



UNIVERSITAT
JAUME•I

UNIVERSITAT JAUME I

**ESCOLA SUPERIOR DE TECNOLOGIA I CIÈNCIES EXPERIMENTALS
MÀSTER UNIVERSITARI EN ENGINYERIA INDUSTRIAL**

***ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE
PASARELA PARA USO DE PEATONES Y
CICLISTAS.
MODELIZACIÓN NUMÉRICA Y
CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL MEDIANTE
APLICACIONES MÓVILES***

TRABAJO FIN DE MÁSTER

AUTOR

Flavien Masse

DIRECTORES

María Dolores Martínez Rodrigo

David Hernández Figueirido

Castellón, noviembre de 2020

ÍNDICE

MEMORIA.....	3
PLANOS.....	65
PLIEGO DE CONDICIONES.....	69
PRESUPUESTO.....	71

MEMORIA

Agradecimientos

Durante este proyecto, he tenido el placer de trabajar con profesores y colegas que compartieron su experiencia y tiempo conmigo, les agradezco mucho.

A Lola Martínez Rodrigo y David Hernández Figueirido, mis tutores. Gracias por vuestros consejos y vuestra ayuda en el desarrollo de este trabajo, así que por tener siempre una actitud positiva.

A Ximo Sancho Bru y Amélie Vienne, por su ayuda en los ensayos de vibración en la pasarela. Gracias por dedicarme tiempo y contribuir a la realización de este trabajo.

A mis colegas Josep, Josep, Carlos y Marta por hacer del lugar de trabajo un lugar de vida donde uno se siente bien.

A la Universitat Jaume I y el Institut National des Sciences Appliquées de Lyon por posibilitar este intercambio entre nuestras universidades. Agradezco especialmente a Carlos Ariño Latorre, Lluís Martínez León y David Philippon por la coordinación del programa.

Al CROUS de Lyon y Erasmus+ por las becas de estudio que me permitieron concentrarme en la realización del Máster Universitario en Ingeniería Industrial y en particular del Trabajo de Final de Máster durante este periodo.

Et bien sûr à mes parents, Fabrice et Brigitte, pour leur soutien total pendant cette période de pandémie.

Resumen

El presente trabajo intenta caracterizar el comportamiento dinámico y resistente de una pasarela peatonal mediante medidas de vibración realizadas con una aplicación móvil. La estructura se compone de una pasarela y dos rampas metálicas que apoyan sobre dos pilares de hormigón. Se sitúa en el municipio de Borriol, Castellón. El trabajo contiene una parte experimental y una parte de modelización numérica.

Un modelo numérico de Elementos Finitos de la estructura, basado en medidas dimensionales tomadas in situ, se realiza con el fin de estudiar su comportamiento. En el estudio de sensibilidad, se observa la influencia del tipo de modelización del enrejado y de los apoyos sobre el valor de las frecuencias fundamentales de la estructura. La variación de la rigidez del enrejado influye de manera significativa en la frecuencia de los modos de vibración verticales (hasta un 22,5 %), mientras la libertad o restricción de desplazamiento o rotación en los apoyos les afecta en menor medida (0,1 - 3,3 %). Se propone una calibración del modelo numérico basada en medidas de vibración realizadas en la pasarela y las rampas.

Los ensayos experimentales se realizan con un teléfono móvil mediante la aplicación Phyphox que permite grabar la aceleración en las tres direcciones. Se mide tanto la frecuencia fundamental de la pasarela como la de las rampas. Se identifica como primer modo de flexión vertical el modo de vibración fundamental de la pasarela. En las rampas, sin embargo, no se pudo identificar el modo de vibración asociado a las medidas experimentales. La calibración del modelo numérico se realiza con el primer modo vertical de la pasarela. La diferencia de frecuencia entre el modelo calibrado y los resultados experimentales es del 1,7 % para el primer modo vertical de la pasarela.

Los ensayos de vibración permitieron determinar además la tasa de amortiguamiento asociada al primer modo vertical de la pasarela, así como cuantificar el efecto del viento y de los corredores sobre la pasarela. Se presentan las amplitudes de aceleración máximas alcanzadas durante estos ensayos y se comparan al Estado Límite de Servicio de vibraciones. Este se alcanza cuando tres corredores o más cruzan la pasarela corriendo de manera sincronizada con un ritmo que provoca la resonancia de su primer modo vertical.

En cuanto al comportamiento resistente de la pasarela, la comprobación de los Estados Límite de resistencia y de pandeo se realiza con el modelo numérico tras haber introducido las cargas de sobrecarga de uso, de viento y de nieve. Los elementos más solicitados son las diagonales laterales, al alcanzar un 92 % del ELU de resistencia y el 97 % del ELU de pandeo, según hipótesis conservadoras.

Résumé

Ce travail essaie de caractériser le comportement dynamique et résistant d'une passerelle piétonne à travers des mesures de vibrations réalisées avec une application sur smartphone. La structure se compose d'une passerelle et de deux rampes métalliques, en appui sur deux piliers en béton. Elle se situe sur la commune de Borriol (Province de Castellón, Espagne). Le projet contient une partie expérimentale et une partie de modélisation numérique.

Suite à une campagne de mesures des dimensions de la structure, un modèle numérique Éléments Finis est conçu afin d'étudier son comportement. L'étude de sensibilité s'intéresse à l'influence du type de modélisation des grilles latérales et des appuis sur la valeur des fréquences fondamentales de la structure. La variation de la rigidité de la grille a une grande influence sur la fréquence des modes de vibration verticaux (jusqu'à 22,5 %), alors que la liberté ou la restriction de déplacement ou de rotation des appuis a une influence moindre (0,1 - 3,3 %). Une calibration du modèle numérique est proposée, basée sur des mesures de vibrations réalisées sur la passerelle et sur les rampes.

Les mesures expérimentales se font à l'aide d'un téléphone portable par le biais de l'application Phyphox qui permet d'enregistrer les valeurs de l'accélération dans les trois directions. La fréquence fondamentale de la passerelle est mesurée, ainsi que celle de chacune des rampes. Le mode de vibration fondamental de la passerelle est identifié comme étant le premier mode de flexion verticale. Dans le cas des rampes, cependant, il n'a pas été possible d'identifier le mode de vibration associé à la fréquence mesurée. La calibration du modèle numérique se réalise par conséquent à partir du premier mode de flexion verticale de la passerelle. La différence de fréquence entre le modèle numérique et les résultats expérimentaux est de 1,7 %.

Les mesures de vibration ont permis de déterminer en outre le taux d'amortissement associé au premier mode vertical de la passerelle, ainsi que de quantifier l'effet du vent et des coureurs sur la passerelle. Les amplitudes d'accélération atteintes sont présentées et comparées à l'État Limite de Service de vibrations. Ce dernier est atteint lorsque trois coureurs ou plus traversent la passerelle de manière synchronisée à un rythme qui provoque la résonance de son mode fondamental.

En ce qui concerne le comportement en résistance de la passerelle, la vérification des États Limite Ultimes de résistance et de flambage est réalisée sur le modèle numérique suite à l'introduction des charges liées au passage de piétons, au vent et à la neige. Les éléments les plus sollicités sont les diagonales latérales: elles atteignent 92 % de l'ELU de résistance et 97 % de l'ELU de flambage, selon des hypothèses conservatrices.

Índice general

Agradecimientos	I
Resumen	II
Résumé	III
Abreviaturas	IX
1 Introducción	1
1.1 Objeto	1
1.2 Presentación de la pasarela	1
1.2.1 Descripción general	1
1.2.2 Elementos estructurales	3
2 Antecedentes	5
2.1 Uso de aplicaciones móviles para la medición de vibraciones	5
2.1.1 Estado del arte	5
2.1.2 Estudio de aplicaciones móviles	5
2.2 Calibración de los modelos numéricos	7
2.3 Comportamiento dinámico de las pasarelas	7
2.3.1 Comportamiento frente a peatones, corredores y ciclistas	7
2.3.2 Amortiguamiento	7
2.4 Normativa	8
3 Metodología	9
3.1 Modelo numérico	9
3.1.1 Mediciones dimensionales	9
3.1.2 Modelado en SAP2000	10
3.1.3 Comportamiento del modelo preliminar	12
3.2 Parte experimental	14
3.2.1 Medidas ambientales	14
3.2.2 Medición de las vibraciones provocadas por corredores	15
3.2.3 Medición del amortiguamiento de la pasarela en su modo fundamental	15
3.3 Proceso de tratamiento de datos y cálculos	16
3.3.1 Determinación de la frecuencia fundamental de la pasarela y de las rampas	16
3.3.2 Amplitudes de aceleración en condiciones de uso	17
3.3.3 Determinación del amortiguamiento	17
3.3.4 Incertidumbres	18
3.4 Estudio de sensibilidad y calibración del modelo	19
3.4.1 Parámetros de estudio	19
3.4.2 Calibración del modelo	21
3.5 Comprobación de los Estados Límite	22
3.5.1 Acciones consideradas	22
3.5.2 ELU de resistencia de las secciones	23
3.5.3 ELU de resistencia a pandeo de los elementos	23

4	Resultados	24
4.1	Resultados experimentales	24
4.1.1	Ensayos ambientales	24
4.1.2	Amplitud de aceleración provocada por corredores	26
4.1.3	Amortiguamiento	26
4.2	Estudio de sensibilidad y calibración	28
4.2.1	Estudio de sensibilidad sobre la pasarela	28
4.2.2	Calibración de la pasarela	28
4.2.3	Estudio de sensibilidad sobre las rampas	29
4.2.4	Calibración de las rampas	31
4.3	Frecuencias y modos de vibración	32
4.3.1	Pasarela	32
4.3.2	Rampas	33
4.4	Comprobación de los Estados Límite de la pasarela	34
4.4.1	ELU de resistencia de las secciones	34
4.4.2	ELU de resistencia a pandeo de los elementos	35
5	Discusión	36
5.1	Parte experimental	36
5.1.1	Uso de un teléfono móvil para la medición de aceleraciones	36
5.1.2	Medidas ambientales	36
5.1.3	Efecto de corredores sincronizados	36
5.1.4	Efecto del viento	36
5.1.5	Amortiguamiento	36
5.1.6	Intentos para detectar modos de vibración adicionales	37
5.2	Modelo numérico	37
5.2.1	Influencia de los parámetros de estudio	37
5.2.2	Calibración del modelo	37
5.2.3	Estados Límite Últimos	37
6	Conclusiones	38
6.1	Parte experimental	38
6.2	Modelo numérico	38
A	Código Matlab para la obtención del espectro de frecuencia	40
B	Acciones consideradas para la verificación de los Estados Límite	41
B.1	Peso propio	41
B.2	Sobrecarga de uso	41
B.3	Viento	41
B.3.1	Empuje horizontal	41
B.3.2	Empuje vertical	45
B.4	Nieve	45
B.5	Combinaciones para comprobaciones en ELU	47
C	ELU de Resistencia a Pandeo	48

Índice de figuras

1.1	Vista general de la pasarela	1
1.2	Elementos de la pasarela	2
1.3	Plano simplificado de la pasarela	3
1.4	Plano simplificado de las rampas	4
1.5	Chapa labrada de los tableros	4
3.1	Instrumentos de medición de la geometría	9
3.2	Modelo numérico de la estructura	10
3.3	Modelado de los pilares	11
3.4	Conexiones entre elementos	12
3.5	Condiciones de contorno	12
3.6	Primer modo de flexión vertical de la pasarela (2,57 Hz)	12
3.7	Modos de vibración de la pasarela	13
3.8	Primer modo de flexión vertical de las rampas (6,03 Hz)	13
3.9	Modos de vibración de las rampas	13
3.10	Ubicación de las medidas ambientales	15
3.11	Ensayo con 3 corredores	15
3.12	Ejemplos de espectros de frecuencia de las medidas ambientales	16
3.13	Valores de referencia de aceleraciones para el confort de los peatones (IAP-11)	17
3.14	Respuesta libre de la pasarela	17
3.15	Enrejado de la estructura	19
3.16	Introducción del enrejado en el modelo	20
3.17	Apoyos de la estructura	20
3.18	Introducción de muelles de torsión en los apoyos	21
3.19	Introducción de muelles de tracción-compresión en los apoyos	21
4.1	Componente vertical de las medidas ambientales en la pasarela	24
4.2	Espectro de frecuencia de las medidas ambientales en la pasarela	25
4.3	Espectro de frecuencia de las medidas ambientales en la rampa 1	25
4.4	Espectro de frecuencia de las medidas ambientales en la rampa 2	25
4.5	Aparición de dos picos de frecuencia en las medidas ambientales (rampas)	26
4.6	Resultados del ensayo con corredores	27
4.7	Respuesta libre de la pasarela para la determinación del amortiguamiento	27
4.8	Influencia de los parámetros de estudio sobre la frecuencia del primer modo vertical de la pasarela	28
4.9	Influencia de los parámetros de estudio sobre la frecuencia del primer modo de flexión vertical de las rampas	29
4.10	Influencia de los parámetros de estudio sobre la frecuencia del segundo modo de flexión vertical de la rampa 1	30
4.11	Influencia de los parámetros de estudio sobre la frecuencia del segundo modo de flexión vertical de la rampa 2	30
4.12	Modos de vibración del modelo calibrado de la pasarela	32
4.13	Modos de vibración del modelo calibrado de las rampas	33
4.14	Tensión axil. Rojo=compresión, azul=tracción	34
4.15	Tensión axil en la diagonal extrema	34

B.1	Mapa de isotacas para la obtención de la velocidad básica fundamental del viento $v_{b,0}$ (fuente: IAP-11)	42
B.2	Coefficiente de fuerza c_f para las secciones más habituales (fuente: IAP-11)	43

Índice de tablas

1.1	Listado de perfiles de la pasarela	3
1.2	Listado de perfiles de las rampas	4
2.1	Estudio de aplicaciones para móvil	6
2.2	Características del teléfono	6
2.3	Características del acelerómetro	6
3.1	Precisión de los instrumentos	9
3.2	Etapas del modelado	10
3.3	Propiedades de los materiales	11
3.4	Frecuencias naturales de la pasarela (modelo preliminar)	13
3.5	Frecuencias naturales de las rampas (modelo preliminar)	14
3.6	Valores característicos de las acciones	22
3.7	Coefficientes parciales γ_F y de combinación ψ_0 de las acciones	22
4.1	Frecuencias observadas en los ensayos ambientales (pasarela)	24
4.2	Frecuencias observadas en los ensayos ambientales (rampas)	26
4.3	Valores máximos de aceleración provocados por corredores sincronizados y viento	26
4.4	Amortiguamiento de la pasarela	26
4.5	Sensibilidad del modelo de la pasarela a los parámetros de estudio (sobre el primer modo vertical)	28
4.6	Valores de calibración de los parámetros de estudio (pasarela)	29
4.7	Diferencia entre el modelo calibrado y la frecuencia experimental (pasarela)	29
4.8	Sensibilidad del modelo a los parámetros de estudio (sobre el primer modo de flexión vertical de las rampas)	29
4.9	Sensibilidad del modelo a los parámetros de estudio (segundo modo vertical de las rampas)	30
4.10	Valores de calibración (rampas)	31
4.11	Frecuencias naturales del modelo calibrado de la pasarela	32
4.12	Frecuencias naturales del modelo calibrado de la rampa 1	33
4.13	Frecuencias naturales del modelo calibrado de la rampa 2	33
4.14	Valores de tensión de Von Mises en la pasarela y resultado frente al ELU de resistencia	34
4.15	Resultados de la comprobación del ELU de pandeo	35
B.1	Coefficientes k_r , z_0 y z_{min} según el tipo de entorno	44
B.2	Empuje horizontal	44
B.3	Coefficiente de ocultamiento η	45
B.4	Sobrecarga de nieve sobre un terreno horizontal en las capitales de provincia y ciudades autónomas	46
B.5	Coefficientes parciales γ_F y de combinación ψ_0 de las acciones	47
C.1	Efecto del esfuerzo cortante	49
C.2	Resultados de la comprobación del ELU de pandeo	50

Abreviaturas

a	Aceleración	[m/s ²]
b	Ancho de un perfil	[mm]
e	Espesor	[mm]
f	Frecuencia	[Hz]
f_m	Frecuencia de muestreo	[Hz]
F_w	Empuje de viento horizontal sobre una barra	[N/m]
$F_{w,z}$	Empuje de viento vertical sobre el tablero	[N/m ²]
h	Altura de un perfil	[mm]
m	Número de muestras	
n	Número de periodos	
P	Perímetro de un perfil	[mm]
q_b	Presión de la velocidad del viento	[N/m ²]
q_{fk}	Presión de la sobrecarga de uso	[N/m ²]
t	Tiempo	[s]
T	Periodo	[s]
δ	Decremento logarítmico	
σ	Tensión	[N/m ²]
ζ	Tasa de amortiguamiento	
DFT	Transformada Discreta de Fourier	
FFT	Transformada Rápida de Fourier	
ELS	Estado Límite de Servicio	
ELU	Estado Límite Último	

1. Introducción

1.1. Objeto

El objeto de este trabajo es la caracterización del comportamiento dinámico de una pasarela metálica. El trabajo conlleva varias problemáticas. El primer objetivo, tras haber desarrollado un modelo numérico de Elementos Finitos de la pasarela, es calibrarlo mediante medidas experimentales de vibración realizadas con una aplicación móvil. En particular se identifica la frecuencia fundamental de vibración de la estructura. Para ello, se realiza previamente un estudio comparativo de aplicaciones que permiten la medición de aceleraciones y se selecciona una de ellas para la realización de los ensayos. El segundo objetivo es estudiar el comportamiento dinámico de la pasarela. Se determinan en base al modelo numérico calibrado los primeros modos y frecuencias de vibración de la pasarela, y se estudia experimentalmente el efecto de los peatones y corredores, así como la acción del viento. Finalmente, se verifican los Estados Límite Últimos de la estructura con el modelo numérico calibrado.

1.2. Presentación de la pasarela

1.2.1. Descripción general

La estructura de estudio es la pasarela peatonal situada en las coordenadas GPS (40.0135, -0.0943), 12190 Borriol, Castellón. Cruza la Autovía de la Plana (CV-10) al Noroeste de Castellón de la Plana. Consta de 3 partes metálicas (llamadas a continuación *Pasarela*, *Rapa 1* y *Rampa 2*) y dos pilares intermedios (*Pilar 1* y *Pilar 2*). La pasarela mide 54 m de largo con un ancho útil de 3 m. Las rampas 1 y 2 son idénticas y miden cada una 21 m de largo con un ancho de 3 m.



Figura 1.1: Vista general de la pasarela



(a) Entrada pasarela



(b) Entrada rampas



(c) Pilar 1



(d) Pilar 2



(e) Rampa 1 (izquierda) y rampa 2 (derecha)

Figura 1.2: Elementos de la pasarela

1.2.2. Elementos estructurales

La pasarela y las rampas están constituidas por una estructura metálica que apoya sobre pilares de hormigón.

Pasarela

Los elementos que componen la pasarela se pueden ver en el plano siguiente (Figura 1.3) y en la lista de perfiles (Tabla 1.1). Los planos completos de la estructura se encuentran en el documento Planos.

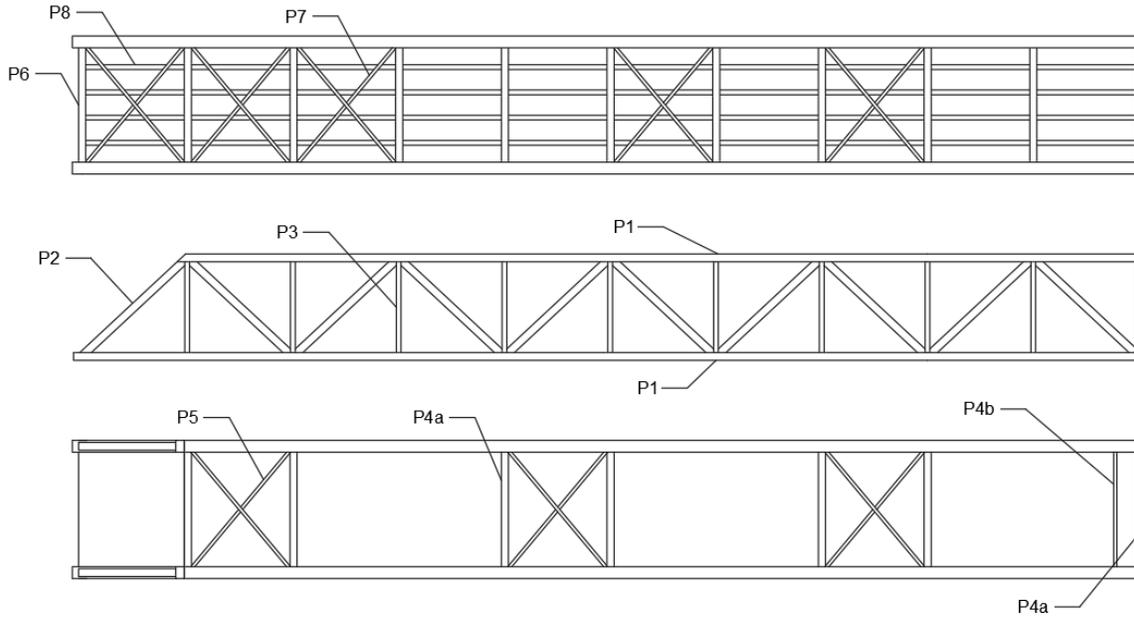


Figura 1.3: Plano simplificado de la pasarela

Tabla 1.1: Listado de perfiles de la pasarela

Código	Nombre	Tipo de perfil	Dimensiones (mm)	Cantidad
P1	Viga principal	Doble UPN300	300x200	4
P2	Diagonal lateral	Cuadrado hueco	200x200x4	40
P3	Montante lateral	Rectangular hueco	200x120x5	38
P4a	Montante superior 1	Cuadrado hueco	180x180x10	13
P4b	Montante superior 2	Cuadrado hueco	80x80x5	2
P5	Diagonal superior	Cuadrado hueco	80x80x5	12
P6	Montante inferior	Cuadrado hueco	180x180x10	21
P7	Diagonal inferior	Cuadrado hueco	80x80x5	20
P8	Vigueta	Rectangular hueco	120x80x4	80

Rampas

Los elementos de cada rampa se pueden ver en el plano siguiente (Figura 1.4) y en la lista de perfiles (Tabla 1.2).

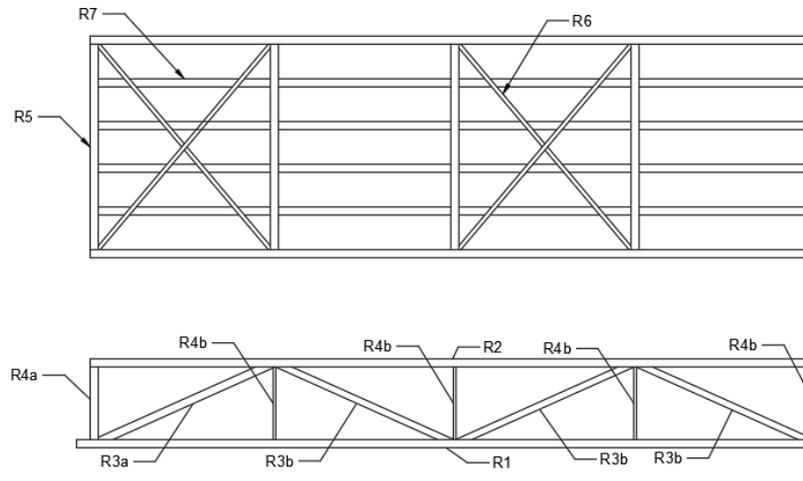


Figura 1.4: Plano simplificado de las rampas

Tabla 1.2: Listado de perfiles de las rampas

Código	Nombre	Tipo de perfil	Dimensiones (mm)	Cantidad
R1	Viga principal	Cuadrado hueco	120x120x8	2
R2	Viga superior	Cuadrado hueco	120x120x10	2
R3a	Diagonal lateral exterior	Rectangular hueco	120x120x6	4
R3b	Diagonal lateral interior	Cuadrado hueco	100x100x4	12
R4a	Montante lateral exterior	Cuadrado hueco	120x120x6	4
R4b	Montante lateral interior	Rectangular hueco	100x40x2	14
R5	Montante inferior	Cuadrado hueco	120x120x6	9
R6	Diagonal inferior	Rectangular hueco	60x40x3	8
R7	Vigueta	Rectangular hueco	120x80x4	32

Tableros

Los tableros de la pasarela y las rampas constan de una chapa labrada de 5 mm de espesor soldada sobre las viguetas (Figura 1.5).



Figura 1.5: Chapa labrada de los tableros

2. Antecedentes

Se presenta en esta parte un estado del arte, con el fin de explorar las publicaciones existentes de acuerdo con los objetivos del proyecto. Estos estudios sirven de base para la elaboración de la metodología del trabajo. Se revisan publicaciones sobre el uso de aplicaciones móviles para la medición de aceleraciones, sobre la calibración de los modelos numéricos y sobre el comportamiento dinámico de las pasarelas. También se presenta en esta parte la selección de la aplicación utilizada para la medición de las aceleraciones. Finalmente se revisa el marco normativo aplicado a las pasarelas peatonales.

2.1. Uso de aplicaciones móviles para la medición de vibraciones

2.1.1. Estado del arte

Existen pocos estudios sobre la aptitud de las aplicaciones móviles para medir vibraciones y valorar el comportamiento dinámico de estructuras incurriendo en costes reducidos. Cahill et al [1] publicaron un estudio comparativo de 12 aplicaciones móviles en el cual muestran que las aplicaciones suelen medir las frecuencias con buena precisión, pero tienen una precisión variable en amplitudes de la aceleración. Feldbusch et al [2] insisten en que la resolución del acelerómetro es un factor crucial en cuanto a la capacidad del smartphone para medir vibraciones. Una alta resolución resulta en una disminución del ruido y una señal más precisa. Destacan también la importancia de la frecuencia de muestreo. Una frecuencia superior a los 100 Hz es recomendada para medir altas frecuencias, pero también aumenta considerablemente la precisión en la medición de bajas frecuencias. Concluyen que el uso de acelerómetros con una frecuencia de muestreo de 100 Hz conviene para la medición de frecuencias naturales de estructuras flexibles como puentes, incluso en condiciones ambientales. Añaden que en el caso de los puentes, la presencia del tráfico y del viento puede ser útil para medir sus frecuencias naturales. Además, un largo tiempo de grabación mejora considerablemente la determinación de la frecuencia natural.

El uso de aplicaciones móviles no pretende sustituir el uso de dispositivos concebidos para medir vibraciones (basados en acelerómetros piezoresistivos, piezoeléctricos, capacitivos, etc.). Es una herramienta adicional que puede ser útil para tener una idea cualitativa de las primeras frecuencias y modos de vibración de una estructura, así como de su nivel de amortiguamiento.

2.1.2. Estudio de aplicaciones móviles

Se presenta en esta parte el proceso de selección de la aplicación móvil utilizada para la medición de vibraciones, y se detallan las principales características del acelerómetro y del teléfono.

Selección de la aplicación

Un estudio comparativo se realizó entre 16 aplicaciones disponibles en el GooglePlay Store [3]. La comparación se hizo en base a los criterios siguientes:

- la posibilidad de medir la aceleración en los 3 ejes
- la posibilidad de exportar los datos
- el tiempo máximo de grabación
- la presencia de estas funcionalidades en la versión gratuita.

El resultado de este estudio se encuentra resumido en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1: Estudio de aplicaciones para móvil

Nombre	Fabricante	Versión	Aceleración 3 ejes	Exportación de datos	Tiempo de grabación
Accelerometer Analyzer	Mobile Tools		Sí	Sí	Ilimitado
Accelerometer Meter	keuwlsoft		Sí	No	100 s
Best Vibrometer	Netigen Tools		No	No	- ²
Medidor de vibraciones	Toolkit		Sí	No	-
Medidor de vibración	maruar	1.1.0	No	No	5 h
Medidor de vibración	Netigen Tools		Sí	No	-
Phyphox	physical phone experiments	1.1.6	Sí	Sí	Ilimitado
Resonance	Here Pluto Laboratories	1.5.3	Sí	Sí ¹	10 s
Vibration Analysis	Kröber		Sí	No	-
Vibration Analysis	A4U TEAM		Sí	No	-
Vibration Meter	Gamma Play		Sí	No	5 s
Vibration Meter	Smart Tools co.	1.6.6	No	No	-
Vibrations Analysis	ENGIN		Sí	No	-
Vibrations FFT	Vibrations		Sí	No	16 s
Vibrometer	EXA Tools	1.4.04.240	Sí	Sí ¹	15 s
VibSensor	Now Instruents & Software, Inc.	2.1.1	Sí	Sí ¹	10 min

¹ Únicamente en la versión de pago

² No se permite grabar, solamente observar la aceleración instantánea

Entre las 16 aplicaciones probadas, la gran mayoría permite medir la aceleración en los tres ejes. Sin embargo, no más de 5 permiten descargar los datos para poder analizarlos. Dos de ellas lo permiten en su versión gratuita: Accelerometer Analyzer y Phyphox. Además, no tienen límite de tiempo de grabación. La principal limitación de Accelerometer Analyzer es la imposibilidad de grabar el valor del tiempo. Por esa razón se utiliza en este trabajo la aplicación Phyphox.

Características del acelerómetro y del teléfono

Las características del teléfono utilizado se pueden ver en la Tabla 2.2. La Tabla 2.3 indica las características del acelerómetro que éste contiene. Su frecuencia de muestreo es superior a la frecuencia mínima recomendada por Feldbusch et al (100 Hz).

Tabla 2.2: Características del teléfono

Marca	Xiaomi
Modelo	Redmi 7
Versión MIUI	Global 11.0.10.0
Versión Android	9 PKG1.181021.001

Tabla 2.3: Características del acelerómetro

Fabricante	STMicroelectronics
Modelo	LIS2HH12
Tecnología	MEMS (Sistema Micro Electro Mecánico)
Rango de aceleración	$\pm 2 \text{ g} = \pm 19,6 \text{ m/s}^2$
Precisión	$\pm 30 \text{ mg} = \pm 0,29 \text{ m/s}^2$
Resolución	0,061 mg/digit
Frecuencia de muestreo	200 Hz

2.2. Calibración de los modelos numéricos

La calibración de los modelos numéricos es un tema que se ha investigado mucho en las últimas décadas, primero en el sector de la ingeniería mecánica y aeroespacial, y progresivamente en la ingeniería civil. Es una etapa clave para garantizar la fiabilidad de un modelo en la representación del comportamiento real de una estructura. Tiene como objetivo reducir al máximo la discrepancia que suele existir antes de la calibración entre el comportamiento del modelo y el de la propia estructura. Si bien la similitud entre el modelo y los valores experimentales es el objetivo principal, no se puede olvidar que los parámetros modificados tienen que conservar un significado físico.

Varios aspectos se han de tener en cuenta a la hora de realizar la calibración. Primero, tiene suma importancia la selección de los parámetros de respuesta del sistema. Son parámetros que se pueden comparar con valores experimentales. Suelen ser las frecuencias naturales de la estructura pero se pueden utilizar también los desplazamientos de puntos identificados de la pasarela durante pruebas de carga, por ejemplo. También es importante la selección de los parámetros de calibración, es decir los parámetros que se van a modificar durante el proceso. Hester et al [4] indican que una modelización correcta de las condiciones de contorno es crucial para la precisión del modelo. En este estudio, la modificación del tipo de apoyos jugó un papel importante en la calibración del modelo del puente estudiado cuando se observaba su respuesta dinámica.

Finalmente, existen varios métodos de calibración. Una calibración manual permite eliminar las principales diferencias. Una vez se dispone de un modelo lo suficientemente representativo de la estructura, se puede refinar la calibración con métodos numéricos de optimización. Los estudios de Merce et al [5] y Sequera-Gutierrez et al [6] son ejemplos de una calibración automatizada realizada con el programa Ansys [7].

2.3. Comportamiento dinámico de las pasarelas

Las pasarelas son generalmente estructuras esbeltas y por ello particularmente sensibles a las vibraciones. Sus primeras frecuencias naturales se pueden encontrar en un rango que coincide con la acción de los usuarios.

2.3.1. Comportamiento frente a peatones, corredores y ciclistas

La acción de los peatones no suele provocar efectos dinámicos decisivos a la hora de diseñar la pasarela. Existen casos excepcionales como el de la Passerelle Solférino en París y el Millenium Bridge en Londres donde la sincronización de una multitud de peatones provocaba la resonancia de un modo de vibración lateral [8]. Pero esta situación está fuera de las condiciones normales de uso de la pasarela de Borriol. Lo que sí corresponde a una situación normal de uso sería el paso de un grupo de corredores o de ciclistas. El paso de ciclistas no suele provocar vibraciones importantes pero el caso de los corredores es distinto.

Los efectos de la acción de los corredores sobre las pasarelas no se suelen considerar en el diseño de una pasarela. Esto se debe a que la duración de la acción del corredor en general no es suficiente para provocar el estado de resonancia [9]. Pero en estructuras particularmente esbeltas y considerando grupos de corredores sincronizados a una frecuencia próxima a la frecuencia natural de la pasarela, los efectos dejan de ser despreciables. No amenazan la integridad de la estructura, pero sí provocan amplitudes de aceleración vertical posiblemente molestas desde el punto de vista del confort de los peatones.

2.3.2. Amortiguamiento

El amortiguamiento de la estructura asociado a sus modos de vibración determina en gran parte su comportamiento dinámico, por lo que es un elemento decisivo en el diseño de una pasarela. Existen recomendaciones en cuanto al valor de la tasa de amortiguamiento ζ para mitigar los efectos de resonancia. Heinemeyer et al [10] recomiendan para pasarelas de acero un valor medio de $\zeta = 0,4\%$ y un

mínimo de $\zeta = 0,2\%$. Se proponen valores similares en la guía SETRA [9], el Eurocódigo 1 [11] y en Patak et al [12].

2.4. Normativa

Para las acciones a considerar en la comprobación de los Estados Límite de la estructura, la normativa de referencia es la Instrucción IAP-11 (sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carretera en España) [13]. Es una guía nacional basada en el Eurocódigo 1 (EN 1991, Acciones sobre las estructuras), publicada por el Ministerio de Fomento en 2012.

El Eurocódigo 3 (EN 1993, Diseño de estructuras de acero) [14], y en particular la Parte 2 (Puentes) es de especial interés. Se siguen sus recomendaciones para la comprobación de los Estados Límite. En el ámbito de las vibraciones, el Eurocódigo 3 simplemente indica que *“en los puentes para peatones y en los puentes para ciclistas en los que las vibraciones excesivas puedan causar incomodidad a los usuarios, deberían adoptarse medidas que minimicen dichas vibraciones proyectando el puente con frecuencias naturales apropiadas o colocando dispositivos de amortiguación adecuados.”* Pero no definen lo que son *“vibraciones excesivas”*. La Instrucción IAP-11 aporta precisión y define las amplitudes de aceleración vertical y transversal a utilizar para la comprobación del ELS de vibraciones.

3. Metodología

En esta parte se expone la metodología empleada para alcanzar los objetivos presentados en la introducción. Está dividida en 5 secciones: el modelo numérico, las mediciones de vibración, el tratamiento de datos, el estudio de sensibilidad y la comprobación de los Estados Límite.

3.1. Modelo numérico

3.1.1. Mediciones dimensionales

No se disponía de planos de la estructura, por lo que la elaboración del modelo numérico se basa en medidas tomadas en la pasarela. Se determinaron sus dimensiones, los perfiles empleados y la naturaleza de las conexiones entre los elementos. Para ello, se ha hecho uso de un medidor láser, una cinta métrica de 20 m y una regla de 30 cm (Figura 3.1). La Tabla 3.1 indica la precisión de cada instrumento.

Tabla 3.1: Precisión de los instrumentos

Instrumento	Precisión
Cinta métrica	± 10 mm
Metro láser	± 2 mm
Regla	± 1 mm



(a) Cinta métrica



(b) Medidor láser



(c) Regla

Figura 3.1: Instrumentos de medición de la geometría

La determinación del espesor de los perfiles tubulares se hace de manera indirecta. Se supone que la relación entre su espesor e y su radio r es $r = 2e$. El valor del radio se calcula a partir del perímetro P mediante la expresión:

$$r = \frac{P - 2h - 2b}{2\pi - 8}$$

donde h y b son el ancho y la altura de la sección recta del perfil.

El perímetro se mide directamente con la cinta métrica. Hay cierta incertidumbre asociada a este método de determinación del espesor del perfil debido a la medición del perímetro, así que la aproximación en la relación entre r y e .

3.1.2. Modelado en SAP2000

El modelo numérico de Elementos Finitos se realiza con SAP2000v21 [15]. Las etapas de modelado de la versión preliminar (previa a la calibración) son las presentadas en el diagrama siguiente. Se describe a continuación la manera en que se han modelado los distintos elementos de la pasarela.

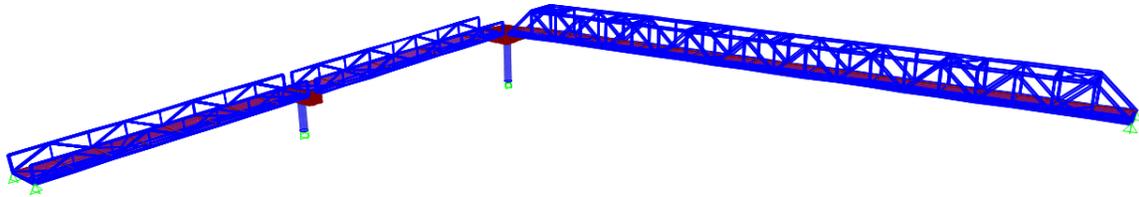


Figura 3.2: Modelo numérico de la estructura

Tabla 3.2: Etapas del modelado

1. Sistema de coordenadas y unidades
2. Definición de los materiales
3. Definición de los perfiles
4. Creación de los elementos
5. Asignación de los perfiles
6. Conexiones entre elementos
7. Condiciones de contorno

Sistema de coordenadas

Cada parte de la estructura (Pasarela, Rampa 1 y Rampa 2) tiene su propio sistema de coordenadas. Por convención:

- X hace referencia al eje longitudinal
- Y hace referencia al eje transversal
- Z hace referencia al eje vertical

Se utilizará esta norma en el resto del documento.

Materiales

Las propiedades de los materiales empleados en el modelo se pueden ver en la Tabla 3.3. Se emite la hipótesis de un comportamiento elástico lineal de los materiales.

Tabla 3.3: Propiedades de los materiales

Material	Denominación	Densidad ρ [kg/m ³]	Módulo de elasticidad E [GPa]	Coefficiente de Poisson ν [-]
Acero	S275	7849	210	0,3
Hormigón	C35/45	2548	34	0,2

Elementos metálicos

Las barras se modelizan con elementos de tipo *Frame* cuyos nudos tienen seis grados de libertad. Los perfiles utilizados son los contenidos en la base de datos *Euro.pro* de SAP2000. Cuando no existen, se introducen manualmente en base a las propiedades encontradas en los catálogos de los fabricantes. Los tableros tanto de la pasarela como de las rampas se modelizan mediante una sección de área de tipo *Shell-Thin* de 5 mm de espesor cuyos nudos tienen también seis grados de libertad. El enrejado no se modeliza directamente: únicamente se toma en cuenta su peso, el cual se introduce en las vigas UPN mediante un coeficiente corrector de la masa.

Pilares

La parte circular de los pilares se modeliza con un elemento de tipo *Frame*, con la sección correspondiente, mientras que la plataforma es un elemento sólido 3D (Figura 3.3), cuyos nudos poseen 3 grados de libertad en desplazamientos y ninguno en rotación.

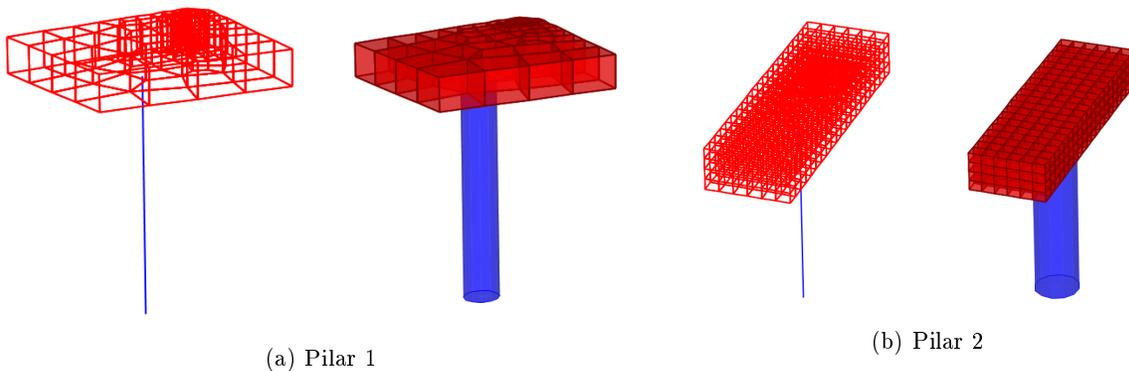


Figura 3.3: Modelado de los pilares

Conexiones entre elementos

Todas las conexiones entre los elementos metálicos son rígidas (transmisión de esfuerzos en los 6 grados de libertad), excepto las extremidades de los tirantes. Para estos elementos, se liberan dos grados de libertad: no transmiten momentos flectores (Figura 3.4a). Los apoyos de la pasarela y de las rampas sobre los pilares se modelizan como apoyos simples. Se crea una unión (*Joint Constraint*) entre el nudo extremo de la barra y los 4 nudos más próximo del sólido (Figura 3.4b), restringiendo los desplazamientos en las 3 direcciones y dejando libres las rotaciones. La conexión entre la cabeza de los pilares y su plataforma también se modeliza con una *Joint Constraint* pero en este caso como empotramiento, es decir restringiendo además las rotaciones.

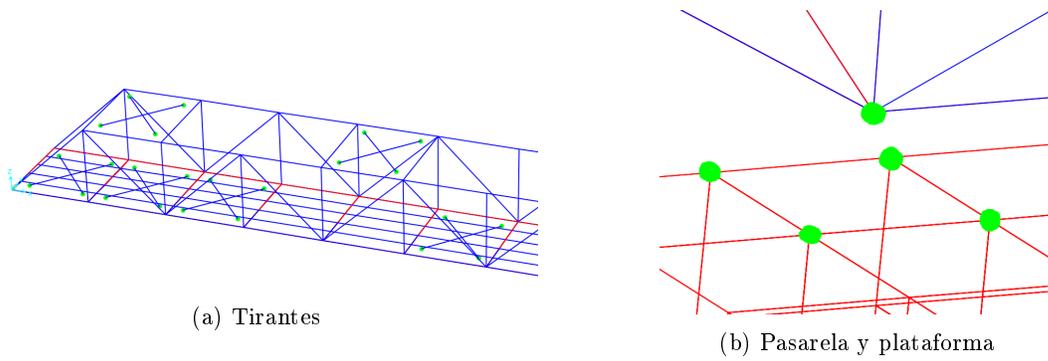


Figura 3.4: Conexiones entre elementos

Condiciones de contorno

Los apoyos de la pasarela y de la rampa 1 sobre el terreno se modelizan como apoyos simples, introduciendo una restricción (*Restraint*) en los 3 desplazamientos, dejando libre las rotaciones (Figura 3.5a). La base de los pilares, en cambio, se define como empotrada (Figura 3.5b).

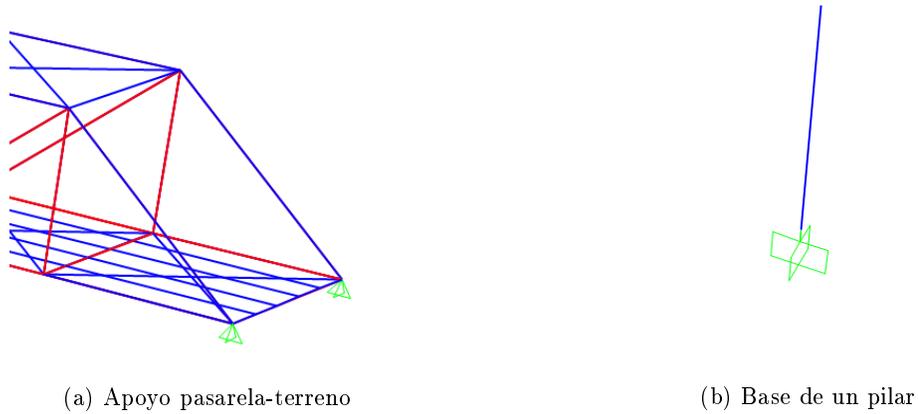


Figura 3.5: Condiciones de contorno

3.1.3. Comportamiento del modelo preliminar

Un primer análisis modal se realiza con el modelo preliminar. El modo fundamental de la estructura es el primer modo de flexión vertical de la pasarela (Figura 3.6). Se corresponde con las primeras observaciones realizadas in situ. La Figura 3.7 muestra los demás modos de la pasarela y la Tabla 3.4 indica las frecuencias correspondientes.

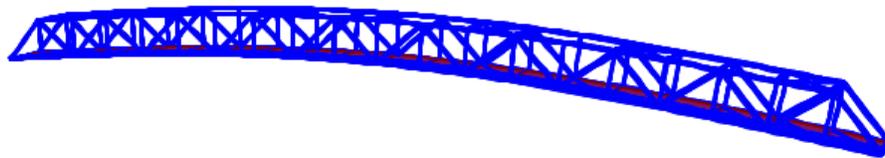


Figura 3.6: Primer modo de flexión vertical de la pasarela (2,57 Hz)

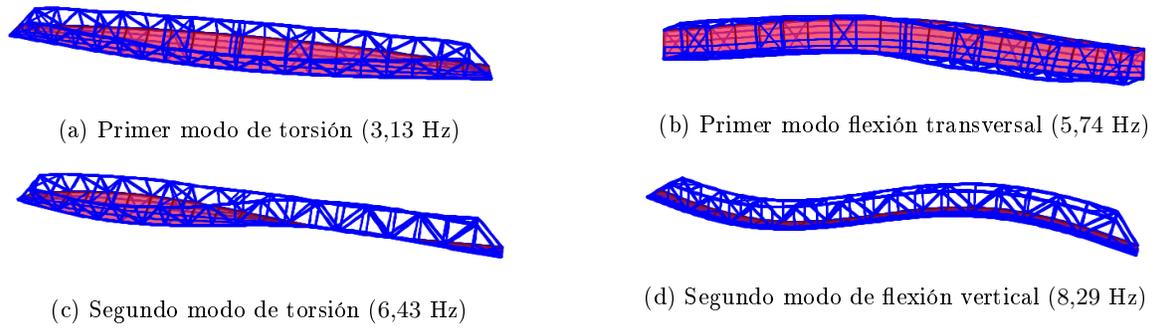


Figura 3.7: Modos de vibración de la pasarela

Tabla 3.4: Frecuencias naturales de la pasarela (modelo preliminar)

Modo	Frecuencia [Hz]
Primer modo de flexión vertical	2,57
Primer modo de torsión	3,13
Primer modo flexión transversal	5,74
Segundo modo de torsión	6,43
Segundo modo de flexión vertical	8,29

En el caso de las rampas, aparecen varios modos que contienen flexión vertical. El primer modo de vibración es el de flexión vertical pura (en 6,03 Hz) que se puede observar en la Figura 3.8. Luego, las rampas presentan varios modos combinados de flexión vertical y torsión, y un modo de torsión pura (Figura 3.9). La Tabla 3.5 indica las frecuencias asociadas a estos modos.

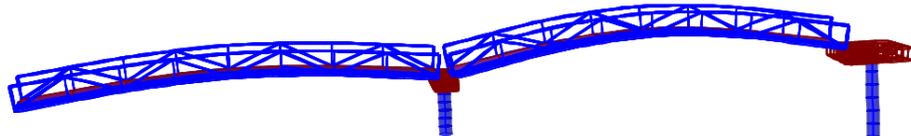


Figura 3.8: Primer modo de flexión vertical de las rampas (6,03 Hz)

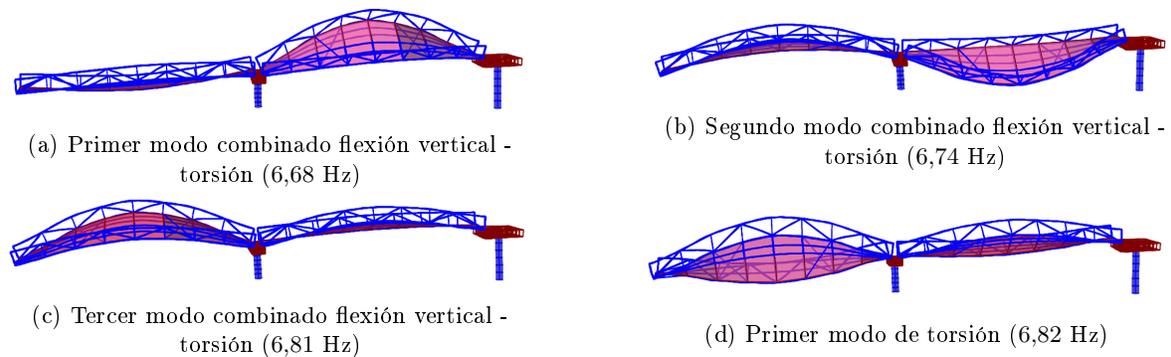


Figura 3.9: Modos de vibración de las rampas

Tabla 3.5: Frecuencias naturales de las rampas (modelo preliminar)

Modo	Frecuencia [Hz]
Primer modo de flexión vertical	6,03
Primer modo combinado flexión vertical - torsión	6,68
Segundo modo combinado flexión vertical - torsión	6,74
Tercer modo combinado flexión vertical - torsión	6,81
Primer modo de torsión	6,82

3.2. Parte experimental

La parte experimental del trabajo consiste en mediciones de vibración en la pasarela en distintas situaciones. Estas mediciones responden a dos objetivos distintos:

1. *Calibrar el modelo numérico.* Para ello se quiere medir la frecuencia del primer modo vertical tanto de la pasarela como de las rampas con un nivel de precisión aceptable.
2. *Valorar el nivel de vibración que experimenta la pasarela en condiciones de uso.* Se divide en tres partes:
 - a) Determinar el nivel de vibración provocado por corredores sincronizados
 - b) Valorar el efecto del viento y demás vibraciones ambientes (tráfico rodado sobre vial inferior) sobre la pasarela
 - c) Determinar la tasa de amortiguamiento del primer modo vertical de la pasarela. El nivel de amortiguamiento determina en gran medida el comportamiento dinámico de la pasarela, por lo que se desea cuantificar de manera fiable.

Se presenta en esta parte la metodología empleada para llevar a cabo estos objetivos.

3.2.1. Medidas ambientales

Se realizan medidas ambientales con el fin de medir la frecuencia fundamental de la pasarela y de las rampas y observar el efecto del viento. El tráfico de la carretera por encima de la cual se sitúa la pasarela provoca vibraciones en la estructura en todas las frecuencias, lo que hace interesante la toma de medidas ambientales. La presencia del viento, además, amplifica estas vibraciones. Los ensayos se realizan entonces con tráfico y con viento (ráfagas de 50 km/h) y se repiten 3 veces.

Las medidas se realizan en el punto de mayor amplitud del primer modo de flexión vertical, es decir en el punto central de la pasarela, y el punto central de cada rampa (Figura 3.10). El teléfono se posiciona de manera que sus ejes internos correspondan a la convención que se ha adoptado (x longitudinal; y transversal; z vertical). El teléfono está simplemente colocado sobre la chapa.

Para la determinación de la frecuencia fundamental, la duración del ensayo determina la resolución del espectro de frecuencia, lo que influye en la precisión del resultado. La resolución en frecuencia es $df = 1/T$ donde T es el tiempo total de grabación. Cuanto mayor sea el tiempo de grabación, mayor será la resolución. Se da como objetivo tener una resolución de 0,01 Hz. Para ello necesitamos grabar con una duración de $T = \frac{1}{df} = \frac{1}{0,01} = 100$ segundos. Los mismos ensayos se utilizan para observar el efecto del viento.



(a) Pasarela

(b) Rampa 1

(c) Rampa 2

Figura 3.10: Ubicación de las medidas ambientales

3.2.2. Medición de las vibraciones provocadas por corredores

El punto de grabación es el punto central de la pasarela dado que se quiere provocar la resonancia del primer modo vertical con el paso de los corredores. El punto central es el punto de mayor amplitud de este modo de vibración. Los corredores avanzan de manera sincronizada entre ellos y con una cadencia correspondiente a la frecuencia del primer modo vertical de la pasarela medida durante los ensayos ambientales. Estos indican que esta frecuencia se sitúa en 2,45 Hz (ver apartado 4.1.1). La cadencia de los corredores es entonces de $2,45 \times 60 = 147$ pasos por minuto, la cual se sigue gracias a un metrónomo. El ensayo empieza cuando los corredores entran en la pasarela y se detiene cuando salen de la pasarela, siendo su duración de 20 segundos aproximadamente. El ensayo se realiza con 1, 2 y finalmente 3 corredores, y se repite 3 veces en cada caso.



Figura 3.11: Ensayo con 3 corredores

3.2.3. Medición del amortiguamiento de la pasarela en su modo fundamental

En este ensayo, una persona realiza saltos en el punto central de la pasarela a una frecuencia correspondiente a la del primer modo vertical (147 bpm) con el fin de provocar la resonancia de la estructura en este modo. Se graba la aceleración en el punto central de la pasarela. Se acciona la grabación cuando la persona cesa de saltar, con el fin de grabar la respuesta libre de la pasarela. Los ensayos se repiten 3 veces. La duración del ensayo tiene que ser suficiente para poder observar el amortiguamiento, es de 20 segundos.

3.3. Proceso de tratamiento de datos y cálculos

Los datos se exportan en formato Microsoft Excel (.xls) [16] y se procesan con Matlab R2020b [17]. Los códigos utilizados se encuentran en el Anexo A.

3.3.1. Determinación de la frecuencia fundamental de la pasarela y de las rampas

En el caso de las medidas ambientales, se requiere el espectro de frecuencia de la señal de aceleración vertical. Para ello el proceso es el siguiente:

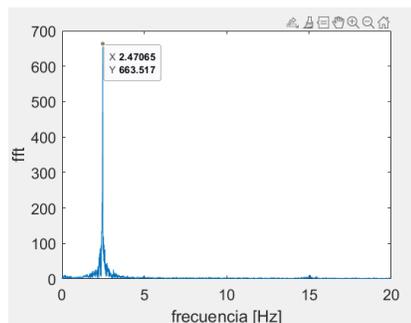
- Se seleccionan los valores de aceleración en el eje Z
- Se elimina el efecto de la gravedad sustrayendo en cada punto el valor medio de aceleración del ensayo
- Se calcula la transformada discreta de Fourier (DFT). Se emplea para ello la función `fft()` que usa el método de transformada rápida de Fourier para su obtención.
- Se asocia el rango de frecuencia correspondiente: de 0 Hz hasta la frecuencia de muestreo. El valor utilizado para la frecuencia de muestreo es $f_m = \frac{m-1}{T}$, donde T es la duración del ensayo y m el número de muestras.

Una vez se tiene el espectro de frecuencia, se lee el valor de la frecuencia fundamental (Figura 3.12a) para cada uno de los tres ensayos y se calcula la media para la pasarela así como para las rampas.

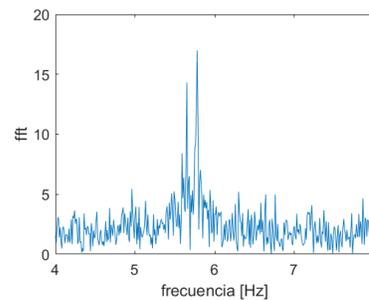
En el caso de las rampas, en 3 ensayos sobre los 6, aparece un doble pico en el espectro de frecuencia (ver Figura 3.12b). Después de analizar los datos brutos de tiempo y aceleración, se emitió la hipótesis de que este fenómeno pudiera venir de la variabilidad del periodo de muestreo y de cómo funciona `fft()` en Matlab. Esta función no utiliza los datos de tiempo para calcular la DFT, sino que se basa en que la frecuencia de muestreo f_m es constante. Sin embargo no es así: se analizaron 3 ensayos de 20 000 muestras y se observó que en cada uno de ellos, en vez de valer siempre $\frac{1}{200} = 0,05$ segundos, el periodo de muestreo vale:

- 0,04974 para 60 % de los periodos (lo que corresponde a $f_m = 201,05$ Hz)
- 0,05005 para 35 % de los periodos (lo que corresponde a $f_m = 199,80$ Hz)
- otro valor aleatorio para el 5 % restante.

Se ve que la frecuencia de muestreo coge sucesivamente dos valores, y eso debería provocar la duplicación de los picos de frecuencia con una diferencia relativa constante de $\frac{201,05-199,80}{201,05} = 0,6\%$. Sin embargo, la diferencia que se observa entre los dos picos varía y se encuentra entre el 1,9 % y el 2,8 %. Además, este fenómeno no aparece en los ensayos sobre la pasarela. Se concluye que estos dos picos corresponden a dos modos de vibración distintos de las rampas.



(a) Pasarela (ensayo 2)



(b) Rampa 1 (ensayo 1)

Figura 3.12: Ejemplos de espectros de frecuencia de las medidas ambientales

3.3.2. Amplitudes de aceleración en condiciones de uso

En el caso de los ensayos con corredores y de las medidas ambientales con viento, se busca el valor máximo de amplitud de la aceleración tras haber eliminado el efecto de la gravedad. Se compara este valor con los valores de referencia de la Instrucción IAP-11 (Figura 3.13) para determinar el grado de confort.

GRADO DE CONFORT	RANGOS DE ACELERACIONES	
	VERTICALES	LATERALES
Máximo	< 0,50 m/s ²	< 0,10 m/s ²
Medio	0,50 a 1,00 m/s ²	0,10 a 0,30 m/s ²
Mínimo	1,00 a 2,50 m/s ²	0,30 a 0,80 m/s ²
No aceptable	>2,50 m/s ²	> 0,80 m/s ²

Figura 3.13: Valores de referencia de aceleraciones para el confort de los peatones (IAP-11)

3.3.3. Determinación del amortiguamiento

Se visualiza la señal de aceleración una vez sustraído el valor de la gravedad. La tasa de amortiguamiento se calcula con el método del decremento logarítmico. Considerando dos máximos locales de la señal, se calcula el decremento logarítmico como:

$$\delta = \frac{1}{n} \ln\left(\frac{a(t)}{a(t+nT)}\right)$$

donde:

- $a(t)$ es la aceleración en el tiempo t ,
- T es el periodo de la señal de aceleración,
- n es el número de periodos considerados.

La tasa de amortiguamiento se obtiene como:

$$\zeta = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{2\pi}{\delta}\right)^2}}$$

El cálculo del decremento logarítmico se realiza con los 48 primeros periodos de la respuesta libre de la pasarela, lo que corresponde a una duración de 19,5 segundos. Se puede observar en la Figura 3.14 el resultado de un ensayo donde los puntos considerados para el cálculo del decremento logarítmico se indican con un círculo.

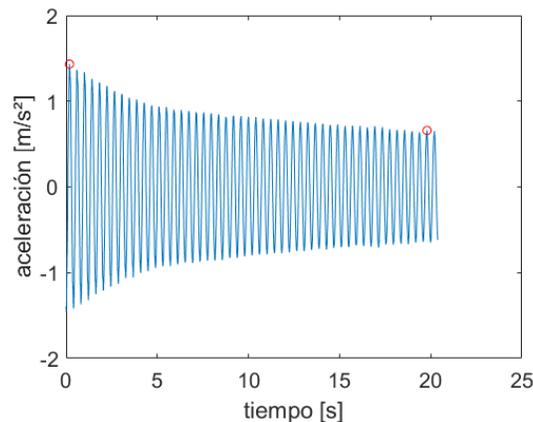


Figura 3.14: Respuesta libre de la pasarela

3.3.4. Incertidumbres

En amplitudes de aceleración

La precisión del acelerómetro en amplitudes de aceleración es de $0,29 \text{ m/s}^2$ (Tabla 2.3). La incertidumbre en los resultados de aceleración es inferior a este valor, dado que el error sistemático se elimina con el procesamiento de datos al sustraer el valor medio del ensayo. Pero al no poder cuantificar esta reducción, se retiene que los resultados en amplitudes de aceleración tienen una incertidumbre de $\pm 0,29 \text{ m/s}^2$.

En frecuencia

Se vio en el apartado 3.3.1 que la frecuencia de muestreo varía (para el 95 % de las muestras) entre 199,80 Hz y 201,05 Hz. Es decir, $f_m = 200,42 \pm 0,3 \%$. Se supone que eso se repercutirá en una incertidumbre de la misma magnitud (0,3 %) sobre el valor de frecuencia después de la transformada de Fourier. Se suma además un error de 0,01 Hz, siendo éste el valor del incremento de frecuencia en el espectro de Fourier (ya que es discreto). Se retiene entonces para los resultados en frecuencia una incertidumbre de $\pm (0,3 \% + 0,01 \text{ Hz})$.

3.4. Estudio de sensibilidad y calibración del modelo

Se realiza un estudio de sensibilidad sobre 3 parámetros con el fin de determinar su influencia en el comportamiento del modelo. En el caso de la pasarela, la variable de observación es la frecuencia del primer modo vertical. En el caso de las rampas, se observa tanto el primer como el segundo modo vertical de cada rampa. Los modos suelen ser una combinación de flexión vertical y torsión, así que se denominan según la forma que parece dominar para diferenciarlos. El objetivo final es calibrar el modelo numérico con los resultados del estudio.

3.4.1. Parámetros de estudio

Una de las hipótesis de la modelización preliminar era que el enrejado únicamente aportaba peso y no se consideraba su rigidez. En este estudio se propone introducir en el modelo la rigidez del enrejado.

Además, el tipo de modelización de los apoyos suele tener un efecto importante sobre el comportamiento de las estructuras. Se propone cambiar la modelización de los apoyos, y observar el efecto de dos parámetros en concreto: la libertad rotacional en el eje transversal y la libertad de desplazamiento en el eje longitudinal.

Rigidez del enrejado

En el modelo preliminar, el enrejado se modelizó considerando únicamente su peso, colocando una masa lineal equivalente a su peso propio en las vigas. Sin embargo, es posible que también añada cierta rigidez. Se puede observar el enrejado de la pasarela y de las rampas en la Figura 3.15. Para modelizarlo, se introduce un elemento de tipo *Shell-Thin* en los laterales de la pasarela y las rampas, de la misma manera que para la chapa (Figura 3.16). Se le asigna el material acero S275 con un coeficiente de corrección de masa de 0 para no considerarla dos veces. Se varía su rigidez mediante el espesor de la chapa, entre 0 y 3 mm. Se designa a este parámetro como *espesor equivalente enrejado*.



(a) Pasarela

(b) Rampa

Figura 3.15: Enrejado de la estructura

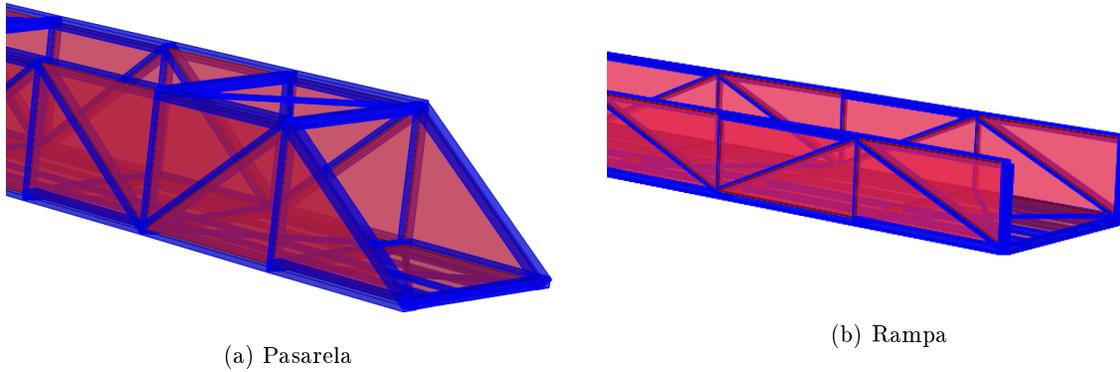


Figura 3.16: Introducción del enrejado en el modelo

Rigidez a torsión en los apoyos

En el modelo preliminar, los apoyos de la pasarela y de las rampas tenían libres las rotaciones según los 3 ejes. Sin embargo, como se puede ver en la Figura 3.17, el apoyo consta de un perno vertical, lo que puede contribuir a restringir la rotación según el eje Y. Se propone observar la influencia de una modificación del tipo de apoyo en el modelo. Se introduce rigidez colocando un muelle de torsión según el eje transversal en los 4 apoyos de la pasarela y los 4 apoyos de cada rampa (ver Figura 3.18). Con el fin de ir desde la ausencia de rigidez hasta la restricción total de rotación, se hace variar su rigidez entre 0 y 10^{12} Nm/rad. El estudio se realiza con un espesor equivalente del enrejado de 0 mm.



Figura 3.17: Apoyos de la estructura

Rigidez a tracción-compresión en los apoyos

En el modelo preliminar, los apoyos de la pasarela y de las rampas tenían restringidos los desplazamientos en las 3 direcciones. Vista la holgura presente en los apoyos de la estructura (Figura 3.17), se propone eliminar la restricción de desplazamiento longitudinal (eje X) e introducir en su lugar un muelle de tracción-compresión (Figura 3.19a). Este cambio se realiza únicamente en un extremo de cada elemento para no generar movimientos de cuerpo rígido (Figura 3.19b). Con el fin de ir desde la restricción total de desplazamiento (situación inicial) hasta la ausencia de restricción, se hace variar la rigidez del muelle entre 10^{12} y 0 N/m. El estudio se realiza con un espesor equivalente del enrejado de 0 mm y sin muelle de torsión.

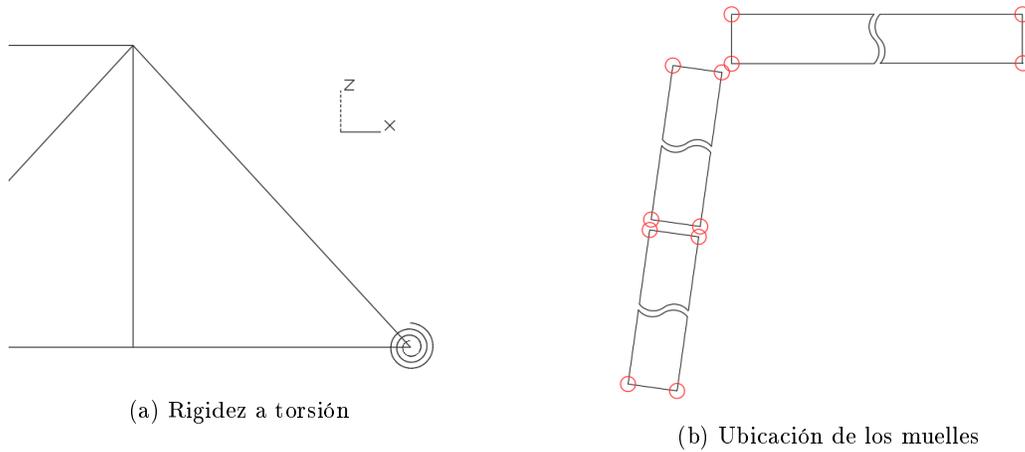


Figura 3.18: Introducción de muelles de torsión en los apoyos

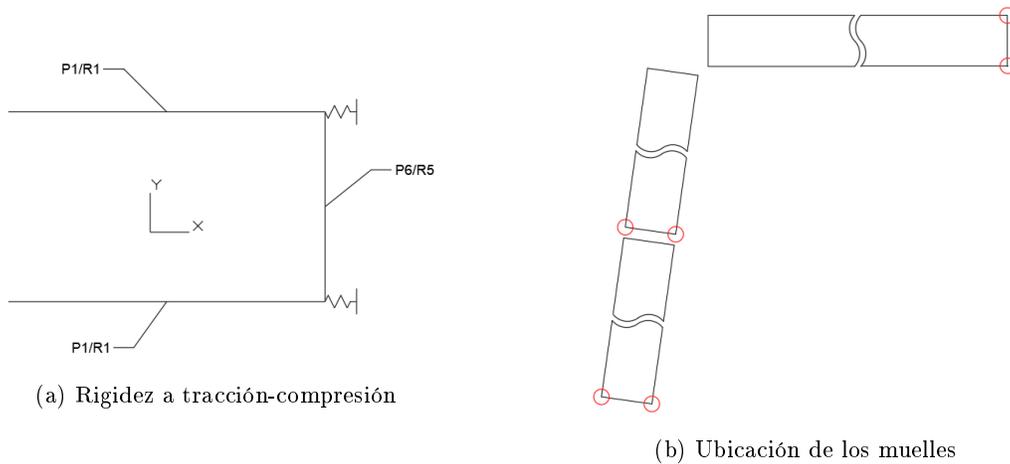


Figura 3.19: Introducción de muelles de tracción-compresión en los apoyos

3.4.2. Calibración del modelo

Teniendo los resultados del análisis de sensibilidad, se calibra el modelo con la mejor combinación posible de los 3 parámetros estudiados. La selección de la combinación adecuada se realiza con el criterio de minimizar la diferencia entre el modelo y los resultados experimentales, en la frecuencia del primer modo vertical. Se compara el porcentaje de error antes y después de la calibración. En el caso de la pasarela, el primer modo vertical se identifica fácilmente tanto en el modelo como en las medidas experimentales.

El caso de las rampas es distinto. Por un lado, las medidas experimentales presentan dos picos de frecuencia muy próximos en torno a 5,7 Hz (ver apartado 4.1.1). Por otro lado, el modelo numérico indica la existencia de dos modos verticales principales (el primer modo vertical en 6,0 Hz, común para las rampas, y el segundo modo vertical de cada rampa en torno a 6,7 Hz). Al no tener más información, no se puede relacionar con certeza las frecuencias experimentales con los modos del modelo. Esto impide la realización la calibración del modelo basada en las frecuencias naturales de las rampas. La calibración se realiza entonces únicamente con el primer modo vertical de la pasarela.

3.5. Comprobación de los Estados Límite

3.5.1. Acciones consideradas

Para la determinación de las acciones a considerar en la comprobación de los Estados Límite, se sigue las recomendaciones de la Instrucción IAP-11 [13]. La metodología completa se puede consultar en el Anexo B. Las cargas consideradas son el peso propio G , la sobrecarga de uso debido al tráfico de peatones Q , el viento lateral V y la nieve N . La sobrecarga de uso tiene un componente vertical q_{fk} y un componente longitudinal q_{flk} . El valor característico del empuje del viento se denomina F_w y cambia según el perfil. Además, en el caso del viento dos casos se contemplan según el sentido del empuje vertical $F_{w,z}$ provocado por el viento lateral en el tablero. El valor característico de la acción de la nieve se denomina $q_{N,k}$. Los valores característicos de las acciones se pueden ver en la Tabla 3.6. Los coeficientes parciales y coeficientes de combinación se pueden ver en la Tabla 3.7.

Tabla 3.6: Valores característicos de las acciones

Acción	Valor característico	Eje	Aplicado en	
G	-	-	-Z	Todos
q_{fk}	5000	[N/m ²]	-Z	Tablero
q_{flk}	500	[N/m ²]	X	Tablero
$F_{w,P1,b}$ ^{1,2}	372,69	[N/m]	Y	P1,b
$F_{w,P2,b}$	417,41	[N/m]	Y	P2,b
$F_{w,P3,b}$	214,67	[N/m]	Y	P3,b
$F_{w,P1,s}$ ³	119,70	[N/m]	Y	P1,s
$F_{w,P2,s}$	134,07	[N/m]	Y	P2,s
$F_{w,P3,s}$	68,95	[N/m]	Y	P3,s
$F_{w,z}$	894,46	[N/m ²]	±Z	Tablero
$q_{N,k}$	160	[N/m ²]	-Z	Tablero

¹ Denominación de los perfiles según la Tabla 1.1

² b: perfiles a barlovento

³ s: perfiles a sotavento

Tabla 3.7: Coeficientes parciales γ_F y de combinación ψ_0 de las acciones

Acción F	γ_F		ψ_0
	Favorable	Desfavorable	
Peso propio G	1	1,35	-
Sobrecarga de uso Q	0	1,35	0
Viento V	0	1,5	0,3
Nieve N	0	1,5	0,8

Las combinaciones de cargas consideradas para la comprobación en ELU son las siguientes:

- $1,35 G$
- $1,35 G + 1,35 Q$
- $1 G + 1,5 V_{up}$
- $1,35 G + 1,35 Q + 0,3 \cdot 1,5 V_{down}$
- $1,35 G + 1,5 V_{down} + 0,8 \cdot 1,5 N$

V_{up} y V_{down} corresponden a las dos hipótesis sobre el empuje del viento vertical en el tablero. Cuando actúa V_{up} , la sobrecarga de uso tiene un efecto favorable, así que no se considera. La combinación de la sobrecarga de uso y la nieve se tiene que considerar únicamente en zonas de alta montaña, no se considera en este estudio. Aunque la acción de la nieve es muy reducida en Castellón, se considera en combinación con el viento. Estas cargas se introducen en el modelo numérico de Elementos Finitos

y se obtienen tras la simulación en SAP2000 los valores de esfuerzos y tensiones en cada uno de los elementos de la estructura. Se malla la estructura con 10 elementos por *Frame*.

3.5.2. ELU de resistencia de las secciones

Para la comprobación del Estado Límite Último de resistencia de las secciones, se utiliza el siguiente criterio de plastificación:

$$\frac{\sigma_{VM}}{f_y/\gamma_{M0}} \leq 1$$

La tensión de Von Mises σ_{VM} se obtiene a partir de la simulación en SAP2000 en todos los nudos del modelo de Elementos Finitos de la pasarela para los cinco casos de carga.

3.5.3. ELU de resistencia a pandeo de los elementos

Se lleva a cabo la comprobación del Estado Límite de pandeo para todos los elementos de tipo *Frame* de la pasarela, excepto:

- Las diagonales superiores (P5) e inferiores (P7). Al ser consideradas como tirantes, no trabajan a compresión.
- Las viguetas (P8) y los montantes superiores 2 (P4b). No son elementos estructurales principales.

La resistencia a pandeo de los elementos sometidos a compresión y flexión se verifica cuando cumple el criterio siguiente:

$$\left\{ \begin{array}{l} 1/\chi_y \\ 1/\chi_z \end{array} \right\} \frac{N_{Ed}}{N_{Rk}/\gamma_{M1}} + \left\{ \begin{array}{l} 1 \\ \alpha_y \end{array} \right\} \frac{k c_m M_{y,Ed}}{M_{y,Rk}/\gamma_{M1}} \leq \left\{ \begin{array}{l} 1 \\ 1 \end{array} \right\}$$

donde

χ_y : Coeficiente de reducción para pandeo en el eje y

χ_z : Coeficiente de reducción para pandeo en el eje z

N_{Ed} : Valor de cálculo del esfuerzo axial máximo de compresión

N_{Rk} : Valor característico de la resistencia a compresión

γ_{M1} : Coeficiente parcial de la resistencia de piezas frente a la inestabilidad

$\alpha_y = 0,8$ (Sección de clase 3)

k : coeficiente de interacción

c_m : factor de momento flector uniforme equivalente

$M_{y,Ed}$: Valor de cálculo del momento flector

$M_{y,Rk}$: Valor característico de la resistencia al momento flector

Los esfuerzos N_{Ed} y $M_{y,Ed}$ en las barras se obtienen a partir de la simulación en SAP2000 con las cinco combinaciones de carga. El desarrollo completo de la comprobación del ELU de pandeo se encuentra en el Anexo C.

4. Resultados

4.1. Resultados experimentales

4.1.1. Ensayos ambientales

Se presentan en esta parte los resultados de las medidas ambientales efectuadas sobre la pasarela y las rampas. Permiten la identificación de las frecuencias naturales de la estructura y la cuantificación del efecto del viento.

Pasarela

La Figura 4.1 muestra el componente vertical de las 3 medidas ambientales en el dominio del tiempo. Se observa que la amplitud máxima de la aceleración en dirección vertical alcanzada durante estos 3 ensayos (provocada por el viento) es de $0,31 \text{ m/s}^2$. Al ser inferior a $0,50 \text{ m/s}^2$, corresponde a un grado de confort *máximo* según la Instrucción IAP-11.

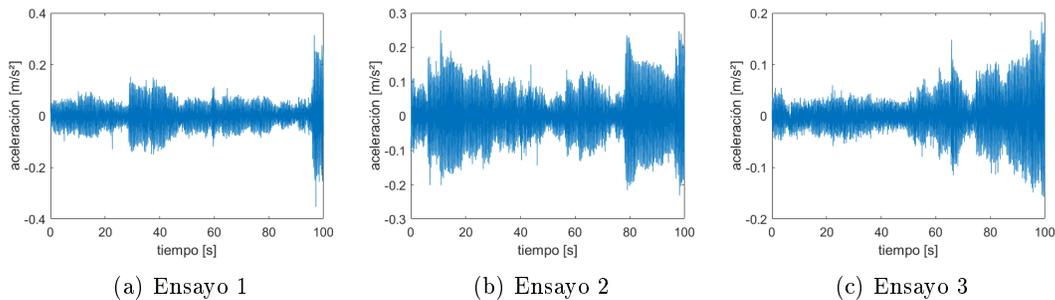


Figura 4.1: Componente vertical de las medidas ambientales en la pasarela

La Figura 4.2 muestra los resultados en el dominio de frecuencia de estos 3 ensayos ambientales. Se muestra aquí el rango 0 - 20 Hz para visualizar las primeras frecuencias, aunque el espectro completo alcanza los 100 Hz. Se observa un único pico correspondiente al primer modo vertical de la pasarela. La amplitud del ruido es muy reducida. Los valores de frecuencia obtenidos se encuentran en la tabla siguiente.

Tabla 4.1: Frecuencias observadas en los ensayos ambientales (pasarela)

Ensayo	Frecuencia [Hz]
1	2,44
2	2,47
3	2,45
Promedio	$2,45 \pm 0,02$

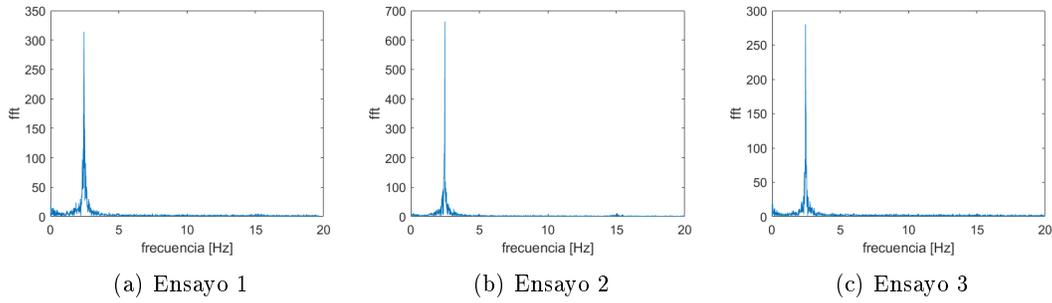


Figura 4.2: Espectro de frecuencia de las medidas ambientales en la pasarela

Rampas

Las Figuras 4.3 y 4.4 muestran los resultados en el dominio de frecuencia de los 3 ensayos ambientales en la rampa 1 y la rampa 2 respectivamente. El ruido es mayor que en el caso de la pasarela pero se siguen distinguiendo los picos asociados a sus primeras frecuencias. En la rampa 1, se observa un pico en $5,78 \pm 0,03$ Hz. Asimismo, en la rampa 2, se observa un pico en $5,74 \pm 0,03$ Hz.

En 3 ensayos sobre los 6, aparece además un segundo pico en 5,61 - 5,65 Hz (Figura 4.5). Sin embargo, se necesitarían más medidas para determinar con suficiente precisión su frecuencia. Este modo supuesto no se puede utilizar para la calibración del modelo numérico. Los valores de frecuencias se encuentran resumidas en la Tabla 4.2.

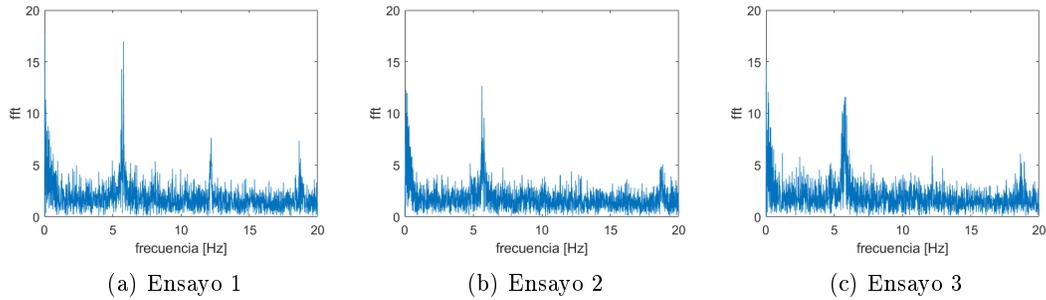


Figura 4.3: Espectro de frecuencia de las medidas ambientales en la rampa 1

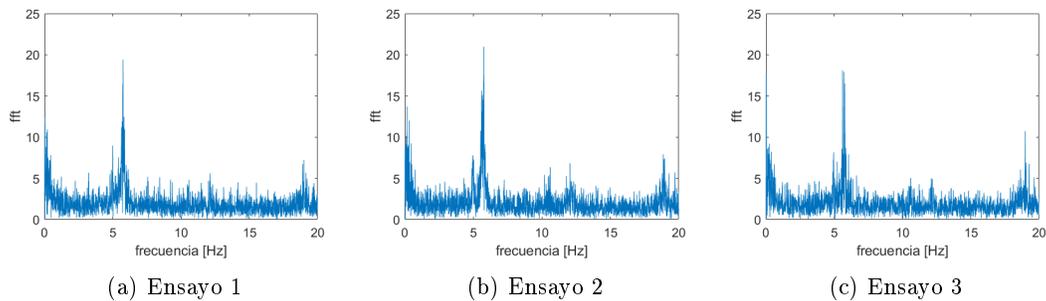


Figura 4.4: Espectro de frecuencia de las medidas ambientales en la rampa 2

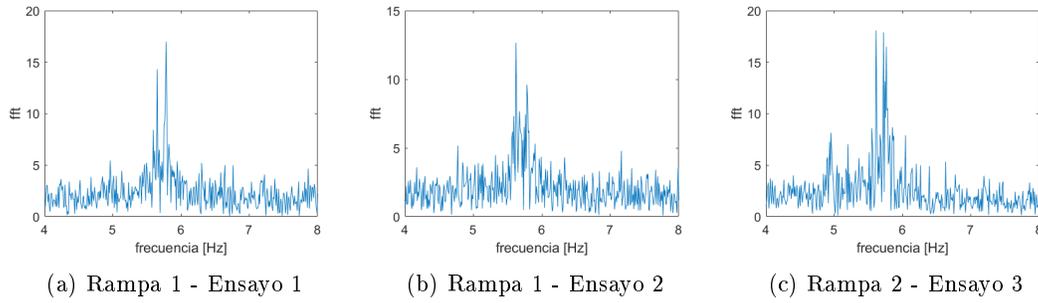


Figura 4.5: Aparición de dos picos de frecuencia en las medidas ambientales (rampas)

Tabla 4.2: Frecuencias observadas en los ensayos ambientales (rampas)

Ensayo	Frecuencia [Hz]			
	Rampa 1		Rampa 2	
1	5,65	5,78	-	5,75
2	5,62	5,78	-	5,75
3	-	5,77	5,61	5,72
Promedio	-	$5,78 \pm 0,03$	-	$5,74 \pm 0,03$

4.1.2. Amplitud de aceleración provocada por corredores

La Figura 4.6 muestra la amplitud de aceleración provocada por corredores cruzando la pasarela de manera sincronizada a un ritmo correspondiente a la frecuencia del primer modo vertical (2,45 Hz). La Tabla 4.3 muestra la amplitud máxima de aceleración alcanzada según el número de corredores y se le asocia el grado de confort definido por la Instrucción IAP-11. Se observa que la amplitud máxima de la aceleración aumenta cuando aumenta el número de corredores. Según estos ensayos, un solo corredor provoca vibraciones asociadas a un grado de confort *mínimo*, cuando el grado de confort *no aceptable* se alcanza a partir de 3 corredores sincronizados.

Tabla 4.3: Valores máximos de aceleración provocados por corredores sincronizados y viento

	1 corredor	2 corredores	3 corredores
Aceleración máxima [m/s ²]	2,06	2,07	2,70
Rango asociado (IAP-11)	1,00 a 2,50	1,00 a 2,50	> 2,50
Grado de confort (IAP-11)	Mínimo	Mínimo	No aceptable

4.1.3. Amortiguamiento

La Figura 4.7 muestra la respuesta libre de la pasarela después de haber provocado la resonancia de su primer modo de vibración vertical. A partir de estas medidas se calcula la tasa de amortiguamiento. Se observa que ésta varía con el tiempo: es mayor al inicio, cuando la amplitud de vibración es más importante, y va disminuyendo a lo largo del tiempo. Los resultados de la Tabla 4.4 indican el decremento logarítmico medio y la tasa de amortiguamiento media sobre 20 segundos.

Tabla 4.4: Amortiguamiento de la pasarela

Decremento logarítmico δ [%]	1,62 - 1,78
Tasa de amortiguamiento ζ [%]	0,26 - 0,28

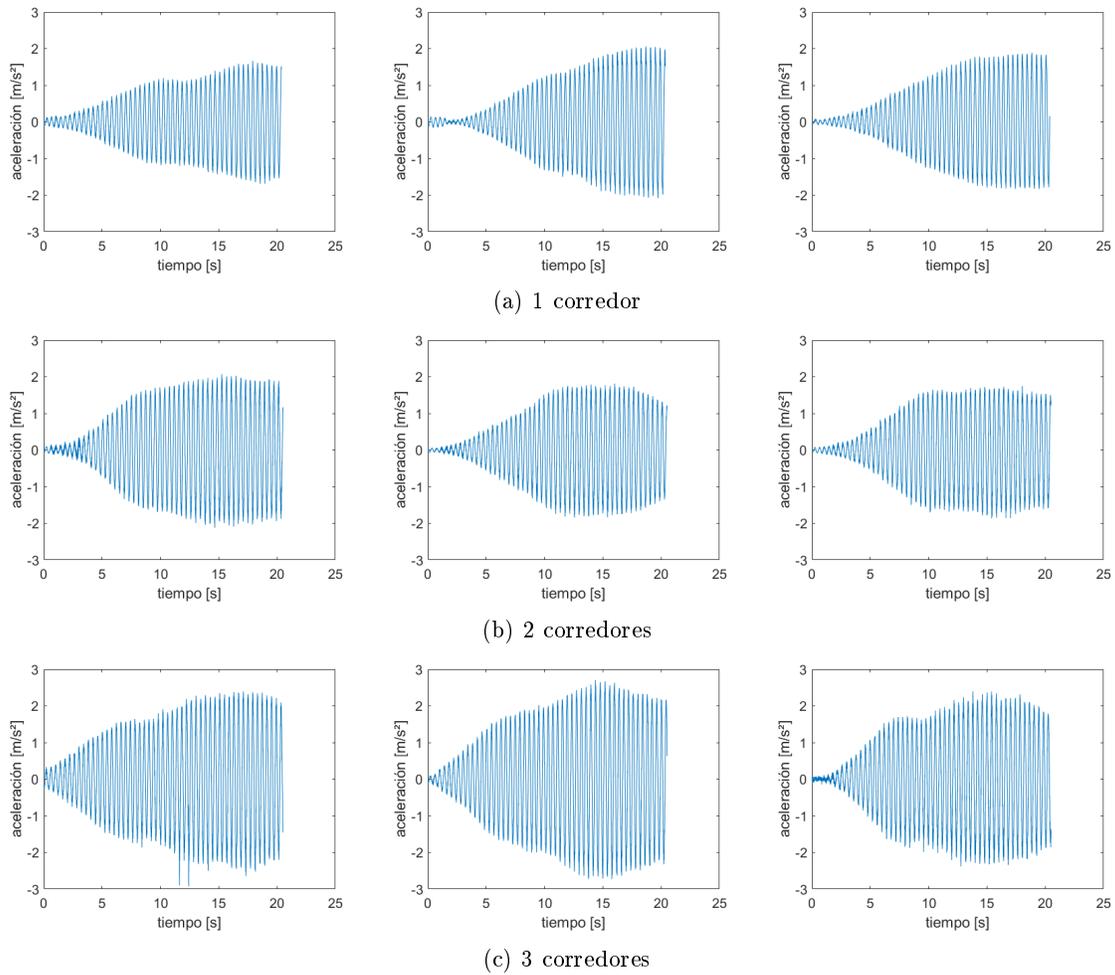


Figura 4.6: Resultados del ensayo con corredores

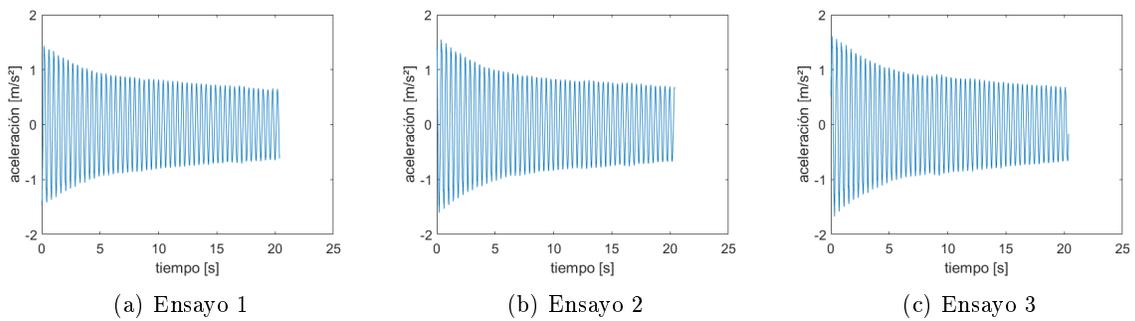


Figura 4.7: Respuesta libre de la pasarela para la determinación del amortiguamiento

4.2. Estudio de sensibilidad y calibración

4.2.1. Estudio de sensibilidad sobre la pasarela

Se presentan en esta parte los resultados del estudio de sensibilidad sobre la pasarela. La Figura 4.8 muestra como varía su frecuencia fundamental cuando varían los 3 parámetros de estudio. Respecto del modelo preliminar, una variación de 0 a 3 mm del espesor equivalente del enrejado aumenta un 21,1 % la frecuencia del primer modo vertical, alejándose del valor experimental (2,45 Hz). Una variación de la rigidez de los muelles de torsión de 0 a 10^{12} Nm/rad aumenta un 2,5 % esta frecuencia, alejándose también del valor experimental. Sin embargo, una variación de la rigidez de los muelles de tracción-compresión de 10^{12} a 0 N/m disminuye un 2,8 % esta frecuencia, acercándose al valor experimental. La Tabla 4.5 muestra la sensibilidad del modelo a cada parámetro.

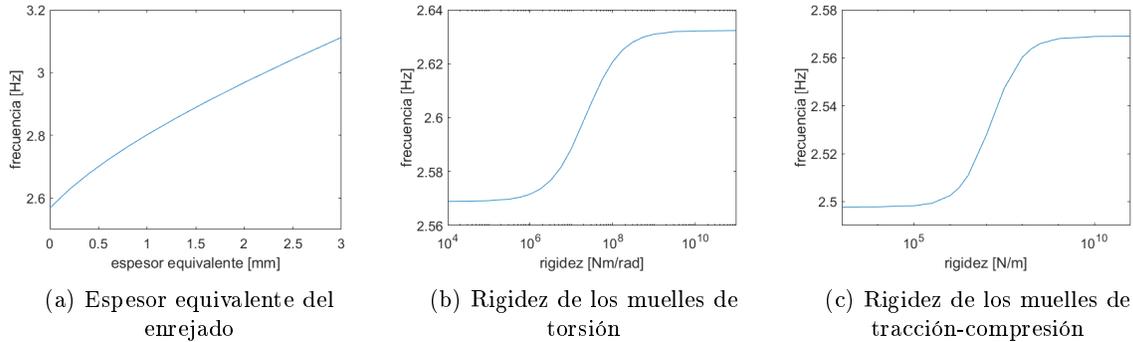


Figura 4.8: Influencia de los parámetros de estudio sobre la frecuencia del primer modo vertical de la pasarela

Tabla 4.5: Sensibilidad del modelo de la pasarela a los parámetros de estudio (sobre el primer modo vertical)

Parámetro	Rango de variación		Variación de frecuencia	
			[Hz]	[%]
Espesor equivalente enrejado	0 - 3	mm	0,54	21,1
Rigidez muelle de torsión	0 - 10^{12}	Nm/rad	0,06	2,5
Rigidez muelle de tracción-compresión	0 - 10^{12}	N/m	0,07	2,8

4.2.2. Calibración de la pasarela

Los resultados del estudio de sensibilidad sobre la pasarela indican que se minimiza la diferencia entre los resultados experimentales y los del modelo cuando el espesor equivalente del enrejado es nulo, y cuando se eliminan los muelles de torsión y de tracción-compresión en los apoyos. Se deduce que la rigidez aportada por el enrejado al comportamiento de deformación global de la estructura es despreciable, lo cual tiene justificación debido a los pocos puntos en los que el enrejado se conecta a ella. La rotación según el eje transversal no parece estar impedida. Es posible que pese a la presencia del perno vertical, haya holgura suficiente como para ante pequeños desplazamientos comportarse ese apoyo de forma libre. El desplazamiento según el eje longitudinal tampoco parece estar impedido. Es posible que haya holgura suficiente como para comportarse de forma libre. La Tabla 4.6 muestra los valores seleccionados para la calibración del modelo. En la Tabla 4.7 se muestra la diferencia de frecuencia entre el modelo numérico y los datos experimentales. *Calib1* es el modelo calibrado después del estudio de sensibilidad sobre la pasarela.

Tabla 4.6: Valores de calibración de los parámetros de estudio (pasarela)

Parámetro de estudio	Valor de calibración
Espesor equivalente enrejado	0
Rigidez a torsión	0
Rigidez a tracción-compresión	0

Tabla 4.7: Diferencia entre el modelo calibrado y la frecuencia experimental (pasarela)

Modelo	Frecuencia [Hz]	Error [%]
Experimental	2,45	-
Preliminar	2,57	4,6
Calib1	2,50	1,7

4.2.3. Estudio de sensibilidad sobre las rampas

El estudio se realiza a partir del modelo *Calib1* (calibrado con la pasarela). Los parámetros de estudio son los mismos que en la pasarela, pero en este caso se observa su efecto sobre los 2 modos de flexión vertical de las rampas.

Efecto sobre el primer modo de flexión vertical

La Figura 4.9 y la Tabla 4.10 muestran los resultados del estudio sobre el primer modo de flexión vertical. El aumento del espesor equivalente del enrejado y de la rigidez de los muelles de torsión aumentan su frecuencia, aunque el efecto es limitado (1,8 % y 0,3 %). En el caso de los muelles de tracción-compresión, la disminución de su rigidez disminuye su frecuencia (-3,3 %), pero sobre todo se observa que este modo vertical de las rampas tiende a desaparecer, al ser cada vez más libre el desplazamiento longitudinal de los apoyos. El modo resultante es un modo de vibración de la pasarela, acompañado por un movimiento longitudinal de la rampa 2.

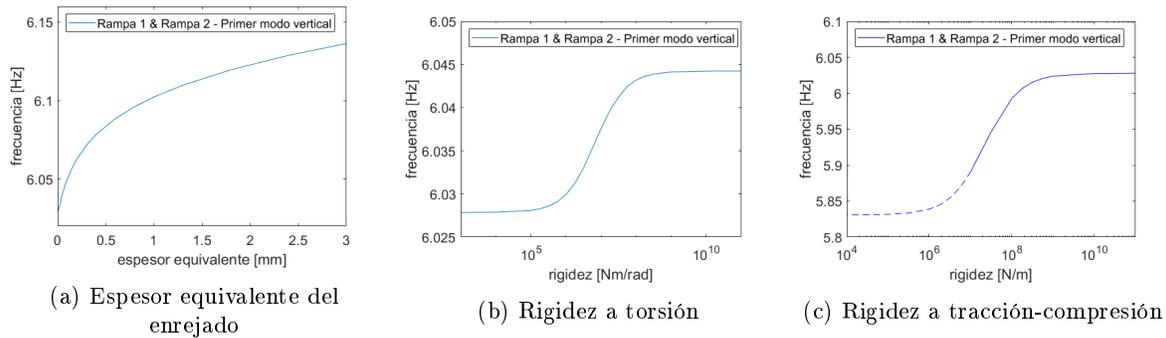


Figura 4.9: Influencia de los parámetros de estudio sobre la frecuencia del primer modo de flexión vertical de las rampas

Tabla 4.8: Sensibilidad del modelo a los parámetros de estudio (sobre el primer modo de flexión vertical de las rampas)

Parámetro	Rango de variación	Variación de frecuencia	
		[Hz]	[%]
Espesor equivalente enrejado	0 - 3 mm	0,11	1,8
Rigidez a torsión	0 - 10^{12} Nm/rad	0,02	0,3
Rigidez a tracción-compresión	0 - 10^{12} N/m	0,20	3,3

Efecto sobre el segundo modo de flexión vertical de cada rampa

Las Figuras 4.10 y 4.11 muestran los resultados del estudio sobre el segundo modo vertical de la rampa 1 y la rampa 2 respectivamente. La tendencia es la misma que en la pasarela, pero difieren las magnitudes. El espesor equivalente del enrejado tiene mayor efecto sobre las rampas (21,4 - 22,5 %) que sobre la pasarela. La rigidez de los muelles de torsión y de tracción-compresión tiene un efecto limitado (0,14 % y 0,07 - 0,12 % respectivamente). En el estudio de la rigidez a tracción-compresión, se representa además la evolución del primer modo de torsión porque influye en la forma del modo vertical. Cuando las frecuencias de estos dos modos son próximas, estos toman una forma mixta entre torsión y flexión vertical (ver Figura 4.13). La Tabla 4.9 muestra los valores de variación de la primera frecuencia vertical de cada rampa ($\Delta f_{1,R1}$ y $\Delta f_{1,R2}$) frente a la variación de los parámetros de estudio.

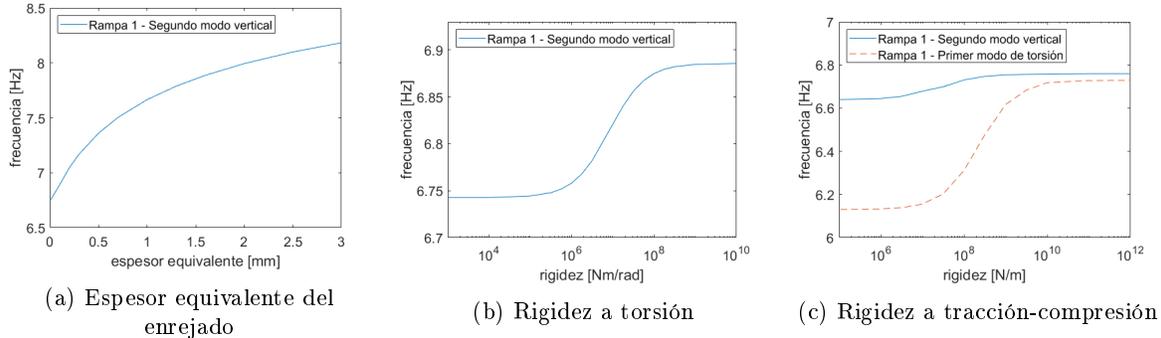


Figura 4.10: Influencia de los parámetros de estudio sobre la frecuencia del segundo modo de flexión vertical de la rampa 1

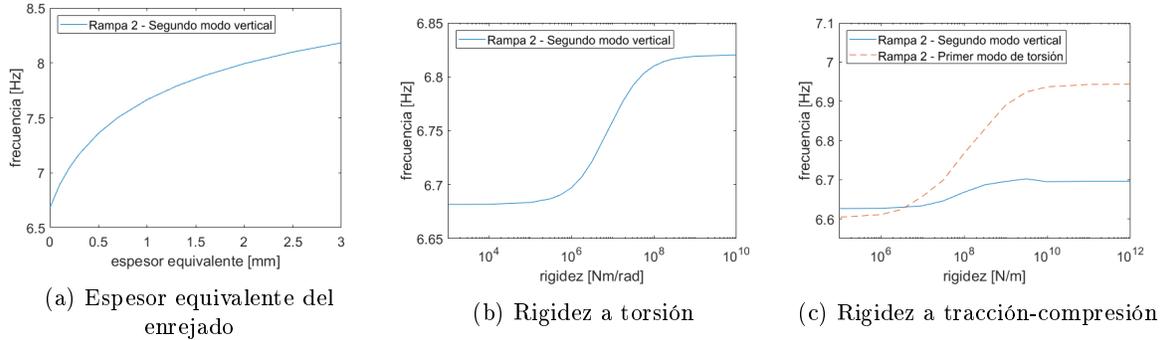


Figura 4.11: Influencia de los parámetros de estudio sobre la frecuencia del segundo modo de flexión vertical de la rampa 2

Tabla 4.9: Sensibilidad del modelo a los parámetros de estudio (segundo modo vertical de las rampas)

Parámetro	Rango de variación	$\Delta f_{1,R1}$		$\Delta f_{1,R2}$	
		[Hz]	[%]	[Hz]	[%]
Espesor equivalente enrejado	0 - 3 mm	1,44	21,4	1,50	22,5
Rigidez a torsión	0 - 10^{12} Nm/rad	0,14	2,1	0,14	2,1
Rigidez a tracción-compresión	0 - 10^{12} N/m	0,12	1,8	0,07	1,0

4.2.4. Calibración de las rampas

Por las razones evocadas en el apartado 3.4.2, no se puede calibrar el modelo numérico a partir de las medidas experimentales realizadas en las rampas. Sin embargo, dado que en la estructura real los apoyos de las rampas son idénticos a los de la pasarela, se propone un segundo modelo *Calib2* con la misma modelización para los 12 apoyos (ver Tabla 4.10).

Tabla 4.10: Valores de calibración (rampas)

Parámetro	Valor de calibración	
	Rampa 1	Rampa 2
Espesor equivalente enrejado	0	0
Rigidez a torsión	0	0
Rigidez a tracción-compresión	0	0

4.3. Frecuencias y modos de vibración

4.3.1. Pasarela

La Figura 4.12 muestra los primeros modos de vibración de la pasarela del modelo calibrado *Calib2*. Los parámetros de este modelo son:

- Un espesor equivalente del enrejado nulo
- En los apoyos:
 - Restricción de desplazamiento vertical y transversal
 - Libertad de desplazamiento longitudinal
 - Libertad de rotación en las 3 direcciones

Las frecuencias asociadas a estos modos de vibración se indican en la Tabla 4.11. Los modos de torsión y transversal se ven más afectados que los modos verticales.

Tabla 4.11: Frecuencias naturales del modelo calibrado de la pasarela

Modo	Frecuencia modelo calibrado [Hz]	Frecuencia modelo preliminar [Hz]	Variación [%]
Primer modo de flexión vertical	2,50	2,57	-2,8
Primer modo de torsión	2,69	3,13	-14,1
Primer modo de flexión transversal	4,99	5,74	-13,1
Segundo modo de torsión	5,83	6,43	-9,4
Segundo modo de flexión vertical	8,33	8,29	+0,5

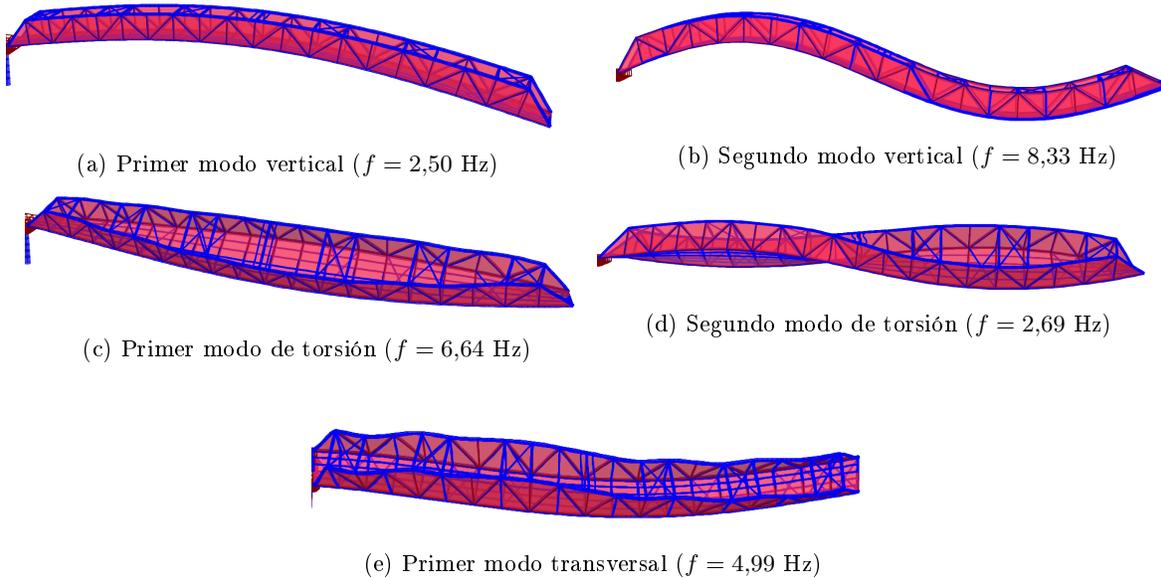


Figura 4.12: Modos de vibración del modelo calibrado de la pasarela

4.3.2. Rampas

La Figura 4.13 muestra los primeros modos de vibración de las rampas del modelo calibrado *Calib2*. Los parámetros de este modelo son:

- Un espesor equivalente del enrejado nulo,
- En los apoyos:
 - Restricción de desplazamiento vertical y transversal
 - Libertad de desplazamiento longitudinal
 - Libertad de rotación en las 3 direcciones

Las frecuencias asociadas a estos modos de vibración se indican en las Tablas 4.12 y 4.13. El primer modo vertical observado en el modelo preliminar ya no aparece en este modelo debido a la libertad de desplazamiento longitudinal de los apoyos.

Tabla 4.12: Frecuencias naturales del modelo calibrado de la rampa 1

Modo	Frecuencia modelo preliminar [Hz]	Frecuencia modelo calibrado [Hz]	Variación [%]
Primer modo de flexión vertical	6,74	6,64	-1,5
Primer modo de torsión	6,81	6,13	-10,0

Tabla 4.13: Frecuencias naturales del modelo calibrado de la rampa 2

Modo	Frecuencia modelo preliminar [Hz]	Frecuencia modelo calibrado [Hz]	Variación [%]
Primer modo de flexión vertical	6,68	6,63	-0,8
Primer modo de torsión	6,74	6,60	-2,0

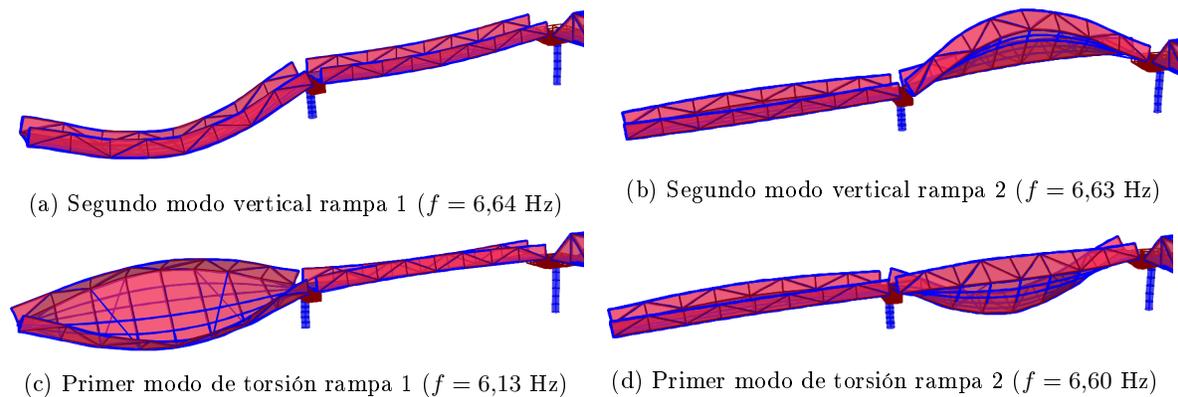


Figura 4.13: Modos de vibración del modelo calibrado de las rampas

4.4. Comprobación de los Estados Límite de la pasarela

4.4.1. ELU de resistencia de las secciones

Los resultados de la simulación de carga con SAP2000 se pueden ver en la Tabla 4.14. La segunda columna indica el valor máximo de la tensión de Von Mises σ_{VM} en los elementos de tipo *Frame* de la pasarela para cada caso de carga. La tercera columna indica el resultado de la comprobación del ELU de resistencia de la sección para el caso de carga correspondiente.

Tabla 4.14: Valores de tensión de Von Mises en la pasarela y resultado frente al ELU de resistencia

Caso de carga	$\sigma_{VM,max}$ [MPa]	$\frac{\sigma_{VM,max}}{f_y/\gamma_{M0}}$
1,35 G	70,83	0,27 \leq 1
1,35 G + 1,35 Q	215,81	0,82 \leq 1
1 G + 1,5 V_{up}	87,29	0,33 \leq 1
1,35 G + 1,35 Q + 0,3 · 1,5 V_{down}	241,95	0,92 \leq 1
1,35 G + 1,5 V_{down} + 0,8 · 1,5 N	166,72	0,64 \leq 1

Ninguna sección alcanza el Estado Límite de resistencia en los casos de carga considerados. La mayor tensión de Von Mises aparece para la combinación de cargas 1,35 G + 1,35 Q + 0,3 · 1,5 V_{down} , es decir con el peso propio, la sobrecarga de uso y el viento (hipótesis de empuje vertical en el sentido gravitatorio). Las secciones que contienen las mayores tensiones son las extremidades de las diagonales laterales extremas, las cuales trabajan principalmente a compresión (ver Figura 4.15).

Con el fin de visualizar los elementos que trabajan a compresión o a tracción, se representa en la Figura 4.14 la tensión axial máxima en las secciones de los elementos de tipo *Frame* de la pasarela, bajo el caso de carga 1,35 G + 1,35 Q + 0,3 · 1,5 V_{down} . La Figura 4.15 se focaliza en la diagonal de mayor tensión.

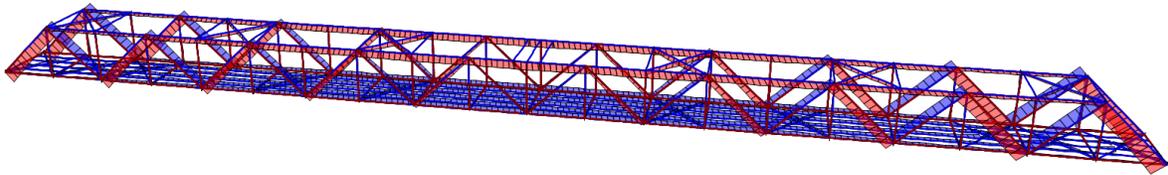


Figura 4.14: Tensión axial. Rojo=compresión, azul=tracción

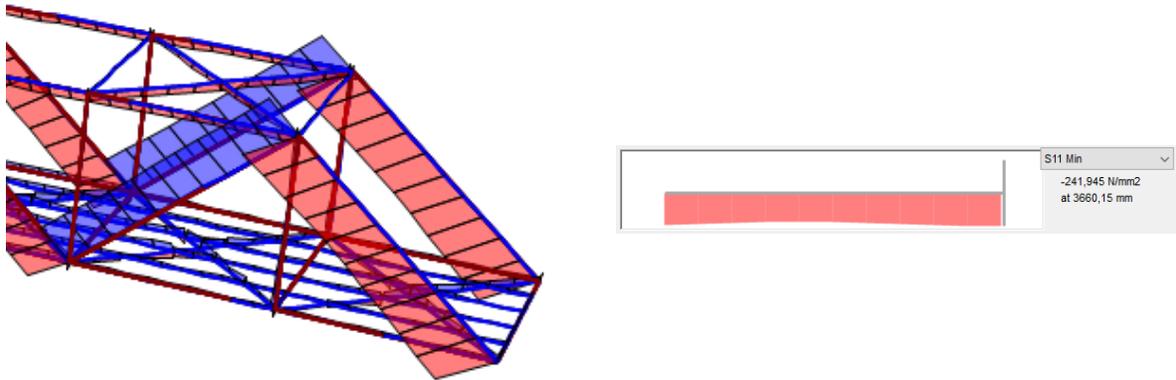


Figura 4.15: Tensión axial en la diagonal extrema

4.4.2. ELU de resistencia a pandeo de los elementos

Los resultados de la comprobación del ELU de resistencia a pandeo de los elementos *Frame* de la pasarela se encuentran en la Tabla 4.15. Para los cinco tipos de perfiles, este resultado se alcanza con la combinación de carga $1,35G + 1,35Q + 0,3 \cdot 1,5V_{down}$.

Tabla 4.15: Resultados de la comprobación del ELU de pandeo

Perfil	Resultado ELU Pandeo
P1	$\left\{ \begin{array}{l} 0,56 \\ 0,61 \end{array} \right\} \leq \left\{ \begin{array}{l} 1 \\ 1 \end{array} \right\}$
P2	$\left\{ \begin{array}{l} 0,92 \\ 0,97 \end{array} \right\} \leq \left\{ \begin{array}{l} 1 \\ 1 \end{array} \right\}$
P3	$\left\{ \begin{array}{l} 0,32 \\ 0,25 \end{array} \right\} \leq \left\{ \begin{array}{l} 1 \\ 1 \end{array} \right\}$
P4a	$\left\{ \begin{array}{l} 0,18 \\ 0,13 \end{array} \right\} \leq \left\{ \begin{array}{l} 1 \\ 1 \end{array} \right\}$
P6	$0,10 \leq 1^1$

¹ El pandeo del perfil P6 está impedido en el plano horizontal debido a las viguetas

5. Discusión

5.1. Parte experimental

5.1.1. Uso de un teléfono móvil para la medición de aceleraciones

El acelerómetro del teléfono permite medir frecuencias de vibración con una buena precisión mediante la aplicación Phyphox. Se ha podido determinar la frecuencia del primer modo vertical de la pasarela mediante medidas ambientales. Además, aunque la precisión es menor en amplitudes de aceleración, se ha podido determinar su tasa de amortiguamiento, el efecto de los corredores, así como el efecto del viento. En contrapartida, al no poder sincronizar las medidas de varios móviles, no es posible identificar los modos de vibración, solo se dispone de la información de la frecuencia.

5.1.2. Medidas ambientales

Las medidas ambientales permiten identificar el primer modo de flexión vertical de la pasarela. Un ensayo realizado con un analizador de vibraciones confirmó los resultados. En las rampas, las medidas ambientales también permitieron medir una frecuencia natural, pero no ha sido posible asociarla a un modo de vibración concreto. Ensayos complementarios de choque o de vibración forzada con varios puntos de medición serían necesarios para caracterizar el comportamiento dinámico de las rampas.

5.1.3. Efecto de corredores sincronizados

Los resultados experimentales muestran que un solo corredor puede generar vibraciones asociadas a un nivel de confort *mínimo* ($1,00 < a < 2,50 \text{ m/s}^2$) según la IAP-11 cuando su ritmo corresponde a la frecuencia natural de la pasarela. A partir de 3 corredores sincronizados, se generan aceleraciones asociadas a un nivel de confort *no aceptable* ($a > 2,50 \text{ m/s}^2$). Sin embargo, debido a la corta duración del fenómeno, no amenaza la integridad de la estructura. Se necesitaría realizar estudios específicos en el caso de eventos tales como maratones, en los cuales las vibraciones podrían ser mucho mayores si se llegara a provocar la resonancia.

5.1.4. Efecto del viento

Los resultados muestran que el viento puede provocar la resonancia del primer modo vertical de la pasarela. Sin embargo, aunque la amplitud de aceleración alcanzada depende mucho de la duración de la ráfaga de viento, no parecen muy importantes: ráfagas de 50 km/h provocan aceleraciones asociadas a un nivel de confort *máximo* ($a < 0,50 \text{ m/s}^2$).

5.1.5. Amortiguamiento

Los resultados experimentales muestran que la tasa de amortiguamiento ζ de la pasarela es del 0,27 %. Este valor es superior al valor mínimo recomendado (0,2 %) pero es inferior al valor medio recomendado (0,4 %) en la literatura [10]. Comparando con las 35 pasarelas estudiadas en el estudio de Patak et al [12], la pasarela de Borriol se halla en el 5,7 % de pasarelas que poseen una ζ inferior al 0,5 %, cuando la tasa de amortiguamiento de la mayoría de las pasarelas está comprendida entre el 0,8 % y el 1,6 %.

5.1.6. Intentos para detectar modos de vibración adicionales

Se han realizado ensayos adicionales para intentar observar otros modos de vibración en la pasarela, en particular su segundo modo vertical. Sin embargo, no se ha podido a medir su frecuencia de manera precisa. Sería útil elaborar una campaña de ensayos más completa en la pasarela para caracterizar mejor su comportamiento. La frecuencia del primer modo principal se ha podido medir mediante ensayos ambientales, pero la detección de otras frecuencias naturales se debería realizar con otros tipos de ensayos.

5.2. Modelo numérico

5.2.1. Influencia de los parámetros de estudio

Pasarela

La influencia de la rigidez del enrejado sobre la frecuencia del primer modo de flexión vertical sería importante, de estar más conectado a la estructura principal. El tipo de modelización de los apoyos tiene menor influencia. Tanto la restricción de rotación según el eje transversal como la libertad de desplazamiento longitudinal de los apoyos tienen un efecto limitado.

Rampas

La rigidez del enrejado de las rampas tiene un efecto significativo (21,4-22,5 %) sobre la frecuencia de su segundo modo vertical, pero tiene un efecto mucho menor en la frecuencia del primer modo vertical, lo que puede significar que este modo de vibración no es propio de las rampas sino que está provocado por la pasarela. La restricción de rotación de los apoyos según el eje transversal no parece tener un efecto significativo sobre los modos verticales. Asimismo, la eliminación de restricción en el desplazamiento longitudinal de los apoyos tiene poca influencia sobre ellos.

5.2.2. Calibración del modelo

Los resultados del estudio de sensibilidad en la pasarela muestran que el modelo representa mejor el comportamiento observado experimentalmente cuando:

- Se considera que el enrejado aporta únicamente peso y no rigidez.
- Hay libertad de rotación en los apoyos
- Hay libertad de desplazamiento longitudinal de los apoyos en un extremo.

Sin embargo, la calibración del modelo se hizo en base a un único modo de vibración: el primer modo de flexión vertical de la pasarela. Para tener un modelo representativo del comportamiento dinámico global de la estructura, se necesitaría realizar una calibración basada en una amplia serie de modos de vibración, tanto verticales como horizontales o de torsión.

5.2.3. Estados Límite Últimos

La comprobación llevada a cabo indica que ninguna sección en la pasarela alcanza el ELU de resistencia y ningún elemento alcanza el ELU de pandeo. Sin embargo, las diagonales laterales, y especialmente las de los extremos de la pasarela, alcanzan un estado, tanto de resistencia como de pandeo, cerca del Estado Límite (0,92 % y 0,97 % respectivamente). Este resultado es conservador dado que la comprobación se realizó considerando un coeficiente de pandeo de $\beta = 1$ para todas las barras, lo que corresponde a barras biarticuladas. En realidad las uniones son soldadas, por lo que el coeficiente de pandeo real se encuentra más bien entre 0,75 y 0,9, lo que significa una mayor resistencia a pandeo. Cabe recordar que la incertidumbre que hay en el espesor de los perfiles se repercute directamente en la comprobación de los Estados Límite. El espesor real del perfil puede ser algo mayor o menor al espesor determinado experimentalmente de manera indirecta.

6. Conclusiones

6.1. Parte experimental

- Las aplicaciones móviles son una herramienta interesante para la medición de aceleraciones en pasarelas
- La frecuencia del modo fundamental se puede medir con medidas ambientales
- Se ha determinado la tasa de amortiguamiento de la pasarela asociada al modo fundamental
- El efecto de corredores sincronizados sobre el nivel de vibración es significativo desde el punto de vista del confort: supera el Estado Límite de Servicio de vibraciones ($2,50 \text{ m/s}^2$).

6.2. Modelo numérico

- Se ha calibrado el modelo numérico de Elementos Finitos en base a la frecuencia del primer modo vertical de la pasarela, determinada experimentalmente. Los parámetros de calibración fueron la rigidez del enrejado y el tipo de apoyos.
- La rigidez del enrejado tiene un efecto significativo sobre la frecuencia del primer modo vertical
- El tipo de apoyo tiene un efecto más limitado.
- No se alcanza el ELU de resistencia de las secciones transversales en la pasarela
- No se alcanza el ELU de resistencia a pandeo de los elementos de la pasarela

Bibliografía

- [1] Cahill et al. Comparison of smartphone accelerometer applications for structural vibration monitoring. *Advanced in Computational Design*, pages 1–13, 2019.
- [2] Feldbusch et al. Vibration analysis using mobile devices (smartphones or tablets). *X International Conference on Structural Dynamics*, 2017.
- [3] Google. Google Play Store, 2020. <https://play.google.com/store>.
- [4] Hester et al. Boundary condition focused finite element model updating for footbridges. *Engineering Structures*, 2019.
- [5] Merce et al. Finite element model updating of a suspension bridge using ansys software. *Inverse Problems, Design and Optimization Symposium, Miami, Florida, USA*, 2007.
- [6] Sequera-Gutierrez et al. Updating the finite element model of a colombian bridge with ansys. *Revista DYNA*, pages 209–218, 2007.
- [7] Ansys. Ansys Structural Analysis, 2020. <https://www.ansys.com/products/structures>.
- [8] Ingólfsson et al. Pedestrian-induced lateral vibrations on footbridges: a literature review. *Engineering Structures*, 2012.
- [9] SETRA (Service d’Etudes Techniques des Routes et Autoroutes). *Passerelle piétonne. Evaluation du comportement vibratoire sous l’action des piétons*. 2006.
- [10] Heinemeyer et al. *Design of lightweight footbridges for human-induced vibrations*. 2009.
- [11] CEN. Eurocode - Basis of structural design. 2001.
- [12] Patak et al. Vibration damping in steel footbridges. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018.
- [13] Ministerio de Fomento. *Instrucción sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carretera*, 2012.
- [14] CEN. Eurocódigo 3: Proyecto de estructuras de acero - Parte 2: Puentes. 2013.
- [15] Computers and Structures Inc. SAP2000, 2020. <https://www.csiespana.com/software/2/sap2000>.
- [16] Microsoft. Microsoft 365 Excel, 2020. <https://www.microsoft.com/es/microsoft-365/excel>.
- [17] MathWorks. MATLAB R2020b, 2020. <https://es.mathworks.com/products/matlab.html>.

A. Código Matlab para la obtención del espectro de frecuencia

```
z=AccelerationZms2-mean(AccelerationZms2); %vector aceleraciones Z con gravedad neutralizada
t=Times-Times(1); %vector tiempo (empieza en 0)
n=length(t); %número de muestras
df=1/t(n); %incremento de frecuencia
fs=1/(t(n)/n); %frecuencia de muestreo
f=(0:n-1)*(fs/n); %vector frecuencia
FFTiZ=fft(z); %vector FFT eje Z (imaginario)
FFTZ=abs(FFTiZ); %vector FFT eje Z (módulo del anterior)
fn=round(n/2); %frecuencia de Niquist
plot(f(1:fn),FFTZ(1:fn))
```

B. Acciones consideradas para la verificación de los Estados Límite

La determinación de las acciones a considerar para la verificación de los Estados Límite se realiza siguiendo la metodología de la IAP-11 (Instrucción sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carretera, Ministerio del Fomento).

B.1. Peso propio

El valor del peso propio viene definido en los propios perfiles y materiales introducidos en el modelo numérico de Elementos Finitos.

B.2. Sobrecarga de uso

Para la determinación de los efectos estáticos de la sobrecarga de uso debida al tráfico de peatones, se considera la acción simultánea de las cargas siguientes:

- a) Una carga vertical uniformemente distribuida q_{fk} de valor igual a 5 kN/m²
- b) Una carga longitudinal uniformemente distribuida q_{flk} de valor igual a 0.5 kN/m²,

B.3. Viento

Se calculan en esta parte los valores de la acción del viento lateral sobre cada elemento de la pasarela. El viento lateral provoca un empuje horizontal (sobre los perfiles laterales) y un empuje vertical (sobre el tablero).

B.3.1. Empuje horizontal

La velocidad básica v_b del viento para un periodo de retorno de 50 años se obtiene mediante la expresión:

$$v_b = c_{dir} c_{season} v_{b,0} = 26,0 \quad [\text{m/s}]$$

donde

$c_{dir} = 1,0$: factor direccional del viento

$c_{season} = 1,0$: factor estacional del viento

$v_{b,0} = 26 \text{ m/s}$: velocidad básica fundamental del viento según el mapa de isotacas de la Figura B.1



Figura B.1: Mapa de isotacas para la obtención de la velocidad básica fundamental del viento $v_{b,0}$ (fuente: IAP-11)

El empuje horizontal del viento sobre cualquier elemento se calcula mediante la expresión:

$$F_w = q_b c_e(z) c_f A_{ref}$$

donde

- q_b : Presión de la velocidad básica del viento
- $c_e(z)$: Coeficiente de exposición
- c_f : Coeficiente de fuerza del elemento considerado (Figura B.2)
- A_{ref} : Área del perfil considerado expuesta al viento

La presión de la velocidad básica del viento q_b se determina mediante la expresión siguiente:

$$q_b = \frac{1}{2} \rho v_b^2 = 422,5 \quad [\text{N/m}^2]$$

donde $\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3$: Densidad del aire

El coeficiente de exposición $c_e(z)$ se obtiene según la fórmula siguiente:

$$c_e(z) = \frac{q_p(z)}{q_b} = 2,35$$

donde $q_p(z)$: Presión de la velocidad punta del viento

	$\frac{B}{h}$	$\leq 0,2$	0,4	0,6	0,7	1,0	2,0	5,0	$\geq 10,0$
	c_f	2,0	2,2	2,35	2,4	2,1	1,65	1,0	0,9
$c_f = 1,4$	sección circular con superficie lisa y tal que: $\varnothing v_b (T) \sqrt{c_s(z)} > 6 \text{ m}^2/\text{s}$ $c_f = 0,7$		sección circular con superficie rugosa ^(*) , o lisa tal que: $\varnothing v_b (T) \sqrt{c_s(z)} < 6 \text{ m}^2/\text{s}$ $c_f = 1,2$						
$c_f = 1,8$	$c_f = 1,6$	$c_f = 1,45$	$c_f = 1,3$						
$c_f = 1,6$	$c_f = 2,2$	$c_f = 2,0$							

(*) Se tomará siempre superficie rugosa excepto si la rugosidad superficial equivalente resulta menor de $\phi \cdot 10^{-5} \text{ m}$

Figura B.2: Coeficiente de fuerza c_f para las secciones más habituales (fuente: IAP-11)

La presión de la velocidad punta del viento $q_p(z)$ se determina mediante la expresión siguiente:

$$q_p(z) = \frac{1}{2} \rho v_m^2 [1 + 7I_v(z)] = 993,84 \quad [\text{N/m}^2]$$

donde

v_m : Velocidad media del viento

$I_v(z)$: Intensidad de la turbulencia

La velocidad media del viento $v_m(z)$ se determina mediante la expresión siguiente:

$$v_m(z) = c_r(z) c_0 v_b = 26,17 \quad [\text{m/s}]$$

donde $c_0 = 1,0$: factor de topografía

El factor de rugosidad se obtiene mediante la expresión siguiente:

$$c_r(z) = k_r \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) = 1,01 \quad | \quad z \geq z_{min}$$

donde

$k_r = 0,190$: Factor del terreno (Tabla B.1)

$z_{min} = 2 \text{ m}$ (Tabla B.1)

$z = 10 \text{ m} \geq z_{min}$: Altura de aplicación del empuje de viento respecto del terreno

$z_0 = 0,05$: Longitud de la rugosidad (Tabla B.1)

Tipo de entorno II: zona rural con vegetación baja y obstáculos aislados

Tabla B.1: Coeficientes k_r , z_0 y z_{min} según el tipo de entorno

TIPO DE ENTORNO	k_r	z_0 [m]	z_{min} [m]
0	0,156	0,003	1
I	0,170	0,01	1
II	0,190	0,05	2
III	0,216	0,30	5
IV	0,235	1,00	10

Fuente: IAP-11

La intensidad de la turbulencia se calcula mediante la ecuación:

$$I_v(z) = \frac{k_I}{c_0 \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} = 0,19 \quad | \quad z \geq z_{min}$$

donde $k_I = 1,0$: Factor de turbulencia

El empuje horizontal del viento F_w se calcula para cada elemento de la pasarela expuesto al viento. En el caso de los elementos a sotavento, dado que se ven parcialmente ocultados, el empuje horizontal considerado es una fracción del empuje calculado para la fachada a barlovento. Se calcula mediante la expresión:

$$F_{w,b} = \eta F_w$$

donde

$\eta = 0,32$: Coeficiente de ocultamiento obtenido por interpolación lineal de los valores de la Tabla B.3

F_w el empuje horizontal del viento para un elemento similar ubicado a barlovento

La Tabla B.2 contiene los valores de empuje horizontal F_w y $F_{w,b}$ para cada uno de los elementos.

Tabla B.2: Empuje horizontal

Perfil	c_f	Anchura expuesta al viento [mm]	F_w [N/m]	$F_{w,b}$ [N/m]
P1	1.88	200	372.69	119.70
P2	2.10	200	417.41	134.07
P3	1.80	120	214.67	68.95
Enrejado	0.70	19.6 [%] ¹	136.36 [N/m ²]	43.80 [N/m ²]

¹ Porcentaje de superficie oculta

Tabla B.3: Coeficiente de ocultamiento η

ESPACIAMIENTO RELATIVO s_r	RELACIÓN DE SOLIDEZ λ					
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	$\geq 0,6$
0,5	0,75	0,40	0,31	0,22	0,13	0,06
1	1,00	0,82	0,64	0,46	0,28	0,10
2	1,00	0,84	0,68	0,52	0,36	0,20
3	1,00	0,86	0,72	0,59	0,45	0,31
4	1,00	0,89	0,78	0,68	0,57	0,46
5	1,00	1,00	0,92	0,85	0,77	0,69
6	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

Fuente: IAP-11

B.3.2. Empuje vertical

Además del empuje horizontal, se considera un empuje vertical (también provocado por el viento lateral) actuando sobre el tablero en el sentido más desfavorable, igual a:

$$F_{w,z} = q_b c_e(z) c_{f,z} = \pm 894,46 \quad [\text{N/m}^2]$$

donde $c_{f,z} = \pm 0,9$ es el coeficiente de fuerza en la dirección vertical

B.4. Nieve

El valor característico de la sobrecarga de nieve en los tableros se calcula mediante la ecuación:

$$q_{N,k} = 0,8s_k = 160 \quad [\text{N/m}^2]$$

donde $s_k = 0,2$ es el valor característico de la sobrecarga de nieve sobre un terreno horizontal (ver Tabla B.4)

Tabla B.4: Sobrecarga de nieve sobre un terreno horizontal en las capitales de provincia y ciudades autónomas

CAPITAL	ALTITUD [m]	s_k [kN/m ²]	CAPITAL	ALTITUD [m]	s_k [kN/m ²]	CAPITAL	ALTITUD [m]	s_k [kN/m ²]
Albacete	690	0,6	Guadalajara	680	0,6	Pontevedra	0	0,3
Alicante	0	0,2	Huelva	0	0,2	Salamanca	780	0,5
Almería	0	0,2	Huesca	470	0,7	San Sebastián	0	0,3
Ávila	1130	1,0	Jaén	570	0,4	Santander	0	0,3
Badajoz	180	0,2	León	820	1,2	Segovia	1000	0,7
Barcelona	0	0,4	Lleida	150	0,5	Sevilla	10	0,2
Bilbao	0	0,3	Logroño	380	0,6	Soria	1090	0,9
Burgos	860	0,6	Lugo	470	0,7	Tarragona	0	0,4
Cáceres	440	0,4	Madrid	660	0,6	Tenerife	0	0,2
Cádiz	0	0,2	Málaga	0	0,2	Teruel	950	0,9
Castellón	0	0,2	Murcia	40	0,2	Toledo	550	0,5
Ciudad Real	640	0,6	Ourense	130	0,4	Valencia	0	0,2
Córdoba	100	0,2	Oviedo	230	0,5	Valladolid	690	0,4
A Coruña	0	0,3	Palencia	740	0,4	Vitoria	520	0,7
Cuenca	1010	1,0	Palma de Mallorca	0	0,2	Zamora	650	0,4
Girona	70	0,4	Palmas, Las	0	0,2	Zaragoza	210	0,5
Granada	690	0,5	Pamplona	450	0,7	Ceuta y Melilla	0	0,2

Fuente: IAP-11

B.5. Combinaciones para comprobaciones en ELU

La combinación de acciones se hace de acuerdo con la expresión siguiente:

$$\gamma_G G_k + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum_{i>1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i}$$

donde

G_k : Valor característico del peso propio

$Q_{k,1}$: Valor característico de la acción variable dominante

$\psi_{0,i} Q_{k,i}$: Valor de combinación de las acciones variables concomitantes con la acción variable dominante

γ_G, γ_Q : Coeficientes parciales

Los coeficientes parciales γ_F y coeficientes de combinación ψ_0 se toman de la IAP-11 y se resumen en la Tabla B.5.

Tabla B.5: Coeficientes parciales γ_F y de combinación ψ_0 de las acciones

Acción F	γ_F		ψ_0
	Favorable	Desfavorable	
Peso propio G	1	1.35	-
Sobrecarga de uso Q	0	1.35	0
Viento V	0	1.5	0.3
Nieve N	0	1.5	0.8

Los casos de carga considerados para la comprobación en ELU son los siguientes:

- $1,35 G$
- $1,35 G + 1,35 Q$
- $1 G + 1,5 V_{up}$
- $1,35 G + 1,35 Q + 0,3 \cdot 1,5 V_{down}$
- $1,35 G + 1,5 V_{down} + 0,8 \cdot 1,5 N$

El empuje vertical del viento sobre el tablero puede ser en los dos sentidos. V_{up} corresponde a la hipótesis del empuje viento en el sentido antigravitatorio y V_{down} en el sentido gravitatorio. Ambos contienen además el empuje horizontal. Cuando se combinan varias acciones variables, la sobrecarga de uso es dominante. En ausencia de sobrecarga de uso, la acción del viento domina la de la nieve.

C. ELU de Resistencia a Pandeo

La resistencia a pandeo de los elementos sometidos a compresión y flexión se verifica cuando cumple el criterio siguiente:

$$\left\{ \frac{1}{\chi_y} \right\} \frac{N_{Ed}}{N_{Rk}/\gamma_{M1}} + \left\{ \frac{1}{\alpha_y} \right\} \frac{k c_m M_{y,Ed}}{M_{y,Rk}/\gamma_{M1}} \leq \left\{ \frac{1}{1} \right\}$$

donde

χ_y : Coeficiente de reducción para pandeo en el eje y

χ_z : Coeficiente de reducción para pandeo en el eje z

N_{Ed} : Valor de cálculo del esfuerzo axial máximo de compresión

N_{Rk} : Valor característico de la resistencia a compresión

γ_{M1} : Coeficiente parcial de la resistencia de piezas frente a la inestabilidad

$\alpha_y = 0,8$ (Sección de clase 3)

k : coeficiente de interacción

c_m : factor de momento flector uniforme equivalente

$M_{y,Ed}$: Valor característico del momento flector

$M_{y,Rk}$: Valor característico de la resistencia al momento flector

El valor característico de la resistencia a compresión se calcula mediante la expresión:

$$N_{Rk} = A f_y \quad [\text{kN}]$$

donde

$f_y = 275$ MPa: Límite elástico

A : Área de sección

El valor característico de la resistencia a flexión se calcula mediante la expresión:

$$M_{y,Rk} = W_y f_y \quad [\text{kN-m}]$$

donde

W_y : Módulo resistente elástico de la sección

Cuando exista esfuerzo cortante, se debe llevar a cabo una reducción de la resistencia a flexión. Su efecto se puede despreciar cuando el esfuerzo cortante V_{Ed} sea menor que la mitad de la resistencia plástica de cálculo a cortante $V_{pl,Rd}$. Esta se obtiene mediante la expresión siguiente:

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_V f_y}{\sqrt{3} \gamma_{M0}}$$

La Tabla C.1 indica el valor del esfuerzo cortante y de la resistencia plástica de cálculo a cortante, así como la relación entre estos dos valores.

Tabla C.1: Efecto del esfuerzo cortante

Sección	A_V [mm ²]	$V_{pl,Rd}$ [kN]	V_{Ed} [kN]	$V_{Ed}/V_{pl,Rd}$
P1	11800	1784.3	12.1	0.006
P2	3090	467.2	6.0	0.013
P3	3040	459.7	7.7	0.017
P4a	6800	1028.2	9.6	0.009
P6	6800	1028.2	44.6	0.04

Como se puede ver en la Tabla C.1, todas las secciones verifican el criterio. Se puede despreciar el efecto del cortante.

El coeficiente de reducción para pandeo se calcula mediante la expresión:

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}}$$

donde

$$\Phi = 0,5[1 + \alpha(\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2]$$

La esbeltez relativa $\bar{\lambda}$ se obtiene mediante la expresión:

$$\bar{\lambda} = \frac{L_\beta}{i \lambda_l}$$

donde

$$L_\beta = \beta L$$

β : coeficiente de pandeo en el eje correspondiente

L : Longitud del elemento

i : Radio de giro de la sección en el eje correspondiente

La esbeltez límite λ_l se obtiene mediante la expresión:

$$\lambda_l = \pi \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

La comprobación de la resistencia a pandeo se realizó sobre todos los perfiles de la pasarela, excepto:

- Los de las rampas
- Las diagonales superiores (P5) e inferiores (P7). Al ser consideradas como tirantes, no trabajan a compresión.
- Las viguetas (P8) y los montantes superiores 2 (P4b). No son elementos estructurales principales.

La Tabla C.2 contiene los resultados de la comprobación del ELU de pandeo. Ninguna sección alcanza el Estado Límite de pandeo. El elemento que más se acerca al Estado Límite es una diagonal lateral extrema. Es el mismo elemento que en la comprobación del ELU de Resistencia de las secciones. Para todos los perfiles, el caso de carga crítico es $1,35 G + 1,35 Q + 0,3 \cdot 1,5 V_{down}$.

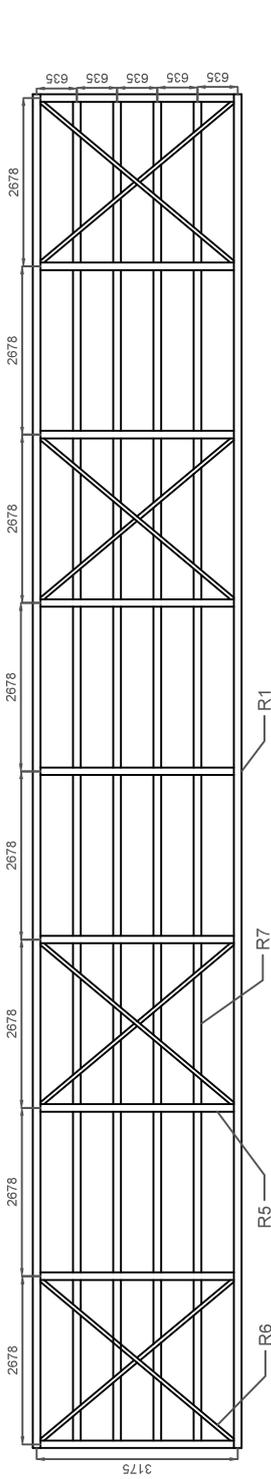
Tabla C.2: Resultados de la comprobación del ELU de pandeo

Parámetro	Eje fuerte						Eje débil					
	P1	P2	P3	P4a	P6	P6 ²	P1	P2	P3	P4a	P6 ²	
Sección	2xUPN300	200x200x4	200x120x5	180x180x10	180x180x10	-	2xUPN300	200x200x4	200x120x5	180x180x10	180x180x10	
A	11800	3090	3040	6800	6800	-	11800	3090	3040	6800	-	
W _y	1070000	197000	165000	365222	365222	-	726000	197000	125000	365222	-	
i	117	79.7	73.7	69.5	69.5	-	78.6	79.7	49.7	69.5	-	
N _{Rd}	2950000	772500	760000	1700000	1700000	-	2950000	772500	760000	1700000	-	
M _{y,Rd}	267500000	49250000	41250000	91305500	91305500	-	181500000	49250000	31250000	91305500	-	
N _{Ed}	1294057	549265	45122	79834	12256	-	1294057	549256	45122	79834	-	
M _{y,Ed}	27503255	4550647	10109930	14271253	10079695	-	16168812	10004327	6202614	7536798	-	
L	2678	3660	2495	3200	3200	-	2678	3660	2495	3200	-	
β	1	1	1	1	1	-	1	1	1	1	-	
L _β	2678	3660	2495	3200	3200	-	2678	3660	2495	3200	-	
λ ₁	86.80	86.80	86.80	86.80	86.80	-	86.80	86.80	86.80	86.80	-	
λ̄	0.26	0.53	0.39	0.53	0.53	-	0.39	0.53	0.58	0.53	-	
Curva de pandeo	c	a	a	a	a	-	c	a	a	a	-	
α	0.49	0.21	0.21	0.21	0.21	-	0.49	0.21	0.21	0.21	-	
Φ	0.55	0.67	0.60	0.68	0.68	-	0.62	0.67	0.71	0.68	-	
χ	0.97	0.92	0.96	0.91	0.91	-	0.90	0.92	0.90	0.91	-	
k	1.07	1.25	1.01	1.02	1.00	-	1.11	1.25	1.02	1.02	-	
M _h	-25525250	-3269196	-8749505	-14271253	-10079695	-	-11216604	-10004327	-6143260	-7536798	-	
M _s	27503255	4550647	10109930	13104035	8993803	-	16168812	8367307	6202614	7346874	-	
M _s /M _h	-1.08	-1.39	-1.16	0.92	-0.89	-	-1.44	-0.84	-1.01	-0.97	-	
C _m	0.96	1.21	1.02	0.83	0.81	-	1.25	0.77	0.91	0.88	-	
Resultado Pandeo	0.56 ≤ 1	0.92 ≤ 1	0.32 ≤ 1	0.18 ≤ 1	0.10 ≤ 1	-	0.61 ≤ 1	0.97 ≤ 1	0.25 ≤ 1	0.13 ≤ 1	-	

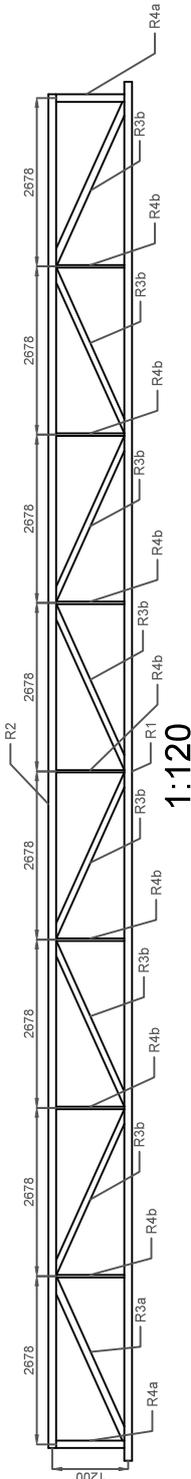
¹ Número de perfil según la Tabla 1.1

² El pandeo del perfil P6 está impedido en el plano horizontal debido a las viguetas

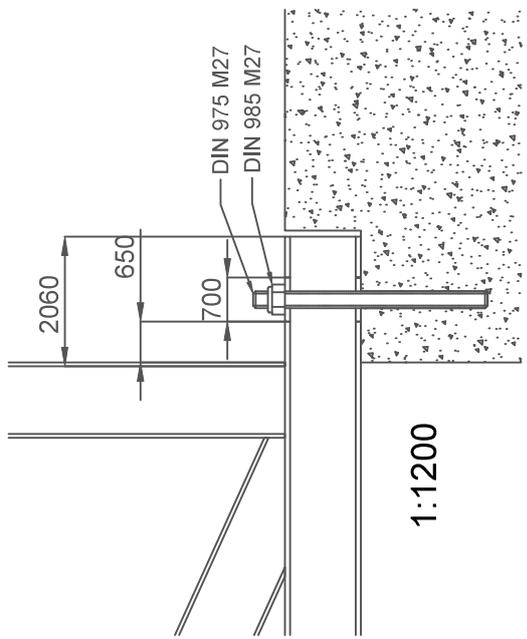
PLANOS



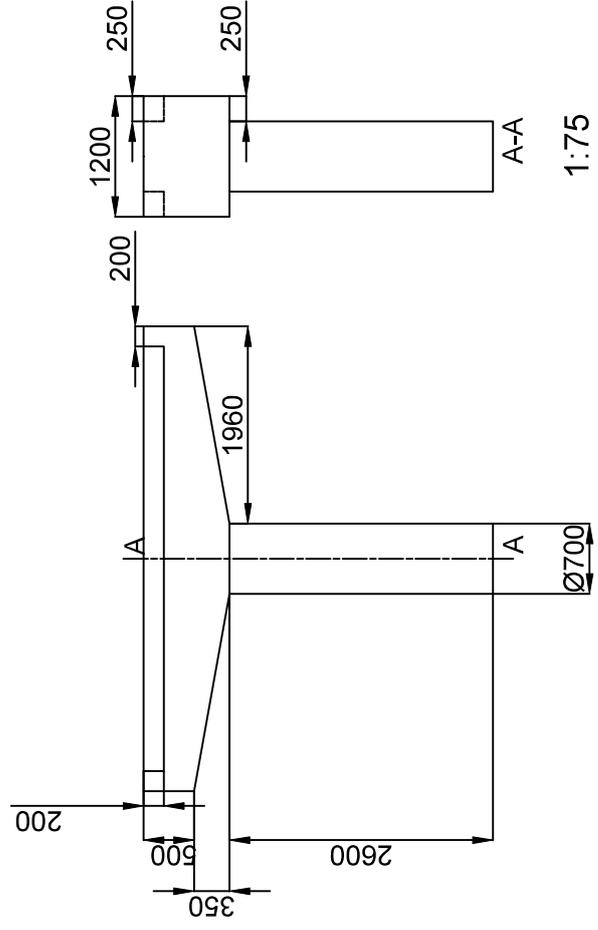
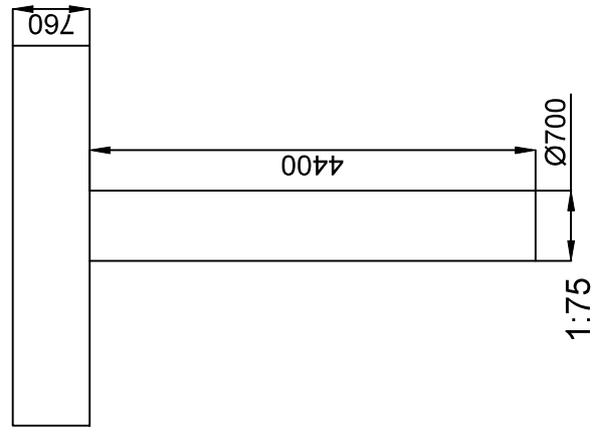
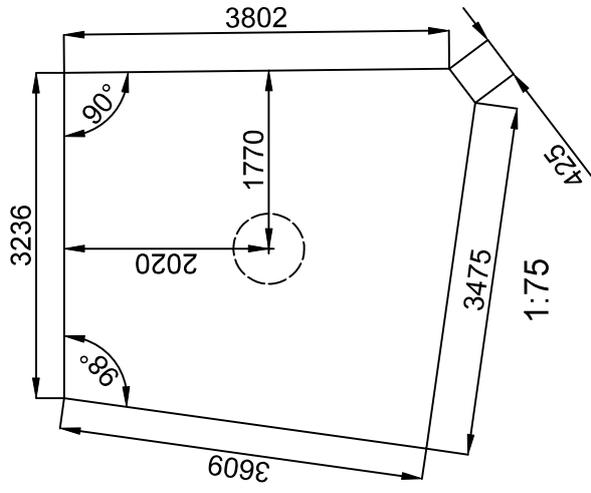
1:120



1:120



Nombre del plano	Autor
Rampas	Flavien Masse
Número del plano	Fecha
P02	Noviembre 2020



1:75

Nombre del plano	Autor
Pilares	Flavien Masse
Número del plano	Fecha
P03	Noviembre 2020

PLIEGO DE CONDICIONES

Pliego de condiciones

Objeto

El objeto de este pliego de condiciones es definir las actividades y especificaciones necesarias para el desarrollo del proyecto de análisis del comportamiento dinámico de pasarela para uso de peatones y ciclistas

Las tareas a realizar consistirán en la determinación de la geometría de la estructura, el diseño de un modelo numérico de la estructura, una campaña de medidas de vibración y un análisis de sensibilidad con calibración del modelo numérico.

Condiciones de la determinación de la geometría de la estructura

La determinación de la geometría de la estructura deberá realizarse con una precisión que permita el posterior diseño de un modelo numérico de la estructura, así como el análisis dinámico y resistente de la misma. Las herramientas empleadas para la medición serán acorde con este objetivo. Las características dimensionales a medir son: longitud y sección de los perfiles, dimensiones de los pilares, tipo de apoyos.

Condiciones de diseño del modelo numérico

El modelo numérico se diseñará mediante un programa de diseño de estructuras de elementos finitos, en base a las medidas dimensionales anteriormente realizadas. Deberá permitir este modelo el desarrollo de análisis modales así que análisis de cargas.

Condiciones de la campaña de medidas de vibración

La medición de vibraciones en la pasarela se realizará con un teléfono móvil mediante una aplicación cuya elección se justificará. Se grabará al menos la aceleración vertical y el tiempo. Se tomarán mediciones al menos en las condiciones siguientes: condiciones ambientes, con una persona corriendo, y un ensayo que permita determinar la tasa de amortiguamiento.

Condiciones del análisis de sensibilidad y de la calibración del modelo numérico

Se deberá analizar la sensibilidad del modelo frente a al menos dos parámetros, observando su efecto en la frecuencia del modo fundamental de la pasarela. Este análisis, junto a los resultados experimentales, deberá permitir la posterior calibración del modelo.

PRESUPUESTO

Presupuesto

12 de noviembre de 2020

Elemento	Tipo de Unidad	Unidades	Coste unitario [€/ud]	Coste [€]
Personal	Horas	400	18.00	7200.00
Subtotal Personal				7200.00
Licencia SAP2000	Meses	3	178.92	536.76
Licencia AutoCAD	Años	0.25	2227.00	556.75
Licencia Matlab	Años	0.25	800.00	200.00
Subtotal Licencias				1428.51
Medidor láser	Días	5	5.00	25.00
Cinta métrica				15.00
Sistema medición vibraciones	Días	2	20.00	40.00
Subtotal Material				80.00
Presupuesto de ejecución				8708.51
Beneficio industrial (6 %)				522.51
Presupuesto de contrata				9231.02
IVA (21 %)				1938.51
Presupuesto Total				11169.53