



MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS

ESCUELA POLITÉCNICA DE MIERES

UNIVERSIDAD DE OVIEDO

**DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIÓN E INGENIERÍA DE FABRICACIÓN
ÁREA DE INGENIERÍA E INFRESTRUCTURA DE LOS TRANSPORTES
ÁREA DE MECÁNICA DE MEDIOS CONTINUOS Y TEORÍA DE
ESTRUCTURAS**

TRABAJO FIN DE MÁSTER

**Análisis de comportamiento estructural de puentes de
hamaca precolombinos: el caso del puente
Q'eswachaka (Perú)**

AUTOR: ENRIQUE PALOMO LLAVONA

TUTORES: DR. PEDRO PLASENCIA LOZANO Y DR. MARIO LÓPEZ GALLEGO

JULIO, 2020



Trabajo de fin de máster:

Análisis del comportamiento
estructural de puentes de hamaca:
el caso del puente Q'eswachaka

Autor: Enrique Palomo Llavona

Directores del trabajo: Dr. Pedro Plasencia Lozano y Dr. Mario López Gallego

CONTENIDO

Índice de tablas.....	3
Índice de figuras.....	3
Resumen	5
Abstract	5
1. Introducción	6
1.1. Sobre los puentes de hamaca.....	6
1.2. Sobre el puente Q'eswachaka	8
1.3. El proceso de renovación del puente.....	10
1.4. Antecedentes.....	12
1.5. Objetivos e hipótesis.....	12
2. Materiales y métodos	15
2.1. Puente de estudio	15
2.1.1. Dimensiones	15
2.1.2. Caracterización resistente de los materiales del puente	15
2.2. Acciones consideradas	18
2.2.1. Acciones permanentes de valor constante	18
2.2.2. Acciones variables.....	19
2.2.3. Hipótesis de cargas consideradas	21
2.3. Modelo de cálculo	22
2.3.1. Descripción de modelo empleado.....	23
2.3.2. Modelo de calibración de pretesado.....	26
2.3.3. Calibración del modelo	28
2.3.4. Proceso de desarrollo del modelo final	28
3. Resultados y discusión	30
3.1. Resultados en los parámetros de entrada	30
3.1.1. Parámetros característicos del material.....	30
3.1.2. Cargas aplicadas	30
3.2. Resultados de calibración del modelo.....	31
3.3. Resultados de hipótesis de cargas	33
3.3.1. Hipótesis 1: posiciones diferentes de trenes de cargas mayoradas según IAP-11 33	
3.3.2. Hipótesis 2: distintas posiciones de trenes de cargas sin mayorar	34
3.3.3. Hipótesis 3: carga máxima a soportar en por el puente de forma que cumpla el criterio de flecha máxima menor igual a 60 cm	36
3.3.4. Hipótesis 4: Efecto en la flecha del puente cuando se considera que solo circula un animal	36
4. Conclusiones y futuras líneas	38

5. Planos	40
Referencias bibliográficas	44

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Valores de modulo Young, resistencia a tracción y densidad para “Stipa Ichu” y “Stipa Obtusa” considerados.....	16
Tabla 2. Características de los distintos trenes de cargas.	20
Tabla 3. Características de los elementos empleados.....	24
Tabla 4. Características mecánicas del material considerado en el puente.	30
Tabla 5. Resultados de cargas a considerar.	30
Tabla 6. Cargas introducidas en el software.	31
Tabla 8. Resultados de tensión máxima de Von Misses, coeficiente de seguridad y flecha máxima en el modelo, para diferentes posiciones del tren de cargas.	34
Tabla 9. Resultados de tensión máxima de Von Misses, coeficiente de seguridad y flecha máxima en el modelo, para diferentes posiciones del tren de cargas.	35
Tabla 9. Resultados de flechas en el puente para cada tipo de animal, número y posición en el puente del grupo.	36
Tabla 10. Resultados del valor de la flecha del puente para distintas posiciones del animal.	37

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Puente de bejucos, perteneciente a la tipología más primitiva de puentes de hamaca, ya que carece de "padrones" (estribos) anclándose directamente a los troncos de los árboles (González Tascón, 1992).	7
Figura 2. "Inca Acos" o gobernador de los puentes, tenía jurisdicción en todo el imperio. (Felipe Guamán, 1615).	8
Figura 3. Puente Q'eswachaka en la actualidad (Cusco, 2020).	9
Figura 4. Sección transversal del puente.	10
Figura 5. Alzado del puente (superior) y plante del puente (inferior).	10
Figura 6. Puente Q'eswachaka antiguo es dejado caer al río para construir el nuevo en su lugar (Busqué, 2019).	11
Figura 7. Hombre colocando las soguillas a lo largo del puente (Busqué, 2019).	11
Figura 8. Stipa Ichu izquierda (Olasperu.com, 2016); Stipa Obtusa derecha (Candiotti <i>et al.</i> , 2020).	16
Figura 9. Tren de cargas de llamas (superior), tren de cargas de caballos (inferior).	20
Figura 10. Llamas cruzando el puente (superior) y caballos cruzando el puente (inferior). ...	20
Figura 11. Disposición del tren de cargas de llamas (izquierda) y tren de caballos (derecha).	21

Figura 12. Reacciones a acciones en una estructura de un cable sometida a cargas (Gimsing and Georgakis, 2011).	22
Figura 13. Geometría del puente.	23
Figura 14. Geometrías presentes en el modelo cajón transversal (superior), cuerda longitudinal (inferior).	24
Figura 15. estructura del puente unida (a) perspectiva de conjunto, (b) alzado, (c) perfil longitudinal y (d) planta.....	25
Figura 16. Malla del modelo del puente.	25
Figura 17. Puente con las restricciones de movimiento en los apoyos.....	26
Figura 18. Cargas puntuales aplicadas sobre la base del puente.	26
Figura 19. Geometría del modelo de cuerda de calibración.....	27
Figura 20. Elemento longitudinal mallado (en azul discontinuo).	27
Figura 21. Condiciones de contorno del modelo pretensado de calibración.	27
Figura 22. Fuerzas aplicadas sobre el modelo.	27
Figura 23. Primera versión del modelo del puente.	29
Figura 24. Deformada del segundo modelo del puente (No se incluyen valores, solo interesa la forma de la deformada).	29
Figura 25. Desplazamientos de calibración modelo pretensado con peso propio (a desplazamientos en x, b desplazamientos en y). Se ha superpuesto la estructura deformada con la sin deformar (Valores en m).	31
Figura 26. Desplazamientos en el eje de ordenadas del modelo del puente (Valores en m)...	31
Figura 27. Desplazamientos bajo la acción del peso de una llama en ambos modelos (Valores en m). (a, modelo cuerda pretesa; b, modelo puente completo).....	32
Figura 28. Respuesta del puente bajo la hipótesis de cargas 1(carga inicial a 0,25 m. Valores en metros y Pascales).....	33
Figura 29. Respuesta del puente bajo la hipótesis de cargas 2 (carga inicial a 0,25 m. Valores en metros y Pascales).....	35
Figura 30. Efecto del cambio de posición del animal mientras cruza el puente.	37

RESUMEN

El puente Q'eswachaka sobre el río Apurímac forma parte del legado de la ingeniería civil incaica. Las técnicas con las que se construye todos los años tienen más de 500 años de antigüedad y son patrimonio de la humanidad. En este trabajo se modeliza y analiza el comportamiento estructural de este puente, reproduciendo para ello los materiales y cargas de la época.

Para modelizar los materiales, de los que está construido el puente, se consideran sus propiedades físicas y resistentes. Para las hipótesis de carga se define la acción debida al tren de carga tipo de la época, que son animales como la llama, empleada por los incas como animal de carga, y el caballo, empleado por los españoles del siglo XVI como medio de transporte de las fuerzas de caballería. Se realizan los planos estructurales del puente, con los que se obtiene la geometría del modelo, a partir de datos recogidos de diferentes fuentes.

ABSTRACT

The Q'eswachaka's bridge over Apurimac river is an important part of the inca's civil engineering legacy. The techniques by it is rebuilt every year, are 500 years old. In this work is modeled the bridge's structure and the bridge's structural behavior to be analyzed.

In order to characterize the bridge's materials, their physical and resistant properties are considered. For the load hypotheses, the action due to the type freight train of the time is defined, which are animals such as llama, used by the Incas as a pack animal, and horse, used by the Spanish of the 16th century as a means of transport for cavalry forces. The structural plans of the bridge has been made. The geometry of the model is obtained from these plans and other data collected from different sources.

1. INTRODUCCIÓN

De los muchos tipos de estructuras que el ser humano ha construido, los puentes siempre han tenido un lugar especial en el imaginario colectivo. Se alzan como desafíos patentes ante la naturaleza, salvando las distancias y uniendo a los distintos pueblos. Dentro de los puentes, los que más llaman la atención son los puentes suspendidos, que soportan su peso gracias a la acción de finos cables que los anclan al terreno. Este trabajo trata sobre un puente histórico perteneciente a un subtipo de puentes suspendidos: los puentes de hamaca. En concreto el caso del puente Q'eswachaka. Los puentes de hamaca llevan construyéndose desde la antigüedad en lugares tan distantes como son Asia o América del Sur. La explicación del funcionamiento estructural de este trabajo se basa en el libro *Cable Supported Bridges* (Gimsing and Georgakis 2011).

A partir de la información oficial disponible (Instituto nacional de cultura 2009) se realizan los planos del puente, se caracterizan los materiales y se elabora un modelo estructural mediante el software ABAQUS CAE. El modelo estructural se evalúa en diversas situaciones de carga y bajo la acción de trenes de carga basados en los animales que se usaban en la época, las llamas y los caballos, usados por los incas y los españoles del siglo XVI respectivamente.

El puente está fabricado con una fibra vegetal llamada ichu que se trenza para formar las sogas que constituyen el puente. Los tejidos vegetales se han empleado desde la antigüedad para multitud de tareas, cestas, muebles, ropa... En la actualidad, las fibras se están estudiando como componente disperso en materiales compuestos ecológicos. Esto aporta una gran resistencia al conjunto, como el caso de un material de base epóxica y reforzado con fibras de algodón e ichu (Iza Tutillo 2017). El uso de fibras de ichu como refuerzos en materiales compuestos ha sido estudiado por S. Mori et al (Mori et al. 2018).

Para el estudio del material, una vez se encuentra entrelazado como una cuerda, se han seguido las explicaciones del libro *Theory of wire rope* (Costello 1997), en el cual se establecen las bases del estudio de las cuerdas como elemento estructural.

La base histórica de los puentes de hamaca se basa en los volúmenes de *Ingeniería Española en ultramar, Siglos XVI-XIX* (González Tascón 1992). En ellos se hace una explicación concienzuda de todas las tipologías, materiales, planteamientos y técnicas empleadas en la ingeniería civil que se realizó entre los siglos XVI y XIX en el continente americano, tanto por los españoles que hicieron morada allí, como de los nativos.

Para las referencias de normativa se emplea la *Instrucción de las acciones a considerar en puentes de carretera IAP-11* (Fomento 2012). Los trenes de carga planteados se basan en los planteamientos expuestos en "Trenes de carga en puentes de carretera" (Del Cuvillo Martínez-Riduejo, Alvaro; Del Cuvillo Jiménez 2002).

Finalmente este trabajo surge de la lectura del artículo "El puente Q'eswachaka sobre el río Apurímac en Perú" (Bühler 2013) el cual explica la tipología, las características y la historia del puente. Una vez leído, apareció el interés por saber más del legado de los antiguos incas que nos dejaron a través de una tradición de más de 500 años de antigüedad.

1.1. SOBRE LOS PUENTES DE HAMACA

Los puentes de hamaca estructuras principalmente soportadas por catenarias que cruzan el vano a salvar. Pueden tener o no tramos rígidos pero el funcionamiento principal es por cuerdas traccionadas. El nombre de puentes de hamaca se lo dieron los españoles ya que les recordó a las redes que los indígenas empleaban como camas, como se explica en el capítulo sobre los orígenes prehispánicos de los puentes de hamaca (González Tascón, 1992, vol 2, págs 513-518).

Los puentes de hamaca se llevan realizando desde la antigüedad tanto en Asia como en las regiones extensas del continente americano. Se encuentran puentes de este tipo de origen prehispánico como es el Q'eswachaka en la región peruana de Cusco, antigua capital del imperio Inca. Este tipo de estructuras flexibles eran idóneas para los episodios de seísmos que se producen con frecuencia en las regiones andinas. La idea de estos puentes, tal y como descubrieron pronto los españoles, era que fueran cruzados a pie, de ahí sus dimensiones. Como dato anecdótico se cuenta que los españoles, al ver por primera vez los puentes de hamaca y cruzar a caballo, lo hicieron velozmente porque tenían miedo de accidentes. Una vez vistos los puentes en acción, los alabaron y estudiaron para emplearlos en sus construcciones (Clavigero 1826).

No se tiene claro exactamente como planificaban y dimensionaban sus obras los incas, pero las investigaciones apuntan a que se guiaban por similitud a otras obras exitosas. También se han encontrado restos que apuntan a que, en algunas ciudades y obras, se realizaban pequeñas maquetas a escala con barro y palitos (Vega, 1608 pág 108).



Figura 1. Puente de bejucos, perteneciente a la tipología más primitiva de puentes de hamaca, ya que carece de "padrones" (estribos) anclándose directamente a los troncos de los árboles (González Tascón 1992).

Toda la red de puentes de cuerdas, que vertebraba la red viaria incaica, se reponía de una a dos veces al año. Su mantenimiento quedaba a cargo de las comunidades más próximas. Se nombraba un técnico de forma que supervisase el trabajo antes de ponerlo en funcionamiento. Además, la organización del imperio Inca nombraba al "Inca Acos" (gobernador de los puentes) de forma que realizase inspecciones periódicas de todos los puentes de la red de

comunicaciones del imperio. Los españoles mantuvieron esta organización, ya que era preciso cambiar las maromas con mucha frecuencia (Felipe Guamán, 1615, págs 355-357).

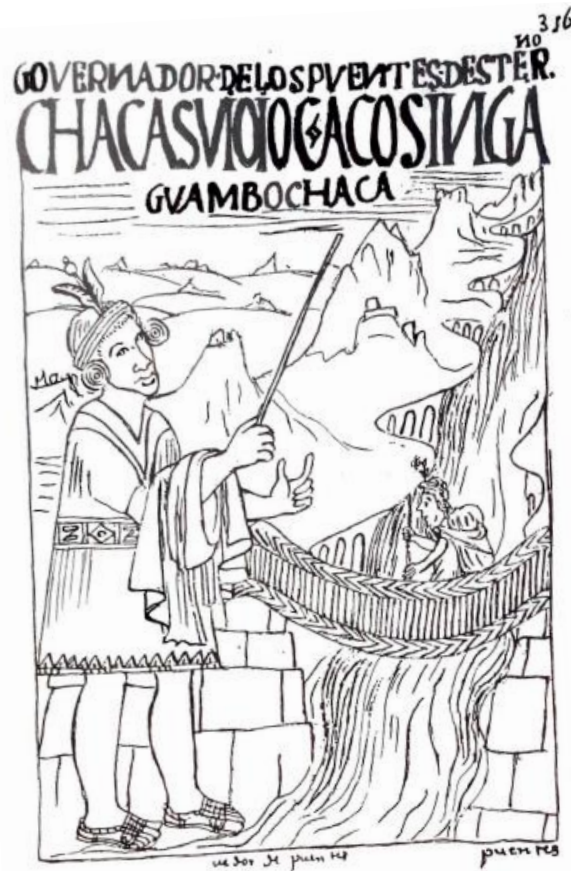


Figura 2. "Inca Acos" o gobernador de los puentes, tenía jurisdicción en todo el imperio. (Felipe Guamán 1615).

Para el mantenimiento de este tipo de puentes, habitualmente se construían dos paralelos ya que así se mantenía el paso durante los trabajos de reparación. Los españoles confundieron esto, inicialmente pensaron que uno era para la nobleza inca, no comprendiendo su planteamiento de origen (Regal, 1972, pág 37).

Finalmente se tiene constancia de la aparición de este tipo de puentes en todo el continente americano (Clavigero, 1826, vol 1, 352), aunque en el imperio Inca fue donde se mejoró la técnica y se desarrollaron los estribos o "padrones": estructuras de piedra que permiten anclar los puentes en cualquier vano y evitan tener que depender de la presencia de árboles cercanos a los que atar las cuerdas.

1.2. SOBRE EL PUENTE Q'ESWACHAKA

El puente Q'ewwachaca (nombre de origen quechua que significa puente de paja torcida) sobre el río Apurímac se encuentra en el distrito de Quehue, dentro de la provincia de Canas que corresponde a la región de Cusco en Perú. Se encuentra en las coordenadas UTM (19L, 232123.56 m E, 8408656.58 m S) a una altitud de 3700 msnm. El puente se encuentra a 158 km al sur de la ciudad de Cusco (Figura 3).



Figura 3. Puente Q'eswachaka en la actualidad (Cusco 2020).

Gracias a las investigaciones del año 2008 realizadas por Carmen Arróspide y Roxana Abril (Instituto nacional de cultura 2009), se ha contrastado que el puente es una construcción de la época incaica y tiene una antigüedad de más de 500 años. El puente pertenece al “Qhapaqñan”, la red viaria que vertebraba todo el “Tawantinsuyu” (palabra quechua que significa las cuatro porciones del mundo) o imperio Inca.

El puente es reconstruido cada año, por lo que han sido los conocimientos y técnicas que se emplean para la reconstrucción anual del puente lo que se ha reconocido por la UNESCO como patrimonio inmaterial de la humanidad desde el año 2013 (Instituto nacional de cultura 2009).

Debido al bajo mantenimiento que se le daba al puente en la época inca, era necesario reemplazarlo una o dos veces al año, a partir de ello surge la tradición de la renovación del puente una vez al año. El puente se reconstruye mediante los ritos tradicionales que comparten las comunidades de Winch'iri, Chirupampa, Ccollana Quehue y Perqaro, Chirupampa y Hbabsaya (Perú 2014). El proceso emplea más de 1000 personas en un acto ceremonial. La reconstrucción se lleva a cabo mediante técnicas tradicionales como la “Mink'a”, una técnica de trabajo cooperativo que permite terminar la obra en pocos días.

El puente presenta un vano de 28 m entre los apoyos de piedra, un ancho de 1,2 m y un alto en la sección transversal de 1,2 m (Figura 4). Está compuesto por 6 grandes sogas que llevan el peso entre los apoyos. Las cuerdas superiores forman los pasamanos o barandillas. Las sogas inferiores forman el piso y se llaman duros. El diámetro medio de las sogas es de 20 cm aproximadamente. Los pasamanos y los duros se unen mediante una serie de cuerdas finas de 1 cm de diámetro.

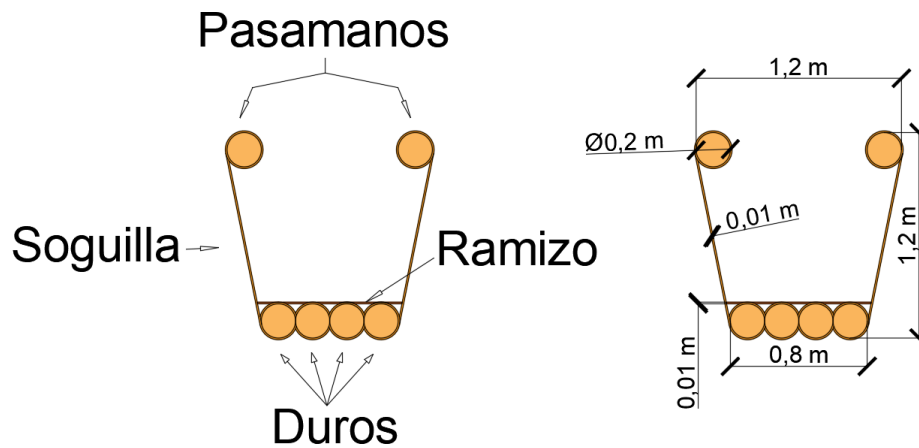


Figura 4. Sección transversal del puente.

Las cuerdas quedan ancladas a los apoyos de piedra, uno a cada lado del río (Figura 5). En cada apoyo las cuerdas quedan fijas en 6 puntos. El material de las cuerdas es el mismo para todos los elementos. El tejido de las cuerdas se llama “cayapo” y proviene de la “qoya” o ichu (Reynel 2012): una planta, similar a la paja que crece en el altiplano andino, a partir de la cual se obtiene la fibra con la que se construye el puente. Esta fibra se reblandece y trenza para formar la superestructura (Figura 5).

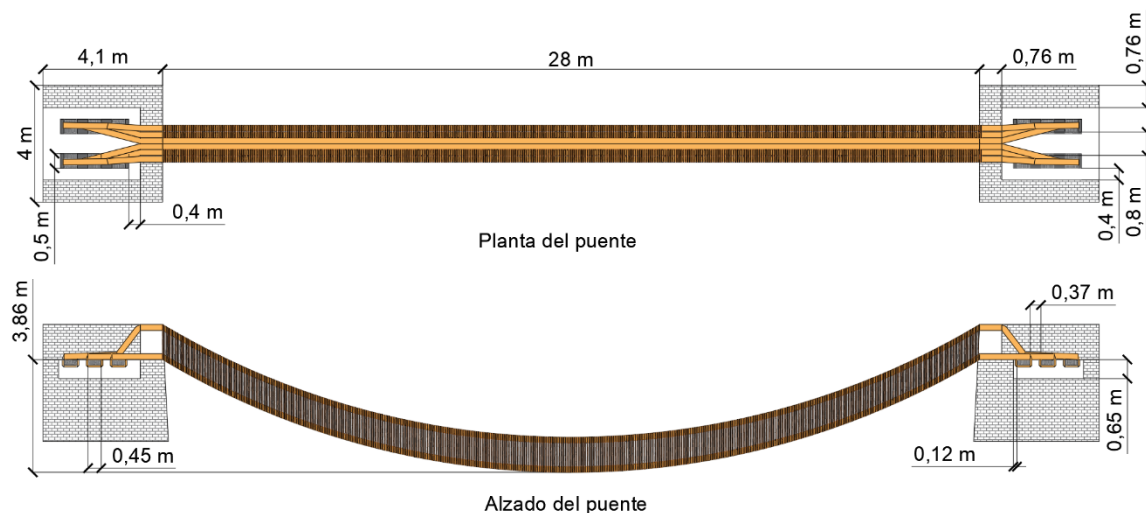


Figura 5. Alzado del puente (superior) y plante del puente (inferior).

1.3. EL PROCESO DE RENOVACIÓN DEL PUENTE

El proceso de renovación del puente, sin incluir aspectos rituales que pertenecen a la tradición Inca, se lleva a cabo de la siguiente forma (Perú 2014): primero todas las comunidades que participan aportan unas 40 brazas (73,15 m aproximadamente) de ichu trenzado. Una vez se dispone de las seis cuerdas longitudinales, los duros y pasamanos, se pasan de un lado a otro del puente. A continuación, se deja caer el puente antiguo y se colocan los duros y pasamanos en los apoyos (Figura 6).



Figura 6. Puente Q'eswachaka antiguo es dejado caer al río para construir el nuevo en su lugar (Busqué 2019).

Para conseguir que estén en la posición adecuada, por ambos lados del puente se aplica tensión, de forma que resista los esfuerzos a los que se somete. Debido a que no se emplean máquinas de tesado en el proceso, no se deja perfectamente horizontal, con lo que adquiere una posición de equilibrio con respecto a su peso propio.



Figura 7. Hombre colocando las soguillas a lo largo del puente (Busqué 2019).

Una vez colocados los pasamanos y los duros, hombres desde ambos lados del puente atan los duros entre sí para que se muevan como uno solo y atan las soguillas a las barandillas (Figura 7). Las mujeres y los niños realizan una labor especial en el proceso, trenzando más cuerdas que actúen como soguillas para que no falten. Finalmente, con todo el puente construido, se sitúa un alfombrado de ramizo, que cubrirá toda la plataforma del puente. Esto hace más cómodo el paso por el puente. Todo el proceso se lleva a cabo como una fiesta y se inaugura por las autoridades locales una vez concluido.

1.4. ANTECEDENTES

Los trabajos previos a éste se dividen en tres tipos de investigaciones:

- Análisis estructural mediante el método de elementos finitos de puentes históricos.
- Análisis estructural por el método de elementos finitos de puentes de hamaca y puentes suspendidos sobre cables.
- Estudios históricos sobre puentes.

Sobre los estudios estructurales de puentes históricos mediante elementos finitos se toman en cuenta los siguientes trabajos:

- El trabajo sobre el puente histórico de arco de Senyuva (Camlihemsin, Turquía), que data del 1696 (Bayraktar et al. 2009). En este trabajo se modeliza el puente para determinar su respuesta dinámica al paso de personas.
- El caso estudiado en varios puentes históricos de la geografía gallega (Riveiro et al. 2008), en éste se realizó un escaneo 3D mediante técnicas de fotogrametría y se elaboró un modelo de cálculo para cuantificar el estado tensional en torno a los daños detectados en el puente.
- La modelización geométrica, empleando escaneo laser y georradar, y numérica llevada a cabo sobre varios puentes históricos gallegos (Lubowiecka et al. 2009).
- La modelización de varios puentes históricos del imperio Otomano existentes a lo largo de la geografía turca (Haciefendioğlu et al. 2015), con el objetivo de ver la respuesta dinámica de los mismos a las cargas sísmicas que se dan en la zona.

En cuanto a los estudios de aplicación del método de elementos finitos sobre puentes de hamaca y puentes suspendidos sobre cables:

- El caso de estudio de distintos puentes en situación de servicio frente al paso de los viandantes, entre ellos la pasarela de Knokke construida en 2008, la cual está planteada como un puente de hamaca pero soportada por una estructura de acero y hormigón (Van Nimmen et al. 2014).
- Las apreciaciones sobre modelización no lineal para el estudio por el método de elementos finitos de puentes suspendidos de cables de Raid Karoumi (Karoumi R. 1999).

Finalmente, en cuanto a estudios históricos sobre puentes de hamaca se tiene:

- El análisis realizado de la ingeniería prehispánica en el continente americano que se hace en la obra *Ingeniería española en ultramar, siglos XVI-XIX* (González Tascón 1992).
- El estudio que realiza José Galindo (Díaz 2009) sobre los puentes suspendidos en Colombia, desde la época prehispánica al siglo XIX.
- El estudio histórico de los puentes de hamaca que se da en el libro *Transition in Engineering* (Peters 1987) en el que se estudian, entre otros, los puentes suspendidos de cables y los puentes de hamaca en China.

1.5. OBJETIVOS E HIPÓTESIS

En este apartado se exponen los objetivos que se quieren alcanzar con el presente trabajo. Además, se presentan todas las hipótesis consideradas para el caso del puente Q'eswachaka.

Como objetivos del presente trabajo se tienen los siguientes:

- Obtener un modelo de cálculo que replique de la forma más fiel posible el puente Q'eswachaka.
- Analizar el comportamiento estructural del puente Q'eswachaka con respecto a diversas situaciones de carga.

- Obtener un coeficiente de seguridad del puente ante las cargas planteadas sin tener en cuenta valores de mayoración.
- Verificar si empleando coeficientes de mayoración de ELU de normativa actual el puente cumpliría.
- Analizar el efecto que tiene sobre el puente el movimiento de un solo animal.
- Analizar el número de animales que pueden cruzar por el puente de forma cómoda (se entiende por cómoda que el puente no varíe más de 0,6 m su flecha al paso del animal).
- Verificar si las suposiciones que hacían los españoles de la época para cruzar rápidamente con los caballos eran correctas o podían cruzar despacio.
- Definir unos planos del puente en la actualidad, contando con las limitaciones disponibles.

En cuanto a las hipótesis consideradas para la realización del trabajo se tiene:

- Las cuerdas que constituyen el puente son de sección y densidad lineal homogénea.
- Se considera que las cuerdas son elementos que solo soportan tracción y no admiten esfuerzos de compresión.
- Los esfuerzos en la estructura del puente únicamente son axiales y los nudos están articulados como en una celosía.
- La estructura se presenta como un modelo de barras que centran toda su sección en el eje central.
- Tanto los pasamanos como los duros (Figura 4) tienen el mismo grosor.
- Se considera la sección de las cuerdas que forman el puente es circular de un diámetro equivalente a la suma del área de las cuerdas trenzadas.
- La separación entre soguillas se toma 0,05 m.
- Se considera que el material que conforma el puente es un material hipotético formado por fibras mezcladas de las dos plantas, a las que se menciona como ichu según los estudios: la *Stipa Ichu* y la *Stipa Obtusa* debido a sus similitudes en aparición (Reynel 2012) y familia a la que pertenecen.
- Se considera que las cuerdas que conforman el puente son isótropas.
- No se considera en el cálculo el efecto del tipo de nudo con el que se unen las cuerdas entre sí.
- No se considera el efecto de las acciones climáticas sobre el puente.
- Las cargas distribuidas se aplican de igual forma sobre los cuatro duros de la base.
- El efecto de las reacciones sobre la estructura debidas al peso propio es similar al que produce el pretesado, con lo que se emula de forma parecida.
- Debido a la simetría del modelo, se consideran iguales los esfuerzos producidos por las cargas situadas en cualquier punto del puente, con respecto a si se situasen en el punto simétrico.
- Todas las unidades introducidas en el programa y devueltas por éste se introducen en la unidad básica del sistema internacional.
- Todas las cargas, excepto el peso propio, se aplican sobre la base del puente.
- Se considera el peso de las llamas (*Lama Glama*) como 200 kg, que es el peso medio máximo de las llamas (Bioenciclopedia n.d.), y su capacidad de carga máxima 50 kg: un cuarto de su peso (HOP 2020).
- Se considera el peso medio de un caballo (*Equus Caballus*) como 500 kg (Del Cuvillo Martínez-Riduejo, Alvaro; Del Cuvillo Jiménez 2002).
- El valor de la constante g de aceleración de la gravedad es 9.81 m/s^2 (Allen Tipler and Gene 2010).
- La densidad del ramizo en la base del puente se asume de 700 kg/m^3 . Esta es una densidad media entre la mínima densidad 200 kg/m^3 y 1540 kg/m^3 máxima densidad teórica de la madera (Vignote Peña and Martínez Rojas 2006).

- Las dimensiones del ramizo del suelo del puente se asumen de 0,01 m de diámetro y 0,8 m de largo.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Este apartado trata de cómo se han obtenido las medidas del puente, la caracterización resistente de los materiales, las hipótesis de cargas planteadas y la construcción del modelo.

2.1. PUENTE DE ESTUDIO

2.1.1. DIMENSIONES

Debido a la falta de documentación sobre las medidas del puente y la falta de planos oficiales, se emplearán diversas fotografías para obtener las medidas. La información disponible, datos del Instituto de Cultura de la República del Perú (Instituto nacional de cultura 2009) y Bühler D. (Bühler 2013), son la anchura y la longitud del puente que corresponden 1,2 m y 28 m respectivamente.

Para obtener las medidas se emplea el siguiente factor de conversión:

$$L_2 = \frac{D_2}{D_1} \times L_1; \quad \text{[Ecuación 1]}$$

donde:

- L_1 : es la longitud del elemento real conocido (unidad de longitud original);
- L_2 : es la longitud del elemento a medir (unidad de longitud original);
- D_1 : es la dimensión en la imagen del elemento real conocido (unidades de longitud de la herramienta de medición);
- D_2 : es la dimensión en la imagen del elemento a medir (unidades de longitud de la herramienta de medición).

Este tipo de medición tiene sus limitaciones de precisión, debido a la calidad de las fotografías disponibles en la internet sobre el puente y que ninguna está tomada y corregida mediante técnicas de ortofotografía.

2.1.2. CARACTERIZACIÓN RESISTENTE DE LOS MATERIALES DEL PUENTE

El puente de forma principal está construido a partir de una fibra trenzada llamada por los locales “qoya” (en quechua), el nombre común es ichu. En la zona hay dos plantas a las que se hace referencia con el nombre de ichu: la *Stipa Ichu* y la *Stipa obtusa*. Son plantas muy similares que se dan en zonas muy similares (Reynel 2012) y son de misma familia. Ambas plantas poseen fibras que, una vez tratadas adecuadamente, se pueden emplear para la realización de cuerdas o, en caso de estudios recientes, emplear como elemento disperso en materiales compuestos (Candiotti et al. 2020). También se da el uso de este tipo de materiales en la elaboración de prótesis (Iza Tutillo 2017).



Figura 8. “Stipa Ichu” izquierda (Olasperu.com 2016); “Stipa Obtusa” derecha (Candiotti et al. 2020)

Debido a la similitud entre ellas, y a los pocos estudios de caracterización del material que existen, se toman como valores característicos del material, para la fabricación del puente, un valor promediado de las dos plantas.

En la siguiente tabla se recogen los valores expuestos según los distintos trabajos que caracterizan el material.

Tabla 1. Valores de modulo Young, resistencia a tracción y densidad para *Stipa Ichu* y *Stipa Obtusa* considerados.

Referencia	Planta	Módulo de Young, E (GPa)	Resistencia a tracción, σ_f (MPa)	Densidad, ρ (kg/m ³)	Deformación en rotura, ε (%)
(Mori et al. 2018)	<i>Stipa Obtusa</i>	23,4	322	1253	1,4
(Candiotti et al. 2020)	<i>Stipa Obtusa</i>	18,4	373	1398	2,6
(Vega Acosta and Villanueva, Villanueva Sanchez 2019)	<i>Stipa Ichu</i>	6,2	94	--	1,6
(Córdova et al. 2019)	<i>Stipa Obtusa</i>	27,3	428	1470	1,8

Para obtener el valor del módulo de Young y darle una importancia similar a la *Stipa Ichu* y a la *Stipa Obtusa* se hace un promedio ponderado de los valores de cada una. Empleando la siguiente expresión:

$$n = 0,75 n_i + 0,25 n_o, \quad [\text{Ecuación 2}]$$

donde:

- n : valor de la magnitud a obtener;
- n_i : valor medio de la magnitud de *Stipa Ichu* obtenido;
- n_o : valor medio de la magnitud de *Stipa Obtusa* obtenido.

Finalmente se obtiene como valores de referencia para el material del puente (Tabla 4).

Debido a que el material no se coloca en bruto, sino que se encuentra trenzado en forma de cuerdas, el valor del módulo elástico se ve alterado y se debe considerar un módulo

equivalente. Para obtenerlo se emplea la formulación expuesta en el libro *Theory of Wire Rope* (Costello 1997). El desarrollo de la formulación es el siguiente:

$$E_e = C_1 \cdot E, \quad \text{[Ecuación 3]}$$

donde:

- E_e : modulo elástico equivalente de la cuerda a obtener (GPa);
- C_1 : coeficiente de equivalencia, valor que se obtiene analíticamente;
- E : modulo elástico del material (GPa).

El valor de C_1 se obtiene de la expresión (3.54) del libro *Theory of Wire Rope* (Costello 1997), que es la siguiente:

$$\frac{F}{EA} = C_1 \cdot \varepsilon + C_2 \cdot \beta, \quad \text{[Ecuación 4]}$$

donde:

- F : fuerza axial a la que se somete la cuerda (N);
- E : modulo elástico del material (Pa);
- A : área equivalente de la cuerda suma de las áreas de todas las fibras que la conforman (m^2);
- C_1 : coeficiente de equivalencia, valor que se obtiene analíticamente (adimensional);
- ε : deformación del material para la carga aplicada;
- C_2 : coeficiente de equivalencia, respectivo a la rotación de la cuerda (adimensional);
- β : deformación rotacional de la cadena (adimensional).

El valor de la deformación rotacional β sale de la expresión (3.53) del libro *Theory of Wire Rope* (Costello, 1997, págs 20-22), que es la siguiente:

$$\beta = R \cdot \tau_s, \quad \text{[Ecuación 5]}$$

donde:

- β : deformación rotacional de la cadena (adimensional);
- R : radio equivalente de la cuerda como suma de los radios de las fibras que componen la cuerda (m);
- τ_s : coeficiente que depende de si la cuerda puede rotar o no (m^{-1}).

Para obtener el valor del E_e se van a tomar los datos correspondientes a ensayos de tracción en los que la cuerda está sometida a un esfuerzo axial y en el que no puede rotar sobre si misma. Con esto el valor de τ_s es 0. Esto produce que el valor del coeficiente β también sea 0 y sustituyendo en [Ecuación 3] se obtiene la siguiente expresión:

$$\frac{F}{EA} = C_1 \cdot \varepsilon, \quad \text{[Ecuación 6]}$$

Sustituyendo la relación entre la fuerza axial y el área por la tensión de rotura en el ensayo de tracción la expresión para obtener C_1 :

$$C_1 = \frac{F}{E \cdot A \cdot \varepsilon}, \quad [\text{Ecuación 7}]$$

2.2. ACCIONES CONSIDERADAS

En este apartado se tratan las acciones a considerar que se aplican sobre el puente según la clasificación de la *IAP-11*. Las acciones se clasifican en permanentes de valor constante, permanentes de valor no constante y variables (Fomento 2012).

- Las permanentes de valor constante son el peso propio y las cargas muertas.
- Las cargas permanentes de valor no constante son pretesados, reológicas, empuje del terreno y similares.
- Las cargas variables son cargas que pueden actuar o no en la estructura, son cargas como la sobrecarga de uso, acciones climáticas o empujes hidrostáticos.

La normativa especifica los coeficientes de mayoración a aplicar en cada tipo de carga. Para la combinación de acciones se emplea la siguiente expresión según la normativa.

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j} + \sum_{m \geq 1} \gamma_{G,m} \cdot G_{k,m}^* + \gamma_{Q,1} \cdot Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \cdot \psi_{0,i} \cdot Q_{k,1}, \quad [\text{Ecuación 8}]$$

donde:

- $G_{k,j}$: es el valor característico de cada acción permanente;
- $G_{k,m}^*$: es el valor característico de cada acción permanente de valor no constante;
- $Q_{k,1}$: valor característico de la acción variable dominante.
- $\psi_{0,i} Q_{k,1}$: valor de combinación de las acciones variables concomitantes con la acción variable dominante;
- $\gamma_G \gamma_Q$: coeficientes parciales.

Los tipos de acciones que se consideran son, acciones permanentes de valor constante, y acciones variables. Dentro de cada tipo se consideran las siguientes acciones:

- Acciones permanentes de valor constante:
 - Peso propio.
 - Carga muerta.
- Acciones variables:
 - Sobrecarga de uso.

2.2.1. ACCIONES PERMANENTES DE VALOR CONSTANTE

Según la *IAP-11* (Fomento 2012) en su punto 2.4 apartado b: “Son cargas que actúan en todo momento y son constantes en posición y magnitud para la situación de proyecto determinada (peso propio de la estructura, del pavimento, de los elementos funcionales, etc.)”. Las acciones permanentes que se considerarán son el peso propio y la carga muerta.

El peso propio es la carga que experimenta una estructura debido a la acción de la gravedad sobre la masa que tiene. Para obtenerlo se emplea la siguiente expresión:

$$G_{pp} = \frac{V_{puente} \cdot \rho_{ichu} \cdot g}{L_{puente} \cdot a_{puente}}, \quad [\text{Ecuación 9}]$$

donde:

- G_{pp} : carga debida al peso propio del puente (N/m^2);
- V_{puente} : volumen del puente (m^3);
- ρ_{ichu} : densidad aparente del ichu (kg/m^3) (epígrafe 2.1.2);
- g : constante de la aceleración de la gravedad (m/s^2);
- L_{puente} : longitud del puente (m);
- a_{puente} : ancho del puente (m);

La carga muerta es la que experimenta la estructura debido al peso de los elementos no estructurales que se apoyan sobre la misma. En este caso se debe al peso del ramizo que alfombra la plataforma del puente. Se calcula mediante la expresión:

$$G_{CM} = \frac{V_{ramizo} \cdot \rho_{ramizo} \cdot g}{L_{puente} \cdot a_{plataforma}}, \quad [\text{Ecuación 10}]$$

donde:

- G_{CM} : carga debida al peso del ramizo (N/m^2);
- V_{ramizo} : volumen total del ramizo que se sitúa sobre el puente (m^3);
- ρ_{ichu} : densidad de la madera (kg/m^3) (epígrafe 2.1.2);
- g : constante de la aceleración de la gravedad (m/s^2);
- L_{puente} : longitud del puente (m);
- $a_{plataforma}$: ancho del puente (m);

2.2.2. ACCIONES VARIABLES

Según la IAP-11 (Fomento 2012) en su punto 2.4 apartado b: “Son acciones externas a la estructura que pueden actuar o no, y, si lo hacen, pueden tener diferentes valores (sobrecargas de uso, acciones climáticas, etc.)”. La acción variable que se considera es la sobrecarga de uso.

Para obtener el valor de la sobrecarga de uso, este trabajo se basa en las consideraciones que se planteaban en 1843 para puentes de carretera en España (Del Cuvillo Martínez-Riduejo, Alvaro; Del Cuvillo Jiménez 2002). Es la consideración de trenes de carga más antigua que se ha encontrado. La carga considerada se divide en una carga superficial y una serie de cargas puntuales que conforman un tren de cargas.

La carga superficial que se considera son 300 kg/m^2 lo cual se traduce en 2943 N/m^2 . En cuanto a los trenes de cargas se consideran dos casos: un tren de cargas formado por llamas separadas $1,25 \text{ m}$ entre ellas y un tren de cargas formado por caballos separados entre sí $2,5 \text{ m}$ (Figura 9). Se consideran estos dos tipos de animales debido a que: las llamas son los animales de carga que empleaban los incas en la zona y en la época en que se utilizaba el puente como vía de paso, y los caballos como animal que empleaba la caballería española una vez llegados al territorio. La distribución de los animales en el puente se puede ver en la Figura 10.

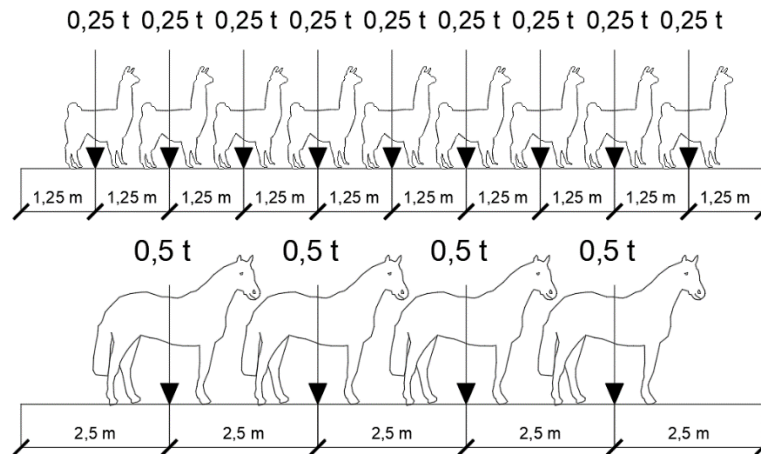


Figura 9. Tren de cargas de llamas (superior), tren de cargas de caballos (inferior).

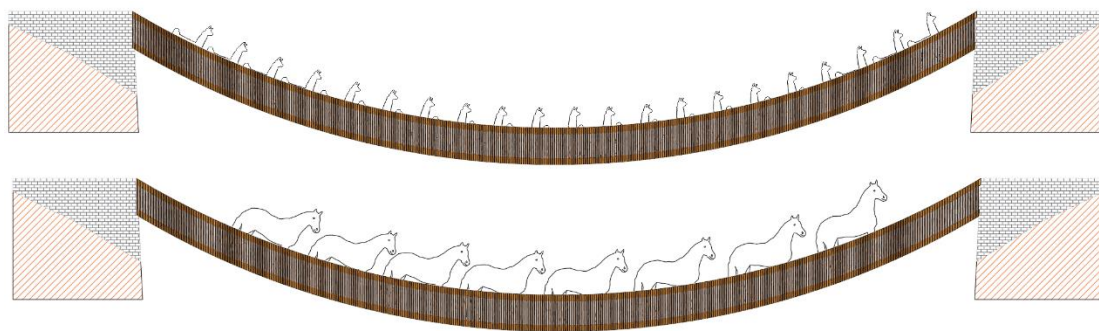


Figura 10. Llamas cruzando el puente (superior) y caballos cruzando el puente (inferior).

Tabla 2. Características de los distintos trenes de cargas.

Tren	Carga de cada elemento del tren (N)	Número de elementos del tren
Llamas 0,25 m	2452,5	23
Llamas 0,50 m	2452,5	22
Llamas 0,75 m	2452,5	22
Llamas 1,00 m	2452,5	22
Llamas 1,25 m	2452,5	22
Llamas 1,50 m	2452,5	22
Caballos 0,25 m	4905	12
Caballos 0,50 m	4905	11
Caballos 0,75 m	4905	11
Caballos 1,00 m	4905	11
Caballos 1,25 m	4905	11
Caballos 1,50 m	4905	11

La idea de realizar el cálculo con las cargas en distintas posiciones es comparar el efecto que produce la diferente colocación de las cargas sobre la estructura. La disposición de las cargas de ambos trenes a lo largo del puente es la siguiente.

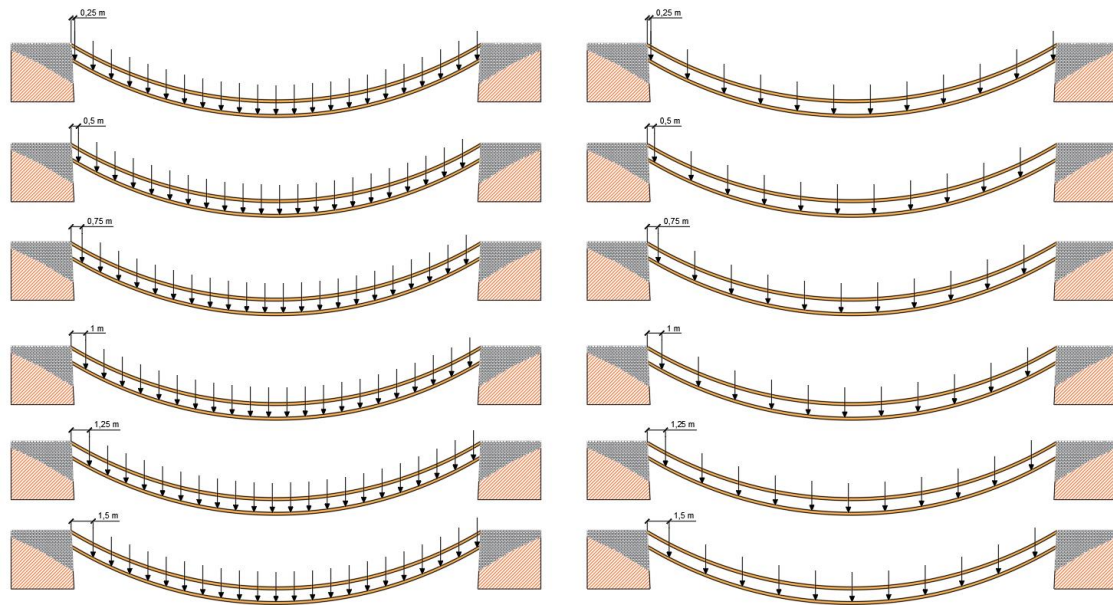


Figura 11. Disposición del tren de cargas de llamas (izquierda) y tren de caballos (derecha).

2.2.3. HIPÓTESIS DE CARGAS CONSIDERADAS

En este punto se describen las hipótesis (situaciones de carga) que se consideran en el cálculo del puente. Los casos estudiados se presentan a continuación:

- Hipótesis 1: distintas posiciones de trenes de cargas mayoradas según *IAP-11* (Fomento 2012).
- Hipótesis 2: distintas posiciones de trenes de cargas sin mayorar.
- Hipótesis 3: Grupos de animales colocados en distintas posiciones del puente de forma que la flecha máxima no supere 0,6 m
- Hipótesis 4: Paso de un solo animal de cada tipo por el puente.

La hipótesis 1 consiste en colocar todas las cargas descritas en el apartado anterior y ver el efecto que tiene sobre las tensiones y la flecha máxima de la estructura. Se consideran los coeficientes de mayoración planteados por la *IAP-11* (Fomento 2012) y el valor de seguridad para el material es 1,5. En este apartado se busca la rotura del puente.

En la hipótesis 2 busca obtener el coeficiente de seguridad en cuanto a tensiones que producen las cargas anteriormente planteadas, pero sin mayorar, el coeficiente para el material es 1 y se valorará el efecto sobre la flecha que induce la carga.

Se entiende como flecha la deformación inducida por las cargas en el puente más allá de la producida por el peso propio. Para obtenerla se restan la deformación vertical que se produce en el punto de máxima deformación menos la deformación natural vertical que supone el peso propio del puente.

En la hipótesis tres se busca la cantidad de llamas o caballos que pueden cruzar simultáneamente el puente para que la flecha máxima producida no supere 0,60 m. En la *IAP-11* (Fomento 2012) se considera que la flecha máxima para que sea confortable al paso de un peatón es la longitud del puente entre 1200, eso da un margen de 0,023 m. La normativa actual está pensada para el empleo de materiales rígidos como el hormigón o el acero, el ichu es un material relativamente flexible (19 veces menos rígido que el acero) por lo que la variación será elevada. El usuario al ver este tipo de estructura espera que se mueva a su paso, por esto es admisible una deformación mayor que la dada por la normativa.

Para la hipótesis 4, se coloca la carga correspondiente a 1 solo animal en distintas posiciones desde 0,25 m desde el inicio del puente hasta 14 m, punto medio del puente, separadas 1,25 m entre sí. En este modelo no se considera la sobrecarga de uso, solo el peso de un animal, la carga muerta y el peso propio. La idea es comprobar el efecto que tiene el paso del animal sobre la flecha del puente cuando este se ubica en las distintas posiciones mencionadas. Debido a la simetría del puente, una vez se llega al punto medio, en el otro lado los resultados serán idénticos por lo que solo se calcula sobre una mitad.

2.3. MODELO DE CÁLCULO

En este apartado se trata la descripción del modelo de cálculo del puente, explicando cómo se ha construido, y sus características. Además, se explica cómo se realiza la calibración del modelo que lo valida con respecto a la realidad y cómo se llega a este modelo a partir de una idea inicial.

El modelo de cálculo se construye en el software ABAQUS CAE, en la versión 6.12. El método de cálculo que emplea el programa es el método de elementos finitos. Este método permite la resolución de problemas con ecuaciones complejas si se aplican sobre todo el modelo, pero de los que se puede obtener una solución numérica aceptablemente aproximada si se divide en multitud de elementos y se calcula una solución para cada uno de ellos. La solución del conjunto es la combinación de las soluciones particulares. Es un método que ha demostrado su eficacia gracias al avance y desarrollo de las técnicas de cálculo computacional.

El puente Q'eswachaka es una estructura de cuerdas, lo que implica que de base no admiten esfuerzos de compresión y es necesario someterlas a una tensión de pretensado antes de que entren en carga.

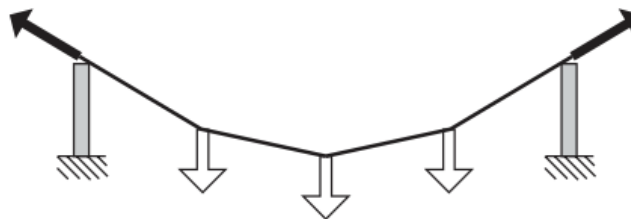


Figura 12. Reacciones a acciones en una estructura de un cable sometida a cargas (Gimsing and Georgakis 2011).

En puentes colgantes de catenaria o atirantados, se aplica esta tensión previa mediante sistemas de pretensado de los cables. En el puente Q'eswachaka la gente que colabora en su construcción hace fuerza para tirar de las cuerdas longitudinales que soportan las cargas principales para tensarlas, debido a que a que son personas y no maquinaria esto resulta en que la cuerda queda en un estado de equilibrio con su propio peso. Las cuerdas son de mayor longitud que el vano para compensar la longitud que se pierde con el descenso producido por la acción del peso propio.

Si el modelo completo se realiza con los elementos puramente axiales "truss" (Dassault Systèmes 2012), aparecen problemas de convergencia, debido a como se reciben las fuerzas del tesado que se aplican en los extremos.

Para solucionar este problema y obtener un modelo simplificado, se plantea la propuesta de modelizar el puente como una estructura de vigas, la cual, para resistir los esfuerzos de compresión, no necesita la aplicación de cargas previas. Para el modelo los nodos de los distintos elementos actúan como articulaciones, de esta forma si se aplican las cargas en los nodos no se transmiten momentos y por la disposición y sentido de aplicación de las cargas solo

se soportan esfuerzos de tracción, de forma similar a como ocurre en una celosía. Esto aproxima el comportamiento de la estructura real de forma simplificada y sencilla.

Para calibrar el modelo del puente, se crea un segundo modelo de comparación que también se explica en este epígrafe. Este modelo se realiza como una única cuerda que equivale a toda la masa del puente, ésta se calibra de forma que replica al puente en reposo y después se compara con el modelo completo y con la realidad. Se da por bueno el modelo si los desplazamientos producidos por una carga puntual en el modelo del puente completo y el modelo simplificado con la carga de tesado son similares. Primero se explica la construcción del modelo completo, después la construcción del modelo de calibración del pretensado, la calibración del modelo en conjunto y proceso de desarrollo del modelo hasta su versión final.

2.3.1. DESCRIPCIÓN DE MODELO EMPLEADO

Con el fin de describir de forma completa el modelo se plantea el siguiente orden de aspectos a tratar: geometría, mallado, condiciones de contorno y fuerzas aplicadas.

2.3.1.1. GEOMETRÍA DEL MODELO

El modelo simula la geometría del tramo intermedio del puente que está suspendido entre los apoyos (Figura 13). Se construye a partir de 2 tipos de geometrías (Figura 14). Los elementos longitudinales que corresponden a los duros y los pasamanos y los elementos transversales en forma de cajón que corresponden al conjunto de cuerdas delgadas que unen elementos longitudinales entre sí. En este aspecto se ha de distinguir la función de los laterales del cajón con respecto al tramo horizontal. Los primeros unen los pasamanos a los duros a modo de protección del usuario. El tramo horizontal únicamente mantiene unidos los duros de la base del puente, de forma que se muevan como uno solo, pero no soporta esfuerzos. Se plantea como una viga que une un elemento a otro, pero en la realidad no es así (son cuerdas que atan los duros entre sí para guiar su movimiento, no están planteadas para resistir esfuerzos). Se presenta así a efectos de cálculo.

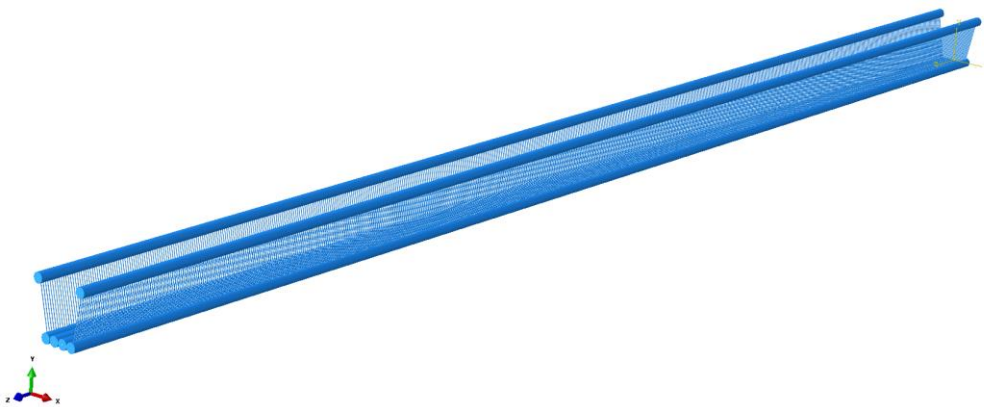


Figura 13. Geometría del puente.

Los elementos del puente principalmente se desarrollan como líneas, con lo que pueden ser caracterizados como elementos unidimensionales a los que se les asigna una determinada sección transversal y un tipo de elemento. El tipo de elemento es lo que determina como el programa trata la geometría para calcular los esfuerzos en este, en este caso se considerarán elementos tipo viga o “beam”(Dassault Systèmes 2012).

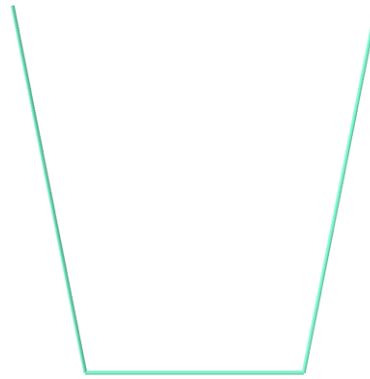


Figura 14. Geometrías presentes en el modelo cajón transversal (superior), cuerda longitudinal (inferior).

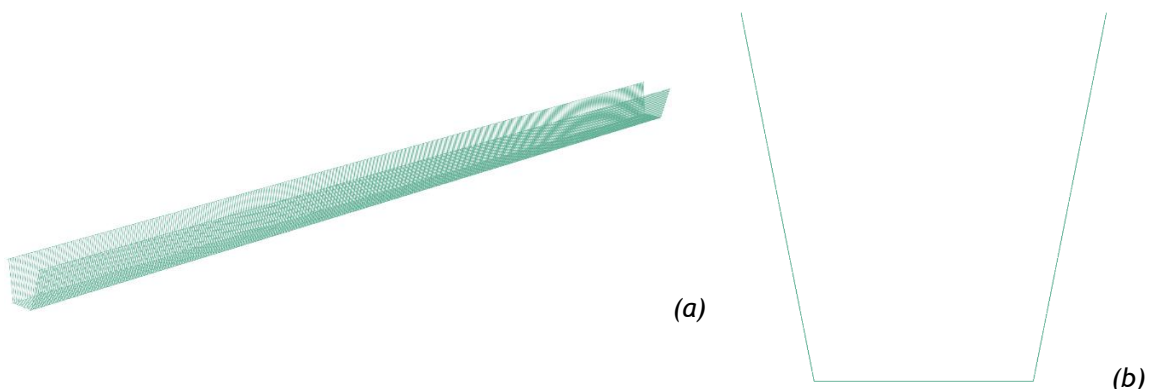
En la siguiente tabla se recogen las secciones que se emplean en cada tipo de elemento.

Tabla 3. Características de los elementos empleados.

Elemento	Tipo de sección	Diámetro (m)	Longitud (m)	Área asignada (m ²)	Número de elementos empleados
Longitudinal	Circular	0,2	28,00	0,0314	6
Cajón	Circular	0,01	1,06	$7,8539 \times 10^{-5}$	559

Una vez caracterizados los elementos del modelo se ensamblan de forma que construyan el puente completo. Para ensamblarlo se ha cargado la sección del cajón y se ha replicado en la dirección longitudinal del puente de forma que se tengan 559 secciones formando una fila y separadas entre sí 0,05 m. Una vez creadas las secciones cajón se han introducido los elementos longitudinales, gracias a que todas las secciones se encuentran alineadas en el eje longitudinal solo hay que colocar los 6 elementos longitudinales correctamente respecto a la primera y el resto están en su sitio.

Una vez ensamblada la estructura, se emplea la herramienta “merge” (Dassault Systèmes 2012), que permite ensamblar toda la geometría como una sola pieza. Es importante remarcar que se pide al programa que conserve los puntos de intersección entre las líneas de la geometría para emplearlos después como puntos de anclaje a la hora de aplicar esfuerzos. Además, conservar las intersecciones permite que, en el modelo final unido, se consideren como barras dentro de la misma pieza las líneas entre intersecciones, esto permite asignarles diferente sección y tamaño de elementos en el mallado.



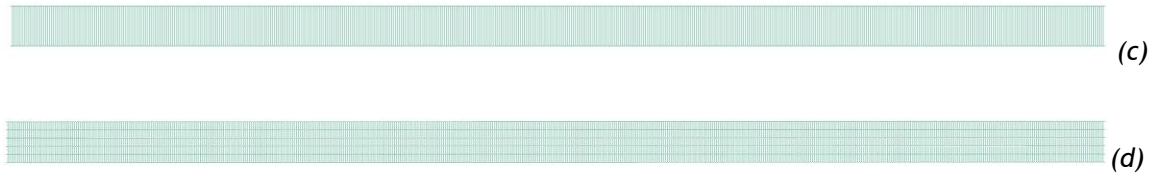


Figura 15. estructura del puente unida (a) perspectiva de conjunto, (b) alzado, (c) perfil longitudinal y (d) planta.

Cabe destacar que la geometría real del puente es curva, esto se debe a la acción de su propio peso. Se replica en el cálculo y se emplea como elemento de calibración. Se explica en mayor profundidad en el epígrafe de calibración del modelo

2.3.1.2. MALLADO

En este apartado se tratan los aspectos que caracterizan el mallado del modelo. Para el cálculo, es fundamental definir el tamaño de elemento y el tipo de elemento interpolador ya que de él depende la formulación de interpolación que se utiliza.

El tamaño de elemento en este caso se ha elegido para que cada segmento del modelo sea un elemento, esto consigue que cada elemento sea una barra y se replica la conexión tipo celosía buscada.

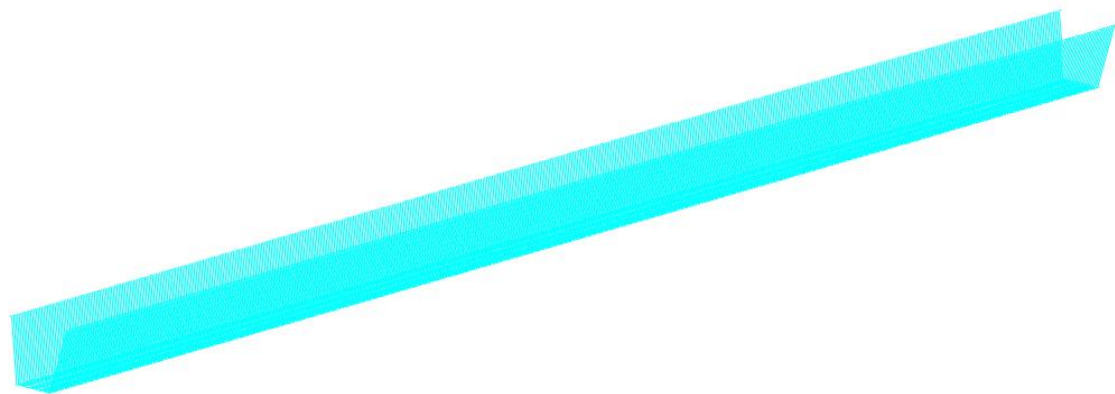


Figura 16. Malla del modelo del puente.

El tipo de elemento finito que se utiliza para el cálculo es el elemento 3D general con formulación lagrangiana lineal para geometría, axial y torsión; y formulación Hermítica para flexión (Celigieta 2011). Este elemento se denomina en el programa ABAQUS como B33 y se selecciona mediante la opción “Cubic formulation” (Dassault Systèmes 2012). En caso de emplear formulación cuadrática mediante la teoría de Timoshenko el elemento aproximaría también linealmente las tensiones debidas a flexión al igual que el elemento Hermítico. Sin embargo, se decide utilizar este último dada la modelización de barras de directriz recta utilizada con objeto de trabajar bajo las hipótesis de celosía (barras o elementos estructurales trabajando únicamente bajo esfuerzo axial). Finalmente, se emplean un total de 6155 elementos y 3366 nodos para mallar el modelo del puente completo.

2.3.1.3. STEPS DE CÁLCULO

En el cálculo del modelo se crean varios “steps” (etapas) para que no todas las fuerzas se apliquen a la vez y el modelo funcione adecuadamente. En el primer paso se carga el peso propio con lo que el modelo recto toma una deformada curva como en la realidad. En el segundo paso se aplican el resto de las cargas: la carga muerta y la sobrecarga de uso.

2.3.1.4. CONDICIONES DE CONTORNO

En este apartado se tratan las condiciones de contorno que se aplican al modelo. En este caso solo se restringe el desplazamiento en los 3 ejes en los puntos extremos de las cuerdas longitudinales ya que son la conexión con el apoyo y no se van a mover, se permiten los giros en los tres ejes de forma que se puedan replicar los movimientos una vez cargado.

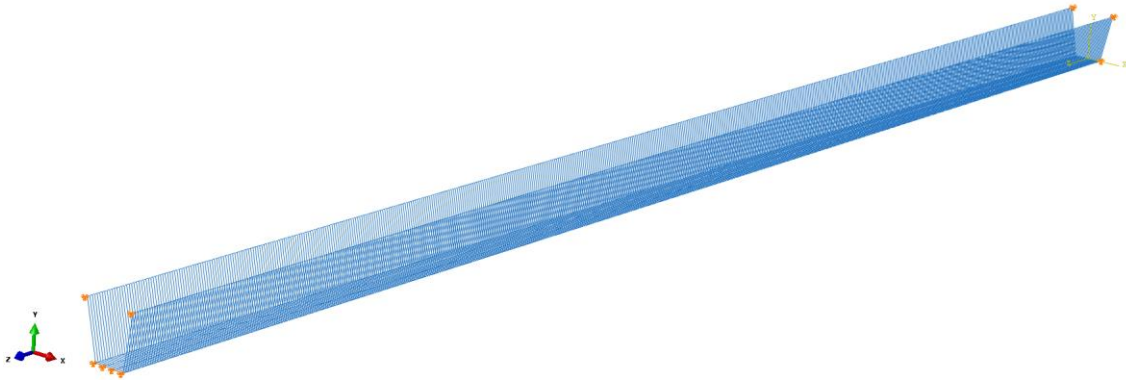


Figura 17. Puento con las restricciones de movimiento en los apoyos.

2.3.1.5. FUERZAS APLICADAS

En este punto se explica cómo se transmiten los esfuerzos al puente. Debido a que interesa conseguir un efecto de celosía, todas las cargas distribuidas se introducen como cargas puntuales sobre los nodos de unión entre las barras del modelo. El peso propio no se considera así porque se transmite por igual en toda la estructura.

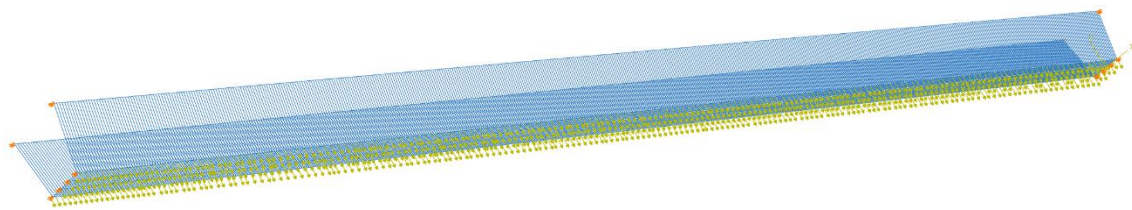


Figura 18. Cargas puntuales aplicadas sobre la base del puente.

Para pasar de las cargas distribuidas a las cargas puntuales, se multiplica la carga superficial por el área de influencia de los nodos, en el caso concreto del modelo el área es $0,2 \text{ m} \cdot 0,05 \text{ m}$. Las cargas puntuales debidas al peso de los trenes de llamas o de caballos se transmiten al puente divididas entre las cuerdas centrales, de esta forma se distribuyen entre los elementos resistentes que soportan el esfuerzo.

2.3.2. MODELO DE CALIBRACIÓN DE PRETESADO

Tal como se explica al inicio del apartado sobre el modelo, se realiza un segundo modelo de calibración. El tipo de elemento para la geometría, en este caso, es axial “truss” (Dassault Systèmes 2012), con lo que se replica una cuerda.

Se transmite la carga de pretensado en el eje de la estructura en un primer paso, eso permite que la estructura pueda soportar esfuerzos de compresión debidos a las cargas. Una vez cargada se aplica el peso propio, se comprueba el descenso de la cuerda y el acortamiento horizontal. El resultante ha de ser que la cuerda se acorte hasta dejar un vano de 28 m y descienda una altura aproximada de 3,86 m. Tras completar el primer paso, se aplica la fuerza del peso de una llama en el centro que servirá de comparación con el modelo del puente completo.

Como en el epígrafe anterior (Descripción de modelo empleado), a fin de describir completamente el modelo, se plantea el orden siguiente de puntos que tratar: geometría, mallado, “steps” de cálculo, condiciones de contorno y fuerzas aplicadas.

2.3.2.1. GEOMETRÍA DEL MODELO

El modelo de calibración es muy sencillo. Es un modelo 2D que consiste en una línea de 29,4 m de longitud a la que se asigna una sección transversal equivalente a todo el puente (el volumen obtenido al multiplicar la longitud de la cuerda por el área asignada es igual al volumen total del puente). La sección es axial “truss” de forma que se replica la cuerda y solo hay que dotarla de un valor para la sección transversal, en este caso se aplica el valor de 0,193 m².



Figura 19. Geometría del modelo de cuerda de calibración.

2.3.2.2. MALLADO

Para el mallado del modelo se realiza una asignación de tamaño de elemento en toda la geometría. Se da un tamaño de 0,05 m para que coincida con el tamaño de elemento en las cuerdas longitudinales del modelo completo. Para el este cálculo se eligen elementos tipo “truss” lineales de dos nodos (Dassault Systèmes 2012).



Figura 20. Elemento longitudinal mallado (en azul discontinuo).

2.3.2.3. STEPS DE CÁLCULO

El primero es el “step” inicial que el programa emplea para inicializar los cálculos y no es alterable; el segundo aplica el pretesado y el tercero aplica la carga de peso propio y la del peso de la llama. Se emplea el peso de una llama como carga de calibración debido a que es una de las presentes en el modelo y permite tener un orden de magnitud adecuado con el que los resultados sean comparables fácilmente. Es importante indicar al programa que active la linealidad geométrica en el cálculo o no converge.

2.3.2.4. CONDICIONES DE CONTORNO

En cuanto a las condiciones de contorno, en el modelo se restringen los desplazamientos en todos los ejes en uno de los extremos y solo en vertical en el otro extremo, que es donde se aplicará la fuerza de pretesado.



Figura 21. Condiciones de contorno del modelo pretesado de calibración.

2.3.2.5. FUERZAS APLICADAS

Se aplican tres fuerzas: la fuerza horizontal de pretesado en el extremo derecho (Figura 22), la fuerza vertical de comprobación y el peso propio (aunque se representa como una flecha en la segunda mitad de la figura, es una carga distribuida, no puntual).



Figura 22. Fuerzas aplicadas sobre el modelo.

2.3.3. CALIBRACIÓN DEL MODELO

En este apartado se explica cómo se calibra el modelo para considerar que funciona de forma similar al puente real. El calibrado se hace en tres fases: calibrado de modelo de pretensado, comprobación del modelo de puente completo y comprobación del modelo de puente completo con respecto al pretensado.

El modelo pretensado, simula mejor la forma de actuar de las cuerdas, y por este motivo, una vez calibrado el pretensado para que se deforme como en la realidad, se emplea como patrón de contraste.

El calibrado del modelo pretensado se hace de la siguiente forma:

- Se ejecuta el cálculo del modelo solo con la aplicación de la carga de pretensado y el peso propio.
- Se comprueban desplazamientos en eje de abscisas y de ordenadas.
- Si el valor de la longitud de la cuerda más la deformación en abscisas, ya que es negativa en este sistema de referencia, es aproximadamente 28 m se cumple.
- Si el desplazamiento en el eje de ordenadas es cercano en valor absoluto a 3.86 m (posición natural del puente bajo su peso propio) se da por cumplido.
- En caso de que ambos valores cumplan se considera que es correcto el modelo.
- En el caso contrario se ajustará la longitud de la cuerda y la tensión de pretensado.
- Finalmente se ha de repetir el proceso de verificación hasta que cumpla.

Cabe destacar que se sabe que la longitud de la cuerda debe ser mayor que el vano total a salvar para que, tras la deformación por el peso propio, la distancia horizontal que cubre la cuerda sea la misma del vano.

Para la comprobación del modelo del puente, se procede de cómo se expone a continuación:

- Se ejecuta el cálculo del modelo, sometido solo a su peso propio, debido a que los apoyos bloquean el movimiento en los tres ejes, la longitud del vano se conservará y solo se ha de comprobar la distancia en vertical.
- Como en el caso pretensado se considera que se comporta como el puente real si la flecha producida en el punto central del puente (máxima tensión) es aproximadamente igual a 3,86 m.

Finalmente, la comprobación de comportamiento similar en ambos modelos se realiza de la siguiente forma:

- Se ejecutan ambos modelos aplicando las cargas anteriormente mencionadas y se añade la carga puntual, colocada en el centro de la geometría, correspondiente al peso de una llama. Se emplea este valor ya que es una carga representativa que ocasiona cambios contrastables en el modelo.
- Se verifica que el resultado de desplazamiento en el eje de ordenadas es similar en ambos modelos. Con esto, se puede decir que ambos reaccionan de forma similar a las cargas que se les aplican y que el modelo de cálculo es una buena representación del puente real.

2.3.4. PROCESO DE DESARROLLO DEL MODELO FINAL

Este apartado explica los modelos sucesivos que se desarrollan hasta llegar al modelo finalmente empleado incluyendo el modelo de calibración con pretensado.

El primer modelo de puente consistió en un modelo de barras unidas (Figura 23), en el que los elementos longitudinales trazaban la forma del puente ya deformado. Se eligió el tipo de elementos “truss” para todas las barras, se bloquearon los desplazamientos y giros en los apoyos y se dispuso la carga de peso propio a actuar. El resultado fue que el modelo no convergía.

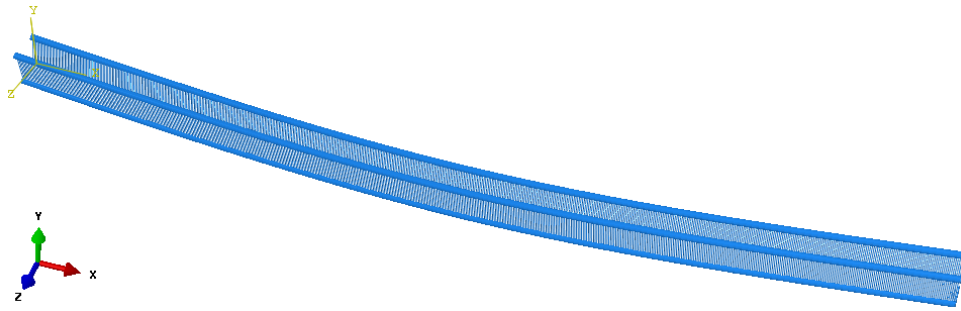


Figura 23. Primera versión del modelo del puente.

Visto que el problema de convergencia se debía al tipo de elemento, se cambiaron por elementos tipo “beam”. Esto solucionó el problema de convergencia, pero la deformada, se correspondía a la de una viga curva debido a la geometría de partida (Figura 24).

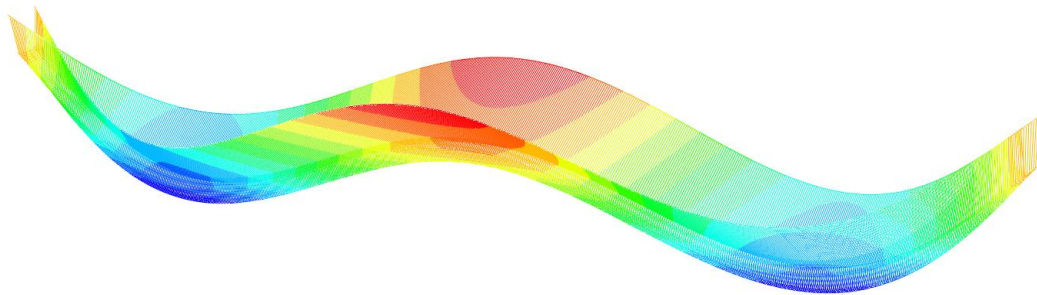


Figura 24. Deformada del segundo modelo del puente (No se incluyen valores, solo interesa la forma de la deformada).

Se replanteó la estrategia viendo cómo se construye el puente. En la versión real los constructores, pasan la cuerda de más de 30 m (Perú 2014) de un lado a otro del vano, la tensan y la atan a los apoyos de piedra. Al no emplear máquinas no pueden dejarla perfectamente tensada y recta y por su peso propio queda con forma de catenaria en una flecha de 3.86 m aproximadamente. La idea entonces para el siguiente modelo fue realizar el puente recto y que adquiriera la forma debida al peso propio. Una vez así ya se le aplican las cargas. Con esto se llega al modelo actual del puente completo (Figura 13).

Para poder comprobar que el puente funciona de forma similar a como haría uno formado por cuerdas se planteó el modelo de calibración pretensado (Figura 19). Además, permite obtener cuánta longitud extra de cuerda es necesaria para compensar la que se pierde con las deformaciones debidas al peso propio.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos y se hace una exposición de su significado y validez. Para presentar de forma organizada los mismos, se explican en el siguiente orden: resultados de parámetros de entrada, resultados de calibración del modelo y resultados de distintas hipótesis de cargas.

3.1. RESULTADOS EN LOS PARÁMETROS DE ENTRADA

En este apartado se presentan los resultados de todos los parámetros de entrada al modelo, fuerzas, densidades, módulos de elasticidad... Se indicará de que apartado del capítulo Materiales y métodos se encuentran. Además, con el objetivo de ofrecer la máxima claridad se presentan en orden de aparición.

3.1.1. PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS DEL MATERIAL

En el epígrafe (2.1.2.) “Caracterización resistente de los materiales del puente”, se calculan las características del material considerado en el puente [Ecuación 2]. Los resultados se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 4. Características mecánicas del material considerado en el puente.

Módulo de Young, E (GPa)	Resistencia a tracción, σ_f (MPa)	Densidad, ρ (kg/m ³)	Deformación en rotura, ϵ (%)
10,41	164,08	1298	1,55

Considerando el efecto sobre el módulo elástico del material que tiene el trenzado de las cuerdas [Ecuación 3] y [Ecuación 7], y considerando como parámetros de entrada las características mecánicas obtenidas (Tabla 3), los valores de C_1 para el material que constituye el puente son: 10,58 GPa para el módulo equivalente de elasticidad, E_e , y 1,02 para el valor de la constante C_f .

3.1.2. CARGAS APLICADAS

La expresión [Ecuación 8] de la IAP-11 (Fomento 2012) presenta cómo ha de obtenerse la carga total que actúa sobre la estructura y cómo debe mayorarse. En el programa se introducen los valores de las distintas cargas por separado. Los resultados a introducir se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 5. Resultados de cargas a considerar.

Carga	Variable que la representa	Valor característico	Coficiente de ponderación, γ	Valor ponderado	Unidades
Peso propio, G_{pp}	Aceleración de la gravedad, g	9,81	1,35	13,24	m/s ²
Carga muerta, G_{CM}	Fuerza distribuida	55	1,35	74,25	N/m ²
Sobrecarga de uso, Q_{uso}	Fuerza distribuida	2943	1,35	3973,05	N/m ²
Sobre carga de uso (Llama)	Fuerza puntual	2452,5	1,35	3310,88	N
Sobrecarga de uso (Caballo)	Fuerza puntual	4905	1,35	6621,75	N

Debido a que en el modelo han de introducirse las fuerzas en los nodos (excepto la de gravedad), los valores se multiplican por el área de influencia de cada nodo (0,2 m•0,05 m)

para las cargas distribuidas. Y se dividen entre los dos puntos en los que se aplican (en el modelo completo, en el cable de calibración no) las puntuales de llamas y caballos. Los resultados se muestran a continuación:

Tabla 6. Cargas introducidas en el software.

Carga	Valor (N)	Valor ponderado 1,35 (N)
Carga muerta, G_{CM}	0,55	0,74
Sobrecarga de uso, Q_{USO}	29,43	39,73
Sobre carga de uso (Llama)	1226,25	1655,44
Sobrecarga de uso (Caballo)	2452,5	3310,88

3.2. RESULTADOS DE CALIBRACIÓN DEL MODELO

Se presentan los resultados de la calibración del modelo, para realizarlo de forma ordenada se plantea primero los resultados como se describe en el epígrafe 2.3.3 (Calibración del modelo).

El modelo de calibración pretensado, sometido a la acción del peso propio muestra los siguientes resultados de desplazamientos para una fuerza de tesado de 64250 N.

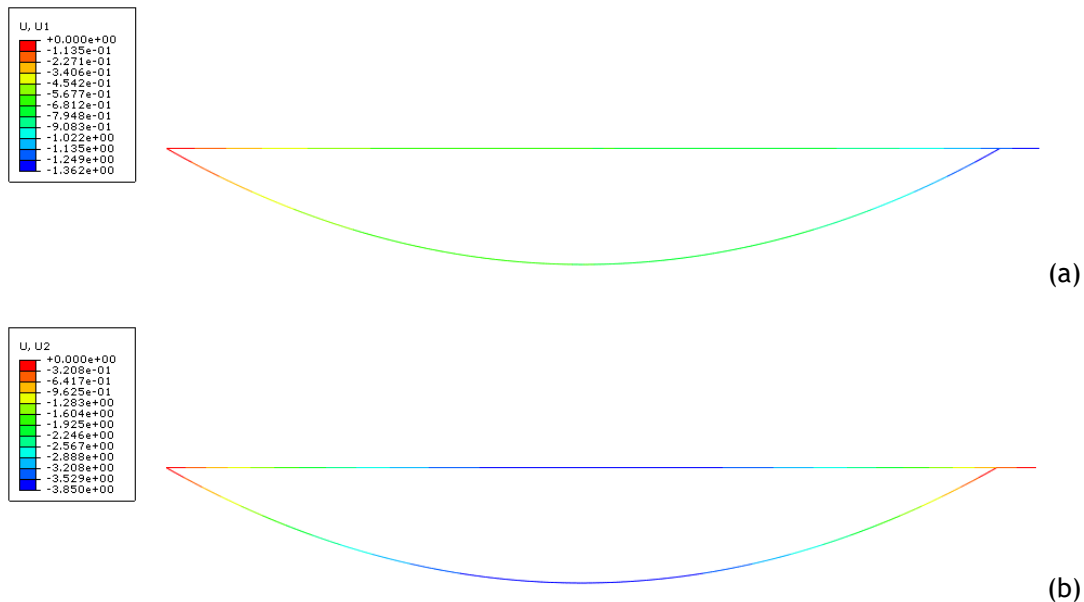


Figura 25. Desplazamientos de calibración modelo pretensado con peso propio (a desplazamientos en horizontal, b desplazamientos en vertical). Se ha superpuesto la estructura deformada con la sin deformar (Valores en m).

La longitud total del elemento es 29,4 m, la deformación en horizontal es 1,4 m, se da en el extremo, y la deformación máxima en vertical es 3,85 m. El vano resultante cubierto una vez deformado son los 28 m y el descenso es casi igual a 3,86 m que aproximadamente se da en la realidad. A partir de estos resultados el modelo de pretensado queda calibrado.

La evaluación del modelo del puente bajo la acción de su propio peso da los siguientes resultados.

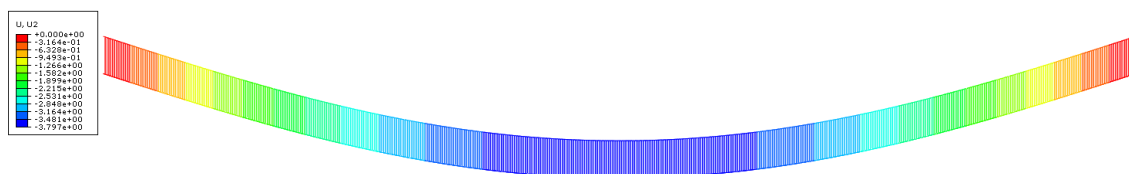


Figura 26. Desplazamientos en el eje de ordenadas del modelo del puente (Valores en m).

El valor del desplazamiento vertical, en el punto más bajo es 3,8 m. Este desplazamiento es muy cercano al 3,85 m del modelo de calibración y 3,86 m aproximados de la realidad. Se da por válida esta comprobación ya que las diferencias son menores del 2% en el caso del puente completo y del 0,3% en el modelo de cuerda pretesa.

Finalmente se realiza la verificación de similitud entre el modelo pretesado y el modelo del puente completo.

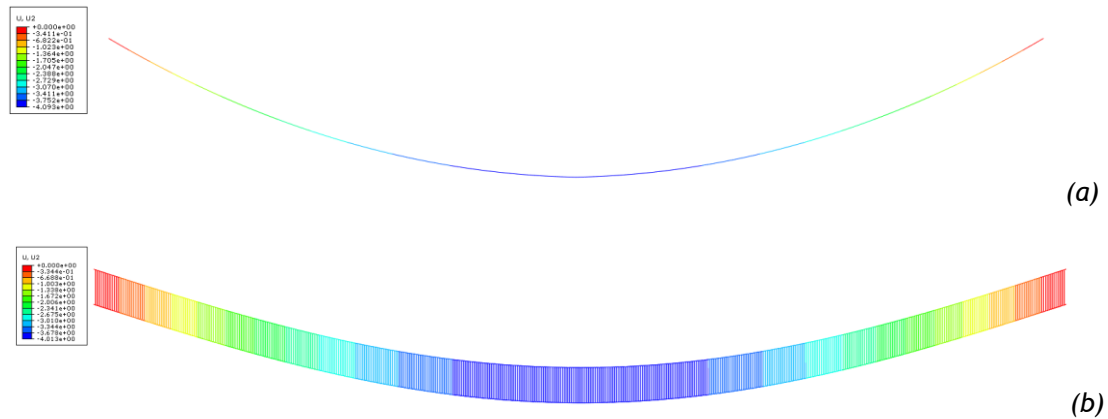


Figura 27. Desplazamientos bajo la acción del peso de una llama en ambos modelos (Valores en m). (a, modelo cuerda pretesa; b, modelo puente completo)

El desplazamiento para el modelo de la cuerda pretesa es de 4,09 m y en el caso del puente completo es de 4,02 m. Los valores presentan una diferencia del 2%, la cual se puede considerar pequeña.

En cuanto a la fuerza de tesado, en comparación con las reacciones producidas en el puente completo, la comparación se realiza bajo la hipótesis en la que solo actúa el peso propio del puente. La fuerza de tesado tiene un valor de 64250 N y las reacciones totales sumadas en el modelo del puente completo son 68573 N. Los valores son muy cercanos con una diferencia de solo un 6%. La diferencia de valor se puede explicar por la diferente inercia que presentan ambos modelos, ya que el puente completo se comporta como una celosía y el cordón inferior y el superior están separados 1 m entre sus ejes.

Como la diferencia de los resultados en ambos modelos en todas las comprobaciones es pequeña menor del 7% en todos los casos se puede considerar que el comportamiento entre ambos modelos es similar.

3.3. RESULTADOS DE HIPÓTESIS DE CARGAS

Este punto expone los resultados que se obtienen de someter al modelo del puente a las distintas situaciones de carga planteadas (Hipótesis de cargas). Como se expone en el epígrafe 1.5 (Objetivos e hipótesis), debido a que el puente es simétrico hacer los cálculos comenzando a cargar el puente desde un extremo o de otro no es relevante.

3.3.1. HIPÓTESIS 1: POSICIONES DIFERENTES DE TRENES DE CARGAS MAYORADAS SEGÚN IAP-11

Se muestran los resultados obtenidos en el puente bajo la hipótesis de cargas 1. En la siguiente figura se presentan gráficamente los resultados de tensión y desplazamiento vertical para el primer tren de cargas planteado, tanto para las llamas como para los caballos.

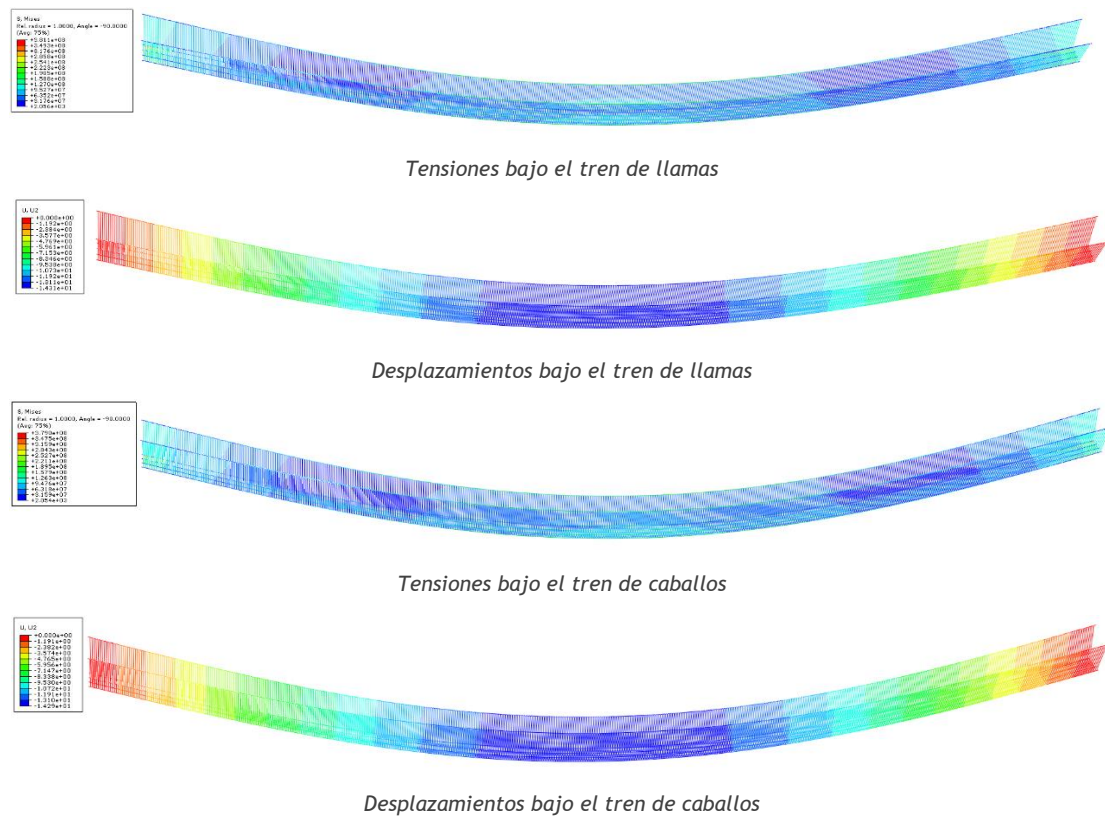


Figura 28. Respuesta del puente bajo la hipótesis de cargas 1 (carga inicial a 0,25 m. Valores en metros y Pascales)

En la “Tabla 7” se recogen los resultados de todos los trenes de cargas en cuanto a tensión (valor de Von Mises), desplazamiento y referencia del coeficiente de seguridad global. La tensión que se estudia no es la máxima del puente en conjunto, ya que esa se da en las cuerdas que unen los duros entre sí, pero, al no ser estructurales, no se consideran; sino la máxima que se produce en los duros y pasamanos, que son el elemento estructural del puente.

$$\gamma_T = \frac{\sigma_{m\acute{a}x}}{\sigma_{adm}}, \quad [\text{Ecuaci3n 11}]$$

donde:

- γ_T : valor del coeficiente de seguridad;
- $\sigma_{m\acute{a}x}$: tensi3n m\acute{a}xima en el puente (MPa);

- σ_{adm} : tensión admisible por el material, se obtiene dividiendo la resistencia a tracción del material entre 1,5.

Tabla 7. Resultados de tensión máxima de Von Mises, coeficiente de seguridad y flecha máxima en el modelo, para diferentes posiciones del tren de cargas.

Posición inicial del tren (m)	Tipo de tren	Tensión máxima producida, σ_{MAX} (MPa)	Límite máximo de tensión admisible, σ_{ADM} (MPa)	Coefficiente de seguridad (adim)	Flecha producida (m)
0,25	Llamas	184,81	109,39	0,59	10,45
0,50	Llamas	184,60	109,39	0,59	10,44
0,75	Llamas	184,87	109,39	0,59	10,47
1,00	Llamas	184,57	109,39	0,59	10,45
1,25	Llamas	184,67	109,39	0,59	10,44
1,50	Llamas	184,72	109,39	0,59	10,44
0,25	Caballos	184,08	109,39	0,59	10,43
0,50	Caballos	184,60	109,39	0,59	10,44
0,75	Caballos	184,91	109,39	0,59	10,48
1,00	Caballos	184,80	109,39	0,59	10,45
1,25	Caballos	185,24	109,39	0,59	10,46
1,50	Caballos	185,54	109,39	0,59	10,46

Como se ve en todos los casos la carga es excesiva y el puente no resiste según los estándares actuales planteados por la normativa moderna. Esto se debe a que es un puente diseñado hace más de 500 años, planteado en base a la experiencia de aquellos días y que se ha transmitido de generación en generación por la tradición.

3.3.2. HIPÓTESIS 2: DISTINTAS POSICIONES DE TRENES DE CARGAS SIN MAYORAR

En la figura se muestran los resultados obtenidos en bajo la segunda hipótesis, primero se muestra la imagen del resultado gráfico de tensiones y desplazamientos que se producen en el puente, para el primer caso, es decir, el tren de cargas inicia a 0,25 m de la entrada del puente.



Tensiones bajo el tren de llamas.

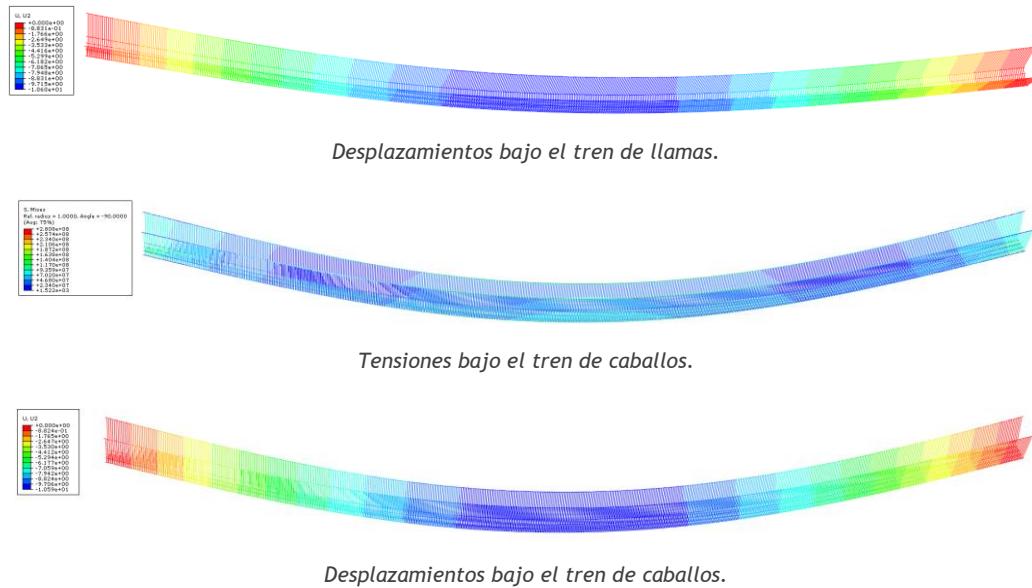


Figura 29. Respuesta del puente bajo la hipótesis de cargas 2 (carga inicial a 0,25 m. Valores en metros y Pascales)

En la tabla siguiente se muestran los resultados correspondientes a todos los casos de carga (tensiones máximas de Von Misses), el coeficiente de seguridad global a la rotura que presenta el puente y la flecha que se produce bajo cada situación.

Tabla 8. Resultados de tensión máxima de Von Misses, coeficiente de seguridad y flecha máxima en el modelo, para diferentes posiciones del tren de cargas.

Posición inicial del tren (m)	Tipo de tren	Tensión máxima producida (MPa)	Límite máximo de tensión admisible (MPa)	Coficiente de seguridad (adim)	Flecha producida (m)
0,25	Llamas	136,90	164,08	1,20	6,74
0,50	Llamas	136,75	164,08	1,20	6,74
0,75	Llamas	136,71	164,08	1,20	6,74
1,00	Llamas	136,72	164,08	1,20	6,74
1,25	Llamas	136,79	164,08	1,20	6,74
1,50	Llamas	136,84	164,08	1,20	6,73
0,25	Caballos	137,37	164,08	1,19	6,73
0,50	Caballos	136,40	164,08	1,20	6,73
0,75	Caballos	136,62	164,08	1,20	6,74
1,00	Caballos	136,89	164,08	1,20	6,74
1,25	Caballos	137,22	164,08	1,20	6,75
1,50	Caballos	137,44	164,08	1,19	6,75

En todos los casos de carga la tensión máxima es menor que la admisible, sin embargo, el margen de seguridad es muy ajustado (1,2 está muy cerca de 1), esto presenta poca fiabilidad ya que se desconoce el material en todo su contexto, pero para la época en que se diseñó supuso un gran aprovechamiento y entendimiento de este. La flecha es excesiva con lo que, en caso de cargar el puente con todas las cargas consideradas en la hipótesis, el paso de los animales podría resultar dificultado si estos se asustan o tropiezan.

3.3.3. HIPÓTESIS 3: CARGA MÁXIMA A SOPORTAR EN POR EL PUENTE DE FORMA QUE CUMPLA EL CRITERIO DE FLECHA MÁXIMA MENOR IGUAL A 60 CM

En este caso se presentan los resultados de cuantos animales pueden estar al mismo tiempo en el puente sin que este experimente una flecha de más de 0,60 m. Se retira la sobrecarga de uso y se sustituye por cargas puntuales separadas entre sí 1,25 m en el caso de las llamas y 2,5 m en el caso de los caballos. Como las cargas se introducen sin mayoración, y en la hipótesis 2 ya se demostró que el puente resiste, ahora no se presentan resultados de tensión, solo de flechas.

En la siguiente tabla se presentan los resultados de cada caso estudiado. La primera columna corresponde a los puntos de inicio y fin del grupo de cargas planteado; se cuenta desde el apoyo del puente. La segunda columna se refiere al animal que compone el grupo de cargas. La tercera columna es la flecha que se produce en este caso concreto. La última columna muestra el número de animales que componen el grupo de cargas empleado en el caso. Un animal añadido al grupo haría que el valor de la flecha supere 0,6 m.

Tabla 9. Resultados de flechas en el puente para cada tipo de animal, número y posición en el puente del grupo.

Posición de los animales (m)	Animal	Flecha producida (m)	Número de animales
0,25-6,50	Llamas	0,46	6
6,50-9,00	Llamas	0,55	3
9,00-10,25	Llamas	0,38	2
10,25-11,50	Llamas	0,41	2
12,50-14,00	Llamas	0,44	2
0,25-5,25	Caballos	0,38	3
7,75	Caballos	0,33	1
5,25	Caballos	0,24	1
6,50	Caballos	0,29	1
7,75	Caballos	0,33	1
10,25	Caballos	0,40	1
12,75	Caballos	0,44	1
14,00	Caballos	0,44	1

De la tabla se extrae que como mucho pueden cruzar todo el puente dos llamas o un caballo, sin que la flecha producida suponga un problema para la comodidad al cruzar. En el inicio del puente puede haber mayor cantidad de animales, pero a partir de los 9 m en el caso de las llamas y los 5,25 m en el caso de los caballos, ya solo pueden pasar 2 llamas o 1 caballo simultáneamente.

3.3.4. HIPÓTESIS 4: EFECTO EN LA FLECHA DEL PUENTE CUANDO SE CONSIDERA QUE SOLO CIRCULA UN ANIMAL

En este caso se presentan los resultados de la prueba del puente cuando los animales pasan por él. Únicamente un animal a la vez en el puente. Además, para facilitar la visualización se añade un gráfico (Figura 30), que en abscisas presenta la posición del animal en el puente (entre 0 m y 28 m) y en ordenadas la flecha máxima que presenta el puente.

Tabla 10. Resultados del valor de la flecha del puente para distintas posiciones del animal.

Posición inicial del animal (m)	Animal	Flecha producida (m)
0,25	Llama	0,01
1,50	Llama	0,04
2,75	Llama	0,07
4,00	Llama	0,10
5,25	Llama	0,12
6,50	Llama	0,15
7,75	Llama	0,17
9,00	Llama	0,19
10,25	Llama	0,20
11,50	Llama	0,21
12,75	Llama	0,22
14,00	Llama	0,22
0,25	Caballo	0,02
1,50	Caballo	0,08
2,75	Caballo	0,13
4,00	Caballo	0,19
5,25	Caballo	0,24
6,50	Caballo	0,29
7,75	Caballo	0,33
9,00	Caballo	0,37
10,25	Caballo	0,40
11,50	Caballo	0,42
12,75	Caballo	0,44
14,00	Caballo	0,44

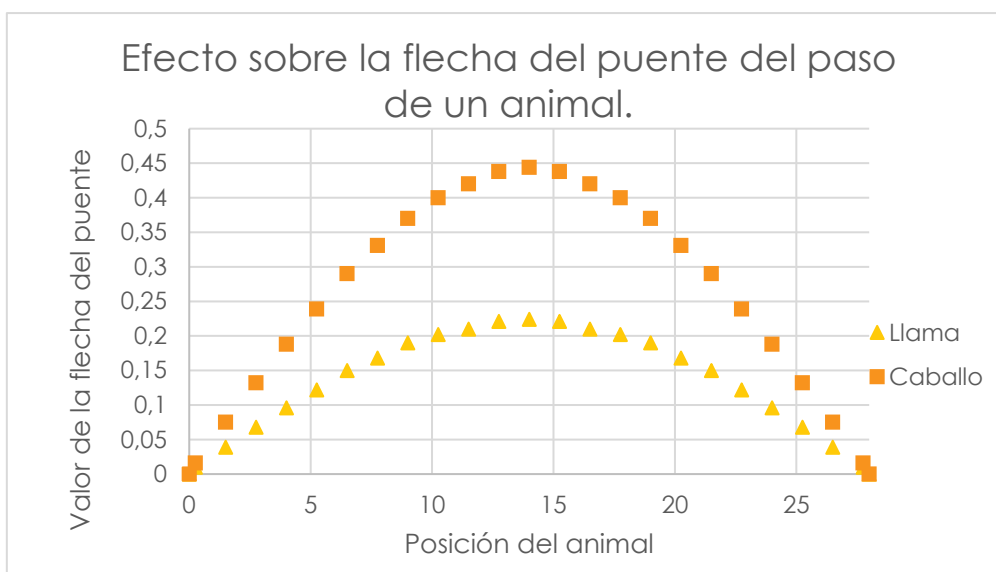


Figura 30. Efecto del cambio de posición del animal mientras cruza el puente.

Como se puede ver el mayor valor de la flecha se produce cuando el animal se sitúa en la posición central, punto de máxima tensión en el puente, y se reduce según se acerca al borde del puente. El mayor valor de flecha corresponde al caballo, con un valor de 0,44 m cuando se sitúa en el centro del puente. En el caso de la llama situada en ese punto, la flecha toma un valor de 0,22 m. Ambos valores se encuentran dentro del margen definido de paso cómodo para el usuario de 0,6 m.

4. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS

En este trabajo de fin de máster se ha realizado el estudio estructural de un puente de hamaca histórico, “El puente Q’eswachaka”. Para ello, se ha caracterizado el material del que está construido el puente, siguiendo distintos estudios. Se ha empleado el software de elementos finitos ABAQUS CAE. Además, se han propuesto dos trenes de cargas adaptados a la época en la que se diseñó el puente, empleando llamas, animal de carga empleado por los incas, y caballos, animal de transporte empleado por los españoles del siglo XVI, para formar los trenes.

A continuación, se exponen las conclusiones que se extraen de los resultados obtenidos del modelo:

- El modelo estructural propuesto para el puente se asemeja a su homólogo real, en cuanto a comportamiento frente a los esfuerzos y deformaciones obtenidos, por lo que se considera correcto como modelo de cálculo.
- Se ha conseguido que el modelo estructural del puente actúe a tracción en todos los elementos y en todos los casos estudiados, con lo que cumple con las condiciones de funcionamiento de una estructura de cuerdas, lo que es de esperar por la tipología de hamaca.
- El coeficiente de seguridad global obtenido frente a las situaciones de carga planteadas es de 1,2 tanto para las llamas como para los caballos.
- Empleando coeficientes de mayoración para ELU (Estado Límite Último) de normativa actual el puente no cumple.
- El puente tiene una flecha máxima de 0,44 m cuando pasa por él un caballo, animal más pesado considerado, por lo que cumple con los requisitos que se imponen de flecha menor de 0,6 m para el confort del usuario.
- Simultáneamente solo pueden pasar cómodamente 2 llamas o 1 caballo, en caso de incrementar el número la flecha resultante será mayor de 0,6 m y los usuarios podrían no querer cruzar.
- La suposición de los españoles del siglo XVI era cierta parcialmente, acertaron en el hecho de pasar de uno en uno por los puentes de cuerda, pero no era necesario que lo hicieran a gran velocidad.
- Teniendo en cuenta las limitaciones disponibles de datos e información sobre el puente, solo hay 2 dimensiones oficiales del puente, se ha conseguido definir unos planos completos del puente.

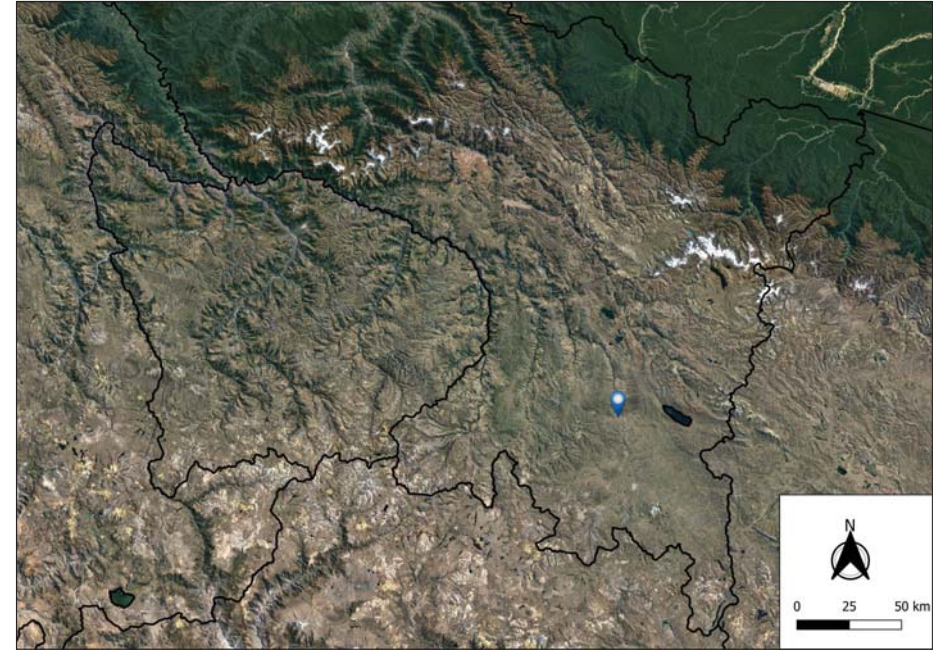
A partir de lo obtenido en este trabajo, se abren distintas oportunidades de investigación a futuro:

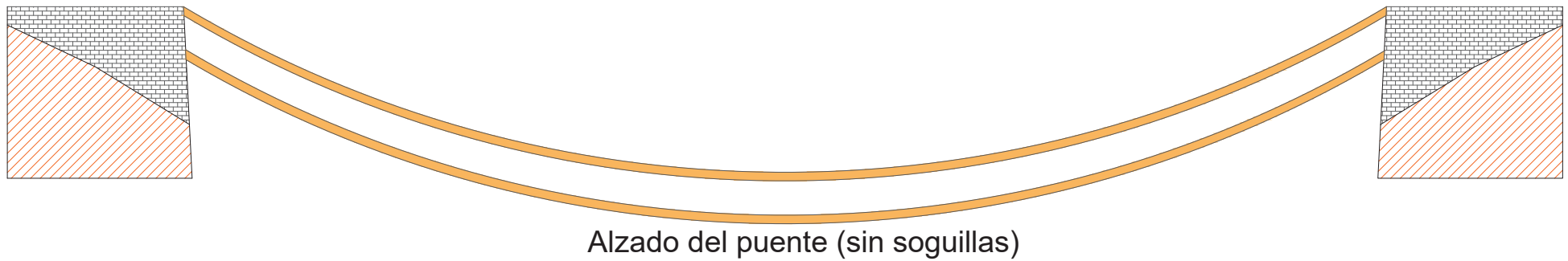
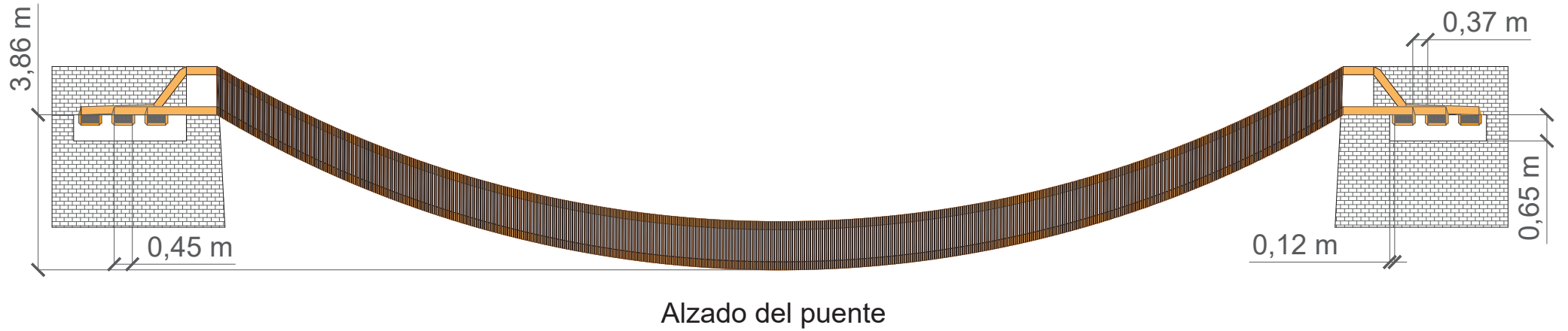
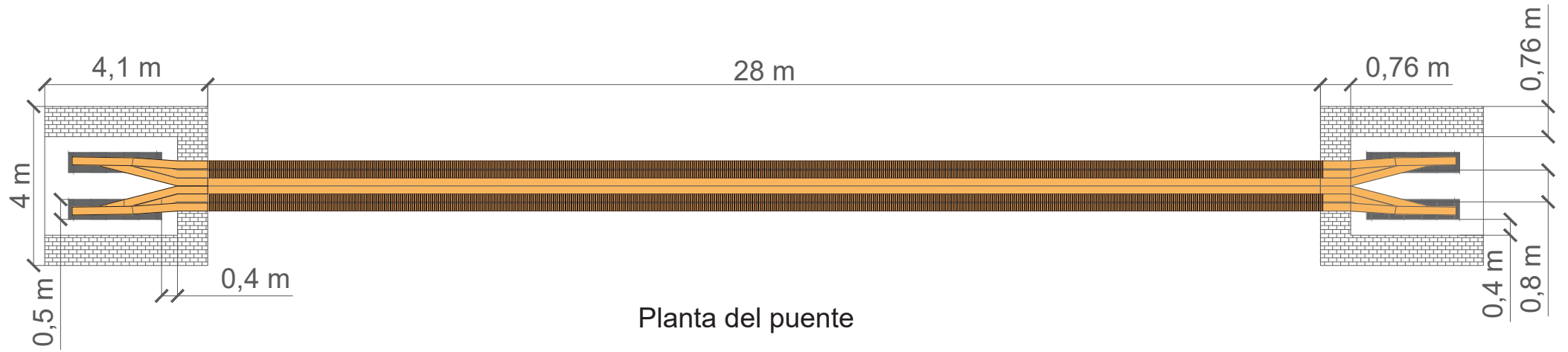
- Mejorar los datos geométricos disponibles del puente mediante la toma de datos in situ con equipos topográficos o drones equipados con escáneres laser, que permitan obtener directamente un modelo 3D de la estructura.
- La caracterización física y resistente del material presenta deficiencias, debido a la escasa cantidad de estudios que caractericen la fibra de ichu en exclusiva. Sería conveniente, tomar muestras de las plantas de ichu y tras realizar el mismo tratamiento

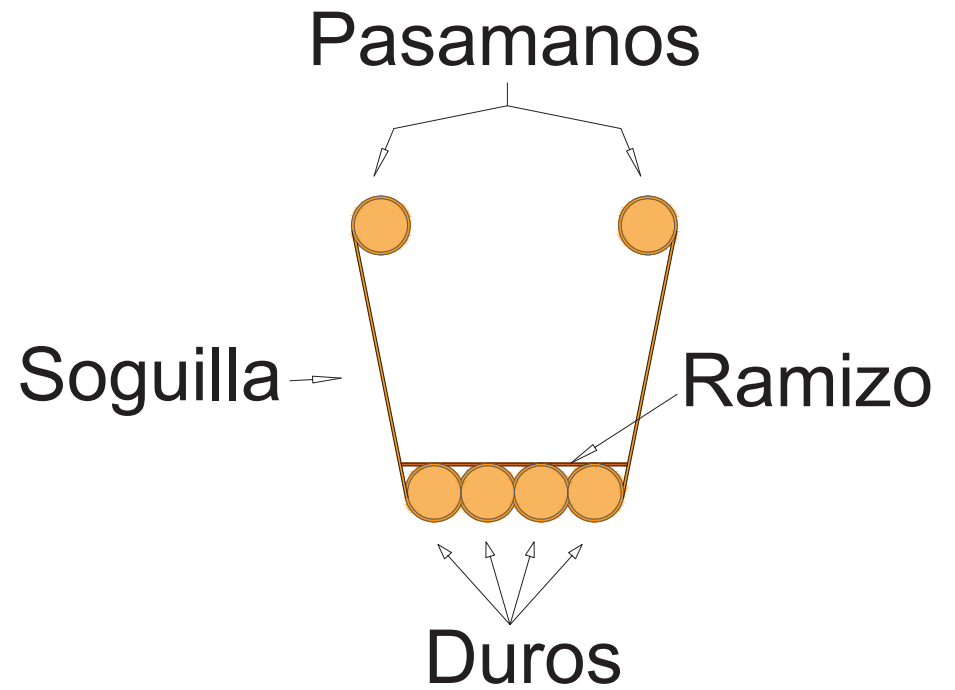
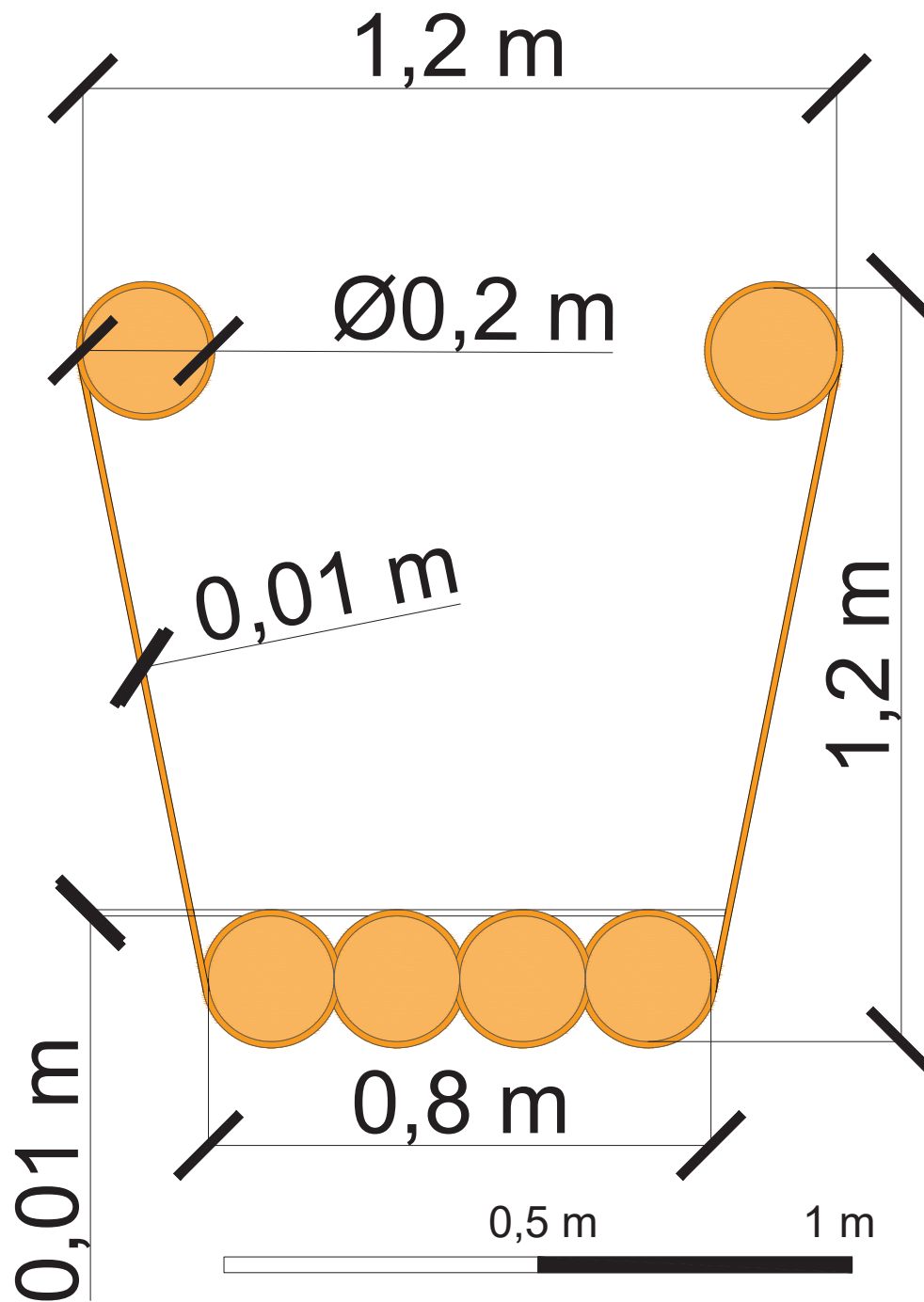
que se emplea para el puente real, ensayarlo de forma que quede completamente definido.

- Teniendo en cuenta que el puente en su origen se renovaba todos los años debido a la falta de mantenimiento que le daban los incas, es interesante plantear un estudio que siga el estado del puente a lo largo del año, desde su colocación hasta su renovación.
- Debido a que es una estructura muy sensible a cambios en la posición de las cargas, es interesante conocer el efecto que tiene la velocidad de paso del usuario sobre los movimientos del puente.
- Finalmente, se puede realizar un análisis similar sobre otros puentes de hamaca como el caso del Puente de Santa de Truxillo (González Tascón 1992), en el caso de otro puente histórico del siglo XIX, o el puente La Hamaca en Puerto Rico (Travel 2016), un caso del siglo XX.

5. PLANOS







REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Allen Tipler, Paul, and Mosca Gene. 2010. *Física Para La Ciencia y La Tecnología I (6 ED) Mecánica, Oscilaciones y Ondas, Termodinámica*. 6th ed. Editorial Reverté.
- Bayraktar, Alemdar et al. 2009. "Finite Element Model Updating of Senyuva Historical Arch Bridge Using Ambient Vibration Tests." *Baltic Journal of Road and Bridge Engineering* 4(4): 177-85.
- Bioenciclopedia. "Llama." <https://www.bioenciclopedia.com/llama/> (June 5, 2020).
- Bühler, Dirk. 2013. "El Puente Q' Eswachaca Sobre El Río Apurímac En Perú." : 9-12.
- Busqué, Jordi;BBC News. 2019. "A Ponte de Capim Construída Pelos Incas Que Ainda é Refeita Todos Os Anos." <https://g1.globo.com/turismo-e-viagem/noticia/2019/06/18/a-ponte-de-capim-construida-pelos-incas-que-ainda-e-refeita-todos-os-anos.ghtml> (July 12, 2020).
- Candiotti, Sergio, José Luis Mantari, Carmen Elena Flores, and Samuel Charca. 2020. "Assessment of the Mechanical Properties of Peruvian Stipa Obtusa Fibers for Their Use as Reinforcement in Composite Materials." *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 135(January): 105950. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2020.105950>.
- Celigüeta, Juan. 2011. "Método de Los Elementos Finitos Para Análisis Estructural." San Sebast. <http://dadun.unav.edu/handle/10171/19069>.
- Clavigero, Francisco Saverio. 1826. "Historia Antigua de México, Traducida Dek Italiano Por José Joaquinn de Mora." In *Vol. I*, Londres: R. Ackerman Strand, 352.
- Córdova, Cristian Jhonatan et al. 2019. "Análisis Multi-Escala De Un Material Compuesto a Base De Fibras Naturales (Stipa Obtusa) Para El Diseño De Una Prótesis Transtibial Multi-Scale Analysis of a Composite Material Based on Natural Fibers (Stipa Obtusa) for the Design of a Transtibial Prothe." *Universidad de Ingeniería y Tecnología - UTEC*.
- Costello, George A. 1997. *Mechanical Engineering Series Theory of Wire Rope*. 2nd editio. ed. Frederick F. Ling. Urbana, Illinois, USA: Springer-Science+Business Media, LLC.
- Cusco, Turismo. 2020. "El Puente Colgante de Q'eswachaka." *Excursiones turísticas en Cusco*. https://www.cuscovacations.com/clasico_turismocusco_queswachaca.html (June 5, 2020).
- Del Cuvillo Martínez-Riduejo, Alvaro;Del Cuvillo Jiménez, Ramón. 2002. "Trenes de Carga En Puentes de Carretera." : 39-51.
- Dassault Systèmes. 2012. "ABAQUS 6.12 Online Documentation." <http://130.149.89.49:2080/v6.12/index.html>.
- Díaz, Jorge Galindo. 2009. "The Construction of Suspension Bridges in Colombia during the Nineteenth Century : Between Tradition and Innovation." *Construction* (May): 635-40.
- Felipe Guamán, Poma de Ayala. 1615. *Nueva Corónica y Buen Gobierno*.
- Fomento, D E. 2012. *Orden FOM/2842/2011, de 29 de SeptieMbre, POr La Que Se Aprueba La Instrucción Sobre Las AcciOnes a COnsiderar En El Proyecto de Puentes de Carretera (IAP-11)*. 2ª. ed. Ministerio de Fomento Centro de Publicaciones, Secretaría técnica. Madrid. https://www.mitma.gob.es/recursos_mfom/0820303.pdf.
- Gimsing, Niels J., and Christos T. Georgakis. 2011. *Cable Supported Bridges Cable Supported Bridges*.
- González Tascón, Ignacio. 1992. *Ingeniería Española En Ultramar, Siglos XVI-XIX*. Madrid: CEHOPU.
- Haciefendioğlu, Kemal, Swagata Banerjee, Kurtuluş Soyuluk, and Olgun Köksal. 2015. "Multi-Point Response Spectrum Analysis of a Historical Bridge to Blast Ground Motion." *Structural Engineering and Mechanics* 53(5): 897-919.

- HOP, Peru. 2020. “Llamas y Alpacas.” <https://www.peruhop.com/es/llamas-y-alpacas-diferencias/>.
- Instituto nacional de cultura, Republica del Perú. 2009. “Declaratoria de Patrimonio Cultural de La Nacion Al Ritual de Reconstrucion Del Puente Q’ eswachaka Del Distrito de Quehue, Provincia de Canas Region Cusco.” : 4.
- Iza Tutillo, Gabriela. 2017. “Caracterización Mecánica Del Material Compuesto de Matriz Epoxi Reforzada Con Fibra Vegetal (Algodon) y Fibra Natural de Stipa Ichu (Pasto de Paramo) Con Secado Natural y Precocido Para Determinar Propiedades Mecanicas En La Fabricación de Elementos Livia.” *Repo.Uta.Edu.Ec* (1): 130. <http://repo.uta.edu.ec/bitstream/handle/123456789/5301/Mg.DCEv.Ed.1859.pdf?sequence=3>.
- Karoumi R. 1999. “Some Modeling Aspects in the Nonlinear Finite Element Analysis of Cable Supported Bridges.” *Computers and Structures* 71(4): 16. <http://www.ingentaconnect.com/content/els/00457949/1999/00000071/00000004/art00244>.
- Lubowiecka, Izabela, Julia Armesto, Pedro Arias, and Henrique Lorenzo. 2009. “Historic Bridge Modelling Using Laser Scanning, Ground Penetrating Radar and Finite Element Methods in the Context of Structural Dynamics.” *Engineering Structures* 31(11): 2667-76.
- Mori, S. et al. 2018. “Assessment of Ichu Fibers Extraction and Their Use as Reinforcement in Composite Materials.” *Journal of Natural Fibers* 17(5): 700-715. <https://doi.org/10.1080/15440478.2018.1527271>.
- Van Nimmen, K., G. Lombaert, G. De Roeck, and P. Van den Broeck. 2014. “Vibration Serviceability of Footbridges: Evaluation of the Current Codes of Practice.” *Engineering Structures* 59(0): 448-61.
- Olasperu.com. 2016. “PROPUESTA PERUANA: Fibra de Ichu, La Nueva Fibra de Vidrio Para La Fabricación de Tablas.” <https://www.olasperu.com/noticias/surf/25112016-2/propuesta-peruana-fibra-de-ichu-la-nueva-fibra-de-vidrio-para-la-fabricacion-de-tablas>.
- Perú, Ministerio de Cultura. 2014. *El Puente Q’ eswachaka*. Republica del Perú: Qhapaq Ñan Perú. https://www.youtube.com/watch?v=qptglcQeblG&feature=emb_title.
- Peters, Tom Frank. 1987. *Tranitions in Engineering, Guillaune Henri Dufour and Early 19th Century Cable Suspension Bridges*. Ithaca, New York.
- Regal, Alberto. 1972. “Los Puentes Del Inca En El Antiguo Perú.” In *Los Puentes Del Inca En El Antiguo Perú*, Lima.
- Reynel, Carlos. 2012. “Guía de Identificación de Las Plantas Comunes Del Derecho de Vía Del Ducto de Perú LNG.” *Comunica 2 S.A.C.*: 46. https://perulng.com/wp-content/uploads/2016/06/Guia_identificacion_plantas.pdf.
- Riveiro, B. et al. 2008. “Multidisciplinar Aproach to Historical Arch Bridges Documentation.” *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives* 37(January).
- Travel, Worlwide. 2016. “Puente La Hamaca, Puerto Rico.” *Puente La Hamaca, Puerto Rico*.
- Vega Acosta, Larry Alexis, and Jean Alenn Villanueva, Villanueva Sanchez. 2019. “Influencia de La Concentración de Hidróxido de Sodio Sobre La Resistencia a La Tracción de Fibras Individuales de Stipa Ichu.” Universidad Nacional de Trujillo.
- Vega, Inca Garcilaso de la. 1608. “De La Goemetría, Geografía Aritmética y Música Que Alcanzaron.” In *Comentarios Reales*, Lisboa: Pedro Crasbeeck.
- Vignote Peña, Santiago, and Isaac Martínez Rojas. 2006. *Tecnología de La Madera*. 3ª edición. Madrid: Ediciones Mundi-Prensa.