

Neby Bru, una pasarela, tres sostenibilidades

Neby Bru: one footpath, three ways of sustainability

Neus Planells Ripoll^{*, a}, Pablo Tarín Benedito^{*, b}, Fernando Ibañez Climent^{*, c},

Gaute Mo^{*, d}

^a MSc ICCP. Degree of Freedom. Engineer. n.planells@dofengineers.com

^b MSc ICCP. Degree of Freedom. Engineer. p.tarin@dofengineers.com

^c MSc ICCP. Degree of Freedom. Director. f.ibanez@dofengineers.com

^d MSc Sivilingeniør ICCP MRIF, Degree of Freedom. Director. g.mo@dofengineers.com

RESUMEN

Degree of Freedom, en colaboración con la localidad de Tynset (Noruega), ha desarrollado el diseño de detalle de una pasarela peatonal de madera que unirá el barrio de Neby con el resto de la ciudad, atravesando el río Glomma. Se trata de un proyecto con un presupuesto limitado, por lo que ya desde la fase de diseño ha primado la optimización de materiales, el uso de recursos y proveedores locales y el empleo de metodologías constructivas convencionales. En la actualidad la obra está en construcción con previsiones de inaugurar el puente en mayo de 2020. En este texto se describen las características principales de la estructura y la metodología que se ha seguido para su diseño.

ABSTRACT

Degree of Freedom, in collaboration with the municipality of Tynset, has developed the detail design of a pedestrian bridge that will join the neighbourhood of Neby with the rest of the city, crossing the river Glåma. This project had a limited budget, so the design stage has been influenced by the materials optimization, the use of local resources and suppliers and the consideration of conventional constructive methodologies. The bridge is currently under construction with plans to open the bridge in May 2020. This text describes the main characteristics of the structure and the methodology considered in the design.

PALABRAS CLAVE: pasarela, cable, colgante, madera, acero, celosía, sostenibilidad, impacto, social.

KEYWORDS: footway, cable, suspension, timber, steel, truss, sustainability, social, commitment.

1. Introducción

El diseño de la pasarela peatonal de madera sobre el río Glomma objeto de este artículo, se ha desarrollado en colaboración con el municipio de Tynset (Noruega).

La idea original del diseño era crear un puente de madera peatonal ligero integrado en el entorno natural y el paisaje donde se coloca.

La nueva pasarela colgante (Figura 1) volverá a conectar de forma directa el barrio de Neby con el resto de la ciudad de Tynset, sustentándose sobre los cimientos de una antigua pasarela destruida durante la Segunda Guerra Mundial.

Dado el enfoque social del proyecto, se ha optado por utilizar recursos y proveedores locales, buscando su colaboración a la hora de prestar sus servicios: desde los cables, que son

proporcionados por una empresa noruega de ámbito europeo, hasta las chapas metálicas, que serán fabricadas en un taller local. Por otro lado, con el uso de la madera como principal material constructivo de la pasarela, se potencia una industria local y un marcado beneficio ambiental.

Está previsto que la pasarela sea ejecutada con mano de obra local, utilizando medios mecánicos disponibles en los alrededores, lo cual ha condicionado en gran medida la concepción del proceso constructivo

Desde el proceso de diseño, la economía del proyecto ha sido un factor primordial, por lo que se ha llevado a cabo una optimización de los materiales siempre que fuera posible.



2. Descripción de la estructura

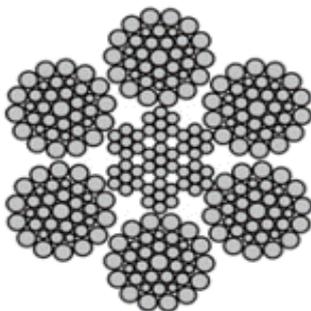
Neby Bru es una pasarela colgante que consiste en una celosía continua formada por cordones de madera maciza y diagonales de acero, suspendida de una catenaria a través de unos tirantes de acero. Se disponen dos mástiles laterales y dos torres centrales de madera laminada encolada (glulam). El puente se divide en tres vanos de aproximadamente 30m, 33m y 30m de largo, respectivamente.

El tablero cuenta con un ancho útil de 1.5m (Figura 8 y Figura 9) que se amplía hasta 5m alrededor de las torres centrales mediante sendos balcones (Figura 4). El balcón hace que la celosía de madera sea discontinua en las torres centrales, ya que el cordón superior se interrumpe. Es por ello que se requiere un tirante diagonal adicional conectado a las torres para no sobrecargar el cordón inferior adyacente a las mismas (Figura 4).

Los elementos estructurales principales del puente se describen a continuación.

2.1 Cables principales

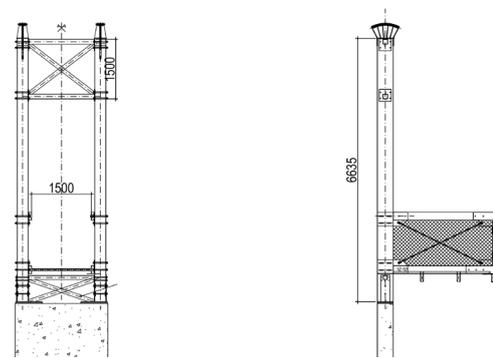
El puente tiene dos cables principales 6x36 IWRC con 36mm de diámetro nominal, paralelos en la dirección longitudinal del puente, suspendidos de las torres y anclados a los macizos de hormigón.



Los cables principales apoyan sobre las cuatro torres a través de sillas de montar de acero atornilladas a su parte superior.

2.2 Torres y mástiles

Los mástiles en los extremos del puente están compuestos por dos columnas de madera y dos dinteles y dos diagonales de acero que unen la parte superior.



Mástiles

Las torres sobre las pilas centrales tienen forma de A, para proporcionar más estabilidad a la estructura.

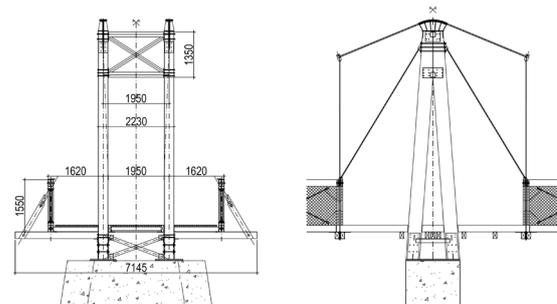


Figura 4. Torres intermedias

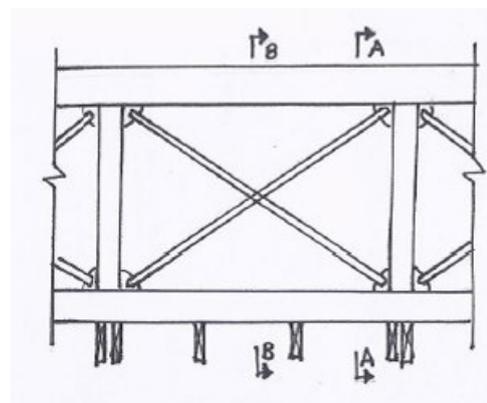
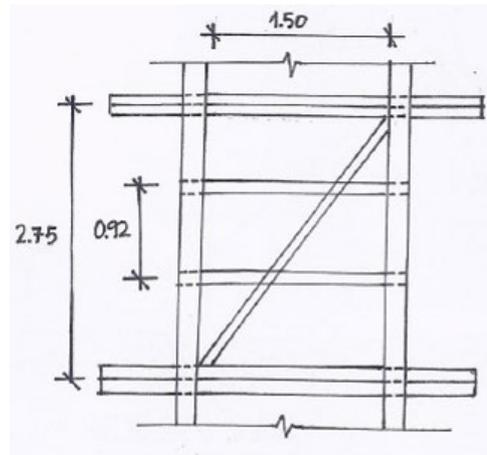
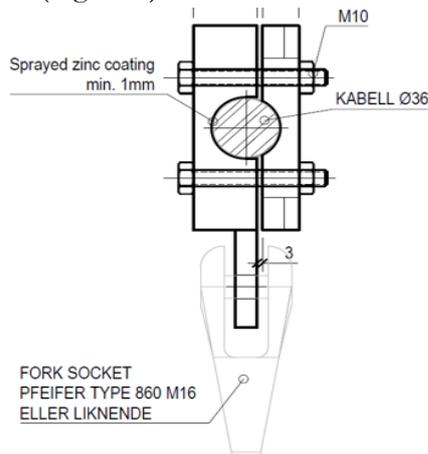
La altura de las torres se ha calculado suponiendo una relación de vano/altura = 5.25 que se ha demostrado que funciona bien para este tipo de puentes. Teniendo en cuenta el vano central que tenemos:

$$H_{\text{torres}} = 33/5.25 = 6.30 \text{ m}$$

2.3 Tirantes verticales

Los tirantes verticales son barras de acero de 16 mm colgadas de los cables principales a una distancia de $33/12 = 2.75\text{m}$, que soportan el tablero de madera del puente.

Los tirantes se conectan a los cables principales a través de abrazaderas y horquillas de acero (Figura 5).



El metro inferior de los tirantes es roscado para poder ajustar los niveles del tablero (ajuste de tuercas) al nivel requerido en cada etapa de construcción.

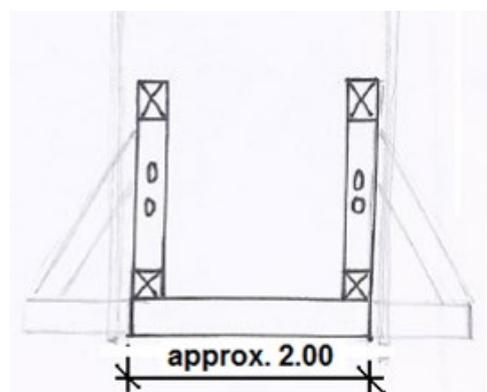
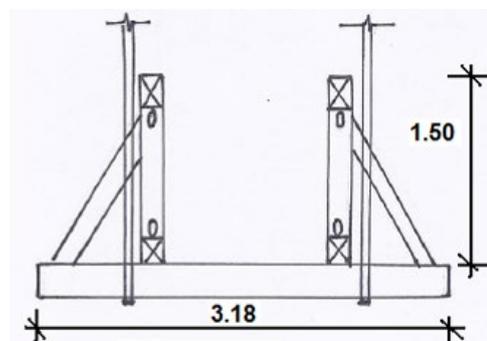
2.4 Celosía de madera

Los perfiles de madera forman dos cerchas verticales (Figura 7) conectadas entre ellas en su plano inferior por otra cercha horizontal (Figura 6) que da rigidez lateral al puente para poder resistir tanto las cargas verticales como también las fuerzas laterales del viento.

Estas tres cerchas forman una sección abierta en forma de U, en la que el cordón superior de las celosías verticales sirve a su vez como barandilla.

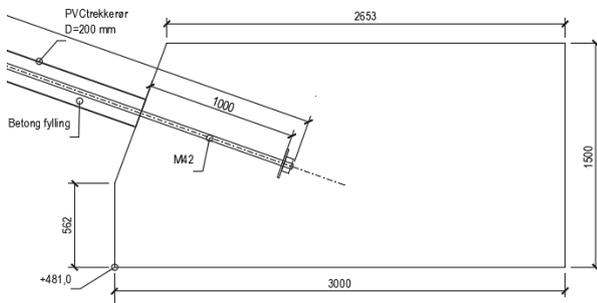
Las siguientes imágenes muestran el diseño preliminar de un módulo típico del tablero del puente, que se repite cada 2.75 m.

El tablero se construye a través de módulos dobles y simples de 2.75m para facilitar así la secuencia de construcción.



2.5 Macizos de anclaje

Los macizos de anclaje de hormigón (Figura 10) se colocan a ambos lados del río para resistir las fuerzas de los cables principales.



3. Secuencia de montaje del puente

El sistema de montaje del puente desempeña un papel principal en la concepción y el diseño de la estructura, ya que se deben utilizar los medios de construcción mecánicos disponibles en los alrededores que puedan ser ejecutados por mano de obra local de Tynset.

Se supone que el puente se montará siguiendo el siguiente procedimiento:

1) Construcción de los soportes (torres (Figura 4) y mástiles (Figura 3)) sobre los cimientos (pilas y estribos).

2) Cuelgue de los cables principales sobre las torres y ajuste a la forma requerida.

3) Cuelgue de los módulos dobles (Figura 11).

Módulo de montaje típico:

$$L1 = 2 \cdot X = 2 \cdot 2.75 = 5.50\text{m}$$

Espaciado entre módulos:

$$Lg = X = 2.75\text{m}$$

4) Construcción de los módulos de los balcones, colgados de los tirantes verticales y conectados a las torres.

5) Pretensado de los tirantes (ajustando las tuercas) para llevar cada módulo doble a la misma posición vertical (horizontal).

NOTA: las diagonales de la celosía no están fijadas en esta fase (no resisten cargas).

6) Unión de los módulos simples mediante el montaje in situ entre los módulos dobles.

7) Tesado de las diagonales de la celosía (ajustando tuercas), para que resistan cargas.

8) Instalación del arriostramiento horizontal. (perfiles metálicos en L).

9) Instalación del pavimento de madera, excepto en los módulos adyacentes a los balcones.

10) Izado del tablero (creando una forma parabólica) mediante el pretensado de los tirantes (ajustando las tuercas).

11) Pretensado de los cables principales al mismo tiempo que la fase previa (ajustando la horquilla de anclaje) para llevar las torres extremas a la posición vertical

11) Instalación del pavimento restante.

12) Activación de las diagonales que se hayan destensado desde la fase 8, para que vuelvan a resistir fuerzas.

13) Instalación y ajuste de los tirantes diagonales del balcón para que empiecen a resistir cargas.

La secuencia de construcción del puente se ha incluido en el modelo FEM, para considerar la acumulación de esfuerzos y deformaciones en los elementos estructurales.

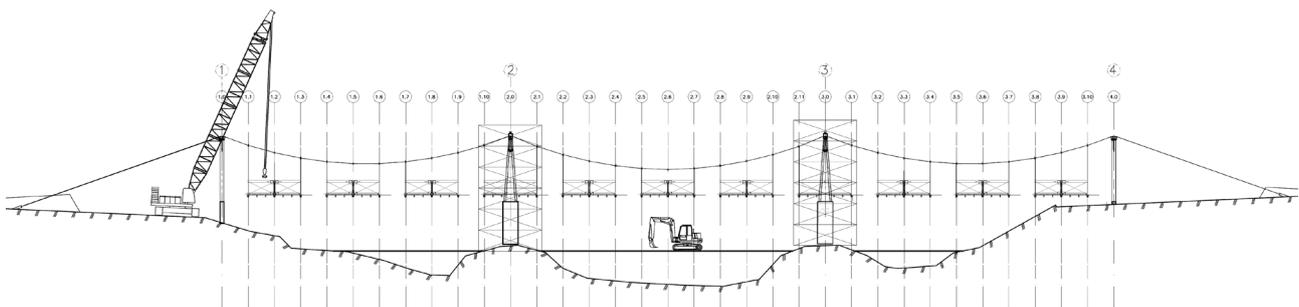


Figura 11. Montaje del puente (instalación de los módulos dobles)

4. Criterios de diseño

4.1 Materiales

4.1.1. Madera

El principal material constructivo de la pasarela es la madera. Su resistencia, ligereza y propiedades de absorción de energía la hacen altamente deseable para la construcción de puentes. Las principales ventajas de utilizar la madera como elemento constructivo son las siguientes.

DURABILIDAD: La madera es muy duradera cuando está adecuadamente protegida contra la putrefacción, la contracción, la torsión, el ataque de insectos y la exposición diaria al ambiente. La madera tratada adecuadamente se puede utilizar en cualquier entorno independientemente del clima, no se desconcha como el hormigón ni se oxida como el acero. La madera no se daña bajo ciclos de congelación/descongelación continuos y resiste los efectos de los agentes anticongelantes, que causan deterioro en otros materiales.

BAJO MANTENIMIENTO: la madera tratada requiere poco mantenimiento.

BAJO COSTE: Desde el punto de vista económico, la madera es competitiva respecto a otros materiales, tanto desde la fase inicial como a lo largo de su vida útil debido a su bajo mantenimiento.

PERIODOS DE CONSTRUCCIÓN REDUCIDOS: Las limitaciones de diseño en el uso de acero o hormigón suelen ralentizar el proceso de instalación, mientras que la madera es un recurso fácilmente disponible y de rápida instalación. Además, la construcción de un puente de madera puede darse en cualquier condición climática sin deterioro del material.

Tanto la madera maciza como el glulam (madera laminada encolada) se utilizan en el

puente peatonal de Neby. El glulam se fabrica mediante la laminación de piezas individuales de madera aserrada conectadas con adhesivos estructurales impermeables.

GL 30c: Se utiliza en torres del puente y en el cordón inferior y vigas transversales de la zona de los balcones.

$$f_{m,g,k} = 30 \text{ N/mm}^2 \text{ (resistencia a flexión)}$$

$$f_{t,0,g,k} = 19.5 \text{ N/mm}^2 \text{ (resistencia a tracción)}$$

$$f_{c,0,g,k} = 24.5 \text{ N/mm}^2 \text{ (resistencia a compresión)}$$

$$Q_{g, \text{mean}} = 430 \text{ kg/m}^3$$

C24: Se utiliza en los elementos estructurales del tablero (vigas transversales, postes verticales y diagonales, cordones superior e inferior)

$$f_{m,k} = 24 \text{ N/mm}^2 \text{ (resistencia a flexión)}$$

$$f_{t,0,k} = 14.5 \text{ N/mm}^2 \text{ (resistencia a tracción)}$$

$$f_{c,0,k} = 21 \text{ N/mm}^2 \text{ (resistencia a compresión)}$$

$$Q_{g, \text{mean}} = 420 \text{ kg/m}^3$$

4.1.2. Acero

S275J2: Se utiliza en las chapas de las conexiones, las sillas de montar y las abrazaderas.

$$f_y = 275 \text{ N/mm}^2$$

$$f_u = 390 \text{ N/mm}^2$$

S355J2: Se utiliza en las barras de acero (tirantes y diagonales).

$$f_y = 355 \text{ N/mm}^2$$

$$f_u = 490 \text{ N/mm}^2$$

4.1.3. Hormigón

C45: Se usa para las pilas.

$$f_{ck} = 45 \text{ N/mm}^2$$

C30: Se utiliza en los macizos de anclaje.

$$f_{ck} = 30 \text{ N/mm}^2$$

4.2 Cargas

Además del peso propio, la carga muerta del tablero es de 0.25 kN/m². La barandilla y el pasamanos se aplica como una carga lineal de 0.05kN/m. En las cargas permanentes se incluyen también cargas del pretensado de los cables y tirantes, aplicadas como temperatura.

Se considera una carga uniforme de tráfico distribuida según la longitud cargada, con un valor máximo de 5kN/m² y un valor mínimo de 2.5 kN/m². Con respecto a las cargas horizontales, el 10% de las cargas verticales de tráfico se consideran longitudinalmente. En los casos donde es desfavorable, se considera además una carga horizontal de 1.5KN/m en la parte superior de la barandilla.

Las cargas de nieve se consideran únicamente en combinación con acciones climáticas, ya que no se pueden combinar con cargas de tráfico.

La carga del viento es de 0.6kN/m transversalmente, 0.3 kN/m en dirección longitudinal y 2.3 kN/m en dirección vertical. La carga de viento en los cables principales se ha establecido como 0.04KN/m y 0.02KN/m en los tirantes. El viento en las columnas es de 0.57KN/m transversalmente y 0.19KN/m longitudinalmente.

Por último, las acciones térmicas consideran una expansión de +36°C y una contracción de -55 °C. En cada situación, al elemento estructural desfavorable (madera o

acero) se le debe aplicar la temperatura extrema, $\Delta T_{N,exp}$ o $\Delta T_{N,con}$ y el otro elemento debe tener una reducción de $\Delta T=15^{\circ}C$ en la temperatura extrema que se le aplica.

4.3 Modelo de Elementos Finitos

4.3.1. Descripción del modelo

Se ha generado un modelo 3D de elementos finitos (Figura 12) para llevar a cabo el análisis global del puente colgante, consistente en barras que representan a los principales elementos estructurales y links que modelan las conexiones entre ellos y sus excentricidades.

El análisis global permite el cálculo de toda la estructura para determinar los desplazamientos en los nudos y las fuerzas internas en cada elemento. El modelo se genera considerando las distintas fases constructivas, así como la situación a corto y largo plazo (apertura al tráfico y tiempo infinito).

Los cordones y diagonales que forman la celosía, las vigas transversales y el arriostramiento horizontal se modelan con barras situadas en el centro de gravedad real de los elementos. Estos elementos se conectan entre sí mediante links que representan las excentricidades y las rigideces de las conexiones (K_{ser}).

El alzado de las pilas se ha modelado con elementos barra y los cables con elementos barra sin rigidez a flexión.

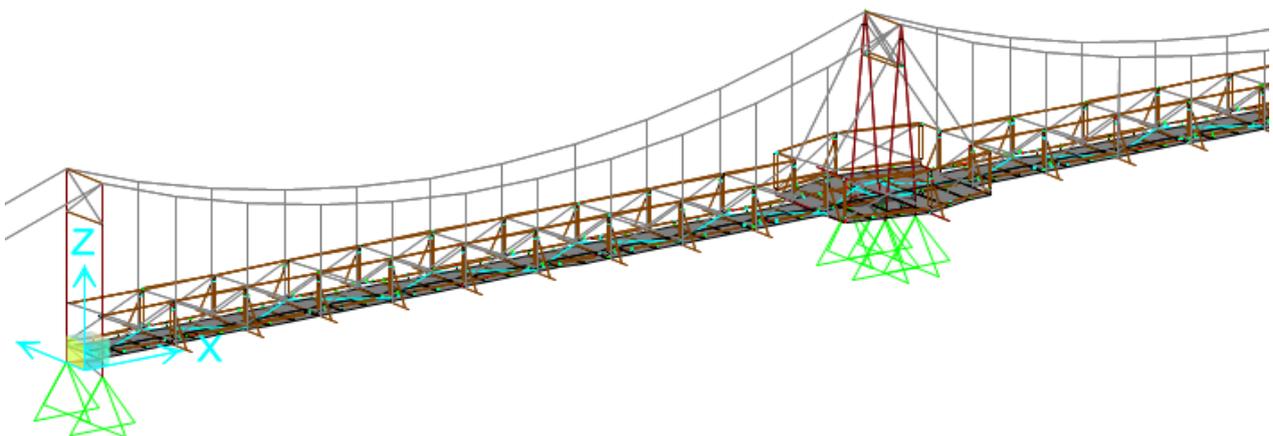


Figura 12. Vista del modelo de elementos finitos

En el modelo se han definido dos grupos diferentes de condiciones de contorno:

1) Los extremos de los cables y las torres de madera descansan sobre macizos de anclaje y pilas de hormigón respectivamente, que se representan como apoyos simples (rígidos).

2) El tablero de madera se apoya vertical y transversalmente sobre los cables y tirantes y longitudinalmente sobre las torres centrales. Todos estos apoyos consideran la rigidez de las conexiones K_{ser} (flexibles).

4.3.2. Metodología de análisis

Un análisis que reproduzca el comportamiento del cable es crucial a la hora de evaluar un puente colgante.

El efecto P-Delta influye en gran medida en la rigidez de los puentes colgantes, ya que la rigidez lateral se debe casi por completo a su estado tensional, puesto que los cables son muy flexibles cuando no están traccionados.

Se establece por lo tanto un análisis no lineal que considera el efecto P-Delta con grandes desplazamientos.

Además, la secuencia de montaje también es fundamental en este tipo de estructuras, ya que las operaciones realizadas en cada etapa afectan a la forma del cable y, por lo tanto, a la distribución de las fuerzas axiales.

Se lleva a cabo un análisis por fases para evaluar los efectos de las cargas permanentes según la secuencia de construcción. Los análisis posteriores, que consideran los efectos de las diferentes combinaciones de cargas, parten de los resultados de este análisis inicial.

Se establecen dos análisis por fases distintos, dependiendo del estado límite que se evalúa (SLS/ULS).

Como la distribución de esfuerzos en los elementos estructurales se ve afectada por la distribución de la rigidez en la estructura, dos rigideces diferentes se deben considerar en los

elementos de madera (corto y largo plazo). El módulo de elasticidad (E), el módulo de cortante (G) and el módulo de deslizamiento (K_{ser}) se dividen por un factor 3 para evaluar la situación a largo plazo.

4.4 Resultados

4.4.1. Verificaciones ELS

Según el Eurocódigo 5, las flechas deben limitarse a $L/200 = 150\text{mm}$ bajo cargas de tráfico características. La flecha vertical máxima en centro de vano es de 124mm, por debajo de $L/200$.

Los principales resultados del análisis modal realizado muestran que el primer modo lateral relevante es de 2.34 Hz y el primer modo vertical es de 3.48 Hz. Se comprueba que, de acuerdo con la clasificación del rango de frecuencias dada por SETRA (Figura 13), la pasarela tiene un bajo riesgo de resonancia para situaciones de carga estándar, tanto para vibraciones verticales/longitudinales como para vibraciones horizontales transversales.

In both vertical and horizontal directions, there are four frequency ranges, corresponding to a decreasing risk of resonance:

Range 1: maximum risk of resonance.

Range 2: medium risk of resonance.

Range 3: low risk of resonance for standard loading situations.

Range 4: negligible risk of resonance.

Table 2.3 defines the frequency ranges for vertical vibrations and for longitudinal horizontal vibrations. Table 2.4 concerns transverse horizontal vibrations.

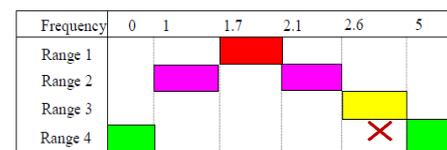


Table 2.3: Frequency ranges (Hz) of the vertical and longitudinal vibrations

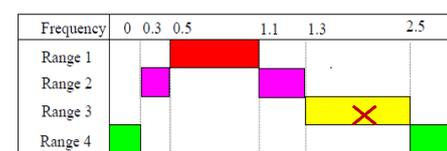


Table 2.4: Frequency ranges (Hz) of the transverse horizontal vibrations

Figura 13. Rangos de frecuencia de vibración según SETRA

4.4.2. Verificaciones ELU

La tensión en los cables fluctúa durante la vida de la estructura debido a la variación de las propiedades mecánicas de la madera a lo largo del tiempo y a los cambios en la temperatura. Los valores máximos que se alcanzan son 270kN en los cables principales, 20kN en los tirantes y 100KN en las diagonales de la celosía vertical.

Se ha comprobado la capacidad de todos los perfiles de madera y sus conexiones. Como era de esperar, aparecen compresiones en el cordón superior y tracciones en el cordón inferior bajo la acción de cargas verticales. Con el fin de que los cordones sean más eficientes y evitar aumentar su tamaño, se aprovecha el pretensado de los tirantes para crear una contraflecha en el tablero que genera en los cordones el efecto opuesto al esperado bajo condiciones de carga normales (cordón superior pre-traccionado y cordón inferior pre-comprimido). Con esto, se puede resistir una mayor carga vertical, de manera similar a la teoría del hormigón pretensado.

Todas las conexiones se diseñan mediante chapas metálicas y pasadores. Se ha evaluado cada tipo de unión por separado para poder optimizar de esta manera el número de pernos y la cantidad de acero de las chapas.

5. Conclusiones

El diseño del puente peatonal de Neby se ha llevado a cabo teniendo en cuenta que se trata de un proyecto social con un presupuesto limitado y que será construido por mano de obra local. Esto hace que la optimización del material sea más importante que la limitación del período de construcción.

Las cuantías de madera se han optimizado mediante el uso de la contraflecha de la celosía que permite comprimir el cordón inferior y traccionar el cordón superior, por lo que se vuelven más eficaces bajo condiciones normales de carga vertical.

Se han optimizado las uniones de los elementos de madera evaluando cada una para obtener un factor de utilización cercano a 1.

Se han utilizado recursos y proveedores locales, así como mano de obra local para la construcción del puente, haciendo uso de la tecnología disponible en la zona.

El uso de la madera como principal material de constructivo, favorece la industria local y contribuye a un beneficio ambiental.

Por lo que se puede afirmar que el proyecto de la pasarela peatonal de Neby genera un claro impacto social, fomentando la sostenibilidad desde tres puntos de vista diferentes: económico, ambiental y social.

Agradecimientos

Los autores quieren agradecer al municipio de Tynset la oportunidad de poder participar en el diseño de la pasarela peatonal de Neby. Y agradecer especialmente al contratista Ola Grønn-Hagen, ingeniero jefe en Nordøstkonsult AS por su colaboración, interés y apoyo durante el diseño de detalle del puente.

El asesoramiento especializado en el diseño de los elementos de tensión ha sido proporcionado por el Grupo Pfeifer.

Referencias

- [1] Eurocódigos y Anejos Nacionales Noruegos a EN 1990, EN 1991, EN 1992, EN 1993, EN 1995, EN 1997 and EN 1998.
- [2] SÉTRA 2006. Technical guide Footbridges. Assessment of vibrational behaviour of footbridges under pedestrian loading. CEREMA, France 2006.
- [3] HIVOSS – Human Induced Vibration of Steel Structures – Design of footbridges – Guideline and Background document.
- [4] European Technical Approval ETA-12/0062: SFS self-tapping screws WR
- [5] European Technical Approval ETA-12/0114: SPAX self-tapping screws