



UNIVERSIDAD DE OVIEDO

ESCUELA POLITÉCNICA DE MIERES

**MASTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA DE CAMINOS, CANALES Y
PUERTOS**

**DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIÓN E INGENIERÍA DE FABRICACIÓN
AREA DE MECÁNICA DE MEDIOS CONTINUOS Y TEORÍA DE
ESTRUCTURAS**

TRABAJO FIN DE MÁSTER

DISEÑO DE PASARELA PARA ENSAYOS CON CARGAS PEATONALES

AUTOR: JAVIER MENDÍVIL CALVO

TUTOR: MARTA GARCÍA DIÉGUEZ

COTUTOR: JOSÉ LUIS ZAPICO VALLE

JUNIO, 2021



UNIVERSIDAD DE OVIEDO

ESCUELA POLITÉCNICA DE MIERES

**MASTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA DE CAMINOS, CANALES Y
PUERTOS**

**DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIÓN E INGENIERÍA DE FABRICACIÓN
AREA DE MECÁNICA DE MEDIOS CONTINUOS Y TEORÍA DE
ESTRUCTURAS**

DOCUMENTO 1: MEMORIA

TRABAJO FIN DE MÁSTER

DISEÑO DE PASARELA PARA ENSAYOS CON CARGAS PEATONALES

AUTOR: JAVIER MENDÍVIL CALVO

TUTOR: MARTA GARCÍA DIÉGUEZ

COTUTOR: JOSÉ LUIS ZAPICO VALLE

JUNIO, 2021

Tabla de contenido

1	Introducción.....	4
1.1	Antecedentes.....	4
1.2	Objetivo.....	4
1.3	Datos de partida de la pasarela.....	4
2	Estado del arte.....	6
2.1	Carga dinámica.....	6
2.2	Análisis dinámico de estructuras.....	8
2.3	Normativa de vibraciones.....	8
2.3.1	ISO 10137:2007.....	8
2.3.2	NA to BS EN 1991-2:2003.....	9
2.3.3	HIVOSS.....	9
2.3.4	SÉTRA.....	9
2.4	Selección de los valores de referencia.....	10
3	Modelo de carga peatonal.....	11
3.1	Base de datos.....	11
3.1.1	Base de datos para velocidad constante.....	11
3.1.2	Base de datos para velocidad variable.....	12
3.2	Variabilidad en la velocidad.....	13
3.3	Variabilidad en el periodo del paso.....	15
3.4	Variabilidad de la fuerza.....	20
3.4.1	Preprocesado de los datos.....	20
3.4.2	Análisis preliminar de los resultados.....	20
3.4.3	Modelización estadística de las componentes DLF.....	22
3.4.4	Composición del modelo de fuerza.....	26
3.5	Composición del modelo de carga peatonal.....	27
3.5.1	Datos de entrada.....	27
3.5.2	Peso del peatón.....	28
3.5.3	Secuencia de velocidades.....	28
3.5.4	Secuencia de periodos de paso.....	28
3.5.5	Posición.....	29
3.5.6	Secuencia de DLF.....	29
3.5.7	Señal temporal de fuerza.....	29

4	Diseño de la estructura	31
4.1	Modelo dinámico	31
4.1.1	Modelo simplificado	31
4.1.2	Modelo completo.....	35
4.2	Modelo estático.....	37
5	Simulación de la respuesta de la pasarela	40
5.1	Aplicación del modelo de carga peatonal	40
5.2	Caracterización de la respuesta dinámica	40
5.2.1	Configuraciones de pasarela	40
5.2.2	Procedimiento de cálculo de la respuesta dinámica	41
6	Elementos estructurales secundarios.....	50
6.1	Sistema de compensación de la aceleración.....	50
6.2	Accesos.....	53
6.3	Uniones y movilidad	54
7	Instrumentación y calibración de la pasarela	56
7.1	Instrumentación	56
7.2	Pruebas de calibración	58
8	Conclusiones.....	59

Resumen

Uno de los objetivos que persigue el análisis dinámico de estructuras es el estudio de la interacción entre la acción dinámica y la respuesta estructural. Esta relación es conocida desde la antigüedad, cuando ya se había observado que el tránsito de personas y animales sobre puentes de madera podía dar lugar a desplazamientos en la estructura, e incluso el colapso de esta. A pesar de ser evidente la existencia de una relación entre acción y respuesta dinámicas, no es sencillo caracterizar la interacción de forma directa. En este proyecto se propone un modelo de pasarela que permite estudiar la interacción entre carga y respuesta mediante la realización de ensayos. La pasarela tiene un vano de 12 m, y un ancho para el tránsito de peatones de 1,5 m. Se trata de un mecanismo, al permitir un cierto descenso del punto central del vano de forma que la pasarela puede vibrar según un modo de vibración que mantenga la condición de sólido rígido en la estructura, y que sea excitado por la acción del tránsito de peatones sobre el tablero.

Abstract

One of the aims pursued by the dynamic analysis of structures is the study of the interaction between the dynamic load and the structural response. This relationship has been noticed since ancient times, when it had already been observed that the transit of people and animals over wooden bridges could lead to displacements in the structure, and even its collapse. Despite the obvious existence of a relationship between dynamic load and response, it is not easy to characterize the interaction directly. In this project, a pedestrian bridge model that allows studying the interaction between load and response by carrying out tests is proposed. The bridge has a span of 12 m and a width for pedestrian traffic of 1.5 m. It is a mechanism, by allowing a certain descent of span's central point so that the structure can vibrate according to a vibration mode that maintains the condition of rigid solid in the structure, and it is excited by the action of pedestrian traffic on the deck.

1 Introducción

1.1 Antecedentes

Este trabajo fin de máster se encuadra dentro de un proyecto de investigación financiado por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades titulado: "Modelizado y Calibración de las interacciones verticales peatón-estructura" llevado a cabo por los tutores de este trabajo.

En esta investigación está prevista la construcción de una pasarela dentro del edificio principal de la Escuela Politécnica de Mieres. Dicha pasarela servirá para la realización de ensayos de análisis de las vibraciones producidas por cargas peatonales sobre la estructura y a través de ellos conseguir inferir modelos de interacción entre los peatones y la estructura. También servirá para validar modelos de carga peatonal ya desarrollados por los tutores. En este contexto surge la posibilidad de hacer un diseño de la pasarela de laboratorio que cumpla ciertas condiciones establecidas de antemano.

1.2 Objetivo

Este proyecto tiene como objetivo el diseño de una pasarela de para realizar ensayos de vibración y poder así analizar los efectos producidos por acción de la carga peatonal sobre las estructuras horizontales. Es conocido que algunas acciones dinámicas, como el tráfico de peatones sobre una pasarela, pueden inducir vibraciones en la estructura. Este fenómeno puede provocar aceleraciones por encima de los umbrales de las normativas y, por tanto, se deben tener en cuenta en el dimensionamiento de estructuras suponiendo una relación entre la acción dinámica y la respuesta vibracional del elemento, sin embargo, esta relación todavía no está bien caracterizada y contrastada debido a su complejidad ni está bien resuelta en los códigos de diseño, siendo normalmente comprobaciones que se realizan posteriormente a la construcción de las estructuras con la sorpresa que eso conlleva en algunas ocasiones.

Otro objetivo de este proyecto es la definición de la instrumentación y calibración de la pasarela previas a la realización de una base de datos experimental.

Los ensayos que se van a realizar en esta pasarela tienen como objetivo validar modelos numéricos desarrollados previamente y futuros modelos de interacción entre el peatón y la estructura.

1.3 Datos de partida de la pasarela

En este apartado se presentan los datos iniciales de diseño, que servirán de base para el desarrollo de este trabajo.

Dadas las dimensiones del espacio donde se va a construir la pasarela, se decide diseñar una pasarela biapoyada de 12 m de longitud, elevada sobre el suelo para permitir alojar debajo un dispositivo de regulación de la frecuencia natural de la estructura y de las aceleraciones máximas que en ella se producen. El tablero dispondrá de 1,5 m de ancho para permitir el cruce de peatones sobre el mismo. El tablero estará compuesto por dos piezas de 6 m de largo como máximo por razones de montaje.

Se diseñará para que sea accesible a través de sendas plataformas ubicadas en los extremos, que cuentan con peldaños para permitir al peatón elevarse desde el nivel del suelo hasta la altura del tablero. Además de elevar al peatón se plantea una plataforma de acceso de un par de metros por cada lado para permitir iniciar la trayectoria de los peatones con una velocidad inicial. Tanto el tablero como las plataformas de acceso cuentan con barandillas por la seguridad de los viandantes.

2 Estado del arte

2.1 Carga dinámica

Se conoce como fuerza dinámica a aquella cuya magnitud varía en el tiempo. Representando gráficamente la señal de fuerza respecto al tiempo se pueden ver las variaciones de magnitud como oscilaciones de la señal. Si la fuerza tiene cierta periodicidad, como es el caso de la carga peatonal, que es aproximadamente repetida en cada paso, las oscilaciones van a seguir un cierto patrón, es decir, van a repetirse cada cierto tiempo.

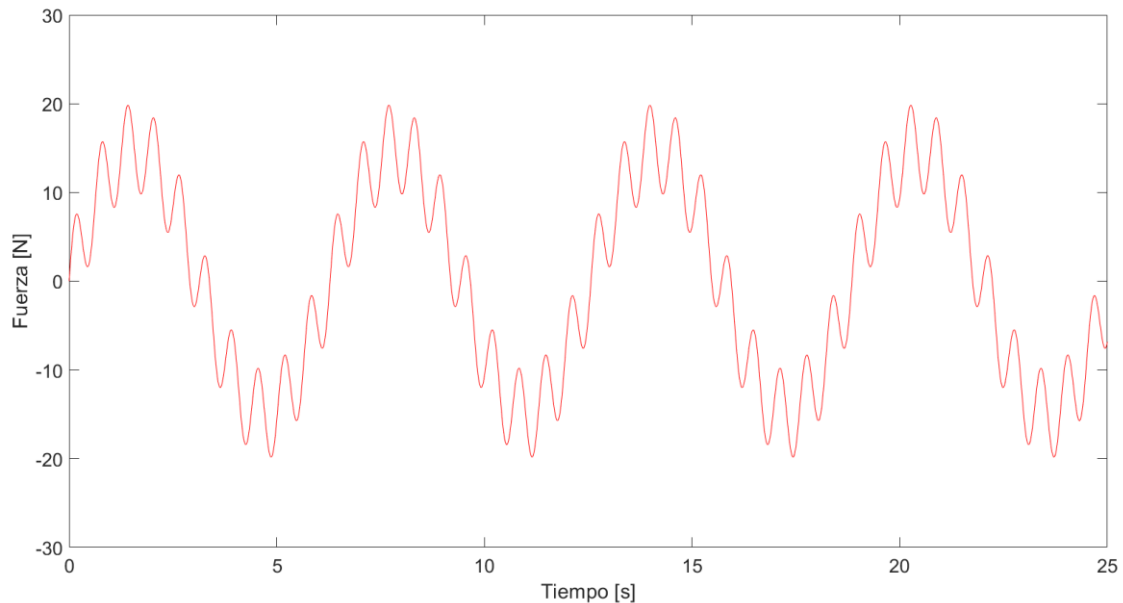


Figura 1: Ejemplo de señal temporal armónica de fuerza.

La señal de fuerza puede presentar diferentes oscilaciones, como se ejemplifica en la Figura 1; cada una de ellas tendrá una magnitud determinada, denominada amplitud, y tardará un determinado tiempo en volver a su punto inicial, denominado periodo. El número de oscilaciones por unidad de tiempo se denomina frecuencia, y es la inversa del periodo. En ocasiones es interesante representar la carga dinámica en el dominio de las frecuencias, en lugar de en el dominio del tiempo. De esta forma se puede visualizar la amplitud y frecuencia que definen cada una de las oscilaciones que conforman la señal de fuerza.

La representación en frecuencia de las señales dinámicas se obtiene mediante la Transformada de Fourier, \mathcal{F} . Se trata de una herramienta matemática que descompone una señal temporal en una suma de funciones senoidales puras. La operación inversa, es decir la transformación de una señal en el dominio de la frecuencia al dominio del tiempo, se realiza mediante la Inversa de la Transformada de Fourier, \mathcal{F}^{-1} .

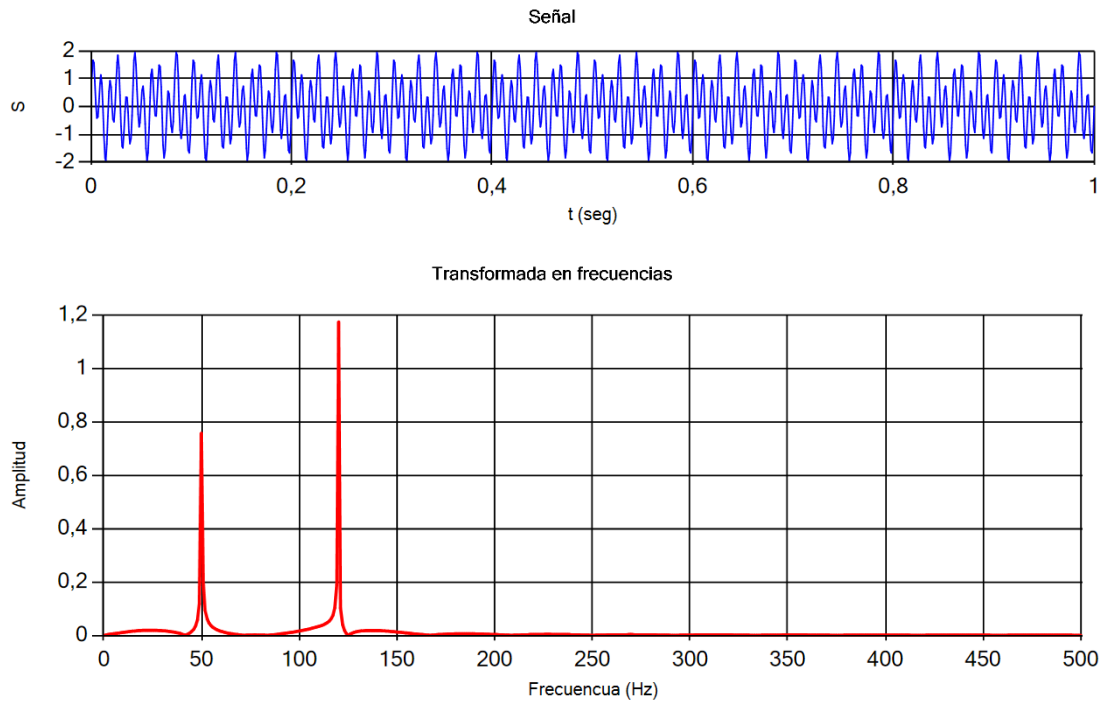


Figura 2: Ejemplo de señal de fuerza y su Transformada de Fourier.

La oscilación principal de una señal se denomina primer armónico. Junto a esta vibración encontramos otras oscilaciones secundarias que aparecen orgánicamente al excitarse el primer armónico. Los denominamos armónicos y subarmónicos.

Un armónico es una oscilación cuya frecuencia es un múltiplo entero de la frecuencia del primer armónico. De esta forma se designa cada armónico por un número correspondiente al múltiplo (2, 3, 4, etc). Por otro lado, un subarmónico es una oscilación cuya frecuencia es un múltiplo entero del subarmónico principal, cuya frecuencia es la mitad de la del primer modo de vibración. Cada armónico y subarmónico se designa por el número correspondiente al factor multiplicativo de su frecuencia respecto a la frecuencia del primer armónico, como se presenta en la Tabla 1.

Tabla 1: Designación modos de vibración y sus frecuencias.

Armónicos		Subarmónicos	
Modo 1	f	Modo 0,5	$0,5 f$
Modo 2	$2 f$	Modo 1,5	$1,5 f$
Modo 3	$3 f$	Modo 2,5	$2,5 f$
Modo 4	$4 f$	Modo 3,5	$3,5 f$
...		...	

2.2 *Análisis dinámico de estructuras*

Se conoce como vibración libre la que se produce en un sistema cuando la carga es nula en el correspondiente intervalo de tiempo. La vibración está originada por la carga previa al intervalo.

La respuesta dinámica de la estructura ante la carga ejercida sobre ella depende de la propia carga, así como de una serie de propiedades intrínsecas a la estructura que se van a definir a continuación:

- Frecuencia natural: frecuencia en la cual un sistema oscila en vibración libre. Un sistema puede tener varias frecuencias naturales, cada una de ellas determina un modo de vibración.
- Rigidez: capacidad que posee una estructura para oponerse a las deformaciones soportando las cargas que actúan sobre ella.
- Masa modal: fracción de la masa de una estructura correspondiente a la masa que se moviliza durante una vibración.
- Amortiguamiento: fenómeno de atenuación orgánica de los movimientos oscilatorios de un sistema en vibración libre. Evita que una estructura vibre indefinidamente tras ser excitada.
- Modo de vibración: movimiento oscilatorio que manifiesta una estructura en vibración libre. Una estructura puede poseer un número indefinido de modos de vibración, cada uno de ellos correspondiente a una frecuencia natural determinada.

2.3 *Normativa de vibraciones*

Diferentes normativas en vigor establecen valores de aceleración máxima que puede soportar un peatón caminando sobre una estructura. Los valores establecidos son distintos en cada una de ellas, por lo que se revisaron las diferentes normas y se seleccionó un valor de referencia óptimo.

Como se verá a continuación, prácticamente todas las normas consideran que 2 m/s^2 es un valor que ofrece un mínimo de confort a los usuarios, por lo que fue seleccionado como valor de referencia tras revisar las normativas siguientes.

2.3.1 *ISO 10137:2007*

En [1] se establece, mediante gráficos, el valor medio cuadrático de aceleración máxima en pasarelas en función de la frecuencia de vibración en una determinada dirección. En concreto, a las oscilaciones verticales corresponde la Figura C.1 de dicha norma, a partir de la cual se ha extraído la información de interés de la Tabla 2. En dicha tabla también se incluye el valor pico ($\sqrt{2} \text{ RMS}$).

Tabla 2: Aceleración máxima vertical según ISO 10137 [1].

Frecuencia puente [Hz]	Aceleración [m/s ²]	
	RMS	Pico
2	0,3	0,42
3	0,36	0,51
4-8	0,42	0,60

2.3.2 NA to BS EN 1991-2:2003

En [2] se establece una aceleración vertical máxima en puentes, a_{limit} , que es función del tipo uso, la importancia y el peso de la estructura, y deberá cumplir:

$$0,5 \text{ m/s}^2 \leq a_{limit} \leq 2,0 \text{ m/s}^2$$

2.3.3 HIVOSS

En [3] se establecen cuatro clases de confort en las pasarelas en el apartado 4.3.2 de dicha norma, presentadas en la Tabla 3 de este documento.

Tabla 3: Clases de confort según HIVOSS [3].

Clase de confort	Grado de confort	Aceleración [m/s ²]	
		Vertical	Lateral
CL 1	Máximo	< 0,50	< 0,10
CL 2	Medio	0,50 – 1,00	0,10 – 0,30
CL 3	Mínimo	1,00 – 2,50	0,30 – 0,80
CL 4	No aceptable	> 2,50	> 0,80

Este mismo sistema de grados de confort es replicado en la norma española IAP-11 en su apartado 7.2.2 “Estado límite de vibraciones en pasarelas peatonales”, con idénticos valores de referencia.

2.3.4 SÉTRA

En [4] se presenta un sistema de niveles de confort en el apartado 4.2.2 de dicha norma, similar al de HIVOSS. Los valores son presentados en la Tabla 4 de este documento.

Tabla 4: Niveles de confort según SÉTRA [4].

Rango	Aceleración vertical [m/s ²]	Nivel de confort	Percepción
1	< 0.5	Máximo	Imperceptible
2	0.5 – 1	Medio	Bastante perceptible
3	1 – 2.5	Mínimo	Perceptible pero no intolerable
4	> 2.5		Intolerable

2.4 Selección de los valores de referencia

Una vez revisado el diseño inicial de la pasarela, la serviciabilidad en cuanto a aceleración de diferentes normativas, y el modelo de carga peatonal de referencia, se establecen a continuación unos valores de referencia necesarios para caracterizar el funcionamiento del sistema dinámico de la pasarela.

La frecuencia de oscilación vertical de la pasarela será de 2 Hz, que aproximadamente es el valor medio obtenido en el modelo de carga peatonal revisado. El valor es extrapolable al caso actual, ya que la simulación es para una pasarela de 12,5 m y la longitud de este caso es de 12,0 m.

La aceleración con la que oscila la pasarela será de 2 m/s², valor que ofreciendo un mínimo de confort es fácilmente perceptible.

3 Modelo de carga peatonal

En este capítulo se describe con suficiente detalle un modelo de carga peatonal desarrollado por los tutores de este trabajo. Es un modelo estadístico inferido a través de una base de datos experimental con señales de carga peatonal de 50 voluntarios caminando a distintas velocidades. Este modelo se ha publicado y ha venido a ampliar el espectro de modelos de carga peatonal desarrollado por la comunidad científica.

El modelo fue desarrollado a lo largo de varios artículos. Un primer modelo de variación del periodo de paso fue descrito en [5], mejorado en [6] con la introducción de un modelo autorregresivo. En [7] se plantea un modelo que considera la variación de la velocidad en el andar del peatón y, finalmente, el modelo de carga peatonal es completado [8] con la introducción de un modelo de fuerzas variables.

La principal novedad del modelo propuesto con respecto a otros es que todos los parámetros del modelo dependen de la velocidad de avance del peatón, en lugar de la frecuencia de paso. En los siguientes apartados se detalla el modelo ya que es una herramienta necesaria para el diseño de la pasarela.

3.1 Base de datos

3.1.1 Base de datos para velocidad constante

Para poder caracterizar matemáticamente la carga peatonal, los autores se apoyaron en una base de datos experimental, consistente en señales temporales reales de fuerza de 50 personas. Para asegurar la representatividad de la muestra se seleccionaron 25 mujeres y 25 hombres, de diferentes edades y pesos. De esta forma se estará considerando la variabilidad que existe entre diferentes personas. Los sujetos reclutados fueron personas adultas, sanas y vestían ropa y calzado habituales.

La base de datos se registró sobre una cinta de caminar específicamente diseñada para este propósito. Consiste en un bastidor metálico fijado al suelo del laboratorio, que soporta un mecanismo de barras sobre el que está apoyada la cinta de caminar. Esta tiene 1 m de longitud y 0,6 m de ancho, y proporciona velocidades de entre 0,1 y 8 km/h con incrementos de 0,1 km/h. El mecanismo de barras conecta la cinta de caminar con una célula de carga, de forma que la acción ejercida por el peatón en su paso es transmitida por las barras y recibida en la célula de carga para poder ser medida. La posición de la célula de carga es tal que la fuerza medida es la fuerza vertical aplicada sobre la cinta, independientemente de la posición horizontal del peatón en ella.

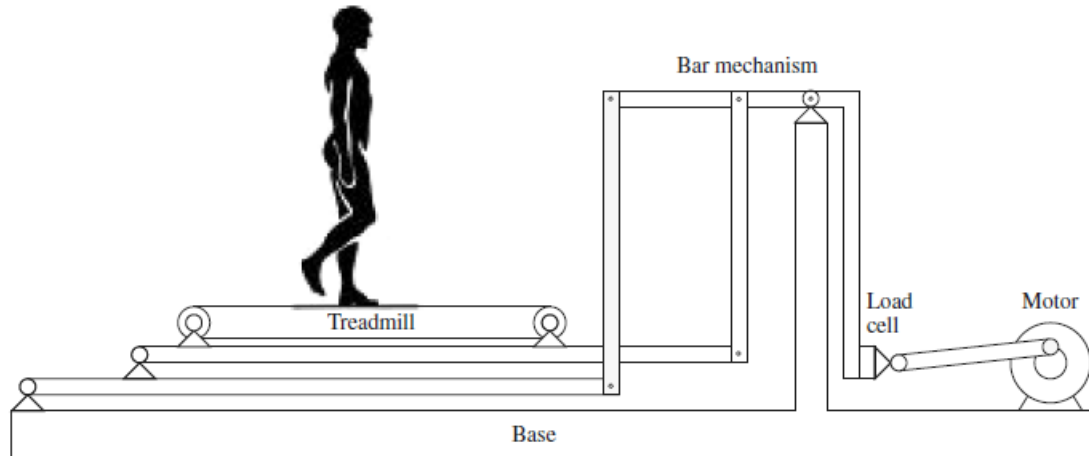


Figura 3: Equipo de ensayo.

El experimento se inicia con el voluntario caminando sobre el suelo del laboratorio una distancia de 35 m en línea recta, midiendo el tiempo empleado. Tres mediciones son realizadas para obtener el tiempo medio y determinar así la velocidad preferida de la persona, v_p , siendo esta la velocidad a la que la persona se siente más cómoda caminando.

A partir de este valor se obtienen otras velocidades superiores e inferiores, dando lugar a un total de 6 velocidades por persona., Las velocidades consideradas para cada voluntario, calculadas a partir de v_p son: $1,4 v_p$, $1,2 v_p$, v_p , $0,8 v_p$, $0,6 v_p$ y $0,4 v_p$.

Se realizan 6 ensayos por persona en la cinta de caminar a las 6 diferentes velocidades determinadas para cada sujeto. De esta forma se considera la variabilidad existente dentro de una misma persona, en función del momento en el que está caminando. Cada ensayo debe superar los 100 pasos y el orden en el que el sujeto realiza cada ensayo es aleatorio para cada persona. En total se han analizado 300 registros de fuerza de 50 personas caminando a 6 velocidades distintas.

3.1.2 Base de datos para velocidad variable

Por la forma en la que se construyó la base de datos experimental, no era posible tener información sobre la variabilidad de la velocidad, ya que cada ensayo se realizaba a velocidad constante y las dimensiones de la cinta de caminar (1 m de longitud) no permitía al peatón a variar la velocidad fijada por la cinta.

Para poder modelizar esta variabilidad se ha recurrido a unos datos provenientes de otros investigadores de una campaña de recogida de datos experimentales, descrita en [9], donde se midió la secuencia de velocidad al andar libremente sobre el suelo.

En la campaña participaron 14 adultos sanos. Realizaron 4 ensayos cada uno, consistentes en caminar 100 pasos seguidos sobre el suelo en línea recta. La posición relativa del sujeto fue monitorizada por un sistema de rastreo magnético instalado en un carro que se hacía rodar junto a la persona conforme esta caminaba. Tres receptores magnéticos se fijaron sobre el cuerpo del peatón, uno en cada antepié y otro en la zona lumbar. La posición del carro sobre el suelo se midió mediante un codificador óptico, permitiendo finalmente determinar la posición relativa de los receptores

respecto al suelo. La velocidad de avance del sujeto se obtiene de los datos del receptor de la espalda y la longitud del paso se calcula a partir de los datos arrojados por los receptores de los pies.

3.2 Variabilidad en la velocidad

La velocidad libre del peatón en el instante correspondiente a un determinado paso, v_i , se puede descomponer en una suma de dos términos: $v_i = \bar{v} + \tilde{v}_i$, donde \bar{v} es la velocidad media regida por una distribución normal, y \tilde{v}_i la desviación en el paso actual. Esta descomposición de la velocidad se representa en la Figura 4.

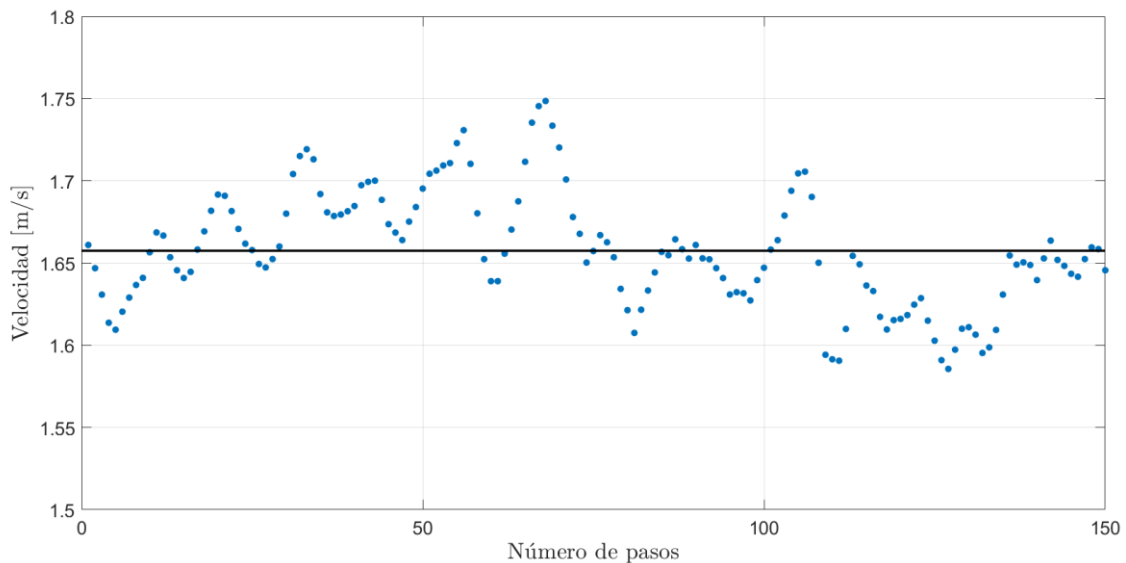


Figura 4: Evolución de la velocidad en un ensayo. Línea: valor medio; Puntos: medidas experimentales.

Esta desviación está descrita por un modelo autorregresivo de orden 2:

$$\tilde{v}_i = c_1 \tilde{v}_{i-1} + c_2 \tilde{v}_{i-2} + w_i \quad (1)$$

Donde c_1 y c_2 son variables autorregresivas que expresan la influencia del penúltimo y antepenúltimo paso en el paso último, respectivamente. Se consideró, por lo tanto, que sólo los dos pasos anteriores tienen influencia en el paso actual, es decir, que una desviación en un determinado paso afectará a los dos próximos y no ya a los sucesivos. El término w_i es una componente aleatoria.

En la Figura 5 se puede observar la presencia de autocorrelación en la desviación de la velocidad, así como una ausencia de autocorrelación en la componente aleatoria w_i

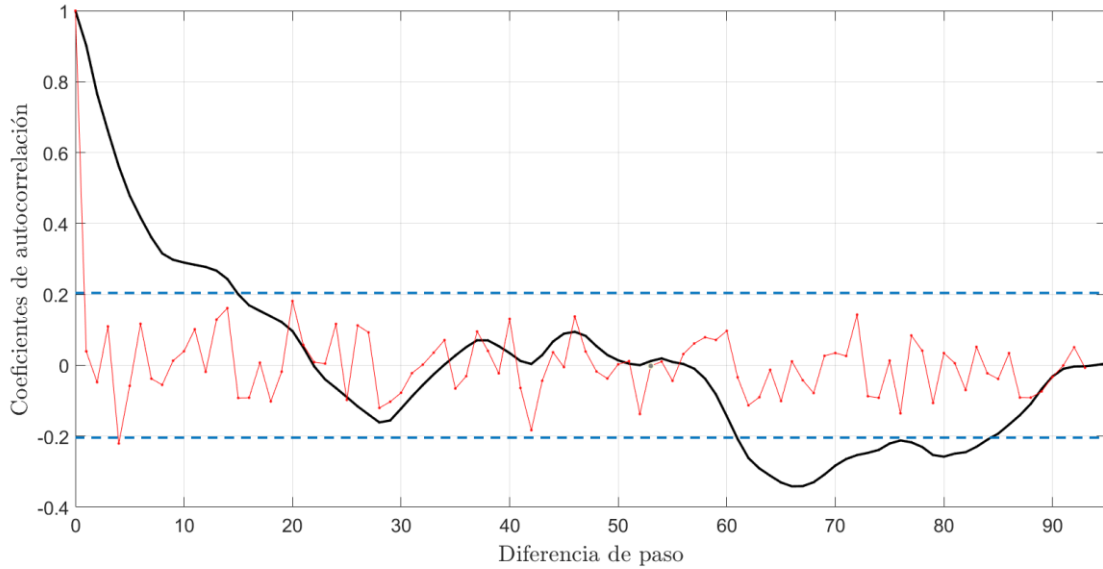


Figura 5: Función de autocorrelación de las velocidades de paso en un ensayo. Línea gruesa: autocorrelación de \hat{v}_i ; Línea fina: autocorrelación de w_i ; Líneas a trazos: intervalo de confianza del 95%.

Los parámetros autorregresivos c_1 y c_2 son independientes de \bar{v} y están descritos por una distribución binormal con las siguientes matrices de media, μ , y covarianza, Σ :

$$\mu = \begin{bmatrix} 1,45 \\ -0,55 \end{bmatrix}, \quad \Sigma = \begin{bmatrix} 0,0210 & -0,0180 \\ -0,0180 & 0,0180 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Enfrentando ambos parámetros autorregresivos c_1 y c_2 en un gráfico, se observó que los parámetros calculados a partir de los datos experimentales se encontraban concentrados en una determinada región, como muestra la Figura 6. Además, se determinó una zona fiable con forma triangular, fuera de la cual cualquier combinación de parámetros autorregresivos hace inestable el modelo.

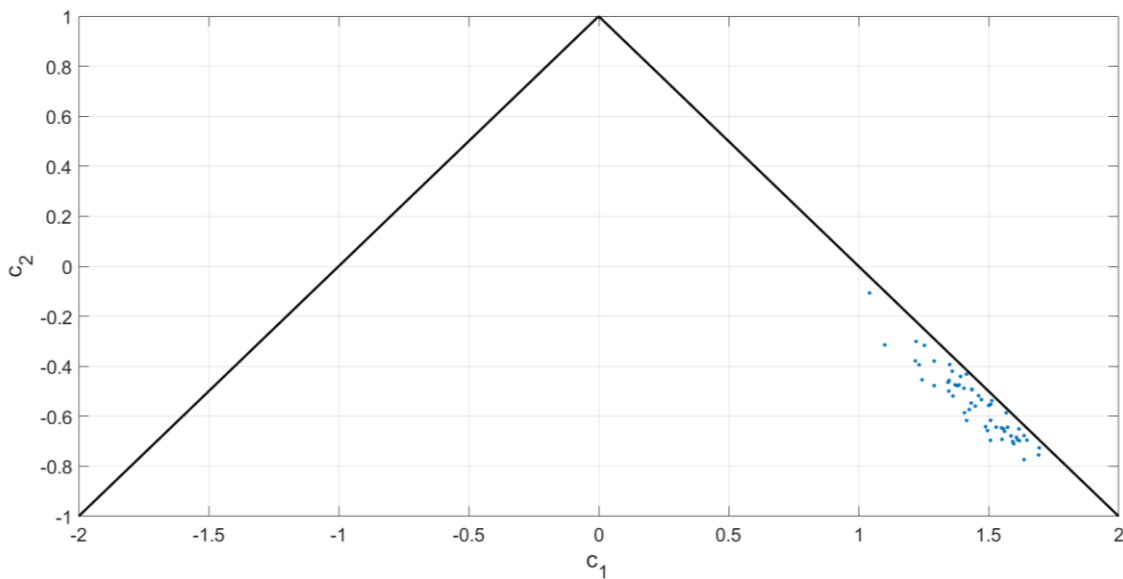


Figura 6: Representación espacial de los parámetros autorregresivos de la velocidad. Puntos: resultados experimentales; Líneas: límites zona fiable.

Los parámetros c_1 y c_2 inestabilizan el modelo autorregresivo cuando cumplen alguna de las siguientes condiciones:

$$\begin{aligned} -1 &> c_2 > 1 \\ c_1 + c_2 &> 1 \\ c_2 - c_1 &> 1 \end{aligned} \quad (3)$$

Si se determina que los parámetros autorregresivos están fuera de la zona fiable, el modelo deberá generar otros aleatoriamente hasta que cumpla las condiciones de estabilidad.

La componente aleatoria w_i está regida por una distribución normal de tipo ruido blanco según $N(0, \sigma_w)$. La desviación estándar σ_w es independiente de \bar{v} y puede ser descrita mediante una distribución beta $B(17, 2103)$. En resumen, la velocidad del peatón en el instante que realiza un paso depende de la velocidad correspondiente a los dos pasos anteriores y de una componente aleatoria.

3.3 Variabilidad en el periodo del paso

Una señal temporal de fuerza medida por la célula de carga está representada en la Figura 7. En ella se puede apreciar que la señal es periódica. El intervalo de tiempo entre cada dos crestas corresponde al periodo de un paso. Cada paso estará delimitado por este máximo relativo, de forma que la señal puede ser segmentada en pasos. De esta forma se determina el periodo, T_i , correspondiente a cada paso i . Para conseguir esta segmentación hay que hacer un filtrado de la señal original para obtener la frecuencia fundamental de paso.

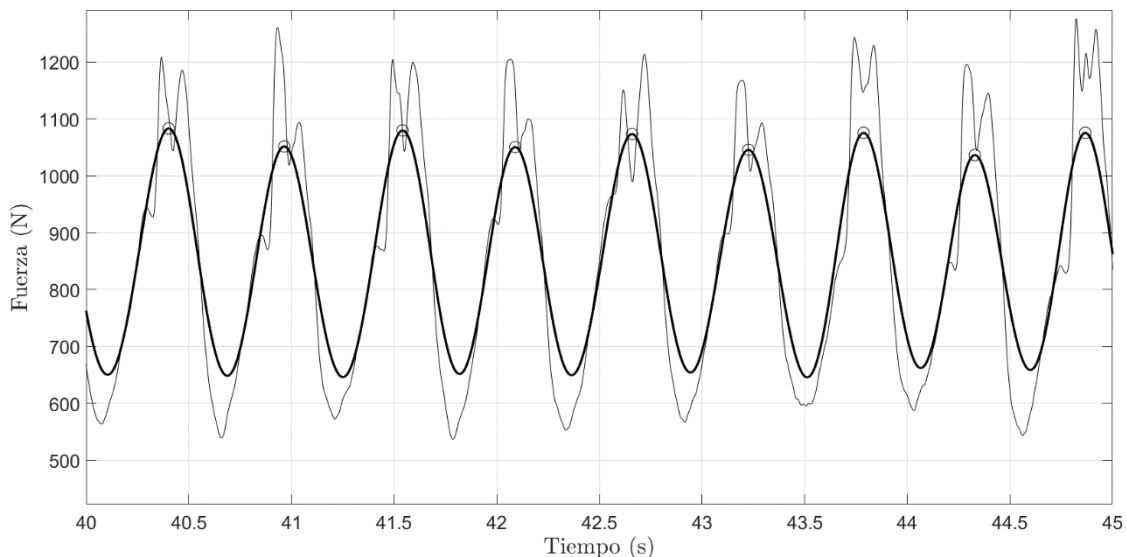


Figura 7: Señal fuerza-tiempo de un sujeto caminando a 4 km/h. Línea fina: señal original; Línea gruesa: señal filtrada.

Para una misma secuencia el periodo de los diferentes pasos es variable. Para aportar un valor más representativo se calcula el periodo medio, \bar{T} , de la secuencia. El periodo de un paso se puede expresar como la suma del periodo medio y la desviación, \tilde{T}_i , respecto a dicha media: $T_i = \bar{T} + \tilde{T}_i$

En la Figura 8 se representa el periodo de cada paso de un determinado ensayo. Se traza una línea que representa el valor medio, de forma que la distancia, en términos de periodo, entre cada punto y la línea es la desviación respecto al periodo medio del ensayo.

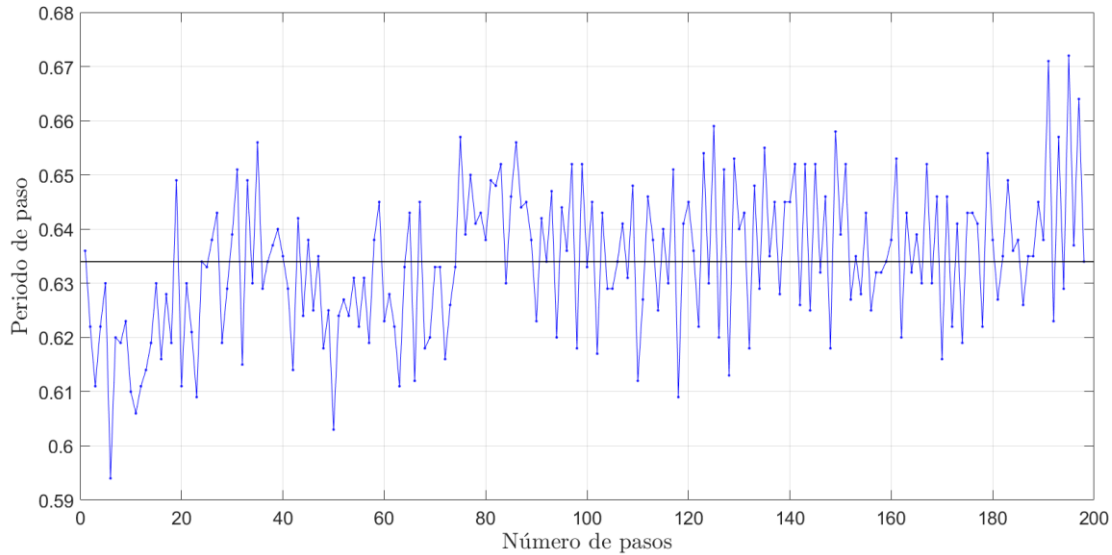


Figura 8: Periodo de los pasos de un ensayo a 4 km/h. Línea: periodo medio.

Calculando el periodo medio de paso para cada una de las 6 velocidades en las que el sujeto realiza el experimento, se observó que la relación periodo medio-velocidad (Figura 9) seguía en todos los casos una ley formulada en [10]:

$$L = c_3 v^{c_4} \quad (4)$$

Donde L es la longitud del paso, v la velocidad, y c_3 y c_4 parámetros variables según la persona. En nuestro caso no consideramos la longitud del paso, sino el periodo, ambos relacionados a través de la velocidad: $L = v T$. Por lo que podemos expresar (4) en función de \bar{T} y obtener la siguiente relación matemática entre el periodo medio y la velocidad de paso:

$$\bar{T} = c_3 v^{c_4 - 1} \quad (5)$$

En la figura 9 se puede ver la representación de la ecuación (5) para un peatón caminando a diferentes velocidades de paso.

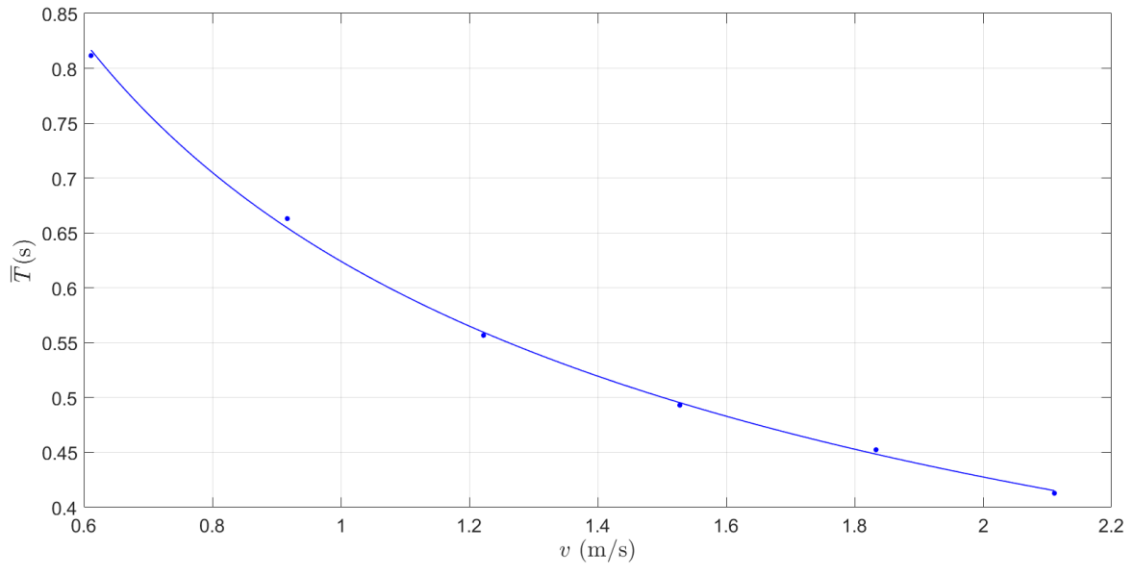


Figura 9: Periodo medio de paso frente a velocidad, para un determinado peatón. Puntos: resultado experimental; Línea: ley ajustada según la ecuación (5).

La variabilidad interpersonal de los parámetros c_3 y c_4 está regida por una distribución binormal con las siguientes matrices de media, μ , y covarianza, Σ :

$$\mu = \begin{bmatrix} 0,586 \\ 0,463 \end{bmatrix}, \quad \Sigma = \begin{bmatrix} 0,0022 & -0,0015 \\ -0,0015 & 0,0062 \end{bmatrix} \quad (6)$$

Se llegó a la conclusión de que la desviación del periodo es causada en parte por la asimetría en el paso que tiene cada persona. Sin embargo, no se puede decir que dicha desviación atienda únicamente a la asimetría del paso, por ello se plantea la desviación del periodo respecto a la media como la suma de dos desviaciones: una debida a la asimetría del paso y otra de naturaleza aleatoria, aunque influenciada por los dos pasos anteriores. Finalmente, esta desviación fue modelada de la siguiente manera:

$$\tilde{T}_i = \tilde{T}_i^a + \tilde{T}_i^r = c_5(-1)^i + c_6\tilde{T}_{i-1} + c_7\tilde{T}_{i-2} + z_i \quad (7)$$

Donde c_5 es la variable que mide la asimetría, y c_6 y c_7 variables autorregresivas que representan la influencia de los dos pasos anteriores en el paso actual. El término z_i es la componente aleatoria.

En la Figura 10 se observa que existe una autocorrelación en \tilde{T}_i^r para los pasos sucesivos, mientras que en z_i no existe tal correlación.

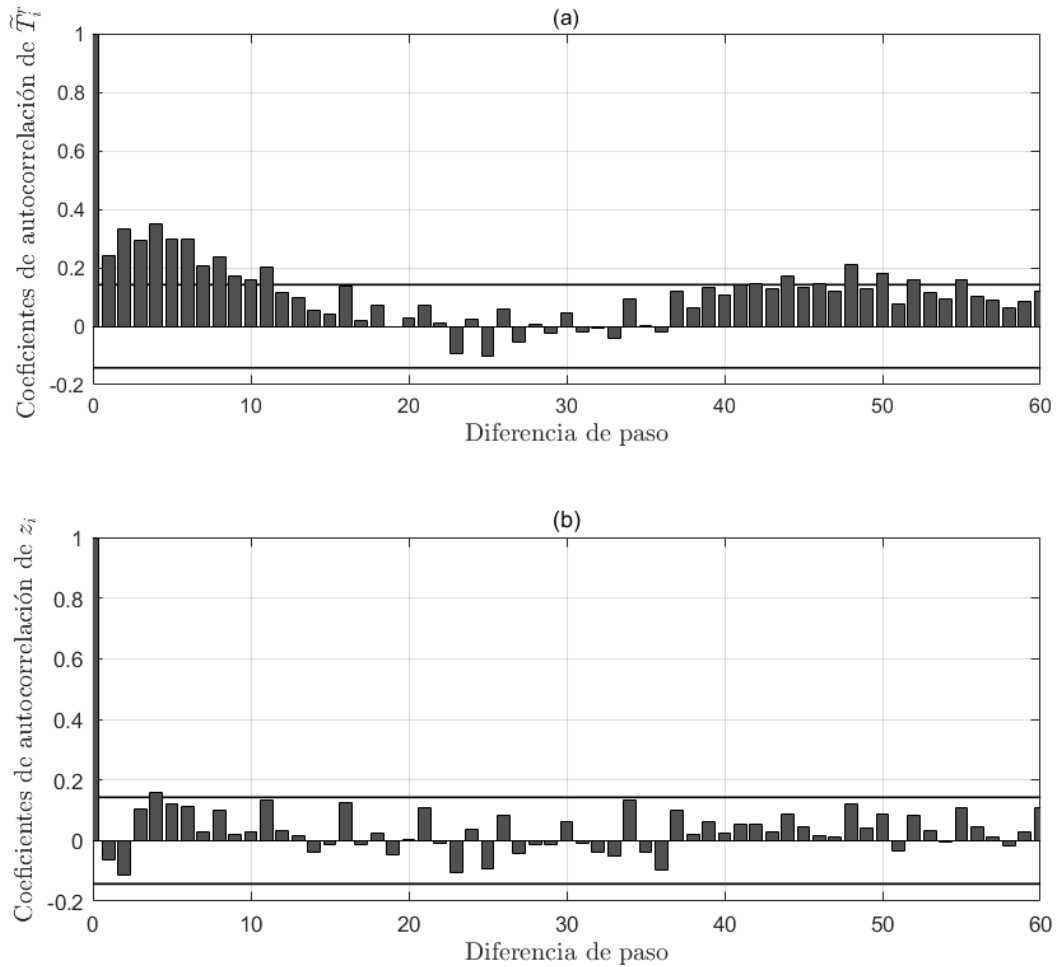


Figura 10: Funciones de autocorrelación de \tilde{T}_i (a) y de z_i (b). Línea: intervalo de confianza del 95%.

Se determinó que el parámetro c_5 está influenciado por el periodo medio de paso y se puede obtener a partir de un valor normalizado, c_{N5} , determinado por una función Beta:

$$c_{N5} = B(2,67, 149,10)$$

$$c_5 = \frac{\bar{T} c_{N5}}{2} \quad (8)$$

Se analizó la variación de los parámetros c_6 y c_7 y se determinó una cierta correlación con la velocidad, pero con una gran variabilidad. Finalmente, la modelización de los parámetros autorregresivos se compone de una suma de dos términos: una función polinómica de segundo grado dependiente de v y un valor normalizado, c_{N6} y c_{N7} , obtenido de distribución beta simétrica.

$$c_{N6} = B(6,60, 6,60)$$

$$c_6(v) = 0,0469 v^2 - 0,0291 v + 0,3448 + c_{N6}$$

$$c_{N7} = B(9,42, 9,42)$$

$$c_7(v) = -0,0370 v^2 - 0,0122 v + 0,1545 + c_{N7} \quad (9)$$

De igual manera que sucedía con los parámetros autorregresivos del modelo de velocidades, los parámetros c_6 y c_7 hacen inestable el modelo autorregresivo para ciertos valores. La zona fiable está representada en la Figura 11, donde se enfrentan c_6 y c_7 .

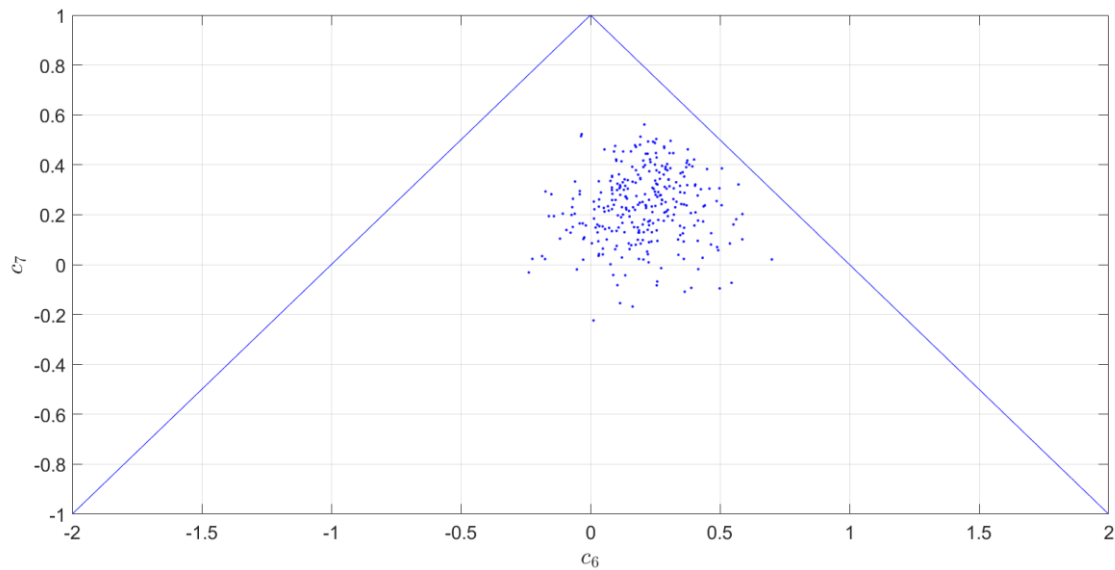


Figura 11: Representación espacial de los parámetros autorregresivos del periodo. Puntos: resultados experimentales; Líneas: límites zona fiable.

Para que el modelo autorregresivo sea estable, en el momento en que se generen los parámetros c_6 y c_7 debe comprobarse que no se da ninguna de las siguientes situaciones:

$$\begin{aligned}
 \max(c_7) &> 1 \\
 \min(c_7) &< -1 \\
 \max(c_6) + \max(c_7) &> 1 \\
 \max(c_7 - c_6) &> 1
 \end{aligned}
 \tag{10}$$

Si se determina que los parámetros autorregresivos están fuera de la zona fiable, el modelo deberá generar otros aleatoriamente hasta que se cumplan todas las condiciones.

Por otro lado, la variable z_i representa el carácter aleatorio del periodo de paso del peatón, y está definida por una distribución normal de tipo ruido blanco, es decir, con valor medio nulo.

$$\begin{aligned}
 z_i &= N(0; \sigma_z) \\
 \sigma_z &= c_8 (v^2 - 3,30 v + 3,00)
 \end{aligned}
 \tag{11}$$

Donde c_8 es un parámetro que representa la componente aleatoria del modelo autorregresivo, y se obtiene de la distribución $B(14,15, 561,19)$

3.4 Variabilidad de la fuerza

3.4.1 Preprocesado de los datos

Una vez caracterizada la variabilidad de la velocidad en una señal de carga y la variabilidad del periodo de paso en una carga a velocidad constante, solo falta por caracterizar la variabilidad de la fuerza ejercida por el peatón sobre la estructura. La amplitud de los registros experimentales en cinta de caminar, Figura 7, se aprecia una secuencia periódica pero compuesta por varios armónicos. En dicha señal se observa claramente un armónico principal, correspondiente a la frecuencia del paso, que ha sido designada como primer armónico. Si se observa la señal original se pueden apreciar unos 'rizos' sobre la oscilación principal, que corresponden a otros armónicos y subarmónicos. Cada uno de ellos puede ser aislado mediante herramientas matemáticas como la Transformada de Fourier, de forma que se pueda determinar la importancia de cada uno. Dicha importancia viene dada por la amplitud del (sub)armónico en cuestión y se traduce en fuerza sobre el suelo. Las amplitudes obtenidas mediante la Transformada de Fourier se denominan *Dynamic Load Factors* (DLF).

Para poder trabajar con los datos de amplitudes correspondientes a diferentes peatones se normaliza la señal de fuerza. En primer lugar, se resta el peso, de forma que la señal de fuerza no oscile entorno a un valor medio igual al peso, sino entorno a cero. Posteriormente se divide la fuerza por el peso, de forma que las DLF resultantes de esta normalización son independientes del peso de la persona. El efecto del peso será reintroducido a la hora de calcular la fuerza al final del modelo.

Observando los resultados del ensayo y analizando las amplitudes a través de la Transformada de Fourier se establecieron los (sub)armónicos que van a ser considerados en el modelo, aquellos que tienen cierta importancia.

Tabla 5: Armónicos y subarmónicos considerados en el modelo de fuerza.

Armónicos:	1	2	3	4	5
Subarmónicos:	0,5	1,5	2,5	3,5	4,5

3.4.2 Análisis preliminar de los resultados

Las DLF se emplearon como base para construir el modelo de fuerza. La expresión $DLF_i^{(j)}$, alude al valor de la DLF correspondiente al paso i de una secuencia de N pasos y al (sub)armónico j de entre los considerados en la Tabla 5. El valor de $DLF_i^{(j)}$ se descompuso en suma de dos componentes: el valor medio para la secuencia completa, \overline{DLF}^j , y una variación aleatoria, $\overline{DLF}_i^{(j)}$. En la Figura 12 se observa, para un ensayo, la variación aleatoria de cada $DLF_i^{(2)}$ respecto del valor medio de la secuencia.

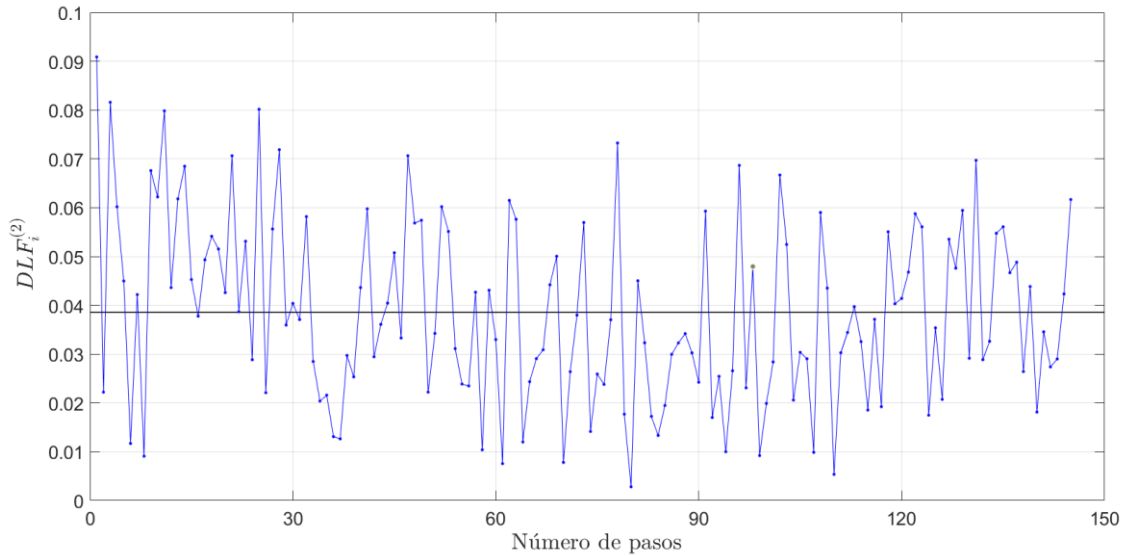


Figura 12: DLF del armónico 2 para una secuencia de pasos. Línea negra: valor medio de la secuencia; Puntos: resultados experimentales.

Se determinó que $\overline{DLF}^{(j)}$ no está correlacionado con el peso del sujeto, y que $\overline{DLF}_i^{(j)}$ no está correlacionado con las variaciones en otros (sub)armónicos ni con las variaciones del periodo de paso, \tilde{T}_i .

La Figura 13 muestra la ausencia de correlación entre sucesivos $\overline{DLF}_i^{(j)}$.

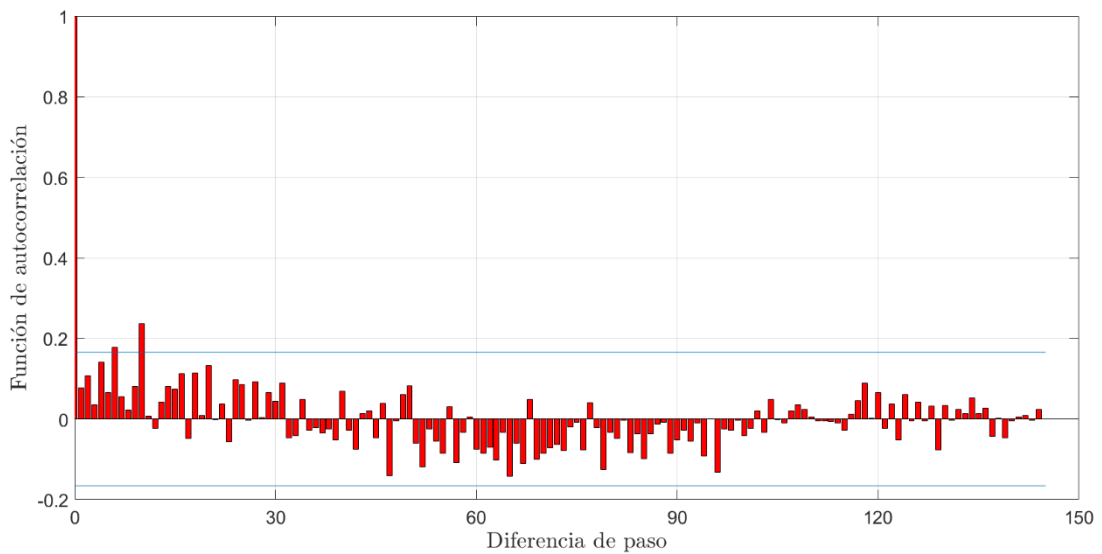


Figura 13: Función de autocorrelación de $\overline{DLF}_i^{(j)}$ correspondiente a los datos presentados en la Figura 12. Líneas horizontales: intervalo de 95% de confianza.

Esto indica que $DLF_i^{(j)}$ puede ser estudiado independientemente, por lo que se determinó que sus valores serían obtenidos a partir de una distribución Beta, $B(a, b)$, cuyos parámetros a y b vienen dados por la media μ y la varianza σ^2 :

$$B(a, b) \begin{cases} a = \frac{\mu^2 (1 - \mu)}{\sigma^2} \\ b = a \frac{1 - \mu}{\mu} \end{cases} \quad (12)$$

La media μ y la varianza σ^2 se determinan a partir del valor promedio $\overline{DLF}^{(j)}$ y del coeficiente de variación $CoV^{(j)}$:

$$\begin{aligned} \mu &\cong \overline{DLF}^{(j)} \\ \sigma^2 &\cong (\overline{DLF}^{(j)} \cdot CoV^{(j)})^2 \end{aligned} \quad (13)$$

El coeficiente de variación CoV^j describe la variación de \overline{DLF}_i^j , considerada como aleatoria:

$$CoV^{(j)} = \frac{S_{DLF}^{(j)}}{\overline{DLF}^{(j)}} \quad (14)$$

Donde $S_{DLF}^{(j)}$ es la desviación estándar de $DLF_i^{(j)}$.

3.4.3 Modelización estadística de las componentes DLF

En este apartado se va a describir la modelización de $\overline{DLF}^{(j)}$ y $CoV^{(j)}$, parámetros que definen la distribución Beta que describe el modelo DLF.

En primer lugar, se va a modelizar $\overline{DLF}^{(j)}$, que se descompuso como un productos de dos factores:

$$\overline{DLF}^{(j)} = \overline{DLF}^{(j)}_d \cdot 10 \overline{DLF}^{(j)}_r \quad (15)$$

Donde el factor $\overline{DLF}^{(j)}_d$ representa la componente determinística y el factor $\overline{DLF}^{(j)}_r$ la estocástica.

Se concluyó que la componente determinística $\overline{DLF}^{(j)}_d$ es una función de la velocidad del peatón, tras analizar los resultados presentados en la Figura 14, donde se enfrenta $\overline{DLF}^{(j)}$ y v para cada (sub)armónico considerado.

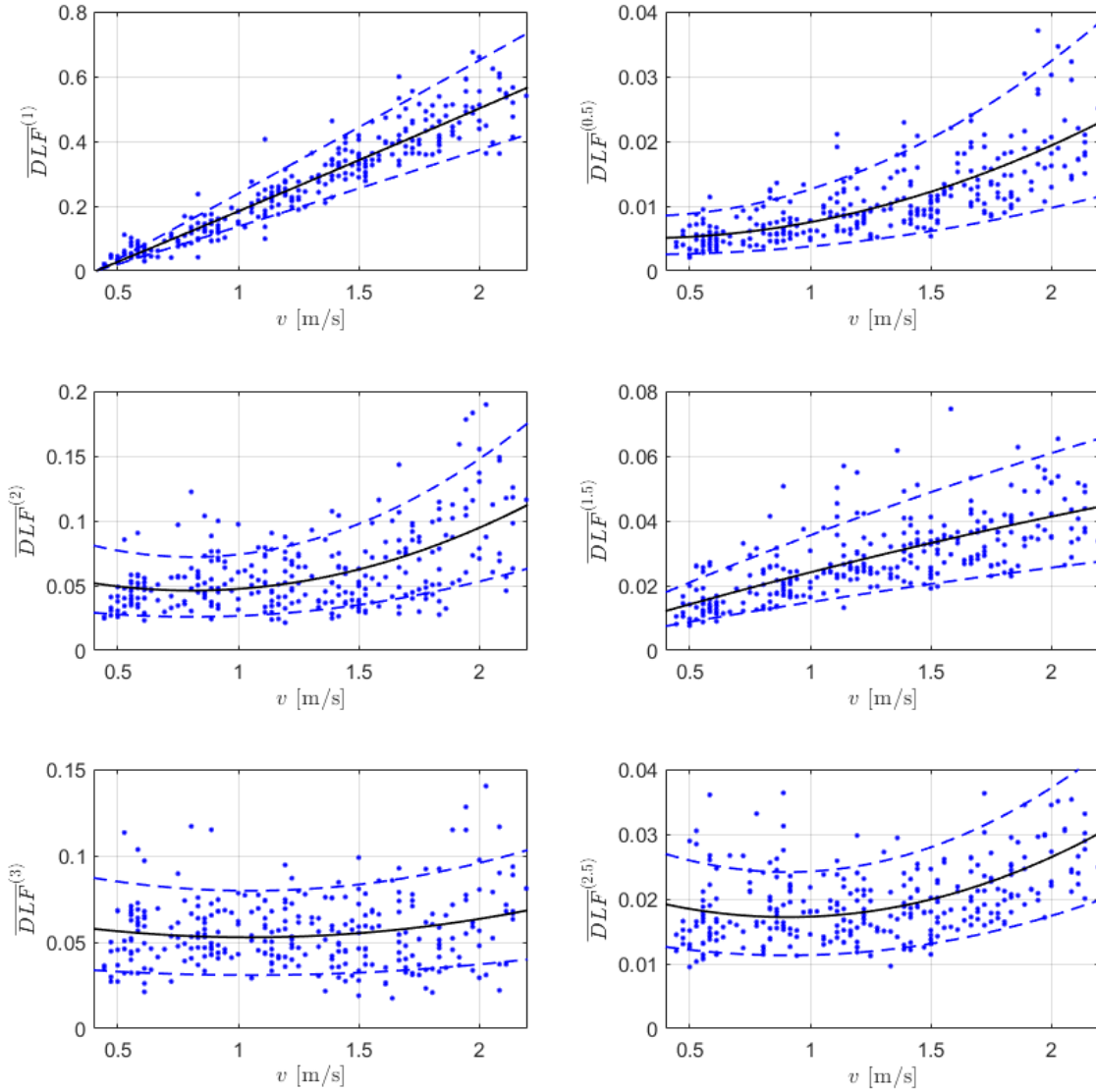


Figura 14: \overline{DLF}^j frente a v . Puntos: datos experimentales; Líneas continuas: ajuste cuadrático; Líneas a trazos: límites 95% de confianza.

$\overline{DLF}^{(j)}_d$ se modelizó como una función polinómica de segundo orden de v , cuyos coeficientes se obtienen ajustando el polinomio a los datos mostrados en la Figura 14.

$$\overline{DLF}^{(j)}_d = c_9^{(j)} v^2 + c_{10}^{(j)} v + c_{11}^{(j)} \quad (16)$$

El valor de los coeficientes $c_9^{(j)}$, $c_{10}^{(j)}$ y $c_{11}^{(j)}$ se muestra en la Tabla 6

La componente estocástica se determinó sustituyendo la Ecuación (16) en la Ecuación (15) para los valores reales del ensayo:

$$\overline{DLF}^{(j)}_r = \frac{\overline{DLF}^{(j)}}{10 \left(c_9^{(j)} v^2 + c_{10}^{(j)} v + c_{11}^{(j)} \right)} \quad (17)$$

La constante 10 limita los valores de los factores aleatorios al rango [0, 1], de forma que ajustaron correctamente a una distribución Beta $B(c_{12}, c_{13})$. Los valores de los

parámetros c_{12} y c_{13} son recogidos en la Tabla 6, y fueron obtenidos por el método de estimación de máxima verosimilitud (MLE).

Tabla 6: Valores de parámetros del modelo $\overline{DLF}^{(j)}$.

(Sub)armónico	c_9	c_{10}	c_{11}	c_{12}	c_{13}
0,5	0,0049	-0,0028	0,0055	10,06	89,29
1	0,0037	0,3064	-0,1263	45,51	407,69
1,5	-0,0017	0,0222	0,0035	1,85	168,56
2	0,0341	-0,0551	0,0685	13,78	123,17
2,5	0,0077	-0,0140	0,0236	24,55	220,83
3	0,0118	-0,0246	0,0657	15,93	143,33
3,5	0,0114	-0,0270	0,0284	24,35	219,03
4	0,0103	-0,0039	0,0333	14,24	128,88
4,5	0,0077	-0,0164	0,0188	22,00	198,18
5	0,0024	0,0138	0,0089	10,66	96,85

En segundo lugar, se modeliza la componente $CoV^{(j)}$. De igual manera se analizó la posible relación con la velocidad del peatón, lo que se presenta en la Figura 15, pero en este caso sólo se apreció correlación en el primer armónico.

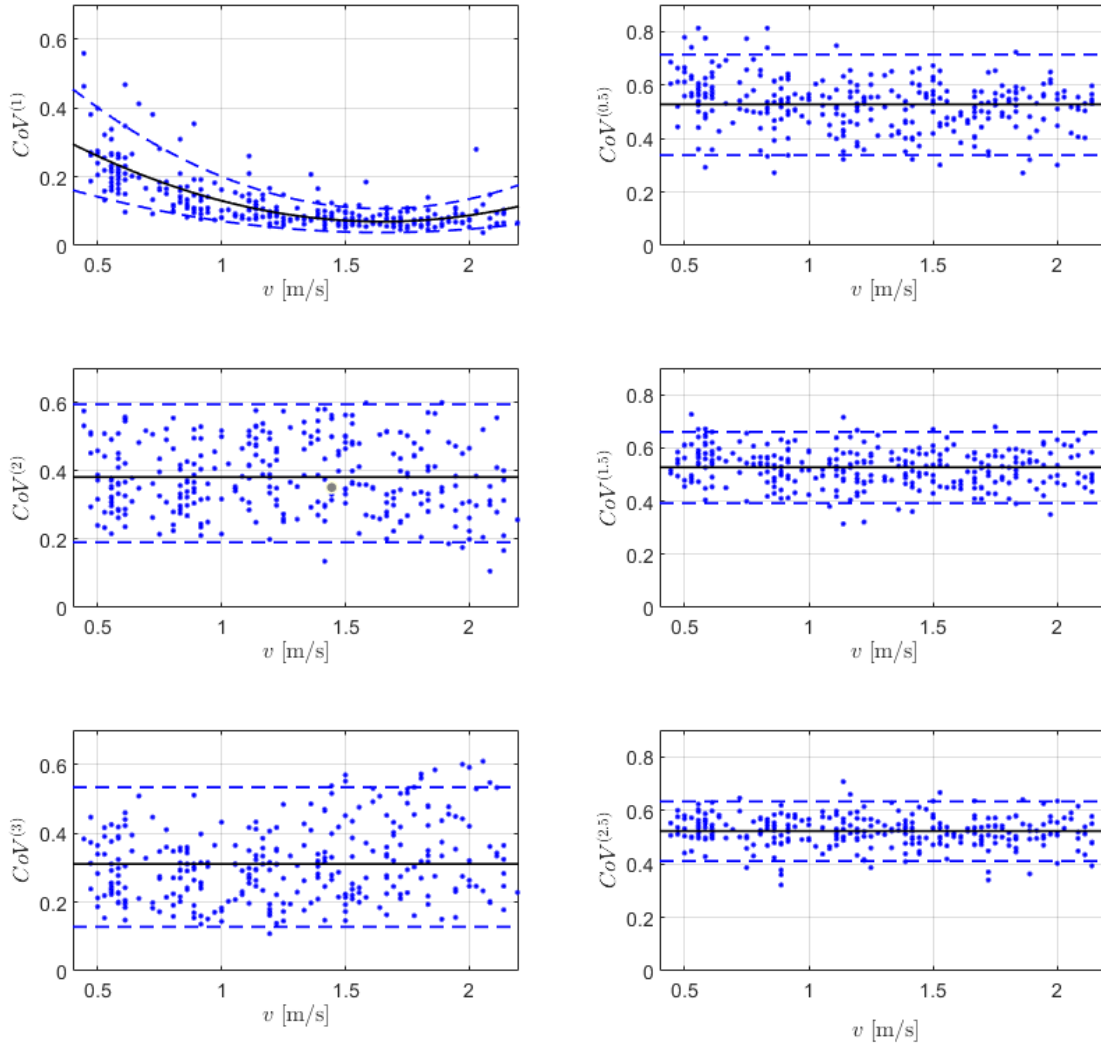


Figura 15: $CoV^{(j)}$ frente a v . Puntos: datos experimentales; Líneas continuas: ajuste cuadrático; Líneas a trazos: límites 95% de confianza.

De forma similar a $\overline{DLF}^{(j)}$, $CoV^{(j)}$ puede ser descrita como un producto de dos factores, uno determinístico y otro estocástico:

$$CoV^{(j)} = CoV^{(j)}_d \cdot 10 CoV^{(j)}_r \quad (18)$$

Donde la componente determinística vuelve a ser modelizada como una función de v polinómica de segundo grado, cuyos coeficientes son recogidos en la Tabla 7.

$$CoV^{(j)}_d = c_{14}^{(j)} v^2 + c_{15}^{(j)} v + c_{16}^{(j)} \quad (19)$$

Nótese que, debido a que la correlación con la velocidad existe sólo para el primer armónico, para el resto de (sub)armónicos los parámetros $c_{14}^{(j)}$ y $c_{15}^{(j)}$ son cero, quedando la Ecuación (19) reducida a una función constante $CoV^{(j)}_d = c_{16}^{(j)}$.

Análogamente al caso de $\overline{DLF}^{(j)}_r$, la componente estocástica $CoV^{(j)}_r$ se calculó dividiendo el valor real de $CoV^{(j)}$ por la componente determinística, y la constante 10:

$$CoV^{(j)}_r = \frac{CoV^{(j)}}{10 \left(c_{14}^{(j)} v^2 + c_{15}^{(j)} v + c_{16}^{(j)} \right)} \quad (20)$$

De esta forma $CoV^{(j)}_r$ se ajustó a una distribución Beta $B(c_{17}, c_{18})$, cuyos parámetros se obtuvieron nuevamente mediante MLE, y son presentados para cada (sub)armónico en la Tabla 7.

Tabla 7: Valores de parámetros del modelo $CoV^{(j)}$.

(Sub)armónico	c_{14}	c_{15}	c_{16}	c_{17}	c_{18}
0,5	0	0	0,1000	13,53	12,10
1	0,1450	-0,4773	0,4625	13,35	121,81
1,5	0	0	0,1000	27,33	24,54
2	0	0	0,1000	7,90	12,82
2,5	0	0	0,1000	39,65	36,29
3	0	0	0,1000	5,73	12,67
3,5	0	0	0,1000	23,24	19,41
4	0	0	0,1000	5,04	13,73
4,5	0	0	0,1000	20,53	16,62
5	0	0	0,1000	5,12	10,56

3.4.4 Composición del modelo de fuerza

La fuerza total que ejerce el peatón sobre el suelo al caminar es la suma de tres fuerzas: la debida a los armónicos $F_i^{(h)}(t)$, la debida a los subarmónicos $F_i^{(s)}(t)$, y el peso del peatón, W .

La fuerza debida a los armónicos es caracterizada matemáticamente para cada paso i :

$$F_i^{(h)}(t) = W \sum_j DLF_i^{(j)} \sin\left(\frac{2\pi j}{T_i} t\right), \quad \begin{cases} (i = 1, 2, \dots, N) \\ (j = 1, 2, 3, 4, 5) \end{cases} \quad (21)$$

Donde t es un tiempo tal que $0 \leq t \leq T_i$.

La fuerza debida a los subarmónicos es caracterizada matemáticamente para cada zancada k :

$$F_k^{(s)}(t) = W \sum_j DLF_k^{(j)} \sin\left(\frac{2\pi j}{T_k} t\right), \quad \begin{cases} (k = 1, 2, \dots, \frac{N}{2}) \\ (j = 0,5, 1,5, 2,5, 3,5, 4,5) \end{cases} \quad (22)$$

Donde t debe ser $0 \leq t \leq T_k$.

Se entiende por una zancada el intervalo de tiempo que transcurre entre dos ocasiones consecutivas en las que un mismo pie se levanta del suelo. Equivale a dos pasos, considerando un paso como el intervalo de tiempo transcurrido desde que un pie se levanta del suelo hasta que el otro pie hace lo propio. En el caso de los subarmónicos se trabaja con zancadas debido a que son múltiplos del subarmónico 0,5, cuya longitud

de onda es el doble que la del armónico 1, es decir, una zancada. Todos los subarmónicos realizan un número entero de oscilaciones cada zancada, al igual que todos los armónicos realizan un número entero, correspondiente a su designación, de oscilaciones en cada paso.

La suma de las dos fuerzas modelizadas en la Ecuación (21) y la Ecuación (22) forma la señal total de fuerza en el tiempo.

3.5 Composición del modelo de carga peatonal

Los tres submodelos presentados anteriormente en los apartados 3.3, 3.2 y 3.4 componen el modelo completo de carga peatonal desarrollado por García Diéguez y Zapico Valle.

La composición del modelo completo está representada de forma general en el diagrama de flujo de la Figura 16.

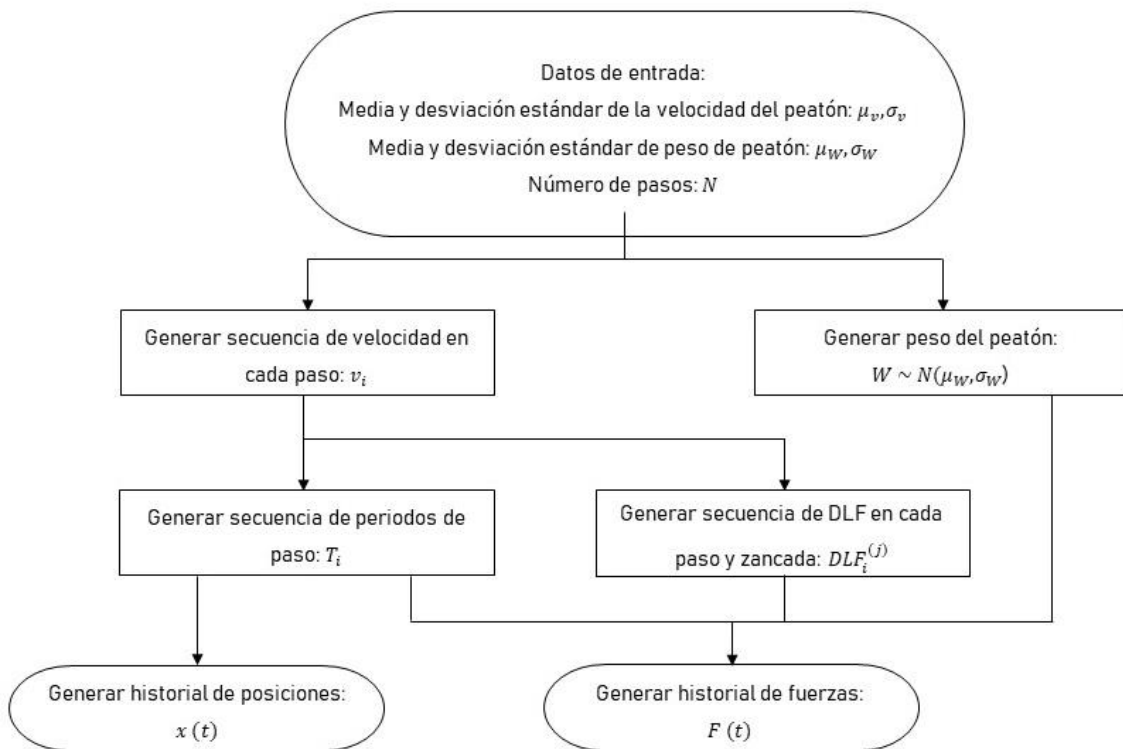


Figura 16: Algoritmo de cálculo del modelo de carga peatonal.

3.5.1 Datos de entrada

Los datos iniciales que alimentan al modelo son:

1. Velocidad del peatón: introducida a través de un valor medio y una desviación estándar, permite personalizar la simulación a un tipo específico de peatón de forma que el modelo tenga en cuenta el uso real que tiene una determinada estructura.
2. Peso del peatón: introducido a través de un valor medio y una desviación estándar, permite considerar la variabilidad geográfica del peso de las

poblaciones de manera que el modelo pueda ser empleado en todo el mundo con las características de una zona geográfica determinada.

3. Número de pasos: determina la duración de la secuencia de simulación y permite ajustar el modelo a un recorrido determinado, como puede ser el trayecto realizado para cruzar una pasarela.

3.5.2 *Peso del peatón*

El peatón virtual generado en cada simulación tiene un peso W obtenido a partir de una distribución normal $N(\mu_W, \sigma_W)$, cuyos parámetros son los datos de entrada correspondientes al peso.

3.5.3 *Secuencia de velocidades*

Para la generación de la secuencia de velocidades v_i se sigue el siguiente proceso:

1. Definir los valores de entrada: valor medio μ_v y desviación estándar σ_v de la velocidad de peatón, y número total de pasos N de la simulación.
2. Determinar el valor de la velocidad media \bar{v} a partir de la distribución $N(\mu_W, \sigma_W)$.
3. Generar los parámetros c_1 y c_2 a partir de la distribución binormal definida en la Ecuación (2).
4. Comprobar de la estabilidad del modelo autorregresivo. Si se cumple alguna de las condiciones de la Ecuación (3), regresar al paso 3.
5. Determinar la desviación estándar de la componente aleatoria, σ_w , a partir de la distribución $B(17, 2103)$.
6. Determinar la componente aleatoria w_i a partir de la distribución $N(0, \sigma_w)$.
7. Calcular las desviaciones de la velocidad en el paso mediante la Ecuación (1), siendo $\tilde{v}_{-1} = \tilde{v}_{-2} = 0$.
8. Generar la secuencia de velocidades en los pasos, sumando los términos calculados, $v_i = \bar{v} + \tilde{v}_i$.

3.5.4 *Secuencia de periodos de paso*

Para la ya determinada secuencia de velocidades, se genera una secuencia de periodos de paso T_i a través del siguiente proceso:

1. Generar los parámetros c_1 y c_2 a partir de la distribución binormal definida en la Ecuación (6).
2. Determinar el periodo promedio definido en la Ecuación (5). Como se dispone de un valor de velocidad específico para cada paso v_i , se adaptará la componente promedio del periodo a cada paso empleando $\bar{T}_i = c_3 v_i^{c_4-1}$ en lugar de la Ecuación (5)
3. Calcular el parámetro de asimetría de cada paso c_5 según la Ecuación (8).
4. Calcular los parámetros autorregresivos c_6 y c_7 a partir de las expresiones de la Ecuación (9)
5. Comprobar la estabilidad del modelo autorregresivo. En caso de darse alguna de las condiciones expuestas en la Ecuación (10), volver al paso 6.
6. Extraer el valor del parámetro c_8 a partir de la distribución $B(14,25, 561,19)$.

7. Calcular la desviación estándar de la componente aleatoria $\sigma_{z_i} = c_8 (v_i^2 - 3,30 v_i + 3,00)$.
8. Obtener la componente aleatoria z_i a partir de la distribución $N(0, \sigma_{z_i})$.
9. Calcular la desviación en el periodo de cada paso, \tilde{T}_i , como se indica en la Ecuación (7), donde $\tilde{T}_{-1} = \tilde{T}_{-2} = 0$.
10. Generar la secuencia de periodos de paso $T_i = \bar{T}_i + \tilde{T}_i$

3.5.5 Posición

La posición del peatón, x_i , durante el paso i ($i = 1, \dots, N$), a lo largo de su camino es el punto sobre el cual se va a aplicar la fuerza de ese determinado paso. Dicha posición se describe como:

$$x_i(t) = x_{i-1} + v_i t \quad (23)$$

3.5.6 Secuencia de DLF

Se genera la secuencia de DLF mediante el siguiente algoritmo. En el caso de DLF correspondientes a subarmónicos serán determinadas para una secuencia de zancadas, mientras que las DLF correspondientes a armónicos se determinarán para una secuencia de pasos.

1. Calcular $\overline{DLF}_i^{(j)}{}_d$, la componente determinística de $\overline{DLF}^{(j)}$, mediante la Ecuación (16).
2. Extraer la componente estocástica $\overline{DLF}^{(j)}{}_r$ de la distribución $B(c_{12}, c_{13})$.
3. Calcular los valores DLF para cada (sub)armónico en cada paso/zancada, $\overline{DLF}_i^{(j)} = \overline{DLF}_i^{(j)}{}_d \cdot 10 \overline{DLF}^{(j)}{}_r$.
4. Calcular $CoV_i^{(j)}{}_d$, la componente determinística de $CoV_i^{(j)}$, mediante la Ecuación (19).
5. Extraer $CoV^{(j)}{}_r$ a partir de la distribución $B(c_{17}, c_{18})$.
6. Calcular la media μ , y desviación típica σ^2 según la Ecuación (13).
7. Calcular los parámetros $a_i^{(j)}$ y $b_i^{(j)}$ según la Ecuación (14).
8. Generar la secuencia de $DLF_i^{(j)}$ a partir de la distribución $B(a_i^{(j)}, b_i^{(j)})$.

3.5.7 Señal temporal de fuerza

Se genera una función sintética de fuerza en el tiempo $F(t) = W + F_i^{(h)}(t) + F_k^{(s)}(t)$, a partir de las componentes armónica $F_i^{(h)}(t)$ y subarmónica $F_k^{(s)}(t)$, definidas en las Ecuaciones (21) y (22) respectivamente, y el peso del peatón W , definido en el apartado 3.5.2.

Un ejemplo de señal de fuerza sintética se muestra en la Figura 17. En esa simulación se emplearon los datos correspondientes a un ensayo experimental realizado con el fin de comparar la señal real con la sintética. Se observa un desfase entre ambas señales, debido a que el modelo no considera la fase inicial de la oscilación puesto que es irrelevante.

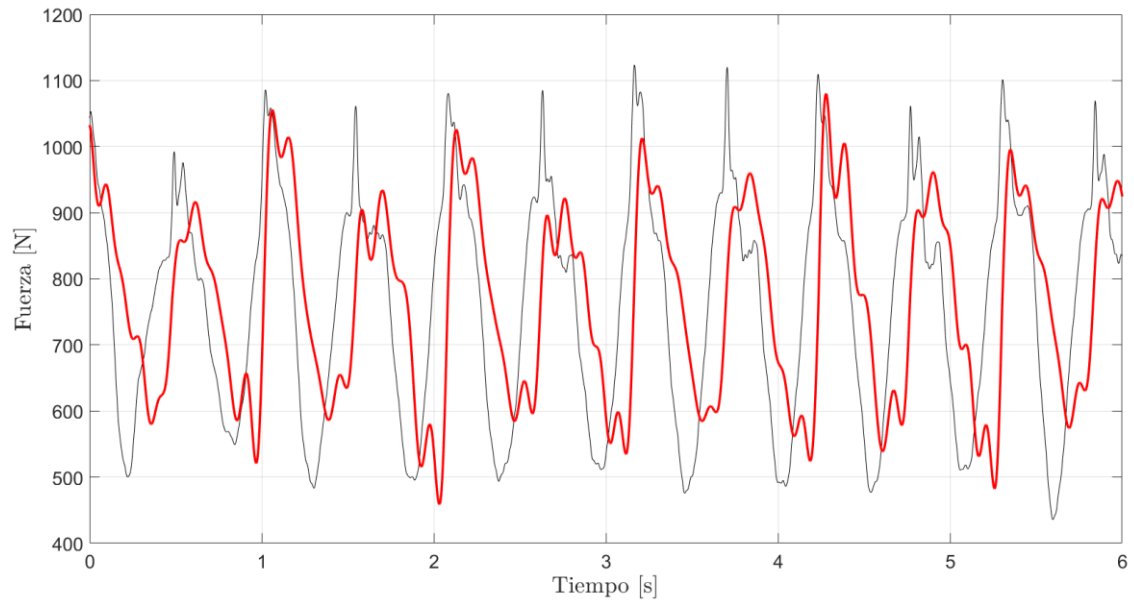


Figura 17: Señal de carga peatonal. Línea fina: datos experimentales; Línea gruesa: homóloga sintética.

4 Diseño de la estructura

4.1 Modelo dinámico

La modelización dinámica de la estructura tiene como objetivo proponer un diseño tal que bajo la carga peatonal sólo se excite un modo de vibración determinado.

Dado que la frecuencia media del paso de los peatones se encuentra en torno a los 2 Hz, el modo de vibración que se debe excitar debe hacerlo a una frecuencia cercana. Como 2 Hz es una frecuencia baja, se considera que éste debe ser el primer modo de vibración de la pasarela, de forma que el resto de los modos se encontrarán a frecuencias superiores.

Para que los demás modos de vibración de la pasarela no se vean excitados bajo la acción peatonal deben encontrarse a frecuencias lo suficientemente alejadas. Teniendo en cuenta que el primer modo de vibración se encuentra en 2 Hz, un límite inferior que podemos otorgar a los siguientes modos puede ser 20 Hz. Con una frecuencia 10 veces mayor que la de la acción dinámica se espera que tales modos de vibración no se manifiesten.

El desarrollo del modelo dinámico se realizará en el software MECWAY. El procedimiento de diseño consistirá en dos etapas. En la etapa inicial se desarrollarán modelos simplificados, consistentes únicamente en la estructura resistente del tablero, mediante los cuales se va a determinar la tipología de viga que más aproxima su primer modo de vibración a la frecuencia de 2 Hz. Una segunda etapa consistirá en la modelización de la estructura completa para la tipología de viga seleccionada, con el objetivo de dimensionar las secciones de los perfiles para obtener la configuración más propicia para el aislamiento del primer modo de vibración de la pasarela respecto al resto de modos.

4.1.1 Modelo simplificado

El modelo simplificado consiste únicamente en las dos piezas que conforman el tablero. Cada una de ellas es un entramado compuesto por 3 perfiles de 6 m dispuestos en la dirección longitudinal y perfiles dispuestos en la dirección transversal cada 1,5 m. Para este modelo se seleccionan perfiles doble T, de 200 mm de ancho y de canto, y 5 mm de espesor de alma y alas. Estas dimensiones se han otorgado de manera arbitraria, ya que el dimensionamiento de la sección no es objetivo de esta etapa.

Para este modelo simplificado se van a estudiar diferentes tipologías de viga, entre las cuales se van a variar las condiciones de movilidad en los apoyos y uniones. El proceso consiste en el método de ensayo y error: se propone una configuración, se determinan sus modos de vibración, se estudia el cumplimiento de la condición de diseño y, en caso de no cumplirla, se modifica la propuesta hacia una solución más apropiada.

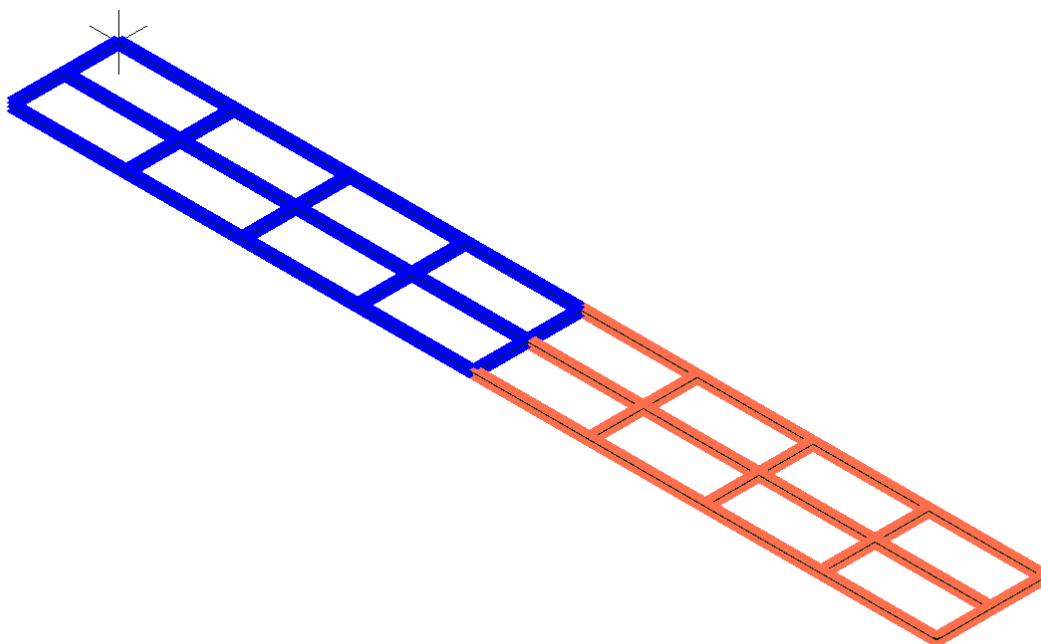


Figura 18: Modelo simplificado realizado en MECWAY.

4.1.1.1 Viga biapoyada

Se inicia con la configuración más sencilla, la viga biapoyada. En esta configuración la pasarela se encuentra apoyada en sus dos extremos mediante apoyos articulados, es decir, que permiten el giro en las secciones extremas. El vano debe ser continuo, por lo que ambas piezas que componen cada mitad de la pasarela deberán estar unidas rígidamente en el punto central.

Los resultados del análisis modal realizado a esta configuración se presentan en la Tabla 8. El primer modo de vibración tiene forma de viga flectada en el plano vertical y se corresponde con una frecuencia de 4,12 Hz.

Tabla 8: Modos de vibración para viga biapoyada.

Modo	Forma	Frecuencia [Hz]
1	Flexión	4,12
2	Torsión	4,45
3	Flexión	16,95
4	Torsión	17,90

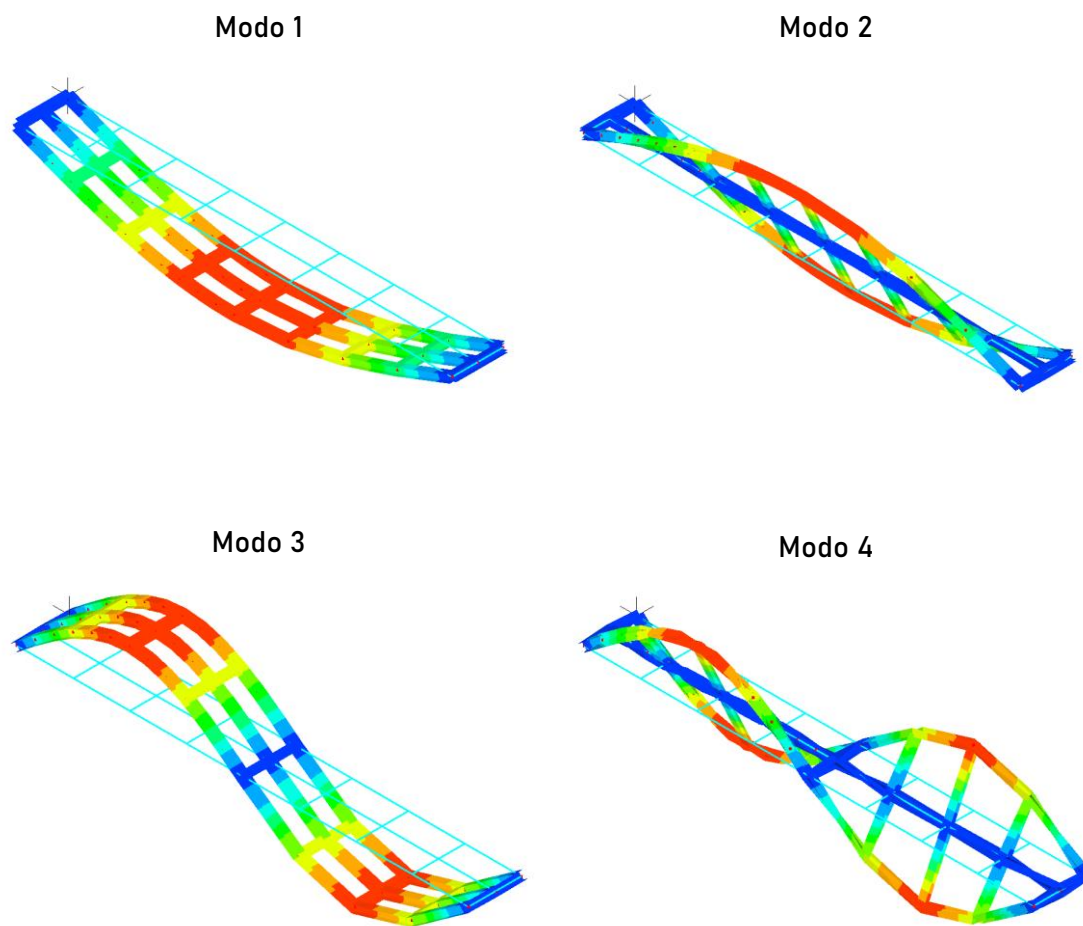


Figura 19: Modos de vibración para viga biapoyada. Las proporciones no son reales, se ha aplicado un factor de escala para apreciar los desplazamientos

La frecuencia a la que se encuentra el primer modo de vibración es más del doble de la frecuencia de 2 Hz deseada, por lo que esta alternativa no es satisfactoria. La forma de disminuir esta frecuencia principal hasta los 2 Hz es utilizando perfiles con menor canto, pero el inconveniente que tiene esta solución es que el resto de modos de torsión y flexión disminuirán en la misma proporción y se encuentran demasiado próximos para poder excitar sólo el primer modo de flexión al paso de los peatones.

4.1.1.2 Viga biapoyada con articulación central

La siguiente propuesta respeta las condiciones de apoyos externos de la anterior. Los apoyos articulados de los extremos permiten el giro en aquellas secciones. En este caso se introduce una articulación en la sección central, de forma que se permite el giro entre ambas piezas que componen cada mitad del vano.

Los resultados del análisis modal realizado a esta configuración se presentan en la Tabla 9. En este caso el modo de vibración más próximo a la frecuencia de 2 Hz es el segundo, con 1,68 Hz. Según este modo la estructura describe un movimiento de sólido rígido, es decir, no presenta deformaciones a flexión del tablero, ya que el giro está permitido en la sección central y por lo tanto la pasarela puede vibrar sin someter a

sus perfiles a esfuerzos de flexión. Por la forma que tiene este modo de vibración nos referiremos a él como modo triangular de aquí en adelante.

Tabla 9: Modos de vibración para viga con articulación.

Modo	Forma	Frecuencia [Hz]
1	Torsión	0,78
2	Triangular	1,68
3	Flexión	16,94
4	Torsión	17,90

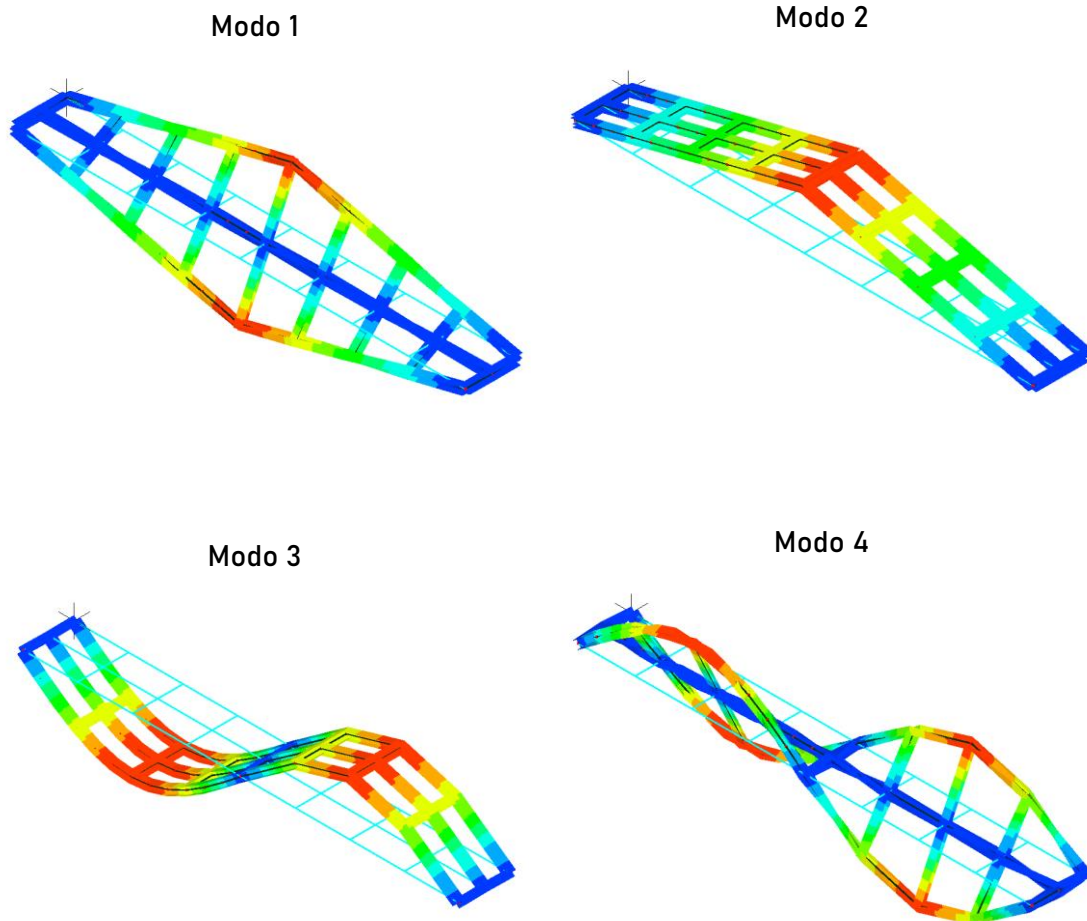


Figura 20: Modos de vibración para viga con articulación. Las proporciones no son reales, se ha aplicado un factor de escala para apreciar los desplazamientos

Nótese que los modos de vibración de doble flexión y doble torsión conservan la frecuencia de la primera configuración, ya que, por la forma que tienen, no inducen giro en la sección central de la pasarela.

La frecuencia a la que se encuentra el modo de vibración triangular es lo suficientemente cercana a la frecuencia media de paso de un peatón. Hay que tener en cuenta que en la siguiente etapa de dimensionamiento la frecuencia de 1,68 Hz de este modo va a ser más ajustada aún a la frecuencia de 2 Hz.

4.1.2 Modelo completo

A la estructura de tablero de la tipología de viga con articulación central se le añaden los siguientes elementos para completar la estructura:

- Tableros de madera que componen la superficie de paso, de 33 mm de canto.
- Barandilla a cada lado de la pasarela, de sección tubular cuadrada 50x3 mm.
- Sistema con apoyo elástico que regula la frecuencia del modo de vibración triangular. Se trata de un balancín cuyos brazos tienen 1,4 m de largo y su sección también son objeto de este dimensionamiento. La pasarela apoya sobre uno de los brazos a 0,4 m del centro del balancín. Como se verá más adelante, este sistema también será útil para calibrar la aceleración con la que vibra la pasarela.

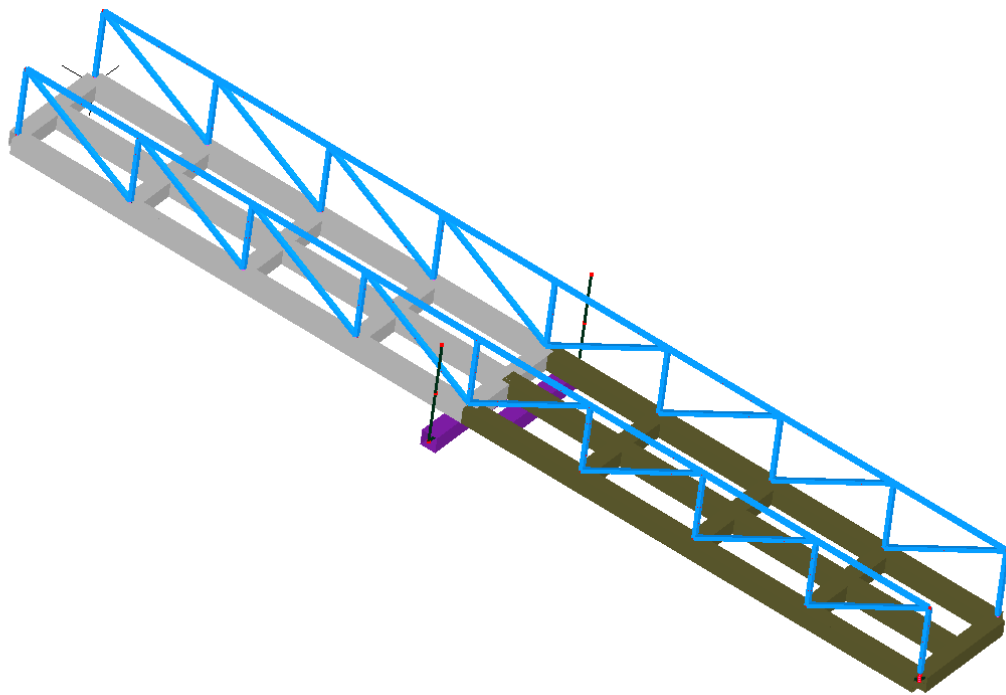


Figura 21: Modelización de la pasarela en MECWAY. En la figura no se muestran los tableros de madera que ocultarían el entramado del tablero.

El proceso de dimensionamiento de esta etapa consiste en la determinación de los modos de vibración para diferentes configuraciones de pasarela, en las que la variable es la sección de los perfiles del tablero y del balancín.

El principal objetivo de esta etapa de dimensionamiento es aumentar la frecuencia del modo de vibración de torsión, que en el modelo simplificado se encuentra a 0,78 Hz, frecuencia demasiado cercana a la del paso del peatón. Para asegurar que el modo de

torsión no es excitado por el paso de peatones es necesario aumentar la frecuencia a la que se excita dicho modo, aumentando la resistencia a torsión de la viga. Una forma de mejorar la resistencia a torsión es el empleo de secciones tubulares, las cuales resisten bien este esfuerzo. Por ello se cambiarán los perfiles doble T del tablero por perfiles tubulares cuadrados. A los perfiles del balancín también se les otorgará esta sección.

Tras realizar varias iteraciones se observó que la solución que mejores resultados proporcionaba consistía en perfiles tubulares cuadrados 200x5 mm tanto en el tablero como en el balancín. Esta configuración da lugar a unos modos de vibración que se recogen en la Tabla 10.

Tabla 10: Modos de vibración de la pasarela.

Modo	Forma	Frecuencia [Hz]
1	Triangular	2,02
2	Flexión	22,30
3	Torsión	23,41
4	Flexión	32,81

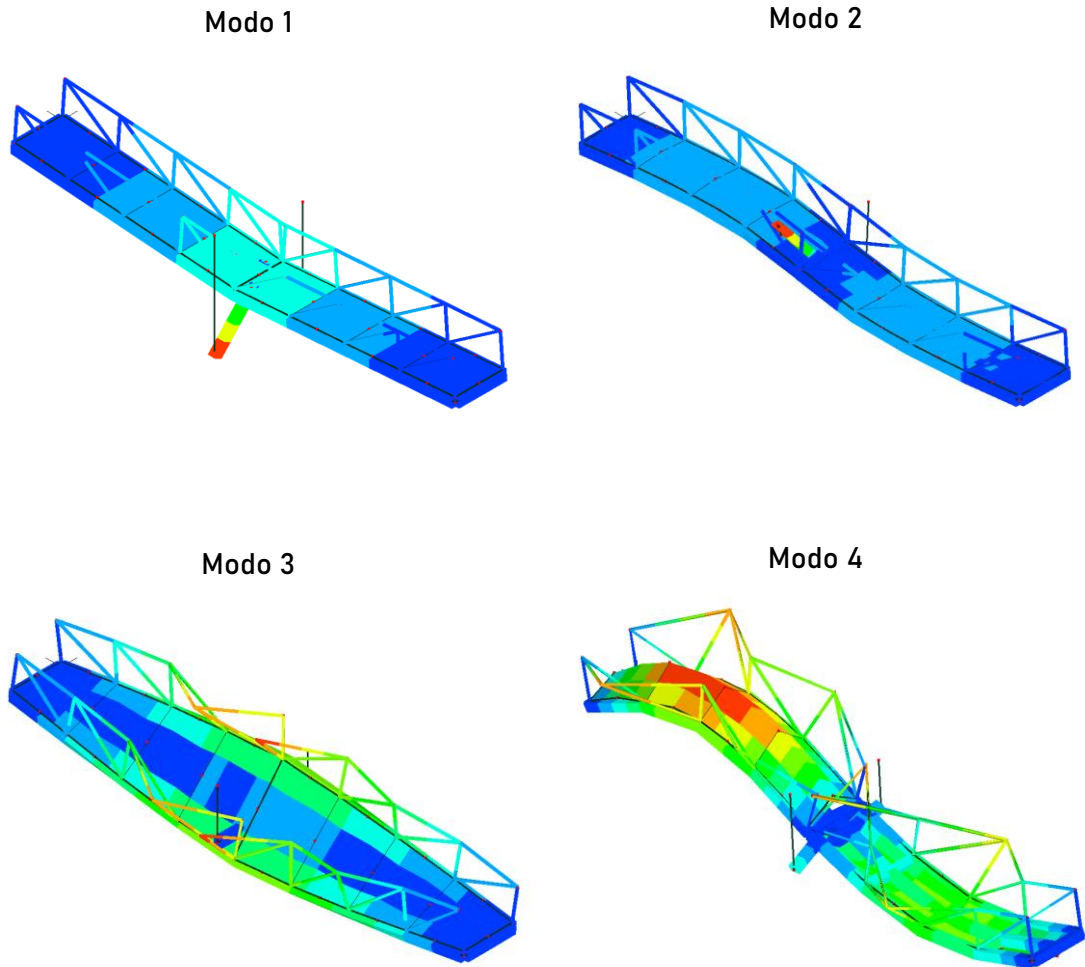


Figura 22: Desplazamientos según el modo de vibración. Las proporciones no son reales, se ha aplicado un factor de escala para apreciar los desplazamientos.

La frecuencia del modo de vibración triangular es 2,02 Hz, valor que se puede considerar igual a la frecuencia media de paso de los peatones. Por otro lado, el resto de los modos de vibración se encuentran por encima de los 20 Hz, como se pretendía. Esta distribución de modos de vibración cumple con los requisitos perseguidos en esta etapa de diseño, por lo que este modelo dinámico es el seleccionado para este proyecto.

4.2 Modelo estático

Paralelamente al cálculo dinámico se debe comprobar la estabilidad estática de la estructura frente a las acciones a las que se verá sometida. La estructura fue modelizada en el software CYPE 3D para el cálculo estático.

El modelo tridimensional incluye los perfiles metálicos como elementos “barra” y los apoyos articulados sobre los que se sustenta la pasarela.

Las secciones metálicas empleadas son tubos cuadrados de acero S275 con secciones de 200x5 para el tablero, como se determinó en el apartado anterior, y 50x3 para las barandillas.

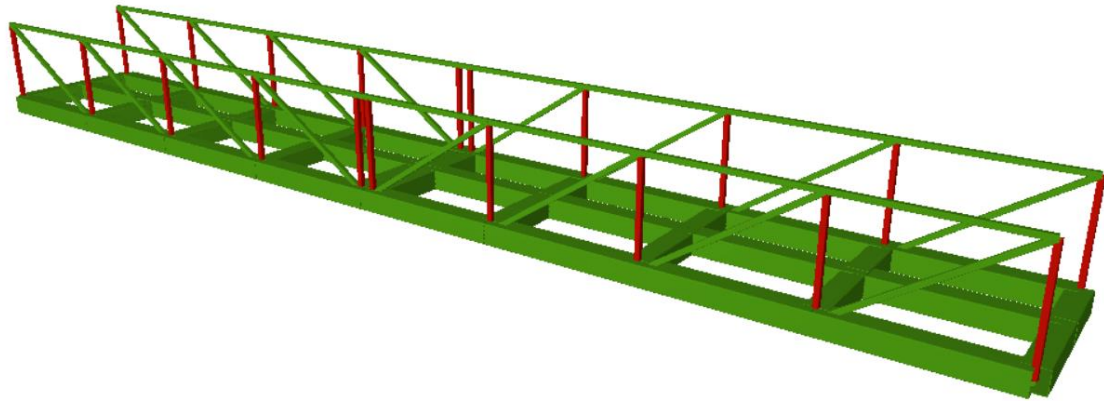


Figura 23: Modelización de la estructura en CYPE 3D.

Los tabloncillos de madera abarcan toda la superficie del tablero y tienen un espesor de 33 mm. Como no son modelizados su peso debe introducirse como una carga permanente, calculada a partir de su peso específico $4,9 \text{ kN/m}^3$.

Las hipótesis de cargas introducidas son las siguientes:

Tabla 11: Hipótesis de cargas para cálculo estático.

Hipótesis	Descripción	Cálculo
PP	Peso propio de la estructura metálica modelizada.	Valor calculado automáticamente en CYPE 3D a partir del material.
CM	Peso de los de tabloncillos de madera.	$4,9 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \cdot 0,033 \text{ m} = 0,16 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$
SU	Sobrecarga de uso, considerando 12 usuarios de 100 kg repartidos por la longitud de la pasarela.	$\frac{12 \text{ kN}}{12 \text{ m} \cdot 1,5 \text{ m}} = 0,65 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$

Las acciones son introducidas en el modelo como cargas superficiales sobre paños, con dirección de reparto transversal al tablero. A pesar de tratarse de un entramado bidireccional de barras, no puede asegurarse que el reparto de cargas se realiza en ambas direcciones, por lo que se va a considerar que son las barras transversales las que reciben la carga, para luego transmitirla a las longitudinales.

Mediante el cálculo con CYPE 3D se realizaron las comprobaciones estáticas de seguridad estructural acordes a la instrucción EAE-11. Los resultados fueron satisfactorios al poderse comprobar que todos los elementos modelizados cumplían con todas las comprobaciones estáticas. Esto tiene sentido si recordamos que los perfiles fueron dimensionados mediante un modelo dinámico, y tenemos en cuenta que,

en el caso de una estructura móvil, por lo general, el comportamiento dinámico está más comprometido que el comportamiento estático.

5 Simulación de la respuesta de la pasarela

El modelo de pasarela propuesto en el apartado 4.1 presentará una respuesta dinámica ante la acción de la carga peatonal. Para estimar esta respuesta dinámica se utiliza el modelo de cargas peatonales descrito en el apartado 3. Se realizarán simulaciones numéricas para reproducir diversas secuencias temporales de fuerza ejercida sobre la estructura, con el fin de determinar su respuesta para conocer sus propiedades dinámicas (aceleración máxima, masa modal, amortiguamiento) y posteriormente realizar un diseño acorde a ellas.

5.1 Aplicación del modelo de carga peatonal

Los datos de entrada que se deben introducir al modelo para realizar la simulación de la pasarela son recogidos en la Tabla 12. Los datos de peso y velocidad vienen dados por los valores estadísticos de la población. El número de pasos debe ser tal que las secuencias temporales de posición y fuerza resultantes de la simulación cubran una distancia superior a la longitud de la pasarela. Las simulaciones son realizadas en MATLAB.

Tabla 12: Datos de entrada.

Peso:	Media	$\mu_W = 75 \text{ kg}$
	Desviación estándar	$\sigma_W = 15 \text{ kg}$
Velocidad:	Media	$\mu_v = 1,40 \text{ m/s}$
	Desviación estándar	$\sigma_v = 0,14 \text{ m/s}$
Número de pasos:		$N = 100$

Con el modelo de carga peatonal se generan 10.000 secuencias de fuerza, cada una correspondiente a un hipotético peatón que pudiera transitar sobre la pasarela. De esta forma, se obtiene una muestra representativa de las respuestas dinámica que sufrirá la pasarela por el paso de los peatones.

5.2 Caracterización de la respuesta dinámica

El análisis de los resultados obtenidos en las 10.000 simulaciones del modelo de carga peatonal será explicado en este apartado. Aplicando la secuencia temporal de fuerza obtenida a la pasarela cuyo diseño es el objetivo de este proyecto se va a estimar la respuesta dinámica que dicha estructura experimenta ante tal carga. La respuesta estará determinada por la aceleración en cada instante de tiempo de cada punto de la pasarela, ya que dicha aceleración no es constante en la longitud de la estructura.

5.2.1 Configuraciones de pasarela

Se realizan cálculos para diferentes configuraciones, en las que se varía el amortiguamiento de la pasarela y su frecuencia natural de oscilación. Los valores del coeficiente de amortiguamiento considerados son 0,25%, 0,5%, 1% y 2%. En cuanto a las frecuencias naturales, se toman frecuencias desde 0,5 Hz hasta 5,5 Hz, con un

incremento de 0,1 Hz, lo que supone un total de 51 configuraciones de frecuencia. Combinando los diferentes amortiguamientos y frecuencias se tiene un total de 204 configuraciones. Los resultados de cada una de las 10.000 simulaciones del modelo de carga peatonal son aplicados a cada una de las 204 configuraciones de pasarela.

El establecimiento de diferentes configuraciones de amortiguamiento y frecuencia está motivado por la incertidumbre sobre el comportamiento dinámico de la pasarela. El amortiguamiento no es fácilmente predecible a priori, sino que es determinado experimentalmente mediante pruebas dinámicas sobre la estructura ejecutada. Aunque el diseño de la pasarela se realizará en base a la configuración de amortiguamiento más desfavorable, el análisis del resto de configuraciones será útil una vez ejecutada la pasarela y determinado su amortiguamiento real. Los resultados correspondientes al análisis de la configuración más aproximada al comportamiento real serán valiosos para caracterizar la respuesta dinámica de la pasarela.

Los cálculos se van a realizar considerando una masa modal unitaria de 1 tonelada. Como masa modal y aceleración son inversamente proporcionales, la masa modal que se otorgará a la pasarela en su diseño será tal que haga que las aceleraciones producidas se mantengan dentro del rango admisible.

5.2.2 Procedimiento de cálculo de la respuesta dinámica

En primer lugar, se deben recortar las secuencias temporales de fuerza y posición, puesto que la señal tiene una duración igual al tiempo que el peatón sintético ha empleado en realizar 100 pasos. Se debe disponer de la secuencia de velocidades y la secuencia de periodos de paso, generadas por el modelo de carga peatonal en la simulación, para determinar la secuencia de longitudes de paso. La longitud de un paso, L_i , es el espacio recorrido por el peatón en el tiempo que dura dicho paso, T_i , a la velocidad v_i .

$$L_i = v_i T_i \quad (24)$$

Calculada la secuencia de longitudes de paso se determina el número de zancadas que le bastan al peatón sintético para recorrer los 12 primeros metros, longitud de la pasarela. Se toma el número de zancadas para que los subarmónicos puedan desarrollar por completo su última oscilación. El número de pasos, S , será la mitad que el de zancadas y por tanto siempre será par. En la Figura 24, Figura 25 y Figura 26 se muestran las secuencias de velocidad, periodo y longitud de paso de una simulación, respectivamente, recortadas al número de pasos que el peatón sintético de dicha simulación empleó para desplazarse 12 m.

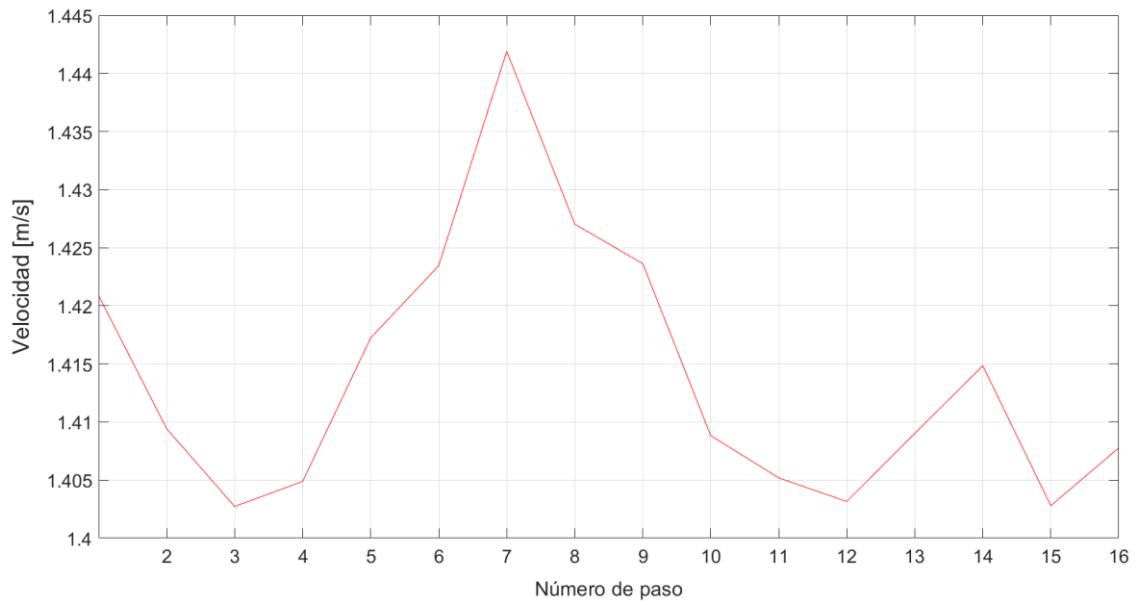


Figura 24: Variación de la velocidad a lo largo de los pasos en una simulación.

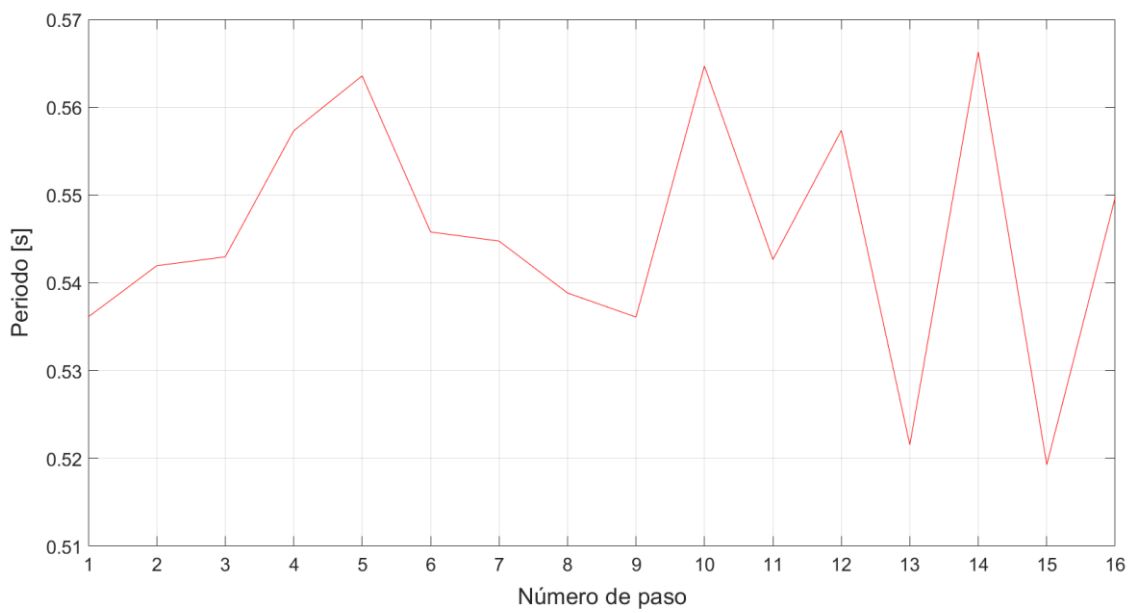


Figura 25: Variación del periodo de los pasos de una simulación.

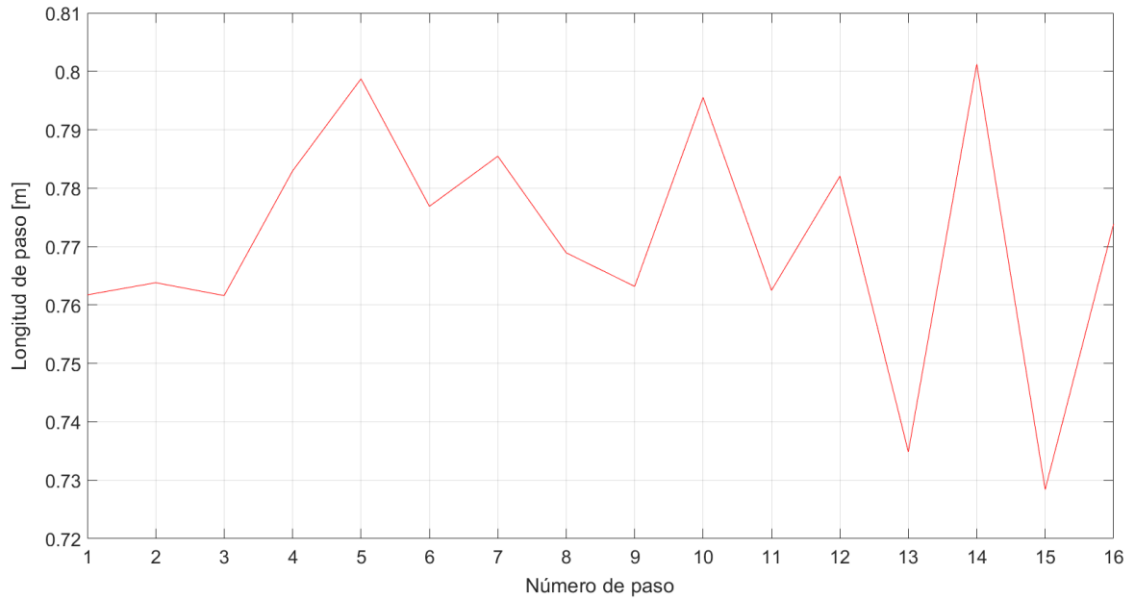


Figura 26: Variación de la longitud de los pasos en una simulación.

Finalmente se determina t_S , el tiempo que emplea el peatón sintético en realizar los S primeros pasos.

$$t_S = \sum_{i=1}^S T_i \quad (25)$$

Las secuencia temporal de fuerza, $f(t)$ es recortada de forma que inician en $t = 0$ y finalizan en $t = t_S$. En dichas secuencias t toma valores finitos, cuyo incremento es $\Delta t = 0,001 s$. En la Figura 27 se presentan las señales de fuerza recortadas correspondientes a tres simulaciones diferentes. Se observa cómo entre una simulación y otra varía la frecuencia del paso y el peso del peatón.

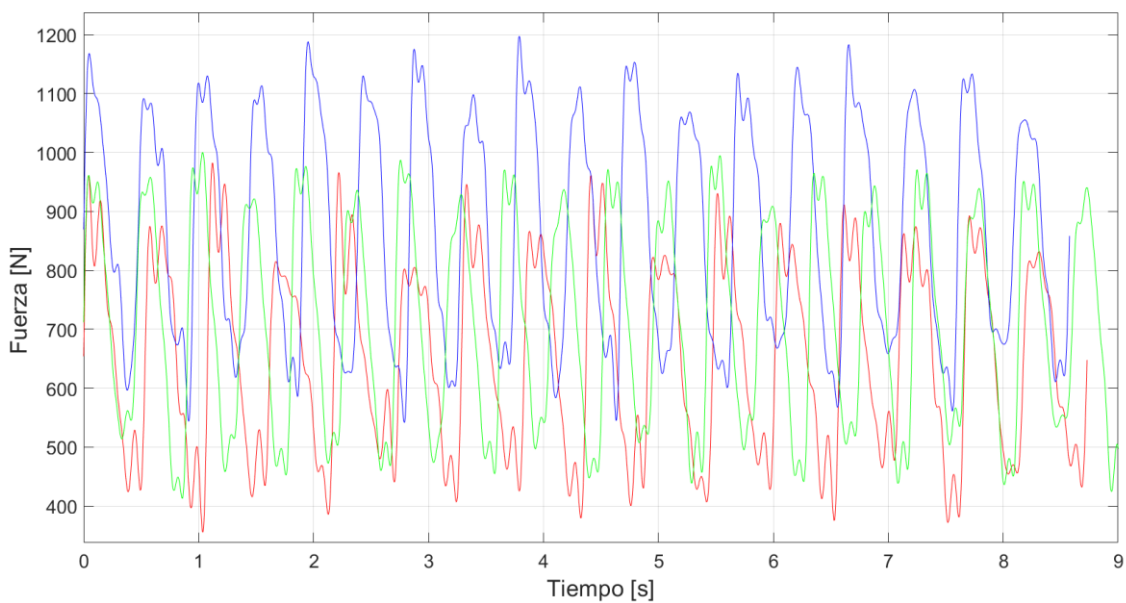


Figura 27: Señales de fuerza recortadas de tres cargas peatonales simuladas o sintéticas.

El modo de vibración triangular implica que las oscilaciones en la pasarela son máximas en el centro del vano y nulas en los extremos, con una pendiente constante entre medias. Este modo de vibración triangular se puede representar como una función a trozos $\varphi(x)$, polinómica de primer grado tal que tiene valor 0 en los extremos de la pasarela $x = 0$ y $x = L$, y valor 1 en el punto medio de la misma, $x = \frac{L}{2}$.

$$\varphi(x) = \begin{cases} \frac{2x}{L}, & x < \frac{L}{2} \\ 2 - \frac{2x}{L}, & x \geq \frac{L}{2} \end{cases} \quad (26)$$

Realizando un cambio de variable se puede convertir la función $\varphi(x)$ en $\varphi(t)$, ya que se tiene determinado para cada instante de tiempo t_i qué posición x_i ocupa el peatón sintético dentro de la pasarela.

La fuerza está restringida por el modo de vibración de la pasarela. Para determinar la fuerza modal debe ponderarse la secuencia de fuerza $f(t)$ según el modo de vibración $\varphi(t)$. Se obtiene una nueva secuencia de fuerzas modales $f_m(t)$ tal que, para cada instante t_i :

$$f_m(t_i) = f(t_i) \cdot \varphi(t_i) \quad (27)$$

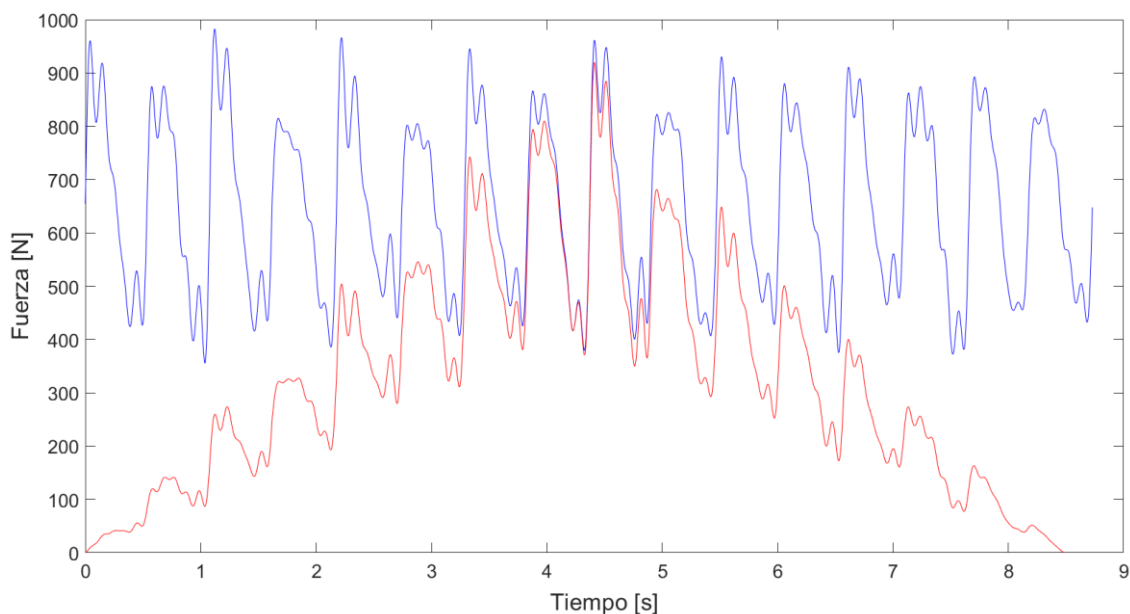


Figura 28: Comparación señal de fuerza original (azul) y señal de fuerza modal (rojo) de una simulación.

La respuesta dinámica de la pasarela se define como el desplazamiento en la dirección vertical, $y(t)$, que describe la estructura en su oscilación. En el dominio del tiempo el desplazamiento se debe calcular mediante la convolución.

$$y(t) = f_m(t) * h(t) \quad (28)$$

Donde el término $h(t)$, función del tiempo, viene determinado por los parámetros dinámicos de la pasarela: coeficiente de amortiguamiento ζ , frecuencia natural ω y masa modal m .

$$h(t) = \frac{e^{-\zeta \omega t}}{\omega m \sqrt{1 - \zeta^2}} \sin(\omega t \sqrt{1 - \zeta^2}) \quad (29)$$

Para evitar el cálculo mediante integrales de convolución se opta por transformar los términos al dominio de las frecuencias aplicando la Transformada de Fourier a $f_m(t)$ y $h(t)$, de forma que la transformada del desplazamiento, $Y(t)$, se calcule como el producto de dichas funciones en el espacio modal:

$$Y(t) = F_m(t) H(t) \quad (30)$$

Donde $F_m(t) = \mathcal{F}[f_m(t)]$ y $H(t) = \mathcal{F}[h(t)]$. Solo queda regresar al dominio del tiempo mediante la inversa de la Transformada de Fourier para obtener la respuesta $y(t) = \mathcal{F}^{-1}[Y(t)]$.

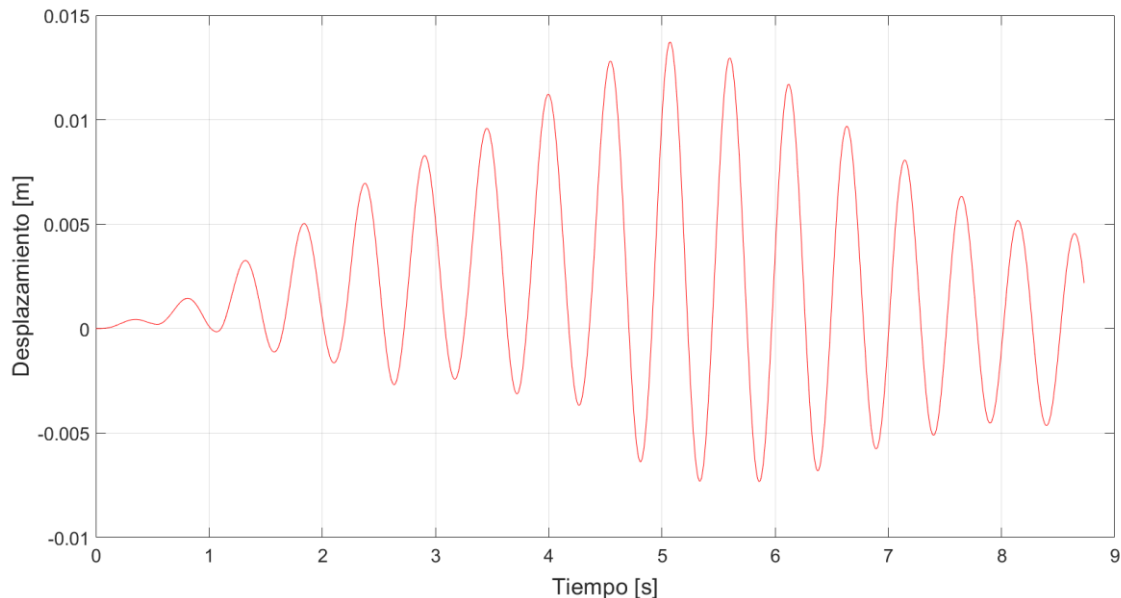


Figura 29: Desplazamientos de una simulación.

Conocida la respuesta se puede calcular la secuencia de aceleraciones $a(t)$ mediante el método de integración numérica. La aceleración en cada instante i es:

$$a_i = \frac{y_i - 2y_{i-1} + y_{i-2}}{(\Delta t)^2} \quad (31)$$

Siendo Δt el incremento de tiempo entre instantes consecutivos definido anteriormente. De la secuencia de aceleraciones es interesante identificar la aceleración máxima, $a_{m\acute{a}x}$, que se suele producir en algún punto de la segunda mitad de la longitud de la pasarela.

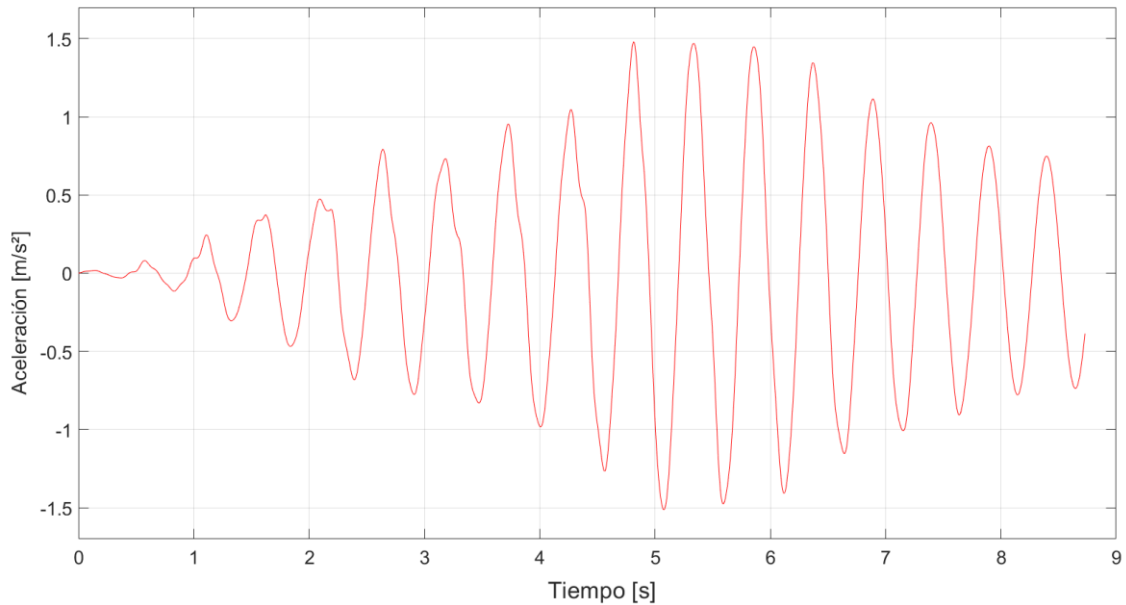


Figura 30: Aceleraciones de una simulación.

Determinando $a(t)$ e identificando la aceleración máxima en cada simulación de una misma hipótesis de comportamiento se obtiene un total de 10.000 valores de aceleración máxima, que son ordenados ascendentemente. Se proponen varios valores de referencia: la aceleración máxima, $a_{m\acute{a}x}$, correspondiente al valor 10.000, la aceleración percentil 95%, a_{95} , correspondiente al valor 9.500, y la aceleración percentil 99%, a_{99} , correspondiente al valor 9.900. Habiendo realizado este procesamiento de datos para cada una de las 51 hipótesis de frecuencias y cada una de las 4 hipótesis de amortiguamientos, se muestra en la Figura 31, Figura 32, Figura 33 y Figura 34 la relación entre aceleración y frecuencia para cada coeficiente de amortiguamiento respectivamente.

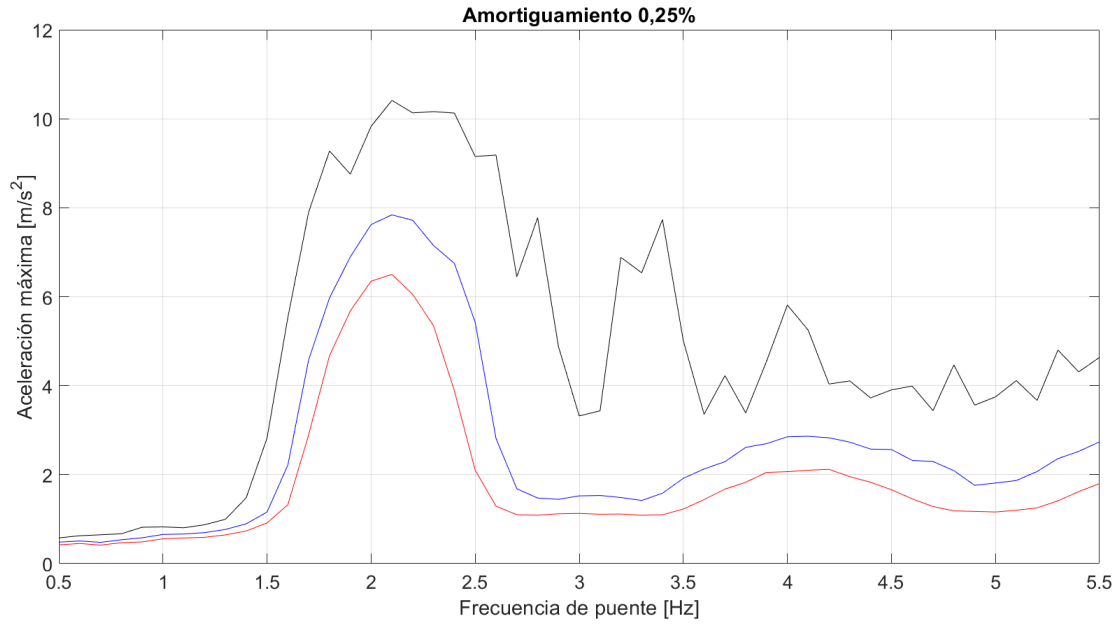


Figura 31: Aceleración frente a frecuencia para $\zeta = 0,25\%$. Línea negra: $a_{m\acute{a}x}$; Línea azul: a_{99} ; Línea roja: a_{95} .

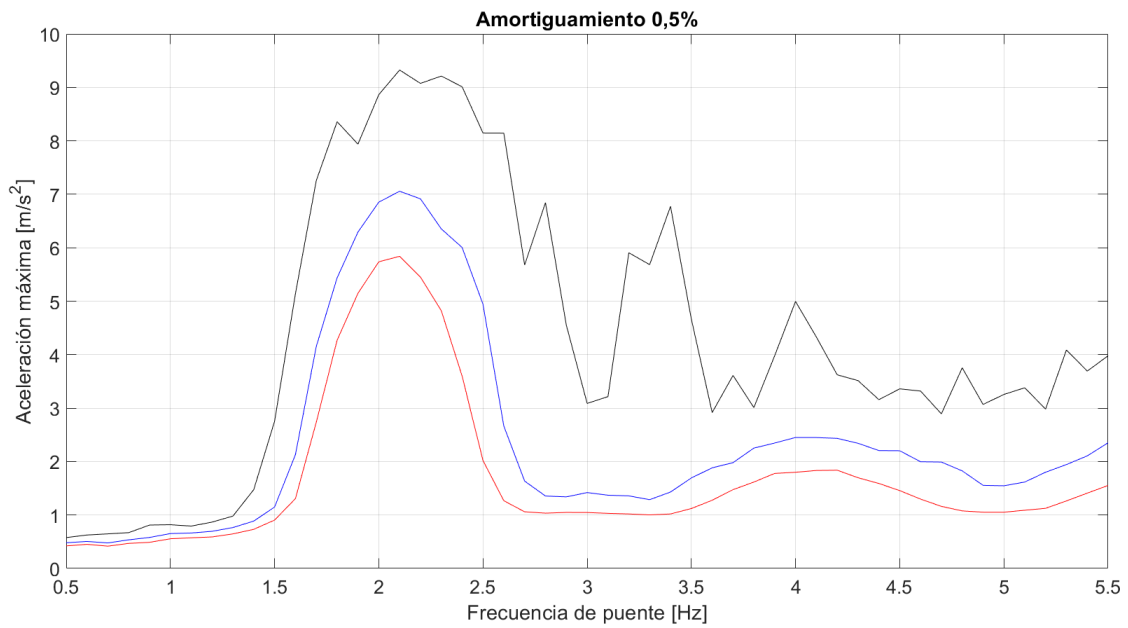


Figura 32: Aceleración frente a frecuencia para $\zeta = 0,5\%$. Línea negra: $a_{m\acute{a}x}$; Línea azul: a_{99} ; Línea roja: a_{95} .

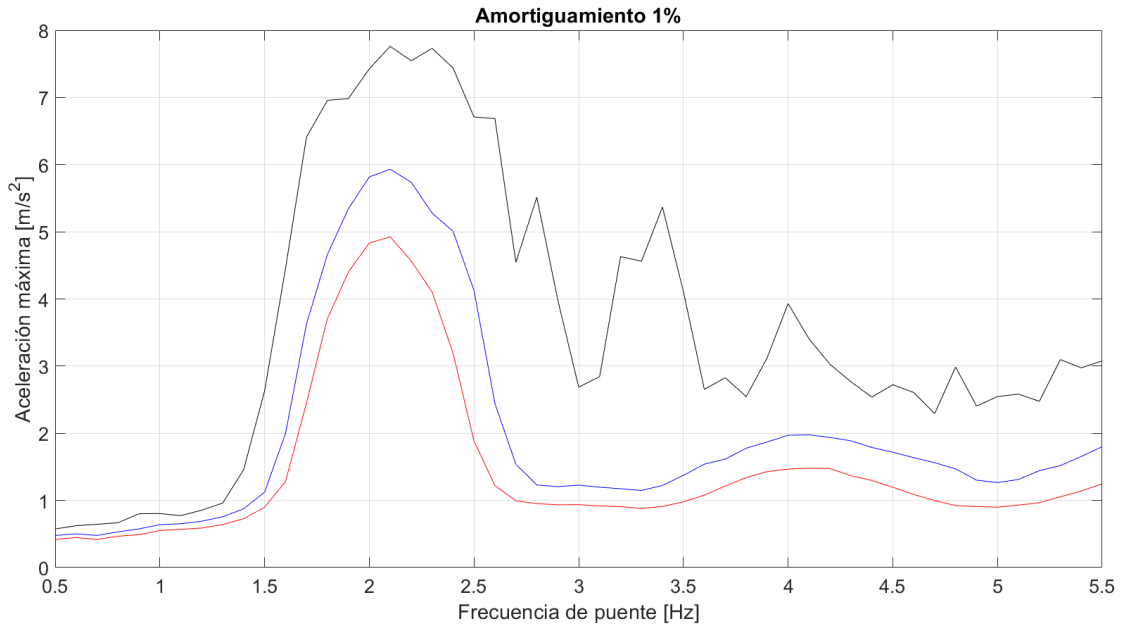


Figura 33: Aceleración frente a frecuencia para $\zeta = 1\%$. Línea negra: $a_{m\acute{a}x}$; Línea azul: a_{99} ; Línea roja: a_{95} .

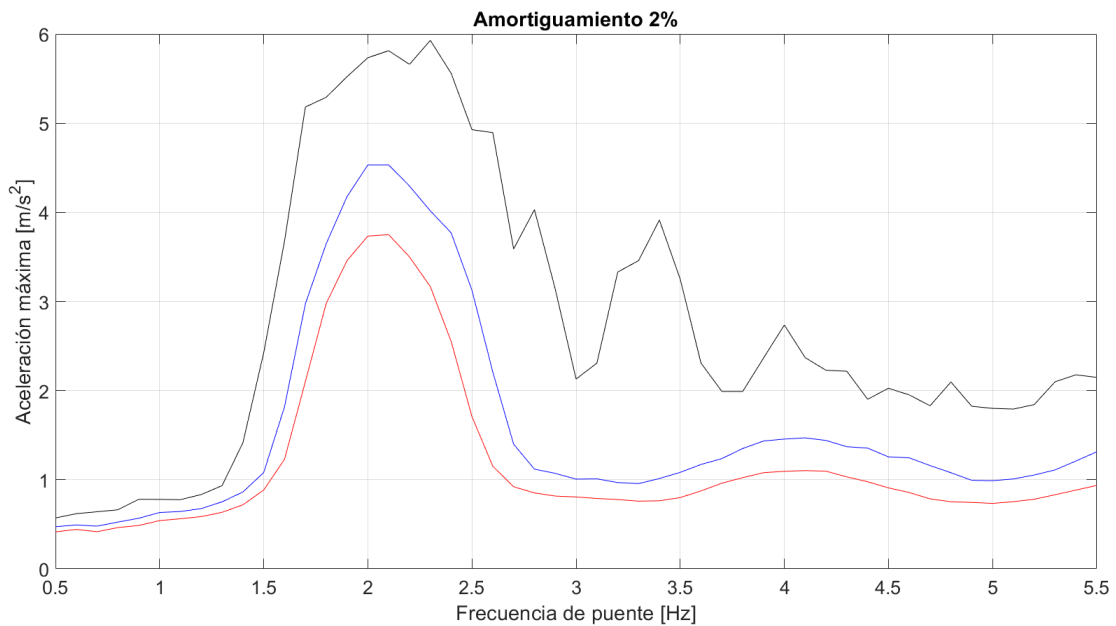


Figura 34: Aceleración frente a frecuencia para $\zeta = 2\%$. Línea negra: $a_{m\acute{a}x}$; Línea azul: a_{99} ; Línea roja: a_{95} .

Se observa que, a menor amortiguamiento, mayor es la respuesta dinámica. En cuanto a la frecuencia, la respuesta es similar en todo el espectro excepto en la zona cercana a los 2 Hz, donde la respuesta es mucho mayor, ya que coincide con la frecuencia de paso de los peatones, que de media tiene ese valor aproximadamente.

La aceleración de cálculo considerada para el diseño de la pasarela será el valor máximo que toma la curva de a_{max} correspondiente al amortiguamiento de 0,25%, de forma que se toma la configuración de amortiguamiento más desfavorable. Este

máximo se da en la frecuencia 2,1 Hz. Se toma de forma aproximada un valor de cálculo $a_c = 10 \text{ m/s}^2$ correspondiente a una masa modal de 1000 kg.

6 Elementos estructurales secundarios

En el apartado 4 se definió la estructura del tablero con detalle. En este apartado se van a presentar otros elementos necesarios para la construcción, como son el sistema de compensación de la aceleración y las estructuras de acceso a la pasarela. También se van a definir las uniones de la estructura y su movilidad.

6.1 Sistema de compensación de la aceleración

En el apartado 5.2 se determinó que la pasarela oscila a una aceleración máxima de 10 m/s² para una masa modal unitaria de 1 tonelada. Por otro lado, en el apartado 2.3 se determinó que el valor de aceleración deseado es de 2 m/s². Esta diferencia hace necesaria la introducción de un sistema que reduzca la aceleración aportando una mayor masa modal a la estructura ya que, como se ha indicado anteriormente, estas dos magnitudes son inversamente proporcionales:

$$\frac{a_1}{a_2} = \frac{m_2}{m_1} \begin{cases} \frac{a_1}{a_2} = \frac{10 \text{ m/s}^2}{2 \text{ m/s}^2} = 5 \\ m_2 = 5 m_1 = 5000 \text{ kg} \end{cases} \quad (32)$$

El sistema de compensación propuesto se trata de un balancín ubicado en el centro del vano. El balancín es un perfil metálico tubular apoyado en el centro de su vano mediante un apoyo fijo sobre el que se balancea. También se apoya en uno de sus extremos sobre un apoyo elástico. Consta de dos masas iguales en cada extremo.

Cada uno de los brazos del balancín tiene 1,4 m de longitud, y la articulación central de la pasarela es solidaria al brazo del balancín que consta de apoyo elástico, también referido como muelle, en su extremo. El punto de unión de pasarela y brazo de balancín está a 0,4 m del centro de este último.

Entre el punto solidario y el punto extremo del balancín se puede establecer una semejanza de triángulos que nos permite determinar un factor de semejanza:

$$\varphi = \frac{1,4 \text{ m}}{0,4 \text{ m}} = 3,5 \quad (33)$$

Este factor de semejanza permite establecer una relación entre la rigidez de la estructura y la del apoyo elástico del balancín.

La rigidez de la estructura se obtiene a partir de la masa modal y frecuencia de oscilación deseadas:

$$k_1 = m \omega^2 = m (2\pi f)^2 = 5000 \text{ kg} \cdot (2\pi \cdot 2 \text{ Hz})^2 = 7,896 \cdot 10^5 \frac{\text{N}}{\text{m}} \quad (34)$$

La rigidez necesaria en el apoyo elástico:

$$k_2 = \frac{k_1}{\varphi^2} = \frac{7,896 \cdot 10^5 \frac{\text{N}}{\text{m}}}{3,5^2} = 6,445 \cdot 10^4 \frac{\text{N}}{\text{m}} \quad (35)$$

Con dicha rigidez se pueden conocer los alargamientos estático y dinámico del apoyo elástico debidos a la carga de la pasarela.

Para ello hay que tener en cuenta por un lado que, al balancín, por encontrarse en el centro del vano, le llegará la mitad del peso de la pasarela y, por otro lado, que dentro del balancín al extremo que tiene muelle llegará una parte de dicha carga proporcional al factor de semejanza:

$$Q = \frac{W}{\varphi} = \frac{2000 \text{ kg} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}{2 \cdot 3,5} = 2803 \text{ N} \quad (36)$$

Alargamiento estático:

$$\delta_e = \frac{Q}{k_2} = \frac{2803 \text{ N}}{64,45 \frac{\text{N}}{\text{mm}}} = 43,5 \text{ mm} \quad (37)$$

Para el alargamiento dinámico del apoyo elástico se calcula el de la pasarela a partir de la aceleración deseada, y se le aplica el factor de semejanza:

$$\delta_d = \frac{a}{\omega^2} \varphi = \frac{a}{(2\pi f)^2} \varphi = \frac{2 \text{ m/s}^2}{(2\pi \cdot 2)^2} \cdot 3,5 = 44,3 \text{ mm} \quad (38)$$

Combinando los alargamientos estático y dinámico se obtienen los alargamientos máximo y mínimo:

$$\begin{aligned} \delta_{max} &= \delta_e + \delta_d = 43,5 \text{ mm} + 44,3 \text{ mm} = 87,8 \text{ mm} \\ \delta_{min} &= \delta_e - \delta_d = 43,5 \text{ mm} - 44,3 \text{ mm} = -0,8 \text{ mm} \end{aligned} \quad (39)$$

El apoyo elástico se materializa en un perfil metálico biapoyado. Apoyando el extremo del balancín en el centro del vano del perfil se produce una flexión en este último, cuya flecha será el alargamiento máximo calculado anteriormente y, al tratarse de una viga biapoyada con carga puntual centrada, dicha flecha será:

$$f = \frac{P L^3}{48 E I} \quad (40)$$

Estructurando la expresión anterior en función de la rigidez se obtiene:

$$k = \frac{P}{f} = \frac{48 E I}{L^3} \quad (41)$$

De donde se puede despejar la longitud del perfil:

$$L = \sqrt[3]{\frac{48 E I}{k}} \quad (42)$$

Tras un proceso iterativo de dimensionamiento se propuso un perfil tubular cuadrado de aluminio 100x3,8 mm que tiene las siguientes características mecánicas:

Módulo de Young del aluminio: $E = 7 \cdot 10^4 \text{ MPa}$

Momento de inercia eje Z: $I_z = 2,25 \cdot 10^6 \text{ mm}^4$

Módulo resistente eje Z: $W_z = 4,5 \cdot 10^4 \text{ mm}^3$

Límite elástico: $\sigma_e = 170 \text{ MPa}$

Teniendo en cuenta la rigidez que debe tener el muelle, calculada anteriormente, de 64,45 N/mm, se obtiene la longitud necesaria para el perfil de aluminio:

$$L = \sqrt[3]{\frac{48 E I}{k}} = \sqrt[3]{\frac{48 \cdot 7 \cdot 10^4 \text{ MPa} \cdot 2,25 \cdot 10^6 \text{ mm}^4}{64,45 \text{ N/mm}}} = 4895 \text{ mm} \quad (43)$$

La carga puntual centrada en el vano que produzca la flecha deseada será:

$$P = \frac{48 E I f}{L^3} = \frac{48 \cdot 7 \cdot 10^4 \text{ MPa} \cdot 2,25 \cdot 10^6 \text{ mm}^4 \cdot 87,8 \text{ mm}}{4895^3} = 5659 \text{ N} \quad (44)$$

El momento que experimenta el perfil biapoyado por dicha carga será:

$$M = \frac{P L}{4} = \frac{5659 \text{ N} \cdot 4895 \text{ mm}}{4} = 6925 \text{ N m} \quad (45)$$

En la fibra más tensionada de la sección tubular del perfil se alcanza una tensión:

$$\sigma = \frac{M}{W} = \frac{6925000 \text{ N mm}}{4,5 \cdot 10^4 \text{ mm}^3} = 153 \text{ MPa} < \sigma_e \quad (46)$$

En la Figura 35 se muestra el aspecto del sistema de compensación. Se distinguen los brazos del balancín, apoyados sobre el eje del balancín en el centro. Se puede observar uno de los brazos del balancín apoyado en su extremo sobre la barra de aluminio, así como la placa mediante la que apoyará la pasarela sobre dicho brazo.

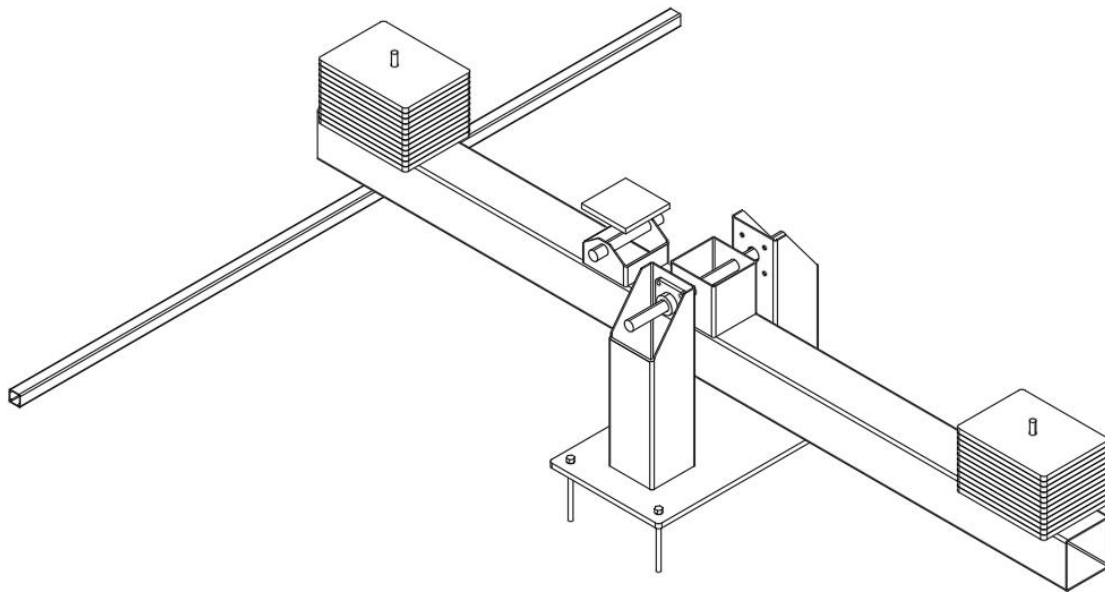


Figura 35: Sistema de compensación de aceleraciones.

La elección de una barra de aluminio como muelle está motivada en que dicha solución abre la posibilidad de variar fácilmente la rigidez del muelle modificando la longitud entre apoyos, ya que, como se ha visto en la Ecuación (43), longitud de barra y rigidez son inversamente proporcionales.

En los extremos del balancín se colocan unas masas que permiten calibrar el sistema de forma que se pueda ajustar la aceleración variando la masa modal ligeramente. Esta posibilidad es muy interesante, ya que el diseño se realiza en base a unos valores de referencia que son aproximados, y se requiere una cierta libertad de modificación de los parámetros dinámicos de la estructura para ajustarse a la situación real del ensayo.

6.2 Accesos

El tablero se encuentra elevado 0,8 m sobre el nivel del suelo para albergar bajo él el sistema de regulación, y tener cierto margen para el movimiento que producirán las vibraciones.

Por otro lado, para que el ensayo sea fiel a la realidad sería conveniente que el peatón entre en la pasarela con una cierta velocidad, en lugar de arrancar desde el reposo ya dentro de la misma.

Estas razones hacen necesario disponer la estructura de acceso representada en la Figura 36, que permite al peatón elevarse a la cota del tablero e iniciar el paso antes de entrar en él. La solución propuesta es una estructura compuesta por unos escalones que van a dar a una plataforma de 1 m de longitud que ya se encuentra a la cota del tablero. Al igual que en el tablero se emplearán perfiles tubulares cuadrados de acero y se dispondrá una barandilla.

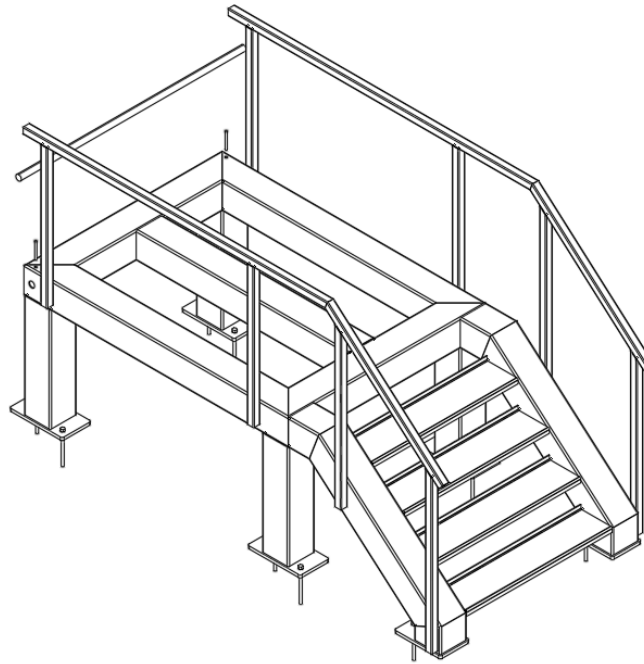


Figura 36: Estructura de acceso.

6.3 Uniones y movilidad

Dado que la estructura no es un sistema estático como se tiene acostumbrado en ingeniería civil, sino que se trata de un mecanismo, es importante clasificar los elementos y uniones que componen la estructura según sean fijos o móviles.

Los elementos fijos descansarán mediante uniones empotradas al suelo, y serán ambas plataformas de acceso, y el bastidor del sistema de compensación. El apoyo se materializará a través de uniones atornilladas mediante placa metálica.

Los elementos móviles, que son las dos piezas del tablero y el brazo del balancín, apoyarán sobre los elementos fijos antes mencionados, así como entre ellos, mediante articulaciones. El tablero estará formado por dos piezas simétricas, cada una de ellas unida en un extremo a la plataforma de acceso correspondiente y unidas entre sí en el centro del vano. El movimiento de cada una de estas dos piezas será una rotación, con centro en la unión con la plataforma de acceso, de forma que el punto que más se desplaza es el centro del vano. Este movimiento viene determinado por el modo de vibración triangular. Por otro lado, el balancín del sistema de compensación es solidario, en el extremo de uno de sus brazos, a una de las piezas que componen el tablero en un punto adyacente al centro del vano, mediante una articulación, de forma que el descenso del punto central del vano se transmita al balancín. El balancín tiene otros dos puntos de apoyo: el extremo del otro brazo, que descansa sobre el apoyo elástico, y el eje de rotación del balancín, que se trata de una unión articulada con el soporte fijado al suelo.

Las uniones articuladas serán materializadas por medio de rodamientos. Se han seleccionado dos tipos de rodamientos, ambos de la casa FAG. Se dispondrá un rodamiento tipo oscilante de una hilera de rodillos, modelo 20209KTC3 con manguito H209, en la unión de la pasarela con el brazo del balancín, y 6 rodamientos tipo S para

ejes, modelo F56208 con soporte incluido, de los cuales se dispondrá una pareja en la unión de los dos extremos del tablero con las plataformas de acceso y una tercera pareja en la unión del brazo del balancín con su soporte.

La unión de ambas piezas que conforman el tablero se materializa como una unión simplemente apoyada mediante la colocación de pestañas en uno de los tramos.

7 Instrumentación y calibración de la pasarela

7.1 Instrumentación

Para completar el diseño de la pasarela se seleccionan los instrumentos de toma y análisis de datos que se van a emplear en los ensayos peatonales que se realizarán en ella. La magnitud a medir en el ensayo es la aceleración, por un lado, la de la pasarela en su movimiento vibratorio y, por otro lado, la del peatón que cruza sobre ella.

La aceleración de la pasarela se va a medir mediante un acelerómetro ubicado bajo el tablero, en su parte central, fijado mediante unión atornillada a la estructura. Como las aceleraciones esperadas son bajas, del orden de 2 m/s^2 , se opta por acelerómetros de alta sensibilidad, que además son los que menor nivel de ruido aportan a la medida. El dispositivo seleccionado es de la casa Brüel & Kjaer, modelo 8340, de sensibilidad 10 V/g .



Figura 37: Acelerómetro Brüel & Kjaer 8340.

Para recibir las medidas realizadas por el dispositivo anterior se requiere un sistema de adquisición de datos. Se dispondrá un sistema fijo junto a ordenador, consistente en una tarjeta dSPACE instalada en el ordenador, unida mediante una caja de conexiones a los cables BNC de los acelerómetros de la pasarela. El posterior tratamiento de los datos se realiza en dicho ordenador.



Figura 38: Tarjeta de adquisición de datos dSPACE

La aceleración del peatón será medida a través de acelerómetro móvil de conexión inalámbrica adherido a la cadera del voluntario. El dispositivo seleccionado es el XSens Dot. Mide las aceleraciones del peatón en cada uno de los tres ejes ortogonales a su desplazamiento. Los datos registrados por el acelerómetro son enviados por conexión Bluetooth a un dispositivo para su posterior procesamiento. Aunque en este caso sólo se desea medir aceleraciones verticales, la medida de la aceleración en la dirección longitudinal de la pasarela será útil para determinar la velocidad del peatón. La medida de aceleración vertical, multiplicada por el peso del voluntario, proporciona la carga real que ejerce el peatón sobre la pasarela en su desplazamiento.



Figura 39: Sensor XSens Dot y su sistema de coordenadas.

Determinando experimentalmente la carga peatonal y la respuesta dinámica se podrá evaluar la calidad de las estimaciones de respuesta realizadas en el apartado 5. De igual manera se podrá comprobar nuevamente el modelo de carga peatonal empleado.

7.2 Pruebas de calibración

La pasarela ha sido diseñada considerando la necesidad de ajuste de la estructura a los ensayos que se van a realizar en ella, disponiendo sistemas que permiten la variación de la rigidez o la masa con el objetivo de modificar la respuesta dinámica.

Concretamente las calibraciones se realizarán en el sistema de compensación de la aceleración. Por un lado, variando la posición de los apoyos de la barra de aluminio que hace de apoyo elástico del brazo del balancín, se puede modificar su posición y con ello la rigidez del muelle. A mayor longitud entre apoyos, menor rigidez y por lo tanto menor frecuencia de oscilación de la pasarela en el modo triangular. Por otro lado, se puede variar la masa depositada en cada extremo del brazo del balancín mediante la adición o sustracción de pesas. Estas pesas aumentan la masa modal, lo que reduce la aceleración de la pasarela.

Las calibraciones deberán realizarse una vez construida la estructura. El proceso consistirá, en primer lugar, en realizar ensayos de vibración libre sobre la estructura vacía para caracterizar las frecuencias naturales y el amortiguamiento de la estructura en vacío. Si los resultados son satisfactorios (parecidos a los de diseño) se procederá a realizar pasos de un peatón individualmente sobre la pasarela para observar si hay variaciones significativas en las propiedades modales de la estructura bajo la carga peatonal. En cualquier caso, previamente, hay que asegurar que las aceleraciones que pueda sufrir el peatón sean inferiores a las que la normativa establece como inadmisibles, 2 m/s^2 .

8 Conclusiones

El modelo de pasarela propuesto ofrece la posibilidad de estudiar la relación directa entre la acción producida por el paso de peatones sobre una estructura y la respuesta dinámica de dicha estructura. El estudio de esta relación permitirá desarrollar modelos de interacción entre peatón y estructura que podrán aportar nuevos conocimientos al estado del arte en materia de dinámica de estructuras y serviciabilidad estructural.

Esto se ha conseguido mediante un diseño que permite la excitación de un modo de vibración particular por acción de la carga peatonal, y al mismo tiempo impide la aparición de otros movimientos vibratorios, de forma que se aísla la vibración de interés para estudiar sus características dinámicas.

La instrumentación seleccionada permitirá caracterizar la respuesta dinámica de la estructura en los ensayos que se pretenden realizar, así como determinar la acción peatonal real de forma que se pueda validar experimentalmente el modelo de carga peatonal desarrollado por los tutores de este trabajo, y validar los cálculos realizados para esta pasarela a partir de las simulaciones generadas por dicho modelo.

El nivel de detalle del diseño ha sido el necesario para proporcionar una estructura segura. Se han dispuesto las adecuadas barandillas y accesos para asegurar la integridad de los voluntarios durante los ensayos, así como unos elementos de unión internos y apoyos externos adecuados para asegurar la estabilidad de la pasarela, teniendo en cuenta que se trata de una estructura móvil. El confort de los voluntarios también se ha cuidado seleccionando los valores de aceleración considerados como aceptables por las diferentes normativas.

Referencias

1. International Standard *ISO 10137. Bases for desing of structures - Serviceability of buildings against vibration*, 2007;
2. British Standards Institution UK National Annex to Eurocode 1: Actions on structures – Part 2 : Traffic loads on bridges. *Assessment* 2003.
3. Hivoss Design of Footbridges : Guideline. *Res. Fund Coal Steel* 2007, 1–33.
4. Sétra *Footbridges. Assesment of vibrational behaviour of footbridges under pedestrian loading*, 2006;
5. García-Diéguez, M.; Zapico-Valle, J.L. Statistical Modeling of the Relationships between Spatiotemporal Parameters of Human Walking and Their Variability. *J. Struct. Eng.* 2017, 143
6. García-Diéguez, M.; Zapico-Valle, J. Sensitivity of the Vertical Response of Footbridges to the Frequency Variability of Crossing Pedestrians. *Vibration* 2018, 1
7. García-Diéguez, M.; Zapico-Valle, J.L. Statistical modelling of spatiotemporal variability of overground walking. *Mech. Syst. Signal Process.* 2019, 129, 186–200,
8. García-Diéguez, M.; Racic, V.; Zapico-Valle, J.L. Complete statistical approach to modelling variable pedestrian forces induced on rigid surfaces. *Mech. Syst. Signal Process.* 2021, 159
9. Bauby, C.E.; Kuo, A.D. Active control of lateral balance in human walking. *Biomech J.* 2000, 33.
10. Grieve, D.W.; Gait pattern and the speed of walking. *Biomed. Eng. (NY)*. 1968.



UNIVERSIDAD DE OVIEDO

ESCUELA POLITÉCNICA DE MIERES

**MASTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA DE CAMINOS, CANALES Y
PUERTOS**

**DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIÓN E INGENIERÍA DE FABRICACIÓN
AREA DE MECÁNICA DE MEDIOS CONTINUOS Y TEORÍA DE
ESTRUCTURAS**

DOCUMENTO 1: MEMORIA
**ANEXO 1: CÁLCULO ESTÁTICO EN
CYPE**

TRABAJO FIN DE MÁSTER

**DISEÑO DE PASARELA PARA ENSAYOS CON
CARGAS PEATONALES**

AUTOR: JAVIER MENDÍVIL CALVO

TUTOR: MARTA GARCÍA DIÉGUEZ

COTUTOR: JOSÉ LUIS ZAPICO VALLE

JUNIO, 2021

1.- DATOS DE OBRA.....	2
1.1.- Normas consideradas.....	2
1.2.- Estados límite.....	2
1.2.1.- Combinaciones.....	2
2.- ESTRUCTURA.....	3
2.1.- Geometría.....	3
2.1.1.- Barras.....	3
2.2.- Resultados.....	3
2.2.1.- Nudos.....	3
2.2.2.- Barras.....	4



1.- DATOS DE OBRA

1.1.- Normas consideradas

Aceros laminados y armados: EAE 2011

Categoría de uso: C. Zonas de acceso al público

1.2.- Estados límite

E.L.U. de rotura. Acero laminado	EAE Nieve: Altitud inferior o igual a 1000 m
Desplazamientos	Acciones características

1.2.1.- Combinaciones

- Nombres de las hipótesis

PP Peso propio

CM 1 Madera

Sobrecarga Uso Sobrecarga Uso

- E.L.U. de rotura. Acero laminado

Comb.	PP	CM 1	Sobrecarga Uso
1	1.000	1.000	
2	1.350	1.000	
3	1.000	1.350	
4	1.350	1.350	
5	1.000	1.000	1.500
6	1.350	1.000	1.500
7	1.000	1.350	1.500
8	1.350	1.350	1.500

- Desplazamientos

Comb.	PP	CM 1	Sobrecarga Uso
1	1.000	1.000	
2	1.000	1.000	1.000



2.- ESTRUCTURA

2.1.- Geometría

2.1.1.- Barras

2.1.1.1.- Materiales utilizados

Materiales utilizados							
Material		E (MPa)	ν	G (MPa)	f _y (MPa)	α _t (m/m°C)	γ (kN/m ³)
Tipo	Designación						
Acero laminado	S275 (EAE)	210000.00	0.300	81000.00	275.00	0.000012	77.01
Notación: E: Módulo de elasticidad ν: Módulo de Poisson G: Módulo de cortadura f _y : Límite elástico α _t : Coeficiente de dilatación γ: Peso específico							

2.1.1.2.- Resumen de medición

Resumen de medición												
Material		Serie	Perfil	Longitud			Volumen			Peso		
Tipo	Designación			Perfil (m)	Serie (m)	Material (m)	Perfil (m ³)	Serie (m ³)	Material (m ³)	Perfil (kg)	Serie (kg)	Material (kg)
Acero laminado	S275 (EAE)	SHS	SHS 200x5.0	48.000	120.344	120.344	0.184	0.235	0.235	1444.69	1843.93	1843.93
			SHS 200x5.0, Doble con unión genérica	1.500			0.012			90.29		
			SHS 50x3.0	68.844			0.037			291.98		
			SHS 50x3.0, Doble con unión genérica	2.000			0.002			16.96		

2.2.- Resultados

2.2.1.- Nudos

2.2.1.1.- Reacciones

Referencias:

Rx, Ry, Rz: Reacciones en nudos con desplazamientos coaccionados (fuerzas).

Mx, My, Mz: Reacciones en nudos con giros coaccionados (momentos).

2.2.1.1.1.- Hipótesis

Reacciones en los nudos, por hipótesis							
Referencia	Descripción	Reacciones en ejes globales					
		Rx (kN)	Ry (kN)	Rz (kN)	Mx (kN·m)	My (kN·m)	Mz (kN·m)
N1	Peso propio	6.350	-0.018	4.640	0.00	0.00	0.00
	CM 1	1.009	-0.003	0.720	0.00	0.00	0.00
	Sobrecarga Uso	4.099	-0.012	2.925	0.00	0.00	0.00
N17	Peso propio	-6.350	-0.018	4.640	0.00	0.00	0.00
	CM 1	-1.009	-0.003	0.720	0.00	0.00	0.00
	Sobrecarga Uso	-4.099	-0.012	2.925	0.00	0.00	0.00
N29	Peso propio	6.324	0.018	4.404	0.00	0.00	0.00
	CM 1	1.023	0.003	0.720	0.00	0.00	0.00
	Sobrecarga Uso	4.156	0.012	2.925	0.00	0.00	0.00
N36	Peso propio	-6.324	0.018	4.404	0.00	0.00	0.00
	CM 1	-1.023	0.003	0.720	0.00	0.00	0.00



Reacciones en los nudos, por hipótesis							
Referencia	Descripción	Reacciones en ejes globales					
		Rx (kN)	Ry (kN)	Rz (kN)	Mx (kN·m)	My (kN·m)	Mz (kN·m)
	Sobrecarga Uso	-4.156	0.012	2.925	0.00	0.00	0.00

2.2.2.- Barras

2.2.2.1.- Comprobaciones E.L.U. (Completo)

Nota: Se muestra el listado completo de comprobaciones realizadas para las 10 barras con mayor coeficiente de aprovechamiento.

Barra N22/N23

Perfil: SHS 50x3.0 Material: Acero (S275 (EAE))							
	Nudos		Longitud (m)	Características mecánicas			
	Inicial	Final		Área (cm ²)	I _y ⁽¹⁾ (cm ⁴)	I _z ⁽¹⁾ (cm ⁴)	I _t ⁽²⁾ (cm ⁴)
	N22	N23	1.500	5.40	19.37	19.37	32.08
Notas: ⁽¹⁾ Inercia respecto al eje indicado ⁽²⁾ Momento de inercia a torsión uniforme							
	Pandeo			Pandeo lateral			
	Plano XY		Plano XZ	Ala sup.		Ala inf.	
β	1.00		1.00	0.00		0.00	
L _k	1.500		1.500	0.000		0.000	
C _m	1.000		1.000	1.000		1.000	
C ₁	-			1.000			
Notación: b: Coeficiente de pandeo L _k : Longitud de pandeo (m) C _m : Coeficiente de momentos C ₁ : Factor de modificación para el momento crítico							

**Limitación de esbeltez** (Criterio de CYPE Ingenieros, basado en: Figura 35.1.2 de la norma EAE 2011.)

La esbeltez reducida $\bar{\lambda}$ de las barras comprimidas debe ser inferior al valor 3.0.

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr}}}$$

$$\bar{\lambda} : \underline{0.91} \quad \checkmark$$

Donde:

Clase: Clase de la sección, según la capacidad de deformación y de desarrollo de la resistencia plástica de los elementos planos comprimidos de una sección.

$$\text{Clase} : \underline{1}$$

A: Área de la sección bruta para las secciones de clase 1, 2 y 3.

$$A : \underline{5.40} \text{ cm}^2$$

f_y : Límite elástico. (EAE 2011, Artículo 27)

$$f_y : \underline{275.00} \text{ MPa}$$

N_{cr} : Axil crítico de pandeo elástico.

$$N_{cr} : \underline{178.39} \text{ kN}$$

El axil crítico de pandeo elástico N_{cr} es el menor de los valores obtenidos en a), b) y c):

a) Axil crítico elástico de pandeo por flexión respecto al eje Y.

$$N_{cr,y} : \underline{178.39} \text{ kN}$$

$$N_{cr,y} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{L_{ky}^2}$$

b) Axil crítico elástico de pandeo por flexión respecto al eje Z.

$$N_{cr,z} : \underline{178.39} \text{ kN}$$

$$N_{cr,z} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{L_{kz}^2}$$

c) Axil crítico elástico de pandeo por torsión.

$$N_{cr,T} : \underline{\infty}$$

$$N_{cr,T} = \frac{1}{i_0^2} \cdot \left[G \cdot I_t + \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_w}{L_{kt}^2} \right]$$

Donde:

I_y : Momento de inercia de la sección bruta, respecto al eje Y.

$$I_y : \underline{19.37} \text{ cm}^4$$

I_z : Momento de inercia de la sección bruta, respecto al eje Z.

$$I_z : \underline{19.37} \text{ cm}^4$$

I_t : Momento de inercia a torsión uniforme.

$$I_t : \underline{32.08} \text{ cm}^4$$

I_w : Constante de alabeo de la sección.

$$I_w : \underline{0.00} \text{ cm}^6$$

E: Módulo de elasticidad.

$$E : \underline{210000} \text{ MPa}$$

G: Módulo de elasticidad transversal.

$$G : \underline{81000} \text{ MPa}$$

L_{ky} : Longitud efectiva de pandeo por flexión, respecto al eje Y.

$$L_{ky} : \underline{1.500} \text{ m}$$

L_{kz} : Longitud efectiva de pandeo por flexión, respecto al eje Z.

$$L_{kz} : \underline{1.500} \text{ m}$$

L_{kt} : Longitud efectiva de pandeo por torsión.

$$L_{kt} : \underline{0.000} \text{ m}$$

i_0 : Radio de giro polar de la sección bruta, respecto al centro de torsión.

$$i_0 : \underline{2.68} \text{ cm}$$

$$i_0 = \left(i_y^2 + i_z^2 + y_0^2 + z_0^2 \right)^{0.5}$$

Siendo:

i_y , i_z : Radios de giro de la sección bruta, respecto a los ejes principales de inercia Y y Z.

$$i_y : \underline{1.89} \text{ cm}$$

$$i_z : \underline{1.89} \text{ cm}$$

y_0 , z_0 : Coordenadas del centro de torsión en la dirección de los ejes principales Y y Z, respectivamente, relativas al centro de gravedad de la sección.

$$y_0 : \underline{0.00} \text{ mm}$$

$$z_0 : \underline{0.00} \text{ mm}$$

**Abolladura del alma inducida por el ala comprimida (EAE 2011, Artículo 35.8)**

Se debe satisfacer:

$$\frac{h_w}{t_w} \leq k \frac{E}{f_{yf}} \sqrt{\frac{A_w}{A_{fc,ef}}}$$

$$14.67 \leq 303.92 \quad \checkmark$$

Donde:

 h_w : Altura del alma.

h_w : 44.00 mm

 t_w : Espesor del alma.

t_w : 3.00 mm

 A_w : Área del alma.

A_w : 2.64 cm²

 $A_{fc,ef}$: Área reducida del ala comprimida.

$A_{fc,ef}$: 1.50 cm²

k: Coeficiente que depende de la clase de la sección.

k : 0.30

E: Módulo de elasticidad.

E : 210000 MPa

 f_{yf} : Límite elástico del acero del ala comprimida.

f_{yf} : 275.00 MPa

Siendo:

$$f_{yf} = f_y$$

Resistencia a tracción (EAE 2011, Artículo 34.2)

La comprobación no procede, ya que no hay axil de tracción.

Resistencia a compresión (EAE 2011, Artículo 34.3)

Se debe satisfacer:

$$\eta = \frac{N_{c,Ed}}{N_{c,Rd}} \leq 1$$

$$\eta : \underline{0.244} \quad \checkmark$$

$$\eta = \frac{N_{c,Ed}}{N_{b,Rd}} \leq 1$$

$$\eta : \underline{0.413} \quad \checkmark$$

El esfuerzo solicitante de cálculo pésimo se produce para la combinación de acciones 1.35·PP+1.35·CM1+1.5·SobrecargaUso.

 $N_{c,Ed}$: Axil de compresión solicitante de cálculo pésimo.

$N_{c,Ed}$: 34.56 kN

La resistencia de cálculo a compresión $N_{c,Rd}$ viene dada por:

$$N_{c,Rd} = A \cdot f_{yd}$$

$N_{c,Rd}$: 141.50 kN

Donde:

Clase: Clase de la sección, según la capacidad de deformación y de desarrollo de la resistencia plástica de los elementos planos comprimidos de una sección.

Clase : 1

A: Área de la sección bruta para las secciones de clase 1, 2 y 3.

A : 5.40 cm²

 f_{yd} : Resistencia de cálculo del acero.

f_{yd} : 261.90 MPa

$$f_{yd} = f_y / \gamma_{M0}$$

Siendo:

 f_y : Límite elástico. (EAE 2011, Artículo 27)

f_y : 275.00 MPa

 γ_{M0} : Coeficiente parcial de seguridad del material.

γ_{M0} : 1.05

Resistencia a pandeo: (EAE 2011, Artículo 35.1)



La resistencia de cálculo a pandeo $N_{b,Rd}$ en una barra comprimida viene dada por:

$$N_{b,Rd} = \chi \cdot A \cdot f_{yd}$$

$$N_{b,Rd} : \underline{83.78} \text{ kN}$$

Donde:

A: Área de la sección bruta para las secciones de clase 1, 2 y 3.

$$A : \underline{5.40} \text{ cm}^2$$

f_{yd} : Resistencia de cálculo del acero.

$$f_{yd} : \underline{261.90} \text{ MPa}$$

$$f_{yd} = f_y / \gamma_{M1}$$

Siendo:

f_y : Límite elástico. (EAE 2011, Artículo 27)

$$f_y : \underline{275.00} \text{ MPa}$$

γ_{M1} : Coeficiente parcial de seguridad del material.

$$\gamma_{M1} : \underline{1.05}$$

c: Coeficiente de reducción por pandeo.

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

$$C_y : \underline{0.59}$$

$$C_z : \underline{0.59}$$

Siendo:

$$\Phi = 0.5 \cdot \left[1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda} - 0.2) + (\bar{\lambda})^2 \right]$$

$$f_y : \underline{1.09}$$

$$f_z : \underline{1.09}$$

a: Coeficiente de imperfección elástica.

$$a_y : \underline{0.49}$$

$$a_z : \underline{0.49}$$

$\bar{\lambda}$: Esbeltez reducida.

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr}}}$$

$$\bar{\lambda}_y : \underline{0.91}$$

$$\bar{\lambda}_z : \underline{0.91}$$

N_{cr} : Axil crítico elástico de pandeo, obtenido como el menor de los siguientes valores:

$$N_{cr} : \underline{178.39} \text{ kN}$$

$N_{cr,y}$: Axil crítico elástico de pandeo por flexión respecto al eje Y.

$$N_{cr,y} : \underline{178.39} \text{ kN}$$

$N_{cr,z}$: Axil crítico elástico de pandeo por flexión respecto al eje Z.

$$N_{cr,z} : \underline{178.39} \text{ kN}$$

$N_{cr,T}$: Axil crítico elástico de pandeo por torsión.

$$N_{cr,T} : \underline{\infty}$$

**Resistencia a flexión eje Y** (EAE 2011, Artículo 34.4)

Se debe satisfacer:

$$\eta = \frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} \leq 1$$

$$h : \underline{0.004} \quad \checkmark$$

Para flexión positiva:

El esfuerzo solicitante de cálculo pésimo se produce en un punto situado a una distancia de 0.938 m del nudo N22, para la combinación de acciones 1.35·PP+CM1.

M_{Ed}^+ : Momento flector solicitante de cálculo pésimo.

$$M_{Ed}^+ : \underline{0.01} \text{ kN}\cdot\text{m}$$

Para flexión negativa:

M_{Ed}^- : Momento flector solicitante de cálculo pésimo.

$$M_{Ed}^- : \underline{0.00} \text{ kN}\cdot\text{m}$$

El momento flector resistente de cálculo $M_{c,Rd}$ viene dado por:

$$M_{c,Rd} = W_{pl,y} \cdot f_{yd}$$

$$M_{c,Rd} : \underline{2.61} \text{ kN}\cdot\text{m}$$

Donde:

Clase: Clase de la sección, según la capacidad de deformación y de desarrollo de la resistencia plástica de los elementos planos de una sección a flexión simple.

$$\text{Clase} : \underline{1}$$

$W_{pl,y}$: Módulo resistente plástico correspondiente a la fibra con mayor tensión, para las secciones de clase 1 y 2.

$$W_{pl,y} : \underline{9.95} \text{ cm}^3$$

f_{yd} : Resistencia de cálculo del acero.

$$f_{yd} : \underline{261.90} \text{ MPa}$$

$$f_{yd} = f_y / \gamma_{M0}$$

Siendo:

f_y : Límite elástico. (EAE 2011, Artículo 27)

$$f_y : \underline{275.00} \text{ MPa}$$

γ_{M0} : Coeficiente parcial de seguridad del material.

$$\gamma_{M0} : \underline{1.05}$$

Resistencia a flexión eje Z (EAE 2011, Artículo 34.4)

La comprobación no procede, ya que no hay momento flector.

**Resistencia a corte Z (EAE 2011, Artículo 34.5)**

Se debe satisfacer:

$$\eta = \frac{V_{Ed}}{V_{c,Rd}} \leq 1$$

$$h : \underline{0.001} \quad \checkmark$$

El esfuerzo solicitante de cálculo pésimo se produce en el nudo N22, para la combinación de acciones 1.35·PP+CM1.

V_{Ed} : Esfuerzo cortante solicitante de cálculo pésimo.

$$V_{Ed} : \underline{0.05} \text{ kN}$$

El esfuerzo cortante resistente de cálculo $V_{c,Rd}$ viene dado por:

$$V_{c,Rd} = A_v \cdot \frac{f_{yd}}{\sqrt{3}}$$

$$V_{c,Rd} : \underline{39.92} \text{ kN}$$

Donde:

A_v : Área transversal a cortante.

$$A_v : \underline{2.64} \text{ cm}^2$$

$$A_v = 2 \cdot d \cdot t_w$$

Siendo:

d: Altura del alma.

$$d : \underline{44.00} \text{ mm}$$

t_w : Espesor del alma.

$$t_w : \underline{3.00} \text{ mm}$$

f_{yd} : Resistencia de cálculo del acero.

$$f_{yd} : \underline{261.90} \text{ MPa}$$

$$f_{yd} = f_y / \gamma_{M0}$$

Siendo:

f_y : Límite elástico. (EAE 2011, Artículo 27)

$$f_y : \underline{275.00} \text{ MPa}$$

γ_{M0} : Coeficiente parcial de seguridad del material.

$$\gamma_{M0} : \underline{1.05}$$

Abolladura por cortante del alma: (EAE 2011, Artículo 35.5)

Aunque no se han dispuesto rigidizadores transversales, no es necesario comprobar la resistencia a la abolladura del alma, puesto que se cumple:

$$\frac{d}{t_w} < \frac{72}{\eta} \cdot \varepsilon$$

$$14.67 < 55.46 \quad \checkmark$$

Donde:

l_w : Esbeltez del alma.

$$l_w : \underline{14.67}$$

$$\lambda_w = \frac{d}{t_w}$$

$l_{m\acute{a}x}$: Esbeltez máxima.

$$l_{m\acute{a}x} : \underline{55.46}$$

$$\lambda_{m\acute{a}x} = \frac{72}{\eta} \cdot \varepsilon$$

h: Coeficiente que permite considerar la resistencia adicional en régimen plástico debida al endurecimiento por deformación del material.

$$h : \underline{1.20}$$

e: Factor de reducción.

$$e : \underline{0.92}$$

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{f_{ref}}{f_y}}$$

Siendo:

f_{ref} : Límite elástico de referencia.

$$f_{ref} : \underline{235.00} \text{ MPa}$$

f_y : Límite elástico. (EAE 2011, Artículo 27)

$$f_y : \underline{275.00} \text{ MPa}$$

**Resistencia a corte Y (EAE 2011, Artículo 34.5)**

La comprobación no procede, ya que no hay esfuerzo cortante.

Resistencia a momento flector Y y fuerza cortante Z combinados (EAE 2011, Artículo 34.7.1)

No es necesario reducir la resistencia de cálculo a flexión, ya que el esfuerzo cortante solicitante de cálculo pésimo V_{Ed} no es superior al 50% de la resistencia de cálculo a cortante $V_{c,Rd}$.

$$V_{Ed} \leq \frac{V_{c,Rd}}{2}$$

$$0.05 \text{ kN} \leq 19.96 \text{ kN} \quad \checkmark$$

Los esfuerzos solicitantes de cálculo pésimos se producen en el nudo N22, para la combinación de acciones 1.35·PP+CM1.

V_{Ed} : Esfuerzo cortante solicitante de cálculo pésimo.

$$V_{Ed} : \underline{0.05} \text{ kN}$$

$V_{c,Rd}$: Esfuerzo cortante resistente de cálculo.

$$V_{c,Rd} : \underline{39.92} \text{ kN}$$

Resistencia a momento flector Z y fuerza cortante Y combinados (EAE 2011, Artículo 34.7.1)

No hay interacción entre momento flector y esfuerzo cortante para ninguna combinación. Por lo tanto, la comprobación no procede.

Resistencia a flexión y axil combinados (EAE 2011, Artículo 34.7.2)

Se debe satisfacer:

$$\eta = \frac{M_{y,Ed}}{M_{N,Rd,y}} \leq 1$$

$$h : \underline{0.004} \quad \checkmark$$

$$\eta = \frac{N_{c,Ed}}{\chi_y \cdot A \cdot f_{yd}} + k_{yy} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot W_{pl,y} \cdot f_{yd}} + k_{yz} \cdot \frac{M_{z,Ed}}{W_{pl,z} \cdot f_{yd}} \leq 1$$

$$h : \underline{0.417} \quad \checkmark$$

$$\eta = \frac{N_{c,Ed}}{\chi_z \cdot A \cdot f_{yd}} + k_{zy} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot W_{pl,y} \cdot f_{yd}} + k_{zz} \cdot \frac{M_{z,Ed}}{W_{pl,z} \cdot f_{yd}} \leq 1$$

$$h : \underline{0.416} \quad \checkmark$$

Los esfuerzos solicitantes de cálculo pésimos se producen en un punto situado a una distancia de 0.938 m del nudo N22, para la combinación de acciones 1.35·PP+1.35·CM1+1.5·SobrecargaUso.

Donde:

$N_{c,Ed}$: Axil de compresión solicitante de cálculo.

$$N_{c,Ed} : \underline{34.56} \text{ kN}$$

$M_{y,Ed}$, $M_{z,Ed}$: Momentos flectores solicitantes de cálculo pésimos, según los ejes Y y Z, respectivamente.

$$M_{y,Ed}^+ : \underline{0.01} \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$M_{z,Ed}^+ : \underline{0.00} \text{ kN}\cdot\text{m}$$

Clase: Clase de la sección, según la capacidad de deformación y de desarrollo de la resistencia plástica de sus elementos planos, para axil y flexión simple.

$$\text{Clase} : \underline{1}$$

$M_{N,Rd,y}$: Momento flector resistente plástico reducido de cálculo, alrededor del eje Y.

$$M_{N,Rd,y} : \underline{2.53} \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$M_{N,Rd,y} = M_{pl,Rd,y} \cdot (1 - n) / (1 - 0.5 \cdot a_w) \leq M_{pl,Rd,y}$$

Siendo:

$$n = N_{c,Ed} / N_{pl,Rd}$$

$$n : \underline{0.244}$$

$N_{pl,Rd}$: Resistencia a compresión de la sección bruta.

$$N_{pl,Rd} : \underline{141.50} \text{ kN}$$

$M_{pl,Rd,y}$: Resistencia a flexión de la sección bruta en régimen plástico, respecto al eje Y.

$$M_{pl,Rd,y} : \underline{2.61} \text{ kN}\cdot\text{m}$$



$$a_w = (A - 2 \cdot b \cdot t_f) / A \leq 0.5$$

A: Área de la sección bruta.

b: Ancho del ala.

t_f: Espesor del ala.

$$a_w : \underline{0.44}$$

$$A : \underline{5.40} \text{ cm}^2$$

$$b : \underline{5.00} \text{ cm}$$

$$t_f : \underline{3.00} \text{ mm}$$

Resistencia a pandeo: (EAE 2011, Artículo 35.3)

A: Área de la sección bruta.

W_{pl,y}, W_{pl,z}: Módulos resistentes plásticos correspondientes a la fibra con mayor tensión, alrededor de los ejes Y y Z, respectivamente.

f_{yd}: Resistencia de cálculo del acero.

$$f_{yd} = f_y / \gamma_{M1}$$

Siendo:

f_y: Límite elástico. (EAE 2011, Artículo 27)

g_{M1}: Coeficiente parcial de seguridad del material.

$$A : \underline{5.40} \text{ cm}^2$$

$$W_{pl,y} : \underline{9.95} \text{ cm}^3$$

$$W_{pl,z} : \underline{9.95} \text{ cm}^3$$

$$f_{yd} : \underline{261.90} \text{ MPa}$$

$$f_y : \underline{275.00} \text{ MPa}$$

$$g_{M1} : \underline{1.05}$$

K_{yy}, K_{yz}, K_{zy}, K_{zz}: Coeficientes de interacción.

$$k_{yy} = C_{m,y} \cdot C_{m,LT} \cdot \frac{\mu_y}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}} \cdot \frac{1}{C_{yy}}$$

$$K_{yy} : \underline{1.14}$$

$$k_{yz} = C_{m,z} \cdot \frac{\mu_y}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}} \cdot \frac{1}{C_{yz}} \cdot 0.6 \cdot \sqrt{\frac{W_z}{W_y}}$$

$$K_{yz} : \underline{0.75}$$

$$k_{zy} = C_{m,y} \cdot C_{m,LT} \cdot \frac{\mu_z}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}} \cdot \frac{1}{C_{zy}} \cdot 0.6 \cdot \sqrt{\frac{W_y}{W_z}}$$

$$K_{zy} : \underline{0.75}$$

$$k_{zz} = C_{m,z} \cdot \frac{\mu_z}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}} \cdot \frac{1}{C_{zz}}$$

$$K_{zz} : \underline{1.14}$$

Términos auxiliares:

$$\mu_y = \frac{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}}{1 - \chi_y \cdot \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}}$$

$$m_y : \underline{0.91}$$

$$\mu_z = \frac{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}}{1 - \chi_z \cdot \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}}$$

$$m_z : \underline{0.91}$$

$$C_{yy} = 1 + (w_y - 1) \cdot \left[\left(2 - \frac{1.6}{w_y} \cdot C_{m,y}^2 \cdot \bar{\lambda}_{max} - \frac{1.6}{w_y} \cdot C_{m,y}^2 \cdot \bar{\lambda}_{max}^2 \right) \cdot n_{pl} - b_{LT} \right] \geq \frac{W_{el,y}}{W_{pl,y}}$$

$$C_{yy} : \underline{0.99}$$

$$C_{yz} = 1 + (w_z - 1) \cdot \left[\left(2 - 14 \cdot \frac{C_{m,z}^2 \cdot \bar{\lambda}_{max}^2}{w_z^5} \right) \cdot n_{pl} - c_{LT} \right] \geq 0.6 \cdot \sqrt{\frac{W_z}{W_y}} \cdot \frac{W_{el,z}}{W_{pl,z}}$$

$$C_{yz} : \underline{0.91}$$

$$C_{zy} = 1 + (w_y - 1) \cdot \left[\left(2 - 14 \cdot \frac{C_{m,y}^2 \cdot \bar{\lambda}_{max}^2}{w_y^5} \right) \cdot n_{pl} - d_{LT} \right] \geq 0.6 \cdot \sqrt{\frac{W_y}{W_z}} \cdot \frac{W_{el,y}}{W_{pl,y}}$$

$$C_{zy} : \underline{0.91}$$

$$C_{zz} = 1 + (w_z - 1) \cdot \left[\left(2 - \frac{1.6}{w_z} \cdot C_{m,z}^2 \cdot \bar{\lambda}_{max} - \frac{1.6}{w_z} \cdot C_{m,z}^2 \cdot \bar{\lambda}_{max}^2 - e_{LT} \right) \cdot n_{pl} \right] \geq \frac{W_{el,z}}{W_{pl,z}}$$

$$C_{zz} : \underline{0.99}$$



$a_{LT} = 1 - \frac{I_t}{I_y} \geq 0$	$a_{LT} : \underline{0.00}$
$b_{LT} = 0.5 \cdot a_{LT} \cdot \bar{\lambda}_0^{-2} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot M_{pl,Rd,y}} \cdot \frac{M_{z,Ed}}{M_{pl,Rd,z}}$	$b_{LT} : \underline{0.00}$
$c_{LT} = 10 \cdot a_{LT} \cdot \frac{\bar{\lambda}_0^{-2}}{5 + \bar{\lambda}_z^{-4}} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{C_{m,y} \cdot \chi_{LT} \cdot M_{pl,Rd,y}}$	$c_{LT} : \underline{0.00}$
$d_{LT} = 2 \cdot a_{LT} \cdot \frac{\bar{\lambda}_0}{0.1 + \bar{\lambda}_z^{-4}} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{C_{m,y} \cdot \chi_{LT} \cdot M_{pl,Rd,y}} \cdot \frac{M_{z,Ed}}{C_{m,z} \cdot M_{pl,Rd,z}}$	$d_{LT} : \underline{0.00}$
$e_{LT} = 1.7 \cdot a_{LT} \cdot \frac{\bar{\lambda}_0}{0.1 + \bar{\lambda}_z^{-4}} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{C_{m,y} \cdot \chi_{LT} \cdot M_{pl,Rd,y}}$	$e_{LT} : \underline{0.00}$
$w_y = \frac{W_{pl,y}}{W_{el,y}} \leq 1.5$	$w_y : \underline{1.28}$
$w_z = \frac{W_{pl,z}}{W_{el,z}} \leq 1.5$	$w_z : \underline{1.28}$
$n_{pl} = \frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}}$	$n_{pl} : \underline{0.24}$

Puesto que:

$$\bar{\lambda}_0 \leq 0.2 \cdot \sqrt{C_1} \cdot \sqrt[4]{\left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}\right) \cdot \left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}\right)} \quad 0.00 \leq 0.18$$

$C_{m,y} = C_{m,y,0}$	$C_{m,y} : \underline{1.00}$
$C_{m,z} = C_{m,z,0}$	$C_{m,z} : \underline{1.00}$
$C_{m,LT} = 1.00$	$C_{m,LT} : \underline{1.00}$

$C_{m,y,0}$, $C_{m,z,0}$: Factores de momento flector uniforme equivalente.

C_1 : Factor que depende de las condiciones de apoyo y de la forma de la ley de momentos flectores sobre la barra.

c_y , c_z : Coeficientes de reducción por pandeo, alrededor de los ejes Y y Z, respectivamente.

c_{LT} : Coeficiente de reducción por pandeo lateral.

$\bar{\lambda}_{m\acute{a}x}$: Esbeltez máxima entre $\bar{\lambda}_y$ y $\bar{\lambda}_z$.

$\bar{\lambda}_y$, $\bar{\lambda}_z$: Esbelteces reducidas en relación a los ejes Y y Z, respectivamente.

$\bar{\lambda}_{LT}$: Esbeltez reducida.

$\bar{\lambda}_0$: Esbeltez reducida, en relación al pandeo lateral, para un momento flector uniforme.

$W_{el,y}$, $W_{el,z}$: Módulos resistentes elásticos correspondientes a la fibra comprimida, alrededor de los ejes Y y Z, respectivamente.

$N_{cr,y}$: Axil crítico elástico de pandeo por flexión respecto al eje Y.

$N_{cr,z}$: Axil crítico elástico de pandeo por flexión respecto al eje Z.

I_y : Momento de inercia de la sección bruta, respecto al eje Y.

I_t : Momento de inercia a torsión uniforme.

	$C_{m,y,0} : \underline{1.00}$
	$C_{m,z,0} : \underline{1.00}$
	$C_1 : \underline{1.00}$
	$c_y : \underline{0.59}$
	$c_z : \underline{0.59}$
	$c_{LT} : \underline{1.00}$
	$\bar{\lambda}_{m\acute{a}x} : \underline{0.91}$
	$\bar{\lambda}_y : \underline{0.91}$
	$\bar{\lambda}_z : \underline{0.91}$
	$\bar{\lambda}_{LT} : \underline{0.00}$
	$\bar{\lambda}_0 : \underline{0.00}$
	$W_{el,y} : \underline{7.75} \text{ cm}^3$
	$W_{el,z} : \underline{7.75} \text{ cm}^3$
	$N_{cr,y} : \underline{178.39} \text{ kN}$
	$N_{cr,z} : \underline{178.39} \text{ kN}$
	$I_y : \underline{19.37} \text{ cm}^4$
	$I_t : \underline{32.08} \text{ cm}^4$

**Resistencia a flexión, axil y cortante combinados (EAE 2011, Artículo 34.7.3)**

No es necesario reducir las resistencias de cálculo a flexión y a axil, ya que se puede ignorar el efecto de abolladura por esfuerzo cortante y, además, el esfuerzo cortante solicitante de cálculo pésimo V_{Ed} es menor o igual que el 50% del esfuerzo cortante resistente de cálculo $V_{c,Rd}$.

Los esfuerzos solicitantes de cálculo pésimos se producen en el nudo N22, para la combinación de acciones 1.35·PP+CM1.

$$V_{Ed,z} \leq \frac{V_{c,Rd,z}}{2}$$

$$0.05 \text{ kN} \leq 19.96 \text{ kN} \quad \checkmark$$

Donde:

$V_{Ed,z}$: Esfuerzo cortante solicitante de cálculo pésimo.

$$V_{Ed,z} : \underline{0.05} \text{ kN}$$

$V_{c,Rd,z}$: Esfuerzo cortante resistente de cálculo.

$$V_{c,Rd,z} : \underline{39.92} \text{ kN}$$

Resistencia a torsión (EAE 2011, Artículo 34.6)

La comprobación no procede, ya que no hay momento torsor.

Resistencia a cortante Z y momento torsor combinados (EAE 2011, Artículo 34.6)

No hay interacción entre momento torsor y esfuerzo cortante para ninguna combinación. Por lo tanto, la comprobación no procede.

Resistencia a cortante Y y momento torsor combinados (EAE 2011, Artículo 34.6)

No hay interacción entre momento torsor y esfuerzo cortante para ninguna combinación. Por lo tanto, la comprobación no procede.



Barra N23/N24

Perfil: SHS 50x3.0

Material: Acero (S275 (EAE))

	Nudos		Longitud (m)	Características mecánicas			
	Inicial	Final		Área (cm ²)	I _y ⁽¹⁾ (cm ⁴)	I _z ⁽¹⁾ (cm ⁴)	I _t ⁽²⁾ (cm ⁴)
	N23	N24	1.500	5.40	19.37	19.37	32.08
Notas: ⁽¹⁾ Inercia respecto al eje indicado ⁽²⁾ Momento de inercia a torsión uniforme							
	Pandeo			Pandeo lateral			
		Plano XY	Plano XZ	Ala sup.	Ala inf.		
	β	1.00	1.00	0.00	0.00		
	L _K	1.500	1.500	0.000	0.000		
	C _m	1.000	1.000	1.000	1.000		
	C ₁	-		1.000			
Notación: b: Coeficiente de pandeo L _K : Longitud de pandeo (m) C _m : Coeficiente de momentos C ₁ : Factor de modificación para el momento crítico							

**Limitación de esbeltez** (Criterio de CYPE Ingenieros, basado en: Figura 35.1.2 de la norma EAE 2011.)

La esbeltez reducida $\bar{\lambda}$ de las barras comprimidas debe ser inferior al valor 3.0.

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr}}}$$

$$\bar{\lambda} : \underline{0.91} \quad \checkmark$$

Donde:

Clase: Clase de la sección, según la capacidad de deformación y de desarrollo de la resistencia plástica de los elementos planos comprimidos de una sección.

$$\text{Clase} : \underline{1}$$

A: Área de la sección bruta para las secciones de clase 1, 2 y 3.

$$A : \underline{5.40} \text{ cm}^2$$

f_y : Límite elástico. (EAE 2011, Artículo 27)

$$f_y : \underline{275.00} \text{ MPa}$$

N_{cr} : Axil crítico de pandeo elástico.

$$N_{cr} : \underline{178.39} \text{ kN}$$

El axil crítico de pandeo elástico N_{cr} es el menor de los valores obtenidos en a), b) y c):

a) Axil crítico elástico de pandeo por flexión respecto al eje Y.

$$N_{cr,y} : \underline{178.39} \text{ kN}$$

$$N_{cr,y} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{L_{ky}^2}$$

b) Axil crítico elástico de pandeo por flexión respecto al eje Z.

$$N_{cr,z} : \underline{178.39} \text{ kN}$$

$$N_{cr,z} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{L_{kz}^2}$$

c) Axil crítico elástico de pandeo por torsión.

$$N_{cr,T} : \underline{\infty}$$

$$N_{cr,T} = \frac{1}{i_0^2} \cdot \left[G \cdot I_t + \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_w}{L_{kt}^2} \right]$$

Donde:

I_y : Momento de inercia de la sección bruta, respecto al eje Y.

$$I_y : \underline{19.37} \text{ cm}^4$$

I_z : Momento de inercia de la sección bruta, respecto al eje Z.

$$I_z : \underline{19.37} \text{ cm}^4$$

I_t : Momento de inercia a torsión uniforme.

$$I_t : \underline{32.08} \text{ cm}^4$$

I_w : Constante de alabeo de la sección.

$$I_w : \underline{0.00} \text{ cm}^6$$

E: Módulo de elasticidad.

$$E : \underline{210000} \text{ MPa}$$

G: Módulo de elasticidad transversal.

$$G : \underline{81000} \text{ MPa}$$

L_{ky} : Longitud efectiva de pandeo por flexión, respecto al eje Y.

$$L_{ky} : \underline{1.500} \text{ m}$$

L_{kz} : Longitud efectiva de pandeo por flexión, respecto al eje Z.

$$L_{kz} : \underline{1.500} \text{ m}$$

L_{kt} : Longitud efectiva de pandeo por torsión.

$$L_{kt} : \underline{0.000} \text{ m}$$

i_0 : Radio de giro polar de la sección bruta, respecto al centro de torsión.

$$i_0 : \underline{2.68} \text{ cm}$$

$$i_0 = \left(i_y^2 + i_z^2 + y_0^2 + z_0^2 \right)^{0.5}$$

Siendo:

i_y , i_z : Radios de giro de la sección bruta, respecto a los ejes principales de inercia Y y Z.

$$i_y : \underline{1.89} \text{ cm}$$

$$i_z : \underline{1.89} \text{ cm}$$

y_0 , z_0 : Coordenadas del centro de torsión en la dirección de los ejes principales Y y Z, respectivamente, relativas al centro de gravedad de la sección.

$$y_0 : \underline{0.00} \text{ mm}$$

$$z_0 : \underline{0.00} \text{ mm}$$

**Abolladura del alma inducida por el ala comprimida (EAE 2011, Artículo 35.8)**

Se debe satisfacer:

$$\frac{h_w}{t_w} \leq k \frac{E}{f_{yf}} \sqrt{\frac{A_w}{A_{fc,ef}}}$$

$$14.67 \leq 303.92 \quad \checkmark$$

Donde:

 h_w : Altura del alma.

h_w : 44.00 mm

 t_w : Espesor del alma.

t_w : 3.00 mm

 A_w : Área del alma.

A_w : 2.64 cm²

 $A_{fc,ef}$: Área reducida del ala comprimida.

$A_{fc,ef}$: 1.50 cm²

k: Coeficiente que depende de la clase de la sección.

k : 0.30

E: Módulo de elasticidad.

E : 210000 MPa

 f_{yf} : Límite elástico del acero del ala comprimida.

f_{yf} : 275.00 MPa

Siendo:

$$f_{yf} = f_y$$

Resistencia a tracción (EAE 2011, Artículo 34.2)

La comprobación no procede, ya que no hay axil de tracción.

Resistencia a compresión (EAE 2011, Artículo 34.3)

Se debe satisfacer:

$$\eta = \frac{N_{c,Ed}}{N_{c,Rd}} \leq 1$$

$$\eta : \underline{0.244} \quad \checkmark$$

$$\eta = \frac{N_{c,Ed}}{N_{b,Rd}} \leq 1$$

$$\eta : \underline{0.413} \quad \checkmark$$

El esfuerzo solicitante de cálculo pésimo se produce para la combinación de acciones 1.35·PP+1.35·CM1+1.5·SobrecargaUso.

 $N_{c,Ed}$: Axil de compresión solicitante de cálculo pésimo.

$N_{c,Ed}$: 34.56 kN

La resistencia de cálculo a compresión $N_{c,Rd}$ viene dada por:

$$N_{c,Rd} = A \cdot f_{yd}$$

$N_{c,Rd}$: 141.50 kN

Donde:

Clase: Clase de la sección, según la capacidad de deformación y de desarrollo de la resistencia plástica de los elementos planos comprimidos de una sección.

Clase : 1

A: Área de la sección bruta para las secciones de clase 1, 2 y 3.

A : 5.40 cm²

 f_{yd} : Resistencia de cálculo del acero.

f_{yd} : 261.90 MPa

$$f_{yd} = f_y / \gamma_{M0}$$

Siendo:

 f_y : Límite elástico. (EAE 2011, Artículo 27)

f_y : 275.00 MPa

 γ_{M0} : Coeficiente parcial de seguridad del material.

γ_{M0} : 1.05

Resistencia a pandeo: (EAE 2011, Artículo 35.1)



La resistencia de cálculo a pandeo $N_{b,Rd}$ en una barra comprimida viene dada por:

$$N_{b,Rd} = \chi \cdot A \cdot f_{yd}$$

$$N_{b,Rd} : \underline{83.78} \text{ kN}$$

Donde:

A: Área de la sección bruta para las secciones de clase 1, 2 y 3.

$$A : \underline{5.40} \text{ cm}^2$$

f_{yd} : Resistencia de cálculo del acero.

$$f_{yd} : \underline{261.90} \text{ MPa}$$

$$f_{yd} = f_y / \gamma_{M1}$$

Siendo:

f_y : Límite elástico. (EAE 2011, Artículo 27)

$$f_y : \underline{275.00} \text{ MPa}$$

γ_{M1} : Coeficiente parcial de seguridad del material.

$$\gamma_{M1} : \underline{1.05}$$

c: Coeficiente de reducción por pandeo.

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

$$C_y : \underline{0.59}$$

$$C_z : \underline{0.59}$$

Siendo:

$$\Phi = 0.5 \cdot \left[1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda} - 0.2) + (\bar{\lambda})^2 \right]$$

$$f_y : \underline{1.09}$$

$$f_z : \underline{1.09}$$

a: Coeficiente de imperfección elástica.

$$a_y : \underline{0.49}$$

$$a_z : \underline{0.49}$$

$\bar{\lambda}$: Esbeltez reducida.

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr}}}$$

$$\bar{\lambda}_y : \underline{0.91}$$

$$\bar{\lambda}_z : \underline{0.91}$$

N_{cr} : Axil crítico elástico de pandeo, obtenido como el menor de los siguientes valores:

$$N_{cr} : \underline{178.39} \text{ kN}$$

$N_{cr,y}$: Axil crítico elástico de pandeo por flexión respecto al eje Y.

$$N_{cr,y} : \underline{178.39} \text{ kN}$$

$N_{cr,z}$: Axil crítico elástico de pandeo por flexión respecto al eje Z.

$$N_{cr,z} : \underline{178.39} \text{ kN}$$

$N_{cr,T}$: Axil crítico elástico de pandeo por torsión.

$$N_{cr,T} : \underline{\infty}$$

**Resistencia a flexión eje Y (EAE 2011, Artículo 34.4)**

Se debe satisfacer:

$$\eta = \frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} \leq 1$$

$$h : \underline{0.004} \quad \checkmark$$

Para flexión positiva:

El esfuerzo solicitante de cálculo pésimo se produce en un punto situado a una distancia de 0.563 m del nudo N23, para la combinación de acciones 1.35·PP+CM1.

M_{Ed}^+ : Momento flector solicitante de cálculo pésimo.

$$M_{Ed}^+ : \underline{0.01} \text{ kN}\cdot\text{m}$$

Para flexión negativa:

M_{Ed}^- : Momento flector solicitante de cálculo pésimo.

$$M_{Ed}^- : \underline{0.00} \text{ kN}\cdot\text{m}$$

El momento flector resistente de cálculo $M_{c,Rd}$ viene dado por:

$$M_{c,Rd} = W_{pl,y} \cdot f_{yd}$$

$$M_{c,Rd} : \underline{2.61} \text{ kN}\cdot\text{m}$$

Donde:

Clase: Clase de la sección, según la capacidad de deformación y de desarrollo de la resistencia plástica de los elementos planos de una sección a flexión simple.

$$\text{Clase} : \underline{1}$$

$W_{pl,y}$: Módulo resistente plástico correspondiente a la fibra con mayor tensión, para las secciones de clase 1 y 2.

$$W_{pl,y} : \underline{9.95} \text{ cm}^3$$

f_{yd} : Resistencia de cálculo del acero.

$$f_{yd} : \underline{261.90} \text{ MPa}$$

$$f_{yd} = f_y / \gamma_{M0}$$

Siendo:

f_y : Límite elástico. (EAE 2011, Artículo 27)

$$f_y : \underline{275.00} \text{ MPa}$$

γ_{M0} : Coeficiente parcial de seguridad del material.

$$\gamma_{M0} : \underline{1.05}$$

Resistencia a flexión eje Z (EAE 2011, Artículo 34.4)

La comprobación no procede, ya que no hay momento flector.

**Resistencia a corte Z (EAE 2011, Artículo 34.5)**

Se debe satisfacer:

$$\eta = \frac{V_{Ed}}{V_{c,Rd}} \leq 1$$

$$h : \underline{0.001} \quad \checkmark$$

El esfuerzo solicitante de cálculo pésimo se produce en el nudo N24, para la combinación de acciones 1.35·PP+CM1.

 V_{Ed} : Esfuerzo cortante solicitante de cálculo pésimo.

$$V_{Ed} : \underline{0.05} \text{ kN}$$

El esfuerzo cortante resistente de cálculo $V_{c,Rd}$ viene dado por:

$$V_{c,Rd} = A_v \cdot \frac{f_{yd}}{\sqrt{3}}$$

$$V_{c,Rd} : \underline{39.92} \text{ kN}$$

Donde:

 A_v : Área transversal a cortante.

$$A_v : \underline{2.64} \text{ cm}^2$$

$$A_v = 2 \cdot d \cdot t_w$$

Siendo:

d: Altura del alma.

$$d : \underline{44.00} \text{ mm}$$

 t_w : Espesor del alma.

$$t_w : \underline{3.00} \text{ mm}$$

 f_{yd} : Resistencia de cálculo del acero.

$$f_{yd} : \underline{261.90} \text{ MPa}$$

$$f_{yd} = f_y / \gamma_{M0}$$

Siendo:

 f_y : Límite elástico. (EAE 2011, Artículo 27)

$$f_y : \underline{275.00} \text{ MPa}$$

 γ_{M0} : Coeficiente parcial de seguridad del material.

$$\gamma_{M0} : \underline{1.05}$$

Abolladura por cortante del alma: (EAE 2011, Artículo 35.5)

Aunque no se han dispuesto rigidizadores transversales, no es necesario comprobar la resistencia a la abolladura del alma, puesto que se cumple:

$$\frac{d}{t_w} < \frac{72}{\eta} \cdot \varepsilon$$

$$14.67 < 55.46 \quad \checkmark$$

Donde:

 l_w : Esbeltez del alma.

$$l_w : \underline{14.67}$$

$$\lambda_w = \frac{d}{t_w}$$

 $l_{m\acute{a}x}$: Esbeltez máxima.

$$l_{m\acute{a}x} : \underline{55.46}$$

$$\lambda_{m\acute{a}x} = \frac{72}{\eta} \cdot \varepsilon$$

h: Coeficiente que permite considerar la resistencia adicional en régimen plástico debida al endurecimiento por deformación del material.

$$h : \underline{1.20}$$

e: Factor de reducción.

$$e : \underline{0.92}$$

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{f_{ref}}{f_y}}$$

Siendo:

 f_{ref} : Límite elástico de referencia.

$$f_{ref} : \underline{235.00} \text{ MPa}$$

 f_y : Límite elástico. (EAE 2011, Artículo 27)

$$f_y : \underline{275.00} \text{ MPa}$$

**Resistencia a corte Y (EAE 2011, Artículo 34.5)**

La comprobación no procede, ya que no hay esfuerzo cortante.

Resistencia a momento flector Y y fuerza cortante Z combinados (EAE 2011, Artículo 34.7.1)

No es necesario reducir la resistencia de cálculo a flexión, ya que el esfuerzo cortante solicitante de cálculo pésimo V_{Ed} no es superior al 50% de la resistencia de cálculo a cortante $V_{c,Rd}$.

$$V_{Ed} \leq \frac{V_{c,Rd}}{2}$$

$$0.02 \text{ kN} \leq 19.96 \text{ kN} \quad \checkmark$$

Los esfuerzos solicitantes de cálculo pésimos se producen en un punto situado a una distancia de 0.188 m del nudo N23, para la combinación de acciones 1.35·PP+CM1.

V_{Ed} : Esfuerzo cortante solicitante de cálculo pésimo.

$$V_{Ed} : \underline{0.02} \text{ kN}$$

$V_{c,Rd}$: Esfuerzo cortante resistente de cálculo.

$$V_{c,Rd} : \underline{39.92} \text{ kN}$$

Resistencia a momento flector Z y fuerza cortante Y combinados (EAE 2011, Artículo 34.7.1)

No hay interacción entre momento flector y esfuerzo cortante para ninguna combinación. Por lo tanto, la comprobación no procede.

Resistencia a flexión y axil combinados (EAE 2011, Artículo 34.7.2)

Se debe satisfacer:

$$\eta = \frac{M_{y,Ed}}{M_{N,Rd,y}} \leq 1$$

$$h : \underline{0.004} \quad \checkmark$$

$$\eta = \frac{N_{c,Ed}}{\chi_y \cdot A \cdot f_{yd}} + k_{yy} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot W_{pl,y} \cdot f_{yd}} + k_{yz} \cdot \frac{M_{z,Ed}}{W_{pl,z} \cdot f_{yd}} \leq 1$$

$$h : \underline{0.417} \quad \checkmark$$

$$\eta = \frac{N_{c,Ed}}{\chi_z \cdot A \cdot f_{yd}} + k_{zy} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot W_{pl,y} \cdot f_{yd}} + k_{zz} \cdot \frac{M_{z,Ed}}{W_{pl,z} \cdot f_{yd}} \leq 1$$

$$h : \underline{0.416} \quad \checkmark$$

Los esfuerzos solicitantes de cálculo pésimos se producen en un punto situado a una distancia de 0.563 m del nudo N23, para la combinación de acciones 1.35·PP+1.35·CM1+1.5·SobrecargaUso.

Donde:

$N_{c,Ed}$: Axil de compresión solicitante de cálculo.

$$N_{c,Ed} : \underline{34.56} \text{ kN}$$

$M_{y,Ed}$, $M_{z,Ed}$: Momentos flectores solicitantes de cálculo pésimos, según los ejes Y y Z, respectivamente.

$$M_{y,Ed}^+ : \underline{0.01} \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$M_{z,Ed}^+ : \underline{0.00} \text{ kN}\cdot\text{m}$$

Clase: Clase de la sección, según la capacidad de deformación y de desarrollo de la resistencia plástica de sus elementos planos, para axil y flexión simple.

$$\text{Clase} : \underline{1}$$

$M_{N,Rd,y}$: Momento flector resistente plástico reducido de cálculo, alrededor del eje Y.

$$M_{N,Rd,y} : \underline{2.53} \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$M_{N,Rd,y} = M_{pl,Rd,y} \cdot (1 - n) / (1 - 0.5 \cdot a_w) \leq M_{pl,Rd,y}$$

Siendo:

$$n = N_{c,Ed} / N_{pl,Rd}$$

$$n : \underline{0.244}$$

$N_{pl,Rd}$: Resistencia a compresión de la sección bruta.

$$N_{pl,Rd} : \underline{141.50} \text{ kN}$$



Listados

estructura_12m

Fecha: 07/06/21

$M_{pl,Rd,y}$: Resistencia a flexión de la sección bruta en régimen plástico, respecto al eje Y.

$$M_{pl,Rd,y} : \underline{2.61} \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$a_w = (A - 2 \cdot b \cdot t_f) / A \leq 0.5$$

$$a_w : \underline{0.44}$$

A: Área de la sección bruta.

$$A : \underline{5.40} \text{ cm}^2$$

b: Ancho del ala.

$$b : \underline{5.00} \text{ cm}$$

t_f : Espesor del ala.

$$t_f : \underline{3.00} \text{ mm}$$

Resistencia a pandeo: (EAE 2011, Artículo 35.3)

A: Área de la sección bruta.

$$A : \underline{5.40} \text{ cm}^2$$

$W_{pl,y}$, $W_{pl,z}$: Módulos resistentes plásticos correspondientes a la fibra con mayor tensión, alrededor de los ejes Y y Z, respectivamente.

$$W_{pl,y} : \underline{9.95} \text{ cm}^3$$

$$W_{pl,z} : \underline{9.95} \text{ cm}^3$$

f_{yd} : Resistencia de cálculo del acero.

$$f_{yd} : \underline{261.90} \text{ MPa}$$

$$f_{yd} = f_y / \gamma_{M1}$$

Siendo:

f_y : Límite elástico. (EAE 2011, Artículo 27)

$$f_y : \underline{275.00} \text{ MPa}$$

γ_{M1} : Coeficiente parcial de seguridad del material.

$$\gamma_{M1} : \underline{1.05}$$

K_{yy} , K_{yz} , K_{zy} , K_{zz} : Coeficientes de interacción.

$$k_{yy} = C_{m,y} \cdot C_{m,LT} \cdot \frac{\mu_y}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}} \cdot \frac{1}{C_{yy}}$$

$$K_{yy} : \underline{1.14}$$

$$k_{yz} = C_{m,z} \cdot \frac{\mu_y}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}} \cdot \frac{1}{C_{yz}} \cdot 0.6 \cdot \sqrt{\frac{W_z}{W_y}}$$

$$K_{yz} : \underline{0.75}$$

$$k_{zy} = C_{m,y} \cdot C_{m,LT} \cdot \frac{\mu_z}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}} \cdot \frac{1}{C_{zy}} \cdot 0.6 \cdot \sqrt{\frac{W_y}{W_z}}$$

$$K_{zy} : \underline{0.75}$$

$$k_{zz} = C_{m,z} \cdot \frac{\mu_z}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}} \cdot \frac{1}{C_{zz}}$$

$$K_{zz} : \underline{1.14}$$

Términos auxiliares:

$$\mu_y = \frac{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}}{1 - \chi_y \cdot \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}}$$

$$m_y : \underline{0.91}$$

$$\mu_z = \frac{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}}{1 - \chi_z \cdot \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}}$$

$$m_z : \underline{0.91}$$

$$C_{yy} = 1 + (w_y - 1) \cdot \left[\left(2 - \frac{1.6}{w_y} \cdot C_{my}^2 \cdot \bar{\lambda}_{max} - \frac{1.6}{w_y} \cdot C_{my}^2 \cdot \bar{\lambda}_{max}^2 \right) \cdot \eta_{pl} - b_{LT} \right] \geq \frac{W_{el,y}}{W_{pl,y}}$$

$$C_{yy} : \underline{0.99}$$

$$C_{yz} = 1 + (w_z - 1) \cdot \left[\left(2 - 14 \cdot \frac{C_{mz}^2 \cdot \bar{\lambda}_{max}^2}{w_z^5} \right) \cdot \eta_{pl} - c_{LT} \right] \geq 0.6 \cdot \sqrt{\frac{W_z}{W_y}} \cdot \frac{W_{el,z}}{W_{pl,z}}$$

$$C_{yz} : \underline{0.91}$$

$$C_{zy} = 1 + (w_y - 1) \cdot \left[\left(2 - 14 \cdot \frac{C_{my}^2 \cdot \bar{\lambda}_{max}^2}{w_y^5} \right) \cdot \eta_{pl} - d_{LT} \right] \geq 0.6 \cdot \sqrt{\frac{W_y}{W_z}} \cdot \frac{W_{el,y}}{W_{pl,y}}$$

$$C_{zy} : \underline{0.91}$$



Listados

estructura_12m

Fecha: 07/06/21

$$C_{zz} = 1 + (w_z - 1) \cdot \left[\left(2 - \frac{1.6}{w_z} \cdot C_{mz}^2 \cdot \bar{\lambda}_{\max} - \frac{1.6}{w_z} \cdot C_{mz}^2 \cdot \bar{\lambda}_{\max}^2 - e_{LT} \right) \cdot n_{pl} \right] \geq \frac{W_{el,z}}{W_{pl,z}}$$

C_{zz} : 0.99

$$a_{LT} = 1 - \frac{I_t}{I_y} \geq 0$$

a_{LT} : 0.00

$$b_{LT} = 0.5 \cdot a_{LT} \cdot \bar{\lambda}_0^{-2} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot M_{pl,Rd,y}} \cdot \frac{M_{z,Ed}}{M_{pl,Rd,z}}$$

b_{LT} : 0.00

$$c_{LT} = 10 \cdot a_{LT} \cdot \frac{\bar{\lambda}_0^{-2}}{5 + \bar{\lambda}_z^{-4}} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{C_{m,y} \cdot \chi_{LT} \cdot M_{pl,Rd,y}}$$

c_{LT} : 0.00

$$d_{LT} = 2 \cdot a_{LT} \cdot \frac{\bar{\lambda}_0}{0.1 + \bar{\lambda}_z^{-4}} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{C_{m,y} \cdot \chi_{LT} \cdot M_{pl,Rd,y}} \cdot \frac{M_{z,Ed}}{C_{m,z} \cdot M_{pl,Rd,z}}$$

d_{LT} : 0.00

$$e_{LT} = 1.7 \cdot a_{LT} \cdot \frac{\bar{\lambda}_0}{0.1 + \bar{\lambda}_z^{-4}} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{C_{m,y} \cdot \chi_{LT} \cdot M_{pl,Rd,y}}$$

e_{LT} : 0.00

$$w_y = \frac{W_{pl,y}}{W_{el,y}} \leq 1.5$$

w_y : 1.28

$$w_z = \frac{W_{pl,z}}{W_{el,z}} \leq 1.5$$

w_z : 1.28

$$n_{pl} = \frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}}$$

n_{pl} : 0.24

Puesto que:

$$\bar{\lambda}_0 \leq 0.2 \cdot \sqrt{C_1} \cdot \sqrt[4]{\left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}} \right) \cdot \left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}} \right)}$$

0.00 ≤ 0.18

$$C_{m,y} = C_{m,y,0}$$

C_{m,y} : 1.00

$$C_{m,z} = C_{m,z,0}$$

C_{m,z} : 1.00

$$C_{m,LT} = 1.00$$

C_{m,LT} : 1.00

C_{m,y,0}, C_{m,z,0}: Factores de momento flector uniforme equivalente.

$$C_{m,y,0} = 1.00$$

$$C_{m,z,0} = 1.00$$

$$C_1 = 1.00$$

C₁: Factor que depende de las condiciones de apoyo y de la forma de la ley de momentos flectores sobre la barra.

c_y, c_z: Coeficientes de reducción por pandeo, alrededor de los ejes Y y Z, respectivamente.

c_y : 0.59

c_z : 0.59

c_{LT}: Coeficiente de reducción por pandeo lateral.

c_{LT} : 1.00

̂I_{máx}: Esbeltez máxima entre ̂λ_y y ̂λ_z.

̂I_{máx} : 0.91

̂I_y, ̂I_z: Esbelteces reducidas en relación a los ejes Y y Z, respectivamente.

̂I_y : 0.91

̂I_z : 0.91

̂I_{LT}: Esbeltez reducida.

̂I_{LT} : 0.00

̂I_o: Esbeltez reducida, en relación al pandeo lateral, para un momento flector uniforme.

̂I_o : 0.00

W_{el,y}, W_{el,z}: Módulos resistentes elásticos correspondientes a la fibra comprimida, alrededor de los ejes Y y Z, respectivamente.

W_{el,y} : 7.75 cm³

W_{el,z} : 7.75 cm³

N_{cr,y}: Axil crítico elástico de pandeo por flexión respecto al eje Y.

N_{cr,y} : 178.39 kN

N_{cr,z}: Axil crítico elástico de pandeo por flexión respecto al eje Z.

N_{cr,z} : 178.39 kN

I_y: Momento de inercia de la sección bruta, respecto al eje Y.

I_y : 19.37 cm⁴

I_t: Momento de inercia a torsión uniforme.

I_t : 32.08 cm⁴

**Resistencia a flexión, axil y cortante combinados (EAE 2011, Artículo 34.7.3)**

No es necesario reducir las resistencias de cálculo a flexión y a axil, ya que se puede ignorar el efecto de abolladura por esfuerzo cortante y, además, el esfuerzo cortante solicitante de cálculo pésimo V_{Ed} es menor o igual que el 50% del esfuerzo cortante resistente de cálculo $V_{c,Rd}$.

Los esfuerzos solicitantes de cálculo pésimos se producen en un punto situado a una distancia de 0.188 m del nudo N23, para la combinación de acciones 1.35·PP+CM1.

$$V_{Ed,z} \leq \frac{V_{c,Rd,z}}{2}$$

$$0.02 \text{ kN} \leq 19.96 \text{ kN} \quad \checkmark$$

Donde:

$V_{Ed,z}$: Esfuerzo cortante solicitante de cálculo pésimo.

$$V_{Ed,z} : \frac{0.02}{\text{ kN}}$$

$V_{c,Rd,z}$: Esfuerzo cortante resistente de cálculo.

$$V_{c,Rd,z} : \frac{39.92}{\text{ kN}}$$

Resistencia a torsión (EAE 2011, Artículo 34.6)

La comprobación no procede, ya que no hay momento torsor.

Resistencia a cortante Z y momento torsor combinados (EAE 2011, Artículo 34.6)

No hay interacción entre momento torsor y esfuerzo cortante para ninguna combinación. Por lo tanto, la comprobación no procede.

Resistencia a cortante Y y momento torsor combinados (EAE 2011, Artículo 34.6)

No hay interacción entre momento torsor y esfuerzo cortante para ninguna combinación. Por lo tanto, la comprobación no procede.



Barra N40/N41

Perfil: SHS 50x3.0 Material: Acero (S275 (EAE))							
	Nudos		Longitud (m)	Características mecánicas			
	Inicial	Final		Área (cm ²)	I _y ⁽¹⁾ (cm ⁴)	I _z ⁽¹⁾ (cm ⁴)	I _t ⁽²⁾ (cm ⁴)
	N40	N41	1.500	5.40	19.37	19.37	32.08
	Notas: ⁽¹⁾ Inercia respecto al eje indicado ⁽²⁾ Momento de inercia a torsión uniforme						
		Pandeo		Pandeo lateral			
		Plano XY	Plano XZ	Ala sup.	Ala inf.		
	β	1.00	1.00	0.00	0.00		
	L _K	1.500	1.500	0.000	0.000		
	C _m	1.000	1.000	1.000	1.000		
	C ₁	-		1.000			
Notación: b: Coeficiente de pandeo L _K : Longitud de pandeo (m) C _m : Coeficiente de momentos C ₁ : Factor de modificación para el momento crítico							

**Limitación de esbeltez** (Criterio de CYPE Ingenieros, basado en: Figura 35.1.2 de la norma EAE 2011.)

La esbeltez reducida $\bar{\lambda}$ de las barras comprimidas debe ser inferior al valor 3.0.

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr}}}$$

$$\bar{\lambda} : \underline{0.91} \quad \checkmark$$

Donde:

Clase: Clase de la sección, según la capacidad de deformación y de desarrollo de la resistencia plástica de los elementos planos comprimidos de una sección.

$$\text{Clase} : \underline{1}$$

A: Área de la sección bruta para las secciones de clase 1, 2 y 3.

$$A : \underline{5.40} \text{ cm}^2$$

f_y : Límite elástico. (EAE 2011, Artículo 27)

$$f_y : \underline{275.00} \text{ MPa}$$

N_{cr} : Axil crítico de pandeo elástico.

$$N_{cr} : \underline{178.39} \text{ kN}$$

El axil crítico de pandeo elástico N_{cr} es el menor de los valores obtenidos en a), b) y c):

a) Axil crítico elástico de pandeo por flexión respecto al eje Y.

$$N_{cr,y} : \underline{178.39} \text{ kN}$$

$$N_{cr,y} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{L_{ky}^2}$$

b) Axil crítico elástico de pandeo por flexión respecto al eje Z.

$$N_{cr,z} : \underline{178.39} \text{ kN}$$

$$N_{cr,z} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{L_{kz}^2}$$

c) Axil crítico elástico de pandeo por torsión.

$$N_{cr,T} : \underline{\infty}$$

$$N_{cr,T} = \frac{1}{i_0^2} \cdot \left[G \cdot I_t + \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_w}{L_{kt}^2} \right]$$

Donde:

I_y : Momento de inercia de la sección bruta, respecto al eje Y.

$$I_y : \underline{19.37} \text{ cm}^4$$

I_z : Momento de inercia de la sección bruta, respecto al eje Z.

$$I_z : \underline{19.37} \text{ cm}^4$$

I_t : Momento de inercia a torsión uniforme.

$$I_t : \underline{32.08} \text{ cm}^4$$

I_w : Constante de alabeo de la sección.

$$I_w : \underline{0.00} \text{ cm}^6$$

E: Módulo de elasticidad.

$$E : \underline{210000} \text{ MPa}$$

G: Módulo de elasticidad transversal.

$$G : \underline{81000} \text{ MPa}$$

L_{ky} : Longitud efectiva de pandeo por flexión, respecto al eje Y.

$$L_{ky} : \underline{1.500} \text{ m}$$

L_{kz} : Longitud efectiva de pandeo por flexión, respecto al eje Z.

$$L_{kz} : \underline{1.500} \text{ m}$$

L_{kt} : Longitud efectiva de pandeo por torsión.

$$L_{kt} : \underline{0.000} \text{ m}$$

i_0 : Radio de giro polar de la sección bruta, respecto al centro de torsión.

$$i_0 : \underline{2.68} \text{ cm}$$

$$i_0 = (i_y^2 + i_z^2 + y_0^2 + z_0^2)^{0.5}$$

Siendo:

i_y , i_z : Radios de giro de la sección bruta, respecto a los ejes principales de inercia Y y Z.

$$i_y : \underline{1.89} \text{ cm}$$

$$i_z : \underline{1.89} \text{ cm}$$

y_0 , z_0 : Coordenadas del centro de torsión en la dirección de los ejes principales Y y Z, respectivamente, relativas al centro de gravedad de la sección.

$$y_0 : \underline{0.00} \text{ mm}$$

$$z_0 : \underline{0.00} \text{ mm}$$

**Abolladura del alma inducida por el ala comprimida (EAE 2011, Artículo 35.8)**

Se debe satisfacer:

$$\frac{h_w}{t_w} \leq k \frac{E}{f_{yf}} \sqrt{\frac{A_w}{A_{fc,ef}}}$$

$$14.67 \leq 303.92 \quad \checkmark$$

Donde:

 h_w : Altura del alma.

h_w : 44.00 mm

 t_w : Espesor del alma.

t_w : 3.00 mm

 A_w : Área del alma.

A_w : 2.64 cm²

 $A_{fc,ef}$: Área reducida del ala comprimida.

$A_{fc,ef}$: 1.50 cm²

k: Coeficiente que depende de la clase de la sección.

k : 0.30

E: Módulo de elasticidad.

E : 210000 MPa

 f_{yf} : Límite elástico del acero del ala comprimida.

f_{yf} : 275.00 MPa

Siendo:

$$f_{yf} = f_y$$

Resistencia a tracción (EAE 2011, Artículo 34.2)

La comprobación no procede, ya que no hay axil de tracción.

Resistencia a compresión (EAE 2011, Artículo 34.3)

Se debe satisfacer:

$$\eta = \frac{N_{c,Ed}}{N_{c,Rd}} \leq 1$$

$$\eta : \underline{0.242} \quad \checkmark$$

$$\eta = \frac{N_{c,Ed}}{N_{b,Rd}} \leq 1$$

$$\eta : \underline{0.408} \quad \checkmark$$

El esfuerzo solicitante de cálculo pésimo se produce para la combinación de acciones 1.35·PP+1.35·CM1+1.5·SobrecargaUso.

 $N_{c,Ed}$: Axil de compresión solicitante de cálculo pésimo.

$N_{c,Ed}$: 34.23 kN

La resistencia de cálculo a compresión $N_{c,Rd}$ viene dada por:

$$N_{c,Rd} = A \cdot f_{yd}$$

$N_{c,Rd}$: 141.50 kN

Donde:

Clase: Clase de la sección, según la capacidad de deformación y de desarrollo de la resistencia plástica de los elementos planos comprimidos de una sección.

Clase : 1

A: Área de la sección bruta para las secciones de clase 1, 2 y 3.

A : 5.40 cm²

 f_{yd} : Resistencia de cálculo del acero.

f_{yd} : 261.90 MPa

$$f_{yd} = f_y / \gamma_{M0}$$

Siendo:

 f_y : Límite elástico. (EAE 2011, Artículo 27)

f_y : 275.00 MPa

 γ_{M0} : Coeficiente parcial de seguridad del material.

γ_{M0} : 1.05

Resistencia a pandeo: (EAE 2011, Artículo 35.1)



La resistencia de cálculo a pandeo $N_{b,Rd}$ en una barra comprimida viene dada por:

$$N_{b,Rd} = \chi \cdot A \cdot f_{yd}$$

$$N_{b,Rd} : \underline{83.78} \text{ kN}$$

Donde:

A: Área de la sección bruta para las secciones de clase 1, 2 y 3.

$$A : \underline{5.40} \text{ cm}^2$$

f_{yd} : Resistencia de cálculo del acero.

$$f_{yd} : \underline{261.90} \text{ MPa}$$

$$f_{yd} = f_y / \gamma_{M1}$$

Siendo:

f_y : Límite elástico. (EAE 2011, Artículo 27)

$$f_y : \underline{275.00} \text{ MPa}$$

γ_{M1} : Coeficiente parcial de seguridad del material.

$$\gamma_{M1} : \underline{1.05}$$

c: Coeficiente de reducción por pandeo.

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

$$C_y : \underline{0.59}$$

$$C_z : \underline{0.59}$$

Siendo:

$$\Phi = 0.5 \cdot \left[1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda} - 0.2) + (\bar{\lambda})^2 \right]$$

$$f_y : \underline{1.09}$$

$$f_z : \underline{1.09}$$

a: Coeficiente de imperfección elástica.

$$a_y : \underline{0.49}$$

$$a_z : \underline{0.49}$$

$\bar{\lambda}$: Esbeltez reducida.

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr}}}$$

$$\bar{\lambda}_y : \underline{0.91}$$

$$\bar{\lambda}_z : \underline{0.91}$$

N_{cr} : Axil crítico elástico de pandeo, obtenido como el menor de los siguientes valores:

$$N_{cr} : \underline{178.39} \text{ kN}$$

$N_{cr,y}$: Axil crítico elástico de pandeo por flexión respecto al eje Y.

$$N_{cr,y} : \underline{178.39} \text{ kN}$$

$N_{cr,z}$: Axil crítico elástico de pandeo por flexión respecto al eje Z.

$$N_{cr,z} : \underline{178.39} \text{ kN}$$

$N_{cr,T}$: Axil crítico elástico de pandeo por torsión.

$$N_{cr,T} : \underline{\infty}$$

**Resistencia a flexión eje Y (EAE 2011, Artículo 34.4)**

Se debe satisfacer:

$$\eta = \frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} \leq 1$$

$$h : \underline{0.004} \quad \checkmark$$

Para flexión positiva:

El esfuerzo solicitante de cálculo pésimo se produce en un punto situado a una distancia de 0.938 m del nudo N40, para la combinación de acciones 1.35·PP+CM1.

M_{Ed}^+ : Momento flector solicitante de cálculo pésimo.

$$M_{Ed}^+ : \underline{0.01} \text{ kN}\cdot\text{m}$$

Para flexión negativa:

M_{Ed}^- : Momento flector solicitante de cálculo pésimo.

$$M_{Ed}^- : \underline{0.00} \text{ kN}\cdot\text{m}$$

El momento flector resistente de cálculo $M_{c,Rd}$ viene dado por:

$$M_{c,Rd} = W_{pl,y} \cdot f_{yd}$$

$$M_{c,Rd} : \underline{2.61} \text{ kN}\cdot\text{m}$$

Donde:

Clase: Clase de la sección, según la capacidad de deformación y de desarrollo de la resistencia plástica de los elementos planos de una sección a flexión simple.

$$\text{Clase} : \underline{1}$$

$W_{pl,y}$: Módulo resistente plástico correspondiente a la fibra con mayor tensión, para las secciones de clase 1 y 2.

$$W_{pl,y} : \underline{9.95} \text{ cm}^3$$

f_{yd} : Resistencia de cálculo del acero.

$$f_{yd} : \underline{261.90} \text{ MPa}$$

$$f_{yd} = f_y / \gamma_{M0}$$

Siendo:

f_y : Límite elástico. (EAE 2011, Artículo 27)

$$f_y : \underline{275.00} \text{ MPa}$$

γ_{M0} : Coeficiente parcial de seguridad del material.

$$\gamma_{M0} : \underline{1.05}$$

Resistencia a flexión eje Z (EAE 2011, Artículo 34.4)

La comprobación no procede, ya que no hay momento flector.

**Resistencia a corte Z (EAE 2011, Artículo 34.5)**

Se debe satisfacer:

$$\eta = \frac{V_{Ed}}{V_{c,Rd}} \leq 1$$

$$h : \underline{0.001} \quad \checkmark$$

El esfuerzo solicitante de cálculo pésimo se produce en el nudo N40, para la combinación de acciones 1.35·PP+CM1.

 V_{Ed} : Esfuerzo cortante solicitante de cálculo pésimo.

$$V_{Ed} : \underline{0.05} \text{ kN}$$

El esfuerzo cortante resistente de cálculo $V_{c,Rd}$ viene dado por:

$$V_{c,Rd} = A_V \cdot \frac{f_{yd}}{\sqrt{3}}$$

$$V_{c,Rd} : \underline{39.92} \text{ kN}$$

Donde:

 A_V : Área transversal a cortante.

$$A_V : \underline{2.64} \text{ cm}^2$$

$$A_V = 2 \cdot d \cdot t_w$$

Siendo:

d: Altura del alma.

$$d : \underline{44.00} \text{ mm}$$

 t_w : Espesor del alma.

$$t_w : \underline{3.00} \text{ mm}$$

 f_{yd} : Resistencia de cálculo del acero.

$$f_{yd} : \underline{261.90} \text{ MPa}$$

$$f_{yd} = f_y / \gamma_{M0}$$

Siendo:

 f_y : Límite elástico. (EAE 2011, Artículo 27)

$$f_y : \underline{275.00} \text{ MPa}$$

 γ_{M0} : Coeficiente parcial de seguridad del material.

$$\gamma_{M0} : \underline{1.05}$$

Abolladura por cortante del alma: (EAE 2011, Artículo 35.5)

Aunque no se han dispuesto rigidizadores transversales, no es necesario comprobar la resistencia a la abolladura del alma, puesto que se cumple:

$$\frac{d}{t_w} < \frac{72}{\eta} \cdot \varepsilon$$

$$14.67 < 55.46 \quad \checkmark$$

Donde:

 l_w : Esbeltez del alma.

$$l_w : \underline{14.67}$$

$$\lambda_w = \frac{d}{t_w}$$

 $l_{m\acute{a}x}$: Esbeltez máxima.

$$l_{m\acute{a}x} : \underline{55.46}$$

$$\lambda_{m\acute{a}x} = \frac{72}{\eta} \cdot \varepsilon$$

h: Coeficiente que permite considerar la resistencia adicional en régimen plástico debida al endurecimiento por deformación del material.

$$h : \underline{1.20}$$

e: Factor de reducción.

$$e : \underline{0.92}$$

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{f_{ref}}{f_y}}$$

Siendo:

 f_{ref} : Límite elástico de referencia.

$$f_{ref} : \underline{235.00} \text{ MPa}$$

 f_y : Límite elástico. (EAE 2011, Artículo 27)

$$f_y : \underline{275.00} \text{ MPa}$$

**Resistencia a corte Y (EAE 2011, Artículo 34.5)**

La comprobación no procede, ya que no hay esfuerzo cortante.

Resistencia a momento flector Y y fuerza cortante Z combinados (EAE 2011, Artículo 34.7.1)

No es necesario reducir la resistencia de cálculo a flexión, ya que el esfuerzo cortante solicitante de cálculo pésimo V_{Ed} no es superior al 50% de la resistencia de cálculo a cortante $V_{c,Rd}$.

$$V_{Ed} \leq \frac{V_{c,Rd}}{2}$$

$$0.05 \text{ kN} \leq 19.96 \text{ kN} \quad \checkmark$$

Los esfuerzos solicitantes de cálculo pésimos se producen en el nudo N40, para la combinación de acciones 1.35·PP+CM1.

V_{Ed} : Esfuerzo cortante solicitante de cálculo pésimo.

$$V_{Ed} : \underline{0.05} \text{ kN}$$

$V_{c,Rd}$: Esfuerzo cortante resistente de cálculo.

$$V_{c,Rd} : \underline{39.92} \text{ kN}$$

Resistencia a momento flector Z y fuerza cortante Y combinados (EAE 2011, Artículo 34.7.1)

No hay interacción entre momento flector y esfuerzo cortante para ninguna combinación. Por lo tanto, la comprobación no procede.

Resistencia a flexión y axil combinados (EAE 2011, Artículo 34.7.2)

Se debe satisfacer:

$$\eta = \frac{M_{y,Ed}}{M_{N,Rd,y}} \leq 1$$

$$h : \underline{0.004} \quad \checkmark$$

$$\eta = \frac{N_{c,Ed}}{\chi_y \cdot A \cdot f_{yd}} + k_{yy} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot W_{pl,y} \cdot f_{yd}} + k_{yz} \cdot \frac{M_{z,Ed}}{W_{pl,z} \cdot f_{yd}} \leq 1$$

$$h : \underline{0.413} \quad \checkmark$$

$$\eta = \frac{N_{c,Ed}}{\chi_z \cdot A \cdot f_{yd}} + k_{zy} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot W_{pl,y} \cdot f_{yd}} + k_{zz} \cdot \frac{M_{z,Ed}}{W_{pl,z} \cdot f_{yd}} \leq 1$$

$$h : \underline{0.412} \quad \checkmark$$

Los esfuerzos solicitantes de cálculo pésimos se producen en un punto situado a una distancia de 0.938 m del nudo N40, para la combinación de acciones 1.35·PP+1.35·CM1+1.5·SobrecargaUso.

Donde:

$N_{c,Ed}$: Axil de compresión solicitante de cálculo.

$$N_{c,Ed} : \underline{34.23} \text{ kN}$$

$M_{y,Ed}$, $M_{z,Ed}$: Momentos flectores solicitantes de cálculo pésimos, según los ejes Y y Z, respectivamente.

$$M_{y,Ed}^+ : \underline{0.01} \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$M_{z,Ed}^+ : \underline{0.00} \text{ kN}\cdot\text{m}$$

Clase: Clase de la sección, según la capacidad de deformación y de desarrollo de la resistencia plástica de sus elementos planos, para axil y flexión simple.

$$\text{Clase} : \underline{1}$$

$M_{N,Rd,y}$: Momento flector resistente plástico reducido de cálculo, alrededor del eje Y.

$$M_{N,Rd,y} : \underline{2.54} \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$M_{N,Rd,y} = M_{pl,Rd,y} \cdot (1 - n) / (1 - 0.5 \cdot a_w) \leq M_{pl,Rd,y}$$

Siendo:

$$n = N_{c,Ed} / N_{pl,Rd}$$

$$n : \underline{0.242}$$

$N_{pl,Rd}$: Resistencia a compresión de la sección bruta.

$$N_{pl,Rd} : \underline{141.50} \text{ kN}$$

$M_{pl,Rd,y}$: Resistencia a flexión de la sección bruta en régimen plástico, respecto al eje Y.

$$M_{pl,Rd,y} : \underline{2.61} \text{ kN}\cdot\text{m}$$



$$a_w = (A - 2 \cdot b \cdot t_f) / A \leq 0.5$$

A: Área de la sección bruta.

b: Ancho del ala.

t_f: Espesor del ala.

$$a_w : \underline{0.44}$$

$$A : \underline{5.40} \text{ cm}^2$$

$$b : \underline{5.00} \text{ cm}$$

$$t_f : \underline{3.00} \text{ mm}$$

Resistencia a pandeo: (EAE 2011, Artículo 35.3)

A: Área de la sección bruta.

W_{pl,y}, W_{pl,z}: Módulos resistentes plásticos correspondientes a la fibra con mayor tensión, alrededor de los ejes Y y Z, respectivamente.

f_{yd}: Resistencia de cálculo del acero.

$$f_{yd} = f_y / \gamma_{M1}$$

Siendo:

f_y: Límite elástico. (EAE 2011, Artículo 27)

g_{M1}: Coeficiente parcial de seguridad del material.

$$A : \underline{5.40} \text{ cm}^2$$

$$W_{pl,y} : \underline{9.95} \text{ cm}^3$$

$$W_{pl,z} : \underline{9.95} \text{ cm}^3$$

$$f_{yd} : \underline{261.90} \text{ MPa}$$

$$f_y : \underline{275.00} \text{ MPa}$$

$$g_{M1} : \underline{1.05}$$

K_{yy}, K_{yz}, K_{zy}, K_{zz}: Coeficientes de interacción.

$$k_{yy} = C_{m,y} \cdot C_{m,LT} \cdot \frac{\mu_y}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}} \cdot \frac{1}{C_{yy}}$$

$$K_{yy} : \underline{1.14}$$

$$k_{yz} = C_{m,z} \cdot \frac{\mu_y}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}} \cdot \frac{1}{C_{yz}} \cdot 0.6 \cdot \sqrt{\frac{W_z}{W_y}}$$

$$K_{yz} : \underline{0.75}$$

$$k_{zy} = C_{m,y} \cdot C_{m,LT} \cdot \frac{\mu_z}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}} \cdot \frac{1}{C_{zy}} \cdot 0.6 \cdot \sqrt{\frac{W_y}{W_z}}$$

$$K_{zy} : \underline{0.75}$$

$$k_{zz} = C_{m,z} \cdot \frac{\mu_z}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}} \cdot \frac{1}{C_{zz}}$$

$$K_{zz} : \underline{1.14}$$

Términos auxiliares:

$$\mu_y = \frac{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}}{1 - \chi_y \cdot \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}}$$

$$m_y : \underline{0.91}$$

$$\mu_z = \frac{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}}{1 - \chi_z \cdot \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}}$$

$$m_z : \underline{0.91}$$

$$C_{yy} = 1 + (w_y - 1) \cdot \left[\left(2 - \frac{1.6}{w_y} \cdot C_{m,y}^2 \cdot \bar{\lambda}_{max} - \frac{1.6}{w_y} \cdot C_{m,y}^2 \cdot \bar{\lambda}_{max}^2 \right) \cdot n_{pl} - b_{LT} \right] \geq \frac{W_{el,y}}{W_{pl,y}}$$

$$C_{yy} : \underline{0.99}$$

$$C_{yz} = 1 + (w_z - 1) \cdot \left[\left(2 - 14 \cdot \frac{C_{m,z}^2 \cdot \bar{\lambda}_{max}^2}{w_z^5} \right) \cdot n_{pl} - c_{LT} \right] \geq 0.6 \cdot \sqrt{\frac{W_z}{W_y}} \cdot \frac{W_{el,z}}{W_{pl,z}}$$

$$C_{yz} : \underline{0.91}$$

$$C_{zy} = 1 + (w_y - 1) \cdot \left[\left(2 - 14 \cdot \frac{C_{m,y}^2 \cdot \bar{\lambda}_{max}^2}{w_y^5} \right) \cdot n_{pl} - d_{LT} \right] \geq 0.6 \cdot \sqrt{\frac{W_y}{W_z}} \cdot \frac{W_{el,y}}{W_{pl,y}}$$

$$C_{zy} : \underline{0.91}$$

$$C_{zz} = 1 + (w_z - 1) \cdot \left[\left(2 - \frac{1.6}{w_z} \cdot C_{m,z}^2 \cdot \bar{\lambda}_{max} - \frac{1.6}{w_z} \cdot C_{m,z}^2 \cdot \bar{\lambda}_{max}^2 - e_{LT} \right) \cdot n_{pl} \right] \geq \frac{W_{el,z}}{W_{pl,z}}$$

$$C_{zz} : \underline{0.99}$$



$$a_{LT} = 1 - \frac{I_t}{I_y} \geq 0 \quad a_{LT} : \underline{0.00}$$

$$b_{LT} = 0.5 \cdot a_{LT} \cdot \bar{\lambda}_0^{-2} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot M_{pl,Rd,y}} \cdot \frac{M_{z,Ed}}{M_{pl,Rd,z}} \quad b_{LT} : \underline{0.00}$$

$$c_{LT} = 10 \cdot a_{LT} \cdot \frac{\bar{\lambda}_0^{-2}}{5 + \bar{\lambda}_z^{-4}} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{C_{m,y} \cdot \chi_{LT} \cdot M_{pl,Rd,y}} \quad c_{LT} : \underline{0.00}$$

$$d_{LT} = 2 \cdot a_{LT} \cdot \frac{\bar{\lambda}_0}{0.1 + \bar{\lambda}_z^{-4}} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{C_{m,y} \cdot \chi_{LT} \cdot M_{pl,Rd,y}} \cdot \frac{M_{z,Ed}}{C_{m,z} \cdot M_{pl,Rd,z}} \quad d_{LT} : \underline{0.00}$$

$$e_{LT} = 1.7 \cdot a_{LT} \cdot \frac{\bar{\lambda}_0}{0.1 + \bar{\lambda}_z^{-4}} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{C_{m,y} \cdot \chi_{LT} \cdot M_{pl,Rd,y}} \quad e_{LT} : \underline{0.00}$$

$$w_y = \frac{W_{pl,y}}{W_{el,y}} \leq 1.5 \quad w_y : \underline{1.28}$$

$$w_z = \frac{W_{pl,z}}{W_{el,z}} \leq 1.5 \quad w_z : \underline{1.28}$$

$$n_{pl} = \frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}} \quad n_{pl} : \underline{0.24}$$

Puesto que:

$$\bar{\lambda}_0 \leq 0.2 \cdot \sqrt{C_1} \cdot \sqrt[4]{\left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}\right) \cdot \left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}\right)} \quad 0.00 \leq 0.18$$

$$C_{m,y} = C_{m,y,0} \quad C_{m,y} : \underline{1.00}$$

$$C_{m,z} = C_{m,z,0} \quad C_{m,z} : \underline{1.00}$$

$$C_{m,LT} = 1.00 \quad C_{m,LT} : \underline{1.00}$$

$C_{m,y,0}$, $C_{m,z,0}$: Factores de momento flector uniforme equivalente.

$$C_{m,y,0} : \underline{1.00}$$

$$C_{m,z,0} : \underline{1.00}$$

$$C_1 : \underline{1.00}$$

C_1 : Factor que depende de las condiciones de apoyo y de la forma de la ley de momentos flectores sobre la barra.

c_y , c_z : Coeficientes de reducción por pandeo, alrededor de los ejes Y y Z, respectivamente.

$$c_y : \underline{0.59}$$

$$c_z : \underline{0.59}$$

c_{LT} : Coeficiente de reducción por pandeo lateral.

$$c_{LT} : \underline{1.00}$$

$\bar{\lambda}_{m\acute{a}x}$: Esbeltez máxima entre $\bar{\lambda}_y$ y $\bar{\lambda}_z$.

$$\bar{\lambda}_{m\acute{a}x} : \underline{0.91}$$

$\bar{\lambda}_y$, $\bar{\lambda}_z$: Esbelteces reducidas en relación a los ejes Y y Z, respectivamente.

$$\bar{\lambda}_y : \underline{0.91}$$

$$\bar{\lambda}_z : \underline{0.91}$$

$\bar{\lambda}_{LT}$: Esbeltez reducida.

$$\bar{\lambda}_{LT} : \underline{0.00}$$

$\bar{\lambda}_0$: Esbeltez reducida, en relación al pandeo lateral, para un momento flector uniforme.

$$\bar{\lambda}_0 : \underline{0.00}$$

$W_{el,y}$, $W_{el,z}$: Módulos resistentes elásticos correspondientes a la fibra comprimida, alrededor de los ejes Y y Z, respectivamente.

$$W_{el,y} : \underline{7.75} \text{ cm}^3$$

$$W_{el,z} : \underline{7.75} \text{ cm}^3$$

$N_{cr,y}$: Axil crítico elástico de pandeo por flexión respecto al eje Y.

$$N_{cr,y} : \underline{178.39} \text{ kN}$$

$N_{cr,z}$: Axil crítico elástico de pandeo por flexión respecto al eje Z.

$$N_{cr,z} : \underline{178.39} \text{ kN}$$

I_y : Momento de inercia de la sección bruta, respecto al eje Y.

$$I_y : \underline{19.37} \text{ cm}^4$$

I_t : Momento de inercia a torsión uniforme.

$$I_t : \underline{32.08} \text{ cm}^4$$

**Resistencia a flexión, axil y cortante combinados (EAE 2011, Artículo 34.7.3)**

No es necesario reducir las resistencias de cálculo a flexión y a axil, ya que se puede ignorar el efecto de abolladura por esfuerzo cortante y, además, el esfuerzo cortante solicitante de cálculo pésimo V_{Ed} es menor o igual que el 50% del esfuerzo cortante resistente de cálculo $V_{c,Rd}$.

Los esfuerzos solicitantes de cálculo pésimos se producen en el nudo N40, para la combinación de acciones 1.35·PP+CM1.

$$V_{Ed,z} \leq \frac{V_{c,Rd,z}}{2}$$

$$0.05 \text{ kN} \leq 19.96 \text{ kN} \quad \checkmark$$

Donde:

$V_{Ed,z}$: Esfuerzo cortante solicitante de cálculo pésimo.

$$V_{Ed,z} : \frac{0.05}{\quad} \text{ kN}$$

$V_{c,Rd,z}$: Esfuerzo cortante resistente de cálculo.

$$V_{c,Rd,z} : \frac{39.92}{\quad} \text{ kN}$$

Resistencia a torsión (EAE 2011, Artículo 34.6)

La comprobación no procede, ya que no hay momento torsor.

Resistencia a cortante Z y momento torsor combinados (EAE 2011, Artículo 34.6)

No hay interacción entre momento torsor y esfuerzo cortante para ninguna combinación. Por lo tanto, la comprobación no procede.

Resistencia a cortante Y y momento torsor combinados (EAE 2011, Artículo 34.6)

No hay interacción entre momento torsor y esfuerzo cortante para ninguna combinación. Por lo tanto, la comprobación no procede.



Barra N41/N42

Perfil: SHS 50x3.0
Material: Acero (S275 (EAE))

	Nudos		Longitud (m)	Características mecánicas			
	Inicial	Final		Área (cm ²)	I _y ⁽¹⁾ (cm ⁴)	I _z ⁽¹⁾ (cm ⁴)	I _t ⁽²⁾ (cm ⁴)
	N41	N42	1.500	5.40	19.37	19.37	32.08
Notas: ⁽¹⁾ Inercia respecto al eje indicado ⁽²⁾ Momento de inercia a torsión uniforme							
	Pandeo			Pandeo lateral			
		Plano XY	Plano XZ	Ala sup.	Ala inf.		
	β	1.00	1.00	0.00	0.00		
	L _K	1.500	1.500	0.000	0.000		
	C _m	1.000	1.000	1.000	1.000		
	C ₁	-		1.000			
Notación: b: Coeficiente de pandeo L _K : Longitud de pandeo (m) C _m : Coeficiente de momentos C ₁ : Factor de modificación para el momento crítico							

**Limitación de esbeltez** (Criterio de CYPE Ingenieros, basado en: Figura 35.1.2 de la norma EAE 2011.)

La esbeltez reducida $\bar{\lambda}$ de las barras comprimidas debe ser inferior al valor 3.0.

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr}}}$$

$$\bar{\lambda} : \underline{0.91} \quad \checkmark$$

Donde:

Clase: Clase de la sección, según la capacidad de deformación y de desarrollo de la resistencia plástica de los elementos planos comprimidos de una sección.

$$\text{Clase} : \underline{1}$$

A: Área de la sección bruta para las secciones de clase 1, 2 y 3.

$$A : \underline{5.40} \text{ cm}^2$$

f_y : Límite elástico. (EAE 2011, Artículo 27)

$$f_y : \underline{275.00} \text{ MPa}$$

N_{cr} : Axil crítico de pandeo elástico.

$$N_{cr} : \underline{178.39} \text{ kN}$$

El axil crítico de pandeo elástico N_{cr} es el menor de los valores obtenidos en a), b) y c):

a) Axil crítico elástico de pandeo por flexión respecto al eje Y.

$$N_{cr,y} : \underline{178.39} \text{ kN}$$

$$N_{cr,y} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{L_{ky}^2}$$

b) Axil crítico elástico de pandeo por flexión respecto al eje Z.

$$N_{cr,z} : \underline{178.39} \text{ kN}$$

$$N_{cr,z} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{L_{kz}^2}$$

c) Axil crítico elástico de pandeo por torsión.

$$N_{cr,T} : \underline{\infty}$$

$$N_{cr,T} = \frac{1}{i_0^2} \cdot \left[G \cdot I_t + \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_w}{L_{kt}^2} \right]$$

Donde:

I_y : Momento de inercia de la sección bruta, respecto al eje Y.

$$I_y : \underline{19.37} \text{ cm}^4$$

I_z : Momento de inercia de la sección bruta, respecto al eje Z.

$$I_z : \underline{19.37} \text{ cm}^4$$

I_t : Momento de inercia a torsión uniforme.

$$I_t : \underline{32.08} \text{ cm}^4$$

I_w : Constante de alabeo de la sección.

$$I_w : \underline{0.00} \text{ cm}^6$$

E: Módulo de elasticidad.

$$E : \underline{210000} \text{ MPa}$$

G: Módulo de elasticidad transversal.

$$G : \underline{81000} \text{ MPa}$$

L_{ky} : Longitud efectiva de pandeo por flexión, respecto al eje Y.

$$L_{ky} : \underline{1.500} \text{ m}$$

L_{kz} : Longitud efectiva de pandeo por flexión, respecto al eje Z.

$$L_{kz} : \underline{1.500} \text{ m}$$

L_{kt} : Longitud efectiva de pandeo por torsión.

$$L_{kt} : \underline{0.000} \text{ m}$$

i_0 : Radio de giro polar de la sección bruta, respecto al centro de torsión.

$$i_0 : \underline{2.68} \text{ cm}$$

$$i_0 = \left(i_y^2 + i_z^2 + y_0^2 + z_0^2 \right)^{0.5}$$

Siendo:

i_y , i_z : Radios de giro de la sección bruta, respecto a los ejes principales de inercia Y y Z.

$$i_y : \underline{1.89} \text{ cm}$$

$$i_z : \underline{1.89} \text{ cm}$$

y_0 , z_0 : Coordenadas del centro de torsión en la dirección de los ejes principales Y y Z, respectivamente, relativas al centro de gravedad de la sección.

$$y_0 : \underline{0.00} \text{ mm}$$

$$z_0 : \underline{0.00} \text{ mm}$$

**Abolladura del alma inducida por el ala comprimida (EAE 2011, Artículo 35.8)**

Se debe satisfacer:

$$\frac{h_w}{t_w} \leq k \frac{E}{f_{yf}} \sqrt{\frac{A_w}{A_{fc,ef}}}$$

$$14.67 \leq 303.92 \quad \checkmark$$

Donde:

 h_w : Altura del alma.

h_w : 44.00 mm

 t_w : Espesor del alma.

t_w : 3.00 mm

 A_w : Área del alma.

A_w : 2.64 cm²

 $A_{fc,ef}$: Área reducida del ala comprimida.

$A_{fc,ef}$: 1.50 cm²

k: Coeficiente que depende de la clase de la sección.

k : 0.30

E: Módulo de elasticidad.

E : 210000 MPa

 f_{yf} : Límite elástico del acero del ala comprimida.

f_{yf} : 275.00 MPa

Siendo:

$$f_{yf} = f_y$$

Resistencia a tracción (EAE 2011, Artículo 34.2)

La comprobación no procede, ya que no hay axil de tracción.

Resistencia a compresión (EAE 2011, Artículo 34.3)

Se debe satisfacer:

$$\eta = \frac{N_{c,Ed}}{N_{c,Rd}} \leq 1$$

$$\eta : \underline{0.242} \quad \checkmark$$

$$\eta = \frac{N_{c,Ed}}{N_{b,Rd}} \leq 1$$

$$\eta : \underline{0.408} \quad \checkmark$$

El esfuerzo solicitante de cálculo pésimo se produce para la combinación de acciones 1.35·PP+1.35·CM1+1.5·SobrecargaUso.

 $N_{c,Ed}$: Axil de compresión solicitante de cálculo pésimo.

$N_{c,Ed}$: 34.23 kN

La resistencia de cálculo a compresión $N_{c,Rd}$ viene dada por:

$$N_{c,Rd} = A \cdot f_{yd}$$

$N_{c,Rd}$: 141.50 kN

Donde:

Clase: Clase de la sección, según la capacidad de deformación y de desarrollo de la resistencia plástica de los elementos planos comprimidos de una sección.

Clase : 1

A: Área de la sección bruta para las secciones de clase 1, 2 y 3.

A : 5.40 cm²

 f_{yd} : Resistencia de cálculo del acero.

f_{yd} : 261.90 MPa

$$f_{yd} = f_y / \gamma_{M0}$$

Siendo:

 f_y : Límite elástico. (EAE 2011, Artículo 27)

f_y : 275.00 MPa

 γ_{M0} : Coeficiente parcial de seguridad del material.

γ_{M0} : 1.05

Resistencia a pandeo: (EAE 2011, Artículo 35.1)



La resistencia de cálculo a pandeo $N_{b,Rd}$ en una barra comprimida viene dada por:

$$N_{b,Rd} = \chi \cdot A \cdot f_{yd}$$

$$N_{b,Rd} : \underline{83.78} \text{ kN}$$

Donde:

A: Área de la sección bruta para las secciones de clase 1, 2 y 3.

$$A : \underline{5.40} \text{ cm}^2$$

f_{yd} : Resistencia de cálculo del acero.

$$f_{yd} : \underline{261.90} \text{ MPa}$$

$$f_{yd} = f_y / \gamma_{M1}$$

Siendo:

f_y : Límite elástico. (EAE 2011, Artículo 27)

$$f_y : \underline{275.00} \text{ MPa}$$

γ_{M1} : Coeficiente parcial de seguridad del material.

$$\gamma_{M1} : \underline{1.05}$$

c: Coeficiente de reducción por pandeo.

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

$$C_y : \underline{0.59}$$

$$C_z : \underline{0.59}$$

Siendo:

$$\Phi = 0.5 \cdot \left[1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda} - 0.2) + (\bar{\lambda})^2 \right]$$

$$f_y : \underline{1.09}$$

$$f_z : \underline{1.09}$$

a: Coeficiente de imperfección elástica.

$$a_y : \underline{0.49}$$

$$a_z : \underline{0.49}$$

$\bar{\lambda}$: Esbeltez reducida.

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr}}}$$

$$\bar{\lambda}_y : \underline{0.91}$$

$$\bar{\lambda}_z : \underline{0.91}$$

N_{cr} : Axil crítico elástico de pandeo, obtenido como el menor de los siguientes valores:

$$N_{cr} : \underline{178.39} \text{ kN}$$

$N_{cr,y}$: Axil crítico elástico de pandeo por flexión respecto al eje Y.

$$N_{cr,y} : \underline{178.39} \text{ kN}$$

$N_{cr,z}$: Axil crítico elástico de pandeo por flexión respecto al eje Z.

$$N_{cr,z} : \underline{178.39} \text{ kN}$$

$N_{cr,T}$: Axil crítico elástico de pandeo por torsión.

$$N_{cr,T} : \underline{\infty}$$

**Resistencia a flexión eje Y (EAE 2011, Artículo 34.4)**

Se debe satisfacer:

$$\eta = \frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} \leq 1$$

$$h : \underline{0.004} \quad \checkmark$$

Para flexión positiva:

El esfuerzo solicitante de cálculo pésimo se produce en un punto situado a una distancia de 0.563 m del nudo N41, para la combinación de acciones 1.35·PP+CM1.

M_{Ed}^+ : Momento flector solicitante de cálculo pésimo.

$$M_{Ed}^+ : \underline{0.01} \text{ kN}\cdot\text{m}$$

Para flexión negativa:

M_{Ed}^- : Momento flector solicitante de cálculo pésimo.

$$M_{Ed}^- : \underline{0.00} \text{ kN}\cdot\text{m}$$

El momento flector resistente de cálculo $M_{c,Rd}$ viene dado por:

$$M_{c,Rd} = W_{pl,y} \cdot f_{yd}$$

$$M_{c,Rd} : \underline{2.61} \text{ kN}\cdot\text{m}$$

Donde:

Clase: Clase de la sección, según la capacidad de deformación y de desarrollo de la resistencia plástica de los elementos planos de una sección a flexión simple.

$$\text{Clase} : \underline{1}$$

$W_{pl,y}$: Módulo resistente plástico correspondiente a la fibra con mayor tensión, para las secciones de clase 1 y 2.

$$W_{pl,y} : \underline{9.95} \text{ cm}^3$$

f_{yd} : Resistencia de cálculo del acero.

$$f_{yd} : \underline{261.90} \text{ MPa}$$

$$f_{yd} = f_y / \gamma_{M0}$$

Siendo:

f_y : Límite elástico. (EAE 2011, Artículo 27)

$$f_y : \underline{275.00} \text{ MPa}$$

γ_{M0} : Coeficiente parcial de seguridad del material.

$$\gamma_{M0} : \underline{1.05}$$

Resistencia a flexión eje Z (EAE 2011, Artículo 34.4)

La comprobación no procede, ya que no hay momento flector.

**Resistencia a corte Z (EAE 2011, Artículo 34.5)**

Se debe satisfacer:

$$\eta = \frac{V_{Ed}}{V_{c,Rd}} \leq 1$$

$$h : \underline{0.001} \quad \checkmark$$

El esfuerzo solicitante de cálculo pésimo se produce en el nudo N42, para la combinación de acciones 1.35·PP+CM1.

V_{Ed} : Esfuerzo cortante solicitante de cálculo pésimo.

$$V_{Ed} : \underline{0.05} \text{ kN}$$

El esfuerzo cortante resistente de cálculo $V_{c,Rd}$ viene dado por:

$$V_{c,Rd} = A_v \cdot \frac{f_{yd}}{\sqrt{3}}$$

$$V_{c,Rd} : \underline{39.92} \text{ kN}$$

Donde:

A_v : Área transversal a cortante.

$$A_v : \underline{2.64} \text{ cm}^2$$

$$A_v = 2 \cdot d \cdot t_w$$

Siendo:

d: Altura del alma.

$$d : \underline{44.00} \text{ mm}$$

t_w : Espesor del alma.

$$t_w : \underline{3.00} \text{ mm}$$

f_{yd} : Resistencia de cálculo del acero.

$$f_{yd} : \underline{261.90} \text{ MPa}$$

$$f_{yd} = f_y / \gamma_{M0}$$

Siendo:

f_y : Límite elástico. (EAE 2011, Artículo 27)

$$f_y : \underline{275.00} \text{ MPa}$$

γ_{M0} : Coeficiente parcial de seguridad del material.

$$\gamma_{M0} : \underline{1.05}$$

Abolladura por cortante del alma: (EAE 2011, Artículo 35.5)

Aunque no se han dispuesto rigidizadores transversales, no es necesario comprobar la resistencia a la abolladura del alma, puesto que se cumple:

$$\frac{d}{t_w} < \frac{72}{\eta} \cdot \varepsilon$$

$$14.67 < 55.46 \quad \checkmark$$

Donde:

l_w : Esbeltez del alma.

$$l_w : \underline{14.67}$$

$$\lambda_w = \frac{d}{t_w}$$

$l_{m\acute{a}x}$: Esbeltez máxima.

$$l_{m\acute{a}x} : \underline{55.46}$$

$$\lambda_{m\acute{a}x} = \frac{72}{\eta} \cdot \varepsilon$$

h: Coeficiente que permite considerar la resistencia adicional en régimen plástico debida al endurecimiento por deformación del material.

$$h : \underline{1.20}$$

e: Factor de reducción.

$$e : \underline{0.92}$$

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{f_{ref}}{f_y}}$$

Siendo:

f_{ref} : Límite elástico de referencia.

$$f_{ref} : \underline{235.00} \text{ MPa}$$

f_y : Límite elástico. (EAE 2011, Artículo 27)

$$f_y : \underline{275.00} \text{ MPa}$$

**Resistencia a corte Y (EAE 2011, Artículo 34.5)**

La comprobación no procede, ya que no hay esfuerzo cortante.

Resistencia a momento flector Y y fuerza cortante Z combinados (EAE 2011, Artículo 34.7.1)

No es necesario reducir la resistencia de cálculo a flexión, ya que el esfuerzo cortante solicitante de cálculo pésimo V_{Ed} no es superior al 50% de la resistencia de cálculo a cortante $V_{c,Rd}$.

$$V_{Ed} \leq \frac{V_{c,Rd}}{2}$$

$$0.02 \text{ kN} \leq 19.96 \text{ kN} \quad \checkmark$$

Los esfuerzos solicitantes de cálculo pésimos se producen en un punto situado a una distancia de 0.188 m del nudo N41, para la combinación de acciones 1.35·PP+CM1.

V_{Ed} : Esfuerzo cortante solicitante de cálculo pésimo.

$$V_{Ed} : \underline{0.02} \text{ kN}$$

$V_{c,Rd}$: Esfuerzo cortante resistente de cálculo.

$$V_{c,Rd} : \underline{39.92} \text{ kN}$$

Resistencia a momento flector Z y fuerza cortante Y combinados (EAE 2011, Artículo 34.7.1)

No hay interacción entre momento flector y esfuerzo cortante para ninguna combinación. Por lo tanto, la comprobación no procede.

Resistencia a flexión y axil combinados (EAE 2011, Artículo 34.7.2)

Se debe satisfacer:

$$\eta = \frac{M_{y,Ed}}{M_{N,Rd,y}} \leq 1$$

$$h : \underline{0.004} \quad \checkmark$$

$$\eta = \frac{N_{c,Ed}}{\chi_y \cdot A \cdot f_{yd}} + k_{yy} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot W_{pl,y} \cdot f_{yd}} + k_{yz} \cdot \frac{M_{z,Ed}}{W_{pl,z} \cdot f_{yd}} \leq 1$$

$$h : \underline{0.413} \quad \checkmark$$

$$\eta = \frac{N_{c,Ed}}{\chi_z \cdot A \cdot f_{yd}} + k_{zy} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot W_{pl,y} \cdot f_{yd}} + k_{zz} \cdot \frac{M_{z,Ed}}{W_{pl,z} \cdot f_{yd}} \leq 1$$

$$h : \underline{0.412} \quad \checkmark$$

Los esfuerzos solicitantes de cálculo pésimos se producen en un punto situado a una distancia de 0.563 m del nudo N41, para la combinación de acciones 1.35·PP+1.35·CM1+1.5·SobrecargaUso.

Donde:

$N_{c,Ed}$: Axil de compresión solicitante de cálculo.

$$N_{c,Ed} : \underline{34.23} \text{ kN}$$

$M_{y,Ed}$, $M_{z,Ed}$: Momentos flectores solicitantes de cálculo pésimos, según los ejes Y y Z, respectivamente.

$$M_{y,Ed}^+ : \underline{0.01} \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$M_{z,Ed}^+ : \underline{0.00} \text{ kN}\cdot\text{m}$$

Clase: Clase de la sección, según la capacidad de deformación y de desarrollo de la resistencia plástica de sus elementos planos, para axil y flexión simple.

$$\text{Clase} : \underline{1}$$

$M_{N,Rd,y}$: Momento flector resistente plástico reducido de cálculo, alrededor del eje Y.

$$M_{N,Rd,y} : \underline{2.54} \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$M_{N,Rd,y} = M_{pl,Rd,y} \cdot (1 - n) / (1 - 0.5 \cdot a_w) \leq M_{pl,Rd,y}$$

Siendo:

$$n = N_{c,Ed} / N_{pl,Rd}$$

$$n : \underline{0.242}$$

$N_{pl,Rd}$: Resistencia a compresión de la sección bruta.

$$N_{pl,Rd} : \underline{141.50} \text{ kN}$$



Listados

estructura_12m

Fecha: 07/06/21

$M_{pl,Rd,y}$: Resistencia a flexión de la sección bruta en régimen plástico, respecto al eje Y.

$$M_{pl,Rd,y} : \underline{2.61} \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$a_w = (A - 2 \cdot b \cdot t_f) / A \leq 0.5$$

$$a_w : \underline{0.44}$$

A: Área de la sección bruta.

$$A : \underline{5.40} \text{ cm}^2$$

b: Ancho del ala.

$$b : \underline{5.00} \text{ cm}$$

t_f : Espesor del ala.

$$t_f : \underline{3.00} \text{ mm}$$

Resistencia a pandeo: (EAE 2011, Artículo 35.3)

A: Área de la sección bruta.

$$A : \underline{5.40} \text{ cm}^2$$

$W_{pl,y}$, $W_{pl,z}$: Módulos resistentes plásticos correspondientes a la fibra con mayor tensión, alrededor de los ejes Y y Z, respectivamente.

$$W_{pl,y} : \underline{9.95} \text{ cm}^3$$

$$W_{pl,z} : \underline{9.95} \text{ cm}^3$$

f_{yd} : Resistencia de cálculo del acero.

$$f_{yd} : \underline{261.90} \text{ MPa}$$

$$f_{yd} = f_y / \gamma_{M1}$$

Siendo:

f_y : Límite elástico. (EAE 2011, Artículo 27)

$$f_y : \underline{275.00} \text{ MPa}$$

γ_{M1} : Coeficiente parcial de seguridad del material.

$$\gamma_{M1} : \underline{1.05}$$

K_{yy} , K_{yz} , K_{zy} , K_{zz} : Coeficientes de interacción.

$$k_{yy} = C_{m,y} \cdot C_{m,LT} \cdot \frac{\mu_y}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}} \cdot \frac{1}{C_{yy}}$$

$$K_{yy} : \underline{1.14}$$

$$k_{yz} = C_{m,z} \cdot \frac{\mu_y}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}} \cdot \frac{1}{C_{yz}} \cdot 0.6 \cdot \sqrt{\frac{W_z}{W_y}}$$

$$K_{yz} : \underline{0.75}$$

$$k_{zy} = C_{m,y} \cdot C_{m,LT} \cdot \frac{\mu_z}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}} \cdot \frac{1}{C_{zy}} \cdot 0.6 \cdot \sqrt{\frac{W_y}{W_z}}$$

$$K_{zy} : \underline{0.75}$$

$$k_{zz} = C_{m,z} \cdot \frac{\mu_z}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}} \cdot \frac{1}{C_{zz}}$$

$$K_{zz} : \underline{1.14}$$

Términos auxiliares:

$$\mu_y = \frac{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}}{1 - \chi_y \cdot \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}}$$

$$m_y : \underline{0.91}$$

$$\mu_z = \frac{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}}{1 - \chi_z \cdot \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}}$$

$$m_z : \underline{0.91}$$

$$C_{yy} = 1 + (w_y - 1) \cdot \left[\left(2 - \frac{1.6}{w_y} \cdot C_{my}^2 \cdot \bar{\lambda}_{max} - \frac{1.6}{w_y} \cdot C_{my}^2 \cdot \bar{\lambda}_{max}^2 \right) \cdot \eta_{pl} - b_{LT} \right] \geq \frac{W_{el,y}}{W_{pl,y}}$$

$$C_{yy} : \underline{0.99}$$

$$C_{yz} = 1 + (w_z - 1) \cdot \left[\left(2 - 14 \cdot \frac{C_{mz}^2 \cdot \bar{\lambda}_{max}^2}{w_z^5} \right) \cdot \eta_{pl} - c_{LT} \right] \geq 0.6 \cdot \sqrt{\frac{W_z}{W_y}} \cdot \frac{W_{el,z}}{W_{pl,z}}$$

$$C_{yz} : \underline{0.91}$$

$$C_{zy} = 1 + (w_y - 1) \cdot \left[\left(2 - 14 \cdot \frac{C_{my}^2 \cdot \bar{\lambda}_{max}^2}{w_y^5} \right) \cdot \eta_{pl} - d_{LT} \right] \geq 0.6 \cdot \sqrt{\frac{W_y}{W_z}} \cdot \frac{W_{el,y}}{W_{pl,y}}$$

$$C_{zy} : \underline{0.91}$$



Listados

estructura_12m

Fecha: 07/06/21

$$C_{zz} = 1 + (w_z - 1) \cdot \left[\left(2 - \frac{1.6}{w_z} \cdot C_{mz}^2 \cdot \bar{\lambda}_{\max} - \frac{1.6}{w_z} \cdot C_{mz}^2 \cdot \bar{\lambda}_{\max}^2 - e_{LT} \right) \cdot n_{pl} \right] \geq \frac{W_{el,z}}{W_{pl,z}}$$

$C_{zz} : \underline{0.99}$

$$a_{LT} = 1 - \frac{I_t}{I_y} \geq 0$$

$a_{LT} : \underline{0.00}$

$$b_{LT} = 0.5 \cdot a_{LT} \cdot \bar{\lambda}_0^{-2} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot M_{pl,Rd,y}} \cdot \frac{M_{z,Ed}}{M_{pl,Rd,z}}$$

$b_{LT} : \underline{0.00}$

$$c_{LT} = 10 \cdot a_{LT} \cdot \frac{\bar{\lambda}_0^{-2}}{5 + \bar{\lambda}_z^{-4}} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{C_{m,y} \cdot \chi_{LT} \cdot M_{pl,Rd,y}}$$

$c_{LT} : \underline{0.00}$

$$d_{LT} = 2 \cdot a_{LT} \cdot \frac{\bar{\lambda}_0}{0.1 + \bar{\lambda}_z^{-4}} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{C_{m,y} \cdot \chi_{LT} \cdot M_{pl,Rd,y}} \cdot \frac{M_{z,Ed}}{C_{m,z} \cdot M_{pl,Rd,z}}$$

$d_{LT} : \underline{0.00}$

$$e_{LT} = 1.7 \cdot a_{LT} \cdot \frac{\bar{\lambda}_0}{0.1 + \bar{\lambda}_z^{-4}} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{C_{m,y} \cdot \chi_{LT} \cdot M_{pl,Rd,y}}$$

$e_{LT} : \underline{0.00}$

$$w_y = \frac{W_{pl,y}}{W_{el,y}} \leq 1.5$$

$w_y : \underline{1.28}$

$$w_z = \frac{W_{pl,z}}{W_{el,z}} \leq 1.5$$

$w_z : \underline{1.28}$

$$n_{pl} = \frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}}$$

$n_{pl} : \underline{0.24}$

Puesto que:

$$\bar{\lambda}_0 \leq 0.2 \cdot \sqrt{C_1} \cdot \sqrt[4]{\left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}} \right) \cdot \left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}} \right)}$$

$0.00 \leq 0.18$

$$C_{m,y} = C_{m,y,0}$$

$C_{m,y} : \underline{1.00}$

$$C_{m,z} = C_{m,z,0}$$

$C_{m,z} : \underline{1.00}$

$$C_{m,LT} = 1.00$$

$C_{m,LT} : \underline{1.00}$

$C_{m,y,0}$, $C_{m,z,0}$: Factores de momento flector uniforme equivalente.

$$C_{m,y,0} : \underline{1.00}$$

$$C_{m,z,0} : \underline{1.00}$$

C_1 : Factor que depende de las condiciones de apoyo y de la forma de la ley de momentos flectores sobre la barra.

$$C_1 : \underline{1.00}$$

c_y , c_z : Coeficientes de reducción por pandeo, alrededor de los ejes Y y Z, respectivamente.

$$c_y : \underline{0.59}$$

$$c_z : \underline{0.59}$$

c_{LT} : Coeficiente de reducción por pandeo lateral.

$$c_{LT} : \underline{1.00}$$

$\bar{\lambda}_{\max}$: Esbeltez máxima entre $\bar{\lambda}_y$ y $\bar{\lambda}_z$.

$$\bar{\lambda}_{\max} : \underline{0.91}$$

$\bar{\lambda}_y$, $\bar{\lambda}_z$: Esbelteces reducidas en relación a los ejes Y y Z, respectivamente.

$$\bar{\lambda}_y : \underline{0.91}$$

$$\bar{\lambda}_z : \underline{0.91}$$

$\bar{\lambda}_{LT}$: Esbeltez reducida.

$$\bar{\lambda}_{LT} : \underline{0.00}$$

$\bar{\lambda}_0$: Esbeltez reducida, en relación al pandeo lateral, para un momento flector uniforme.

$$\bar{\lambda}_0 : \underline{0.00}$$

$W_{el,y}$, $W_{el,z}$: Módulos resistentes elásticos correspondientes a la fibra comprimida, alrededor de los ejes Y y Z, respectivamente.

$$W_{el,y} : \underline{7.75} \text{ cm}^3$$

$$W_{el,z} : \underline{7.75} \text{ cm}^3$$

$N_{cr,y}$: Axil crítico elástico de pandeo por flexión respecto al eje Y.

$$N_{cr,y} : \underline{178.39} \text{ kN}$$

$N_{cr,z}$: Axil crítico elástico de pandeo por flexión respecto al eje Z.

$$N_{cr,z} : \underline{178.39} \text{ kN}$$

I_y : Momento de inercia de la sección bruta, respecto al eje Y.

$$I_y : \underline{19.37} \text{ cm}^4$$

I_t : Momento de inercia a torsión uniforme.

$$I_t : \underline{32.08} \text{ cm}^4$$

**Resistencia a flexión, axil y cortante combinados (EAE 2011, Artículo 34.7.3)**

No es necesario reducir las resistencias de cálculo a flexión y a axil, ya que se puede ignorar el efecto de abolladura por esfuerzo cortante y, además, el esfuerzo cortante solicitante de cálculo pésimo V_{Ed} es menor o igual que el 50% del esfuerzo cortante resistente de cálculo $V_{c,Rd}$.

Los esfuerzos solicitantes de cálculo pésimos se producen en un punto situado a una distancia de 0.188 m del nudo N41, para la combinación de acciones 1.35·PP+CM1.

$$V_{Ed,z} \leq \frac{V_{c,Rd,z}}{2}$$

$$0.02 \text{ kN} \leq 19.96 \text{ kN} \quad \checkmark$$

Donde:

$V_{Ed,z}$: Esfuerzo cortante solicitante de cálculo pésimo.

$$V_{Ed,z} : \frac{0.02}{\text{ kN}}$$

$V_{c,Rd,z}$: Esfuerzo cortante resistente de cálculo.

$$V_{c,Rd,z} : \frac{39.92}{\text{ kN}}$$

Resistencia a torsión (EAE 2011, Artículo 34.6)

La comprobación no procede, ya que no hay momento torsor.

Resistencia a cortante Z y momento torsor combinados (EAE 2011, Artículo 34.6)

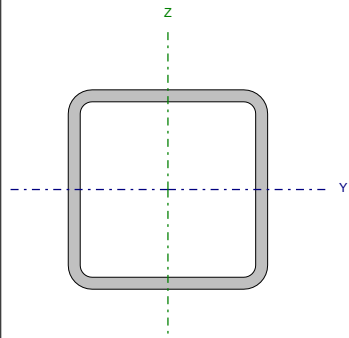
No hay interacción entre momento torsor y esfuerzo cortante para ninguna combinación. Por lo tanto, la comprobación no procede.

Resistencia a cortante Y y momento torsor combinados (EAE 2011, Artículo 34.6)

No hay interacción entre momento torsor y esfuerzo cortante para ninguna combinación. Por lo tanto, la comprobación no procede.



Barra N21/N22

Perfil: SHS 50x3.0 Material: Acero (S275 (EAE))							
	Nudos		Longitud (m)	Características mecánicas			
	Inicial	Final		Área (cm ²)	I _y ⁽¹⁾ (cm ⁴)	I _z ⁽¹⁾ (cm ⁴)	I _t ⁽²⁾ (cm ⁴)
	N21	N22	1.500	5.40	19.37	19.37	32.08
Notas: ⁽¹⁾ Inercia respecto al eje indicado ⁽²⁾ Momento de inercia a torsión uniforme							
	Pandeo			Pandeo lateral			
			Plano XY	Plano XZ	Ala sup.		Ala inf.
	β		1.00	1.00	0.00		0.00
	L _K		1.500	1.500	0.000		0.000
	C _m		1.000	1.000	1.000		1.000
	C ₁		-		1.000		
Notación: b: Coeficiente de pandeo L _K : Longitud de pandeo (m) C _m : Coeficiente de momentos C ₁ : Factor de modificación para el momento crítico							

**Limitación de esbeltez** (Criterio de CYPE Ingenieros, basado en: Figura 35.1.2 de la norma EAE 2011.)

La esbeltez reducida $\bar{\lambda}$ de las barras comprimidas debe ser inferior al valor 3.0.

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr}}}$$

$$\bar{\lambda} : \underline{0.91} \quad \checkmark$$

Donde:

Clase: Clase de la sección, según la capacidad de deformación y de desarrollo de la resistencia plástica de los elementos planos comprimidos de una sección.

$$\text{Clase} : \underline{1}$$

A: Área de la sección bruta para las secciones de clase 1, 2 y 3.

$$A : \underline{5.40} \text{ cm}^2$$

f_y : Límite elástico. (EAE 2011, Artículo 27)

$$f_y : \underline{275.00} \text{ MPa}$$

N_{cr} : Axil crítico de pandeo elástico.

$$N_{cr} : \underline{178.39} \text{ kN}$$

El axil crítico de pandeo elástico N_{cr} es el menor de los valores obtenidos en a), b) y c):

a) Axil crítico elástico de pandeo por flexión respecto al eje Y.

$$N_{cr,y} : \underline{178.39} \text{ kN}$$

$$N_{cr,y} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{L_{ky}^2}$$

b) Axil crítico elástico de pandeo por flexión respecto al eje Z.

$$N_{cr,z} : \underline{178.39} \text{ kN}$$

$$N_{cr,z} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{L_{kz}^2}$$

c) Axil crítico elástico de pandeo por torsión.

$$N_{cr,T} : \underline{\infty}$$

$$N_{cr,T} = \frac{1}{i_0^2} \cdot \left[G \cdot I_t + \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_w}{L_{kt}^2} \right]$$

Donde:

I_y : Momento de inercia de la sección bruta, respecto al eje Y.

$$I_y : \underline{19.37} \text{ cm}^4$$

I_z : Momento de inercia de la sección bruta, respecto al eje Z.

$$I_z : \underline{19.37} \text{ cm}^4$$

I_t : Momento de inercia a torsión uniforme.

$$I_t : \underline{32.08} \text{ cm}^4$$

I_w : Constante de alabeo de la sección.

$$I_w : \underline{0.00} \text{ cm}^6$$

E: Módulo de elasticidad.

$$E : \underline{210000} \text{ MPa}$$

G: Módulo de elasticidad transversal.

$$G : \underline{81000} \text{ MPa}$$

L_{ky} : Longitud efectiva de pandeo por flexión, respecto al eje Y.

$$L_{ky} : \underline{1.500} \text{ m}$$

L_{kz} : Longitud efectiva de pandeo por flexión, respecto al eje Z.

$$L_{kz} : \underline{1.500} \text{ m}$$

L_{kt} : Longitud efectiva de pandeo por torsión.

$$L_{kt} : \underline{0.000} \text{ m}$$

i_0 : Radio de giro polar de la sección bruta, respecto al centro de torsión.

$$i_0 : \underline{2.68} \text{ cm}$$

$$i_0 = \left(i_y^2 + i_z^2 + y_0^2 + z_0^2 \right)^{0.5}$$

Siendo:

i_y , i_z : Radios de giro de la sección bruta, respecto a los ejes principales de inercia Y y Z.

$$i_y : \underline{1.89} \text{ cm}$$

$$i_z : \underline{1.89} \text{ cm}$$

y_0 , z_0 : Coordenadas del centro de torsión en la dirección de los ejes principales Y y Z, respectivamente, relativas al centro de gravedad de la sección.

$$y_0 : \underline{0.00} \text{ mm}$$

$$z_0 : \underline{0.00} \text{ mm}$$

**Abolladura del alma inducida por el ala comprimida (EAE 2011, Artículo 35.8)**

Se debe satisfacer:

$$\frac{h_w}{t_w} \leq k \frac{E}{f_{yf}} \sqrt{\frac{A_w}{A_{fc,ef}}}$$

$$14.67 \leq 303.92 \quad \checkmark$$

Donde:

 h_w : Altura del alma.

h_w : 44.00 mm

 t_w : Espesor del alma.

t_w : 3.00 mm

 A_w : Área del alma.

A_w : 2.64 cm²

 $A_{fc,ef}$: Área reducida del ala comprimida.

$A_{fc,ef}$: 1.50 cm²

k: Coeficiente que depende de la clase de la sección.

k : 0.30

E: Módulo de elasticidad.

E : 210000 MPa

 f_{yf} : Límite elástico del acero del ala comprimida.

f_{yf} : 275.00 MPa

Siendo:

$$f_{yf} = f_y$$

Resistencia a tracción (EAE 2011, Artículo 34.2)

La comprobación no procede, ya que no hay axil de tracción.

Resistencia a compresión (EAE 2011, Artículo 34.3)

Se debe satisfacer:

$$\eta = \frac{N_{c,Ed}}{N_{c,Rd}} \leq 1$$

$$\eta : \underline{0.216} \quad \checkmark$$

$$\eta = \frac{N_{c,Ed}}{N_{b,Rd}} \leq 1$$

$$\eta : \underline{0.365} \quad \checkmark$$

El esfuerzo solicitante de cálculo pésimo se produce para la combinación de acciones 1.35·PP+1.35·CM1+1.5·SobrecargaUso.

 $N_{c,Ed}$: Axil de compresión solicitante de cálculo pésimo.

$N_{c,Ed}$: 30.62 kN

La resistencia de cálculo a compresión $N_{c,Rd}$ viene dada por:

$$N_{c,Rd} = A \cdot f_{yd}$$

$N_{c,Rd}$: 141.50 kN

Donde:

Clase: Clase de la sección, según la capacidad de deformación y de desarrollo de la resistencia plástica de los elementos planos comprimidos de una sección.

Clase : 1

A: Área de la sección bruta para las secciones de clase 1, 2 y 3.

A : 5.40 cm²

 f_{yd} : Resistencia de cálculo del acero.

f_{yd} : 261.90 MPa

$$f_{yd} = f_y / \gamma_{M0}$$

Siendo:

 f_y : Límite elástico. (EAE 2011, Artículo 27)

f_y : 275.00 MPa

 γ_{M0} : Coeficiente parcial de seguridad del material.

γ_{M0} : 1.05

Resistencia a pandeo: (EAE 2011, Artículo 35.1)



La resistencia de cálculo a pandeo $N_{b,Rd}$ en una barra comprimida viene dada por:

$$N_{b,Rd} = \chi \cdot A \cdot f_{yd}$$

$$N_{b,Rd} : \underline{83.78} \text{ kN}$$

Donde:

A: Área de la sección bruta para las secciones de clase 1, 2 y 3.

$$A : \underline{5.40} \text{ cm}^2$$

f_{yd} : Resistencia de cálculo del acero.

$$f_{yd} : \underline{261.90} \text{ MPa}$$

$$f_{yd} = f_y / \gamma_{M1}$$

Siendo:

f_y : Límite elástico. (EAE 2011, Artículo 27)

$$f_y : \underline{275.00} \text{ MPa}$$

γ_{M1} : Coeficiente parcial de seguridad del material.

$$\gamma_{M1} : \underline{1.05}$$

c: Coeficiente de reducción por pandeo.

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

$$C_y : \underline{0.59}$$

$$C_z : \underline{0.59}$$

Siendo:

$$\Phi = 0.5 \cdot \left[1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda} - 0.2) + (\bar{\lambda})^2 \right]$$

$$f_y : \underline{1.09}$$

$$f_z : \underline{1.09}$$

a: Coeficiente de imperfección elástica.

$$a_y : \underline{0.49}$$

$$a_z : \underline{0.49}$$

$\bar{\lambda}$: Esbeltez reducida.

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr}}}$$

$$\bar{\lambda}_y : \underline{0.91}$$

$$\bar{\lambda}_z : \underline{0.91}$$

N_{cr} : Axil crítico elástico de pandeo, obtenido como el menor de los siguientes valores:

$$N_{cr} : \underline{178.39} \text{ kN}$$

$N_{cr,y}$: Axil crítico elástico de pandeo por flexión respecto al eje Y.

$$N_{cr,y} : \underline{178.39} \text{ kN}$$

$N_{cr,z}$: Axil crítico elástico de pandeo por flexión respecto al eje Z.

$$N_{cr,z} : \underline{178.39} \text{ kN}$$

$N_{cr,T}$: Axil crítico elástico de pandeo por torsión.

$$N_{cr,T} : \underline{\infty}$$

**Resistencia a flexión eje Y (EAE 2011, Artículo 34.4)**

Se debe satisfacer:

$$\eta = \frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} \leq 1$$

$$h : \underline{0.013} \quad \checkmark$$

Para flexión positiva:

El esfuerzo solicitante de cálculo pésimo se produce en el nudo N22, para la combinación de acciones 1.35·PP+1.35·CM1+1.5·SobrecargaUso.

 M_{Ed}^+ : Momento flector solicitante de cálculo pésimo.

$$M_{Ed}^+ : \underline{0.03} \text{ kN}\cdot\text{m}$$

Para flexión negativa:

 M_{Ed}^- : Momento flector solicitante de cálculo pésimo.

$$M_{Ed}^- : \underline{0.00} \text{ kN}\cdot\text{m}$$

El momento flector resistente de cálculo $M_{c,Rd}$ viene dado por:

$$M_{c,Rd} = W_{pl,y} \cdot f_{yd}$$

$$M_{c,Rd} : \underline{2.61} \text{ kN}\cdot\text{m}$$

Donde:

Clase: Clase de la sección, según la capacidad de deformación y de desarrollo de la resistencia plástica de los elementos planos de una sección a flexión simple.

$$\text{Clase} : \underline{1}$$

 $W_{pl,y}$: Módulo resistente plástico correspondiente a la fibra con mayor tensión, para las secciones de clase 1 y 2.

$$W_{pl,y} : \underline{9.95} \text{ cm}^3$$

 f_{yd} : Resistencia de cálculo del acero.

$$f_{yd} : \underline{261.90} \text{ MPa}$$

$$f_{yd} = f_y / \gamma_{M0}$$

Siendo:

 f_y : Límite elástico. (EAE 2011, Artículo 27)

$$f_y : \underline{275.00} \text{ MPa}$$

 γ_{M0} : Coeficiente parcial de seguridad del material.

$$\gamma_{M0} : \underline{1.05}$$

Resistencia a flexión eje Z (EAE 2011, Artículo 34.4)

La comprobación no procede, ya que no hay momento flector.

**Resistencia a corte Z (EAE 2011, Artículo 34.5)**

Se debe satisfacer:

$$\eta = \frac{V_{Ed}}{V_{c,Rd}} \leq 1$$

$$h : \underline{0.002} \quad \checkmark$$

El esfuerzo solicitante de cálculo pésimo se produce en el nudo N21, para la combinación de acciones 1.35·PP+1.35·CM1+1.5·SobrecargaUso.

V_{Ed} : Esfuerzo cortante solicitante de cálculo pésimo.

$$V_{Ed} : \underline{0.08} \text{ kN}$$

El esfuerzo cortante resistente de cálculo $V_{c,Rd}$ viene dado por:

$$V_{c,Rd} = A_v \cdot \frac{f_{yd}}{\sqrt{3}}$$

$$V_{c,Rd} : \underline{39.92} \text{ kN}$$

Donde:

A_v : Área transversal a cortante.

$$A_v : \underline{2.64} \text{ cm}^2$$

$$A_v = 2 \cdot d \cdot t_w$$

Siendo:

d: Altura del alma.

$$d : \underline{44.00} \text{ mm}$$

t_w : Espesor del alma.

$$t_w : \underline{3.00} \text{ mm}$$

f_{yd} : Resistencia de cálculo del acero.

$$f_{yd} : \underline{261.90} \text{ MPa}$$

$$f_{yd} = f_y / \gamma_{M0}$$

Siendo:

f_y : Límite elástico. (EAE 2011, Artículo 27)

$$f_y : \underline{275.00} \text{ MPa}$$

γ_{M0} : Coeficiente parcial de seguridad del material.

$$\gamma_{M0} : \underline{1.05}$$

Abolladura por cortante del alma: (EAE 2011, Artículo 35.5)

Aunque no se han dispuesto rigidizadores transversales, no es necesario comprobar la resistencia a la abolladura del alma, puesto que se cumple:

$$\frac{d}{t_w} < \frac{72}{\eta} \cdot \varepsilon$$

$$14.67 < 55.46 \quad \checkmark$$

Donde:

l_w : Esbeltez del alma.

$$l_w : \underline{14.67}$$

$$\lambda_w = \frac{d}{t_w}$$

$l_{m\acute{a}x}$: Esbeltez máxima.

$$l_{m\acute{a}x} : \underline{55.46}$$

$$\lambda_{m\acute{a}x} = \frac{72}{\eta} \cdot \varepsilon$$

h: Coeficiente que permite considerar la resistencia adicional en régimen plástico debida al endurecimiento por deformación del material.

$$h : \underline{1.20}$$

e: Factor de reducción.

$$e : \underline{0.92}$$

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{f_{ref}}{f_y}}$$

Siendo:

f_{ref} : Límite elástico de referencia.

$$f_{ref} : \underline{235.00} \text{ MPa}$$

f_y : Límite elástico. (EAE 2011, Artículo 27)

$$f_y : \underline{275.00} \text{ MPa}$$

**Resistencia a corte Y (EAE 2011, Artículo 34.5)**

La comprobación no procede, ya que no hay esfuerzo cortante.

Resistencia a momento flector Y y fuerza cortante Z combinados (EAE 2011, Artículo 34.7.1)

No es necesario reducir la resistencia de cálculo a flexión, ya que el esfuerzo cortante solicitante de cálculo pésimo V_{Ed} no es superior al 50% de la resistencia de cálculo a cortante $V_{c,Rd}$.

$$V_{Ed} \leq \frac{V_{c,Rd}}{2}$$

$$0.08 \text{ kN} \leq 19.96 \text{ kN} \quad \checkmark$$

Los esfuerzos solicitantes de cálculo pésimos se producen para la combinación de acciones 1.35·PP+1.35·CM1+1.5·SobrecargaUso.

V_{Ed} : Esfuerzo cortante solicitante de cálculo pésimo.

$$V_{Ed} : \underline{0.08} \text{ kN}$$

$V_{c,Rd}$: Esfuerzo cortante resistente de cálculo.

$$V_{c,Rd} : \underline{39.92} \text{ kN}$$

Resistencia a momento flector Z y fuerza cortante Y combinados (EAE 2011, Artículo 34.7.1)

No hay interacción entre momento flector y esfuerzo cortante para ninguna combinación. Por lo tanto, la comprobación no procede.

Resistencia a flexión y axil combinados (EAE 2011, Artículo 34.7.2)

Se debe satisfacer:

$$\eta = \frac{M_{y,Ed}}{M_{N,Rd,y}} \leq 1$$

$$h : \underline{0.013} \quad \checkmark$$

$$\eta = \frac{N_{c,Ed}}{\chi_y \cdot A \cdot f_{yd}} + k_{yy} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot W_{pl,y} \cdot f_{yd}} + k_{yz} \cdot \frac{M_{z,Ed}}{W_{pl,z} \cdot f_{yd}} \leq 1$$

$$h : \underline{0.380} \quad \checkmark$$

$$\eta = \frac{N_{c,Ed}}{\chi_z \cdot A \cdot f_{yd}} + k_{zy} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot W_{pl,y} \cdot f_{yd}} + k_{zz} \cdot \frac{M_{z,Ed}}{W_{pl,z} \cdot f_{yd}} \leq 1$$

$$h : \underline{0.375} \quad \checkmark$$

Los esfuerzos solicitantes de cálculo pésimos se producen en el nudo N22, para la combinación de acciones 1.35·PP+1.35·CM1+1.5·SobrecargaUso.

Donde:

$N_{c,Ed}$: Axil de compresión solicitante de cálculo.

$$N_{c,Ed} : \underline{30.62} \text{ kN}$$

$M_{y,Ed}$, $M_{z,Ed}$: Momentos flectores solicitantes de cálculo pésimos, según los ejes Y y Z, respectivamente.

$$M_{y,Ed}^+ : \underline{0.03} \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$M_{z,Ed}^+ : \underline{0.00} \text{ kN}\cdot\text{m}$$

Clase: Clase de la sección, según la capacidad de deformación y de desarrollo de la resistencia plástica de sus elementos planos, para axil y flexión simple.

$$\text{Clase} : \underline{1}$$

$M_{N,Rd,y}$: Momento flector resistente plástico reducido de cálculo, alrededor del eje Y.

$$M_{N,Rd,y} : \underline{2.61} \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$M_{N,Rd,y} = M_{pl,Rd,y} \cdot (1 - n) / (1 - 0.5 \cdot a_w) \leq M_{pl,Rd,y}$$

Siendo:

$$n = N_{c,Ed} / N_{pl,Rd}$$

$$n : \underline{0.216}$$

$N_{pl,Rd}$: Resistencia a compresión de la sección bruta.

$$N_{pl,Rd} : \underline{141.50} \text{ kN}$$

$M_{pl,Rd,y}$: Resistencia a flexión de la sección bruta en régimen plástico, respecto al eje Y.

$$M_{pl,Rd,y} : \underline{2.61} \text{ kN}\cdot\text{m}$$



$$a_w = (A - 2 \cdot b \cdot t_f) / A \leq 0.5$$

A: Área de la sección bruta.

b: Ancho del ala.

t_f: Espesor del ala.

$$a_w : \underline{0.44}$$

$$A : \underline{5.40} \text{ cm}^2$$

$$b : \underline{5.00} \text{ cm}$$

$$t_f : \underline{3.00} \text{ mm}$$

Resistencia a pandeo: (EAE 2011, Artículo 35.3)

A: Área de la sección bruta.

W_{pl,y}, W_{pl,z}: Módulos resistentes plásticos correspondientes a la fibra con mayor tensión, alrededor de los ejes Y y Z, respectivamente.

f_{yd}: Resistencia de cálculo del acero.

$$f_{yd} = f_y / \gamma_{M1}$$

Siendo:

f_y: Límite elástico. (EAE 2011, Artículo 27)

g_{M1}: Coeficiente parcial de seguridad del material.

$$A : \underline{5.40} \text{ cm}^2$$

$$W_{pl,y} : \underline{9.95} \text{ cm}^3$$

$$W_{pl,z} : \underline{9.95} \text{ cm}^3$$

$$f_{yd} : \underline{261.90} \text{ MPa}$$

$$f_y : \underline{275.00} \text{ MPa}$$

$$g_{M1} : \underline{1.05}$$

K_{yy}, K_{yz}, K_{zy}, K_{zz}: Coeficientes de interacción.

$$k_{yy} = C_{m,y} \cdot C_{m,LT} \cdot \frac{\mu_y}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}} \cdot \frac{1}{C_{yy}}$$

$$K_{yy} : \underline{1.13}$$

$$k_{yz} = C_{m,z} \cdot \frac{\mu_y}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}} \cdot \frac{1}{C_{yz}} \cdot 0.6 \cdot \sqrt{\frac{W_z}{W_y}}$$

$$K_{yz} : \underline{0.73}$$

$$k_{zy} = C_{m,y} \cdot C_{m,LT} \cdot \frac{\mu_z}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}} \cdot \frac{1}{C_{zy}} \cdot 0.6 \cdot \sqrt{\frac{W_y}{W_z}}$$

$$K_{zy} : \underline{0.73}$$

$$k_{zz} = C_{m,z} \cdot \frac{\mu_z}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}} \cdot \frac{1}{C_{zz}}$$

$$K_{zz} : \underline{1.13}$$

Términos auxiliares:

$$\mu_y = \frac{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}}{1 - \chi_y \cdot \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}}$$

$$m_y : \underline{0.92}$$

$$\mu_z = \frac{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}}{1 - \chi_z \cdot \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}}$$

$$m_z : \underline{0.92}$$

$$C_{yy} = 1 + (w_y - 1) \cdot \left[\left(2 - \frac{1.6}{w_y} \cdot C_{m,y}^2 \cdot \bar{\lambda}_{max} - \frac{1.6}{w_y} \cdot C_{m,y}^2 \cdot \bar{\lambda}_{max}^2 \right) \cdot n_{pl} - b_{LT} \right] \geq \frac{W_{el,y}}{W_{pl,y}}$$

$$C_{yy} : \underline{0.99}$$

$$C_{yz} = 1 + (w_z - 1) \cdot \left[\left(2 - 14 \cdot \frac{C_{m,z}^2 \cdot \bar{\lambda}_{max}^2}{w_z^5} \right) \cdot n_{pl} - c_{LT} \right] \geq 0.6 \cdot \sqrt{\frac{W_z}{W_y}} \cdot \frac{W_{el,z}}{W_{pl,z}}$$

$$C_{yz} : \underline{0.92}$$

$$C_{zy} = 1 + (w_y - 1) \cdot \left[\left(2 - 14 \cdot \frac{C_{m,y}^2 \cdot \bar{\lambda}_{max}^2}{w_y^5} \right) \cdot n_{pl} - d_{LT} \right] \geq 0.6 \cdot \sqrt{\frac{W_y}{W_z}} \cdot \frac{W_{el,y}}{W_{pl,y}}$$

$$C_{zy} : \underline{0.92}$$

$$C_{zz} = 1 + (w_z - 1) \cdot \left[\left(2 - \frac{1.6}{w_z} \cdot C_{m,z}^2 \cdot \bar{\lambda}_{max} - \frac{1.6}{w_z} \cdot C_{m,z}^2 \cdot \bar{\lambda}_{max}^2 - e_{LT} \right) \cdot n_{pl} \right] \geq \frac{W_{el,z}}{W_{pl,z}}$$

$$C_{zz} : \underline{0.99}$$



$$a_{LT} = 1 - \frac{I_t}{I_y} \geq 0 \quad a_{LT} : \underline{0.00}$$

$$b_{LT} = 0.5 \cdot a_{LT} \cdot \bar{\lambda}_0^{-2} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot M_{pl,Rd,y}} \cdot \frac{M_{z,Ed}}{M_{pl,Rd,z}} \quad b_{LT} : \underline{0.00}$$

$$c_{LT} = 10 \cdot a_{LT} \cdot \frac{\bar{\lambda}_0^{-2}}{5 + \bar{\lambda}_z^{-4}} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{C_{m,y} \cdot \chi_{LT} \cdot M_{pl,Rd,y}} \quad c_{LT} : \underline{0.00}$$

$$d_{LT} = 2 \cdot a_{LT} \cdot \frac{\bar{\lambda}_0}{0.1 + \bar{\lambda}_z^{-4}} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{C_{m,y} \cdot \chi_{LT} \cdot M_{pl,Rd,y}} \cdot \frac{M_{z,Ed}}{C_{m,z} \cdot M_{pl,Rd,z}} \quad d_{LT} : \underline{0.00}$$

$$e_{LT} = 1.7 \cdot a_{LT} \cdot \frac{\bar{\lambda}_0}{0.1 + \bar{\lambda}_z^{-4}} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{C_{m,y} \cdot \chi_{LT} \cdot M_{pl,Rd,y}} \quad e_{LT} : \underline{0.00}$$

$$w_y = \frac{W_{pl,y}}{W_{el,y}} \leq 1.5 \quad w_y : \underline{1.28}$$

$$w_z = \frac{W_{pl,z}}{W_{el,z}} \leq 1.5 \quad w_z : \underline{1.28}$$

$$n_{pl} = \frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}} \quad n_{pl} : \underline{0.22}$$

Puesto que:

$$\bar{\lambda}_0 \leq 0.2 \cdot \sqrt{C_1} \cdot \sqrt[4]{\left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}\right) \cdot \left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}\right)} \quad 0.00 \leq 0.18$$

$$C_{m,y} = C_{m,y,0} \quad C_{m,y} : \underline{1.00}$$

$$C_{m,z} = C_{m,z,0} \quad C_{m,z} : \underline{1.00}$$

$$C_{m,LT} = 1.00 \quad C_{m,LT} : \underline{1.00}$$

$C_{m,y,0}$, $C_{m,z,0}$: Factores de momento flector uniforme equivalente.

$$C_{m,y,0} : \underline{1.00}$$

$$C_{m,z,0} : \underline{1.00}$$

$$C_1 : \underline{1.00}$$

C_1 : Factor que depende de las condiciones de apoyo y de la forma de la ley de momentos flectores sobre la barra.

c_y , c_z : Coeficientes de reducción por pandeo, alrededor de los ejes Y y Z, respectivamente.

$$c_y : \underline{0.59}$$

$$c_z : \underline{0.59}$$

c_{LT} : Coeficiente de reducción por pandeo lateral.

$$c_{LT} : \underline{1.00}$$

$\bar{I}_{m\acute{a}x}$: Esbeltez máxima entre $\bar{\lambda}_y$ y $\bar{\lambda}_z$.

$$\bar{I}_{m\acute{a}x} : \underline{0.91}$$

\bar{I}_y , \bar{I}_z : Esbelteces reducidas en relación a los ejes Y y Z, respectivamente.

$$\bar{I}_y : \underline{0.91}$$

$$\bar{I}_z : \underline{0.91}$$

\bar{I}_{LT} : Esbeltez reducida.

$$\bar{I}_{LT} : \underline{0.00}$$

\bar{I}_0 : Esbeltez reducida, en relación al pandeo lateral, para un momento flector uniforme.

$$\bar{I}_0 : \underline{0.00}$$

$W_{el,y}$, $W_{el,z}$: Módulos resistentes elásticos correspondientes a la fibra comprimida, alrededor de los ejes Y y Z, respectivamente.

$$W_{el,y} : \underline{7.75} \text{ cm}^3$$

$$W_{el,z} : \underline{7.75} \text{ cm}^3$$

$N_{cr,y}$: Axil crítico elástico de pandeo por flexión respecto al eje Y.

$$N_{cr,y} : \underline{178.39} \text{ kN}$$

$N_{cr,z}$: Axil crítico elástico de pandeo por flexión respecto al eje Z.

$$N_{cr,z} : \underline{178.39} \text{ kN}$$

I_y : Momento de inercia de la sección bruta, respecto al eje Y.

$$I_y : \underline{19.37} \text{ cm}^4$$

I_t : Momento de inercia a torsión uniforme.

$$I_t : \underline{32.08} \text{ cm}^4$$

**Resistencia a flexión, axil y cortante combinados (EAE 2011, Artículo 34.7.3)**

No es necesario reducir las resistencias de cálculo a flexión y a axil, ya que se puede ignorar el efecto de abolladura por esfuerzo cortante y, además, el esfuerzo cortante solicitante de cálculo pésimo V_{Ed} es menor o igual que el 50% del esfuerzo cortante resistente de cálculo $V_{c,Rd}$.

Los esfuerzos solicitantes de cálculo pésimos se producen para la combinación de acciones $1.35 \cdot PP + 1.35 \cdot CM1 + 1.5 \cdot SobrecargaUso$.

$$V_{Ed,z} \leq \frac{V_{c,Rd,z}}{2}$$

$$0.08 \text{ kN} \leq 19.96 \text{ kN} \quad \checkmark$$

Donde:

$V_{Ed,z}$: Esfuerzo cortante solicitante de cálculo pésimo.

$$V_{Ed,z} : \underline{0.08} \text{ kN}$$

$V_{c,Rd,z}$: Esfuerzo cortante resistente de cálculo.

$$V_{c,Rd,z} : \underline{39.92} \text{ kN}$$

Resistencia a torsión (EAE 2011, Artículo 34.6)

La comprobación no procede, ya que no hay momento torsor.

Resistencia a cortante Z y momento torsor combinados (EAE 2011, Artículo 34.6)

No hay interacción entre momento torsor y esfuerzo cortante para ninguna combinación. Por lo tanto, la comprobación no procede.

Resistencia a cortante Y y momento torsor combinados (EAE 2011, Artículo 34.6)

No hay interacción entre momento torsor y esfuerzo cortante para ninguna combinación. Por lo tanto, la comprobación no procede.



Barra N24/N25

Perfil: SHS 50x3.0 Material: Acero (S275 (EAE))							
	Nudos		Longitud (m)	Características mecánicas			
	Inicial	Final		Área (cm ²)	I _y ⁽¹⁾ (cm ⁴)	I _z ⁽¹⁾ (cm ⁴)	I _t ⁽²⁾ (cm ⁴)
	N24	N25	1.500	5.40	19.37	19.37	32.08
Notas: ⁽¹⁾ Inercia respecto al eje indicado ⁽²⁾ Momento de inercia a torsión uniforme							
	Pandeo			Pandeo lateral			
	Plano XY	Plano XZ	Ala sup.	Ala inf.			
β	1.00	1.00	0.00	0.00			
L _K	1.500	1.500	0.000	0.000			
C _m	1.000	1.000	1.000	1.000			
C ₁	-		1.000				
Notación: b: Coeficiente de pandeo L _K : Longitud de pandeo (m) C _m : Coeficiente de momentos C ₁ : Factor de modificación para el momento crítico							

**Limitación de esbeltez** (Criterio de CYPE Ingenieros, basado en: Figura 35.1.2 de la norma EAE 2011.)

La esbeltez reducida $\bar{\lambda}$ de las barras comprimidas debe ser inferior al valor 3.0.

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr}}}$$

$$\bar{\lambda} : \underline{0.91} \quad \checkmark$$

Donde:

Clase: Clase de la sección, según la capacidad de deformación y de desarrollo de la resistencia plástica de los elementos planos comprimidos de una sección.

$$\text{Clase} : \underline{1}$$

A: Área de la sección bruta para las secciones de clase 1, 2 y 3.

$$A : \underline{5.40} \text{ cm}^2$$

f_y : Límite elástico. (EAE 2011, Artículo 27)

$$f_y : \underline{275.00} \text{ MPa}$$

N_{cr} : Axil crítico de pandeo elástico.

$$N_{cr} : \underline{178.39} \text{ kN}$$

El axil crítico de pandeo elástico N_{cr} es el menor de los valores obtenidos en a), b) y c):

a) Axil crítico elástico de pandeo por flexión respecto al eje Y.

$$N_{cr,y} : \underline{178.39} \text{ kN}$$

$$N_{cr,y} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{L_{ky}^2}$$

b) Axil crítico elástico de pandeo por flexión respecto al eje Z.

$$N_{cr,z} : \underline{178.39} \text{ kN}$$

$$N_{cr,z} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{L_{kz}^2}$$

c) Axil crítico elástico de pandeo por torsión.

$$N_{cr,T} : \underline{\infty}$$

$$N_{cr,T} = \frac{1}{i_0^2} \cdot \left[G \cdot I_t + \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_w}{L_{kt}^2} \right]$$

Donde:

I_y : Momento de inercia de la sección bruta, respecto al eje Y.

$$I_y : \underline{19.37} \text{ cm}^4$$

I_z : Momento de inercia de la sección bruta, respecto al eje Z.

$$I_z : \underline{19.37} \text{ cm}^4$$

I_t : Momento de inercia a torsión uniforme.

$$I_t : \underline{32.08} \text{ cm}^4$$

I_w : Constante de alabeo de la sección.

$$I_w : \underline{0.00} \text{ cm}^6$$

E: Módulo de elasticidad.

$$E : \underline{210000} \text{ MPa}$$

G: Módulo de elasticidad transversal.

$$G : \underline{81000} \text{ MPa}$$

L_{ky} : Longitud efectiva de pandeo por flexión, respecto al eje Y.

$$L_{ky} : \underline{1.500} \text{ m}$$

L_{kz} : Longitud efectiva de pandeo por flexión, respecto al eje Z.

$$L_{kz} : \underline{1.500} \text{ m}$$

L_{kt} : Longitud efectiva de pandeo por torsión.

$$L_{kt} : \underline{0.000} \text{ m}$$

i_0 : Radio de giro polar de la sección bruta, respecto al centro de torsión.

$$i_0 : \underline{2.68} \text{ cm}$$

$$i_0 = (i_y^2 + i_z^2 + y_0^2 + z_0^2)^{0.5}$$

Siendo:

i_y , i_z : Radios de giro de la sección bruta, respecto a los ejes principales de inercia Y y Z.

$$i_y : \underline{1.89} \text{ cm}$$

$$i_z : \underline{1.89} \text{ cm}$$

y_0 , z_0 : Coordenadas del centro de torsión en la dirección de los ejes principales Y y Z, respectivamente, relativas al centro de gravedad de la sección.

$$y_0 : \underline{0.00} \text{ mm}$$

$$z_0 : \underline{0.00} \text{ mm}$$

**Abolladura del alma inducida por el ala comprimida (EAE 2011, Artículo 35.8)**

Se debe satisfacer:

$$\frac{h_w}{t_w} \leq k \frac{E}{f_{yf}} \sqrt{\frac{A_w}{A_{fc,ef}}}$$

$$14.67 \leq 303.92 \quad \checkmark$$

Donde:

 h_w : Altura del alma.

h_w : 44.00 mm

 t_w : Espesor del alma.

t_w : 3.00 mm

 A_w : Área del alma.

A_w : 2.64 cm²

 $A_{fc,ef}$: Área reducida del ala comprimida.

$A_{fc,ef}$: 1.50 cm²

k: Coeficiente que depende de la clase de la sección.

k : 0.30

E: Módulo de elasticidad.

E : 210000 MPa

 f_{yf} : Límite elástico del acero del ala comprimida.

f_{yf} : 275.00 MPa

Siendo:

$$f_{yf} = f_y$$

Resistencia a tracción (EAE 2011, Artículo 34.2)

La comprobación no procede, ya que no hay axil de tracción.

Resistencia a compresión (EAE 2011, Artículo 34.3)

Se debe satisfacer:

$$\eta = \frac{N_{c,Ed}}{N_{c,Rd}} \leq 1$$

$$\eta : \underline{0.216} \quad \checkmark$$

$$\eta = \frac{N_{c,Ed}}{N_{b,Rd}} \leq 1$$

$$\eta : \underline{0.365} \quad \checkmark$$

El esfuerzo solicitante de cálculo pésimo se produce para la combinación de acciones 1.35·PP+1.35·CM1+1.5·SobrecargaUso.

 $N_{c,Ed}$: Axil de compresión solicitante de cálculo pésimo.

$N_{c,Ed}$: 30.62 kN

La resistencia de cálculo a compresión $N_{c,Rd}$ viene dada por:

$$N_{c,Rd} = A \cdot f_{yd}$$

$N_{c,Rd}$: 141.50 kN

Donde:

Clase: Clase de la sección, según la capacidad de deformación y de desarrollo de la resistencia plástica de los elementos planos comprimidos de una sección.

Clase : 1

A: Área de la sección bruta para las secciones de clase 1, 2 y 3.

A : 5.40 cm²

 f_{yd} : Resistencia de cálculo del acero.

f_{yd} : 261.90 MPa

$$f_{yd} = f_y / \gamma_{M0}$$

Siendo:

 f_y : Límite elástico. (EAE 2011, Artículo 27)

f_y : 275.00 MPa

 γ_{M0} : Coeficiente parcial de seguridad del material.

γ_{M0} : 1.05

Resistencia a pandeo: (EAE 2011, Artículo 35.1)



La resistencia de cálculo a pandeo $N_{b,Rd}$ en una barra comprimida viene dada por:

$$N_{b,Rd} = \chi \cdot A \cdot f_{yd}$$

$$N_{b,Rd} : \underline{83.78} \text{ kN}$$

Donde:

A: Área de la sección bruta para las secciones de clase 1, 2 y 3.

$$A : \underline{5.40} \text{ cm}^2$$

f_{yd} : Resistencia de cálculo del acero.

$$f_{yd} : \underline{261.90} \text{ MPa}$$

$$f_{yd} = f_y / \gamma_{M1}$$

Siendo:

f_y : Límite elástico. (EAE 2011, Artículo 27)

$$f_y : \underline{275.00} \text{ MPa}$$

γ_{M1} : Coeficiente parcial de seguridad del material.

$$\gamma_{M1} : \underline{1.05}$$

c: Coeficiente de reducción por pandeo.

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

$$C_y : \underline{0.59}$$

$$C_z : \underline{0.59}$$

Siendo:

$$\Phi = 0.5 \cdot \left[1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda} - 0.2) + (\bar{\lambda})^2 \right]$$

$$f_y : \underline{1.09}$$

$$f_z : \underline{1.09}$$

a: Coeficiente de imperfección elástica.

$$a_y : \underline{0.49}$$

$$a_z : \underline{0.49}$$

$\bar{\lambda}$: Esbeltez reducida.

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr}}}$$

$$\bar{\lambda}_y : \underline{0.91}$$

$$\bar{\lambda}_z : \underline{0.91}$$

N_{cr} : Axil crítico elástico de pandeo, obtenido como el menor de los siguientes valores:

$$N_{cr} : \underline{178.39} \text{ kN}$$

$N_{cr,y}$: Axil crítico elástico de pandeo por flexión respecto al eje Y.

$$N_{cr,y} : \underline{178.39} \text{ kN}$$

$N_{cr,z}$: Axil crítico elástico de pandeo por flexión respecto al eje Z.

$$N_{cr,z} : \underline{178.39} \text{ kN}$$

$N_{cr,T}$: Axil crítico elástico de pandeo por torsión.

$$N_{cr,T} : \underline{\infty}$$

**Resistencia a flexión eje Y (EAE 2011, Artículo 34.4)**

Se debe satisfacer:

$$\eta = \frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} \leq 1$$

$$h : \underline{0.013} \quad \checkmark$$

Para flexión positiva:

El esfuerzo solicitante de cálculo pésimo se produce en el nudo N24, para la combinación de acciones 1.35·PP+1.35·CM1+1.5·SobrecargaUso.

M_{Ed}^+ : Momento flector solicitante de cálculo pésimo.

$$M_{Ed}^+ : \underline{0.03} \text{ kN}\cdot\text{m}$$

Para flexión negativa:

M_{Ed}^- : Momento flector solicitante de cálculo pésimo.

$$M_{Ed}^- : \underline{0.00} \text{ kN}\cdot\text{m}$$

El momento flector resistente de cálculo $M_{c,Rd}$ viene dado por:

$$M_{c,Rd} = W_{pl,y} \cdot f_{yd}$$

$$M_{c,Rd} : \underline{2.61} \text{ kN}\cdot\text{m}$$

Donde:

Clase: Clase de la sección, según la capacidad de deformación y de desarrollo de la resistencia plástica de los elementos planos de una sección a flexión simple.

$$\text{Clase} : \underline{1}$$

$W_{pl,y}$: Módulo resistente plástico correspondiente a la fibra con mayor tensión, para las secciones de clase 1 y 2.

$$W_{pl,y} : \underline{9.95} \text{ cm}^3$$

f_{yd} : Resistencia de cálculo del acero.

$$f_{yd} : \underline{261.90} \text{ MPa}$$

$$f_{yd} = f_y / \gamma_{M0}$$

Siendo:

f_y : Límite elástico. (EAE 2011, Artículo 27)

$$f_y : \underline{275.00} \text{ MPa}$$

γ_{M0} : Coeficiente parcial de seguridad del material.

$$\gamma_{M0} : \underline{1.05}$$

Resistencia a flexión eje Z (EAE 2011, Artículo 34.4)

La comprobación no procede, ya que no hay momento flector.

**Resistencia a corte Z (EAE 2011, Artículo 34.5)**

Se debe satisfacer:

$$\eta = \frac{V_{Ed}}{V_{c,Rd}} \leq 1$$

$$h : \underline{0.002} \quad \checkmark$$

El esfuerzo solicitante de cálculo pésimo se produce en el nudo N25, para la combinación de acciones 1.35·PP+1.35·CM1+1.5·SobrecargaUso.

V_{Ed} : Esfuerzo cortante solicitante de cálculo pésimo.

$$V_{Ed} : \underline{0.08} \text{ kN}$$

El esfuerzo cortante resistente de cálculo $V_{c,Rd}$ viene dado por:

$$V_{c,Rd} = A_v \cdot \frac{f_{yd}}{\sqrt{3}}$$

$$V_{c,Rd} : \underline{39.92} \text{ kN}$$

Donde:

A_v : Área transversal a cortante.

$$A_v : \underline{2.64} \text{ cm}^2$$

$$A_v = 2 \cdot d \cdot t_w$$

Siendo:

d: Altura del alma.

$$d : \underline{44.00} \text{ mm}$$

t_w : Espesor del alma.

$$t_w : \underline{3.00} \text{ mm}$$

f_{yd} : Resistencia de cálculo del acero.

$$f_{yd} : \underline{261.90} \text{ MPa}$$

$$f_{yd} = f_y / \gamma_{M0}$$

Siendo:

f_y : Límite elástico. (EAE 2011, Artículo 27)

$$f_y : \underline{275.00} \text{ MPa}$$

γ_{M0} : Coeficiente parcial de seguridad del material.

$$\gamma_{M0} : \underline{1.05}$$

Abolladura por cortante del alma: (EAE 2011, Artículo 35.5)

Aunque no se han dispuesto rigidizadores transversales, no es necesario comprobar la resistencia a la abolladura del alma, puesto que se cumple:

$$\frac{d}{t_w} < \frac{72}{\eta} \cdot \varepsilon$$

$$14.67 < 55.46 \quad \checkmark$$

Donde:

l_w : Esbeltez del alma.

$$l_w : \underline{14.67}$$

$$\lambda_w = \frac{d}{t_w}$$

$l_{m\acute{a}x}$: Esbeltez máxima.

$$l_{m\acute{a}x} : \underline{55.46}$$

$$\lambda_{m\acute{a}x} = \frac{72}{\eta} \cdot \varepsilon$$

h: Coeficiente que permite considerar la resistencia adicional en régimen plástico debida al endurecimiento por deformación del material.

$$h : \underline{1.20}$$

e: Factor de reducción.

$$e : \underline{0.92}$$

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{f_{ref}}{f_y}}$$

Siendo:

f_{ref} : Límite elástico de referencia.

$$f_{ref} : \underline{235.00} \text{ MPa}$$

f_y : Límite elástico. (EAE 2011, Artículo 27)

$$f_y : \underline{275.00} \text{ MPa}$$

**Resistencia a corte Y (EAE 2011, Artículo 34.5)**

La comprobación no procede, ya que no hay esfuerzo cortante.

Resistencia a momento flector Y y fuerza cortante Z combinados (EAE 2011, Artículo 34.7.1)

No es necesario reducir la resistencia de cálculo a flexión, ya que el esfuerzo cortante solicitante de cálculo pésimo V_{Ed} no es superior al 50% de la resistencia de cálculo a cortante $V_{c,Rd}$.

$$V_{Ed} \leq \frac{V_{c,Rd}}{2}$$

$$0.02 \text{ kN} \leq 19.96 \text{ kN} \quad \checkmark$$

Los esfuerzos solicitantes de cálculo pésimos se producen para la combinación de acciones 1.35·PP+CM1.

V_{Ed} : Esfuerzo cortante solicitante de cálculo pésimo.

$$V_{Ed} : \underline{0.02} \text{ kN}$$

$V_{c,Rd}$: Esfuerzo cortante resistente de cálculo.

$$V_{c,Rd} : \underline{39.92} \text{ kN}$$

Resistencia a momento flector Z y fuerza cortante Y combinados (EAE 2011, Artículo 34.7.1)

No hay interacción entre momento flector y esfuerzo cortante para ninguna combinación. Por lo tanto, la comprobación no procede.

Resistencia a flexión y axil combinados (EAE 2011, Artículo 34.7.2)

Se debe satisfacer:

$$\eta = \frac{M_{y,Ed}}{M_{N,Rd,y}} \leq 1$$

$$h : \underline{0.013} \quad \checkmark$$

$$\eta = \frac{N_{c,Ed}}{\chi_y \cdot A \cdot f_{yd}} + k_{yy} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot W_{pl,y} \cdot f_{yd}} + k_{yz} \cdot \frac{M_{z,Ed}}{W_{pl,z} \cdot f_{yd}} \leq 1$$

$$h : \underline{0.380} \quad \checkmark$$

$$\eta = \frac{N_{c,Ed}}{\chi_z \cdot A \cdot f_{yd}} + k_{zy} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot W_{pl,y} \cdot f_{yd}} + k_{zz} \cdot \frac{M_{z,Ed}}{W_{pl,z} \cdot f_{yd}} \leq 1$$

$$h : \underline{0.375} \quad \checkmark$$

Los esfuerzos solicitantes de cálculo pésimos se producen en el nudo N24, para la combinación de acciones 1.35·PP+1.35·CM1+1.5·SobrecargaUso.

Donde:

$N_{c,Ed}$: Axil de compresión solicitante de cálculo.

$$N_{c,Ed} : \underline{30.62} \text{ kN}$$

$M_{y,Ed}$, $M_{z,Ed}$: Momentos flectores solicitantes de cálculo pésimos, según los ejes Y y Z, respectivamente.

$$M_{y,Ed}^+ : \underline{0.03} \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$M_{z,Ed}^+ : \underline{0.00} \text{ kN}\cdot\text{m}$$

Clase: Clase de la sección, según la capacidad de deformación y de desarrollo de la resistencia plástica de sus elementos planos, para axil y flexión simple.

$$\text{Clase} : \underline{1}$$

$M_{N,Rd,y}$: Momento flector resistente plástico reducido de cálculo, alrededor del eje Y.

$$M_{N,Rd,y} : \underline{2.61} \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$M_{N,Rd,y} = M_{pl,Rd,y} \cdot (1 - n) / (1 - 0.5 \cdot a_w) \leq M_{pl,Rd,y}$$

Siendo:

$$n = N_{c,Ed} / N_{pl,Rd}$$

$$n : \underline{0.216}$$

$N_{pl,Rd}$: Resistencia a compresión de la sección bruta.

$$N_{pl,Rd} : \underline{141.50} \text{ kN}$$

$M_{pl,Rd,y}$: Resistencia a flexión de la sección bruta en régimen plástico, respecto al eje Y.

$$M_{pl,Rd,y} : \underline{2.61} \text{ kN}\cdot\text{m}$$



Listados

estructura_12m

Fecha: 07/06/21

$$a_w = (A - 2 \cdot b \cdot t_f) / A \leq 0.5$$

A: Área de la sección bruta.

b: Ancho del ala.

t_f: Espesor del ala.

$$a_w : \underline{0.44}$$

$$A : \underline{5.40} \text{ cm}^2$$

$$b : \underline{5.00} \text{ cm}$$

$$t_f : \underline{3.00} \text{ mm}$$

Resistencia a pandeo: (EAE 2011, Artículo 35.3)

A: Área de la sección bruta.

W_{pl,y}, W_{pl,z}: Módulos resistentes plásticos correspondientes a la fibra con mayor tensión, alrededor de los ejes Y y Z, respectivamente.

f_{yd}: Resistencia de cálculo del acero.

$$f_{yd} = f_y / \gamma_{M1}$$

Siendo:

f_y: Límite elástico. (EAE 2011, Artículo 27)

g_{M1}: Coeficiente parcial de seguridad del material.

$$A : \underline{5.40} \text{ cm}^2$$

$$W_{pl,y} : \underline{9.95} \text{ cm}^3$$

$$W_{pl,z} : \underline{9.95} \text{ cm}^3$$

$$f_{yd} : \underline{261.90} \text{ MPa}$$

$$f_y : \underline{275.00} \text{ MPa}$$

$$g_{M1} : \underline{1.05}$$

K_{yy}, K_{yz}, K_{zy}, K_{zz}: Coeficientes de interacción.

$$k_{yy} = C_{m,y} \cdot C_{m,LT} \cdot \frac{\mu_y}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}} \cdot \frac{1}{C_{yy}}$$

$$K_{yy} : \underline{1.13}$$

$$k_{yz} = C_{m,z} \cdot \frac{\mu_y}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}} \cdot \frac{1}{C_{yz}} \cdot 0.6 \cdot \sqrt{\frac{W_z}{W_y}}$$

$$K_{yz} : \underline{0.73}$$

$$k_{zy} = C_{m,y} \cdot C_{m,LT} \cdot \frac{\mu_z}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}} \cdot \frac{1}{C_{zy}} \cdot 0.6 \cdot \sqrt{\frac{W_y}{W_z}}$$

$$K_{zy} : \underline{0.73}$$

$$k_{zz} = C_{m,z} \cdot \frac{\mu_z}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}} \cdot \frac{1}{C_{zz}}$$

$$K_{zz} : \underline{1.13}$$

Términos auxiliares:

$$\mu_y = \frac{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}}{1 - \chi_y \cdot \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}}$$

$$m_y : \underline{0.92}$$

$$\mu_z = \frac{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}}{1 - \chi_z \cdot \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}}$$

$$m_z : \underline{0.92}$$

$$C_{yy} = 1 + (w_y - 1) \cdot \left[\left(2 - \frac{1.6}{w_y} \cdot C_{m,y}^2 \cdot \bar{\lambda}_{max} - \frac{1.6}{w_y} \cdot C_{m,y}^2 \cdot \bar{\lambda}_{max}^2 \right) \cdot n_{pl} - b_{LT} \right] \geq \frac{W_{el,y}}{W_{pl,y}}$$

$$C_{yy} : \underline{0.99}$$

$$C_{yz} = 1 + (w_z - 1) \cdot \left[\left(2 - 14 \cdot \frac{C_{m,z}^2 \cdot \bar{\lambda}_{max}^2}{w_z^5} \right) \cdot n_{pl} - c_{LT} \right] \geq 0.6 \cdot \sqrt{\frac{W_z}{W_y}} \cdot \frac{W_{el,z}}{W_{pl,z}}$$

$$C_{yz} : \underline{0.92}$$

$$C_{zy} = 1 + (w_y - 1) \cdot \left[\left(2 - 14 \cdot \frac{C_{m,y}^2 \cdot \bar{\lambda}_{max}^2}{w_y^5} \right) \cdot n_{pl} - d_{LT} \right] \geq 0.6 \cdot \sqrt{\frac{W_y}{W_z}} \cdot \frac{W_{el,y}}{W_{pl,y}}$$

$$C_{zy} : \underline{0.92}$$

$$C_{zz} = 1 + (w_z - 1) \cdot \left[\left(2 - \frac{1.6}{w_z} \cdot C_{m,z}^2 \cdot \bar{\lambda}_{max} - \frac{1.6}{w_z} \cdot C_{m,z}^2 \cdot \bar{\lambda}_{max}^2 - e_{LT} \right) \cdot n_{pl} \right] \geq \frac{W_{el,z}}{W_{pl,z}}$$

$$C_{zz} : \underline{0.99}$$



$a_{LT} = 1 - \frac{I_t}{I_y} \geq 0$	$a_{LT} : \underline{0.00}$
$b_{LT} = 0.5 \cdot a_{LT} \cdot \bar{\lambda}_0^{-2} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot M_{pl,Rd,y}} \cdot \frac{M_{z,Ed}}{M_{pl,Rd,z}}$	$b_{LT} : \underline{0.00}$
$c_{LT} = 10 \cdot a_{LT} \cdot \frac{\bar{\lambda}_0^{-2}}{5 + \bar{\lambda}_z^{-4}} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{C_{m,y} \cdot \chi_{LT} \cdot M_{pl,Rd,y}}$	$c_{LT} : \underline{0.00}$
$d_{LT} = 2 \cdot a_{LT} \cdot \frac{\bar{\lambda}_0}{0.1 + \bar{\lambda}_z^{-4}} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{C_{m,y} \cdot \chi_{LT} \cdot M_{pl,Rd,y}} \cdot \frac{M_{z,Ed}}{C_{m,z} \cdot M_{pl,Rd,z}}$	$d_{LT} : \underline{0.00}$
$e_{LT} = 1.7 \cdot a_{LT} \cdot \frac{\bar{\lambda}_0}{0.1 + \bar{\lambda}_z^{-4}} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{C_{m,y} \cdot \chi_{LT} \cdot M_{pl,Rd,y}}$	$e_{LT} : \underline{0.00}$
$w_y = \frac{W_{pl,y}}{W_{el,y}} \leq 1.5$	$w_y : \underline{1.28}$
$w_z = \frac{W_{pl,z}}{W_{el,z}} \leq 1.5$	$w_z : \underline{1.28}$
$n_{pl} = \frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}}$	$n_{pl} : \underline{0.22}$

Puesto que:

$$\bar{\lambda}_0 \leq 0.2 \cdot \sqrt{C_1} \cdot \sqrt[4]{\left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}\right) \cdot \left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}\right)} \quad 0.00 \leq 0.18$$

$C_{m,y} = C_{m,y,0}$	$C_{m,y} : \underline{1.00}$
$C_{m,z} = C_{m,z,0}$	$C_{m,z} : \underline{1.00}$
$C_{m,LT} = 1.00$	$C_{m,LT} : \underline{1.00}$

$C_{m,y,0}$, $C_{m,z,0}$: Factores de momento flector uniforme equivalente.

C_1 : Factor que depende de las condiciones de apoyo y de la forma de la ley de momentos flectores sobre la barra.

c_y , c_z : Coeficientes de reducción por pandeo, alrededor de los ejes Y y Z, respectivamente. $c_y : \underline{0.59}$
 $c_z : \underline{0.59}$

c_{LT} : Coeficiente de reducción por pandeo lateral. $c_{LT} : \underline{1.00}$

$\bar{I}_{m\acute{a}x}$: Esbeltez máxima entre $\bar{\lambda}_y$ y $\bar{\lambda}_z$. $\bar{I}_{m\acute{a}x} : \underline{0.91}$

\bar{I}_y , \bar{I}_z : Esbelteces reducidas en relación a los ejes Y y Z, respectivamente. $\bar{I}_y : \underline{0.91}$
 $\bar{I}_z : \underline{0.91}$

\bar{I}_{LT} : Esbeltez reducida. $\bar{I}_{LT} : \underline{0.00}$

\bar{I}_0 : Esbeltez reducida, en relación al pandeo lateral, para un momento flector uniforme. $\bar{I}_0 : \underline{0.00}$

$W_{el,y}$, $W_{el,z}$: Módulos resistentes elásticos correspondientes a la fibra comprimida, alrededor de los ejes Y y Z, respectivamente. $W_{el,y} : \underline{7.75} \text{ cm}^3$
 $W_{el,z} : \underline{7.75} \text{ cm}^3$

$N_{cr,y}$: Axil crítico elástico de pandeo por flexión respecto al eje Y. $N_{cr,y} : \underline{178.39} \text{ kN}$

$N_{cr,z}$: Axil crítico elástico de pandeo por flexión respecto al eje Z. $N_{cr,z} : \underline{178.39} \text{ kN}$

I_y : Momento de inercia de la sección bruta, respecto al eje Y. $I_y : \underline{19.37} \text{ cm}^4$

I_t : Momento de inercia a torsión uniforme. $I_t : \underline{32.08} \text{ cm}^4$

**Resistencia a flexión, axil y cortante combinados (EAE 2011, Artículo 34.7.3)**

No es necesario reducir las resistencias de cálculo a flexión y a axil, ya que se puede ignorar el efecto de abolladura por esfuerzo cortante y, además, el esfuerzo cortante solicitante de cálculo pésimo V_{Ed} es menor o igual que el 50% del esfuerzo cortante resistente de cálculo $V_{c,Rd}$.

Los esfuerzos solicitantes de cálculo pésimos se producen para la combinación de acciones 1.35·PP+CM1.

$$V_{Ed,z} \leq \frac{V_{c,Rd,z}}{2}$$

$$0.02 \text{ kN} \leq 19.96 \text{ kN}$$



Donde:

$V_{Ed,z}$: Esfuerzo cortante solicitante de cálculo pésimo.

$$V_{Ed,z} : \underline{0.02} \text{ kN}$$

$V_{c,Rd,z}$: Esfuerzo cortante resistente de cálculo.

$$V_{c,Rd,z} : \underline{39.92} \text{ kN}$$

Resistencia a torsión (EAE 2011, Artículo 34.6)

La comprobación no procede, ya que no hay momento torsor.

Resistencia a cortante Z y momento torsor combinados (EAE 2011, Artículo 34.6)

No hay interacción entre momento torsor y esfuerzo cortante para ninguna combinación. Por lo tanto, la comprobación no procede.

Resistencia a cortante Y y momento torsor combinados (EAE 2011, Artículo 34.6)

No hay interacción entre momento torsor y esfuerzo cortante para ninguna combinación. Por lo tanto, la comprobación no procede.



Barra N42/N43

Perfil: SHS 50x3.0 Material: Acero (S275 (EAE))							
	Nudos		Longitud (m)	Características mecánicas			
	Inicial	Final		Área (cm ²)	I _y ⁽¹⁾ (cm ⁴)	I _z ⁽¹⁾ (cm ⁴)	I _t ⁽²⁾ (cm ⁴)
	N42	N43	1.500	5.40	19.37	19.37	32.08
Notas: ⁽¹⁾ Inercia respecto al eje indicado ⁽²⁾ Momento de inercia a torsión uniforme							
	Pandeo			Pandeo lateral			
	Plano XY		Plano XZ	Ala sup.		Ala inf.	
β	1.00		1.00	0.00		0.00	
L _K	1.500		1.500	0.000		0.000	
C _m	1.000		1.000	1.000		1.000	
C ₁	-			1.000			
Notación: b: Coeficiente de pandeo L _K : Longitud de pandeo (m) C _m : Coeficiente de momentos C ₁ : Factor de modificación para el momento crítico							

**Limitación de esbeltez** (Criterio de CYPE Ingenieros, basado en: Figura 35.1.2 de la norma EAE 2011.)

La esbeltez reducida $\bar{\lambda}$ de las barras comprimidas debe ser inferior al valor 3.0.

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr}}}$$

$$\bar{\lambda} : \underline{0.91} \quad \checkmark$$

Donde:

Clase: Clase de la sección, según la capacidad de deformación y de desarrollo de la resistencia plástica de los elementos planos comprimidos de una sección.

$$\text{Clase} : \underline{1}$$

A: Área de la sección bruta para las secciones de clase 1, 2 y 3.

$$A : \underline{5.40} \text{ cm}^2$$

f_y : Límite elástico. (EAE 2011, Artículo 27)

$$f_y : \underline{275.00} \text{ MPa}$$

N_{cr} : Axil crítico de pandeo elástico.

$$N_{cr} : \underline{178.39} \text{ kN}$$

El axil crítico de pandeo elástico N_{cr} es el menor de los valores obtenidos en a), b) y c):

a) Axil crítico elástico de pandeo por flexión respecto al eje Y.

$$N_{cr,y} : \underline{178.39} \text{ kN}$$

$$N_{cr,y} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{L_{ky}^2}$$

b) Axil crítico elástico de pandeo por flexión respecto al eje Z.

$$N_{cr,z} : \underline{178.39} \text{ kN}$$

$$N_{cr,z} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{L_{kz}^2}$$

c) Axil crítico elástico de pandeo por torsión.

$$N_{cr,T} : \underline{\infty}$$

$$N_{cr,T} = \frac{1}{i_0^2} \cdot \left[G \cdot I_t + \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_w}{L_{kt}^2} \right]$$

Donde:

I_y : Momento de inercia de la sección bruta, respecto al eje Y.

$$I_y : \underline{19.37} \text{ cm}^4$$

I_z : Momento de inercia de la sección bruta, respecto al eje Z.

$$I_z : \underline{19.37} \text{ cm}^4$$

I_t : Momento de inercia a torsión uniforme.

$$I_t : \underline{32.08} \text{ cm}^4$$

I_w : Constante de alabeo de la sección.

$$I_w : \underline{0.00} \text{ cm}^6$$

E: Módulo de elasticidad.

$$E : \underline{210000} \text{ MPa}$$

G: Módulo de elasticidad transversal.

$$G : \underline{81000} \text{ MPa}$$

L_{ky} : Longitud efectiva de pandeo por flexión, respecto al eje Y.

$$L_{ky} : \underline{1.500} \text{ m}$$

L_{kz} : Longitud efectiva de pandeo por flexión, respecto al eje Z.

$$L_{kz} : \underline{1.500} \text{ m}$$

L_{kt} : Longitud efectiva de pandeo por torsión.

$$L_{kt} : \underline{0.000} \text{ m}$$

i_0 : Radio de giro polar de la sección bruta, respecto al centro de torsión.

$$i_0 : \underline{2.68} \text{ cm}$$

$$i_0 = (i_y^2 + i_z^2 + y_0^2 + z_0^2)^{0.5}$$

Siendo:

i_y, i_z : Radios de giro de la sección bruta, respecto a los ejes principales de inercia Y y Z.

$$i_y : \underline{1.89} \text{ cm}$$

$$i_z : \underline{1.89} \text{ cm}$$

y_0, z_0 : Coordenadas del centro de torsión en la dirección de los ejes principales Y y Z, respectivamente, relativas al centro de gravedad de la sección.

$$y_0 : \underline{0.00} \text{ mm}$$

$$z_0 : \underline{0.00} \text{ mm}$$

**Abolladura del alma inducida por el ala comprimida (EAE 2011, Artículo 35.8)**

Se debe satisfacer:

$$\frac{h_w}{t_w} \leq k \frac{E}{f_{yf}} \sqrt{\frac{A_w}{A_{fc,ef}}}$$

$$14.67 \leq 303.92 \quad \checkmark$$

Donde:

 h_w : Altura del alma.

h_w : 44.00 mm

 t_w : Espesor del alma.

t_w : 3.00 mm

 A_w : Área del alma.

A_w : 2.64 cm²

 $A_{fc,ef}$: Área reducida del ala comprimida.

$A_{fc,ef}$: 1.50 cm²

k: Coeficiente que depende de la clase de la sección.

k : 0.30

E: Módulo de elasticidad.

E : 210000 MPa

 f_{yf} : Límite elástico del acero del ala comprimida.

f_{yf} : 275.00 MPa

Siendo:

$$f_{yf} = f_y$$

Resistencia a tracción (EAE 2011, Artículo 34.2)

La comprobación no procede, ya que no hay axil de tracción.

Resistencia a compresión (EAE 2011, Artículo 34.3)

Se debe satisfacer:

$$\eta = \frac{N_{c,Ed}}{N_{c,Rd}} \leq 1$$

$$\eta : \underline{0.214} \quad \checkmark$$

$$\eta = \frac{N_{c,Ed}}{N_{b,Rd}} \leq 1$$

$$\eta : \underline{0.361} \quad \checkmark$$

El esfuerzo solicitante de cálculo pésimo se produce para la combinación de acciones 1.35·PP+1.35·CM1+1.5·SobrecargaUso.

 $N_{c,Ed}$: Axil de compresión solicitante de cálculo pésimo.

$N_{c,Ed}$: 30.24 kN

La resistencia de cálculo a compresión $N_{c,Rd}$ viene dada por:

$$N_{c,Rd} = A \cdot f_{yd}$$

$N_{c,Rd}$: 141.50 kN

Donde:

Clase: Clase de la sección, según la capacidad de deformación y de desarrollo de la resistencia plástica de los elementos planos comprimidos de una sección.

Clase : 1

A: Área de la sección bruta para las secciones de clase 1, 2 y 3.

A : 5.40 cm²

 f_{yd} : Resistencia de cálculo del acero.

f_{yd} : 261.90 MPa

$$f_{yd} = f_y / \gamma_{M0}$$

Siendo:

 f_y : Límite elástico. (EAE 2011, Artículo 27)

f_y : 275.00 MPa

 γ_{M0} : Coeficiente parcial de seguridad del material.

γ_{M0} : 1.05

Resistencia a pandeo: (EAE 2011, Artículo 35.1)



La resistencia de cálculo a pandeo $N_{b,Rd}$ en una barra comprimida viene dada por:

$$N_{b,Rd} = \chi \cdot A \cdot f_{yd}$$

$$N_{b,Rd} : \underline{83.78} \text{ kN}$$

Donde:

A: Área de la sección bruta para las secciones de clase 1, 2 y 3.

$$A : \underline{5.40} \text{ cm}^2$$

f_{yd} : Resistencia de cálculo del acero.

$$f_{yd} : \underline{261.90} \text{ MPa}$$

$$f_{yd} = f_y / \gamma_{M1}$$

Siendo:

f_y : Límite elástico. (EAE 2011, Artículo 27)

$$f_y : \underline{275.00} \text{ MPa}$$

γ_{M1} : Coeficiente parcial de seguridad del material.

$$\gamma_{M1} : \underline{1.05}$$

c: Coeficiente de reducción por pandeo.

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

$$C_y : \underline{0.59}$$

$$C_z : \underline{0.59}$$

Siendo:

$$\Phi = 0.5 \cdot \left[1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda} - 0.2) + (\bar{\lambda})^2 \right]$$

$$f_y : \underline{1.09}$$

$$f_z : \underline{1.09}$$

a: Coeficiente de imperfección elástica.

$$a_y : \underline{0.49}$$

$$a_z : \underline{0.49}$$

$\bar{\lambda}$: Esbeltez reducida.

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr}}}$$

$$\bar{\lambda}_y : \underline{0.91}$$

$$\bar{\lambda}_z : \underline{0.91}$$

N_{cr} : Axil crítico elástico de pandeo, obtenido como el menor de los siguientes valores:

$$N_{cr} : \underline{178.39} \text{ kN}$$

$N_{cr,y}$: Axil crítico elástico de pandeo por flexión respecto al eje Y.

$$N_{cr,y} : \underline{178.39} \text{ kN}$$

$N_{cr,z}$: Axil crítico elástico de pandeo por flexión respecto al eje Z.

$$N_{cr,z} : \underline{178.39} \text{ kN}$$

$N_{cr,T}$: Axil crítico elástico de pandeo por torsión.

$$N_{cr,T} : \underline{\infty}$$

**Resistencia a flexión eje Y (EAE 2011, Artículo 34.4)**

Se debe satisfacer:

$$\eta = \frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} \leq 1$$

$$h : \underline{0.012} \quad \checkmark$$

Para flexión positiva:

El esfuerzo solicitante de cálculo pésimo se produce en el nudo N42, para la combinación de acciones 1.35·PP+1.35·CM1+1.5·SobrecargaUso.

 M_{Ed}^+ : Momento flector solicitante de cálculo pésimo.

$$M_{Ed}^+ : \underline{0.03} \text{ kN}\cdot\text{m}$$

Para flexión negativa:

 M_{Ed}^- : Momento flector solicitante de cálculo pésimo.

$$M_{Ed}^- : \underline{0.00} \text{ kN}\cdot\text{m}$$

El momento flector resistente de cálculo $M_{c,Rd}$ viene dado por:

$$M_{c,Rd} = W_{pl,y} \cdot f_{yd}$$

$$M_{c,Rd} : \underline{2.61} \text{ kN}\cdot\text{m}$$

Donde:

Clase: Clase de la sección, según la capacidad de deformación y de desarrollo de la resistencia plástica de los elementos planos de una sección a flexión simple.

$$\text{Clase} : \underline{1}$$

 $W_{pl,y}$: Módulo resistente plástico correspondiente a la fibra con mayor tensión, para las secciones de clase 1 y 2.

$$W_{pl,y} : \underline{9.95} \text{ cm}^3$$

 f_{yd} : Resistencia de cálculo del acero.

$$f_{yd} : \underline{261.90} \text{ MPa}$$

$$f_{yd} = f_y / \gamma_{M0}$$

Siendo:

 f_y : Límite elástico. (EAE 2011, Artículo 27)

$$f_y : \underline{275.00} \text{ MPa}$$

 γ_{M0} : Coeficiente parcial de seguridad del material.

$$\gamma_{M0} : \underline{1.05}$$

Resistencia a flexión eje Z (EAE 2011, Artículo 34.4)

La comprobación no procede, ya que no hay momento flector.

**Resistencia a corte Z (EAE 2011, Artículo 34.5)**

Se debe satisfacer:

$$\eta = \frac{V_{Ed}}{V_{c,Rd}} \leq 1$$

$$h : \underline{0.002} \quad \checkmark$$

El esfuerzo solicitante de cálculo pésimo se produce en el nudo N43, para la combinación de acciones 1.35·PP+1.35·CM1+1.5·SobrecargaUso.

V_{Ed} : Esfuerzo cortante solicitante de cálculo pésimo.

$$V_{Ed} : \underline{0.08} \text{ kN}$$

El esfuerzo cortante resistente de cálculo $V_{c,Rd}$ viene dado por:

$$V_{c,Rd} = A_V \cdot \frac{f_{yd}}{\sqrt{3}}$$

$$V_{c,Rd} : \underline{39.92} \text{ kN}$$

Donde:

A_V : Área transversal a cortante.

$$A_V : \underline{2.64} \text{ cm}^2$$

$$A_V = 2 \cdot d \cdot t_w$$

Siendo:

d: Altura del alma.

$$d : \underline{44.00} \text{ mm}$$

t_w : Espesor del alma.

$$t_w : \underline{3.00} \text{ mm}$$

f_{yd} : Resistencia de cálculo del acero.

$$f_{yd} : \underline{261.90} \text{ MPa}$$

$$f_{yd} = f_y / \gamma_{M0}$$

Siendo:

f_y : Límite elástico. (EAE 2011, Artículo 27)

$$f_y : \underline{275.00} \text{ MPa}$$

γ_{M0} : Coeficiente parcial de seguridad del material.

$$\gamma_{M0} : \underline{1.05}$$

Abolladura por cortante del alma: (EAE 2011, Artículo 35.5)

Aunque no se han dispuesto rigidizadores transversales, no es necesario comprobar la resistencia a la abolladura del alma, puesto que se cumple:

$$\frac{d}{t_w} < \frac{72}{\eta} \cdot \varepsilon$$

$$14.67 < 55.46 \quad \checkmark$$

Donde:

l_w : Esbeltez del alma.

$$l_w : \underline{14.67}$$

$$\lambda_w = \frac{d}{t_w}$$

$l_{m\acute{a}x}$: Esbeltez máxima.

$$l_{m\acute{a}x} : \underline{55.46}$$

$$\lambda_{m\acute{a}x} = \frac{72}{\eta} \cdot \varepsilon$$

h: Coeficiente que permite considerar la resistencia adicional en régimen plástico debida al endurecimiento por deformación del material.

$$h : \underline{1.20}$$

e: Factor de reducción.

$$e : \underline{0.92}$$

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{f_{ref}}{f_y}}$$

Siendo:

f_{ref} : Límite elástico de referencia.

$$f_{ref} : \underline{235.00} \text{ MPa}$$

f_y : Límite elástico. (EAE 2011, Artículo 27)

$$f_y : \underline{275.00} \text{ MPa}$$

**Resistencia a corte Y (EAE 2011, Artículo 34.5)**

La comprobación no procede, ya que no hay esfuerzo cortante.

Resistencia a momento flector Y y fuerza cortante Z combinados (EAE 2011, Artículo 34.7.1)

No es necesario reducir la resistencia de cálculo a flexión, ya que el esfuerzo cortante solicitante de cálculo pésimo V_{Ed} no es superior al 50% de la resistencia de cálculo a cortante $V_{c,Rd}$.

$$V_{Ed} \leq \frac{V_{c,Rd}}{2}$$

$$0.02 \text{ kN} \leq 19.96 \text{ kN} \quad \checkmark$$

Los esfuerzos solicitantes de cálculo pésimos se producen en el nudo N42, para la combinación de acciones 1.35·PP+CM1.

V_{Ed} : Esfuerzo cortante solicitante de cálculo pésimo.

$$V_{Ed} : \underline{0.02} \text{ kN}$$

$V_{c,Rd}$: Esfuerzo cortante resistente de cálculo.

$$V_{c,Rd} : \underline{39.92} \text{ kN}$$

Resistencia a momento flector Z y fuerza cortante Y combinados (EAE 2011, Artículo 34.7.1)

No hay interacción entre momento flector y esfuerzo cortante para ninguna combinación. Por lo tanto, la comprobación no procede.

Resistencia a flexión y axil combinados (EAE 2011, Artículo 34.7.2)

Se debe satisfacer:

$$\eta = \frac{M_{y,Ed}}{M_{N,Rd,y}} \leq 1$$

$$h : \underline{0.012} \quad \checkmark$$

$$\eta = \frac{N_{c,Ed}}{\chi_y \cdot A \cdot f_{yd}} + k_{yy} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot W_{pl,y} \cdot f_{yd}} + k_{yz} \cdot \frac{M_{z,Ed}}{W_{pl,z} \cdot f_{yd}} \leq 1$$

$$h : \underline{0.374} \quad \checkmark$$

$$\eta = \frac{N_{c,Ed}}{\chi_z \cdot A \cdot f_{yd}} + k_{zy} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot W_{pl,y} \cdot f_{yd}} + k_{zz} \cdot \frac{M_{z,Ed}}{W_{pl,z} \cdot f_{yd}} \leq 1$$

$$h : \underline{0.370} \quad \checkmark$$

Los esfuerzos solicitantes de cálculo pésimos se producen en el nudo N42, para la combinación de acciones 1.35·PP+1.35·CM1+1.5·SobrecargaUso.

Donde:

$N_{c,Ed}$: Axil de compresión solicitante de cálculo.

$$N_{c,Ed} : \underline{30.24} \text{ kN}$$

$M_{y,Ed}$, $M_{z,Ed}$: Momentos flectores solicitantes de cálculo pésimos, según los ejes Y y Z, respectivamente.

$$M_{y,Ed}^+ : \underline{0.03} \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$M_{z,Ed}^+ : \underline{0.00} \text{ kN}\cdot\text{m}$$

Clase: Clase de la sección, según la capacidad de deformación y de desarrollo de la resistencia plástica de sus elementos planos, para axil y flexión simple.

$$\text{Clase} : \underline{1}$$

$M_{N,Rd,y}$: Momento flector resistente plástico reducido de cálculo, alrededor del eje Y.

$$M_{N,Rd,y} : \underline{2.61} \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$M_{N,Rd,y} = M_{pl,Rd,y} \cdot (1 - n) / (1 - 0.5 \cdot a_w) \leq M_{pl,Rd,y}$$

Siendo:

$$n = N_{c,Ed} / N_{pl,Rd}$$

$$n : \underline{0.214}$$

$N_{pl,Rd}$: Resistencia a compresión de la sección bruta.

$$N_{pl,Rd} : \underline{141.50} \text{ kN}$$

$M_{pl,Rd,y}$: Resistencia a flexión de la sección bruta en régimen plástico, respecto al eje Y.

$$M_{pl,Rd,y} : \underline{2.61} \text{ kN}\cdot\text{m}$$



$$a_w = (A - 2 \cdot b \cdot t_f) / A \leq 0.5$$

A: Área de la sección bruta.

b: Ancho del ala.

t_f: Espesor del ala.

$$a_w : \underline{0.44}$$

$$A : \underline{5.40} \text{ cm}^2$$

$$b : \underline{5.00} \text{ cm}$$

$$t_f : \underline{3.00} \text{ mm}$$

Resistencia a pandeo: (EAE 2011, Artículo 35.3)

A: Área de la sección bruta.

W_{pl,y}, W_{pl,z}: Módulos resistentes plásticos correspondientes a la fibra con mayor tensión, alrededor de los ejes Y y Z, respectivamente.

f_{yd}: Resistencia de cálculo del acero.

$$f_{yd} = f_y / \gamma_{M1}$$

Siendo:

f_y: Límite elástico. (EAE 2011, Artículo 27)

g_{M1}: Coeficiente parcial de seguridad del material.

$$A : \underline{5.40} \text{ cm}^2$$

$$W_{pl,y} : \underline{9.95} \text{ cm}^3$$

$$W_{pl,z} : \underline{9.95} \text{ cm}^3$$

$$f_{yd} : \underline{261.90} \text{ MPa}$$

$$f_y : \underline{275.00} \text{ MPa}$$

$$g_{M1} : \underline{1.05}$$

K_{yy}, K_{yz}, K_{zy}, K_{zz}: Coeficientes de interacción.

$$k_{yy} = C_{m,y} \cdot C_{m,LT} \cdot \frac{\mu_y}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}} \cdot \frac{1}{C_{yy}}$$

$$K_{yy} : \underline{1.12}$$

$$k_{yz} = C_{m,z} \cdot \frac{\mu_y}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}} \cdot \frac{1}{C_{yz}} \cdot 0.6 \cdot \sqrt{\frac{W_z}{W_y}}$$

$$K_{yz} : \underline{0.73}$$

$$k_{zy} = C_{m,y} \cdot C_{m,LT} \cdot \frac{\mu_z}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}} \cdot \frac{1}{C_{zy}} \cdot 0.6 \cdot \sqrt{\frac{W_y}{W_z}}$$

$$K_{zy} : \underline{0.73}$$

$$k_{zz} = C_{m,z} \cdot \frac{\mu_z}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}} \cdot \frac{1}{C_{zz}}$$

$$K_{zz} : \underline{1.12}$$

Términos auxiliares:

$$\mu_y = \frac{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}}{1 - \chi_y \cdot \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}}$$

$$m_y : \underline{0.92}$$

$$\mu_z = \frac{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}}{1 - \chi_z \cdot \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}}$$

$$m_z : \underline{0.92}$$

$$C_{yy} = 1 + (w_y - 1) \cdot \left[\left(2 - \frac{1.6}{w_y} \cdot C_{m,y}^2 \cdot \bar{\lambda}_{\max} - \frac{1.6}{w_y} \cdot C_{m,y}^2 \cdot \bar{\lambda}_{\max}^2 \right) \cdot n_{pl} - b_{LT} \right] \geq \frac{W_{el,y}}{W_{pl,y}}$$

$$C_{yy} : \underline{0.99}$$

$$C_{yz} = 1 + (w_z - 1) \cdot \left[\left(2 - 14 \cdot \frac{C_{m,z}^2 \cdot \bar{\lambda}_{\max}^2}{w_z^5} \right) \cdot n_{pl} - c_{LT} \right] \geq 0.6 \cdot \sqrt{\frac{W_z}{W_y}} \cdot \frac{W_{el,z}}{W_{pl,z}}$$

$$C_{yz} : \underline{0.92}$$

$$C_{zy} = 1 + (w_y - 1) \cdot \left[\left(2 - 14 \cdot \frac{C_{m,y}^2 \cdot \bar{\lambda}_{\max}^2}{w_y^5} \right) \cdot n_{pl} - d_{LT} \right] \geq 0.6 \cdot \sqrt{\frac{W_y}{W_z}} \cdot \frac{W_{el,y}}{W_{pl,y}}$$

$$C_{zy} : \underline{0.92}$$

$$C_{zz} = 1 + (w_z - 1) \cdot \left[\left(2 - \frac{1.6}{w_z} \cdot C_{m,z}^2 \cdot \bar{\lambda}_{\max} - \frac{1.6}{w_z} \cdot C_{m,z}^2 \cdot \bar{\lambda}_{\max}^2 - e_{LT} \right) \cdot n_{pl} \right] \geq \frac{W_{el,z}}{W_{pl,z}}$$

$$C_{zz} : \underline{0.99}$$



$$a_{LT} = 1 - \frac{I_t}{I_y} \geq 0 \quad a_{LT} : \underline{0.00}$$

$$b_{LT} = 0.5 \cdot a_{LT} \cdot \bar{\lambda}_0^{-2} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot M_{pl,Rd,y}} \cdot \frac{M_{z,Ed}}{M_{pl,Rd,z}} \quad b_{LT} : \underline{0.00}$$

$$c_{LT} = 10 \cdot a_{LT} \cdot \frac{\bar{\lambda}_0^{-2}}{5 + \bar{\lambda}_z^{-4}} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{C_{m,y} \cdot \chi_{LT} \cdot M_{pl,Rd,y}} \quad c_{LT} : \underline{0.00}$$

$$d_{LT} = 2 \cdot a_{LT} \cdot \frac{\bar{\lambda}_0}{0.1 + \bar{\lambda}_z^{-4}} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{C_{m,y} \cdot \chi_{LT} \cdot M_{pl,Rd,y}} \cdot \frac{M_{z,Ed}}{C_{m,z} \cdot M_{pl,Rd,z}} \quad d_{LT} : \underline{0.00}$$

$$e_{LT} = 1.7 \cdot a_{LT} \cdot \frac{\bar{\lambda}_0}{0.1 + \bar{\lambda}_z^{-4}} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{C_{m,y} \cdot \chi_{LT} \cdot M_{pl,Rd,y}} \quad e_{LT} : \underline{0.00}$$

$$w_y = \frac{W_{pl,y}}{W_{el,y}} \leq 1.5 \quad w_y : \underline{1.28}$$

$$w_z = \frac{W_{pl,z}}{W_{el,z}} \leq 1.5 \quad w_z : \underline{1.28}$$

$$n_{pl} = \frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}} \quad n_{pl} : \underline{0.21}$$

Puesto que:

$$\bar{\lambda}_0 \leq 0.2 \cdot \sqrt{C_1} \cdot \sqrt[4]{\left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}\right) \cdot \left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}\right)} \quad 0.00 \leq 0.18$$

$$C_{m,y} = C_{m,y,0} \quad C_{m,y} : \underline{1.00}$$

$$C_{m,z} = C_{m,z,0} \quad C_{m,z} : \underline{1.00}$$

$$C_{m,LT} = 1.00 \quad C_{m,LT} : \underline{1.00}$$

$C_{m,y,0}$, $C_{m,z,0}$: Factores de momento flector uniforme equivalente.

$$C_{m,y,0} : \underline{1.00}$$

$$C_{m,z,0} : \underline{1.00}$$

$$C_1 : \underline{1.00}$$

C_1 : Factor que depende de las condiciones de apoyo y de la forma de la ley de momentos flectores sobre la barra.

c_y , c_z : Coeficientes de reducción por pandeo, alrededor de los ejes Y y Z, respectivamente. $c_y : \underline{0.59}$
 $c_z : \underline{0.59}$

c_{LT} : Coeficiente de reducción por pandeo lateral. $c_{LT} : \underline{1.00}$

$\bar{I}_{m\acute{a}x}$: Esbeltez máxima entre $\bar{\lambda}_y$ y $\bar{\lambda}_z$. $\bar{I}_{m\acute{a}x} : \underline{0.91}$

\bar{I}_y , \bar{I}_z : Esbelteces reducidas en relación a los ejes Y y Z, respectivamente. $\bar{I}_y : \underline{0.91}$
 $\bar{I}_z : \underline{0.91}$

\bar{I}_{LT} : Esbeltez reducida. $\bar{I}_{LT} : \underline{0.00}$

\bar{I}_0 : Esbeltez reducida, en relación al pandeo lateral, para un momento flector uniforme. $\bar{I}_0 : \underline{0.00}$

$W_{el,y}$, $W_{el,z}$: Módulos resistentes elásticos correspondientes a la fibra comprimida, alrededor de los ejes Y y Z, respectivamente. $W_{el,y} : \underline{7.75} \text{ cm}^3$
 $W_{el,z} : \underline{7.75} \text{ cm}^3$

$N_{cr,y}$: Axil crítico elástico de pandeo por flexión respecto al eje Y. $N_{cr,y} : \underline{178.39} \text{ kN}$

$N_{cr,z}$: Axil crítico elástico de pandeo por flexión respecto al eje Z. $N_{cr,z} : \underline{178.39} \text{ kN}$

I_y : Momento de inercia de la sección bruta, respecto al eje Y. $I_y : \underline{19.37} \text{ cm}^4$

I_t : Momento de inercia a torsión uniforme. $I_t : \underline{32.08} \text{ cm}^4$

**Resistencia a flexión, axil y cortante combinados (EAE 2011, Artículo 34.7.3)**

No es necesario reducir las resistencias de cálculo a flexión y a axil, ya que se puede ignorar el efecto de abolladura por esfuerzo cortante y, además, el esfuerzo cortante solicitante de cálculo pésimo V_{Ed} es menor o igual que el 50% del esfuerzo cortante resistente de cálculo $V_{c,Rd}$.

Los esfuerzos solicitantes de cálculo pésimos se producen en el nudo N42, para la combinación de acciones 1.35-PP+CM1.

$$V_{Ed,z} \leq \frac{V_{c,Rd,z}}{2}$$

$$0.02 \text{ kN} \leq 19.96 \text{ kN}$$



Donde:

$V_{Ed,z}$: Esfuerzo cortante solicitante de cálculo pésimo.

$$V_{Ed,z} : \underline{0.02} \text{ kN}$$

$V_{c,Rd,z}$: Esfuerzo cortante resistente de cálculo.

$$V_{c,Rd,z} : \underline{39.92} \text{ kN}$$

Resistencia a torsión (EAE 2011, Artículo 34.6)

La comprobación no procede, ya que no hay momento torsor.

Resistencia a cortante Z y momento torsor combinados (EAE 2011, Artículo 34.6)

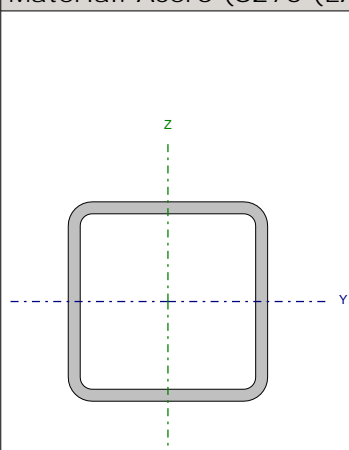
No hay interacción entre momento torsor y esfuerzo cortante para ninguna combinación. Por lo tanto, la comprobación no procede.

Resistencia a cortante Y y momento torsor combinados (EAE 2011, Artículo 34.6)

No hay interacción entre momento torsor y esfuerzo cortante para ninguna combinación. Por lo tanto, la comprobación no procede.



Barra N39/N40

Perfil: SHS 50x3.0 Material: Acero (S275 (EAE))							
	Nudos		Longitud (m)	Características mecánicas			
	Inicial	Final		Área (cm ²)	I _y ⁽¹⁾ (cm ⁴)	I _z ⁽¹⁾ (cm ⁴)	I _t ⁽²⁾ (cm ⁴)
	N39	N40	1.500	5.40	19.37	19.37	32.08
Notas: ⁽¹⁾ Inercia respecto al eje indicado ⁽²⁾ Momento de inercia a torsión uniforme							
	Pandeo			Pandeo lateral			
			Plano XY	Plano XZ	Ala sup.	Ala inf.	
	β		1.00	1.00	0.00	0.00	
	L _K		1.500	1.500	0.000	0.000	
	C _m		1.000	1.000	1.000	1.000	
	C ₁		-		1.000		
Notación: b: Coeficiente de pandeo L _K : Longitud de pandeo (m) C _m : Coeficiente de momentos C ₁ : Factor de modificación para el momento crítico							

**Limitación de esbeltez** (Criterio de CYPE Ingenieros, basado en: Figura 35.1.2 de la norma EAE 2011.)

La esbeltez reducida $\bar{\lambda}$ de las barras comprimidas debe ser inferior al valor 3.0.

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr}}}$$

$$\bar{\lambda} : \underline{0.91} \quad \checkmark$$

Donde:

Clase: Clase de la sección, según la capacidad de deformación y de desarrollo de la resistencia plástica de los elementos planos comprimidos de una sección.

$$\text{Clase} : \underline{1}$$

A: Área de la sección bruta para las secciones de clase 1, 2 y 3.

$$A : \underline{5.40} \text{ cm}^2$$

f_y : Límite elástico. (EAE 2011, Artículo 27)

$$f_y : \underline{275.00} \text{ MPa}$$

N_{cr} : Axil crítico de pandeo elástico.

$$N_{cr} : \underline{178.39} \text{ kN}$$

El axil crítico de pandeo elástico N_{cr} es el menor de los valores obtenidos en a), b) y c):

a) Axil crítico elástico de pandeo por flexión respecto al eje Y.

$$N_{cr,y} : \underline{178.39} \text{ kN}$$

$$N_{cr,y} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{L_{ky}^2}$$

b) Axil crítico elástico de pandeo por flexión respecto al eje Z.

$$N_{cr,z} : \underline{178.39} \text{ kN}$$

$$N_{cr,z} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{L_{kz}^2}$$

c) Axil crítico elástico de pandeo por torsión.

$$N_{cr,T} : \underline{\infty}$$

$$N_{cr,T} = \frac{1}{i_0^2} \cdot \left[G \cdot I_t + \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_w}{L_{kt}^2} \right]$$

Donde:

I_y : Momento de inercia de la sección bruta, respecto al eje Y.

$$I_y : \underline{19.37} \text{ cm}^4$$

I_z : Momento de inercia de la sección bruta, respecto al eje Z.

$$I_z : \underline{19.37} \text{ cm}^4$$

I_t : Momento de inercia a torsión uniforme.

$$I_t : \underline{32.08} \text{ cm}^4$$

I_w : Constante de alabeo de la sección.

$$I_w : \underline{0.00} \text{ cm}^6$$

E: Módulo de elasticidad.

$$E : \underline{210000} \text{ MPa}$$

G: Módulo de elasticidad transversal.

$$G : \underline{81000} \text{ MPa}$$

L_{ky} : Longitud efectiva de pandeo por flexión, respecto al eje Y.

$$L_{ky} : \underline{1.500} \text{ m}$$

L_{kz} : Longitud efectiva de pandeo por flexión, respecto al eje Z.

$$L_{kz} : \underline{1.500} \text{ m}$$

L_{kt} : Longitud efectiva de pandeo por torsión.

$$L_{kt} : \underline{0.000} \text{ m}$$

i_0 : Radio de giro polar de la sección bruta, respecto al centro de torsión.

$$i_0 : \underline{2.68} \text{ cm}$$

$$i_0 = \left(i_y^2 + i_z^2 + y_0^2 + z_0^2 \right)^{0.5}$$

Siendo:

i_y , i_z : Radios de giro de la sección bruta, respecto a los ejes principales de inercia Y y Z.

$$i_y : \underline{1.89} \text{ cm}$$

$$i_z : \underline{1.89} \text{ cm}$$

y_0 , z_0 : Coordenadas del centro de torsión en la dirección de los ejes principales Y y Z, respectivamente, relativas al centro de gravedad de la sección.

$$y_0 : \underline{0.00} \text{ mm}$$

$$z_0 : \underline{0.00} \text{ mm}$$

**Abolladura del alma inducida por el ala comprimida (EAE 2011, Artículo 35.8)**

Se debe satisfacer:

$$\frac{h_w}{t_w} \leq k \frac{E}{f_{yf}} \sqrt{\frac{A_w}{A_{fc,ef}}}$$

$$14.67 \leq 303.92 \quad \checkmark$$

Donde:

 h_w : Altura del alma.

h_w : 44.00 mm

 t_w : Espesor del alma.

t_w : 3.00 mm

 A_w : Área del alma.

A_w : 2.64 cm²

 $A_{fc,ef}$: Área reducida del ala comprimida.

$A_{fc,ef}$: 1.50 cm²

k: Coeficiente que depende de la clase de la sección.

k : 0.30

E: Módulo de elasticidad.

E : 210000 MPa

 f_{yf} : Límite elástico del acero del ala comprimida.

f_{yf} : 275.00 MPa

Siendo:

$$f_{yf} = f_y$$

Resistencia a tracción (EAE 2011, Artículo 34.2)

La comprobación no procede, ya que no hay axil de tracción.

Resistencia a compresión (EAE 2011, Artículo 34.3)

Se debe satisfacer:

$$\eta = \frac{N_{c,Ed}}{N_{c,Rd}} \leq 1$$

$$\eta : \underline{0.214} \quad \checkmark$$

$$\eta = \frac{N_{c,Ed}}{N_{b,Rd}} \leq 1$$

$$\eta : \underline{0.361} \quad \checkmark$$

El esfuerzo solicitante de cálculo pésimo se produce para la combinación de acciones 1.35·PP+1.35·CM1+1.5·SobrecargaUso.

 $N_{c,Ed}$: Axil de compresión solicitante de cálculo pésimo.

$N_{c,Ed}$: 30.24 kN

La resistencia de cálculo a compresión $N_{c,Rd}$ viene dada por:

$$N_{c,Rd} = A \cdot f_{yd}$$

$N_{c,Rd}$: 141.50 kN

Donde:

Clase: Clase de la sección, según la capacidad de deformación y de desarrollo de la resistencia plástica de los elementos planos comprimidos de una sección.

Clase : 1

A: Área de la sección bruta para las secciones de clase 1, 2 y 3.

A : 5.40 cm²

 f_{yd} : Resistencia de cálculo del acero.

f_{yd} : 261.90 MPa

$$f_{yd} = f_y / \gamma_{M0}$$

Siendo:

 f_y : Límite elástico. (EAE 2011, Artículo 27)

f_y : 275.00 MPa

 γ_{M0} : Coeficiente parcial de seguridad del material.

γ_{M0} : 1.05

Resistencia a pandeo: (EAE 2011, Artículo 35.1)



La resistencia de cálculo a pandeo $N_{b,Rd}$ en una barra comprimida viene dada por:

$$N_{b,Rd} = \chi \cdot A \cdot f_{yd}$$

$$N_{b,Rd} : \underline{83.78} \text{ kN}$$

Donde:

A: Área de la sección bruta para las secciones de clase 1, 2 y 3.

$$A : \underline{5.40} \text{ cm}^2$$

f_{yd} : Resistencia de cálculo del acero.

$$f_{yd} : \underline{261.90} \text{ MPa}$$

$$f_{yd} = f_y / \gamma_{M1}$$

Siendo:

f_y : Límite elástico. (EAE 2011, Artículo 27)

$$f_y : \underline{275.00} \text{ MPa}$$

γ_{M1} : Coeficiente parcial de seguridad del material.

$$\gamma_{M1} : \underline{1.05}$$

c: Coeficiente de reducción por pandeo.

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

$$C_y : \underline{0.59}$$

$$C_z : \underline{0.59}$$

Siendo:

$$\Phi = 0.5 \cdot \left[1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda} - 0.2) + (\bar{\lambda})^2 \right]$$

$$f_y : \underline{1.09}$$

$$f_z : \underline{1.09}$$

a: Coeficiente de imperfección elástica.

$$a_y : \underline{0.49}$$

$$a_z : \underline{0.49}$$

$\bar{\lambda}$: Esbeltez reducida.

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr}}}$$

$$\bar{\lambda}_y : \underline{0.91}$$

$$\bar{\lambda}_z : \underline{0.91}$$

N_{cr} : Axil crítico elástico de pandeo, obtenido como el menor de los siguientes valores:

$$N_{cr} : \underline{178.39} \text{ kN}$$

$N_{cr,y}$: Axil crítico elástico de pandeo por flexión respecto al eje Y.

$$N_{cr,y} : \underline{178.39} \text{ kN}$$

$N_{cr,z}$: Axil crítico elástico de pandeo por flexión respecto al eje Z.

$$N_{cr,z} : \underline{178.39} \text{ kN}$$

$N_{cr,T}$: Axil crítico elástico de pandeo por torsión.

$$N_{cr,T} : \underline{\infty}$$

**Resistencia a flexión eje Y (EAE 2011, Artículo 34.4)**

Se debe satisfacer:

$$\eta = \frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} \leq 1$$

$$h : \underline{0.012} \quad \checkmark$$

Para flexión positiva:

El esfuerzo solicitante de cálculo pésimo se produce en el nudo N40, para la combinación de acciones 1.35·PP+1.35·CM1+1.5·SobrecargaUso.

M_{Ed}^+ : Momento flector solicitante de cálculo pésimo.

$$M_{Ed}^+ : \underline{0.03} \text{ kN}\cdot\text{m}$$

Para flexión negativa:

M_{Ed}^- : Momento flector solicitante de cálculo pésimo.

$$M_{Ed}^- : \underline{0.00} \text{ kN}\cdot\text{m}$$

El momento flector resistente de cálculo $M_{c,Rd}$ viene dado por:

$$M_{c,Rd} = W_{pl,y} \cdot f_{yd}$$

$$M_{c,Rd} : \underline{2.61} \text{ kN}\cdot\text{m}$$

Donde:

Clase: Clase de la sección, según la capacidad de deformación y de desarrollo de la resistencia plástica de los elementos planos de una sección a flexión simple.

$$\text{Clase} : \underline{1}$$

$W_{pl,y}$: Módulo resistente plástico correspondiente a la fibra con mayor tensión, para las secciones de clase 1 y 2.

$$W_{pl,y} : \underline{9.95} \text{ cm}^3$$

f_{yd} : Resistencia de cálculo del acero.

$$f_{yd} : \underline{261.90} \text{ MPa}$$

$$f_{yd} = f_y / \gamma_{M0}$$

Siendo:

f_y : Límite elástico. (EAE 2011, Artículo 27)

$$f_y : \underline{275.00} \text{ MPa}$$

γ_{M0} : Coeficiente parcial de seguridad del material.

$$\gamma_{M0} : \underline{1.05}$$

Resistencia a flexión eje Z (EAE 2011, Artículo 34.4)

La comprobación no procede, ya que no hay momento flector.

**Resistencia a corte Z (EAE 2011, Artículo 34.5)**

Se debe satisfacer:

$$\eta = \frac{V_{Ed}}{V_{c,Rd}} \leq 1$$

$$h : \underline{0.002} \quad \checkmark$$

El esfuerzo solicitante de cálculo pésimo se produce en el nudo N39, para la combinación de acciones 1.35·PP+1.35·CM1+1.5·SobrecargaUso.

V_{Ed} : Esfuerzo cortante solicitante de cálculo pésimo.

$$V_{Ed} : \underline{0.08} \text{ kN}$$

El esfuerzo cortante resistente de cálculo $V_{c,Rd}$ viene dado por:

$$V_{c,Rd} = A_v \cdot \frac{f_{yd}}{\sqrt{3}}$$

$$V_{c,Rd} : \underline{39.92} \text{ kN}$$

Donde:

A_v : Área transversal a cortante.

$$A_v : \underline{2.64} \text{ cm}^2$$

$$A_v = 2 \cdot d \cdot t_w$$

Siendo:

d: Altura del alma.

$$d : \underline{44.00} \text{ mm}$$

t_w : Espesor del alma.

$$t_w : \underline{3.00} \text{ mm}$$

f_{yd} : Resistencia de cálculo del acero.

$$f_{yd} : \underline{261.90} \text{ MPa}$$

$$f_{yd} = f_y / \gamma_{M0}$$

Siendo:

f_y : Límite elástico. (EAE 2011, Artículo 27)

$$f_y : \underline{275.00} \text{ MPa}$$

γ_{M0} : Coeficiente parcial de seguridad del material.

$$\gamma_{M0} : \underline{1.05}$$

Abolladura por cortante del alma: (EAE 2011, Artículo 35.5)

Aunque no se han dispuesto rigidizadores transversales, no es necesario comprobar la resistencia a la abolladura del alma, puesto que se cumple:

$$\frac{d}{t_w} < \frac{72}{\eta} \cdot \varepsilon$$

$$14.67 < 55.46 \quad \checkmark$$

Donde:

l_w : Esbeltez del alma.

$$l_w : \underline{14.67}$$

$$\lambda_w = \frac{d}{t_w}$$

$l_{m\acute{a}x}$: Esbeltez máxima.

$$l_{m\acute{a}x} : \underline{55.46}$$

$$\lambda_{m\acute{a}x} = \frac{72}{\eta} \cdot \varepsilon$$

h: Coeficiente que permite considerar la resistencia adicional en régimen plástico debida al endurecimiento por deformación del material.

$$h : \underline{1.20}$$

e: Factor de reducción.

$$e : \underline{0.92}$$

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{f_{ref}}{f_y}}$$

Siendo:

f_{ref} : Límite elástico de referencia.

$$f_{ref} : \underline{235.00} \text{ MPa}$$

f_y : Límite elástico. (EAE 2011, Artículo 27)

$$f_y : \underline{275.00} \text{ MPa}$$

**Resistencia a corte Y (EAE 2011, Artículo 34.5)**

La comprobación no procede, ya que no hay esfuerzo cortante.

Resistencia a momento flector Y y fuerza cortante Z combinados (EAE 2011, Artículo 34.7.1)

No es necesario reducir la resistencia de cálculo a flexión, ya que el esfuerzo cortante solicitante de cálculo pésimo V_{Ed} no es superior al 50% de la resistencia de cálculo a cortante $V_{c,Rd}$.

$$V_{Ed} \leq \frac{V_{c,Rd}}{2}$$

$$0.08 \text{ kN} \leq 19.96 \text{ kN} \quad \checkmark$$

Los esfuerzos solicitantes de cálculo pésimos se producen en el nudo N39, para la combinación de acciones 1.35·PP+1.35·CM1+1.5·SobrecargaUso.

V_{Ed} : Esfuerzo cortante solicitante de cálculo pésimo.

$$V_{Ed} : \underline{0.08} \text{ kN}$$

$V_{c,Rd}$: Esfuerzo cortante resistente de cálculo.

$$V_{c,Rd} : \underline{39.92} \text{ kN}$$

Resistencia a momento flector Z y fuerza cortante Y combinados (EAE 2011, Artículo 34.7.1)

No hay interacción entre momento flector y esfuerzo cortante para ninguna combinación. Por lo tanto, la comprobación no procede.

Resistencia a flexión y axil combinados (EAE 2011, Artículo 34.7.2)

Se debe satisfacer:

$$\eta = \frac{M_{y,Ed}}{M_{N,Rd,y}} \leq 1$$

$$h : \underline{0.012} \quad \checkmark$$

$$\eta = \frac{N_{c,Ed}}{\chi_y \cdot A \cdot f_{yd}} + k_{yy} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot W_{pl,y} \cdot f_{yd}} + k_{yz} \cdot \frac{M_{z,Ed}}{W_{pl,z} \cdot f_{yd}} \leq 1$$

$$h : \underline{0.374} \quad \checkmark$$

$$\eta = \frac{N_{c,Ed}}{\chi_z \cdot A \cdot f_{yd}} + k_{zy} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot W_{pl,y} \cdot f_{yd}} + k_{zz} \cdot \frac{M_{z,Ed}}{W_{pl,z} \cdot f_{yd}} \leq 1$$

$$h : \underline{0.370} \quad \checkmark$$

Los esfuerzos solicitantes de cálculo pésimos se producen en el nudo N40, para la combinación de acciones 1.35·PP+1.35·CM1+1.5·SobrecargaUso.

Donde:

$N_{c,Ed}$: Axil de compresión solicitante de cálculo.

$$N_{c,Ed} : \underline{30.24} \text{ kN}$$

$M_{y,Ed}$, $M_{z,Ed}$: Momentos flectores solicitantes de cálculo pésimos, según los ejes Y y Z, respectivamente.

$$M_{y,Ed}^+ : \underline{0.03} \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$M_{z,Ed}^+ : \underline{0.00} \text{ kN}\cdot\text{m}$$

Clase: Clase de la sección, según la capacidad de deformación y de desarrollo de la resistencia plástica de sus elementos planos, para axil y flexión simple.

$$\text{Clase} : \underline{1}$$

$M_{N,Rd,y}$: Momento flector resistente plástico reducido de cálculo, alrededor del eje Y.

$$M_{N,Rd,y} : \underline{2.61} \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$M_{N,Rd,y} = M_{pl,Rd,y} \cdot (1 - n) / (1 - 0.5 \cdot a_w) \leq M_{pl,Rd,y}$$

Siendo:

$$n = N_{c,Ed} / N_{pl,Rd}$$

$$n : \underline{0.214}$$

$N_{pl,Rd}$: Resistencia a compresión de la sección bruta.

$$N_{pl,Rd} : \underline{141.50} \text{ kN}$$

$M_{pl,Rd,y}$: Resistencia a flexión de la sección bruta en régimen plástico, respecto al eje Y.

$$M_{pl,Rd,y} : \underline{2.61} \text{ kN}\cdot\text{m}$$



$$a_w = (A - 2 \cdot b \cdot t_f) / A \leq 0.5$$

A: Área de la sección bruta.

b: Ancho del ala.

t_f: Espesor del ala.

$$a_w : \underline{0.44}$$

$$A : \underline{5.40} \text{ cm}^2$$

$$b : \underline{5.00} \text{ cm}$$

$$t_f : \underline{3.00} \text{ mm}$$

Resistencia a pandeo: (EAE 2011, Artículo 35.3)

A: Área de la sección bruta.

W_{pl,y}, W_{pl,z}: Módulos resistentes plásticos correspondientes a la fibra con mayor tensión, alrededor de los ejes Y y Z, respectivamente.

f_{yd}: Resistencia de cálculo del acero.

$$f_{yd} = f_y / \gamma_{M1}$$

Siendo:

f_y: Límite elástico. (EAE 2011, Artículo 27)

g_{M1}: Coeficiente parcial de seguridad del material.

$$A : \underline{5.40} \text{ cm}^2$$

$$W_{pl,y} : \underline{9.95} \text{ cm}^3$$

$$W_{pl,z} : \underline{9.95} \text{ cm}^3$$

$$f_{yd} : \underline{261.90} \text{ MPa}$$

$$f_y : \underline{275.00} \text{ MPa}$$

$$g_{M1} : \underline{1.05}$$

K_{yy}, K_{yz}, K_{zy}, K_{zz}: Coeficientes de interacción.

$$k_{yy} = C_{m,y} \cdot C_{m,LT} \cdot \frac{\mu_y}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}} \cdot \frac{1}{C_{yy}}$$

$$K_{yy} : \underline{1.12}$$

$$k_{yz} = C_{m,z} \cdot \frac{\mu_y}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}} \cdot \frac{1}{C_{yz}} \cdot 0.6 \cdot \sqrt{\frac{W_z}{W_y}}$$

$$K_{yz} : \underline{0.73}$$

$$k_{zy} = C_{m,y} \cdot C_{m,LT} \cdot \frac{\mu_z}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}} \cdot \frac{1}{C_{zy}} \cdot 0.6 \cdot \sqrt{\frac{W_y}{W_z}}$$

$$K_{zy} : \underline{0.73}$$

$$k_{zz} = C_{m,z} \cdot \frac{\mu_z}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}} \cdot \frac{1}{C_{zz}}$$

$$K_{zz} : \underline{1.12}$$

Términos auxiliares:

$$\mu_y = \frac{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}}{1 - \chi_y \cdot \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}}$$

$$m_y : \underline{0.92}$$

$$\mu_z = \frac{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}}{1 - \chi_z \cdot \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}}$$

$$m_z : \underline{0.92}$$

$$C_{yy} = 1 + (w_y - 1) \cdot \left[\left(2 - \frac{1.6}{w_y} \cdot C_{m,y}^2 \cdot \bar{\lambda}_{max} - \frac{1.6}{w_y} \cdot C_{m,y}^2 \cdot \bar{\lambda}_{max}^2 \right) \cdot n_{pl} - b_{LT} \right] \geq \frac{W_{el,y}}{W_{pl,y}}$$

$$C_{yy} : \underline{0.99}$$

$$C_{yz} = 1 + (w_z - 1) \cdot \left[\left(2 - 14 \cdot \frac{C_{m,z}^2 \cdot \bar{\lambda}_{max}^2}{w_z^5} \right) \cdot n_{pl} - c_{LT} \right] \geq 0.6 \cdot \sqrt{\frac{W_z}{W_y}} \cdot \frac{W_{el,z}}{W_{pl,z}}$$

$$C_{yz} : \underline{0.92}$$

$$C_{zy} = 1 + (w_y - 1) \cdot \left[\left(2 - 14 \cdot \frac{C_{m,y}^2 \cdot \bar{\lambda}_{max}^2}{w_y^5} \right) \cdot n_{pl} - d_{LT} \right] \geq 0.6 \cdot \sqrt{\frac{W_y}{W_z}} \cdot \frac{W_{el,y}}{W_{pl,y}}$$

$$C_{zy} : \underline{0.92}$$

$$C_{zz} = 1 + (w_z - 1) \cdot \left[\left(2 - \frac{1.6}{w_z} \cdot C_{m,z}^2 \cdot \bar{\lambda}_{max} - \frac{1.6}{w_z} \cdot C_{m,z}^2 \cdot \bar{\lambda}_{max}^2 - e_{LT} \right) \cdot n_{pl} \right] \geq \frac{W_{el,z}}{W_{pl,z}}$$

$$C_{zz} : \underline{0.99}$$



$a_{LT} = 1 - \frac{I_t}{I_y} \geq 0$	$a_{LT} : \underline{0.00}$
$b_{LT} = 0.5 \cdot a_{LT} \cdot \bar{\lambda}_0^{-2} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot M_{pl,Rd,y}} \cdot \frac{M_{z,Ed}}{M_{pl,Rd,z}}$	$b_{LT} : \underline{0.00}$
$c_{LT} = 10 \cdot a_{LT} \cdot \frac{\bar{\lambda}_0^{-2}}{5 + \bar{\lambda}_z^{-4}} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{C_{m,y} \cdot \chi_{LT} \cdot M_{pl,Rd,y}}$	$c_{LT} : \underline{0.00}$
$d_{LT} = 2 \cdot a_{LT} \cdot \frac{\bar{\lambda}_0}{0.1 + \bar{\lambda}_z^{-4}} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{C_{m,y} \cdot \chi_{LT} \cdot M_{pl,Rd,y}} \cdot \frac{M_{z,Ed}}{C_{m,z} \cdot M_{pl,Rd,z}}$	$d_{LT} : \underline{0.00}$
$e_{LT} = 1.7 \cdot a_{LT} \cdot \frac{\bar{\lambda}_0}{0.1 + \bar{\lambda}_z^{-4}} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{C_{m,y} \cdot \chi_{LT} \cdot M_{pl,Rd,y}}$	$e_{LT} : \underline{0.00}$
$w_y = \frac{W_{pl,y}}{W_{el,y}} \leq 1.5$	$w_y : \underline{1.28}$
$w_z = \frac{W_{pl,z}}{W_{el,z}} \leq 1.5$	$w_z : \underline{1.28}$
$n_{pl} = \frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}}$	$n_{pl} : \underline{0.21}$

Puesto que:

$$\bar{\lambda}_0 \leq 0.2 \cdot \sqrt{C_1} \cdot \sqrt[4]{\left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}\right) \cdot \left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}\right)} \quad 0.00 \leq 0.18$$

$C_{m,y} = C_{m,y,0}$	$C_{m,y} : \underline{1.00}$
$C_{m,z} = C_{m,z,0}$	$C_{m,z} : \underline{1.00}$
$C_{m,LT} = 1.00$	$C_{m,LT} : \underline{1.00}$

$C_{m,y,0}, C_{m,z,0}$: Factores de momento flector uniforme equivalente.

C_1 : Factor que depende de las condiciones de apoyo y de la forma de la ley de momentos flectores sobre la barra.

c_y, c_z : Coeficientes de reducción por pandeo, alrededor de los ejes Y y Z, respectivamente.

c_{LT} : Coeficiente de reducción por pandeo lateral.

$\bar{I}_{m\acute{a}x}$: Esbeltez máxima entre $\bar{\lambda}_y$ y $\bar{\lambda}_z$.

\bar{I}_y, \bar{I}_z : Esbelteces reducidas en relación a los ejes Y y Z, respectivamente.

\bar{I}_{LT} : Esbeltez reducida.

\bar{I}_0 : Esbeltez reducida, en relación al pandeo lateral, para un momento flector uniforme.

$W_{el,y}, W_{el,z}$: Módulos resistentes elásticos correspondientes a la fibra comprimida, alrededor de los ejes Y y Z, respectivamente.

$N_{cr,y}$: Axil crítico elástico de pandeo por flexión respecto al eje Y.

$N_{cr,z}$: Axil crítico elástico de pandeo por flexión respecto al eje Z.

I_y : Momento de inercia de la sección bruta, respecto al eje Y.

I_t : Momento de inercia a torsión uniforme.

	$C_{m,y,0} : \underline{1.00}$
	$C_{m,z,0} : \underline{1.00}$
	$C_1 : \underline{1.00}$
	$c_y : \underline{0.59}$
	$c_z : \underline{0.59}$
	$c_{LT} : \underline{1.00}$
	$\bar{I}_{m\acute{a}x} : \underline{0.91}$
	$\bar{I}_y : \underline{0.91}$
	$\bar{I}_z : \underline{0.91}$
	$\bar{I}_{LT} : \underline{0.00}$
	$\bar{I}_0 : \underline{0.00}$
	$W_{el,y} : \underline{7.75} \text{ cm}^3$
	$W_{el,z} : \underline{7.75} \text{ cm}^3$
	$N_{cr,y} : \underline{178.39} \text{ kN}$
	$N_{cr,z} : \underline{178.39} \text{ kN}$
	$I_y : \underline{19.37} \text{ cm}^4$
	$I_t : \underline{32.08} \text{ cm}^4$

**Resistencia a flexión, axil y cortante combinados (EAE 2011, Artículo 34.7.3)**

No es necesario reducir las resistencias de cálculo a flexión y a axil, ya que se puede ignorar el efecto de abolladura por esfuerzo cortante y, además, el esfuerzo cortante solicitante de cálculo pésimo V_{Ed} es menor o igual que el 50% del esfuerzo cortante resistente de cálculo $V_{c,Rd}$.

Los esfuerzos solicitantes de cálculo pésimos se producen en el nudo N39, para la combinación de acciones $1.35 \cdot PP + 1.35 \cdot CM1 + 1.5 \cdot SobrecargaUso$.

$$V_{Ed,z} \leq \frac{V_{c,Rd,z}}{2}$$

$$0.08 \text{ kN} \leq 19.96 \text{ kN} \quad \checkmark$$

Donde:

$V_{Ed,z}$: Esfuerzo cortante solicitante de cálculo pésimo.

$$V_{Ed,z} : \underline{0.08} \text{ kN}$$

$V_{c,Rd,z}$: Esfuerzo cortante resistente de cálculo.

$$V_{c,Rd,z} : \underline{39.92} \text{ kN}$$

Resistencia a torsión (EAE 2011, Artículo 34.6)

La comprobación no procede, ya que no hay momento torsor.

Resistencia a cortante Z y momento torsor combinados (EAE 2011, Artículo 34.6)

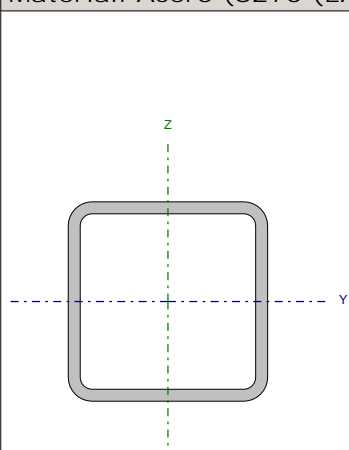
No hay interacción entre momento torsor y esfuerzo cortante para ninguna combinación. Por lo tanto, la comprobación no procede.

Resistencia a cortante Y y momento torsor combinados (EAE 2011, Artículo 34.6)

No hay interacción entre momento torsor y esfuerzo cortante para ninguna combinación. Por lo tanto, la comprobación no procede.



Barra N25/N26

Perfil: SHS 50x3.0 Material: Acero (S275 (EAE))							
	Nudos		Longitud (m)	Características mecánicas			
	Inicial	Final		Área (cm ²)	I _y ⁽¹⁾ (cm ⁴)	I _z ⁽¹⁾ (cm ⁴)	I _t ⁽²⁾ (cm ⁴)
	N25	N26	1.500	5.40	19.37	19.37	32.08
Notas: ⁽¹⁾ Inercia respecto al eje indicado ⁽²⁾ Momento de inercia a torsión uniforme							
	Pandeo			Pandeo lateral			
			Plano XY	Plano XZ	Ala sup.	Ala inf.	
	β		1.00	1.00	0.00	0.00	
	L _K		1.500	1.500	0.000	0.000	
	C _m		1.000	1.000	1.000	1.000	
	C ₁		-		1.000		
Notación: b: Coeficiente de pandeo L _K : Longitud de pandeo (m) C _m : Coeficiente de momentos C ₁ : Factor de modificación para el momento crítico							

**Limitación de esbeltez** (Criterio de CYPE Ingenieros, basado en: Figura 35.1.2 de la norma EAE 2011.)

La esbeltez reducida $\bar{\lambda}$ de las barras comprimidas debe ser inferior al valor 3.0.

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr}}}$$

$$\bar{\lambda} : \underline{0.91} \quad \checkmark$$

Donde:

Clase: Clase de la sección, según la capacidad de deformación y de desarrollo de la resistencia plástica de los elementos planos comprimidos de una sección.

$$\text{Clase} : \underline{1}$$

A: Área de la sección bruta para las secciones de clase 1, 2 y 3.

$$A : \underline{5.40} \text{ cm}^2$$

f_y : Límite elástico. (EAE 2011, Artículo 27)

$$f_y : \underline{275.00} \text{ MPa}$$

N_{cr} : Axil crítico de pandeo elástico.

$$N_{cr} : \underline{178.39} \text{ kN}$$

El axil crítico de pandeo elástico N_{cr} es el menor de los valores obtenidos en a), b) y c):

a) Axil crítico elástico de pandeo por flexión respecto al eje Y.

$$N_{cr,y} : \underline{178.39} \text{ kN}$$

$$N_{cr,y} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{L_{ky}^2}$$

b) Axil crítico elástico de pandeo por flexión respecto al eje Z.

$$N_{cr,z} : \underline{178.39} \text{ kN}$$

$$N_{cr,z} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{L_{kz}^2}$$

c) Axil crítico elástico de pandeo por torsión.

$$N_{cr,T} : \underline{\infty}$$

$$N_{cr,T} = \frac{1}{i_0^2} \cdot \left[G \cdot I_t + \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_w}{L_{kt}^2} \right]$$

Donde:

I_y : Momento de inercia de la sección bruta, respecto al eje Y.

$$I_y : \underline{19.37} \text{ cm}^4$$

I_z : Momento de inercia de la sección bruta, respecto al eje Z.

$$I_z : \underline{19.37} \text{ cm}^4$$

I_t : Momento de inercia a torsión uniforme.

$$I_t : \underline{32.08} \text{ cm}^4$$

I_w : Constante de alabeo de la sección.

$$I_w : \underline{0.00} \text{ cm}^6$$

E: Módulo de elasticidad.

$$E : \underline{210000} \text{ MPa}$$

G: Módulo de elasticidad transversal.

$$G : \underline{81000} \text{ MPa}$$

L_{ky} : Longitud efectiva de pandeo por flexión, respecto al eje Y.

$$L_{ky} : \underline{1.500} \text{ m}$$

L_{kz} : Longitud efectiva de pandeo por flexión, respecto al eje Z.

$$L_{kz} : \underline{1.500} \text{ m}$$

L_{kt} : Longitud efectiva de pandeo por torsión.

$$L_{kt} : \underline{0.000} \text{ m}$$

i_0 : Radio de giro polar de la sección bruta, respecto al centro de torsión.

$$i_0 : \underline{2.68} \text{ cm}$$

$$i_0 = \left(i_y^2 + i_z^2 + y_0^2 + z_0^2 \right)^{0.5}$$

Siendo:

i_y , i_z : Radios de giro de la sección bruta, respecto a los ejes principales de inercia Y y Z.

$$i_y : \underline{1.89} \text{ cm}$$

$$i_z : \underline{1.89} \text{ cm}$$

y_0 , z_0 : Coordenadas del centro de torsión en la dirección de los ejes principales Y y Z, respectivamente, relativas al centro de gravedad de la sección.

$$y_0 : \underline{0.00} \text{ mm}$$

$$z_0 : \underline{0.00} \text{ mm}$$

**Abolladura del alma inducida por el ala comprimida (EAE 2011, Artículo 35.8)**

Se debe satisfacer:

$$\frac{h_w}{t_w} \leq k \frac{E}{f_{yf}} \sqrt{\frac{A_w}{A_{fc,ef}}}$$

$$14.67 \leq 303.92 \quad \checkmark$$

Donde:

 h_w : Altura del alma.

h_w : 44.00 mm

 t_w : Espesor del alma.

t_w : 3.00 mm

 A_w : Área del alma.

A_w : 2.64 cm²

 $A_{fc,ef}$: Área reducida del ala comprimida.

$A_{fc,ef}$: 1.50 cm²

k: Coeficiente que depende de la clase de la sección.

k : 0.30

E: Módulo de elasticidad.

E : 210000 MPa

 f_{yf} : Límite elástico del acero del ala comprimida.

f_{yf} : 275.00 MPa

Siendo:

$$f_{yf} = f_y$$

Resistencia a tracción (EAE 2011, Artículo 34.2)

La comprobación no procede, ya que no hay axil de tracción.

Resistencia a compresión (EAE 2011, Artículo 34.3)

Se debe satisfacer:

$$\eta = \frac{N_{c,Ed}}{N_{c,Rd}} \leq 1$$

$$\eta : \underline{0.166} \quad \checkmark$$

$$\eta = \frac{N_{c,Ed}}{N_{b,Rd}} \leq 1$$

$$\eta : \underline{0.280} \quad \checkmark$$

El esfuerzo solicitante de cálculo pésimo se produce para la combinación de acciones 1.35·PP+1.35·CM1+1.5·SobrecargaUso.

 $N_{c,Ed}$: Axil de compresión solicitante de cálculo pésimo.

$N_{c,Ed}$: 23.50 kN

La resistencia de cálculo a compresión $N_{c,Rd}$ viene dada por:

$$N_{c,Rd} = A \cdot f_{yd}$$

$N_{c,Rd}$: 141.50 kN

Donde:

Clase: Clase de la sección, según la capacidad de deformación y de desarrollo de la resistencia plástica de los elementos planos comprimidos de una sección.

Clase : 1

A: Área de la sección bruta para las secciones de clase 1, 2 y 3.

A : 5.40 cm²

 f_{yd} : Resistencia de cálculo del acero.

f_{yd} : 261.90 MPa

$$f_{yd} = f_y / \gamma_{M0}$$

Siendo:

 f_y : Límite elástico. (EAE 2011, Artículo 27)

f_y : 275.00 MPa

 γ_{M0} : Coeficiente parcial de seguridad del material.

γ_{M0} : 1.05

Resistencia a pandeo: (EAE 2011, Artículo 35.1)



La resistencia de cálculo a pandeo $N_{b,Rd}$ en una barra comprimida viene dada por:

$$N_{b,Rd} = \chi \cdot A \cdot f_{yd}$$

$$N_{b,Rd} : \underline{83.78} \text{ kN}$$

Donde:

A: Área de la sección bruta para las secciones de clase 1, 2 y 3.

$$A : \underline{5.40} \text{ cm}^2$$

f_{yd} : Resistencia de cálculo del acero.

$$f_{yd} : \underline{261.90} \text{ MPa}$$

$$f_{yd} = f_y / \gamma_{M1}$$

Siendo:

f_y : Límite elástico. (EAE 2011, Artículo 27)

$$f_y : \underline{275.00} \text{ MPa}$$

γ_{M1} : Coeficiente parcial de seguridad del material.

$$\gamma_{M1} : \underline{1.05}$$

c: Coeficiente de reducción por pandeo.

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

$$C_y : \underline{0.59}$$

$$C_z : \underline{0.59}$$

Siendo:

$$\Phi = 0.5 \cdot \left[1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda} - 0.2) + (\bar{\lambda})^2 \right]$$

$$f_y : \underline{1.09}$$

$$f_z : \underline{1.09}$$

a: Coeficiente de imperfección elástica.

$$a_y : \underline{0.49}$$

$$a_z : \underline{0.49}$$

$\bar{\lambda}$: Esbeltez reducida.

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr}}}$$

$$\bar{\lambda}_y : \underline{0.91}$$

$$\bar{\lambda}_z : \underline{0.91}$$

N_{cr} : Axil crítico elástico de pandeo, obtenido como el menor de los siguientes valores:

$$N_{cr} : \underline{178.39} \text{ kN}$$

$N_{cr,y}$: Axil crítico elástico de pandeo por flexión respecto al eje Y.

$$N_{cr,y} : \underline{178.39} \text{ kN}$$

$N_{cr,z}$: Axil crítico elástico de pandeo por flexión respecto al eje Z.

$$N_{cr,z} : \underline{178.39} \text{ kN}$$

$N_{cr,T}$: Axil crítico elástico de pandeo por torsión.

$$N_{cr,T} : \underline{\infty}$$

**Resistencia a flexión eje Y (EAE 2011, Artículo 34.4)**

Se debe satisfacer:

$$\eta = \frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} \leq 1$$

$$h : \underline{0.012} \quad \checkmark$$

Para flexión positiva:

 M_{Ed}^+ : Momento flector solicitante de cálculo pésimo.

$$M_{Ed}^+ : \underline{0.00} \text{ kN}\cdot\text{m}$$

Para flexión negativa:

El esfuerzo solicitante de cálculo pésimo se produce en el nudo N26, para la combinación de acciones 1.35·PP+1.35·CM1+1.5·SobrecargaUso.

 M_{Ed}^- : Momento flector solicitante de cálculo pésimo.

$$M_{Ed}^- : \underline{0.03} \text{ kN}\cdot\text{m}$$

El momento flector resistente de cálculo $M_{c,Rd}$ viene dado por:

$$M_{c,Rd} = W_{pl,y} \cdot f_{yd}$$

$$M_{c,Rd} : \underline{2.61} \text{ kN}\cdot\text{m}$$

Donde:

Clase: Clase de la sección, según la capacidad de deformación y de desarrollo de la resistencia plástica de los elementos planos de una sección a flexión simple.

$$\text{Clase} : \underline{1}$$

$W_{pl,y}$: Módulo resistente plástico correspondiente a la fibra con mayor tensión, para las secciones de clase 1 y 2.

$$W_{pl,y} : \underline{9.95} \text{ cm}^3$$

 f_{yd} : Resistencia de cálculo del acero.

$$f_{yd} : \underline{261.90} \text{ MPa}$$

$$f_{yd} = f_y / \gamma_{M0}$$

Siendo:

 f_y : Límite elástico. (EAE 2011, Artículo 27)

$$f_y : \underline{275.00} \text{ MPa}$$

 γ_{M0} : Coeficiente parcial de seguridad del material.

$$\gamma_{M0} : \underline{1.05}$$

Resistencia a flexión eje Z (EAE 2011, Artículo 34.4)

La comprobación no procede, ya que no hay momento flector.

**Resistencia a corte Z (EAE 2011, Artículo 34.5)**

Se debe satisfacer:

$$\eta = \frac{V_{Ed}}{V_{c,Rd}} \leq 1$$

$$h : \underline{0.002} \quad \checkmark$$

El esfuerzo solicitante de cálculo pésimo se produce en el nudo N26, para la combinación de acciones 1.35·PP+1.35·CM1+1.5·SobrecargaUso.

V_{Ed} : Esfuerzo cortante solicitante de cálculo pésimo.

$$V_{Ed} : \underline{0.08} \text{ kN}$$

El esfuerzo cortante resistente de cálculo $V_{c,Rd}$ viene dado por:

$$V_{c,Rd} = A_v \cdot \frac{f_{yd}}{\sqrt{3}}$$

$$V_{c,Rd} : \underline{39.92} \text{ kN}$$

Donde:

A_v : Área transversal a cortante.

$$A_v : \underline{2.64} \text{ cm}^2$$

$$A_v = 2 \cdot d \cdot t_w$$

Siendo:

d: Altura del alma.

$$d : \underline{44.00} \text{ mm}$$

t_w : Espesor del alma.

$$t_w : \underline{3.00} \text{ mm}$$

f_{yd} : Resistencia de cálculo del acero.

$$f_{yd} : \underline{261.90} \text{ MPa}$$

$$f_{yd} = f_y / \gamma_{M0}$$

Siendo:

f_y : Límite elástico. (EAE 2011, Artículo 27)

$$f_y : \underline{275.00} \text{ MPa}$$

γ_{M0} : Coeficiente parcial de seguridad del material.

$$\gamma_{M0} : \underline{1.05}$$

Abolladura por cortante del alma: (EAE 2011, Artículo 35.5)

Aunque no se han dispuesto rigidizadores transversales, no es necesario comprobar la resistencia a la abolladura del alma, puesto que se cumple:

$$\frac{d}{t_w} < \frac{72}{\eta} \cdot \varepsilon$$

$$14.67 < 55.46 \quad \checkmark$$

Donde:

l_w : Esbeltez del alma.

$$l_w : \underline{14.67}$$

$$\lambda_w = \frac{d}{t_w}$$

$l_{m\acute{a}x}$: Esbeltez máxima.

$$l_{m\acute{a}x} : \underline{55.46}$$

$$\lambda_{m\acute{a}x} = \frac{72}{\eta} \cdot \varepsilon$$

h: Coeficiente que permite considerar la resistencia adicional en régimen plástico debida al endurecimiento por deformación del material.

$$h : \underline{1.20}$$

e: Factor de reducción.

$$e : \underline{0.92}$$

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{f_{ref}}{f_y}}$$

Siendo:

f_{ref} : Límite elástico de referencia.

$$f_{ref} : \underline{235.00} \text{ MPa}$$

f_y : Límite elástico. (EAE 2011, Artículo 27)

$$f_y : \underline{275.00} \text{ MPa}$$

**Resistencia a corte Y (EAE 2011, Artículo 34.5)**

La comprobación no procede, ya que no hay esfuerzo cortante.

Resistencia a momento flector Y y fuerza cortante Z combinados (EAE 2011, Artículo 34.7.1)

No es necesario reducir la resistencia de cálculo a flexión, ya que el esfuerzo cortante solicitante de cálculo pésimo V_{Ed} no es superior al 50% de la resistencia de cálculo a cortante $V_{c,Rd}$.

$$V_{Ed} \leq \frac{V_{c,Rd}}{2}$$

$$0.02 \text{ kN} \leq 19.96 \text{ kN} \quad \checkmark$$

Los esfuerzos solicitantes de cálculo pésimos se producen para la combinación de acciones 1.35·PP+CM1.

V_{Ed} : Esfuerzo cortante solicitante de cálculo pésimo.

$$V_{Ed} : \underline{0.02} \text{ kN}$$

$V_{c,Rd}$: Esfuerzo cortante resistente de cálculo.

$$V_{c,Rd} : \underline{39.92} \text{ kN}$$

Resistencia a momento flector Z y fuerza cortante Y combinados (EAE 2011, Artículo 34.7.1)

No hay interacción entre momento flector y esfuerzo cortante para ninguna combinación. Por lo tanto, la comprobación no procede.

Resistencia a flexión y axil combinados (EAE 2011, Artículo 34.7.2)

Se debe satisfacer:

$$\eta = \frac{M_{y,Ed}}{M_{N,Rd,y}} \leq 1$$

$$h : \underline{0.012} \quad \checkmark$$

$$\eta = \frac{N_{c,Ed}}{\chi_y \cdot A \cdot f_{yd}} + k_{yy} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot W_{pl,y} \cdot f_{yd}} + k_{yz} \cdot \frac{M_{z,Ed}}{W_{pl,z} \cdot f_{yd}} \leq 1$$

$$h : \underline{0.294} \quad \checkmark$$

$$\eta = \frac{N_{c,Ed}}{\chi_z \cdot A \cdot f_{yd}} + k_{zy} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot W_{pl,y} \cdot f_{yd}} + k_{zz} \cdot \frac{M_{z,Ed}}{W_{pl,z} \cdot f_{yd}} \leq 1$$

$$h : \underline{0.289} \quad \checkmark$$

Los esfuerzos solicitantes de cálculo pésimos se producen en el nudo N26, para la combinación de acciones 1.35·PP+1.35·CM1+1.5·SobrecargaUso.

Donde:

$N_{c,Ed}$: Axil de compresión solicitante de cálculo.

$$N_{c,Ed} : \underline{23.50} \text{ kN}$$

$M_{y,Ed}$, $M_{z,Ed}$: Momentos flectores solicitantes de cálculo pésimos, según los ejes Y y Z, respectivamente.

$$M_{y,Ed} : \underline{0.03} \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$M_{z,Ed} : \underline{0.00} \text{ kN}\cdot\text{m}$$

Clase: Clase de la sección, según la capacidad de deformación y de desarrollo de la resistencia plástica de sus elementos planos, para axil y flexión simple.

$$\text{Clase} : \underline{1}$$

$M_{N,Rd,y}$: Momento flector resistente plástico reducido de cálculo, alrededor del eje Y.

$$M_{N,Rd,y} : \underline{2.61} \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$M_{N,Rd,y} = M_{pl,Rd,y} \cdot (1 - n) / (1 - 0.5 \cdot a_w) \leq M_{pl,Rd,y}$$

Siendo:

$$n = N_{c,Ed} / N_{pl,Rd}$$

$$n : \underline{0.166}$$

$N_{pl,Rd}$: Resistencia a compresión de la sección bruta.

$$N_{pl,Rd} : \underline{141.50} \text{ kN}$$

$M_{pl,Rd,y}$: Resistencia a flexión de la sección bruta en régimen plástico, respecto al eje Y.

$$M_{pl,Rd,y} : \underline{2.61} \text{ kN}\cdot\text{m}$$



Listados

estructura_12m

Fecha: 07/06/21

$$a_w = (A - 2 \cdot b \cdot t_f) / A \leq 0.5$$

A: Área de la sección bruta.

b: Ancho del ala.

t_f: Espesor del ala.

$$a_w : \underline{0.44}$$

$$A : \underline{5.40} \text{ cm}^2$$

$$b : \underline{5.00} \text{ cm}$$

$$t_f : \underline{3.00} \text{ mm}$$

Resistencia a pandeo: (EAE 2011, Artículo 35.3)

A: Área de la sección bruta.

W_{pl,y}, W_{pl,z}: Módulos resistentes plásticos correspondientes a la fibra con mayor tensión, alrededor de los ejes Y y Z, respectivamente.

f_{yd}: Resistencia de cálculo del acero.

$$f_{yd} = f_y / \gamma_{M1}$$

Siendo:

f_y: Límite elástico. (EAE 2011, Artículo 27)

g_{M1}: Coeficiente parcial de seguridad del material.

$$A : \underline{5.40} \text{ cm}^2$$

$$W_{pl,y} : \underline{9.95} \text{ cm}^3$$

$$W_{pl,z} : \underline{9.95} \text{ cm}^3$$

$$f_{yd} : \underline{261.90} \text{ MPa}$$

$$f_y : \underline{275.00} \text{ MPa}$$

$$g_{M1} : \underline{1.05}$$

K_{yy}, K_{yz}, K_{zy}, K_{zz}: Coeficientes de interacción.

$$k_{yy} = C_{m,y} \cdot C_{m,LT} \cdot \frac{\mu_y}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}} \cdot \frac{1}{C_{yy}}$$

$$K_{yy} : \underline{1.09}$$

$$k_{yz} = C_{m,z} \cdot \frac{\mu_y}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}} \cdot \frac{1}{C_{yz}} \cdot 0.6 \cdot \sqrt{\frac{W_z}{W_y}}$$

$$K_{yz} : \underline{0.69}$$

$$k_{zy} = C_{m,y} \cdot C_{m,LT} \cdot \frac{\mu_z}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}} \cdot \frac{1}{C_{zy}} \cdot 0.6 \cdot \sqrt{\frac{W_y}{W_z}}$$

$$K_{zy} : \underline{0.69}$$

$$k_{zz} = C_{m,z} \cdot \frac{\mu_z}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}} \cdot \frac{1}{C_{zz}}$$

$$K_{zz} : \underline{1.09}$$

Términos auxiliares:

$$\mu_y = \frac{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}}{1 - \chi_y \cdot \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}}$$

$$m_y : \underline{0.94}$$

$$\mu_z = \frac{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}}{1 - \chi_z \cdot \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}}$$

$$m_z : \underline{0.94}$$

$$C_{yy} = 1 + (w_y - 1) \cdot \left[\left(2 - \frac{1.6}{w_y} \cdot C_{m,y}^2 \cdot \bar{\lambda}_{max} - \frac{1.6}{w_y} \cdot C_{m,y}^2 \cdot \bar{\lambda}_{max}^2 \right) \cdot n_{pl} - b_{LT} \right] \geq \frac{W_{el,y}}{W_{pl,y}}$$

$$C_{yy} : \underline{0.99}$$

$$C_{yz} = 1 + (w_z - 1) \cdot \left[\left(2 - 14 \cdot \frac{C_{m,z}^2 \cdot \bar{\lambda}_{max}^2}{w_z^5} \right) \cdot n_{pl} - c_{LT} \right] \geq 0.6 \cdot \sqrt{\frac{W_z}{W_y}} \cdot \frac{W_{el,z}}{W_{pl,z}}$$

$$C_{yz} : \underline{0.94}$$

$$C_{zy} = 1 + (w_y - 1) \cdot \left[\left(2 - 14 \cdot \frac{C_{m,y}^2 \cdot \bar{\lambda}_{max}^2}{w_y^5} \right) \cdot n_{pl} - d_{LT} \right] \geq 0.6 \cdot \sqrt{\frac{W_y}{W_z}} \cdot \frac{W_{el,y}}{W_{pl,y}}$$

$$C_{zy} : \underline{0.94}$$

$$C_{zz} = 1 + (w_z - 1) \cdot \left[\left(2 - \frac{1.6}{w_z} \cdot C_{m,z}^2 \cdot \bar{\lambda}_{max} - \frac{1.6}{w_z} \cdot C_{m,z}^2 \cdot \bar{\lambda}_{max}^2 - e_{LT} \right) \cdot n_{pl} \right] \geq \frac{W_{el,z}}{W_{pl,z}}$$

$$C_{zz} : \underline{0.99}$$



$a_{LT} = 1 - \frac{I_t}{I_y} \geq 0$	$a_{LT} : \underline{0.00}$
$b_{LT} = 0.5 \cdot a_{LT} \cdot \bar{\lambda}_0^{-2} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot M_{pl,Rd,y}} \cdot \frac{M_{z,Ed}}{M_{pl,Rd,z}}$	$b_{LT} : \underline{0.00}$
$c_{LT} = 10 \cdot a_{LT} \cdot \frac{\bar{\lambda}_0^{-2}}{5 + \bar{\lambda}_z^{-4}} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{C_{m,y} \cdot \chi_{LT} \cdot M_{pl,Rd,y}}$	$c_{LT} : \underline{0.00}$
$d_{LT} = 2 \cdot a_{LT} \cdot \frac{\bar{\lambda}_0}{0.1 + \bar{\lambda}_z^{-4}} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{C_{m,y} \cdot \chi_{LT} \cdot M_{pl,Rd,y}} \cdot \frac{M_{z,Ed}}{C_{m,z} \cdot M_{pl,Rd,z}}$	$d_{LT} : \underline{0.00}$
$e_{LT} = 1.7 \cdot a_{LT} \cdot \frac{\bar{\lambda}_0}{0.1 + \bar{\lambda}_z^{-4}} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{C_{m,y} \cdot \chi_{LT} \cdot M_{pl,Rd,y}}$	$e_{LT} : \underline{0.00}$
$w_y = \frac{W_{pl,y}}{W_{el,y}} \leq 1.5$	$w_y : \underline{1.28}$
$w_z = \frac{W_{pl,z}}{W_{el,z}} \leq 1.5$	$w_z : \underline{1.28}$
$n_{pl} = \frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}}$	$n_{pl} : \underline{0.17}$

Puesto que:

$$\bar{\lambda}_0 \leq 0.2 \cdot \sqrt{C_1} \cdot \sqrt[4]{\left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}\right) \cdot \left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}\right)} \quad 0.00 \leq 0.19$$

$C_{m,y} = C_{m,y,0}$	$C_{m,y} : \underline{1.00}$
$C_{m,z} = C_{m,z,0}$	$C_{m,z} : \underline{1.00}$
$C_{m,LT} = 1.00$	$C_{m,LT} : \underline{1.00}$

$C_{m,y,0}$, $C_{m,z,0}$: Factores de momento flector uniforme equivalente.

C_1 : Factor que depende de las condiciones de apoyo y de la forma de la ley de momentos flectores sobre la barra.

c_y , c_z : Coeficientes de reducción por pandeo, alrededor de los ejes Y y Z, respectivamente.

c_{LT} : Coeficiente de reducción por pandeo lateral.

$\bar{I}_{m\acute{a}x}$: Esbeltez máxima entre $\bar{\lambda}_y$ y $\bar{\lambda}_z$.

\bar{I}_y , \bar{I}_z : Esbelteces reducidas en relación a los ejes Y y Z, respectivamente.

\bar{I}_{LT} : Esbeltez reducida.

\bar{I}_0 : Esbeltez reducida, en relación al pandeo lateral, para un momento flector uniforme.

$W_{el,y}$, $W_{el,z}$: Módulos resistentes elásticos correspondientes a la fibra comprimida, alrededor de los ejes Y y Z, respectivamente.

$N_{cr,y}$: Axil crítico elástico de pandeo por flexión respecto al eje Y.

$N_{cr,z}$: Axil crítico elástico de pandeo por flexión respecto al eje Z.

I_y : Momento de inercia de la sección bruta, respecto al eje Y.

I_t : Momento de inercia a torsión uniforme.

**Resistencia a flexión, axil y cortante combinados (EAE 2011, Artículo 34.7.3)**

No es necesario reducir las resistencias de cálculo a flexión y a axil, ya que se puede ignorar el efecto de abolladura por esfuerzo cortante y, además, el esfuerzo cortante solicitante de cálculo pésimo V_{Ed} es menor o igual que el 50% del esfuerzo cortante resistente de cálculo $V_{c,Rd}$.

Los esfuerzos solicitantes de cálculo pésimos se producen para la combinación de acciones 1.35·PP+CM1.

$$V_{Ed,z} \leq \frac{V_{c,Rd,z}}{2}$$

$$0.02 \text{ kN} \leq 19.96 \text{ kN}$$



Donde:

$V_{Ed,z}$: Esfuerzo cortante solicitante de cálculo pésimo.

$$V_{Ed,z} : \underline{0.02} \text{ kN}$$

$V_{c,Rd,z}$: Esfuerzo cortante resistente de cálculo.

$$V_{c,Rd,z} : \underline{39.92} \text{ kN}$$

Resistencia a torsión (EAE 2011, Artículo 34.6)

La comprobación no procede, ya que no hay momento torsor.

Resistencia a cortante Z y momento torsor combinados (EAE 2011, Artículo 34.6)

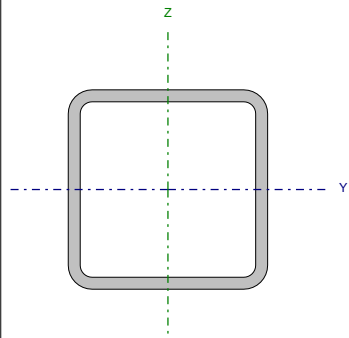
No hay interacción entre momento torsor y esfuerzo cortante para ninguna combinación. Por lo tanto, la comprobación no procede.

Resistencia a cortante Y y momento torsor combinados (EAE 2011, Artículo 34.6)

No hay interacción entre momento torsor y esfuerzo cortante para ninguna combinación. Por lo tanto, la comprobación no procede.



Barra N20/N21

Perfil: SHS 50x3.0 Material: Acero (S275 (EAE))							
	Nudos		Longitud (m)	Características mecánicas			
	Inicial	Final		Área (cm ²)	I _y ⁽¹⁾ (cm ⁴)	I _z ⁽¹⁾ (cm ⁴)	I _t ⁽²⁾ (cm ⁴)
	N20	N21	1.500	5.40	19.37	19.37	32.08
Notas: ⁽¹⁾ Inercia respecto al eje indicado ⁽²⁾ Momento de inercia a torsión uniforme							
	Pandeo			Pandeo lateral			
			Plano XY	Plano XZ	Ala sup.	Ala inf.	
	β		1.00	1.00	0.00	0.00	
	L _K		1.500	1.500	0.000	0.000	
	C _m		1.000	1.000	1.000	1.000	
	C ₁		-		1.000		
Notación: b: Coeficiente de pandeo L _K : Longitud de pandeo (m) C _m : Coeficiente de momentos C ₁ : Factor de modificación para el momento crítico							

**Limitación de esbeltez** (Criterio de CYPE Ingenieros, basado en: Figura 35.1.2 de la norma EAE 2011.)

La esbeltez reducida $\bar{\lambda}$ de las barras comprimidas debe ser inferior al valor 3.0.

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr}}}$$

$$\bar{\lambda} : \underline{0.91} \quad \checkmark$$

Donde:

Clase: Clase de la sección, según la capacidad de deformación y de desarrollo de la resistencia plástica de los elementos planos comprimidos de una sección.

$$\text{Clase} : \underline{1}$$

A: Área de la sección bruta para las secciones de clase 1, 2 y 3.

$$A : \underline{5.40} \text{ cm}^2$$

f_y : Límite elástico. (EAE 2011, Artículo 27)

$$f_y : \underline{275.00} \text{ MPa}$$

N_{cr} : Axil crítico de pandeo elástico.

$$N_{cr} : \underline{178.39} \text{ kN}$$

El axil crítico de pandeo elástico N_{cr} es el menor de los valores obtenidos en a), b) y c):

a) Axil crítico elástico de pandeo por flexión respecto al eje Y.

$$N_{cr,y} : \underline{178.39} \text{ kN}$$

$$N_{cr,y} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{L_{ky}^2}$$

b) Axil crítico elástico de pandeo por flexión respecto al eje Z.

$$N_{cr,z} : \underline{178.39} \text{ kN}$$

$$N_{cr,z} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{L_{kz}^2}$$

c) Axil crítico elástico de pandeo por torsión.

$$N_{cr,T} : \underline{\infty}$$

$$N_{cr,T} = \frac{1}{i_0^2} \cdot \left[G \cdot I_t + \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_w}{L_{kt}^2} \right]$$

Donde:

I_y : Momento de inercia de la sección bruta, respecto al eje Y.

$$I_y : \underline{19.37} \text{ cm}^4$$

I_z : Momento de inercia de la sección bruta, respecto al eje Z.

$$I_z : \underline{19.37} \text{ cm}^4$$

I_t : Momento de inercia a torsión uniforme.

$$I_t : \underline{32.08} \text{ cm}^4$$

I_w : Constante de alabeo de la sección.

$$I_w : \underline{0.00} \text{ cm}^6$$

E: Módulo de elasticidad.

$$E : \underline{210000} \text{ MPa}$$

G: Módulo de elasticidad transversal.

$$G : \underline{81000} \text{ MPa}$$

L_{ky} : Longitud efectiva de pandeo por flexión, respecto al eje Y.

$$L_{ky} : \underline{1.500} \text{ m}$$

L_{kz} : Longitud efectiva de pandeo por flexión, respecto al eje Z.

$$L_{kz} : \underline{1.500} \text{ m}$$

L_{kt} : Longitud efectiva de pandeo por torsión.

$$L_{kt} : \underline{0.000} \text{ m}$$

i_0 : Radio de giro polar de la sección bruta, respecto al centro de torsión.

$$i_0 : \underline{2.68} \text{ cm}$$

$$i_0 = \left(i_y^2 + i_z^2 + y_0^2 + z_0^2 \right)^{0.5}$$

Siendo:

i_y , i_z : Radios de giro de la sección bruta, respecto a los ejes principales de inercia Y y Z.

$$i_y : \underline{1.89} \text{ cm}$$

$$i_z : \underline{1.89} \text{ cm}$$

y_0 , z_0 : Coordenadas del centro de torsión en la dirección de los ejes principales Y y Z, respectivamente, relativas al centro de gravedad de la sección.

$$y_0 : \underline{0.00} \text{ mm}$$

$$z_0 : \underline{0.00} \text{ mm}$$

**Abolladura del alma inducida por el ala comprimida (EAE 2011, Artículo 35.8)**

Se debe satisfacer:

$$\frac{h_w}{t_w} \leq k \frac{E}{f_{yf}} \sqrt{\frac{A_w}{A_{fc,ef}}}$$

$$14.67 \leq 303.92 \quad \checkmark$$

Donde:

 h_w : Altura del alma.

h_w : 44.00 mm

 t_w : Espesor del alma.

t_w : 3.00 mm

 A_w : Área del alma.

A_w : 2.64 cm²

 $A_{fc,ef}$: Área reducida del ala comprimida.

$A_{fc,ef}$: 1.50 cm²

k: Coeficiente que depende de la clase de la sección.

k : 0.30

E: Módulo de elasticidad.

E : 210000 MPa

 f_{yf} : Límite elástico del acero del ala comprimida.

f_{yf} : 275.00 MPa

Siendo:

$$f_{yf} = f_y$$

Resistencia a tracción (EAE 2011, Artículo 34.2)

La comprobación no procede, ya que no hay axil de tracción.

Resistencia a compresión (EAE 2011, Artículo 34.3)

Se debe satisfacer:

$$\eta = \frac{N_{c,Ed}}{N_{c,Rd}} \leq 1$$

$$\eta : \underline{0.166} \quad \checkmark$$

$$\eta = \frac{N_{c,Ed}}{N_{b,Rd}} \leq 1$$

$$\eta : \underline{0.280} \quad \checkmark$$

El esfuerzo solicitante de cálculo pésimo se produce para la combinación de acciones 1.35·PP+1.35·CM1+1.5·SobrecargaUso.

 $N_{c,Ed}$: Axil de compresión solicitante de cálculo pésimo.

$N_{c,Ed}$: 23.50 kN

La resistencia de cálculo a compresión $N_{c,Rd}$ viene dada por:

$$N_{c,Rd} = A \cdot f_{yd}$$

$N_{c,Rd}$: 141.50 kN

Donde:

Clase: Clase de la sección, según la capacidad de deformación y de desarrollo de la resistencia plástica de los elementos planos comprimidos de una sección.

Clase : 1

A: Área de la sección bruta para las secciones de clase 1, 2 y 3.

A : 5.40 cm²

 f_{yd} : Resistencia de cálculo del acero.

f_{yd} : 261.90 MPa

$$f_{yd} = f_y / \gamma_{M0}$$

Siendo:

 f_y : Límite elástico. (EAE 2011, Artículo 27)

f_y : 275.00 MPa

 γ_{M0} : Coeficiente parcial de seguridad del material.

γ_{M0} : 1.05

Resistencia a pandeo: (EAE 2011, Artículo 35.1)



La resistencia de cálculo a pandeo $N_{b,Rd}$ en una barra comprimida viene dada por:

$$N_{b,Rd} = \chi \cdot A \cdot f_{yd}$$

$$N_{b,Rd} : \underline{83.78} \text{ kN}$$

Donde:

A: Área de la sección bruta para las secciones de clase 1, 2 y 3.

$$A : \underline{5.40} \text{ cm}^2$$

f_{yd} : Resistencia de cálculo del acero.

$$f_{yd} : \underline{261.90} \text{ MPa}$$

$$f_{yd} = f_y / \gamma_{M1}$$

Siendo:

f_y : Límite elástico. (EAE 2011, Artículo 27)

$$f_y : \underline{275.00} \text{ MPa}$$

γ_{M1} : Coeficiente parcial de seguridad del material.

$$\gamma_{M1} : \underline{1.05}$$

c: Coeficiente de reducción por pandeo.

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

$$C_y : \underline{0.59}$$

$$C_z : \underline{0.59}$$

Siendo:

$$\Phi = 0.5 \cdot \left[1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda} - 0.2) + (\bar{\lambda})^2 \right]$$

$$f_y : \underline{1.09}$$

$$f_z : \underline{1.09}$$

a: Coeficiente de imperfección elástica.

$$a_y : \underline{0.49}$$

$$a_z : \underline{0.49}$$

$\bar{\lambda}$: Esbeltez reducida.

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr}}}$$

$$\bar{\lambda}_y : \underline{0.91}$$

$$\bar{\lambda}_z : \underline{0.91}$$

N_{cr} : Axil crítico elástico de pandeo, obtenido como el menor de los siguientes valores:

$$N_{cr} : \underline{178.39} \text{ kN}$$

$N_{cr,y}$: Axil crítico elástico de pandeo por flexión respecto al eje Y.

$$N_{cr,y} : \underline{178.39} \text{ kN}$$

$N_{cr,z}$: Axil crítico elástico de pandeo por flexión respecto al eje Z.

$$N_{cr,z} : \underline{178.39} \text{ kN}$$

$N_{cr,T}$: Axil crítico elástico de pandeo por torsión.

$$N_{cr,T} : \underline{\infty}$$

**Resistencia a flexión eje Y (EAE 2011, Artículo 34.4)**

Se debe satisfacer:

$$\eta = \frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} \leq 1$$

$$h : \underline{0.012} \quad \checkmark$$

Para flexión positiva:

 M_{Ed}^+ : Momento flector solicitante de cálculo pésimo.

$$M_{Ed}^+ : \underline{0.00} \text{ kN}\cdot\text{m}$$

Para flexión negativa:

El esfuerzo solicitante de cálculo pésimo se produce en el nudo N20, para la combinación de acciones 1.35·PP+1.35·CM1+1.5·SobrecargaUso.

 M_{Ed}^- : Momento flector solicitante de cálculo pésimo.

$$M_{Ed}^- : \underline{0.03} \text{ kN}\cdot\text{m}$$

El momento flector resistente de cálculo $M_{c,Rd}$ viene dado por:

$$M_{c,Rd} = W_{pl,y} \cdot f_{yd}$$

$$M_{c,Rd} : \underline{2.61} \text{ kN}\cdot\text{m}$$

Donde:

Clase: Clase de la sección, según la capacidad de deformación y de desarrollo de la resistencia plástica de los elementos planos de una sección a flexión simple.

$$\text{Clase} : \underline{1}$$

$W_{pl,y}$: Módulo resistente plástico correspondiente a la fibra con mayor tensión, para las secciones de clase 1 y 2.

$$W_{pl,y} : \underline{9.95} \text{ cm}^3$$

 f_{yd} : Resistencia de cálculo del acero.

$$f_{yd} : \underline{261.90} \text{ MPa}$$

$$f_{yd} = f_y / \gamma_{M0}$$

Siendo:

 f_y : Límite elástico. (EAE 2011, Artículo 27)

$$f_y : \underline{275.00} \text{ MPa}$$

 γ_{M0} : Coeficiente parcial de seguridad del material.

$$\gamma_{M0} : \underline{1.05}$$

Resistencia a flexión eje Z (EAE 2011, Artículo 34.4)

La comprobación no procede, ya que no hay momento flector.

**Resistencia a corte Z (EAE 2011, Artículo 34.5)**

Se debe satisfacer:

$$\eta = \frac{V_{Ed}}{V_{c,Rd}} \leq 1$$

$$h : \underline{0.002} \quad \checkmark$$

El esfuerzo solicitante de cálculo pésimo se produce en el nudo N20, para la combinación de acciones 1.35·PP+1.35·CM1+1.5·SobrecargaUso.

V_{Ed} : Esfuerzo cortante solicitante de cálculo pésimo.

$$V_{Ed} : \underline{0.08} \text{ kN}$$

El esfuerzo cortante resistente de cálculo $V_{c,Rd}$ viene dado por:

$$V_{c,Rd} = A_v \cdot \frac{f_{yd}}{\sqrt{3}}$$

$$V_{c,Rd} : \underline{39.92} \text{ kN}$$

Donde:

A_v : Área transversal a cortante.

$$A_v : \underline{2.64} \text{ cm}^2$$

$$A_v = 2 \cdot d \cdot t_w$$

Siendo:

d: Altura del alma.

$$d : \underline{44.00} \text{ mm}$$

t_w : Espesor del alma.

$$t_w : \underline{3.00} \text{ mm}$$

f_{yd} : Resistencia de cálculo del acero.

$$f_{yd} : \underline{261.90} \text{ MPa}$$

$$f_{yd} = f_y / \gamma_{M0}$$

Siendo:

f_y : Límite elástico. (EAE 2011, Artículo 27)

$$f_y : \underline{275.00} \text{ MPa}$$

γ_{M0} : Coeficiente parcial de seguridad del material.

$$\gamma_{M0} : \underline{1.05}$$

Abolladura por cortante del alma: (EAE 2011, Artículo 35.5)

Aunque no se han dispuesto rigidizadores transversales, no es necesario comprobar la resistencia a la abolladura del alma, puesto que se cumple:

$$\frac{d}{t_w} < \frac{72}{\eta} \cdot \varepsilon$$

$$14.67 < 55.46 \quad \checkmark$$

Donde:

l_w : Esbeltez del alma.

$$l_w : \underline{14.67}$$

$$\lambda_w = \frac{d}{t_w}$$

$l_{m\acute{a}x}$: Esbeltez máxima.

$$l_{m\acute{a}x} : \underline{55.46}$$

$$\lambda_{m\acute{a}x} = \frac{72}{\eta} \cdot \varepsilon$$

h: Coeficiente que permite considerar la resistencia adicional en régimen plástico debida al endurecimiento por deformación del material.

$$h : \underline{1.20}$$

e: Factor de reducción.

$$e : \underline{0.92}$$

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{f_{ref}}{f_y}}$$

Siendo:

f_{ref} : Límite elástico de referencia.

$$f_{ref} : \underline{235.00} \text{ MPa}$$

f_y : Límite elástico. (EAE 2011, Artículo 27)

$$f_y : \underline{275.00} \text{ MPa}$$

**Resistencia a corte Y (EAE 2011, Artículo 34.5)**

La comprobación no procede, ya que no hay esfuerzo cortante.

Resistencia a momento flector Y y fuerza cortante Z combinados (EAE 2011, Artículo 34.7.1)

No es necesario reducir la resistencia de cálculo a flexión, ya que el esfuerzo cortante solicitante de cálculo pésimo V_{Ed} no es superior al 50% de la resistencia de cálculo a cortante $V_{c,Rd}$.

$$V_{Ed} \leq \frac{V_{c,Rd}}{2}$$

$$0.08 \text{ kN} \leq 19.96 \text{ kN} \quad \checkmark$$

Los esfuerzos solicitantes de cálculo pésimos se producen para la combinación de acciones 1.35·PP+1.35·CM1+1.5·SobrecargaUso.

V_{Ed} : Esfuerzo cortante solicitante de cálculo pésimo.

$$V_{Ed} : \underline{0.08} \text{ kN}$$

$V_{c,Rd}$: Esfuerzo cortante resistente de cálculo.

$$V_{c,Rd} : \underline{39.92} \text{ kN}$$

Resistencia a momento flector Z y fuerza cortante Y combinados (EAE 2011, Artículo 34.7.1)

No hay interacción entre momento flector y esfuerzo cortante para ninguna combinación. Por lo tanto, la comprobación no procede.

Resistencia a flexión y axil combinados (EAE 2011, Artículo 34.7.2)

Se debe satisfacer:

$$\eta = \frac{M_{y,Ed}}{M_{N,Rd,y}} \leq 1$$

$$h : \underline{0.012} \quad \checkmark$$

$$\eta = \frac{N_{c,Ed}}{\chi_y \cdot A \cdot f_{yd}} + k_{yy} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot W_{pl,y} \cdot f_{yd}} + k_{yz} \cdot \frac{M_{z,Ed}}{W_{pl,z} \cdot f_{yd}} \leq 1$$

$$h : \underline{0.294} \quad \checkmark$$

$$\eta = \frac{N_{c,Ed}}{\chi_z \cdot A \cdot f_{yd}} + k_{zy} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot W_{pl,y} \cdot f_{yd}} + k_{zz} \cdot \frac{M_{z,Ed}}{W_{pl,z} \cdot f_{yd}} \leq 1$$

$$h : \underline{0.289} \quad \checkmark$$

Los esfuerzos solicitantes de cálculo pésimos se producen en el nudo N20, para la combinación de acciones 1.35·PP+1.35·CM1+1.5·SobrecargaUso.

Donde:

$N_{c,Ed}$: Axil de compresión solicitante de cálculo.

$$N_{c,Ed} : \underline{23.50} \text{ kN}$$

$M_{y,Ed}$, $M_{z,Ed}$: Momentos flectores solicitantes de cálculo pésimos, según los ejes Y y Z, respectivamente.

$$M_{y,Ed} : \underline{0.03} \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$M_{z,Ed} : \underline{0.00} \text{ kN}\cdot\text{m}$$

Clase: Clase de la sección, según la capacidad de deformación y de desarrollo de la resistencia plástica de sus elementos planos, para axil y flexión simple.

$$\text{Clase} : \underline{1}$$

$M_{N,Rd,y}$: Momento flector resistente plástico reducido de cálculo, alrededor del eje Y.

$$M_{N,Rd,y} : \underline{2.61} \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$M_{N,Rd,y} = M_{pl,Rd,y} \cdot (1 - n) / (1 - 0.5 \cdot a_w) \leq M_{pl,Rd,y}$$

Siendo:

$$n = N_{c,Ed} / N_{pl,Rd}$$

$$n : \underline{0.166}$$

$N_{pl,Rd}$: Resistencia a compresión de la sección bruta.

$$N_{pl,Rd} : \underline{141.50} \text{ kN}$$

$M_{pl,Rd,y}$: Resistencia a flexión de la sección bruta en régimen plástico, respecto al eje Y.

$$M_{pl,Rd,y} : \underline{2.61} \text{ kN}\cdot\text{m}$$



$$a_w = (A - 2 \cdot b \cdot t_f) / A \leq 0.5$$

A: Área de la sección bruta.

b: Ancho del ala.

t_f: Espesor del ala.

$$a_w : \underline{0.44}$$

$$A : \underline{5.40} \text{ cm}^2$$

$$b : \underline{5.00} \text{ cm}$$

$$t_f : \underline{3.00} \text{ mm}$$

Resistencia a pandeo: (EAE 2011, Artículo 35.3)

A: Área de la sección bruta.

W_{pl,y}, W_{pl,z}: Módulos resistentes plásticos correspondientes a la fibra con mayor tensión, alrededor de los ejes Y y Z, respectivamente.

f_{yd}: Resistencia de cálculo del acero.

$$f_{yd} = f_y / \gamma_{M1}$$

Siendo:

f_y: Límite elástico. (EAE 2011, Artículo 27)

g_{M1}: Coeficiente parcial de seguridad del material.

$$A : \underline{5.40} \text{ cm}^2$$

$$W_{pl,y} : \underline{9.95} \text{ cm}^3$$

$$W_{pl,z} : \underline{9.95} \text{ cm}^3$$

$$f_{yd} : \underline{261.90} \text{ MPa}$$

$$f_y : \underline{275.00} \text{ MPa}$$

$$g_{M1} : \underline{1.05}$$

K_{yy}, K_{yz}, K_{zy}, K_{zz}: Coeficientes de interacción.

$$k_{yy} = C_{m,y} \cdot C_{m,LT} \cdot \frac{\mu_y}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}} \cdot \frac{1}{C_{yy}}$$

$$K_{yy} : \underline{1.09}$$

$$k_{yz} = C_{m,z} \cdot \frac{\mu_y}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}} \cdot \frac{1}{C_{yz}} \cdot 0.6 \cdot \sqrt{\frac{W_z}{W_y}}$$

$$K_{yz} : \underline{0.69}$$

$$k_{zy} = C_{m,y} \cdot C_{m,LT} \cdot \frac{\mu_z}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}} \cdot \frac{1}{C_{zy}} \cdot 0.6 \cdot \sqrt{\frac{W_y}{W_z}}$$

$$K_{zy} : \underline{0.69}$$

$$k_{zz} = C_{m,z} \cdot \frac{\mu_z}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}} \cdot \frac{1}{C_{zz}}$$

$$K_{zz} : \underline{1.09}$$

Términos auxiliares:

$$\mu_y = \frac{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}}{1 - \chi_y \cdot \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}}$$

$$m_y : \underline{0.94}$$

$$\mu_z = \frac{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}}{1 - \chi_z \cdot \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}}$$

$$m_z : \underline{0.94}$$

$$C_{yy} = 1 + (w_y - 1) \cdot \left[\left(2 - \frac{1.6}{w_y} \cdot C_{m,y}^2 \cdot \bar{\lambda}_{max} - \frac{1.6}{w_y} \cdot C_{m,y}^2 \cdot \bar{\lambda}_{max}^2 \right) \cdot n_{pl} - b_{LT} \right] \geq \frac{W_{el,y}}{W_{pl,y}}$$

$$C_{yy} : \underline{0.99}$$

$$C_{yz} = 1 + (w_z - 1) \cdot \left[\left(2 - 14 \cdot \frac{C_{m,z}^2 \cdot \bar{\lambda}_{max}^2}{w_z^5} \right) \cdot n_{pl} - c_{LT} \right] \geq 0.6 \cdot \sqrt{\frac{W_z}{W_y}} \cdot \frac{W_{el,z}}{W_{pl,z}}$$

$$C_{yz} : \underline{0.94}$$

$$C_{zy} = 1 + (w_y - 1) \cdot \left[\left(2 - 14 \cdot \frac{C_{m,y}^2 \cdot \bar{\lambda}_{max}^2}{w_y^5} \right) \cdot n_{pl} - d_{LT} \right] \geq 0.6 \cdot \sqrt{\frac{W_y}{W_z}} \cdot \frac{W_{el,y}}{W_{pl,y}}$$

$$C_{zy} : \underline{0.94}$$

$$C_{zz} = 1 + (w_z - 1) \cdot \left[\left(2 - \frac{1.6}{w_z} \cdot C_{m,z}^2 \cdot \bar{\lambda}_{max} - \frac{1.6}{w_z} \cdot C_{m,z}^2 \cdot \bar{\lambda}_{max}^2 - e_{LT} \right) \cdot n_{pl} \right] \geq \frac{W_{el,z}}{W_{pl,z}}$$

$$C_{zz} : \underline{0.99}$$



Listados

estructura_12m

Fecha: 07/06/21

$$a_{LT} = 1 - \frac{I_t}{I_y} \geq 0 \quad a_{LT} : \underline{0.00}$$

$$b_{LT} = 0.5 \cdot a_{LT} \cdot \bar{\lambda}_0^{-2} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot M_{pl,Rd,y}} \cdot \frac{M_{z,Ed}}{M_{pl,Rd,z}} \quad b_{LT} : \underline{0.00}$$

$$c_{LT} = 10 \cdot a_{LT} \cdot \frac{\bar{\lambda}_0^{-2}}{5 + \bar{\lambda}_z^{-4}} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{C_{m,y} \cdot \chi_{LT} \cdot M_{pl,Rd,y}} \quad c_{LT} : \underline{0.00}$$

$$d_{LT} = 2 \cdot a_{LT} \cdot \frac{\bar{\lambda}_0}{0.1 + \bar{\lambda}_z^{-4}} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{C_{m,y} \cdot \chi_{LT} \cdot M_{pl,Rd,y}} \cdot \frac{M_{z,Ed}}{C_{m,z} \cdot M_{pl,Rd,z}} \quad d_{LT} : \underline{0.00}$$

$$e_{LT} = 1.7 \cdot a_{LT} \cdot \frac{\bar{\lambda}_0}{0.1 + \bar{\lambda}_z^{-4}} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{C_{m,y} \cdot \chi_{LT} \cdot M_{pl,Rd,y}} \quad e_{LT} : \underline{0.00}$$

$$w_y = \frac{W_{pl,y}}{W_{el,y}} \leq 1.5 \quad w_y : \underline{1.28}$$

$$w_z = \frac{W_{pl,z}}{W_{el,z}} \leq 1.5 \quad w_z : \underline{1.28}$$

$$n_{pl} = \frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}} \quad n_{pl} : \underline{0.17}$$

Puesto que:

$$\bar{\lambda}_0 \leq 0.2 \cdot \sqrt{C_1} \cdot \sqrt[4]{\left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}\right) \cdot \left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}\right)} \quad 0.00 \leq 0.19$$

$$C_{m,y} = C_{m,y,0} \quad C_{m,y} : \underline{1.00}$$

$$C_{m,z} = C_{m,z,0} \quad C_{m,z} : \underline{1.00}$$

$$C_{m,LT} = 1.00 \quad C_{m,LT} : \underline{1.00}$$

$C_{m,y,0}$, $C_{m,z,0}$: Factores de momento flector uniforme equivalente.

$$C_{m,y,0} : \underline{1.00}$$

$$C_{m,z,0} : \underline{1.00}$$

$$C_1 : \underline{1.00}$$

C_1 : Factor que depende de las condiciones de apoyo y de la forma de la ley de momentos flectores sobre la barra.

c_y , c_z : Coeficientes de reducción por pandeo, alrededor de los ejes Y y Z, respectivamente. $c_y : \underline{0.59}$
 $c_z : \underline{0.59}$

c_{LT} : Coeficiente de reducción por pandeo lateral. $c_{LT} : \underline{1.00}$

$\bar{I}_{m\acute{a}x}$: Esbeltez máxima entre $\bar{\lambda}_y$ y $\bar{\lambda}_z$. $\bar{I}_{m\acute{a}x} : \underline{0.91}$

\bar{I}_y , \bar{I}_z : Esbelteces reducidas en relación a los ejes Y y Z, respectivamente. $\bar{I}_y : \underline{0.91}$
 $\bar{I}_z : \underline{0.91}$

\bar{I}_{LT} : Esbeltez reducida. $\bar{I}_{LT} : \underline{0.00}$

\bar{I}_0 : Esbeltez reducida, en relación al pandeo lateral, para un momento flector uniforme. $\bar{I}_0 : \underline{0.00}$

$W_{el,y}$, $W_{el,z}$: Módulos resistentes elásticos correspondientes a la fibra comprimida, alrededor de los ejes Y y Z, respectivamente. $W_{el,y} : \underline{7.75} \text{ cm}^3$
 $W_{el,z} : \underline{7.75} \text{ cm}^3$

$N_{cr,y}$: Axil crítico elástico de pandeo por flexión respecto al eje Y. $N_{cr,y} : \underline{178.39} \text{ kN}$

$N_{cr,z}$: Axil crítico elástico de pandeo por flexión respecto al eje Z. $N_{cr,z} : \underline{178.39} \text{ kN}$

I_y : Momento de inercia de la sección bruta, respecto al eje Y. $I_y : \underline{19.37} \text{ cm}^4$

I_t : Momento de inercia a torsión uniforme. $I_t : \underline{32.08} \text{ cm}^4$

**Resistencia a flexión, axil y cortante combinados (EAE 2011, Artículo 34.7.3)**

No es necesario reducir las resistencias de cálculo a flexión y a axil, ya que se puede ignorar el efecto de abolladura por esfuerzo cortante y, además, el esfuerzo cortante solicitante de cálculo pésimo V_{Ed} es menor o igual que el 50% del esfuerzo cortante resistente de cálculo $V_{c,Rd}$.

Los esfuerzos solicitantes de cálculo pésimos se producen para la combinación de acciones $1.35 \cdot PP + 1.35 \cdot CM1 + 1.5 \cdot \text{SobrecargaUso}$.

$$V_{Ed,z} \leq \frac{V_{c,Rd,z}}{2}$$

$$0.08 \text{ kN} \leq 19.96 \text{ kN}$$



Donde:

$V_{Ed,z}$: Esfuerzo cortante solicitante de cálculo pésimo.

$$V_{Ed,z} : \underline{0.08} \text{ kN}$$

$V_{c,Rd,z}$: Esfuerzo cortante resistente de cálculo.

$$V_{c,Rd,z} : \underline{39.92} \text{ kN}$$

Resistencia a torsión (EAE 2011, Artículo 34.6)

La comprobación no procede, ya que no hay momento torsor.

Resistencia a cortante Z y momento torsor combinados (EAE 2011, Artículo 34.6)

No hay interacción entre momento torsor y esfuerzo cortante para ninguna combinación. Por lo tanto, la comprobación no procede.

Resistencia a cortante Y y momento torsor combinados (EAE 2011, Artículo 34.6)

No hay interacción entre momento torsor y esfuerzo cortante para ninguna combinación. Por lo tanto, la comprobación no procede.



2.2.2.2.- Comprobaciones E.L.U. (Resumido)

Barras	COMPROBACIONES (EAE 2011)													Estado		
	$\bar{\lambda}$	$\bar{\lambda}_{cr}$	N_{Ed}	N_{Rd}	M_{Ed}	M_{Rd}	V_{Ed}	V_{Rd}	M_{Ed}	M_{Rd}	NMM_{Ed}	NMM_{Rd}	M_{Ed}		MV_{Ed}	MV_{Rd}
N1/N2	$\bar{\lambda} < 3.0$ Cumple	$\bar{\lambda}_{cr} \leq \bar{\lambda}_{cr,max}$ Cumple	$N_{Ed} = 0.00$ N.P. ⁽⁵⁾	$\eta = 1.5$	x: 1.5 m $\eta = 1.5$	x: 0 m $\eta = 0.2$	x: 0 m $\eta = 0.3$	$\eta < 0.1$	$\eta < 0.1$	$\eta < 0.1$	x: 1.5 m $\eta = 3.1$	$\eta < 0.1$	$\eta = 0.1$	x: 0 m $\eta = 0.3$	$\eta < 0.1$	CUMPLE h = 3.1
N29/N28	$\bar{\lambda} < 3.0$ Cumple	$\bar{\lambda}_{cr} \leq \bar{\lambda}_{cr,max}$ Cumple	$N_{Ed} = 0.00$ N.P. ⁽⁵⁾	$\eta = 1.5$	x: 1.5 m $\eta = 1.5$	x: 0 m $\eta = 0.2$	x: 0 m $\eta = 0.3$	$\eta < 0.1$	$\eta < 0.1$	$\eta < 0.1$	x: 1.5 m $\eta = 3.1$	$\eta < 0.1$	$\eta = 0.1$	x: 0 m $\eta = 0.3$	$\eta < 0.1$	CUMPLE h = 3.1
N3/N4	$\bar{\lambda} < 3.0$ Cumple	$\bar{\lambda}_{cr} \leq \bar{\lambda}_{cr,max}$ Cumple	$N_{Ed} = 0.00$ N.P. ⁽⁵⁾	$\eta = 0.1$	x: 1.5 m $\eta = 1.5$	x: 0 m $\eta < 0.1$	x: 0 m $\eta = 0.3$	$\eta < 0.1$	$\eta < 0.1$	$\eta < 0.1$	x: 1.5 m $\eta = 1.6$	$\eta < 0.1$	$\eta = 0.1$	x: 0 m $\eta = 0.3$	$\eta < 0.1$	CUMPLE h = 1.6
N2/N5	$\bar{\lambda} < 3.0$ Cumple	$\bar{\lambda}_{cr} \leq \bar{\lambda}_{cr,max}$ Cumple	$N_{Ed} = 0.00$ N.P. ⁽⁵⁾	$\eta = 0.3$	x: 1.5 m $\eta = 2.2$	x: 1.5 m $\eta = 0.3$	x: 0 m $\eta = 0.2$	$\eta = 0.1$	$\eta < 0.1$	$\eta < 0.1$	x: 1.5 m $\eta = 2.7$	$\eta < 0.1$	$\eta = 0.1$	x: 0 m $\eta = 0.2$	$\eta = 0.1$	CUMPLE h = 2.7
N6/N5	N.P. ⁽⁵⁾	$\bar{\lambda}_{cr} \leq \bar{\lambda}_{cr,max}$ Cumple	$\eta < 0.1$	$N_{Ed} = 0.00$ N.P. ⁽⁵⁾	x: 0.163 m $\eta = 0.7$	x: 0 m $\eta = 0.9$	x: 0.65 m $\eta = 0.4$	$\eta = 0.5$	$\eta < 0.1$	$\eta < 0.1$	x: 0 m $\eta = 1.3$	$\eta < 0.1$	$\eta = 0.2$	x: 0.65 m $\eta = 0.4$	$\eta = 0.5$	CUMPLE h = 1.3
N4/N6	N.P. ⁽⁵⁾	$\bar{\lambda}_{cr} \leq \bar{\lambda}_{cr,max}$ Cumple	$\eta < 0.1$	$N_{Ed} = 0.00$ N.P. ⁽⁵⁾	x: 1.5 m $\eta = 2.3$	x: 1.5 m $\eta < 0.1$	x: 0 m $\eta = 0.2$	$\eta < 0.1$	$\eta < 0.1$	$\eta < 0.1$	x: 0 m $\eta < 0.1$	$\eta < 0.1$	$\eta < 0.1$	x: 0 m $\eta = 0.2$	$\eta < 0.1$	CUMPLE h = 2.3
N28/N30	$\bar{\lambda} < 3.0$ Cumple	$\bar{\lambda}_{cr} \leq \bar{\lambda}_{cr,max}$ Cumple	$N_{Ed} = 0.00$ N.P. ⁽⁵⁾	$\eta = 0.3$	x: 1.5 m $\eta = 2.2$	x: 1.5 m $\eta = 0.3$	x: 0 m $\eta = 0.2$	$\eta = 0.1$	$\eta < 0.1$	$\eta < 0.1$	x: 0 m $\eta < 0.1$	$\eta < 0.1$	$\eta < 0.1$	x: 0 m $\eta = 0.2$	$\eta = 0.1$	CUMPLE h = 2.7
N30/N6	N.P. ⁽⁵⁾	$\bar{\lambda}_{cr} \leq \bar{\lambda}_{cr,max}$ Cumple	$\eta < 0.1$	$N_{Ed} = 0.00$ N.P. ⁽⁵⁾	x: 0.638 m $\eta = 0.8$	x: 0.85 m $\eta = 0.8$	x: 0 m $\eta = 0.4$	$\eta = 0.4$	$\eta < 0.1$	$\eta < 0.1$	x: 0.85 m $\eta = 1.3$	$\eta < 0.1$	$\eta = 0.1$	x: 0 m $\eta = 0.4$	$\eta = 0.4$	CUMPLE h = 1.3
N5/N7	N.P. ⁽⁵⁾	$\bar{\lambda}_{cr} \leq \bar{\lambda}_{cr,max}$ Cumple	$\eta = 0.6$	$N_{Ed} = 0.00$ N.P. ⁽⁵⁾	x: 1.5 m $\eta = 2.6$	x: 0 m $\eta = 0.3$	x: 0 m $\eta = 0.2$	$\eta = 0.1$	$\eta < 0.1$	$\eta < 0.1$	x: 1.5 m $\eta = 3.0$	$\eta < 0.1$	$\eta = 0.2$	x: 0 m $\eta = 0.2$	$\eta = 0.1$	CUMPLE h = 3.0
N8/N7	N.P. ⁽⁵⁾	$\bar{\lambda}_{cr} \leq \bar{\lambda}_{cr,max}$ Cumple	$\eta < 0.1$	$N_{Ed} = 0.00$ N.P. ⁽⁵⁾	x: 0 m $\eta = 2.5$	x: 0 m $\eta = 0.6$	x: 0.65 m $\eta = 1.2$	$\eta = 0.3$	$\eta < 0.1$	$\eta < 0.1$	x: 0 m $\eta = 2.6$	$\eta < 0.1$	$\eta = 1.6$	x: 0.65 m $\eta = 1.2$	$\eta = 0.3$	CUMPLE h = 2.6
N6/N8	N.P. ⁽⁵⁾	$\bar{\lambda}_{cr} \leq \bar{\lambda}_{cr,max}$ Cumple	$\eta = 0.3$	$N_{Ed} = 0.00$ N.P. ⁽⁵⁾	x: 0 m $\eta = 2.4$	x: 0 m $\eta < 0.1$	x: 1.5 m $\eta = 0.5$	$\eta < 0.1$	$\eta < 0.1$	$\eta < 0.1$	x: 0 m $\eta = 2.4$	$\eta < 0.1$	$\eta < 0.1$	x: 1.5 m $\eta = 0.5$	$\eta < 0.1$	CUMPLE h = 2.4
N30/N31	N.P. ⁽⁵⁾	$\bar{\lambda}_{cr} \leq \bar{\lambda}_{cr,max}$ Cumple	$\eta = 0.6$	$N_{Ed} = 0.00$ N.P. ⁽⁵⁾	x: 1.5 m $\eta = 2.7$	x: 0 m $\eta = 0.3$	x: 0 m $\eta = 0.2$	$\eta = 0.1$	$\eta < 0.1$	$\eta < 0.1$	x: 1.5 m $\eta = 3.1$	$\eta < 0.1$	$\eta = 0.3$	x: 0 m $\eta = 0.2$	$\eta = 0.1$	CUMPLE h = 3.1
N31/N8	N.P. ⁽⁵⁾	$\bar{\lambda}_{cr} \leq \bar{\lambda}_{cr,max}$ Cumple	$\eta < 0.1$	$N_{Ed} = 0.00$ N.P. ⁽⁵⁾	x: 0.85 m $\eta = 2.5$	x: 0.85 m $\eta = 0.6$	x: 0 m $\eta = 1.0$	$\eta = 0.3$	$\eta < 0.1$	$\eta < 0.1$	x: 0.85 m $\eta = 2.6$	$\eta < 0.1$	$\eta = 1.4$	x: 0 m $\eta = 1.1$	$\eta = 0.3$	CUMPLE h = 2.6
N7/N9	N.P. ⁽⁵⁾	x: 0 m $\bar{\lambda}_{cr} \leq \bar{\lambda}_{cr,max}$ Cumple	$\eta = 1.2$	$N_{Ed} = 0.00$ N.P. ⁽⁵⁾	x: 0 m $\eta = 4.0$	x: 0 m $\eta = 0.1$	x: 1.5 m $\eta = 0.7$	$\eta < 0.1$	x: 0 m $\eta < 0.1$	x: 0 m $\eta < 0.1$	x: 0 m $\eta = 4.7$	x: 0 m $\eta < 0.1$	$M_{Ed} = 0.00$ N.P. ⁽⁵⁾	N.P. ⁽⁶⁾	N.P. ⁽⁶⁾	CUMPLE h = 4.7
N10/N9	N.P. ⁽⁵⁾	x: 0.163 m $\bar{\lambda}_{cr} \leq \bar{\lambda}_{cr,max}$ Cumple	$\eta < 0.1$	$N_{Ed} = 0.00$ N.P. ⁽⁵⁾	x: 0.325 m $\eta = 0.1$	$M_{Ed} = 0.00$ N.P. ⁽⁵⁾	x: 0 m $\eta = 0.1$	$V_{Ed} = 0.00$ N.P. ⁽⁶⁾	x: 0.163 m $\eta < 0.1$	N.P. ⁽⁷⁾	x: 0.325 m $\eta = 0.1$	x: 0.163 m $\eta < 0.1$	$M_{Ed} = 0.00$ N.P. ⁽⁵⁾	N.P. ⁽⁶⁾	N.P. ⁽⁶⁾	CUMPLE h = 0.1
N8/N10	N.P. ⁽⁵⁾	x: 0 m $\bar{\lambda}_{cr} \leq \bar{\lambda}_{cr,max}$ Cumple	$\eta = 0.5$	$N_{Ed} = 0.00$ N.P. ⁽⁵⁾	x: 0 m $\eta = 3.0$	x: 0 m $\eta < 0.1$	x: 0 m $\eta = 0.5$	$V_{Ed} = 0.00$ N.P. ⁽⁶⁾	x: 0 m $\eta < 0.1$	N.P. ⁽⁷⁾	x: 0.188 m $\eta = 3.0$	x: 0 m $\eta < 0.1$	$M_{Ed} = 0.00$ N.P. ⁽⁵⁾	N.P. ⁽⁶⁾	N.P. ⁽⁶⁾	CUMPLE h = 3.0
N31/N32	N.P. ⁽⁵⁾	x: 0 m $\bar{\lambda}_{cr} \leq \bar{\lambda}_{cr,max}$ Cumple	$\eta = 1.2$	$N_{Ed} = 0.00$ N.P. ⁽⁵⁾	x: 0 m $\eta = 3.8$	x: 0 m $\eta = 0.1$	x: 1.5 m $\eta = 0.7$	$\eta < 0.1$	x: 0 m $\eta < 0.1$	x: 0 m $\eta < 0.1$	x: 0 m $\eta = 4.5$	x: 0 m $\eta < 0.1$	$M_{Ed} = 0.00$ N.P. ⁽⁵⁾	N.P. ⁽⁶⁾	N.P. ⁽⁶⁾	CUMPLE h = 4.5
N32/N10	N.P. ⁽⁵⁾	x: 0.213 m $\bar{\lambda}_{cr} \leq \bar{\lambda}_{cr,max}$ Cumple	$\eta < 0.1$	$N_{Ed} = 0.00$ N.P. ⁽⁵⁾	x: 0.425 m $\eta = 0.2$	$M_{Ed} = 0.00$ N.P. ⁽⁵⁾	x: 0 m $\eta = 0.2$	$V_{Ed} = 0.00$ N.P. ⁽⁶⁾	x: 0.213 m $\eta < 0.1$	N.P. ⁽⁷⁾	x: 0.425 m $\eta = 0.2$	x: 0.213 m $\eta < 0.1$	$M_{Ed} = 0.00$ N.P. ⁽⁵⁾	N.P. ⁽⁶⁾	N.P. ⁽⁶⁾	CUMPLE h = 0.2
N3/N1	$\bar{\lambda} < 3.0$ Cumple	$\bar{\lambda}_{cr} \leq \bar{\lambda}_{cr,max}$ Cumple	$N_{Ed} = 0.00$ N.P. ⁽⁵⁾	$\eta < 0.1$	x: 0 m $\eta = 1.1$	x: 0 m $\eta = 0.5$	x: 0.65 m $\eta = 0.5$	$\eta = 0.2$	$\eta < 0.1$	$\eta < 0.1$	x: 0 m $\eta = 1.7$	$\eta < 0.1$	$\eta < 0.1$	x: 0.65 m $\eta = 0.5$	$\eta = 0.2$	CUMPLE h = 1.7
N29/N3	N.P. ⁽⁵⁾	$\bar{\lambda}_{cr} \leq \bar{\lambda}_{cr,max}$ Cumple	$N_{Ed} = 0.00$ N.P. ⁽⁵⁾	$N_{Ed} = 0.00$ N.P. ⁽⁵⁾	x: 0.85 m $\eta = 1.1$	x: 0.85 m $\eta = 0.5$	x: 0 m $\eta = 0.5$	$\eta = 0.2$	$\eta < 0.1$	$\eta < 0.1$	x: 0.85 m $\eta = 1.2$	$\eta < 0.1$	$\eta = 0.1$	x: 0 m $\eta = 0.5$	$\eta = 0.2$	CUMPLE h = 1.2
N28/N4	$\bar{\lambda} < 3.0$ Cumple	$\bar{\lambda}_{cr} \leq \bar{\lambda}_{cr,max}$ Cumple	$N_{Ed} = 0.00$ N.P. ⁽⁵⁾	$\eta < 0.1$	x: 0.85 m $\eta = 1.1$	x: 0.85 m $\eta = 0.6$	x: 0 m $\eta = 0.6$	$\eta = 0.2$	$\eta < 0.1$	$\eta < 0.1$	x: 0.85 m $\eta = 1.7$	$\eta < 0.1$	$\eta = 0.1$	x: 0 m $\eta = 0.6$	$\eta = 0.2$	CUMPLE h = 1.7
N4/N2	$\bar{\lambda} < 3.0$ Cumple	$\bar{\lambda}_{cr} \leq \bar{\lambda}_{cr,max}$ Cumple	$N_{Ed} = 0.00$ N.P. ⁽⁵⁾	$\eta < 0.1$	x: 0 m $\eta = 1.1$	x: 0 m $\eta = 0.6$	x: 0.65 m $\eta = 0.6$	$\eta = 0.3$	$\eta < 0.1$	$\eta < 0.1$	x: 0 m $\eta = 1.7$	$\eta < 0.1$	$\eta < 0.1$	x: 0.65 m $\eta = 0.6$	$\eta = 0.3$	CUMPLE h = 1.7
N9/N11	N.P. ⁽⁵⁾	x: 0.188 m $\bar{\lambda}_{cr} \leq \bar{\lambda}_{cr,max}$ Cumple	$\eta = 1.2$	$N_{Ed} = 0.00$ N.P. ⁽⁵⁾	x: 1.5 m $\eta = 4.0$	x: 1.5 m $\eta = 0.1$	x: 0 m $\eta = 0.7$	$\eta < 0.1$	x: 0.188 m $\eta < 0.1$	x: 0.188 m $\eta < 0.1$	x: 1.5 m $\eta = 4.7$	x: 0.188 m $\eta < 0.1$	$M_{Ed} = 0.00$ N.P. ⁽⁵⁾	N.P. ⁽⁶⁾	N.P. ⁽⁶⁾	CUMPLE h = 4.7
N12/N11	N.P. ⁽⁵⁾	$\bar{\lambda}_{cr} \leq \bar{\lambda}_{cr,max}$ Cumple	$\eta < 0.1$	$N_{Ed} = 0.00$ N.P. ⁽⁵⁾	x: 0 m $\eta = 2.5$	x: 0 m $\eta = 0.6$	x: 0.65 m $\eta = 1.2$	$\eta = 0.3$	$\eta < 0.1$	$\eta < 0.1$	x: 0 m $\eta = 2.6$	$\eta < 0.1$	$\eta = 1.6$	x: 0.65 m $\eta = 1.2$	$\eta = 0.3$	CUMPLE h = 2.6
N33/N12	N.P. ⁽⁵⁾	$\bar{\lambda}_{cr} \leq \bar{\lambda}_{cr,max}$ Cumple	$\eta < 0.1$	$N_{Ed} = 0.00$ N.P. ⁽⁵⁾	x: 0.85 m $\eta = 2.5$	x: 0.85 m $\eta = 0.6$	x: 0 m $\eta = 1.0$	$\eta = 0.3$	$\eta < 0.1$	$\eta < 0.1$	x: 0.85 m $\eta = 2.6$	$\eta < 0.1$	$\eta = 1.4$	x: 0 m $\eta = 1.1$	$\eta = 0.3$	CUMPLE h = 2.6
N10/N12	N.P. ⁽⁵⁾	x: 0.188 m $\bar{\lambda}_{cr} \leq \bar{\lambda}_{cr,max}$ Cumple	$\eta = 0.5$	$N_{Ed} = 0.00$ N.P. ⁽⁵⁾	x: 1.5 m $\eta = 3.0$	x: 1.5 m $\eta < 0.1$	x: 1.5 m $\eta = 0.5$	$V_{Ed} = 0.00$ N.P. ⁽⁶⁾	x: 0.188 m $\eta < 0.1$	N.P. ⁽⁷⁾	x: 1.313 m $\eta = 3.0$	x: 0.188 m $\eta < 0.1$	$M_{Ed} = 0.00$ N.P. ⁽⁵⁾	N.P. ⁽⁶⁾	N.P. ⁽⁶⁾	CUMPLE h = 3.0
N32/N33	N.P. ⁽⁵⁾	x: 0.188 m $\bar{\lambda}_{cr} \leq \bar{\lambda}_{cr,max}$ Cumple	$\eta = 1.2$	$N_{Ed} = 0.00$ N.P. ⁽⁵⁾	x: 1.5 m $\eta = 3.8$	x: 1.5 m $\eta = 0.1$	x: 0 m $\eta = 0.7$	$\eta < 0.1$	x: 0.188 m $\eta < 0.1$	x: 0.188 m $\eta < 0.1$	x: 1.5 m $\eta = 4.5$	x: 0.188 m $\eta < 0.1$	$M_{Ed} = 0.00$ N.P. ⁽⁵⁾	N.P. ⁽⁶⁾	N.P. ⁽⁶⁾	CUMPLE h = 4.5
N33/N34	N.P. ⁽⁵⁾	$\bar{\lambda}_{cr} \leq \bar{\lambda}_{cr,max}$ Cumple	$\eta = 0.6$	$N_{Ed} = 0.00$ N.P. ⁽⁵⁾	x: 0 m $\eta = 2.7$	x: 1.5 m $\eta = 0.3$	x: 1.5 m $\eta = 0.2$	$\eta = 0.1$	$\eta < 0.1$	$\eta < 0.1$	x: 0 m $\eta = 3.1$	$\eta < 0.1$	$\eta = 0.3$	x: 1.5 m $\eta = 0.2$	$\eta = 0.1$	CUMPLE h = 3.1
N34/N13	N.P. ⁽⁵⁾	$\bar{\lambda}_{cr} \leq \bar{\lambda}_{cr,max}$ Cumple	$\eta < 0.1$	$N_{Ed} = 0.00$ N.P. ⁽⁵⁾	x: 0.638 m $\eta = 0.8$	x: 0.85 m $\eta = 0.8$	x: 0 m $\eta = 0.4$	$\eta = 0.4$	$\eta < 0.1$	$\eta < 0.1$	x: 0.85 m $\eta = 1.3$	$\eta < 0.1$	$\eta = 0.1$	x: 0 m $\eta = 0.4$	$\eta = 0.4$	CUMPLE h = 1.3
N12/N13	N.P. ⁽⁵⁾	$\bar{\lambda}_{cr} \leq \bar{\lambda}_{cr,max}$ Cumple	$\eta = 0.3$	$N_{Ed} = 0.00$ N.P. ⁽⁵⁾	x: 1.5 m $\eta = 2.4$	x: 1.5 m $\eta < 0.1$	x: 0 m $\eta = 0.5$	$\eta < 0.1$	$\eta < 0.1$	$\eta < 0.1$	x: 0 m $\eta = 2.4$	$\eta < 0.1$	$\eta < 0.1$	x: 0 m $\eta = 0.5$	$\eta < 0.1$	CUMPLE h = 2.4
N11/N14	N.P. ⁽⁵⁾	$\bar{\lambda}_{cr} \leq \bar{\lambda}_{cr,max}$ Cumple	$\eta = 0.6$	$N_{Ed} = 0.00$ N.P. ⁽⁵⁾	x: 0 m $\eta = 2.6$	x: 1.5 m $\eta = 0.3$	x: 1.5 m $\eta = 0.2$	$\eta = 0.1$	$\eta < 0.1$	$\eta < 0.1$	x: 0 m $\eta = 3.0$	$\eta < 0.1$	$\eta = 0.2$	x: 1.5 m $\eta = 0.2$	$\eta = 0.1$	CUMPLE h = 3.0
N13/N14	N.P. ⁽⁵⁾	$\bar{\lambda}_{cr} \leq \bar{\lambda}_{cr,max}$ Cumple	$\eta < 0.1$	$N_{Ed} = 0.00$ N.P. ⁽⁵⁾	x: 0.163 m $\eta = 0.7$	x: 0 m $\eta = 0.9$	x: 0.65 m $\eta = 0.4$	$\eta = 0.5$	$\eta < 0.1$	$\eta < 0.1$	x: 0 m $\eta = 1.3$	$\eta < 0.1$	$\eta = 0.2$	x: 0.65 m $\eta = 0.4$	$\eta = 0.5$	CUMPLE h = 1.3
N14/N15	$\bar{\lambda} < 3.0$ Cumple	$\bar{\lambda}_{cr} \leq \bar{\lambda}_{cr,max}$ Cumple	$N_{Ed} = 0.00$ N.P. ⁽⁵⁾	$\eta = 0.3$	x: 0 m $\eta = 2.2$	x: 0 m $\eta = 0.3$	x: 1.5 m $\eta = 0.2$	$\eta = 0.1$	$\eta < 0.1$	$\eta < 0.1$	x: 0 m $\eta = 2.7$	$\eta < 0.1$	$\eta = 0.1$	x: 1.5 m $\eta = 0.2$	$\eta = 0.1$	CUMPLE h = 2.7
N16/N15	$\bar{\lambda} < 3.0$ Cumple	$\bar{\lambda}_{cr} \leq \bar{\lambda}_{cr,max}</$														



Listados

estructura_12m

Fecha: 07/06/21

Barras	COMPROBACIONES (EAE 2011)															Estado
	λ	λ_w	N _t	N _c	M _x	M _y	V _z	V _y	M _x V _z	M _y V _y	NM _x	NM _y V _z	M _t	MV _z	MV _y	
<p>Notación:</p> <ul style="list-style-type: none"> l : Limitación de esbeltez l_w : Abolladura del alma inducida por el ala comprimida N_t : Resistencia a tracción N_c : Resistencia a compresión M_x : Resistencia a flexión eje Y M_y : Resistencia a flexión eje Z V_z : Resistencia a corte Z V_y : Resistencia a corte Y M_xV_z : Resistencia a momento flector Y y fuerza cortante Z combinados M_yV_y : Resistencia a momento flector Z y fuerza cortante Y combinados NM_x : Resistencia a flexión y axil combinados NM_yV_z : Resistencia a flexión, axil y cortante combinados M_t : Resistencia a torsión MV_z : Resistencia a cortante Z y momento torsor combinados MV_y : Resistencia a cortante Y y momento torsor combinados x : Distancia al origen de la barra h : Coeficiente de aprovechamiento (%) N.P. : No procede <p>Comprobaciones que no proceden (N.P.):</p> <ul style="list-style-type: none"> ⊘ La comprobación no procede, ya que no hay axil de tracción. ⊘ La comprobación no procede, ya que no hay axil de compresión. ⊘ La comprobación no procede, ya que no hay momento torsor. ⊘ No hay interacción entre momento torsor y esfuerzo cortante para ninguna combinación. Por lo tanto, la comprobación no procede. ⊘ La comprobación no procede, ya que no hay momento flector. ⊘ La comprobación no procede, ya que no hay esfuerzo cortante. ⊘ No hay interacción entre momento flector y esfuerzo cortante para ninguna combinación. Por lo tanto, la comprobación no procede. ⊘ La comprobación no procede, ya que no hay momento flector que comprima un ala, de forma que se pueda desarrollar el fenómeno de abolladura del alma inducida por el ala comprimida. ⊘ No hay interacción entre axil y momento flector ni entre momentos flectores en ambas direcciones para ninguna combinación. Por lo tanto, la comprobación no procede. ⊘ No hay interacción entre momento flector, axil y cortante para ninguna combinación. Por lo tanto, la comprobación no procede. 																



UNIVERSIDAD DE OVIEDO

ESCUELA POLITÉCNICA DE MIERES

**MASTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA DE CAMINOS, CANALES Y
PUERTOS**

**DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIÓN E INGENIERÍA DE FABRICACIÓN
AREA DE MECÁNICA DE MEDIOS CONTINUOS Y TEORÍA DE
ESTRUCTURAS**

DOCUMENTO 2: PLANOS

TRABAJO FIN DE MÁSTER

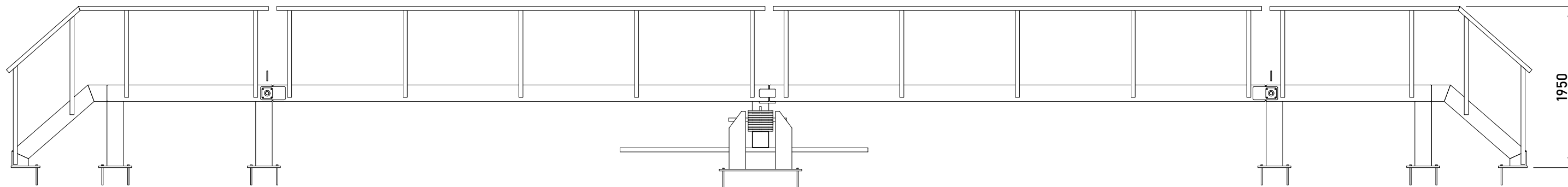
DISEÑO DE PASARELA PARA ENSAYOS CON CARGAS PEATONALES

AUTOR: JAVIER MENDÍVIL CALVO

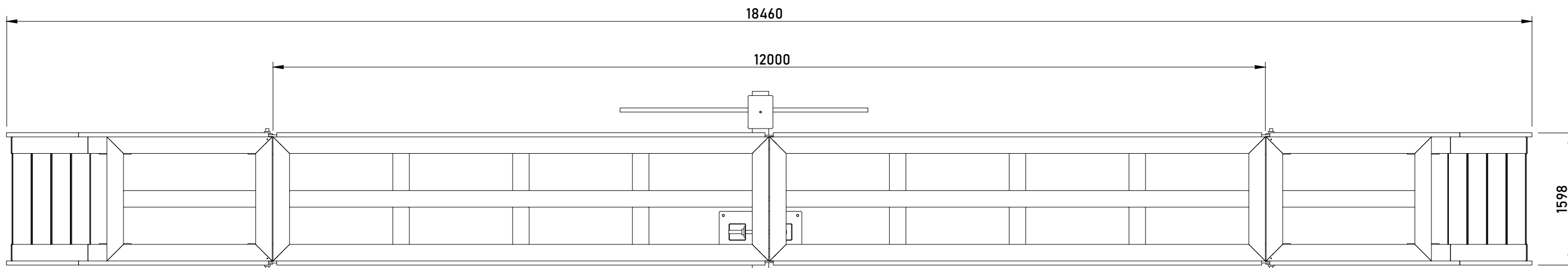
TUTOR: MARTA GARCÍA DIÉGUEZ

COTUTOR: JOSÉ LUIS ZAPICO VALLE

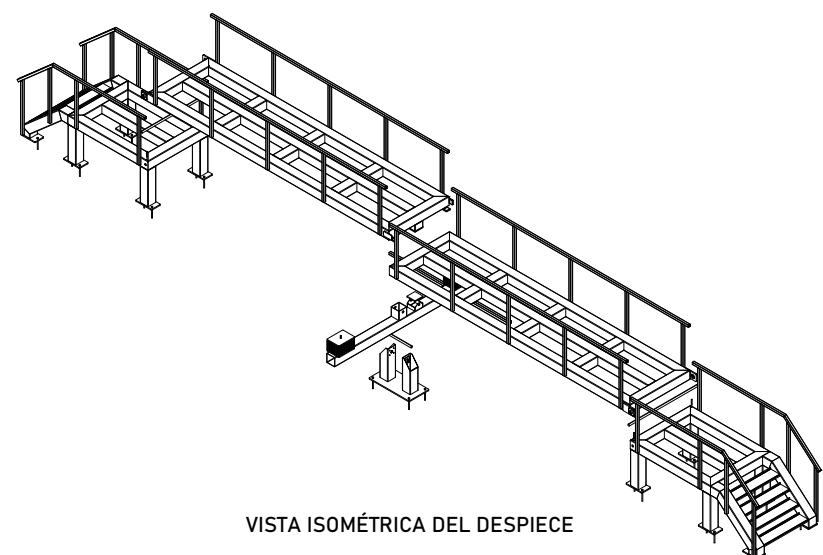
JUNIO, 2021



ALZADO



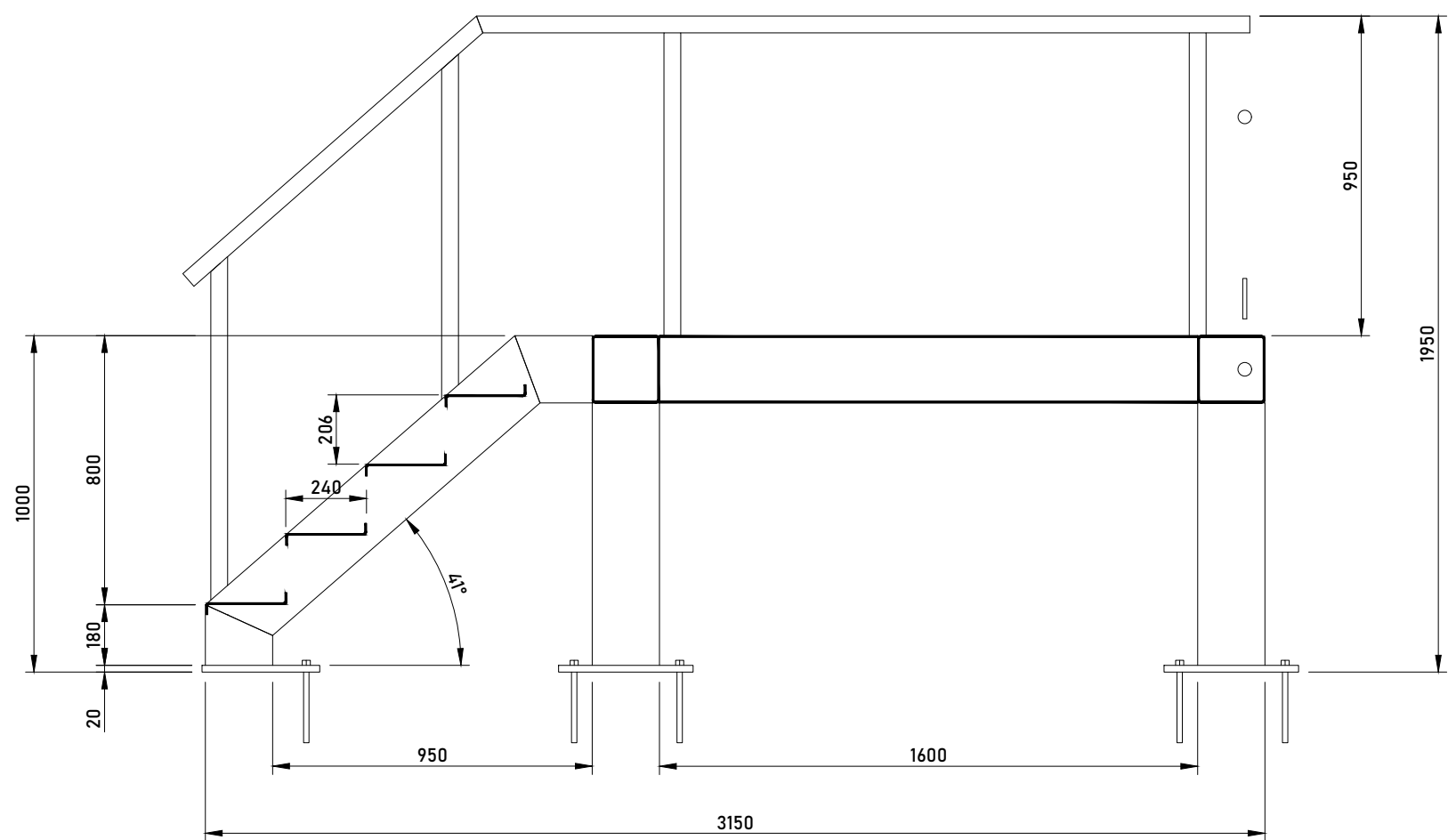
PLANTA SUPERIOR



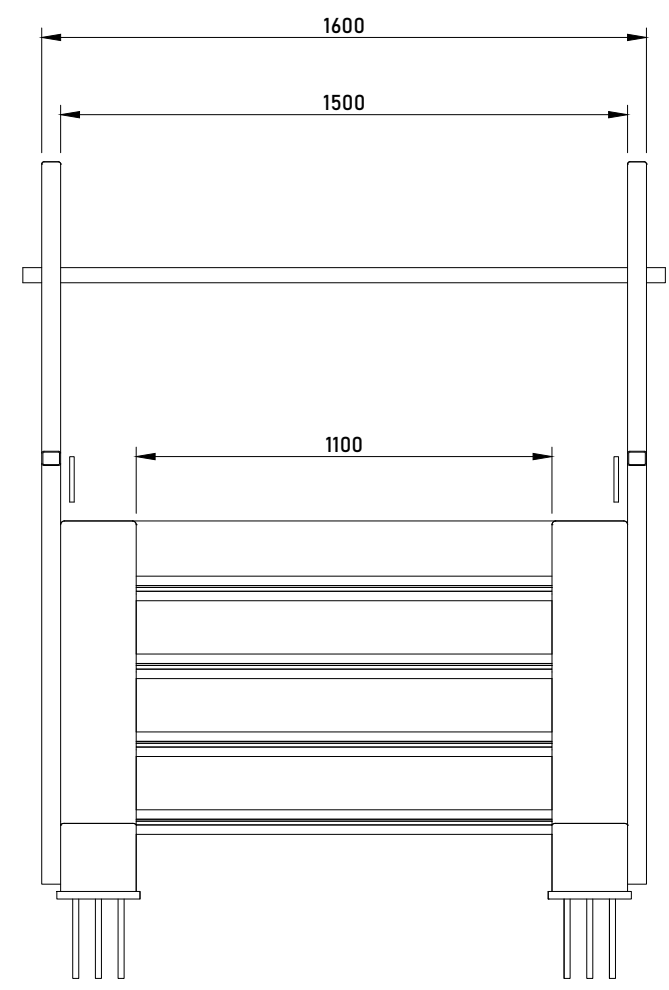
VISTA ISOMÉTRICA DEL DESPIECE

TUBOS ESTRUCTURA: SHS 200x5 ACERO S275
 TUBOS BARANDILLA: SHS 50x3 ACERO S275

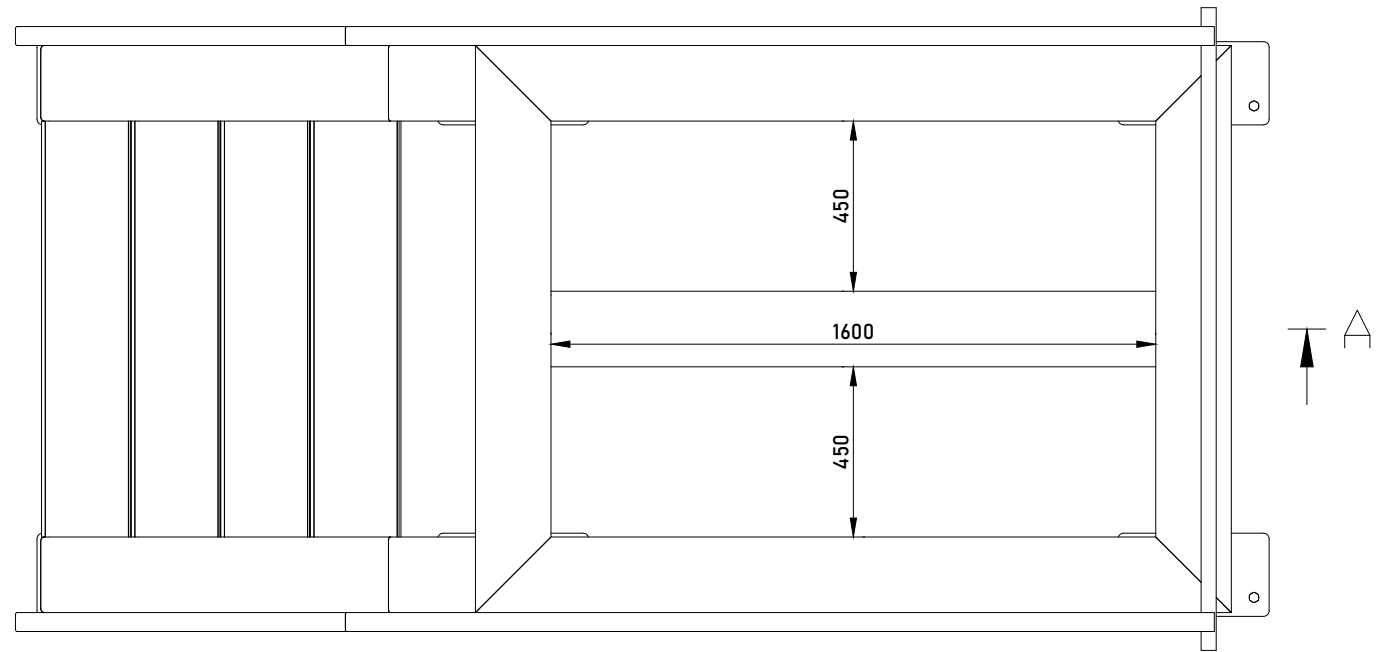
UNIVERSIDAD DE OVIEDO. ESCUELA POLITÉCNICA DE MIERES. MÁSTER EN INGENIERÍA DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS			
TRABAJO FIN DE MÁSTER:			
DISEÑO DE PASARELA PARA ENSAYO CON CARGAS PEATONALES			
Dibujado por JAVIER MENDÍVIL CALVO		Fecha JUNIO 2021	Plano N° 01
Contenido ESTRUCTURA COMPLETA	Escalas 1/50		



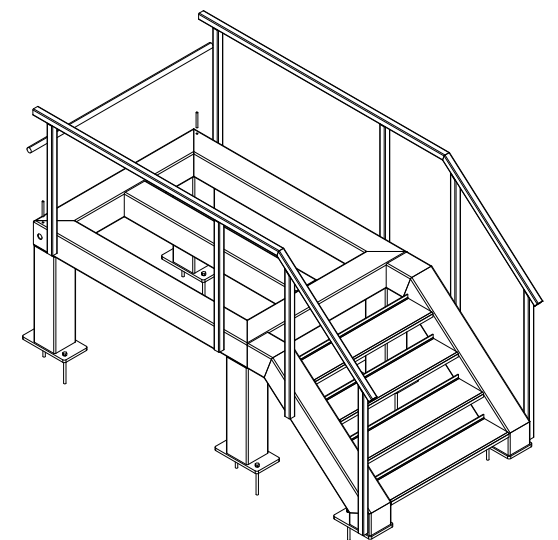
SECCIÓN A-A



PERFIL



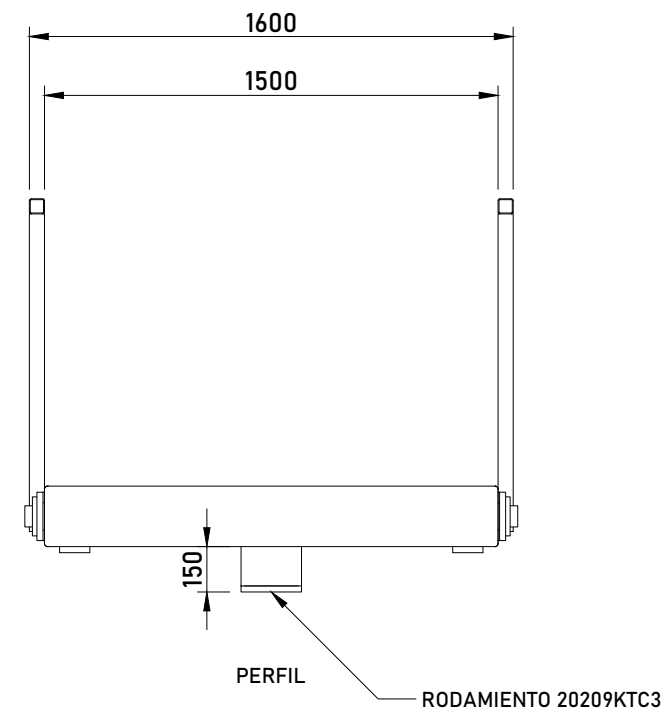
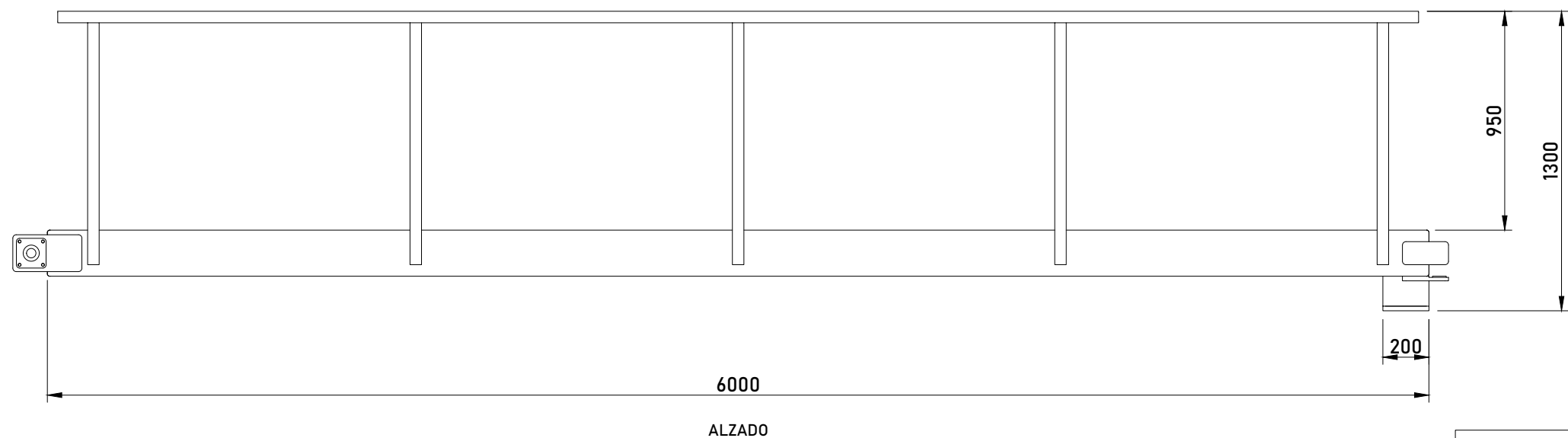
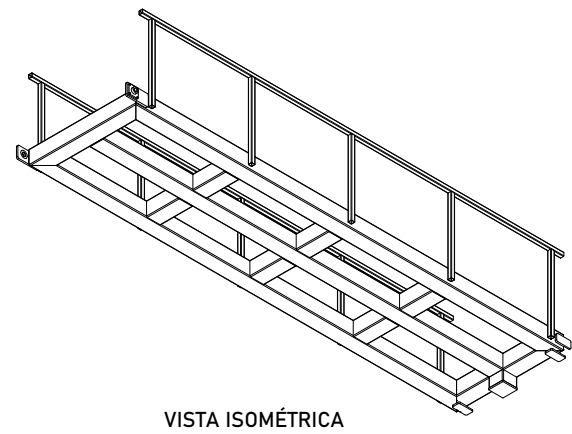
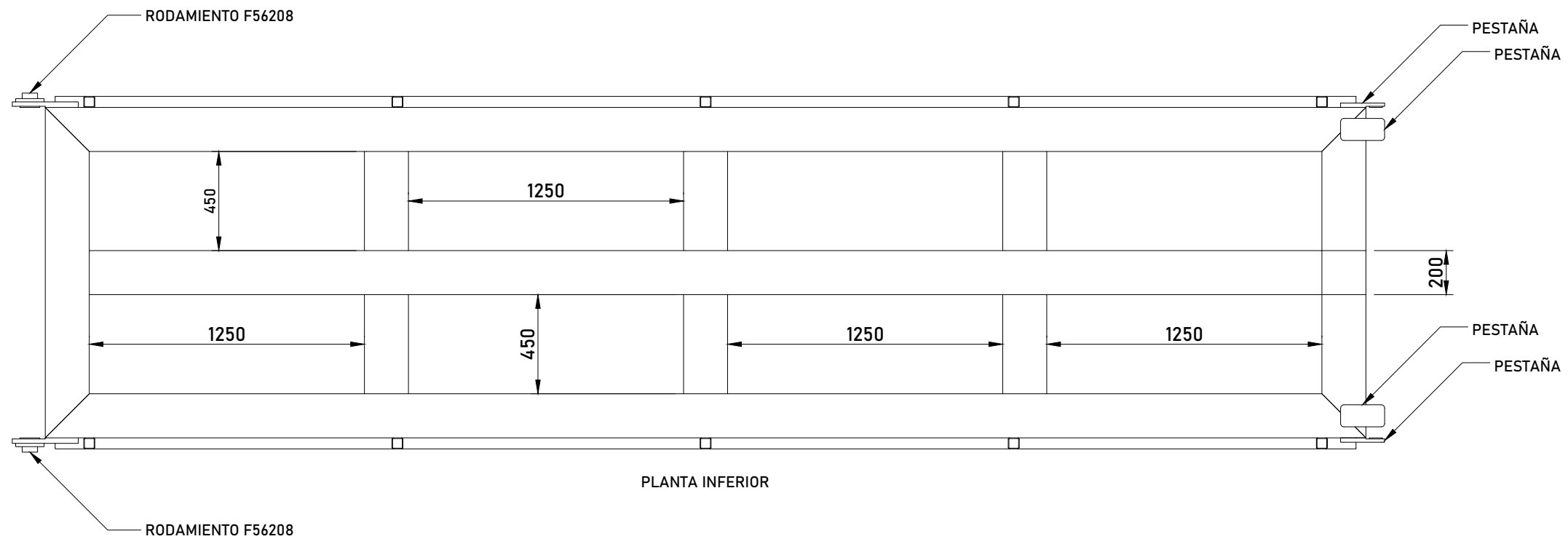
PLANTA SUPERIOR



VISTA ISOMÉTRICA

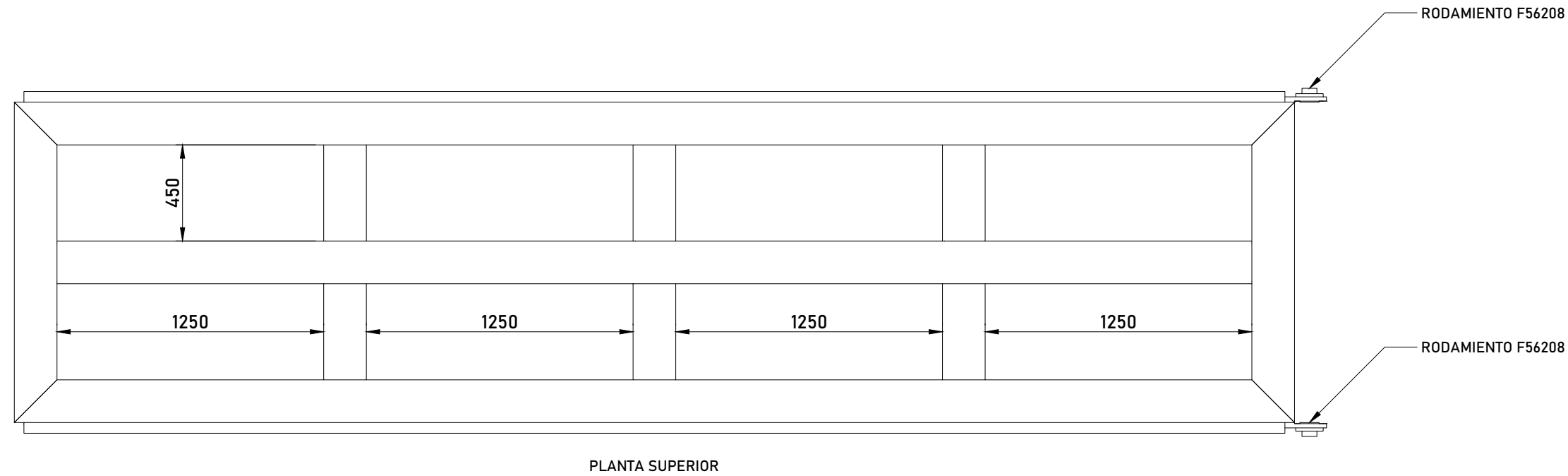
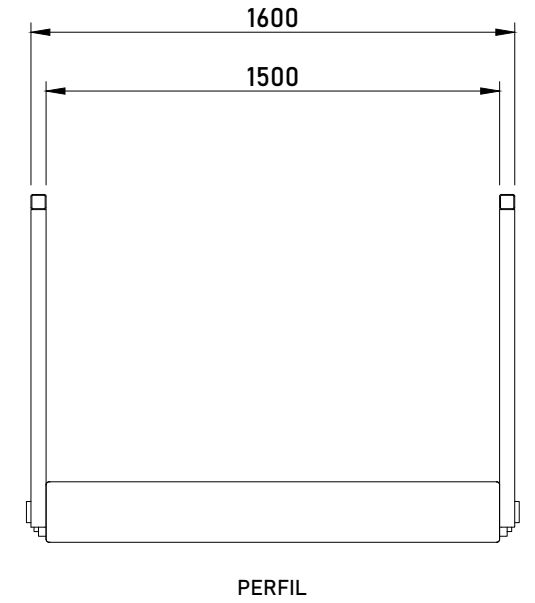
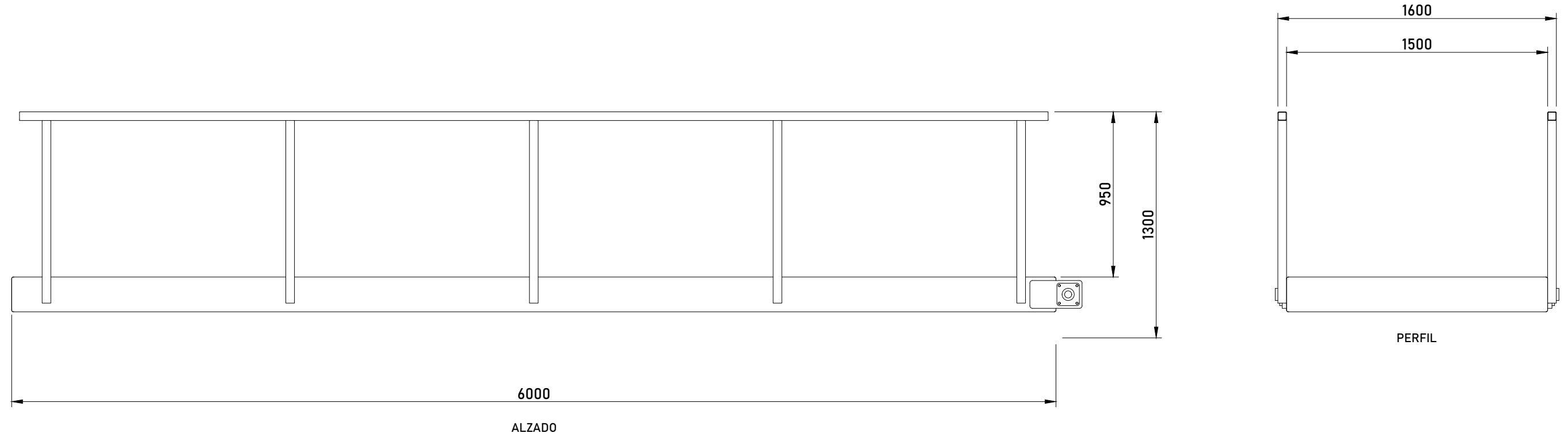
TUBOS ESTRUCTURA: SHS 200x5 ACERO S275
 TUBOS BARANDILLA: SHS 50x3 ACERO S275

UNIVERSIDAD DE OVIEDO. ESCUELA POLITÉCNICA DE MIERES. MÁSTER EN INGENIERÍA DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS			
TRABAJO FIN DE MÁSTER:			
DISEÑO DE PASARELA PARA ENSAYO CON CARGAS PEATONALES			
Dibujado por JAVIER MENDÍVIL CALVO		Fecha JUNIO 2021	
Contenido PLATAFORMA DE ACCESO	Escalas 1/20	Plano N° 02	



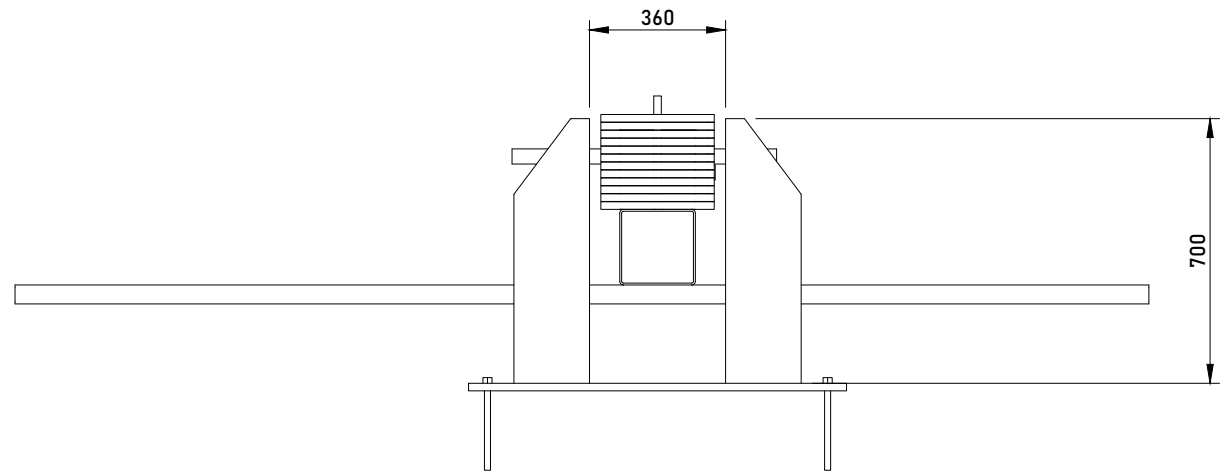
TUBOS ESTRUCTURA: SHS 200x5 ACERO S275
 TUBOS BARANDILLA: SHS 50x3 ACERO S275

UNIVERSIDAD DE OVIEDO. ESCUELA POLITÉCNICA DE MIERES. MÁSTER EN INGENIERÍA DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS			
TRABAJO FIN DE MÁSTER:			
DISEÑO DE PASARELA PARA ENSAYO CON CARGAS PEATONALES			
Dibujado por JAVIER MENDÍVIL CALVO		Fecha JUNIO 2021	
Contenido TABLERO PIEZA A	Escalas 1/25	Plano N° 03	

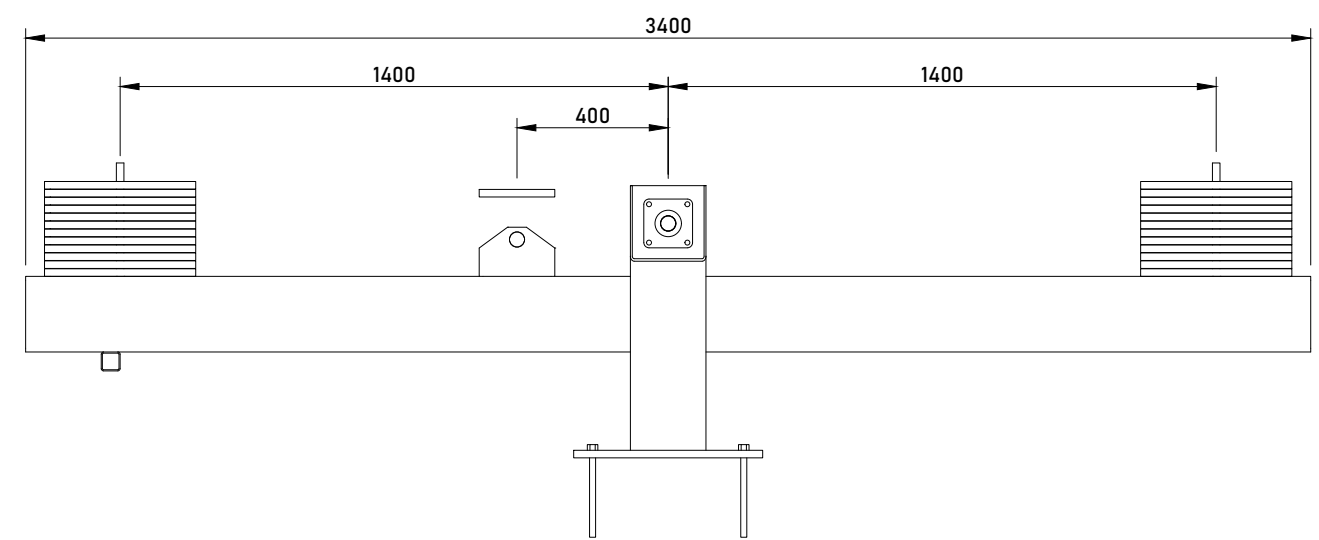


TUBOS ESTRUCTURA: SHS 200x5 ACERO S275
TUBOS BARANDILLA: SHS 50x3 ACERO S275

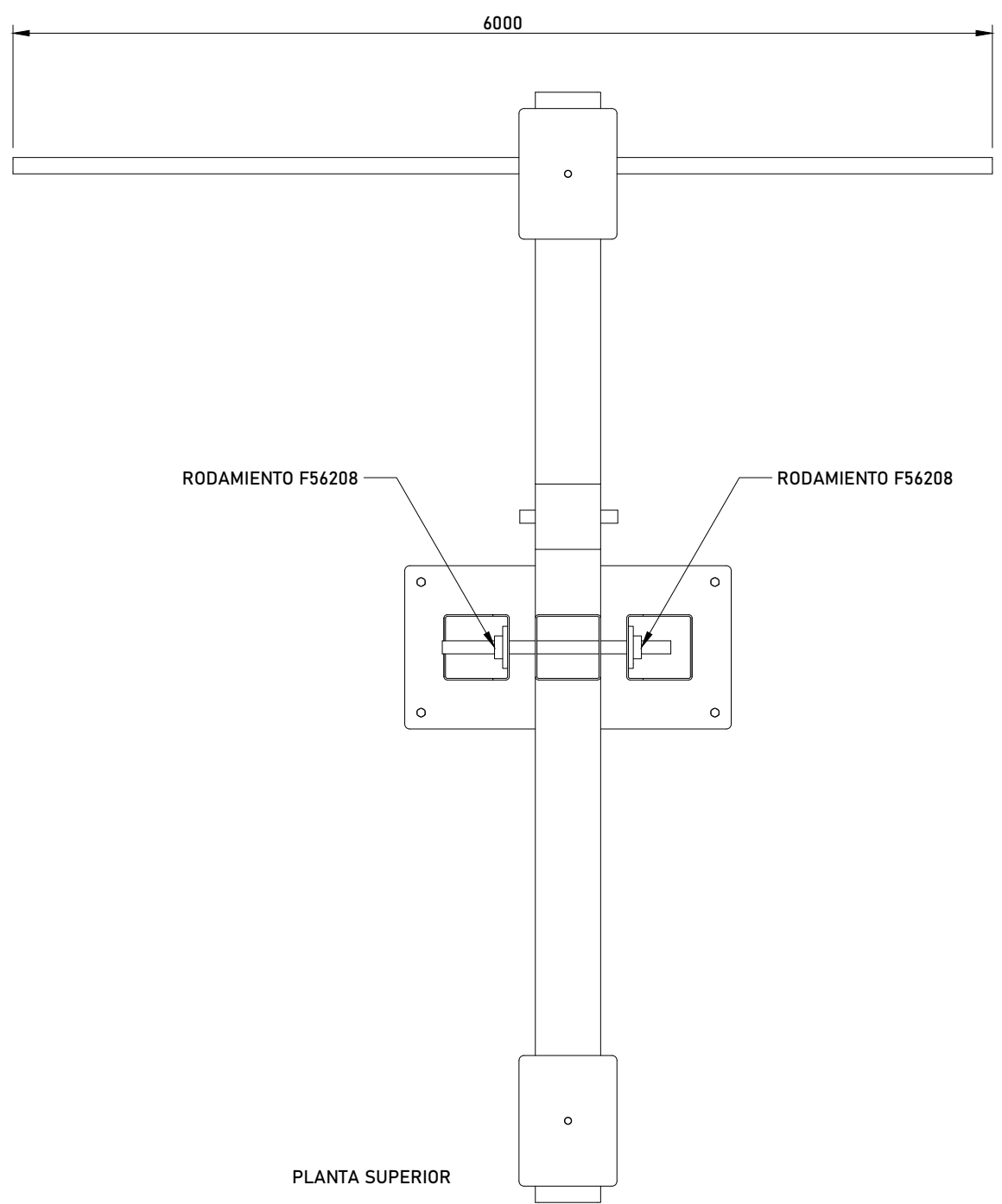
UNIVERSIDAD DE OVIEDO. ESCUELA POLITÉCNICA DE MIERES. MÁSTER EN INGENIERÍA DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS			
TRABAJO FIN DE MÁSTER:			
DISEÑO DE PASARELA PARA ENSAYO CON CARGAS PEATONALES			
Dibujado por JAVIER MENDÍVIL CALVO		Fecha JUNIO 2021	
Contenido TABLERO PIEZA B	Escalas 1/25	Plano N° 04	



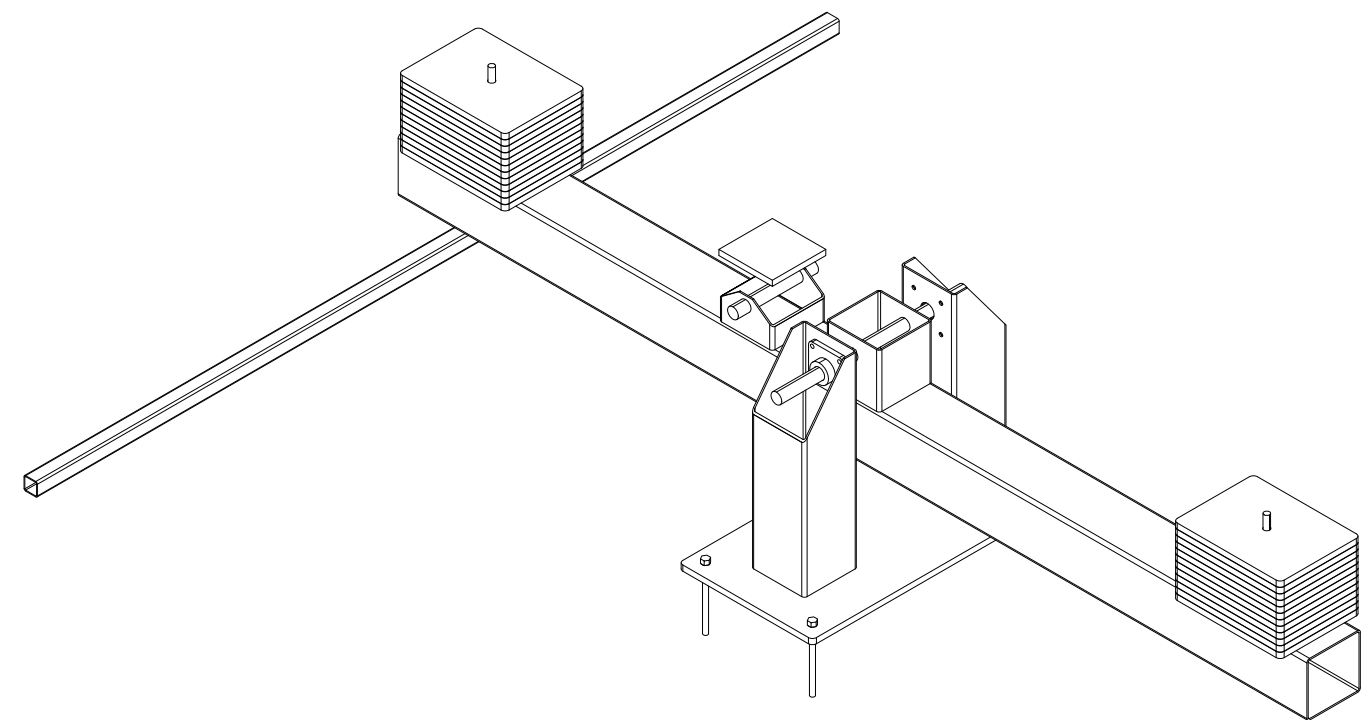
ALZADO



PERFIL



PLANTA SUPERIOR



VISTA ISOMÉTRICA

TUBOS ESTRUCTURA: SHS 200x5 ACERO S275
 TUBO APOYO ELÁSTICO: 100x3,8 ALUMINIO

UNIVERSIDAD DE OVIEDO. ESCUELA POLITÉCNICA DE MIERES. MÁSTER EN INGENIERÍA DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS			
TRABAJO FIN DE MÁSTER:			
DISEÑO DE PASARELA PARA ENSAYO CON CARGAS PEATONALES			
Dibujado por JAVIER MENDÍVIL CALVO		Fecha JUNIO 2021	
Contenido BALANCÍN COMPLETO	Escalas 1/20	Plano N° 05	



UNIVERSIDAD DE OVIEDO

ESCUELA POLITÉCNICA DE MIERES

**MASTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA DE CAMINOS, CANALES Y
PUERTOS**

**DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIÓN E INGENIERÍA DE FABRICACIÓN
AREA DE MECÁNICA DE MEDIOS CONTINUOS Y TEORÍA DE
ESTRUCTURAS**

DOCUMENTO 3: PRESUPUESTO

TRABAJO FIN DE MÁSTER

DISEÑO DE PASARELA PARA ENSAYOS CON CARGAS PEATONALES

AUTOR: JAVIER MENDÍVIL CALVO

TUTOR: MARTA GARCÍA DIÉGUEZ

COTUTOR: JOSÉ LUIS ZAPICO VALLE

JUNIO, 2021

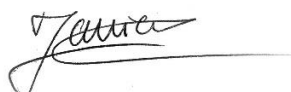
	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio [€]	Importe [€]
1	Estructura metálica				9436,41
1.1	Acero UNE-EN 10210-1 S275J0H, en vigas formadas por piezas simples de perfiles huecos acabados en caliente de las serie cuadrado acabado con imprimación antioxidante, con uniones soldadas. El precio incluye las soldaduras, los cortes, los despuntes, las piezas especiales, los casquillos y los elementos auxiliares de montaje.	kg	3272,4	2,34	7657,42
1.2	Aluminio UNE-EN 755-1:2016 6082-T6/T651, formado por piezas simples de perfiles huecos cuadrados extruido, tratado térmicamente y envejecido artificialmente, simplemente apoyado. El precio incluye los cortes, los despuntes y los elementos auxiliares de montaje.	kg	23,28	4,48	104,29
1.3	Placa de anclaje de acero UNE-EN 10025 S275JR en perfil plano, con taladro central, de 400x200 mm y espesor 20 mm, y montaje sobre 2 pernos de acero corrugado UNE-EN 10080 B 500 S de 16 mm de diámetro y 25 cm de longitud total, atornillados con arandelas, tuerca y contratuerca. El precio incluye los cortes, los despuntes, las pletinas, las piezas especiales y los elementos auxiliares de montaje.	ud	12	61,28	735,36
1.4	Placa de anclaje de acero UNE-EN 10025 S275JR en perfil plano, con taladro central, de 1000x500 mm y espesor 20 mm, y montaje sobre 2 pernos de acero corrugado UNE-EN 10080 B 500 S de 16 mm de diámetro y 25 cm de longitud total, atornillados con arandelas, tuerca y contratuerca. El precio incluye los cortes, los despuntes, las pletinas, las piezas especiales y los elementos auxiliares de montaje.	ud	1	293,98	293,98

Descripción	Unidad	Cantidad	Precio [€]	Importe [€]
1.5 Pletina de acero laminado UNE-EN 10025 S275JR, de 200x100 mm y espesor 5mm, con uniones soldadas. El precio incluye las soldaduras, los cortes, los despuntes y los elementos auxiliares de montaje.	ud	8	5,23	41,84
1.6 Peldaño de 1100x240 mm, formado por chapa lagrimada de espesor 5 mm de acero laminado UNE-EN 10025 S275JR, acabado galvanizado en caliente, con uniones soldadas. El precio incluye las soldaduras.	ud	8	31,30	250,40
1.7 Rodamiento FAG 20209 KTC3 con manguito H209	ud	1	95,72	95,72
1.8 Rodamiento FAG F56208	ud	6	42,90	257,40
2 Madera				809,82
2.1 Tablero estructural de madera tratada para uso en ambiente húmedo, de 2040x800 mm y 33 mm de espesor, machihembrado en sus cuatro cantos, fijado con tornillos, tratamiento antideslizante. El precio incluye el atornillamiento, los cortes, el tratamiento y los elementos auxiliares de montaje.	m ²	19,80	40,90	809,82
3 Instrumentación				14680,00
3.1 Acelerómetro Brüel & Kjaer modelo 8340. El precio incluye envío e IVA.	ud	1,00	2000,00	2000,00
3.2 Tarjeta de adquisición de datos dSPACE. El precio incluye envío e IVA.	ud	1,00	12000,00	12000,00
3.3 Sistema Xsens Dot de 5 sensores. El precio incluye envío e IVA.	ud	1,00	680,00	680,00

Capítulo	Importe [€]
1 Estructura metálica	9436,41
2 Madera	809,82
3 Instrumentación	14680,00
Presupuesto ejecución material (sólo aplica a capítulos 1 y 2)	10246,23
Gastos generales (13%)	1332,01
Beneficio industrial (6%)	614,77
Presupuesto ejecución por contrata (sólo aplica a capítulos 1 y 2)	12193,01
IVA Presupuesto ejecución por contrata (21%)	2560,53
Presupuesto instrumentación con IVA (sólo aplica a capítulo 3)	14680,00
PRESUPUESTO TOTAL	29433,55

Presupuesto realizado por: Javier Mendivil Calvo

Firma:



Fecha: 7 de junio de 2021