Conocer y profundizar en ámbitos del cálculo estructural que hasta la fecha desconocíamos por no verse incluidos en el temario de ninguna asignatura del Grado. El análisis modal, el efecto de resonancia o el análisis dinámico estructural son conceptos, hasta el momento desconocidos, que tendrán una importancia esencial en este trabajo.
- Realizar una revisión bibliográfica y documental de ensayos y escritos previos sobre la Pasarela del Museo de la Ciencia de Valladolid (PMC).
- Analizar guías de diseño estructural y normativa referente a pasarelas y efectos vibratoriales en el ser humano.
- Emplear una herramienta de trabajo ideada y diseñada por un compañero de la Escuela de Ingenieros Industriales de Valladolid y utilizarla para obtener resultados y conclusiones, ayudando así al desarrollo de este trabajo y a la implementación de mejoras y detección de errores en el software.
- Reducir la estructura de la PMC a un problema plano y conseguir caracterizar su comportamiento modal en el ordenador para poder realizar simulaciones mediante el software empleado.
- Comprobar que el software empleado es una herramienta válida para la aplicación de situaciones reales mediante la comparación con resultados experimentales registrados por investigadores del Centro Tecnológico CARTIF.
- Identificar los parámetros más determinantes en la respuesta dinámica de la pasarela y ver de qué manera actúan e influyen en los resultados obtenidos.
- Simular y predecir lo que sucedería en situaciones extremas en las que un flujo peatonal atravesara la pasarela.
- Analizar la situación de confort o incomodidad experimentada por los peatones al atravesar la PMC.

*

Capítulo 2

Caso Práctico

2.1. Pasarela del Museo de la Ciencia

La estructura a estudiar será la Pasarela del Museo de la Ciencia (PMC a partir de ahora). Construida en el año 2004 y ubicada sobre el Río Pisuerga, en la ciudad de Valladolid, la PMC comunica el Museo de la Ciencia con el Paseo de Zorrilla.

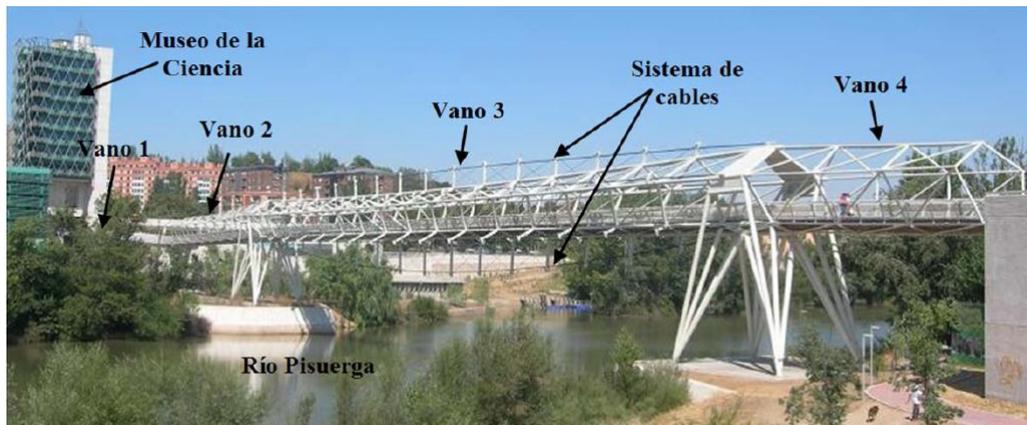


Figura 2.1: Pasarela del Museo de la Ciencia (Valladolid)

La PMC está construida de acero y hormigón y tiene una longitud total de 234 m. La pavimentación original de madera fue sustituida en el año 2013 por chapa de aluminio galvanizado.

Como se puede apreciar en la figura 2.1, la PMC está dividida en cuatro vanos. El primer tramo tiene 45 m y una gran rigidez; construido en hormigón armado, se integra en el edificio del museo, con el que comparte cimentación. Los otros tres vanos metálicos poseen una configuración de entramado triangular de barras tubulares con sección hexagonal. El *vano 3*, de 111 m cuenta con un sistema de pretensado formado por un conjunto de cables

longitudinales y transversales que rigidiza y estabiliza dicho tramo ante el tránsito peatonal. El *vano 4* es el más corto, con tan sólo 21 m. Finalmente el *vano 2*, de 51 m es el más sensible a excitaciones dinámicas. En dicho vano se alcanzan niveles vibratorios que afectan al confort del usuario, especialmente en casos como el de un corredor atravesando el puente.

Como la incomodidad de este vano no es un tema nuevo, han sido varios los estudios realizados sobre este tramo. Ensayos precedentes han descrito la manera de vibrar del tramo, así como su comportamiento ante cargas dinámicas como la fuerza del viento o el tránsito peatonal. Es por este motivo que nosotros partimos de la base de que ya conocemos las frecuencias propias del sistema gracias a estudios previos. A lo largo de este trabajo estudiaremos el problemático *Vano 2*, que se puede observar en la figura 2.2



Figura 2.2: Vano 2 (PMC)

2.2. Método de Trabajo

Reduciremos el caso real a un problema plano en dos dimensiones y estudiaremos la vibración vertical del tramo. Propondremos dos modelos matemáticos para intentar aproximar el comportamiento de la estructura real. Entendemos que si en el modelo teórico llegamos a obtener los valores reales de las frecuencias propias, podremos simular de forma certera el comportamiento dinámico de la PMC.

En una situación de diseño, el proceso de trabajo consistiría en determinar materiales, características y propiedades, así como geometría de la pasarela y condiciones de contorno. Todos estos parámetros, junto con los valores de la masa M_T del tramo e inercia I de la sección transversal intervienen en la respuesta modal del sistema, y por lo tanto en la cantidad de modos propios y los valores de las frecuencias naturales. Estos valores son una señal de

identidad de la pasarela e intervienen en su comportamiento y respuesta a excitaciones dinámicas. Nosotros vamos trabajar en sentido contrario.

Como ya hemos comentado, el *Vano 2* de la PMC es un tramo conflictivo y está de sobra estudiado. Por poner un ejemplo, en [5] se estudia experimentalmente, con acelerómetros y demás equipo de campo, la respuesta a cargas dinámicas de dicho tramo de la PMC y se propone una solución con un dispositivo TMD (Tuned Mass Damper) para mitigar las vibraciones del vano. En dicho estudio quedan totalmente definidos experimentalmente los 3 modos propios del tramo y sus valores, reflejados en la Fig 2.3

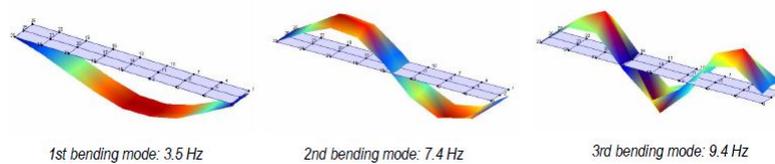


Figura 2.3: Frecuencias propias del Vano 2 en la PMC.

Nuestro planteamiento consiste en simplificar el sistema reduciéndolo a un modelo plano de esquema sencillo estilo viga biapoyada, biempotrada o apoyada-empotrada (lo discutiremos más adelante). Al ser un problema plano, no vamos a tener presente en este estudio la anchura de la pasarela o las vibraciones transversales y torsionales del sistema. Únicamente desplazamientos, velocidades y aceleraciones en el eje vertical.

Debemos identificar las propiedades del material y las características de la sección de la viga y ajustarlos hasta llegar a los valores de las frecuencias propias vistas en la Fig 2.3. Una vez conseguido esto, nuestra estructura teórica se aproximará de forma certera al comportamiento real de la PMC, por lo tanto estaremos en condiciones de simular el comportamiento de la estructura bajo cargas dinámicas. Durante la Sección 2.4 procederemos de la siguiente manera:

- Intentaremos aproximar la PMC mediante el modelo más sencillo, biga biapoyada, una única sección a lo largo de todo el tramo y un único material. Veremos qué punto de precisión podemos alcanzar con este modelo.
- Caracterización de la PMC mediante un Modelo de Sección Variable. Discutiremos en qué medida aproxima mejor el sistema real que el modelo más sencillo expuesto antes. Describiremos dónde reside la complejidad

de caracterizar el sistema de esta forma. Expondremos las ventajas e inconvenientes de este modelo.

- Finalmente, una vez empleados ambos modelos por separado, llegará la hora de compararlos y seleccionar el más apropiado para trabajar con él durante el resto del trabajo. Definiremos las ventajas y limitaciones del modelo seleccionado.

El siguiente paso es caracterizar la acción del peatón sobre el piso. Desde el punto de vista matemático-estructural, un peatón es un elemento de geometría compleja. Bien es verdad que estudios anteriores y guías de diseño lo han caracterizado como una carga puntual que se desplaza a una velocidad constante por el sistema, sin embargo, de alguna manera se debe incluir en el modelo la acción balanceante al caminar, la altura del peatón, la velocidad o la frecuencia de paso.

Durante la Sección 2.5 vamos a:

- Analizar y estudiar videos y datos de estudios experimentales cedidos por CARTIF para el desarrollo de estudios sobre el *Vano 2* de la PMC. A partir de estos intentaremos caracterizar antropométricamente a los peatones. Establecer relaciones geométricas dentro de su anatomía y decidir si estas relaciones, por ejemplo, se mantienen constante, o de qué manera influyen al sistema, etc.
- Asociar la acción real de un peatón con un modelo matemático definido; dicho de otra manera, definir la fuerza dinámica que supone el tránsito del peatón sobre el tramo mediante una ecuación matemática.

Una vez discutidos y llevados a cabo estos pasos, estaremos en condiciones de estudiar la PMC. Podremos simular casos que ya se llevaron a cabo de forma experimental y comparar resultados o incluso proponer situaciones nuevas que aún no se han llegado a experimentar y analizar la posible respuesta del sistema.

Como conclusión, durante este Capítulo vamos a aproximar lo máximo posible la respuesta modal en la simulación por software a la respuesta modal real.

- Iteraremos hasta conseguir los resultados deseados que nos aseguren una aproximación realista de la respuesta del sistema bajo excitaciones dinámicas.
- Caracterizaremos al peatón matemáticamente. Realizaremos un estudio antropométrico que relacione las medidas anatómicas del individuo con la forma de caminar.
- Aproximaremos la carga dinámica ejercida por el paso del peatón a una fuerza periódica dependiente del tiempo.

Una vez conseguido todo esto tanto la pasarela como el peatón estarán caracterizados de forma completa en nuestro modelo virtual. Así, en el Capítulo 3, podremos realizar el estudio dinámico del sistema atendiendo únicamente al modelo simulado por software.

2.3. Herramienta de Trabajo

Una vez expuesta la línea de trabajo a seguir, debemos especificar cuál va a ser la herramienta para llevarlo a cabo. Resulta evidente, que con el avance tecnológico que estamos experimentando actualmente y la gran cantidad de oferta de software dedicado al cálculo estructural, debíamos decantarnos por un programa en concreto.

Programas de cálculo mediante Elementos Finitos como ANSYS o el módulo de cálculo integrado en SolidWorks habrían sido buenos candidatos que, seguro hubieran aportado gran precisión y comodidad en muchas de las tareas que aquí se han ido realizando. Sin embargo, uno de los motivos principales para escoger este tema de TFG era continuar la labor de mi compañero Álvaro Magdaleno, cuyo trabajo se ve reflejado en [1].

2.3.1. Breve descripción del software

Durante la realización de [1] se empleó el programa MATLAB como soporte para crear una herramienta de cálculo estructural. El software nos permite analizar estructuras planas. Permite añadir tantas barras como queramos al sistema y dotar al problema de la complejidad que queramos.

El software solicita datos para dotar a las barras de las propiedades infundidas por el material escogido y la sección del perfil empleado. Una vez definidas las barras, éstas se van acumulando en la estructura.

Tenemos la posibilidad de reproducir cualquier condición de contorno deseada. Así, podemos introducir apoyos fijos o móviles, empotramientos, rótulas e incluso resortes y desplazamientos prescritos en los apoyos. También podemos incluir la cantidad de cargas que deseemos, tanto estáticas como dinámicas, tanto puntuales (internodales o nodales) como distribuidas.

El programa, internamente, obtiene la solución empleando un sistema similar al de Elementos Finitos. El software nos solicita una resolución para el mallado de cálculo. La estructura quedará subdivida en la cantidad de sub-barras escogida y estudiará cada una de ellas de forma independiente. El programa ajustará automáticamente las condiciones de contorno que relacionan la sub-barra i -ésima con las sub-barras adyacentes.

En la Ref. [1] queda demostrado perfectamente que el programa es fiable, aporta resultados reales y precisos y que supone una herramienta de confianza para el estudio de estructuras planas.

El software nos ofrece la posibilidad de realizar un análisis estático, modal y dinámico de la estructura seleccionada. Nos aporta valores en función del tiempo para las fuerzas, reacciones, desplazamientos, velocidades y aceleraciones en cualquier punto o conjunto de puntos escogido, así como de la estructura completa; lo cual no sólo la convierte en una poderosa herramienta para el estudio general del sistema sino también para el análisis de un punto crítico o problemático.

2.3.2. Decisión de uso

Ventajas Este software supone una herramienta perfecta para el desarrollo de este trabajo, de hecho es una herramienta hecha a la medida. A su vez, el desarrollo de este trabajo sirve para alentar la mejora continua y la evolución del programa, que hoy en día sigue en constante progreso. Determinadas problemáticas surgidas aquí han dado lugar a la implementación de nuevas funcionalidades en el software o a perfeccionar otras que ya estaban incluidas.

Desventajas Como ya hemos comentado, es un programa que sigue en desarrollo y eso puede acarrear fallos y problemas inesperados. Aún así, la mayor limitación que hemos encontrado al emplear esta herramienta es la gran carga cálculo que supone para el procesador del ordenador, lo que se traduce en tiempos de respuesta muy elevados para problemas complejos. Esto nos ha hecho decidir que, al menos ahora, no sea la herramienta más apropiada para sistemas de cierta complejidad. Sin embargo de esto hablaremos más adelante.

La satisfacción de continuar el trabajo de un compañero, ayudar a implementar nuevas funcionalidades y colaborar en el desarrollo del programa fue un motivo de peso a la hora de escoger este tema de TFG. Es un programa escrito con el objetivo de dar solución a problemas como el expuesto en este documento, por eso espero que mi trabajo ayude a complementar y dar una dimensión real, práctica y tangible al proyecto de mi compañero, Ref. [1].

2.4. Caracterización de la Estructura

2.4.1. Modelo de Sección Única

Aproximamos inicialmente la estructura al esquema de una viga simple. En la figura 2.4 podemos observar el esquema simplificado para el modelo escogido.

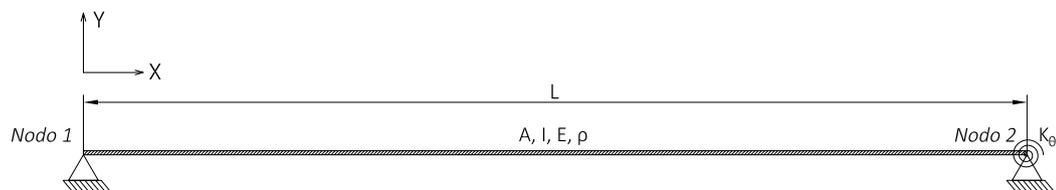


Figura 2.4: Esquema simplificado. Modelo de Sección Única

Parámetros Influyentes

El *nodo 1* constituye la unión entre el *vano 1* y el *vano 2*, sin embargo, como hemos comentado antes, el *vano 2* es el primero que se encuentra puramente sobre el agua y que no comparte cimentación con la orilla del Museo.

Si estudiáramos la estructura completa, esta unión se podría caracterizar mediante una rótula, que permita el giro independiente del *vano 2* sobre el *vano 1*. A la hora de aislar el tramo, esto se traduce en un apoyo fijo: desplazamientos restringidos y giro libre.

Por otro lado, la unión entre el *vano 2* y el *vano 3* supone una unión semirígida. Los dos comparten dintel de sustentación pero la conexión no es totalmente rígida, permitiéndose de esta forma un cierto giro relativo entre ambos tramos. Al aislar el *vano 2* traducimos el apoyo derecho en un apoyo fijo con un resorte torsional en el *nodo 2*. Desplazamientos restringidos y giro relativamente libre.

La rigidez de la unión queda determinada por el valor de K_θ [Nm/rad], constante elástica del resorte torsional.

- Si $K_\theta \rightarrow \infty$, entonces el apoyo estará funcionando como un empotramiento, con el giro totalmente restringido. Resultando una viga apoyada - empotrada.
- Si $K_\theta \rightarrow 0$ Nm/rad, entonces el apoyo estará funcionando como un apoyo fijo puro y el resorte no estará realizando ningún tipo de función. El giro será totalmente libre. Resultando así una viga biapoyada.

El resto de valores que caracterizan al sistema son:

Valores derivados de la estructura real. Valores que asumimos como ciertos y comprobados.

- **Longitud Total** L_T (m) longitud total del tramo, asumimos 51 m para nuestros cálculos. Valor real.
- **Masa Total** M_T (kg) masa total del tramo, asumimos $35 \cdot 10^3$ kg para nuestros cálculos. Valor real.
- **Amortiguamiento** c (-) el amortiguamiento es una característica inherente al sistema cuyo valor será determinado por la geometría de la estructura, propiedades del material, etc. Es el responsable de absorber y mitigar las acciones externas sobre la estructura. Tiene un valor adimensional, se expresa en tanto por ciento y su valor para estructuras peatonales se encuentra entre el 0.5% y el 2%. Es un parámetro que influye fuertemente en la respuesta dinámica del sistema, sin embargo, para el análisis modal puede considerarse despreciable. Por lo tanto en esta sección no lo tendremos en cuenta; hablaremos de él más adelante.

Valores geométricos de la sección. Simplificamos el modelo asumiendo una sección uniforme en todo el tramo y de geometría rectangular, donde seleccionaremos los valores para

- **Ancho de la sección**, b (m)
- **Altura de la sección**, h (m)

Que a su vez nos determinarán:

- **Área** A (m^2) corresponde al área de la sección transversal de la viga.

$$A = b \cdot h \quad (2.1)$$

- **Inercia** I (m^4) es el valor del momento de inercia respecto el eje Z.

$$I = \frac{1}{12} \cdot b \cdot h^4 \quad (2.2)$$

El hecho de definir b y h simplemente es por comodidad a la hora de plantear los bucles de generación de datos en el software. Realmente nuestro interés está en los valores de A e I ; aproximar la sección a una geometría rectangular o de cualquier otro tipo nos resulta indiferente.

Valores derivados de la elección del material. Valores que no determinaremos de forma directa.

- **Módulo de Young** E (Pa) asumimos que el material es acero, lo que implica: $E = 2,1 \cdot 10^{11}$ Pa.
- **Coefficiente de dilatación térmica** α ($^{\circ}C^{-1}$) aunque no influye en el desarrollo del problema, el software requiere un valor para este parámetro para poder iniciar los cálculos.
Asumimos $\alpha = 1,2 \cdot 10^{-5}$ $^{\circ}C^{-1}$.
- **Densidad del material** ρ (kg/m^3) es valor de la densidad del material. Quedará determinado a través de A :

$$\rho = \frac{M_T}{A \cdot L_T} \quad (2.3)$$

De este modo quedan definidos todos los parámetros que influyen en la respuesta modal del sistema. Nosotros escogeremos valores para K_{θ} , b y h , quedando definidos a través de estos el resto de parámetros.

Resultados Obtenidos

El desarrollo de una ecuación analítica que estableciera los valores de las frecuencias propias en función de los distintos parámetros planteados sería una solución cómoda para el estudio pero bastante intrincada de obtener. Además, contravendría el objetivo antes planteado de testar, emplear y explotar las posibilidades del software de cálculo. Es por esto que a las soluciones que se exponen a continuación se ha llegado mediante métodos iterativos y de prueba y error. Otra ventaja añadida de emplear este sistema es poder averiguar la influencia de cada uno de los parámetros en los resultados.

f_1 Se programado un gran bucle en el que todas las variables van tomando valores consecutivos y registrando un resultado para f_1 , f_2 y f_3 . Posteriormente se estudian los casos cercanos a la solución y de qué manera influyen las variables en los resultados obtenidos.

Inicialmente tratamos de satisfacer $f_1 = 3,5 \text{ Hz}$ (primera frecuencia propia del sistema). Partimos de la hipótesis de apoyo fijo ($K_\theta = 0$). Dando valores aleatorios vemos que es relativamente sencillo llegar a este valor. Sin embargo, enseguida nos damos cuenta de que aproximar $f_2 = 7,4 \text{ Hz}$ y $f_3 = 9,4 \text{ Hz}$ es una tarea que se antoja complicada. Los valores de la segunda y tercera frecuencia propia varían de forma imprevisible y sin ninguna dependencia lineal aparente con ninguna variable.

Decidimos entonces plantear varios parámetros nuevos para ayudarnos a analizar los datos obtenidos:

$$K_{21} = f_2/f_1 \quad (2.4)$$

$$K_{31} = f_3/f_1 \quad (2.5)$$

Las ecuaciones 2.4 y 2.5 relacionan la segunda y tercera frecuencia con la primera. La necesidad de plantear estos dos nuevos indicadores surge al observar una evolución más estable con respecto a la variación de A , I y K_θ . Nuestro objetivo ahora es alcanzar $f_1 = 3,5 \text{ Hz}$, $K_{21} = 2,1$ y $K_{31} = 2,7$.

Además definimos:

$$\mu = \frac{E \cdot I}{\rho \cdot A} \quad (2.6)$$

A través de la ecuación 2.6 relacionamos todas las variables que toman parte en los resultados del análisis modal excepto K_θ .

El parámetro μ engloba todas las características geométricas de la sección y propiedades del material. Esto implica que para cada pareja de valores (A, I) habrá un único valor μ . Nos supone una comodidad añadida a la hora de analizar resultados.

Los valores dado a K_θ van desde 10 Nm/rad hasta 10^{50} Nm/rad . Con un mismo valor de μ tenemos 50 resultados diferentes, correspondientes a los 50 valores que hemos dado a K_θ (en cada iteración $K_\theta = 10^{i+1}$).

A continuación se exponen los resultados más cercanos al objetivo:

$K_\theta \text{ [Nm/rad]}$	$A \text{ [m}^2\text{]}$	$I \text{ [m}^4\text{]}$	$\mu \text{ [m}^4\text{/s}^2\text{]}$	$f_1 \text{ [Hz]}$	K_{21}	K_{31}
10^{21}	2.85	0.021375	$6.54 \cdot 10^6$	3.5	2.1	4.6
10^{21}	1	0.020833	$6.38 \cdot 10^6$	3.5	2.1	4.6
10^{21}	1.6	0.021333	$6.53 \cdot 10^6$	3.5	2.1	4.6
M.V. ¹	1.5 - 2.25	0.045 - 0.049	$(1.38 - 1.43) \cdot 10^7$	3.5	3.2	6.8

Tabla 2.1: Resultados cercanos al objetivo para el Modelo de Sección Única

En la tabla 2.1 observamos:

- Lo primero que salta a la vista es que satisfacer el valor de las tres frecuencias propias es imposible, al menos con este modelo. El valor límite que alcanzamos para $f_1 = 3,5 \text{ Hz}$ corresponde a $f_2 = 3,5 \cdot 2,1 = 7,4 \text{ Hz}$, lo cual es correcto, pero $f_3 = 3,5 \cdot 4,6 = 16,1 \text{ Hz}$. Esta terna de resultados es la que más se ajusta a nuestro objetivo, que recordamos es:

$$f_1 = 3,5 \text{ Hz} \quad f_2 = 7,4 \text{ Hz} \quad f_3 = 9,4 \text{ Hz}$$

Y por lo tanto:

$$K_{21} = 2,1 \quad K_{31} = 2,7$$

- Aunque el valor de μ es similar en los tres casos, los resultados suponen una singularidad en el valor de $K_\theta = 10^{21} \text{ Nm/rad}$. No se obtienen resultados similares ni cercanos para cualquier otro valor de K_θ , sea cual sea el valor de μ . No solo eso, si no que si analizamos el resultado para los valores adyacentes de K_θ , supone una discontinuidad en la tendencia de los resultados.
- Sin embargo, a parte de estos tres valores, surgen una gran cantidad de valores que aproximan de forma muy exacta la primera frecuencia. No así las otras dos, que se alejan bastante. Sin embargo es reseñable que para ese determinado rango de valores en μ , los valores de K_{ij} se estabilizan independientemente del valor que tome K_θ .

Interpretación Gráfica

A la vista de los resultados obtenidos consideramos interesante estudiar y representar gráficamente la dependencia de f_i y K_{ij} en función de K_θ para un valor constante de μ . También la dependencia de f_i y K_{ij} en función de μ para un valor constante de K_θ .

¹Múltiples Valores

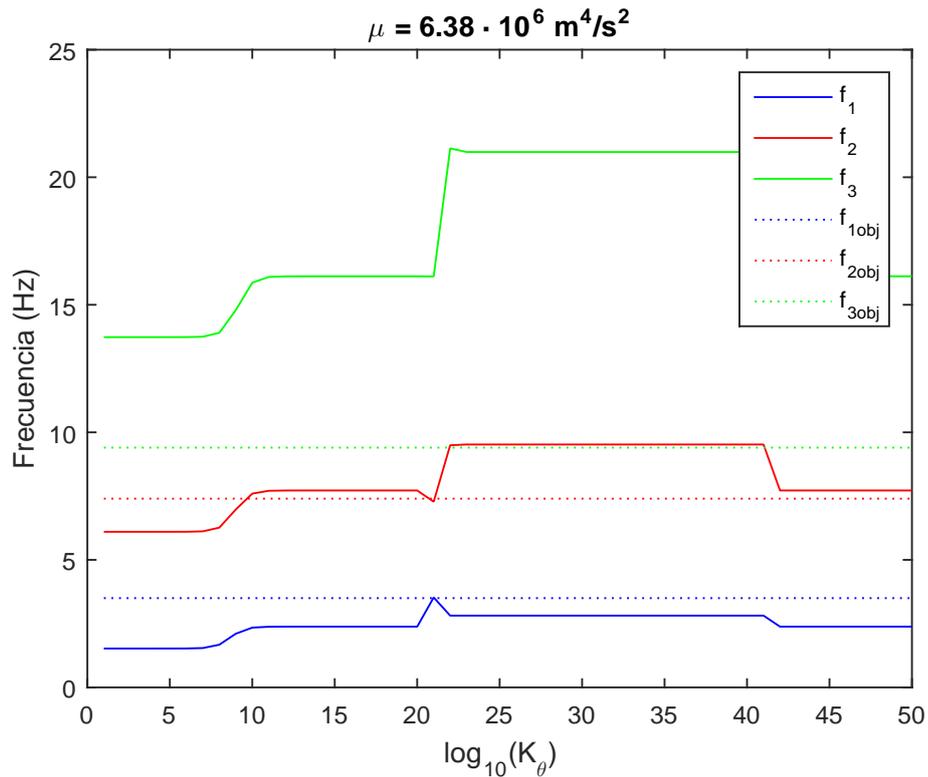


Figura 2.5: Variación de $f_i = f[\log_{10}K_\theta]$ para $\mu = cte = 6,38 \cdot 10^6 m^4/s^2$

Vemos en la Figura 2.5 que la evolución de las frecuencias propias con el aumento de K_θ no corresponde a ninguna función conocida. No se aprecia evolución lineal ni comportamiento uniforme en ningún momento. Además podemos adelantar, y lo veremos más adelante, que estas curvas ni siquiera conservan el aspecto global para diferentes valores de μ .

Observamos, como hemos comentado antes, que la solución recogida en la Tabla 2.1 es efectivamente una singularidad en la representación. Cuando $K_\theta = 10^{21} Nm/rad$, f_1 crece repentinamente y simultáneamente f_2 desciende, ambas hacia los valores deseados, sin embargo, f_3 se dispara y queda bastante lejos del objetivo ($f_{i,obj}$ representan los valores 'objetivo').

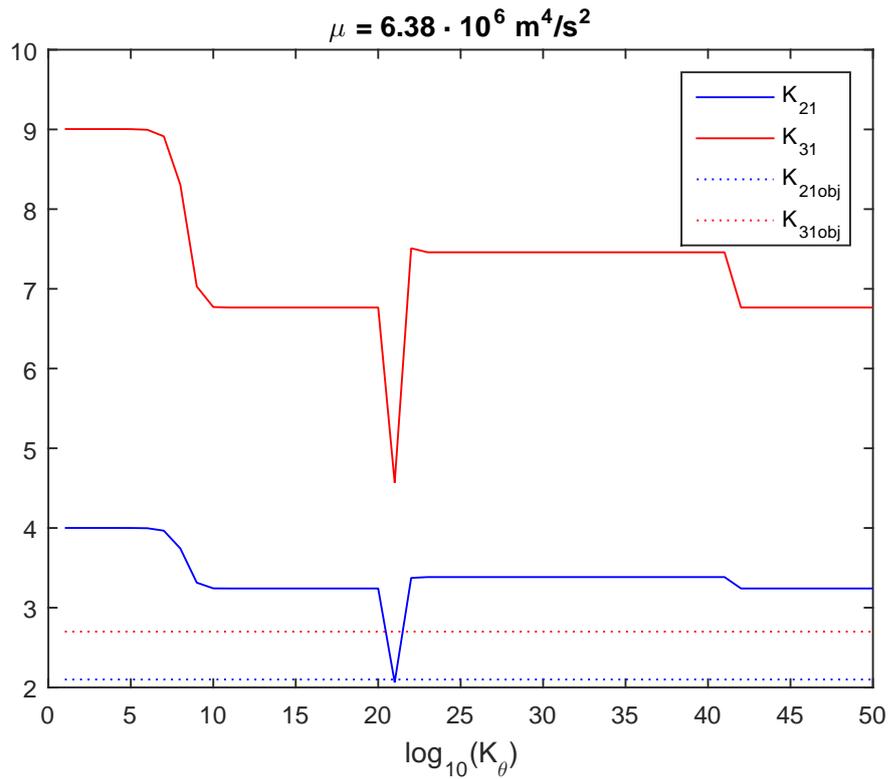


Figura 2.6: Variación de $K_{ij} = f[\log_{10}K_\theta]$ para $\mu = cte = 6,38 \cdot 10^6 \text{ m}^4/\text{s}^2$

En la Figura 2.6 mostramos la evolución de K_{21} y K_{31} , con el interés de descubrir un comportamiento más familiar. Queda presente que esto no es así y volvemos a observar la singularidad para $K_\theta = 10^{21} \text{ Nm/rad}$.

Veamos ahora qué es lo que sucede en el otro conjunto de resultados presentado en la Tabla 2.1. Recordamos que cuando $\mu \in (1,38 - 1,43) \cdot 10^7 \text{ m}^4/\text{s}^2$, f_1 se estabiliza y permanece invariable para un amplio conjunto de valores de K_θ .

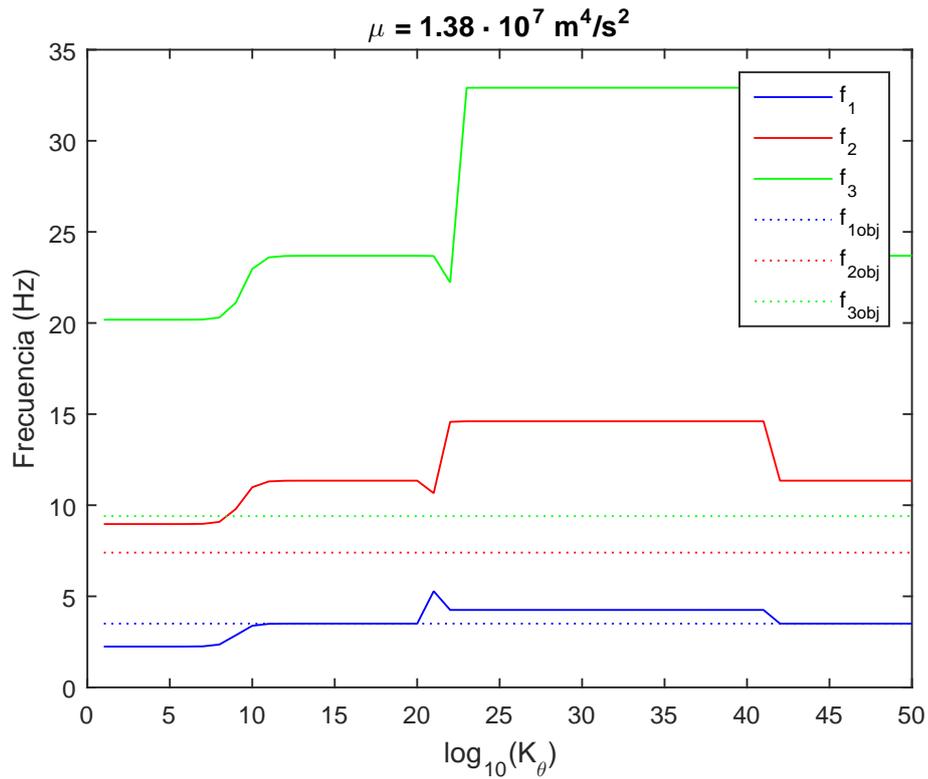


Figura 2.7: Variación de $f_i = f[\log_{10}K_\theta]$ para $\mu = \text{cte} = 1,38 \cdot 10^7 \text{ m}^4/\text{s}^2$

Vemos que la apariencia general entre las figuras 2.5 y 2.7 es similar. Con el aumento del valor de μ , el valor de las frecuencias propias aumenta. Volvemos a observar una singularidad en los resultados cuando $K_\theta = 10^{21} \text{ Nm/rad}$, sin embargo esta vez nuestro objetivo queda recogido en una zona uniforme entre $K_\theta = 10^{10} - 10^{20} \text{ Nm/rad}$ y $10^{42} - 10^{50} \text{ Nm/rad}$. Comprobamos aquí que aunque los valores de f_2 y f_3 quedan muy alejados del objetivo, f_1 toma un valor más fiable al situarse próxima al objetivo para un mayor conjunto de valores de K_θ .

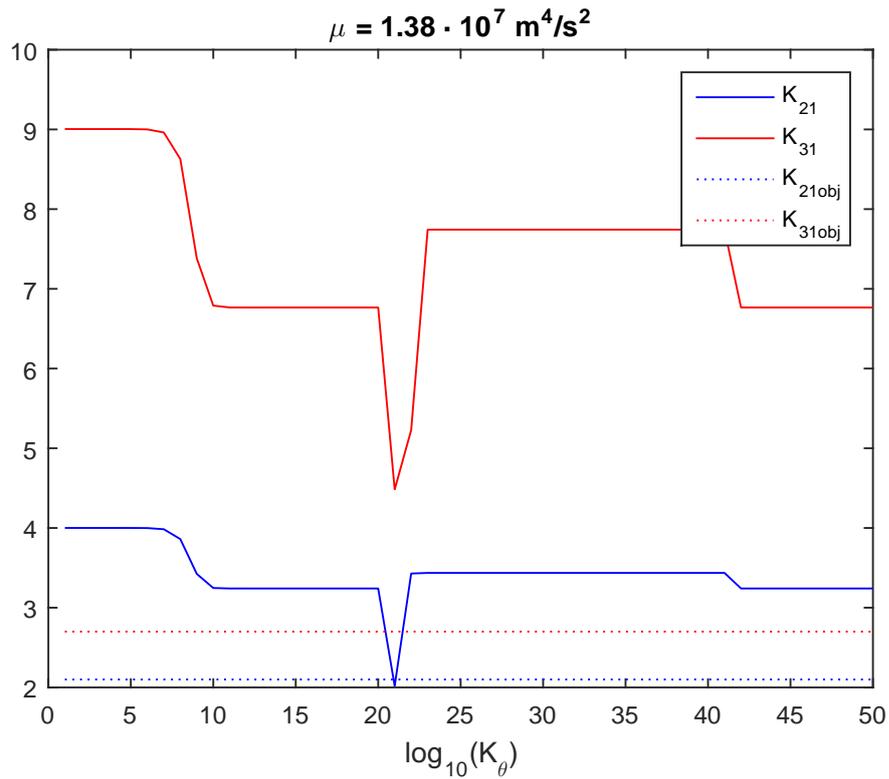


Figura 2.8: Variación de $K_{ij} = f[\log_{10}K_\theta]$ para $\mu = cte = 1,38 \cdot 10^7 \text{ m}^4/\text{s}^2$

Vemos que la apariencia general entre las figuras 2.6 y 2.8 es similar. Volvemos a obtener la relación K_{21} deseada con $K_\theta = 10^{21} \text{ Nm/rad}$ pero como ya hemos visto, para este valor y en este caso, no conseguimos alcanzar f_1 .

Habiendo observado cómo se comporta f_3 en función de los diferentes parámetros, vamos a asumir que mediante este modelo de sección única **no** alcanzaremos de ninguna manera el valor objetivo. Nos centraremos en f_1 y K_{21} . Surge ahora la duda de cómo se comportan estos dos parámetros para distintos valores de μ .

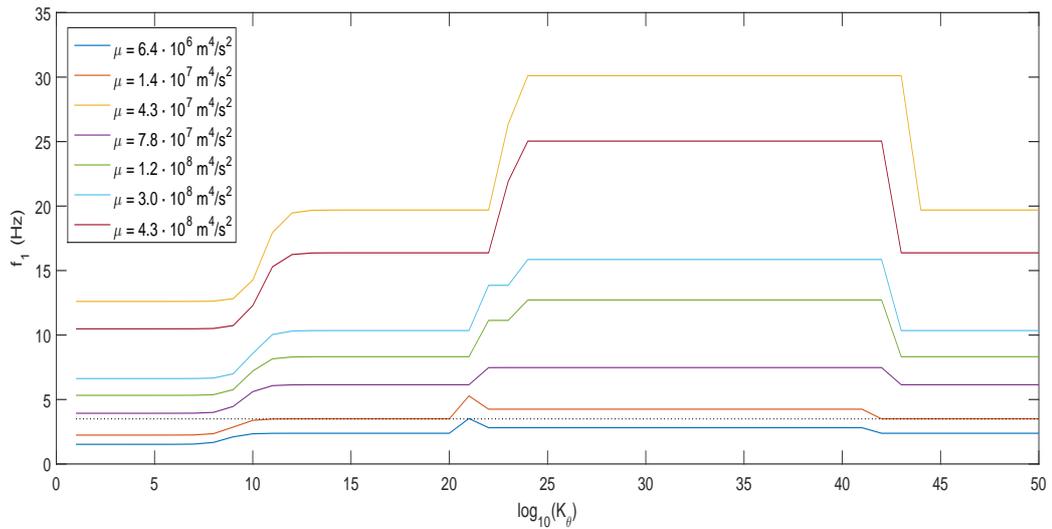


Figura 2.9: Variación de $f_1 = f[\log_{10}K_\theta]$ para varios valores de μ

Vemos en la Figura 2.9 la evolución de f_1 para varios valores de μ , incluidos los dos valores analizados antes. La forma general de las curvas se conserva, pero a medida que aumenta el valor de μ los diferentes tramos de cada curva se distancian más entre sí.

Consideramos importante señalar que la singularidad para $K_\theta = 10^{21} \text{ Nm/rad}$ se pierde a medida que crece μ . Esto nos va a condicionar a la hora de qué resultado escoger entre los posibles reflejados en la Tabla 2.1.

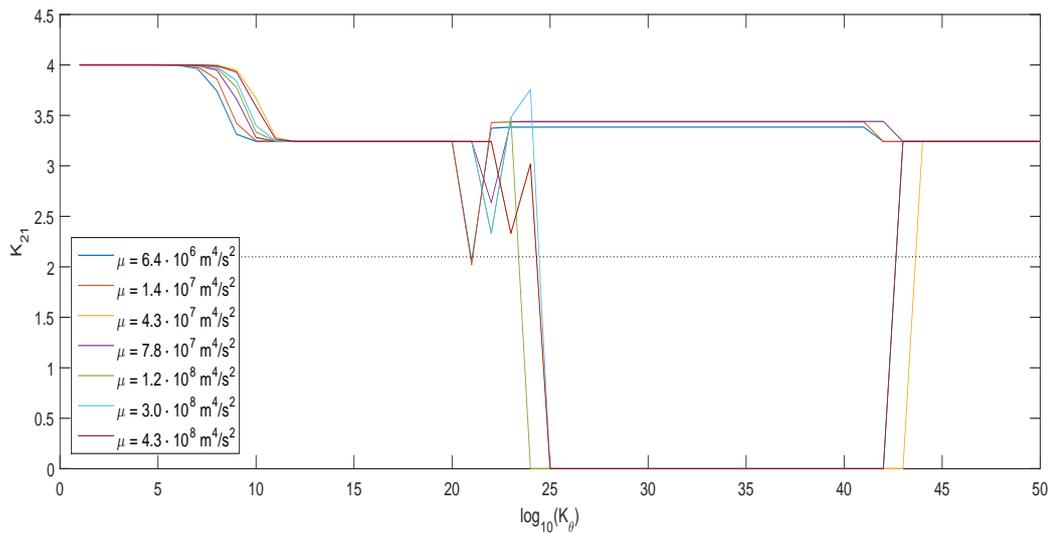


Figura 2.10: Variación de $K_{21} = f[\log_{10}K_\theta]$ para varios valores de μ

En la Figura 2.10 vemos el comportamiento de K_{21} , e indirectamente de f_2 . Observamos irregularidades en el comportamiento de K_θ cuando oscila

entre 10^{24} y 10^{43} Nm/rad . Esto también nos condicionará a la hora de escoger el resultado definitivo que emplearemos en el Análisis Dinámico del siguiente capítulo (siempre y cuando escojamos el Modelo de Sección Única como el más apropiado para el estudio).

Vamos a considerar el comportamiento en el rango mencionado [$K_\theta \in (10^{24}, 10^{43}) \text{ Nm/rad}$] como una irregularidad porque gracias al software podemos demostrar que para valores de K_θ a partir de $\sim 10^{12} \text{ Nm/rad}$, el nodo 2 se comporta como un empotramiento. Además, los resultados nos respaldan y vemos que si omitimos estas irregularidades de las que estamos hablando, el valor de f_1 y K_{21} respectivamente es prácticamente el mismo cuando $K_\theta \in (10^{12}, 10^{20}) \text{ Nm/rad}$ y $K_\theta \geq 10^{42} \text{ Nm/rad}$.

No tiene sentido, que siendo K_θ el único valor variable, el valor de K_{21} sufra este cambio repentino para el rango mencionado. No se tendrá en cuenta.

Nótese que los resultados mostrados son los obtenidos con el software empleado y, aunque no se ha estudiado en detalle, no se descarta que estén apareciendo singularidades o errores computacionales debidos a problemas numéricos como podría ser el mal condicionamiento del sistema de ecuaciones que se resuelve.

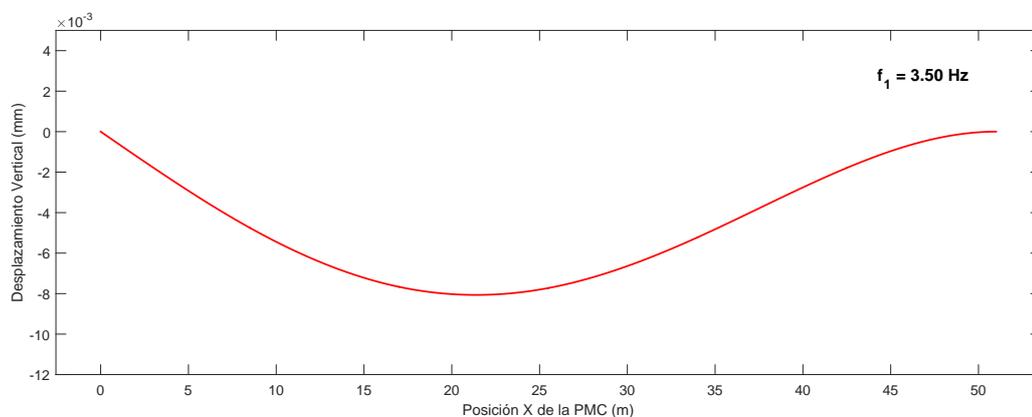


Figura 2.11: Representación del 1^{er} Modo Propio de Vibración de la PMC [Simulación]

En la Figura 2.11 vemos la representación del Primer Modo de la PMC. La figura permanece invariable a partir de $K_\theta = 10^{12} \text{ Nm/rad}$. Se observa el giro nulo en el nodo 2, es decir, extremo empotrado.

Queda por analizar el caso complementario. ¿Qué ocurre cuando mantenemos invariable el valor de K_θ y representamos f_1 y K_{21} en función de μ ?

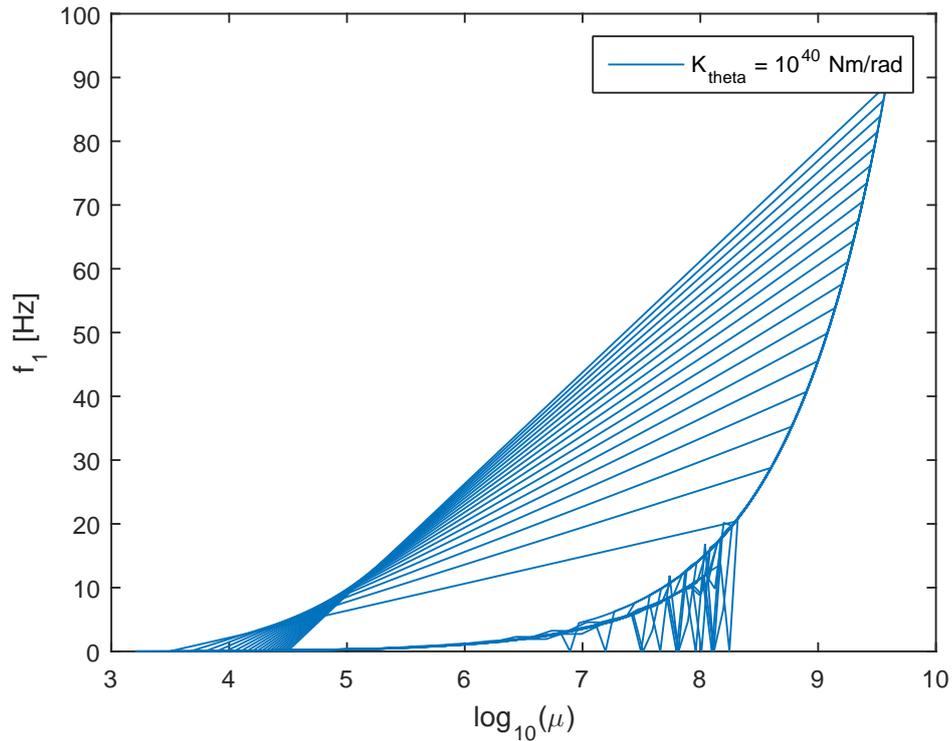


Figura 2.12: Variación de $f_1 = f[\log_{10}\mu]$ para $K_\theta = 10^{40} \text{ Nm/rad}$

En la Figura 2.12 vemos que la representación en función de K_θ tiene un aspecto más complicado. En esta curva estamos asumiendo el nodo 2 como empotramiento ($K_\theta = 10^{40} \text{ Nm/rad}$). Como no es de expresa relevancia, comentaremos a grandes rasgos que al aumentar μ de forma exponencial (atención, estamos representando en función de $\log_{10}(\mu)$), f_1 también lo hace. Se puede demostrar que a mayores valores de K_θ esta inclinación de la curva se hace más prominente, pero como hemos dicho, no viene al caso. No vamos a ahondar más en este asunto, consideramos que el estudio del comportamiento de K_{21} en estas condiciones es irrelevante.

Conclusiones del Modelo de Sección Única

El Modelo de Sección Única consigue aproximar f_1 y en algunos casos f_2 . Sin embargo, estos casos van a ser considerados como irregularidades por los motivos que hemos expuesto a lo largo de esta sección. Este modelo no es suficiente ni apropiado para aproximar o satisfacer el valor de f_3 de ninguna de las maneras.

En el caso de seleccionar este modelo como definitivo a la hora de desarrollar el Análisis Dinámico de la estructura escogeremos unos parámetros

que han demostrado ser estables y fiables. Queda claro que asumimos el nodo 2 como empotramiento. Seleccionamos:

A [m ²]	I [m ⁴]	μ [m ⁴ /s ²]	K_θ [Nm/rad]	f_1 [Hz]	f_2 [Hz]	f_3 [Hz]
1.5	0.045	$1.38 \cdot 10^7$	10^{45}	3.5	11.4	23.7

Tabla 2.2: Resultados escogidos en el Modelo de Sección Única

Ante la imposibilidad de ajustar de una manera más fiable la segunda y tercera frecuencia propia del sistema estructural, planteamos en la siguiente sección un modelo más complejo para intentar dar solución a este problema.

2.4.2. Modelo de Sección Variable

A lo largo de esta sección trataremos de describir un modelo simplificado de la PMC más complejo que el que acabamos de ver. Ante la limitación de no poder satisfacer los valores de f_2 y f_3 de ninguna manera pensamos lo siguiente: mediante el Modelo de Sección Única no hay ningún problema en alcanzar el valor $f_1 = 3,5$ Hz, de hecho hay múltiples casos que satisfacen este resultado; el problema es no poder acercarse más al valor de f_2 (sobre todo a f_2 porque, como veremos más adelante, f_3 es menos relevante para nuestro estudio). El punto central del vano 2 de la PMC ($X = L_T/2 \approx 25$ m) vibra según el Primer Modo Propio con desplazamiento vertical máximo; es el punto de máxima flecha (recordamos la Figura 2.11). En cambio, cuando vibra según el Segundo Modo este punto tiene desplazamiento vertical prácticamente nulo. Por otro lado, el comportamiento en los extremos del vano (zonas próximas a los apoyos) es similar independientemente del Modo de vibración que estemos hablando. Por estos motivos pensamos que un modelo de sección variable podría ser adecuado. Un modelo que nos permita subdividir el vano en varias barras y modificar la rigidez de cada de ellas al variar su masa, área e inercia.

Parámetros Influyentes

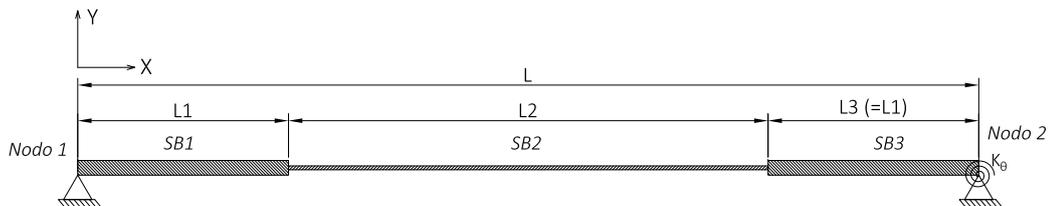


Figura 2.13: Esquema simplificado. Modelo de Sección Variable

Vamos a experimentar con este Modelo de Sección Variable que vemos en la Figura 2.13. Seguimos manteniendo la estructura general, con dos apoyos fijos y un resorte torsional en el nodo de la derecha (K_θ). Mantenemos la longitud y masa totales: $L_T = 51 \text{ m}$, $M_T = 35 \cdot 10^3 \text{ kg}$.

Decidimos dividir el vano en tres sub-barras (SB). SB1 y SB3 comparten las mismas propiedades. SB2 tiene propiedades diferentes. Pensamos que tres barras es un modelo apropiado porque es simétrico, porque nos debemos preocupar únicamente de dos tipos de sección y porque la complejidad del modelo **pensamos** que no supondrá un tiempo de cálculo mucho mayor al del Modelo de Sección Única ni una carga excesiva para el Software.

El método de trabajo a seguir durante esta sección va a ser el mismo que llevamos a cabo en el Modelo de Sección Única. Vamos a emplear el Software para plantear un bucle de grandes dimensiones que nos genere una extensa batería de datos que podamos emplear para su estudio e interpretación. Al igual que antes, nos centraremos en analizar el comportamiento de f_i y K_{ij} .

Está claro que ahora, al haber más barras, habrá una mayor cantidad de parámetros a tener en cuenta y de los que dependerán los valores de f_i y K_{ij} . Vamos a intentar compactar lo máximo posible este conjunto de variables intentando relacionarlas entre sí. Cuantos menos parámetros independientes haya que incluir en el código del bucle, menos tiempo de cálculo, menos carga para el procesador y menos tiempo de espera para obtener resultados.

De esta manera hablaremos de A_1, I_1 y L_1 para SB1 y SB3 y A_2, I_2 y L_2 para SB2. Está claro que $2L_1 + L_2 = L_T$, de forma que nosotros sólo actuamos variando el valor de L_2 .

Surge una cuestión añadida, ahora tendremos dos valores diferentes μ_1 y μ_2 . Si recordamos la Ecuación 2.6, μ depende del área de la sección pero también de la densidad del tramo. En el Modelo de Sección Única teníamos un único valor para la densidad; no era una variable sobre la que actuar ya que estaba determinado por otros factores. Sin embargo ahora supone una variable añadida, debemos darnos cuenta de que ahora:

$$\rho_{SB} = \frac{M_{SB}}{L_{SB} \cdot A_{SB}} \quad (2.7)$$

Está claro que $2M_1 + M_2 = M_T$, pero ¿cómo decidimos el valor de M_i ? Tenemos varias opciones:

1. Podemos asumir que ρ es un valor constante para todo el vano, es decir

$\rho_1 = \rho_2 = \rho_{material}$. Automáticamente M_{SB} quedaría definida a través de L_{SB} Y A_{SB} . El valor de $\rho_{material}$ será desconocido e iremos dando sucesivos valores.

2. Podemos ir dando valores a M_{SB2} quedando M_{SB1} definida a través de M_T , y por consiguiente también ρ_{SB1} y ρ_{SB2} .

Ambas opciones tienen sentido desde el punto de vista realista. La primera opción tiene sentido ya que el conjunto de elementos y materiales es el mismo a lo largo de todo el vano. La segunda opción también lo tiene porque es verdad que en los nodos del vano están los pilares, que aumenta la masa notablemente en estos puntos determinados. Lo que está claro es que en ambos casos tenemos un parámetro a mayores que incluir en el código del bucle y nosotros queremos evitar por todos los medios incrementar la complejidad del código porque aumentaría el tiempo de cálculo y de obtención de resultados.

Durante el desarrollo del trabajo se probaron todas las opciones expuestas. Hemos de tener en cuenta que de cara al programa ahora estamos simulando tres barras y no una y que el número de parámetros incluidos en el código del bucle ha aumentado. Esto se traduce en que mientras en el Modelo de Sección Única obteníamos la batería de resultados en 2 h, ahora el tiempo de respuesta alcanza las 30 h.

Necesitamos aligerar los cálculos y tras probar todas las opciones posibles decidimos implementar la siguiente simplificación:

$$M_1 = M_2 = M_T/3 = 11,7 \cdot 10^3 \text{ kg} \quad (2.8)$$

De esta forma tenemos la ventaja de no tener que preocuparnos por el valor de ρ_{SB} , que vendrá determinado por la Ecuación 2.7.

Resultados Obtenidos

Resulta difícil reflejar en este trabajo el esfuerzo que se llevó a cabo en esta etapa. La inmensa cantidad de datos generados y la cantidad de horas en generar el bucle y obtener los resultados hizo que esta tarea supusiera un obstáculo que no esperábamos encontrar.

No merece la pena realizar la interpretación gráfica de los parámetros influyentes como hicimos en el Modelo de Sección Única; esto es debido a la gran cantidad de variables intervinientes y a la carencia, en muchos casos, de significado físico. Obtuvimos varios resultados satisfactorios pero que correspondían a valores irreales de A , I o ρ .

La evolución de los valores de las frecuencias naturales en función de μ o K_θ han sido mucho más impredecibles y mucho más variables que en el Modelo de Sección Única, estos cambios en las curvas de las gráficas venían determinadas por el valor que tomara L_2 . Aún así podemos destacar una serie de puntos:

- Los resultados se acercan a la solución cuando $K_\theta \rightarrow 10^{50} \text{ Nm/rad}$, es decir, cuando el nodo 2 funciona como un empotramiento. Cosa en común con el Modelo de Sección Única y que nos hace reafirmarnos en esta suposición.
- Los resultados se aproximan a la solución cuando L_2 se encuentra cerca de los extremos del rango de opciones posibles, es decir, cuando $L_2 \rightarrow 1 \text{ m}$ o cuando $L_2 \rightarrow L_T$.
 - Encontramos resultados satisfactorios cuando L_2 toma valores entre 2 y 4 m (frente a $L_T = 51 \text{ m}$), pero hay una gran diferencia entre μu_1 y μu_2 a favor de μu_1 . Del orden de $\rho_2 = 100 \cdot \rho_1$. Esto supone que SB2 se comporta como una especie de carga puntual dentro del vano y no tiene mucho sentido si observamos la PMC en la realidad.
 - Encontramos resultados satisfactorios en el otro extremo: cuando L_2 toma valores en torno a los 41 m. En estos casos $\rho_2 \approx 100 \cdot \rho_1$, pero $A_2 = A_1/1000$, lo que supone que SB2 es una chapa fina pero con una masa muy elevada, lo que desde el punto de vista realista tampoco tiene demasiado sentido. Además, esto implica que $\mu_2 = 10^5 \cdot \mu_1$, un resultado que aunque ajuste los valores-objetivo en la simulación, no debería ser tomado en cuenta en la realidad.

Exponemos a continuación el dato más cercano al objetivo:

K_θ [Nm/rad]	L_1 [m]	A_1 [m ²]	I_1 [m ⁴]	μ_1 [m ⁴ /s ²]	L_2 [m]	A_2 [m ²]	I_2 [m ⁴]	μ_2 [m ⁴ /s ²]
10^{50}	5	1	0.00110	$2,0 \cdot 10^4$	41	0.001	0.1	$2,3 \cdot 10^9$

f_1 [Hz]	f_2 [Hz]	f_3 [Hz]
3.5	7.4	9.4

Tabla 2.3: Resultados escogidos en el Modelo de Sección Variable

Vemos en la Tabla 2.3 los resultados más cercanos al objetivo. Se da solución de forma completa, se alcanzan los tres valores de los modos propios del sistema. Sin embargo, un cambio del valor de μ tan grande de una Sub-barra a otra no da confianza y nos hace dudar de la fiabilidad de estos datos.

Conclusiones del Modelo de Sección Variable

¿Da este modelo solución al problema? Sí, pero, ¿con valores viables? No demasiado. Aún así, durante la etapa de desarrollo del presente trabajo empleamos estos resultados para el Análisis Dinámico. Los resultados que obtuvimos al emplear este Modelo en la respuesta dinámica del sistema fueron correctos y muy cercanos a los datos reales.

Debemos comentar que este punto de estudio fue un obstáculo inesperado que paralizó bastante el avance del trabajo. Aún así hemos llegado a la solución deseada y queda demostrado que estábamos en lo cierto al pensar que un Modelo de Sección Variable daría respuesta al problema mientras que el Modelo de Sección Única se veía limitado en ese aspecto. Podríamos decir que si queremos simplificar la PMC mediante un modelo de viga biapoyada, debemos emplear un Modelo de Sección Variable para alcanzar una mayor precisión. La intuición nos dice que cuantas más sub-barras conformen la totalidad del *vano 2*, mayor será la precisión y probablemente alcanzáramos soluciones más precisas y más realistas.

A pesar de todo, es evidente que en este caso no hemos llegado a una solución óptima. Sí que lo es desde el punto de vista matemático pero no de cara al mundo real, desde el punto de vista morfológico y constructivo. Al fin y al cabo estamos tratando de simular una pasarela real y de características conocidas como es la PMC y no podemos alejarnos tanto de estos principios.

También es interesante remarcar que a partir de este punto comenzamos a ser conscientes de que el Software empleado es una gran herramienta pero tiene serias limitaciones para determinados usos; nos estamos refiriendo al tiempo de trabajo y la carga de cálculo que supone para el procesador.

2.4.3. Elección Final

En primera instancia seleccionamos el Modelo de Sección Variable como modelo simplificado correcto y a emplear en el Análisis Dinámico por la fidelidad de sus resultados a la realidad. Como ya hemos comentado, estos resultados partían de unos valores de ρ_{SB} , A_{SB} , I_{SB} , etc bastante irreales, pero decidimos proceder a experimentar con el Análisis Dinámico.

Aunque lo comentaremos más adelante en el siguiente Capítulo, la manera de decidir si el Modelo de Sección Variable era apropiado o no ha sido comparar datos recogidos en casos reales experimentados por CARTIF (Centro

Tecnológico de Ingeniería localizado en Valladolid) con los datos obtenidos mediante simulación de dichas situaciones. Los resultados fueron, a pesar de los valores irreales que tomaban las diferentes variables, bastante buenos. Con esto podemos confirmar la importancia del Análisis Modal previo al Análisis Dinámico de una estructura.

Sin embargo, el Software volvió a ser un limitante a la hora de trabajar. Al trabajar con un modelo multisección el Software entiende cada Sub-barra como un elemento independiente con sus respectivas condiciones de contorno y sus cargas dinámicas. Es como si trabajáramos con una estructura multibarra en el que cada elemento se discretiza con un mallado determinado.

En el caso de estudiar el tránsito de un peatón por el *vano 2* de la PMC el Software no entiende el problema como una viga biapoyada sometida a una fuerza dinámica, sino como tres barras independientes sometidas cada una de ellas a una fuerza dinámica. En realidad no deja de ser el mismo peatón, pero para ser caracterizado dentro del programa debe ser incluido como una fuerza que actúa sobre la Sub-barra determinada el tiempo que transcurre en recorrer L_{SB} . Transcurrido ese tiempo, esa carga dinámica deja de actuar sobre, por ejemplo, SB_1 y debemos anular esa e incluir una nueva que se active cuando el peatón entra en SB_2 . Lo mismo sucede con SB_3 .

Por supuesto que eso hace más complejo el código del Software, pero lo más importante es que la carga de cálculo y el tiempo de respuesta aumenta de forma exponencial con respecto al Modelo de Sección Única. Esto hace que tardáramos 5 h en obtener los resultados de cada simulación y que este modelo no fuera práctico para trabajar.

Justificación del empleo del Modelo de Sección Única

El *vano 2* de la PMC es un tramo conflictivo. Los peatones vallisoletanos que la transitan a menudo comentan su incomodidad de su uso. Incomodidad ocasionada por la percepción de las vibraciones del tramo. Esto sucede porque $f_1 = 3,5 \text{ Hz}$, frecuencia fácilmente excitable por el paso de un peatón corriendo. También es fácil excitar $f_1/2 = 1,75 \text{ Hz}$ con un peatón caminando. Es este primer modo propio el conflictivo y el origen de la pérdida de confort del tramo con respecto a los otros vanos de la PMC.

Por supuesto que nos interesaría que toda la respuesta modal simulada fuera exacta a la situación real y alcanzar todos los valores objetivo para las frecuencias propias, sin embargo escogemos el Modelo de Sección Única

porque:

- Alcanza el valor de f_1 que es el problemático. Ocasionar una excitación hasta cotas de $7,5 \text{ Hz}$ y $9,4 \text{ Hz}$ (segunda y tercera frecuencias propias del sistema) resulta imposible mediante una persona corriendo o caminando. Esto se verá justificado en la Sección siguiente: 'Caracterización de Peatón'.
- El tiempo de cálculo se aligera brutalmente. Trabajar con el Modelo de Sección Variable no es factible. Aunque conseguimos simular diferentes casos reales, no era práctico trabajar así, al menos con un ordenador de uso doméstico.
- Por último queremos recordar que una de las motivaciones de este trabajo es continuar la labor de un compañero y emplear el Software para aplicaciones prácticas como ésta. Es evidente que con otro Software de uso comercial no tendríamos problemas de este tipo e incluso nos hubiera facilitado las cosas, pero conseguir realizar este estudio empleando esta herramienta es uno de nuestros objetivos principales.

Por lo tanto cerramos esta sección seleccionando el Modelo de Sección Única como modelo simplificado a emplear durante el resto del trabajo. Volvemos a incluir los datos a utilizar, vistos en la Tabla 2.2.

$A [m^2]$	$I [m^4]$	$\mu [m^4/s^2]$	$K_\theta [Nm/rad]$	$f_1 [Hz]$	$f_2 [Hz]$	$f_3 [Hz]$
1.5	0.045	$1.38 \cdot 10^7$	10^{45}	3.5	11.4	23.7

2.5. Caracterización del Peatón

2.5.1. Estudio Antropométrico

El cuerpo humano guarda una serie de relaciones dimensionales entre las diferentes partes del cuerpo. Por supuesto estos valores son estadísticos y suponen una generalización que no tiene por qué cumplirse siempre.

Los experimentos desarrollados por CARTIF durante el estudio de la PMC quedaron registrados en vídeo. Hemos podido acceder a estos documentos y a partir de ellos hemos realizado nuestro estudio antropométrico particular. En estos vídeos se ve al sujeto caminar a lo largo del *vano 2* de la PMC a diferentes frecuencias de paso. Nos hemos centrado en los vídeos en los que el individuo está caminando, ya que en otros se les ve corriendo o saltando.

Escogimos como referencia para el estudio a una mujer y un hombre que aparecen en los vídeos y llevan a cabo las pruebas: Stana y Carlos. Queremos estudiar estos dos sujetos con la intención de extrapolar los resultados a un peatón aleatorio.

Procedimiento de Trabajo

Nuestro objetivo es encontrar una relación entre la altura de una persona (H [m]) y la longitud de la zancada (L_{zan} [m]). Con esto podríamos llegar a delimitar un rango de velocidades de paso razonables para una frecuencia de paso determinada. Podemos relacionar la velocidad de paso (v [m/s]) con la frecuencia de paso (f [Hz]). Finalmente podremos acotar un rango de valores de frecuencias de paso fácilmente alcanzables por un peatón caminando y relacionarlas con las frecuencias propias de la estructura.

1. Medimos el tiempo que tardaba el sujeto en recorrer la totalidad del vano y calculamos el tiempo promedio para cada frecuencia de paso t_{med} [s].
2. Calculamos la velocidad media para cada frecuencia de paso como:

$$v_{med} = L_T/t_{med} \quad (2.9)$$

3. Calculamos la longitud de zancada promedio L_{zan} . La frecuencia de paso f es un dato del que disponemos a priori.

$$L_{zan} = f/v_{med} \quad (2.10)$$

4. Según [3] la apertura media de las personas al caminar es de 35° . A este ángulo lo llamaremos α_{zan} . A través de estos valores podremos calcular la longitud de pierna promedio L_{pierna} .

$$L_{pierna} = \frac{L_{zan}/2}{\tan \alpha_{zan}} \quad (2.11)$$

5. Obtenemos la r_p y r_{zan} como:

$$r_p = L_{pierna}/H \quad (2.12)$$

$$r_{zan} = L_{zan}/H \quad (2.13)$$

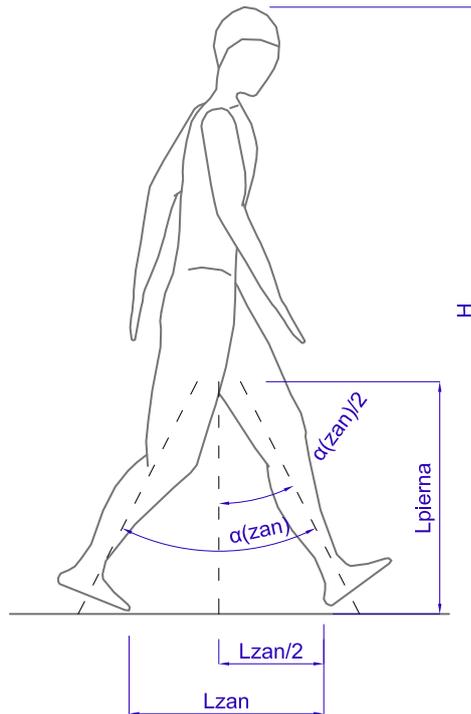


Figura 2.14: Parámetros estudiados en el Estudio Antropométrico

En la Figura 2.14 vemos los diferentes parámetros de los que hemos estado hablando.

Resultados Obtenidos

En total se estudiaron un total de 24 casos para Stana y 16 para Carlos. Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

Individuo	M [kg]	H [m]	r_p	r_{zan}
Stana	65	1.7	0.611	0.385
Carlos	92	1.9	0.608	0.383

Tabla 2.4: Resultados del Estudio Antropométrico

Vemos que tanto r_p como r_{zan} toman un valor constante independientemente de la altura y sexo del sujeto. A través de estos valores podemos establecer un rango de velocidades razonables que puede alcanzar una persona mientras camina.

Para una determinada frecuencia, la velocidad que alcanza el sujeto mientras camina viene determinada por la apertura de las piernas. En [3] se

delimita este valor, $\alpha_{zan} \in (30^\circ, 50^\circ)$, por consiguiente. Si quisiéramos asumir el valor promedio de $\alpha_{zan} = 35^\circ$:

$$v_{med} = f \cdot r_{zan} \cdot H \quad (2.14)$$

Donde $r_{zan} = 0,38$. Pero si queremos acotar el valor de v_{med} emplearíamos:

$$v_{med} = f \cdot 2 \cdot r_p \cdot H \cdot \tan(\alpha_{zan}/2) \quad (2.15)$$

Donde $r_p = 0,61$ y como ya hemos comentado, $\alpha_{zan} \in (30^\circ, 50^\circ)$. Finalmente:

$$\begin{aligned} v_{med,max} &= 0,569 \cdot H \cdot f \\ v_{med,min} &= 0,327 \cdot H \cdot f \end{aligned} \quad (2.16)$$

La Ecuación 2.16 será empleada más adelante para observar la influencia de la velocidad en la respuesta dinámica del sistema para un determinado individuo caminando a una frecuencia concreta.

2.5.2. El peatón como carga dinámica

La carga causada por el tránsito de un peatón al caminar ha sido estudiada en múltiples trabajos y guías de diseño. En [2] se hace una diferencia clara entre el efecto que ocasiona un peatón cuando camina y cuando corre.

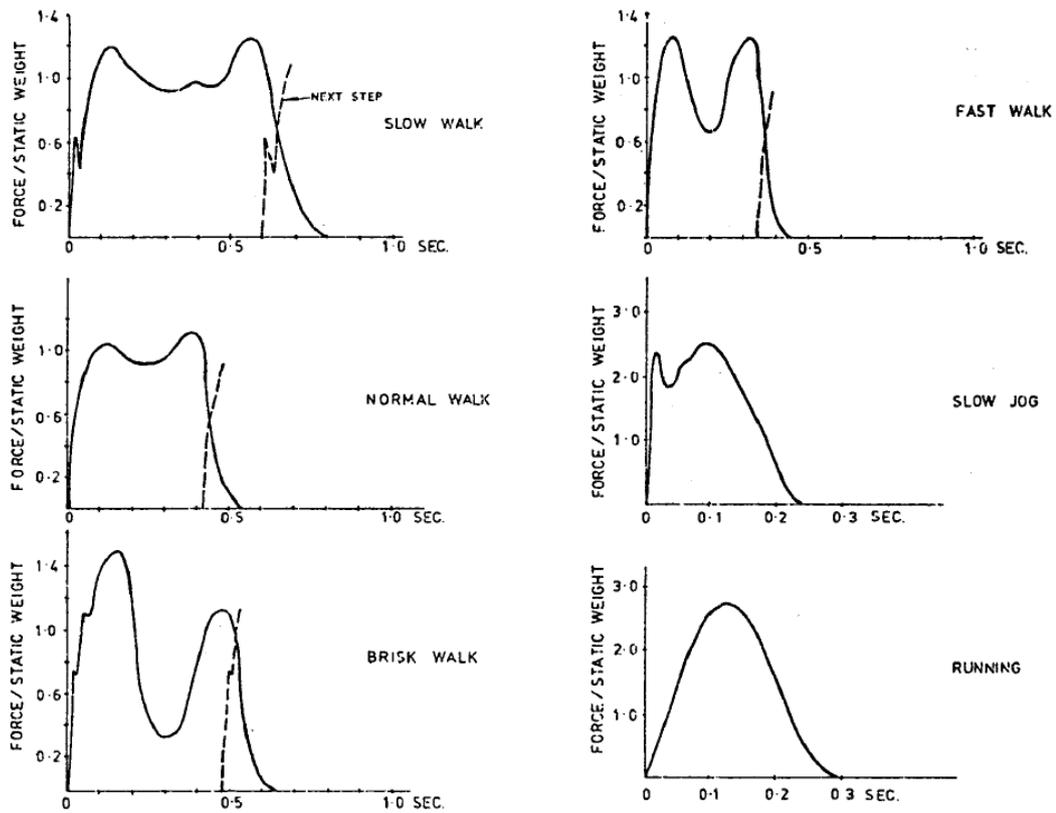


Figura 2.15: Evolución de la fuerza realizada por un peatón a lo largo del tiempo

En la Figura 2.15 se observa que hay una distinción evidente entre el efecto sobre el pavimento que causa un peatón cuando camina y cuando corre. Nosotros a lo largo de este TFG nos vamos a centrar en el efecto del peatón al caminar. En [2] se desarrolla un modelo matemático que aproxima la carga que supone un peatón al caminar.

Dicho efecto se puede aproximar a una fuerza puntual aplicada sobre el piso en función del tiempo y de la posición del peatón. Son muchos los parámetros que podrían afectar y modificar al valor de esta carga, como la forma de caminar, las características de la estructura o la fisonomía del peatón; sin embargo, diferentes estudios experimentales han determinado que esta carga se aproxima a una fuerza periódica caracterizada por un parámetro fundamental: la frecuencia de paso, entendida como

$$f = \frac{\text{numero de pasos}}{s} [Hz] \quad (2.17)$$

Cuando un peatón camina existe un contacto continuo con el suelo, sin embargo cuando corre, dicho contacto es discontinuo e interrumpido porque hay instantes en los que los dos pies están en el aire. Según [2]:

Descripción	Rango de Frecuencias [Hz]
Caminando	1.6 - 2.4
Corriendo	2 - 3.5

En la Tabla 2.5.2 se vuelve a demostrar que f_2 y f_3 son mucho menos influyentes que f_1 en la respuesta dinámica de la estructura, $f_1 = 3,5 \text{ Hz}$ es un valor fácilmente alcanzable al correr, y $f_1/2 = 1,75 \text{ Hz}$ una frecuencia de paso común al caminar.

Según [2], convencionalmente, la frecuencia de paso puede ser descrita mediante una distribución normal de media 2 Hz y en torno a $0,20 \text{ Hz}$ de desviación estándar. La función periódica que describe la carga ocasionada $F(t)$ puede ser resuelta mediante una Serie de Fourier en la que hay una parte constante incrementada por una suma de fuerzas armónicas.

$$F(t) = G_0 + G_1 \sin(2\pi f_m t) + \sum_{i=2}^n G_i \sin(2\pi f_m t - \varphi_i) \quad (2.18)$$

G_0	Fuerza estática. Componente vertical del peso del peatón
G_1	Amplitud del primer armónico. $G_1 = 0,4G_0$
G_i	Amplitud del armónico i-ésimo. $G_2 = G_3 \approx 0,1G_0$
f	Frecuencia de paso
φ_i	Fase del ángulo del armónico i-ésimo respecto al primero $\varphi_2 = \varphi_3 \approx \pi/2$
n	Número de armónicos tenidos en cuenta

Esta $F(t)$ es la que se va a emplear para caracterizar el efecto del paso de nuestro peatón. En [1] se explica de qué forma se incluye en el Software y la forma de actuar. Además, en el desarrollo de [1] se demuestra y queda comprobado que es una aproximación fiable. En el programa, $F(t)$ queda definido a través de f , v_m y la masa del peatón $M \text{ [kg]}$.

2.6. Corolario

El Modelo de Sección Única es un modelo matemático y simulado que aproxima el comportamiento del vano 2 de la PMC. La primera frecuencia propia del sistema es problemática porque, como se ha expuesto a lo largo de este Capítulo, es una frecuencia de paso habitual por un peatón al caminar. El hecho de que $f_{critica} = f_1/2 = 1,75 \text{ Hz}$ sea un valor fácil de alcanzar por un peatón andando provocará la aparición de un efecto de resonancia, lo que puede suponer un inconveniente en desde el punto de vista del confort del usuario al transitar el tramo.

Capítulo 3

Experimentación

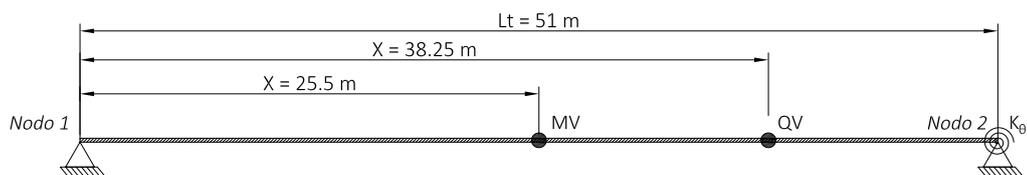
Una vez realizada la caracterización de la estructura, la manera que tiene de caminar un peatón estándar y la acción que provoca sobre el sistema estructural pasamos a analizar la respuesta que tiene la estructura bajo la carga de un sólo peatón caminando.

3.1. Validez del Modelo de Sección Única

CARTIF realizó experimentos sobre el *vano 2* de la PMC. Los datos se registraron mediante diferentes modelos de acelerómetros distribuidos a lo largo del vano. Además, los experimentos quedaron registrados en vídeo; estos vídeos han sido clave para nuestro Estudio Antropométrico (Sección 2.5.1).

Para este Capítulo empleamos los datos registrados en 9 experimentos diferentes, 5 realizados por Stana y 4 por Carlos. En ellos el individuo recorre el *vano 2* hasta el final y vuelve; lo hace una, dos y hasta tres veces dependiendo del test que estemos manejando.

Los datos registrados son aceleraciones verticales [m/s^2] en dos puntos diferentes: la mitad del vano, $X = L_T/2 = 25,5 m$ (a partir de ahora MV) y en $X = 0,75L_T = 38,25 m$ (a partir de ahora QV). A través de los vídeos y los datos recogidos hemos podido obtener el valor de la velocidad de tránsito y de la frecuencia de paso en cada test.



Para analizar la validez de nuestro modelo hemos introducido los datos de cada test en el Software y después hemos comparado los datos con la respuesta real. Como parámetro de comparación hemos empleado el RMS de cada serie de datos, la experimental (obtenida por CARTIF) y la simulada (obtenida por nosotros en MATLAB).

El Valor Cuadrático Medio o RMS (Root Mean Square) es una medida estadística que puede calcularse para una serie de valores discretos.

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2} \quad (3.1)$$

Influencia del Amortiguamiento Como ya adelantamos en el Capítulo anterior, el amortiguamiento (c) de la estructura no influye significativamente en la respuesta modal del sistema sin embargo sí lo hace en la respuesta dinámica. Aunque $c = 0,5\%$ es un valor bastante usual, hemos ido probando y ajustando el valor para que la respuesta simulada se asemeje lo máximo posible a la real. Tras varias comprobaciones, determinamos $c = 1,85\%$.

Una vez hechas estas aclaraciones previas veamos el aspecto que tienen los datos generados en los ensayos de CARTIF. Tomamos como ejemplo el *test 076*, en el que Stana camina a una velocidad de $1,17 \text{ m/s}$ y $f = 1,75 \text{ Hz}$.



Figura 3.1: Stana caminando por el vano 2 durante el test 076

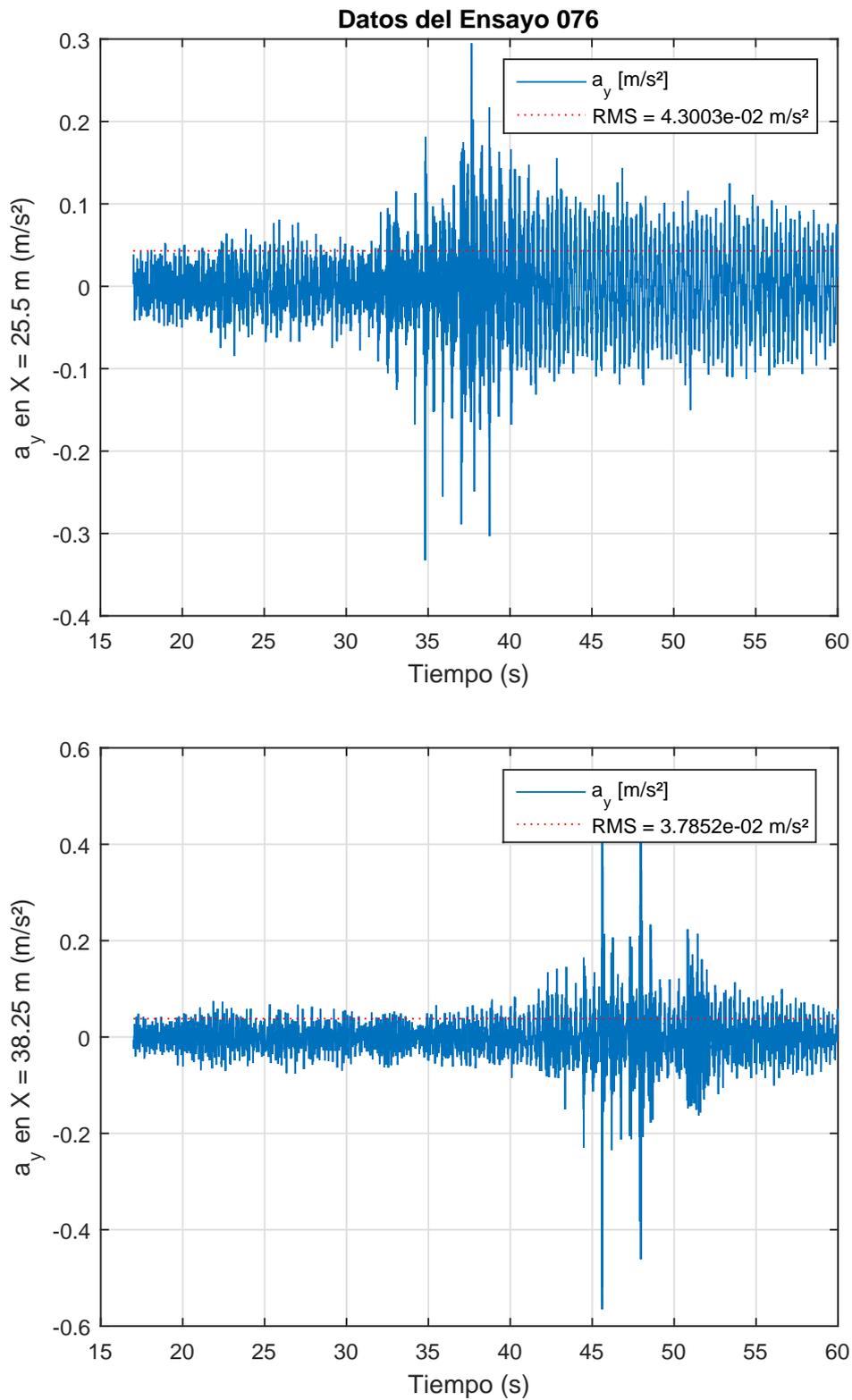


Figura 3.2: Test 76 - Aceleración en función del tiempo en MV y en QV

En la Figura 3.2 el eje temporal se sitúa entre $t = (17, 60)$ s porque son los instantes de salida y llegada del primer viaje realizado en el *test 76*. Durante

este test se realizaron dos viajes de ida y vuelta por lo que disponemos de cuatro conjuntos de datos diferentes. En la Figura 3.2 se muestra el primero de ellos.

Observamos que la "percepción" que tiene MV del tránsito de Stana inicialmente es muy pequeño pero conforme va acercándose a al punto de control la respuesta aumenta exponencialmente hasta aceleraciones máximas (a_{max}) de $0,3 \text{ m/s}^2$. Superado este punto, la respuesta es mayor con respecto a los instantes de tiempo precedentes a alcanzar MV.

En el caso de QV, la respuesta antes de alcanzar el punto de control es menor, de hecho podemos decir que es prácticamente nula y que el registro es ruido ocasionado por las condiciones ambientales. Una vez alcanzado el punto de control, a_{max} alcanza valores superiores a los $0,4 \text{ m/s}^2$ y por tanto superiores a los observados en MV.

Una vez Stana termina su marcha el tramo sigue vibrando y tardará un tiempo en alcanzar el reposo, lo que implica que un peatón que transite la PMC simultáneamente o justo después de ella "sufrirá" las perturbaciones ocasionadas por Stana. Si la respuesta alcanza unas cotas demasiado altas esto puede dar lugar a una situación de incomodidad o inseguridad.

Debido a este comportamiento, el valor RMS en la situación MV es mayor que en QV, esto es debido a que tardamos más en alcanzar QV que MV desde el punto de origen y el sistema se encuentra durante más tiempo en una situación más cercana al reposo.

Cabe destacar que durante este *test 76*, Stana está caminando con una frecuencia de paso $f = f_{critica} = f_1/2 = 1,75 \text{ Hz}$ lo que sugiere que estamos ante una situación bastante desfavorable al estar excitando la primera frecuencia propia del sistema que, como ya habíamos dicho anteriormente, es la más problemática.

Por último, añadir que en situaciones reales la pasarela nunca alcanzará el reposo absoluto. Siempre existirá alguna excitación de otra naturaleza (como la carga del viento). Además, los acelerómetros siempre registran ruido (vibración en ausencia de carga de amplitudes muy pequeñas), que nosotros debemos considerar insignificante y próximo al estado de reposo.

Veamos ahora lo que sucede al comparar la respuesta real con el mismo *test 76*, pero simulado través del Software.

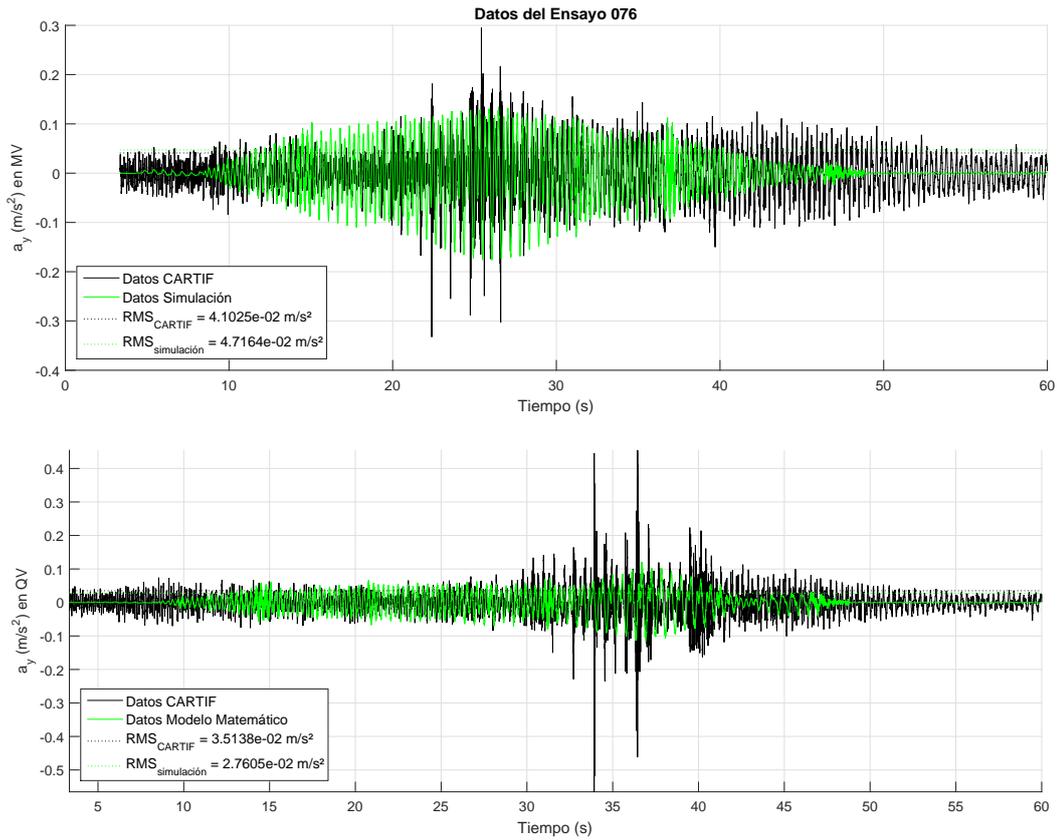


Figura 3.3: Test 76 - Comparación Respuesta Real - Respuesta Simulada

A pesar de que el pico de a_{max} están ligeramente desfasados, los valores de RMS nos dan una idea de cómo de exactos somos al aproximar la situación real mediante el modelo simulado. Para valorar el error empleamos:

$$error [\%] = \frac{|RMS_{CARTIF} - RMS_{Simulacion}|}{RMS_{CARTIF}} \cdot 100 \quad (3.2)$$

Obtenemos $error_{MV} = 1,52\%$ y $error_{QV} = 28\%$, lo que supone ser una buena aproximación, especialmente para MV. Queremos destacar que cuando aumentábamos el valor de c disminuíamos el $error_{MV}$ pero aumentaba el $error_{QV}$ por lo que hemos tenido que ir jugando con este parámetro para poder aproximar lo mejor posible ambos puntos en todos los test realizados. También queremos recordar que al haber escogido el Modelo de Sección Única, no estamos ajustando los valores reales de f_2 y f_3 , lo que implica una carencia de precisión al intentar aproximar la situación real.

Llama la atención que en el modelo simulado la respuesta dinámica del sistema es más simétrica respecto al punto de control MV o QV, es decir, que el comportamiento antes y después es más semejante que cuando analizamos la

respuesta real del sistema. En la respuesta simulada sí alcanzamos el estado de reposo; está claro que refleja una situación ideal, en ausencia de ruido u otros factores de carga.

Comparemos ahora lo que sucede en el *test 75*, en el que Stana camina a velocidad $v = 1,08 \text{ m/s}$ para la misma frecuencia crítica de paso $f = 1,75 \text{ Hz}$

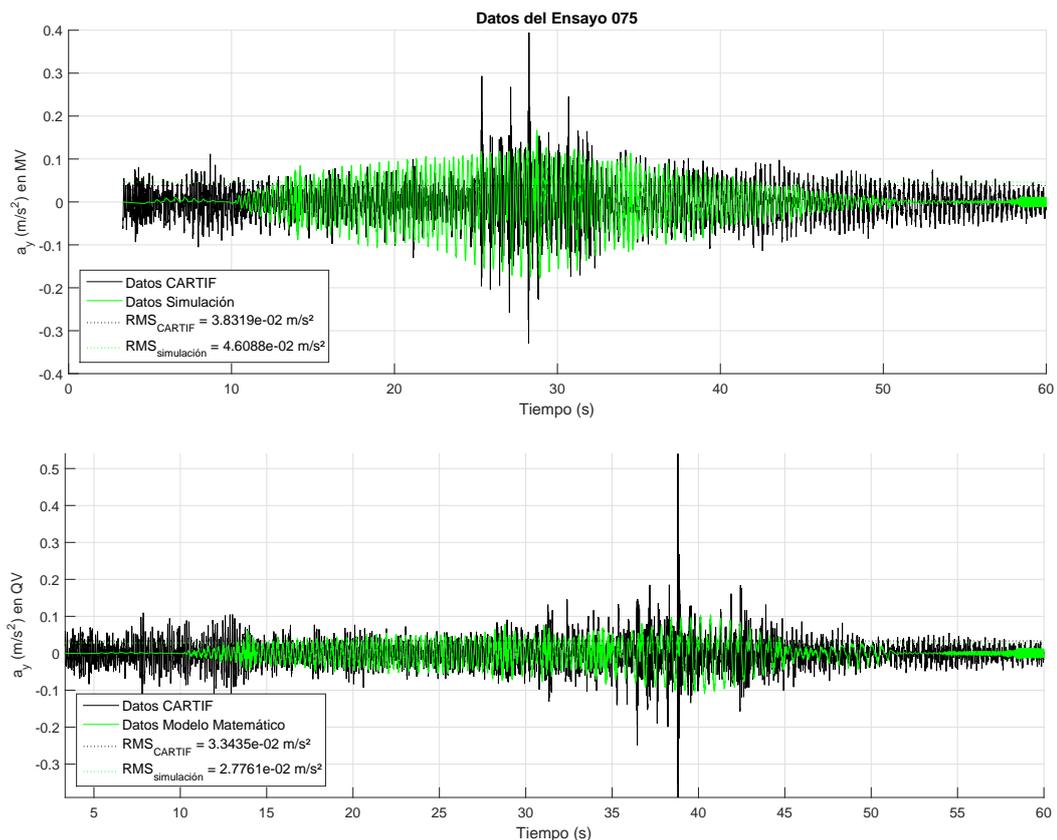


Figura 3.4: Test 75 - Comparación Respuesta Real - Respuesta Simulada

A simple vista vemos en la Figura 3.4 una superposición más exacta entre las respuestas que las que veíamos en la Figura 3.3, sin embargo el *error* es algo mayor, pero puede estar ocasionado por el ruido generado por las precedentes y posteriores idas y venidas por el tramo que se realizaron durante el test. Para este caso $error_{MV} = error_{QV} = 17\%$, lo que volvemos a aceptar como un buen resultado, considerando de nuevo el Modelo simulado como una buena aproximación de la situación real del Sistema.

Pese a que estos dos test mostrados son los más representativos, hemos comparado la respuesta real y simulada de los 9 test disponibles obteniendo en todos una aproximación aceptable, en ningún caso el $error_{MV}$ ha superado el 20%, ni el $error_{QV}$ el 35%.

En ningún momento debemos olvidar la cantidad de simplificaciones inducidas en el modelo escogido, así como que sólo estamos satisfaciendo el valor de la primera frecuencia propia del sistema. Con todo y con eso, para el estudio que estamos llevando a cabo, concluimos definitivamente que el Modelo de Sección Única es, a pesar de sus limitaciones, suficientemente válido para aproximar el comportamiento real del *vano 2* de la PMC.

3.2. Situación de Confort

La Guía de Diseño SETRA, Ref. [2] propone una metodología de estudio de la pasarela que se resume en el diagrama de flujo de la siguiente figura:

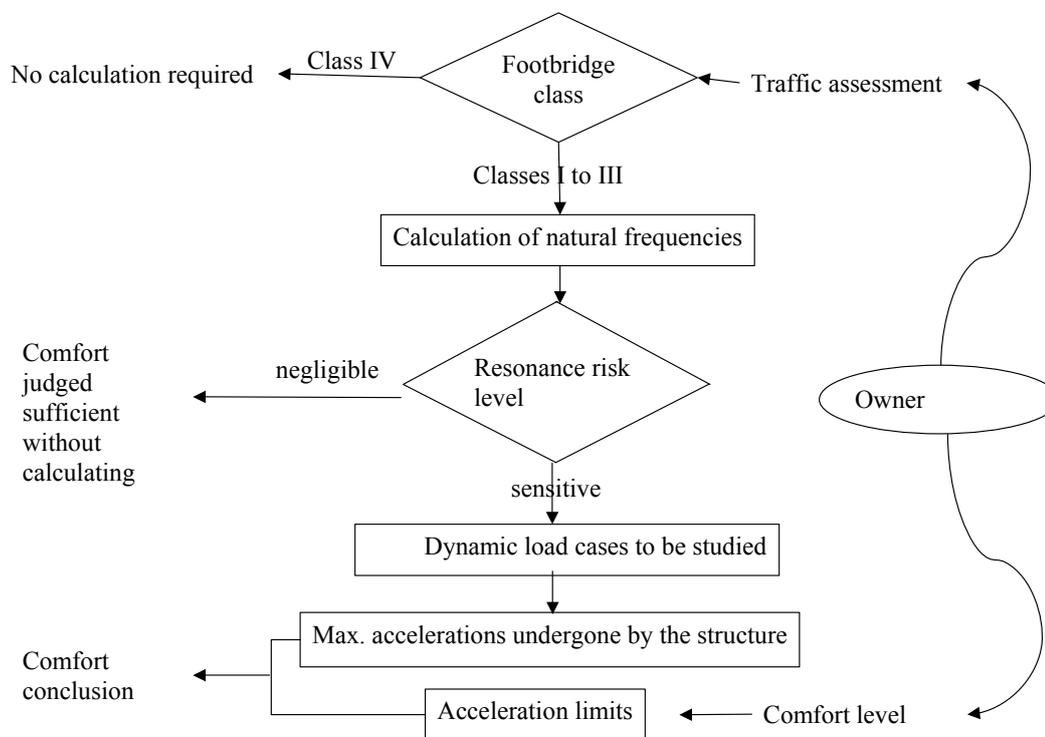


Figura 3.5: Metodología de estudio de pasarelas propuesta por SETRA

Seguimos ahora los pasos descritos en la Figura 3.5 para el caso concreto de la PMC. Se diferencian cuatro clases diferentes de pasarela en función del nivel de tráfico que soportan:

- Clase I: Pasarela de conexión entre áreas de gran densidad de población, muy frecuentemente transitada y/o por multitudes que ocupen simultáneamente toda o casi toda la zona de tránsito.
- Clase II: Pasarela de conexión entre áreas bastante habitadas que puede ocasionalmente encontrarse sometida al tránsito de multitudes que

Clase de Confort	Grado de Confort	$a_{vertical,limite}$
CL1	Máximo	$< 0,5 m/s^2$
CL2	Medio	$0,5 - 1,0 m/s^2$
CL3	Mínimo	$1,0 - 2,5 m/s^2$
CL4	Inaceptable	$\geq 2,5 m/s^2$

Tabla 3.1: Aceleraciones máximas aceptables recomendadas por HIVOSS y SETRA

ocupen simultáneamente toda o casi toda la zona de tránsito.

- Clase III: Pasarela de conexión estándar, puede ser ocasionalmente ocupada por grandes grupos de peatones, pero nunca se verá ocupada simultáneamente toda la zona de tránsito.
- Clase IV: Pasarela de uso poco frecuente, únicamente para comunicar zonas poco habitadas o asegurar la continuidad de la conexión entre áreas pobladas.

La PMC se puede considerar una Pasarela de Clase III, por lo tanto deberemos pasar al cálculo de las frecuencias naturales. Si nos guiamos por la Guía de Diseño HIVOSS (Ref. [4]), estaríamos hablando de una Pasarela de Clase TC2, con una densidad aproximada de $0,2 \text{ peatones}/m^2$ en la que los peatones pueden desplazarse libremente por el tramo y adelantar sin verse obstaculizados por otros individuos.

En nuestro caso las frecuencias naturales ya han sido estudiadas y discutidas en el Capítulo 2 y ha quedado demostrado que existe riesgo de que la PMC entre en resonancia por la acción del tránsito peatonal. Por lo tanto debemos estudiar las aceleraciones máximas a las que se somete la estructura y compararlas con los límites de confort establecidos. Tanto [4] como [2] definen estos rangos como se describe en la Tabla 3.1.

Ambas guías definen también límites máximos de confort para las aceleraciones laterales (dirección transversal de la pasarela), nosotros obviamos estos datos al haber simplificado el caso como un problema plano (en 2D) en el que únicamente tendremos en cuenta las excitaciones y respuestas verticales.

Descripción	a_{limite}
Vibración Vertical	$< 0,7 \text{ m/s}^2$
Vibración Lateral	$< 0,2 \text{ m/s}^2$
Condición excepcionalmente multitudinaria	$< 0,4 \text{ m/s}^2$

Tabla 3.2: Aceleraciones máximas aceptables recomendadas por EUROCODE

3.2.1. Otros Criterios de Confort

Además de HIVOSS y SETRA, existen otros documentos que hablan y definen su propio criterio de confort, veamos algunos de ellos:

Eurocode Eurocode SS-EN 1990/A1:2005 define el criterio de confort basándose en la máxima aceleración percibida en cualquier tramo de la pasarela. Eurocode aporta límites para las aceleraciones máximas laterales y verticales, incluso un valor para condiciones de tránsito multitudinario excepcionales.

Observamos que es ligeramente más laxo que HIVOSS y SETRA salvo en condiciones excepcionales.

SS-ISO 10137:2008 La norma ISO 10137 aporta normas básicas para el diseño de de pasarelas peatonales. Define los límites de confort en función de las frecuencias propias del sistema. El límite para la aceleración vertical se obtiene multiplicando por 60 el valor resultante para la primera frecuencia natural del sistema que describe la Figura 3.6.

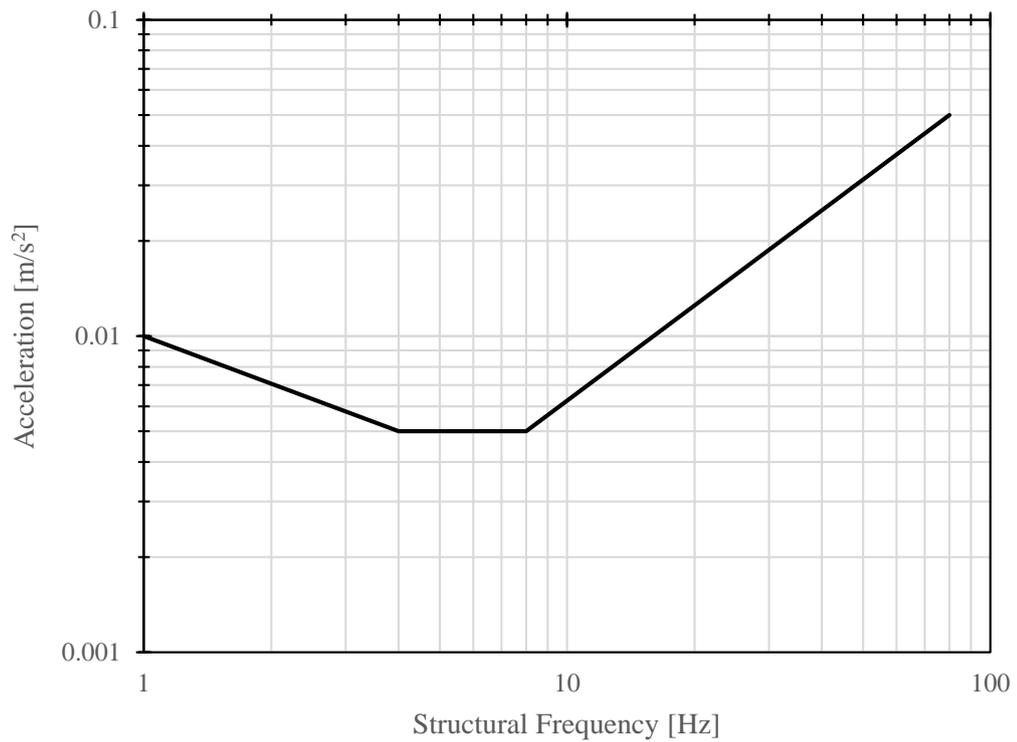


Figura 3.6: Limite para aceleraciones verticales recomendado por ISO 10137

Para $f_1 = 3,5 \text{ Hz}$ obtenemos $60 \cdot 0,0055 = 0,33 \text{ m/s}^2$, un valor más restrictivo que los vistos anteriormente.

UK National Annex Define como aceleración vertical máxima recomendada:

$$a_{limit} = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_4 \text{ [m/s}^2\text{]} \quad (3.3)$$

donde,

$$0,5 \leq a_{limit} \leq 2,0 \text{ [m/s}^2\text{]} \quad (3.4)$$

y k_i depende de distintos factores:

Bridge function	k_1
Primary route for hospitals or other high sensitivity routes	0.6
Primary route for school	0.8
Primary routes for sport stadia or other high usage routes	0.8
Major urban centers	1.0
Suburban crossings	1.3
Rural environments	1.6

Route redundancy	k_2
Sole means of access	0.7
Primary route	1.0
Alternative routes readily available	1.3

Bridge height [m]	k_3
Greater than 8 m	0.7
4 m to 8 m	1.0
Less than 4 m	1.1

$k_4 \approx 1$, por lo tanto en nuestro caso $a_{limite} = 0,8 \cdot 1,0 \cdot 0,7 \cdot 1,0 = 0,56 \text{ m/s}^2$.

Una vez expuestos estos umbrales de confort, veamos ahora cómo se comporta nuestro sistema ante la excitación ocasionada por un único peatón atravesando el tramo y si estamos dentro de las clases de confort y comodidad de tránsito definidas por los documentos presentados.

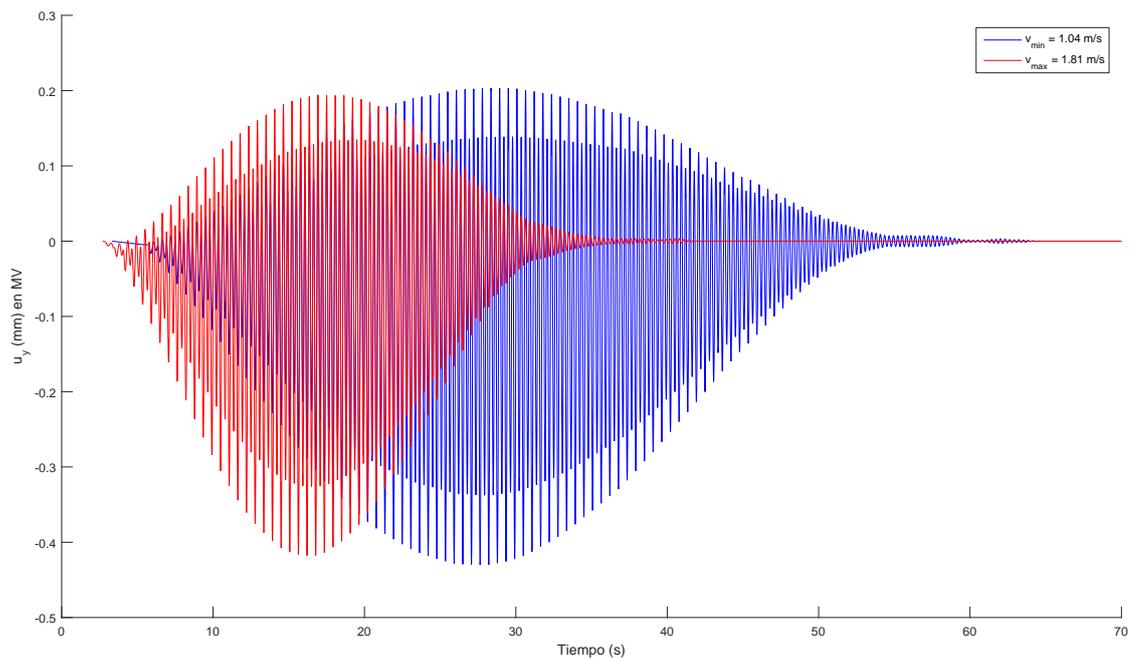
3.3. Respuesta Dinámica del Sistema

Analizamos ahora cómo responde el sistema ante diferentes tipos de excitación y cómo se modifica su respuesta ante la variación de según qué

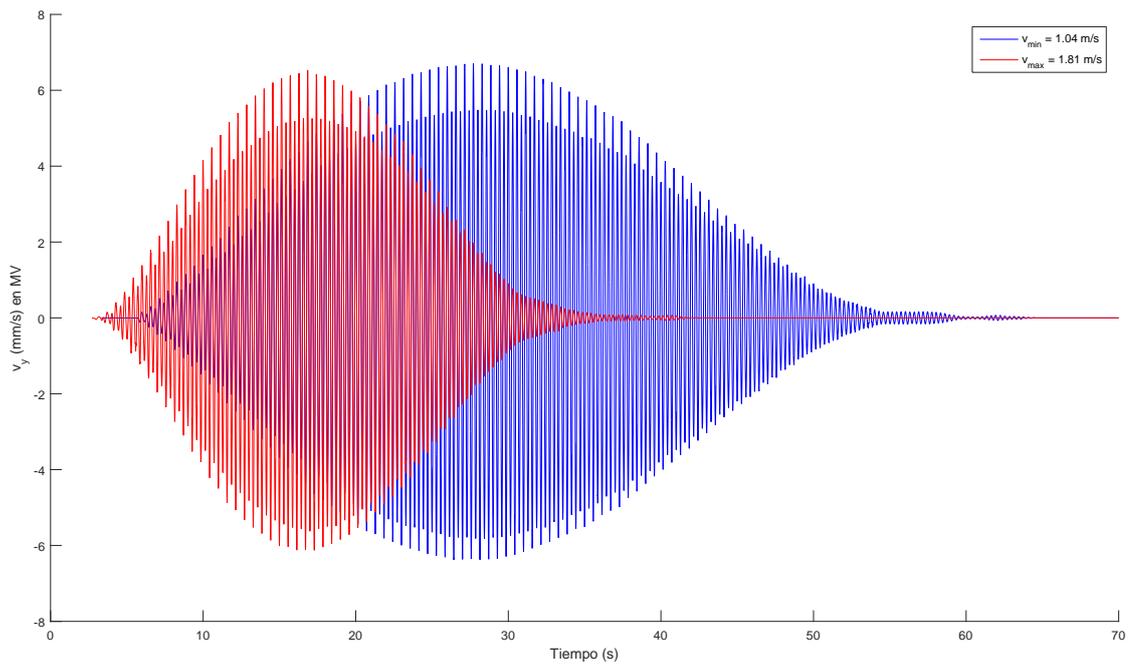
parámetros. Todas las respuestas corresponden a simulaciones de una única persona caminando. Nos vamos a ceñir al punto de control MV.

3.3.1. Velocidad de Paso

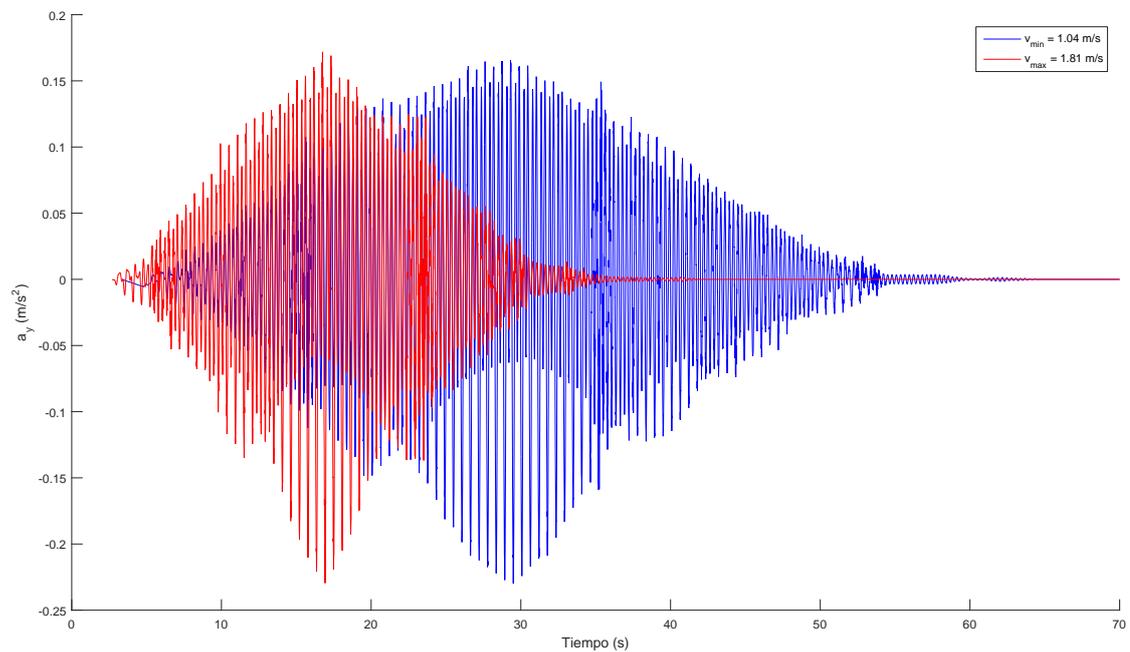
Veamos lo que sucede cuando un individuo varón de $M = 82 \text{ kg}$, $H = 1,82 \text{ m}$ que camina con frecuencia de paso $f = 1,75 \text{ Hz}$ modifica su velocidad entre $v_{med,min}$ y $v_{med,max}$ como vimos en la Ecuación 2.16.



(d) Desplazamiento



(e) Velocidad



(f) Aceleración

Figura 3.7: Respuesta de la PMC. Mismo individuo y frecuencia, diferente velocidad

En la Figura 3.7 vemos en color rojo lo que sucede cuando el peatón camina a $v_{med,max} = 1,81$ m/s y en color azul cuando lo hace a $v_{med,min} = 1,04$ m/s.

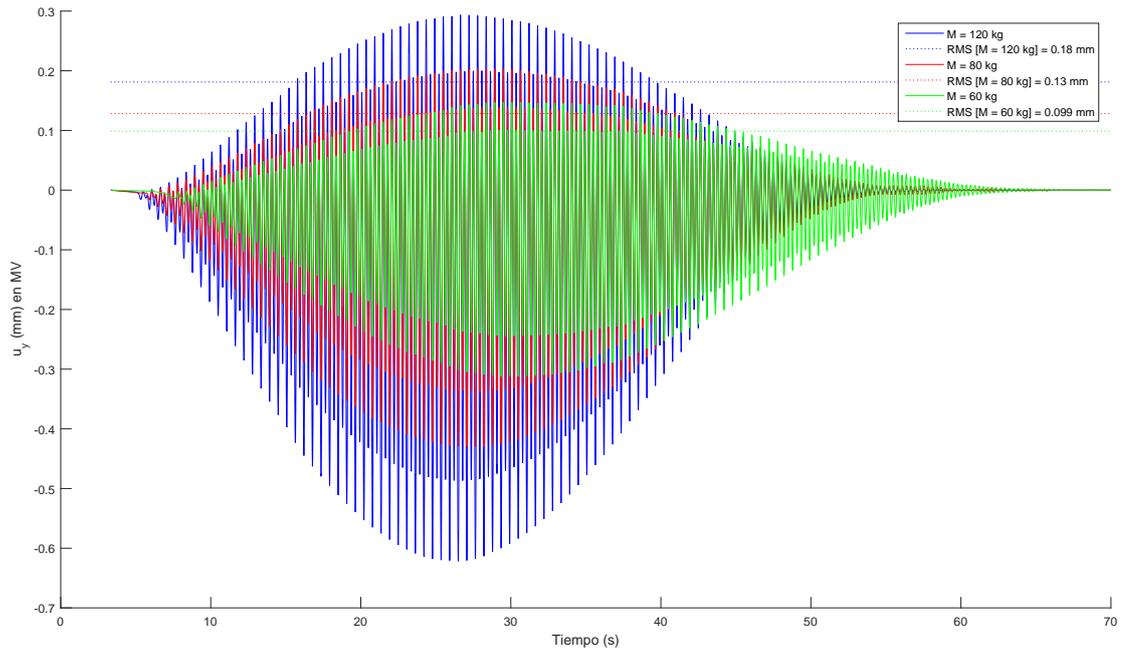
Para todas las magnitudes representadas la apariencia de la gráfica es igual pero parece 'comprimida' para $v_{med,max}$. Lógicamente cuanto más lento camine el peatón, más tardará en atravesar la pasarela y más tiempo durará la excitación inducida al sistema. Los valores alcanzados son idénticos, $u_{max} \approx 0,4 \text{ mm}$ lo que es perfectamente asumible teniendo en cuenta las dimensiones de la PMC. Por otra parte $a_{max} \leq 0,5 \text{ m/s}^2$ lo que según visto en la Sección 3.2 supone una situación de máximo confort CL1.

En ambas situaciones hay una remanencia de la respuesta observada. Aunque el peatón ya no se encuentre en el vano de estudio el sistema tarda un tiempo en disipar la excitación y alcanzar el estado de reposo. Cuando $v_{med,max} = 1,81 \text{ m/s}$, el peatón tarda aproximadamente $t_r = 28 \text{ s}$ en realizar el recorrido, mientras que para $v_{med,min} = 1,04 \text{ m/s}$, $t_r = 49 \text{ s}$; sin embargo, en ambos casos el tiempo requerido para alcanzar el reposo $T_{rep} = cte \approx 10 \text{ s}$ y no proporcionalmente mayor para la respuesta de más duración ($v_{med,min}$) como podría esperarse.

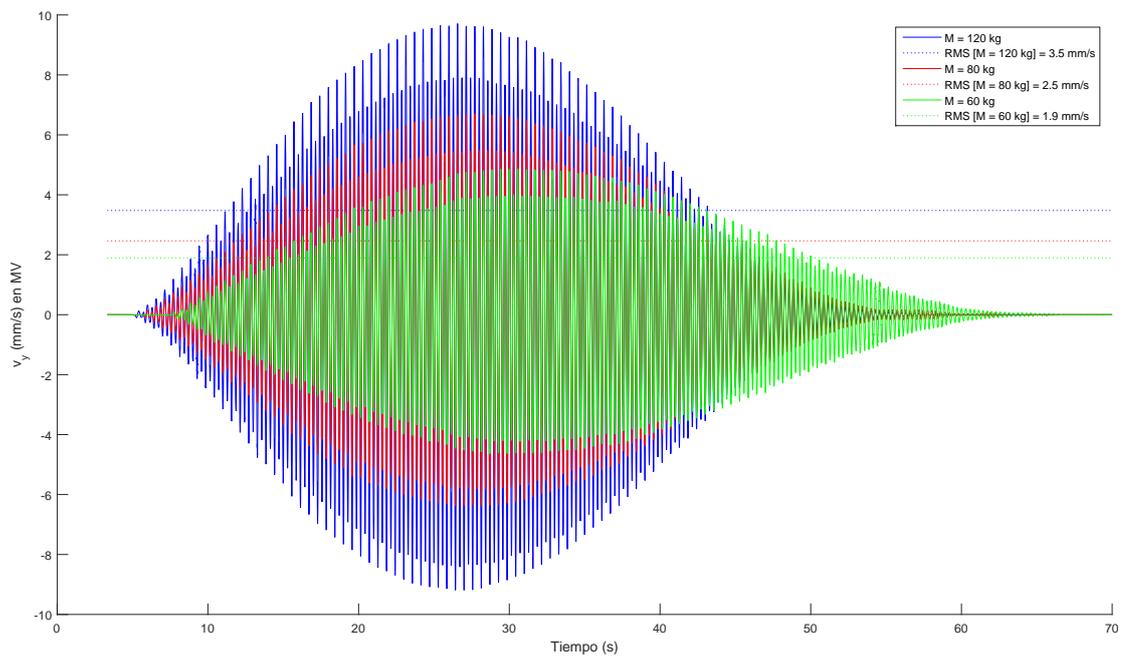
Se concluye que para una misma f , la velocidad de paso no aumenta los máximos valores en la respuesta dinámica del sistema ni afecta en el tiempo de recuperación T_{rep} . La respuesta observada tiene una duración que depende de lo que tarde el peatón en atravesar el tramo (t_r).

3.3.2. Masa del Peatón

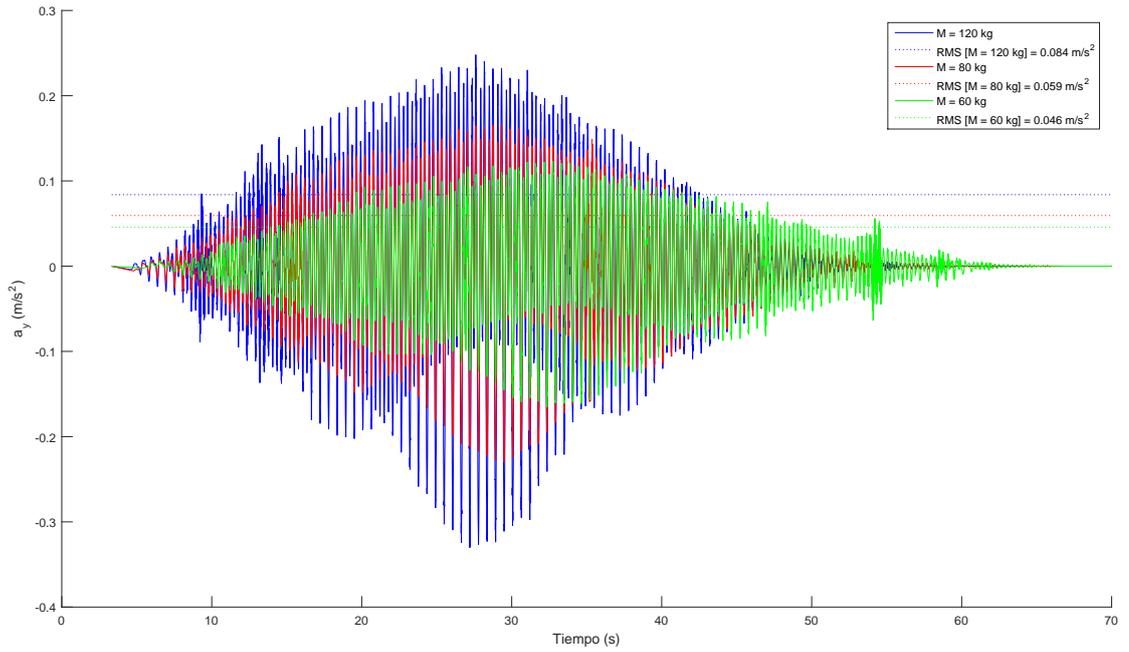
Estudiamos ahora de qué manera influye la masa corporal del peatón [M], que está transitando la PMC. En todos los casos $f = 1,75 \text{ Hz}$, además hemos ajustado $v = 1 \text{ m/s}$, para que t_r sea igual en todos los casos y la respuesta sea comparable. Estudiamos el punto de control MV.



(a) Desplazamiento



(b) Velocidad



(c) Aceleración

Figura 3.8: Respuesta de la PMC. Individuos con distinta masa caminando a la misma frecuencia

En la Figura 3.8 vemos en color verde vemos la respuesta ocasionada por un peatón con $M = 60 \text{ kg}$, en rojo $M = 80 \text{ kg}$ y en azul $M = 120 \text{ kg}$. Salta a la vista lo influyente que resulta este parámetro, u , v y a aumentan considerablemente cuando aumenta la masa del individuo, además se puede comprobar que:

$$\begin{aligned}
 \frac{RMS_{M120}}{RMS_{M80}}|_u &= \frac{RMS_{M120}}{RMS_{M80}}|_v = \frac{RMS_{M120}}{RMS_{M80}}|_a = 1,4 \\
 \frac{RMS_{M80}}{RMS_{M60}}|_u &= \frac{RMS_{M80}}{RMS_{M60}}|_v = \frac{RMS_{M80}}{RMS_{M60}}|_a = 1,3 \\
 \frac{RMS_{M120}}{RMS_{M60}}|_u &= \frac{RMS_{M120}}{RMS_{M60}}|_v = \frac{RMS_{M120}}{RMS_{M60}}|_a = 1,8
 \end{aligned} \tag{3.5}$$

La relación entre los valores de RMS se mantiene constante para todas las magnitudes estudiadas (u , v y a); además se aproximan bastante a la relación M_i/M_j en cada caso. Esto demuestra que aunque la respuesta dinámica no crezca linealmente con el aumento de la carga, sí que se puede considerar ligeramente escalable con el aumento de masa de la carga.

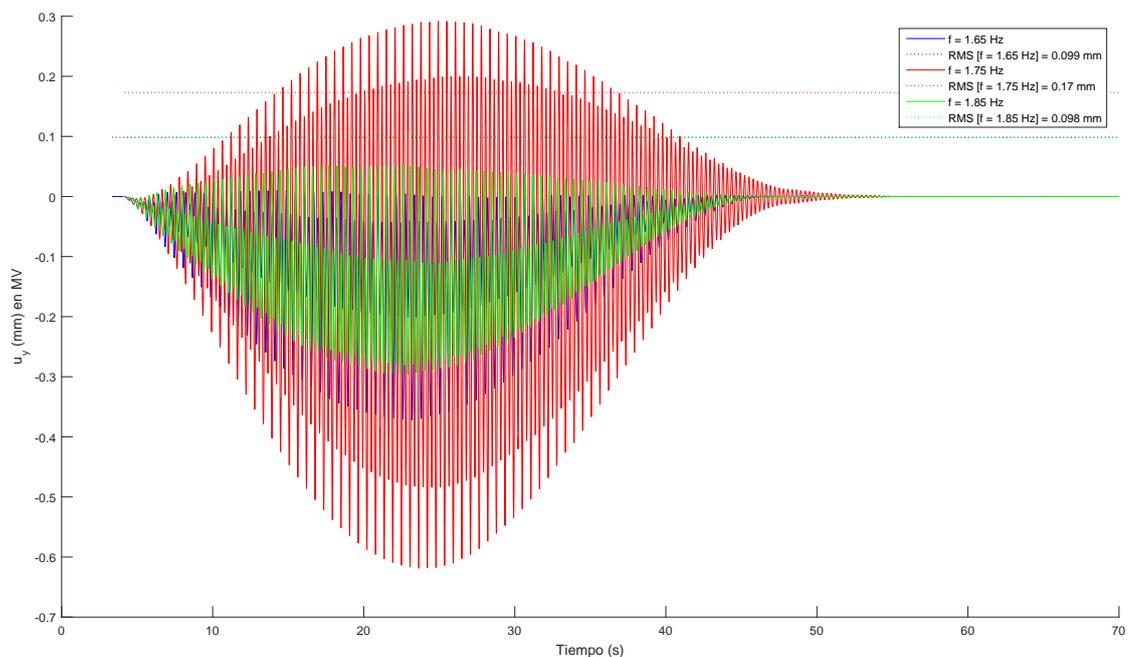
Vemos que los valores máximos de aceleración para $M = 120 \text{ kg}$ aumentan peligrosamente cuando el peatón se acerca a la zona crítica, que no es otra que cuando atraviesa el punto de control MV. Remarcamos también que, aunque $M = 60 \text{ kg}$ es de las tres la menos peligrosa, sí que es la que más tarde alcanza

el estado de reposo absoluto (mayor T_{rep}). Aún así seguimos disfrutando de un confort de clase CL1 (Tabla 3.1) al encontrarnos siempre con $a < 0,5 \text{ m/s}^2$.

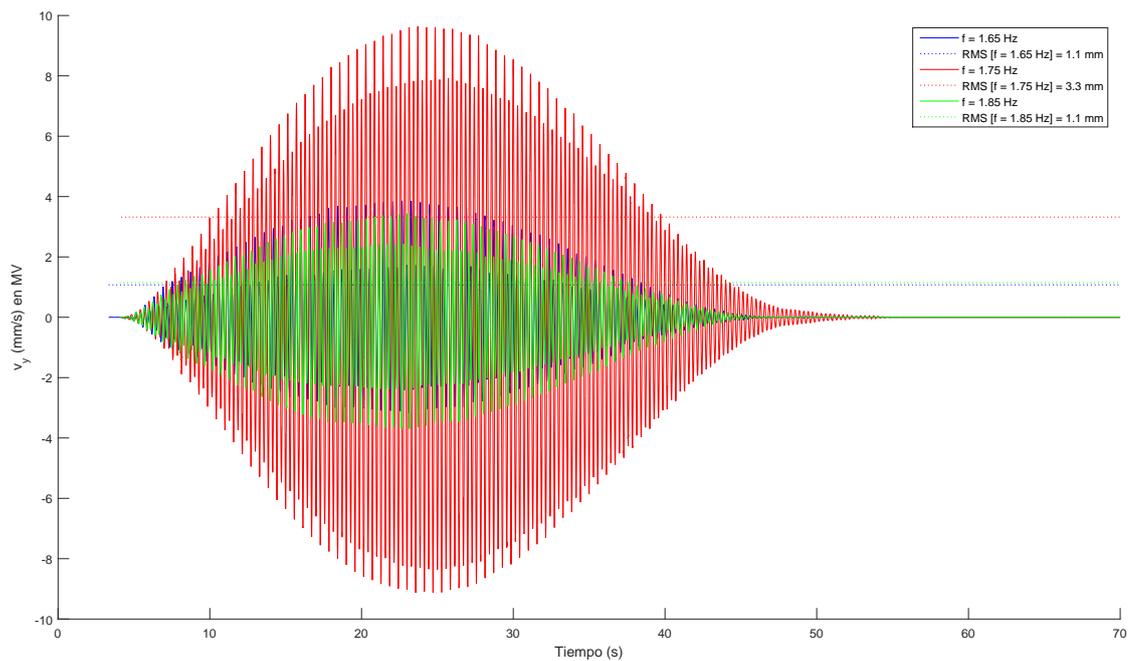
Queda demostrado que la masa del peatón M es un factor muy influyente en la respuesta dinámica del sistema. A pesar de que sea despreciable frente a M_T . Además, se ha demostrado que la respuesta guarda cierta proporcionalidad con el aumento de la masa del peatón (masa de la carga).

3.3.3. Frecuencia de Paso

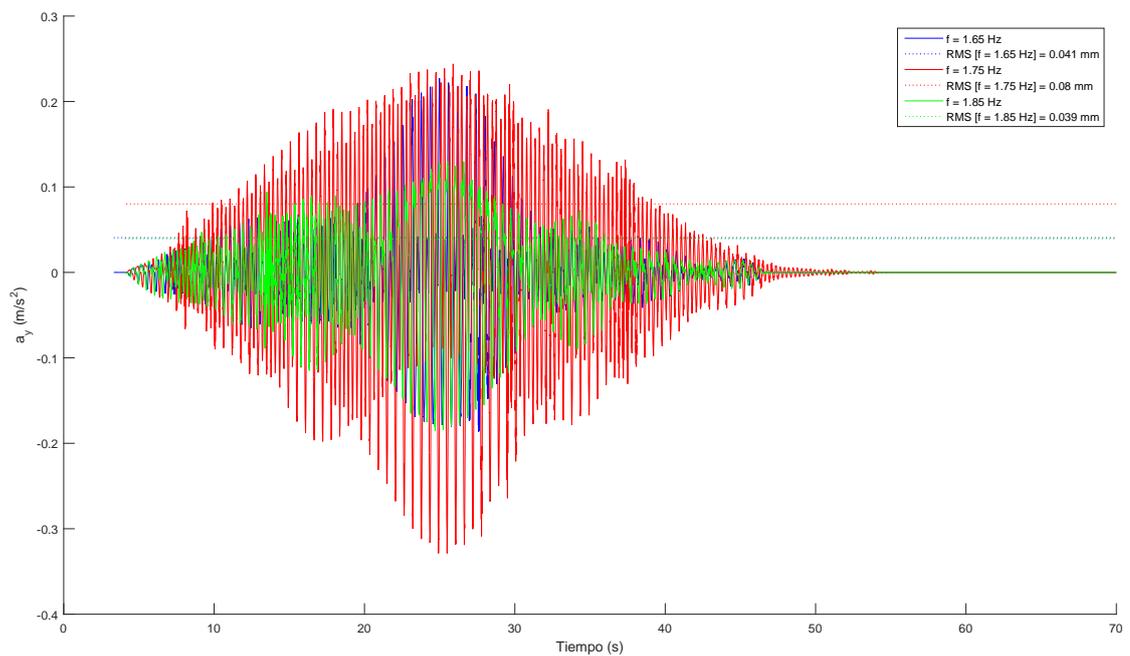
Veamos ahora hasta qué punto es determinante que el individuo estudiado camine con una frecuencia de paso f igual a la frecuencia crítica $f_{critica} = f_1/2 = 1,75 \text{ Hz}$. Veamos qué sucede cuando un peatón de $M = 120 \text{ kg}$ y $H = 1,9 \text{ m}$ camina con la misma $v = 1,2 \text{ m/s}$ pero a diferentes frecuencias de paso, muy cercanas a $f_{critica}$.



(a) Desplazamiento



(b) Velocidad



(c) Aceleración

Figura 3.9: Respuesta de la PMC. Mismo individuo caminando a la misma velocidad pero a distintas frecuencias de paso

En la Figura 3.9 vemos en color azul la respuesta para $f = 1,65 \text{ Hz}$, en verde para $f = 1,85 \text{ Hz}$ y en rojo para $f = f_{critica} = 1,75 \text{ Hz}$. Realmente salta a la vista lo determinante que es la frecuencia de paso en la respuesta del

sistema. A pesar de que las otras dos no estén realmente alejadas de $f_{critica}$, la respuesta se dispara para las tres magnitudes de estudio.

Aunque los valores de los otros dos casos son simétricos respecto a $f_{critica}$, es decir

$$f_{critica} - 1,65 \text{ Hz} = 1,85 \text{ Hz} - f_{critica}$$

es curioso que para todas las magnitudes de estudio

$$RMS_{1,65|u,v,a} \approx RMS_{1,85|u,v,a}$$

a pesar de que la respuesta no es idéntica ni se superpone en ninguno de los casos para estos valores. De hecho, si observamos la evolución de la aceleración a lo largo del tiempo, observamos que para $f = 1,65 \text{ Hz}$ se alcanzan en picos máximos de los mismo valores aproximadamente que los que alcanza $f = 1,75 \text{ Hz}$, sin embargo hay gran contraste entre la respuesta observada en torno a MV y los extremos del vano: muy excitada en MV y muy cercana al reposo en los extremos. En cambio para $f = 1,85 \text{ Hz}$ no se alcanzan valores tan altos en ningun punto, la respuesta es mucho más uniforme en todo el rango temporal; pero aún así, los valores RMS entre ambas situaciones son muy similares.

Es evidente el cambio tan radical que origina en la respuesta el que una persona transite con $f = f_{critica}$, el valor RMS se duplica para u y a y se triplica para v con respecto a los otros dos casos. Podemos por lo tanto concluir que la frecuencia de paso es un factor totalmente determinante en la respuesta del sistema, dando lugar a comportamientos anómalos y cada vez más alejados de la situación de confort durante el tránsito. Este riesgo se acentúa exponencialmente cuanto más nos acerquemos a la frecuencia crítica.

3.3.4. Corolario

Parece lógico pensar que una M aún más elevada, ocasionada por el tránsito de varias personas caminando en fase a la frecuencia de paso crítica podría ocasionar una gran perturbación en el sistema, abandonando así la situación de máximo confort CL1. También cabe esperar, que cuanto más tiempo dure la excitación (por ejemplo una marcha militar o una maratón) más sufrirá la PMC y los usuarios al transitarla.

3.4. Estudio Multipersona

Todos los resultados vistos anteriormente nos llevan a preguntarnos qué sucedería en una situación extraordinariamente desventajosa, en la que un grupo de personas caminen simultáneamente a la frecuencia crítica del sistema.

La Guía SETRA (Ref. [2]) también habla sobre flujos peatonales en pasarelas. A partir de los resultados causados por el tránsito de una persona aproxima la respuesta que se obtendrá en situaciones con varias personas implicadas.

Establece un nuevo parámetro denominado 'número de peatones equivalente', N_{eq} que depende de factores como el amortiguamiento o el número de personas que ocupan la pasarela. Basándose en que la entrada de peatones en la pasarela a lo largo del tiempo puede entenderse como una distribución normal se plantea:

$$N_{eq} = 10,8\sqrt{N \cdot c} \quad (3.6)$$

para un tránsito normal o ligeramente denso. Recordamos que c es el amortiguamiento de la estructura y N es el número de peatones ocupando la pasarela.

La expresión de la fuerza que vimos anteriormente (Ec. 2.18) quedará ahora modificada por N_{eq} . Esta nueva expresión ya incluye el factor de 'flujo peatonal'. La aceleración máxima que ocasiona un grupo de peatones está generada por la Ec. 3.4.

$$F(t) = \frac{N_{eq}}{L_T} \cdot 280 \cdot N \cdot \cos(2\pi f + \varphi_0) \quad (3.7)$$

Sin embargo, esto no deja de ser una aproximación. Nosotros disponemos de un software específico que nos permite simular expresamente cada caso determinado que deseemos estudiar. Podemos introducir cada individuo por separado, con su propio peso y altura, frecuencia de paso y velocidad al caminar. Tenemos la posibilidad de escoger en qué momento entra en la pasarela, en qué punto comienza a actuar su fuerza, etc. Esto supone una ventaja porque nos permite plantear cada situación minuciosamente escogiendo el valor particular para cada parámetro.

3.4.1. Frente Peatonal

Comenzamos analizando lo que sucedería cuando la pasarela la transita un determinado grupo de personas en línea en dirección transversal. Un frente de personas recorriendo a la vez el vano 2 (como una oleada). Todas las personas tienen la misma masa ($M = 100 \text{ kg}$) y altura ($H = 1,9 \text{ m}$) y caminan en fase a la misma frecuencia de paso ($f = 1,75 \text{ Hz}$) con la misma velocidad ($v = v_{med,min} = 1,1 \text{ m/s}$). La sincronía es total. Nos podemos anticipar diciendo que es una situación desfavorable y más aún cuanto mayor sea el grupo de personas.

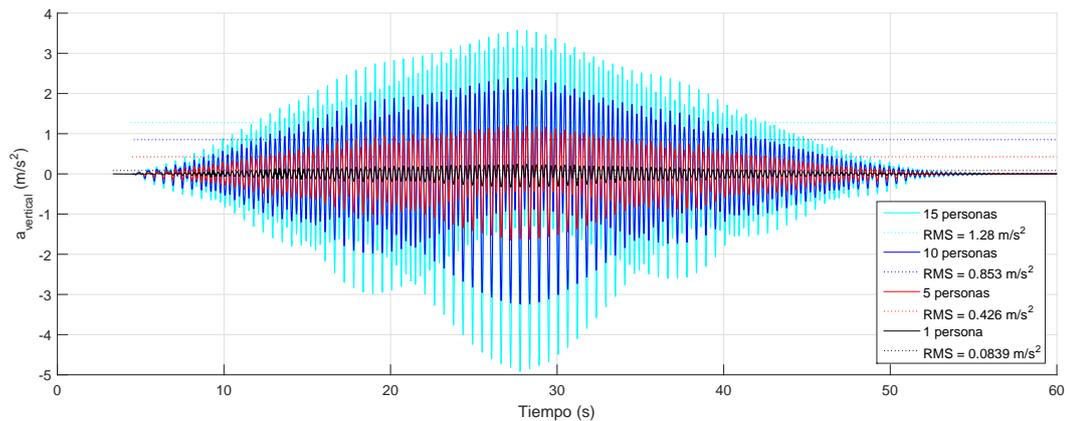


Figura 3.10: Aceleración vertical en MV para flujos peatonales

En la Figura 3.10 se representa la aceleración vertical en el punto de control MV cuando la PMC la transita 1 persona, un grupo de 5, de 10 y de 15 personas. El aumento del espectro es proporcional al tamaño del grupo de personas. El valor RMS aumenta (y mucho) y las aceleraciones máximas también.

Ahora vamos a realizar una libre interpretación de lo que propone la guía SETRA para el estudio de casos multipersona en pasarelas. Si asumimos que la aceleración estructural es proporcional al valor de la fuerza que la ocasiona, a partir de la Ecuación 3.4 podemos comparar el valor obtenido por simulación con la aproximación teórica que propone SETRA y depende de N_{eq} . Aproximamos:

$$a_{max,multipersona} = \frac{N_{eq}}{L_T} \cdot N \cdot a_{max,1persona} \quad (3.8)$$

La aceleración máxima para una única persona es: $a_{max,1persona} = 0,24 \text{ m/s}^2$. Este dato se obtiene de la Figura 3.10. Obtenemos los valores de

a_{max} para las series de datos de 5, 10 y 15, por un lado empleando la Figura 3.10 y por otro la Ecuación 3.4.1. Comparamos resultados:

Nº Personas	a_{max} Simulación	a_{max} Aproximación N_{eq}
5	1,1 m/s^2	0,8 m/s^2
10	2,4 m/s^2	2,2 m/s^2
15	3,6 m/s^2	3,7 m/s^2

Tabla 3.3: Comparación entre valores máximos de aceleración Simulación - Aproximación SETRA

Ambos métodos convergen bastante bien, y se acercan bastante entre sí, sin embargo, empleando el software tenemos la ventaja de conocer perfectamente las características del flujo de peatones y podemos simular situaciones especiales o irregularidades puntuales que puedan alterar la respuesta. Aún así volvemos a aclarar que esta comparación es fruto de una libre interpretación de la guía SETRA, nada categórico.

En cuanto al análisis de la situación de confort, nos referimos a la Tabla 3.1, claramente hemos abandonado la zona de máxima comodidad CL1. Para 5 personas estamos en torno a la comodidad media correspondiente a la clase CL2, con 10 personas alcanzamos la clase CL3 (mínimo confort) y para 15 personas superamos el valor límite $a_{limite} = 2,5 m/s^2$, lo que supone una incomodidad de tránsito inaceptable, clase CL4.

Está claro que lograr una situación de este tipo en la realidad es muy difícil. Tener a 15 personas transitando simultáneamente y exactamente a la frecuencia $f = 1,75 Hz$ totalmente en fase es bastante improbable, pero no imposible. Este estudio demuestra lo susceptible que es el vano 2 de la PMC y la amplitud de vibración que podría llegar a alcanzarse en casos extremos.

3.4.2. Flujo Peatonal Regular

Ahora ya no es un frente de personas sino un flujo peatonal. Individuos con las mismas características que antes e idénticos entre sí: $M = 100 kg$; $H = 1,9 m$; $f = 1,75 Hz$; $v = 1,1 m/s$. Estos sujetos van entrando a la pasarela, uno detrás de otro, cada 10 segundos y recorren el vano hasta el final.

La simulación se ha llevado a cabo de forma que, para los registros multipersona, en el instante inicial ya hay 5 personas ocupando la pasarela.

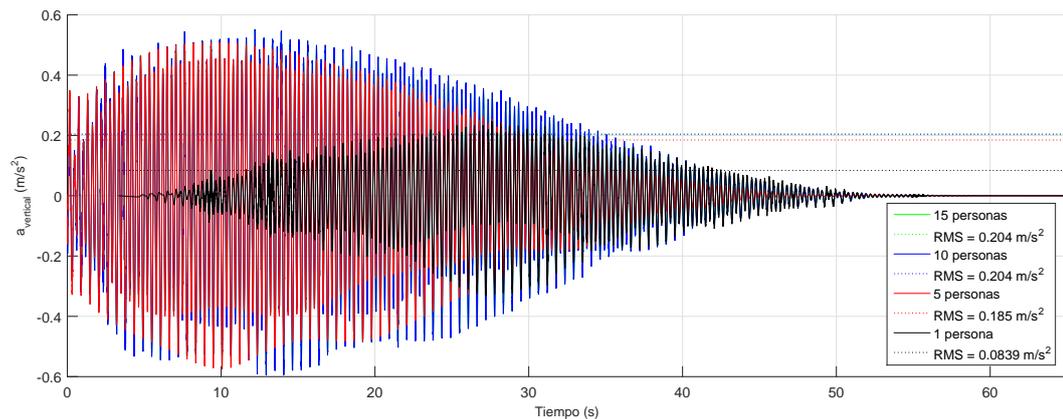


Figura 3.11: Aceleración vertical en MV . Entrada de peatones cada 10 segundos

En la Figura 3.11, vemos lo que sucede cuando el flujo peatonal es de 1 persona, o de 5, 10 o 15 personas. Todas las gráficas han sido posicionadas en la gráfica de manera que sean fácilmente comparables entre sí. La representación corresponde a los 60 últimos segundos de cada ensayo superpuestos entre sí.

El que la pasarela esté ocupada por cinco personas en el instante inicial y que la velocidad al caminar sea $\approx 1 \text{ m/s}$ implica que haya un peatón posicionado cada $\approx 10 \text{ m}$. Esto ocasiona que

- La respuesta de las 4 series de datos se superpone cada vez más para los últimos instantes de tiempo. Esto es debido a que al final, en todos los casos sólo queda una persona caminando por el sistema.
- La respuesta para 10 y 15 personas se superponga totalmente para todo el registro. Esto es porque, debido a la velocidad que llevan los peatones, en ningún momento habrá más de 5 peatones en la pasarela. Para el caso de 5 personas sólo estarán los cinco que están dentro inicialmente, eso hace que la excitación dure menos tiempo.

La Figura 3.11 representa un caso mucho más real que el caso que el de un 'frente peatonal' como el visto en la Sección anterior. Los valores de la a_{max} son mucho más comedidos ahora. Esta vez $a_{max} = 0,55 \text{ m/s}^2$ tanto para 10 como para 15 personas (la respuesta se superpone completamente). Aún así nos estamos moviendo en los límites de CL1 - CL2 y estaríamos abandonado la situación de máximo confort.

Esta experimentación corresponde con una situación muy controlada y muy 'relajada' para el sistema, que soporta como máximo 5 personas

simultáneamente. Pues bien, aún así ya no nos situamos de una manera tan holgada en una clase de confort CL1.

3.4.3. Flujo Aleatorio

Por último veamos lo que sucede en un caso de distribución aleatoria. Todos los individuos caminan con $f = 1,75 \text{ Hz}$ pero cada uno entra a en un instante diferente y aleatorio. Hemos considerado que hay un par de grupos de 2 personas que entran prácticamente a la vez. Cada uno de los individuos tiene una masa y una altura diferentes a las del resto y camina a una velocidad distinta.

En total entran en la pasarela 15 personas. El tiempo de desfase máximo entre dos personas consecutivas es de $2,5 \text{ s}$.

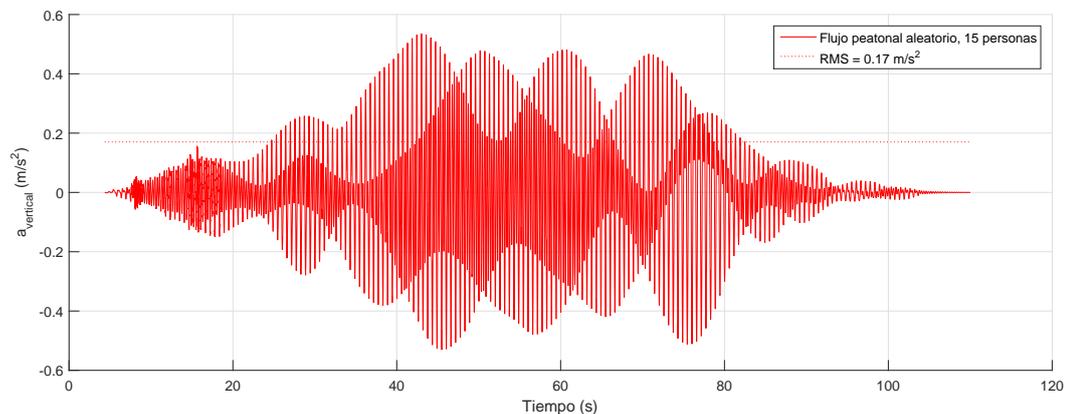


Figura 3.12: Aceleración vertical en MV . Flujo peatonal aleatorio

El caso representado por la Figura 3.12 representa una situación aún más real que la anterior.

Aunque todos los peatones circulen con la misma frecuencia de paso, al entrar cada uno en un instante diferente y aleatorio, la onda de la carga de un peatón determinado puede ser totalmente opuesta a la de otro. En esta situación, habría ondas que se estarían anulando, parcial o completamente. En general, en esta situación la fuerza total actuando sobre el sistema es una onda compleja, suma de 15 acciones diferentes.

Volvemos a alcanzar valores máximos de la aceleración ligeramente superiores a $0,5 \text{ m/s}^2$. Volvemos a situarnos más cerca de CL2 que de CL1. Vuelve a quedar en evidencia lo fácil que es excitar este tramo como para

alcanzar una cierta incomodidad. La situación planteada no es tan extraña como las expuestas anteriormente.

3.4.4. Corolario

Queda patente lo susceptible que resulta el *vano 2* de la PMC. Esta claro que en todos los casos hemos generado resonancia en la respuesta pero es evidente lo fácil que puede resultar tener una cierta sensación incómoda al atravesar el vano. Esto concuerda perfectamente con los usuarios vallisoletanos, que a menudo se quejan de la vibración que se experimenta en esta pasarela.

Hay que tener en cuenta que, durante todo el desarrollo del trabajo, únicamente hemos tenido en cuenta la acción de caminar y nunca la de correr. Un corredor transitando sería todavía más peligroso por ser capaz de excitar $f_1 = 3,5 \text{ Hz}$ directamente. Sin embargo, como ya explicamos en 2.5, aproximar mediante una función matemática el efecto de un peatón al correr es totalmente diferente al de un peatón caminando. Es por esto, que la situación de uno o varios corredores circulando por la PMC ha quedado fuera del estudio. Aún así, lo que queremos decir es que se podrían plantear situaciones aún más desventajosas que las vistas en este Capítulo.

*

Capítulo 4

Conclusiones

Una vez finalizado el desarrollo del trabajo hemos llegado a las siguientes conclusiones desde el punto de vista técnico:

- Una vez definida la clase de confort deseada en una pasarela y las condiciones de uso que tendrá, un análisis modal será esencial para evaluar el comportamiento del sistema ante cargas dinámicas. No obstante, la respuesta dinámica ante cargas resonantes no sólo dependerá de las frecuencias propias sino del amortiguamiento estructural y de la relación entre la masa de los peatones y la propia de la estructura.
- Queda demostrado que el software empleado es una herramienta útil y capaz de simular y dar soluciones aproximadas a problemas reales. No obstante, se han evidenciado ciertos problemas numéricos y el alto coste computacional requerido.
- El *vano 2* de la PMC puede ser simplificada hasta cierto punto como una viga apoyada-empotrada con las características y propiedades vistas en el Capítulo 2.
- Es posible caracterizar de forma simplificada determinadas características antropométricas que influyen en las cargas dinámicas sobre la pasarela.
- La respuesta dinámica de la estructura se ve influida principalmente por la masa del peatón y la frecuencia de paso, así como por el número de peatones.
- Una situación de flujo peatonal de excepcional sincronismo supondría un caso de percepción vibracional exagerada por parte de los usuarios, generando una gran incomodidad en el tránsito.

- Aunque nos encontramos ante una pasarela de clase CL1 es fácil que se abandone este umbral en condiciones normales de cierta ocupación del vano.

Desde el punto de vista personal, la realización de este trabajo ha supuesto un significativo complemento en la formación tanto en materia de dinámica estructural como en el manejo de normas y recomendaciones de diseño respecto a pasarelas peatonales. Ambos son aspectos de gran importancia profesional en la ingeniería mecánica.

Bibliografía

- [1] Álvaro Magdaleno González, “Modelos simplificados para simulación numérica (matlab) en la acción de las personas sobre las estructuras.” Escuela de Ingenierías Industriales, Universidad de Valladolid” Trabajo Fin de Grado, 2015.
- [2] W. H. Pascal Charles, “Footbridges: Assessment of vibrational behaviour of footbridges under pedestrian loading,” SÉTRA: service d’Études techniques des routes et autoroutes,” Technical Guide, 2006.
- [3] V. R. Preedy, *Handbook of Anthropometry: Physical Measures of Human Form in Health and Disease*, V. R. Preedy, Ed. Springer, 2012.
- [4] D.-I. C. H. Prof. Dr.-Ing. Markus Feldmann, “Hivoss: Human induced vibrations of steel structures. design of footbridges guidelines,” Research Fund for Coal and Steel (RFCS),” Technical Guide, 2008.
- [5] J. S. Sanz, “Análisis del estado límite de servicio y control de vibraciones en pasarelas peatonales,” Ph.D. dissertation, Escuela de Ingenierías Industriales, Universidad de Valladolid, 2012.