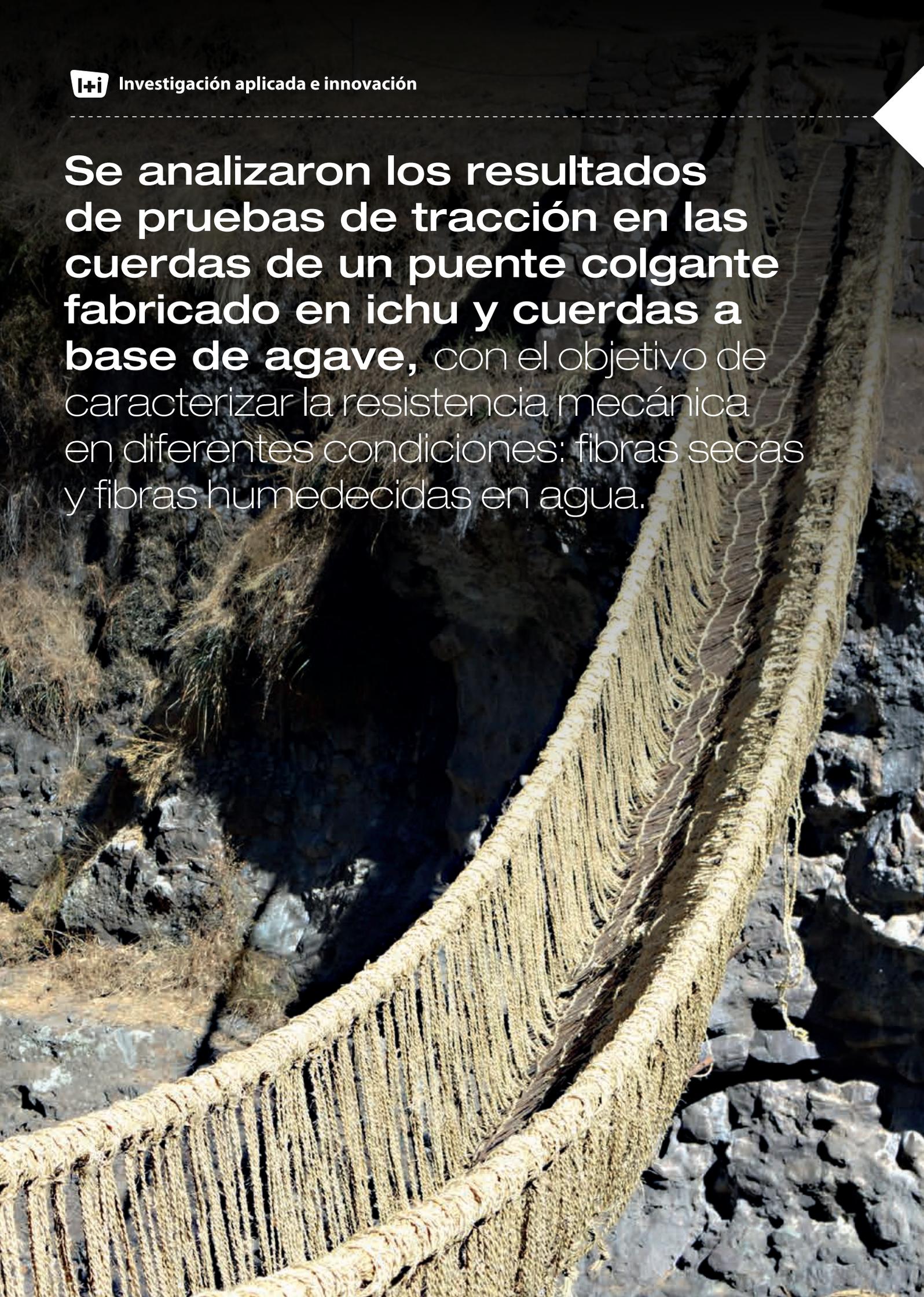


**Se analizaron los resultados de pruebas de tracción en las cuerdas de un puente colgante fabricado en ichu y cuerdas a base de agave,** con el objetivo de caracterizar la resistencia mecánica en diferentes condiciones: fibras secas y fibras humedecidas en agua.



## Caracterización de cuerdas de ichu y de agave usados en estructuras colgantes

### *Characterization of Ichu and Agave Ropes used in Hanging Structures*

#### RESUMEN

Se aborda un estudio sobre la resistencia mecánica de materiales usados en la fabricación de puentes colgantes empleados en la región andina. Uno de ellos es el pasto del Altiplano, llamado *ichu* (*Stipa ichu*). El otro es una fibra manufacturada de uso comercial. Se realizaron ensayos de tracción en ambas para calcular la fuerza de rotura y la resistencia mecánica. Se muestran los resultados en diferentes condiciones: fibras secas y fibras encharcadas con agua, con el propósito de correlacionar la resistencia mecánica con la humedad que puede contener los materiales en condiciones de trabajo.

#### ABSTRACT

*It is addressed a study on the mechanical strength of materials used in the manufacture of hanging bridges applied in the Andean regions. One of them is the grass of the Andean regions called Ichu (Stipa Ichu). The other is a manufactured fiber for commercial use. There were performed traction tests on both fibers to calculate the breaking strength and mechanical strength. The results are shown in different conditions: dry fibers and fibers soaked with water, in order to correlate the mechanical resistance with the moisture that is able to contain the materials in working conditions.*

#### INTRODUCCIÓN

Los relatos históricos escritos por los primeros europeos en los Andes mencionaron los puentes colgantes tejidos en fibras. Estas estructuras, aparentemente delicadas, eran una novedad para ellos, y al cruzar las primeras veces, su comportamiento oscilante les causaba considerable temor. Los puentes colgantes impresionaron casi a todo el mundo, tanto a los europeos como a los nativos andinos. Diversos materiales fueron usados en su elaboración como el sauce (*Salix humboldtiana*), chilca (*Baccharis spp*), chuchau (*Fourcoroya andina*), entre otros materiales naturales [5]. La figura 1 muestra un puente colgante fabricado en fibra de ichu en la ciudad del Cusco en Perú y que, actualmente, se encuentra en las instalaciones de la Tecsup Sede Centro.



Figura 1. Puente colgante fabricado en ichu.  
Fuente: Elaboración propia.



#### Palabras clave

Resistencia mecánica, cuerdas de fibra, ichu, agave. Tracción. Altiplano, Estructuras colgantes.

#### Key words

Mechanical strength, fiber string, ichu, agave, fiber ropes, hanging structures, traction, Andean region

En este trabajo, serán analizados los resultados de pruebas de tracción en las cuerdas de un puente colgante fabricado en ichu y cuerdas a base de agave, ambos procedentes de los andes peruanos.

El objetivo es caracterizar la resistencia mecánica de las cuerdas en diferentes condiciones: fibras secas y fibras humedecidas en agua. Los resultados correlacionan resistencia a la tracción para seleccionar otras alternativas para la construcción de futuras estructuras colgantes, como los puentes en cuestión.

## FUNDAMENTOS

El uso de fibras naturales locales y baratas es una gran alternativa, especialmente, para actualizar o renovar construcciones rudimentarias. En las zonas situadas por encima de los 3 000 metros sobre el nivel del mar, las fibras naturales son vastas y baratas (~0.15 USD/kg), sobre todo, las fibras denominadas ichu [3].

La creciente sensibilidad hacia la contaminación ambiental y las recientes leyes sobre la protección del medioambiente han generado una atención creciente a los llamados biocompuestos, es decir, a materiales compuestos ecológicos o renovables, obtenidos a partir de biopolímeros reforzados con fibras naturales. Pese la contribución de diversos trabajos publicados en la literatura, centrada en biocompuestos reforzados por fibras de agave, todavía se encuentran en fase de estudio para la implementación de biocompuestos de alto rendimiento para aplicaciones semiestructurales y estructurales [6].

Por otro lado, estudios experimentales de biocompuestos de alto rendimiento a base de resina epoxi reforzados con fibras de agave, así como la implementación sucesiva de modelos micromecánicos confiables que se pueden utilizar en la fase de diseño [7]. Se explica que el uso de estas fibras permite al usuario obtener biocompuestos renovables de alto rendimiento caracterizados por una alta rigidez y resistencia.

## METODOLOGÍA

En materia de resistencia mecánica, durante un ensayo de tracción, se debe recordar que la carga aplicada sobre el área de una sección transversal de un cuerpo de prueba se refleja en la tensión a la cual tal cuerpo queda expuesto, y ese parámetro deberá ser constante para el mismo material y para cualquier área de la sección transversal utilizada. Sin embargo, debido a las mayores dificultades operacionales en determinarse valores reales (instantáneos), se convino usar el área inicial para la obtención de la tensión convencional en cualquier punto del ensayo [4]. La figura 2 muestra la relación de carga aplicada en función del área transversal. La misma es directamente proporcional.

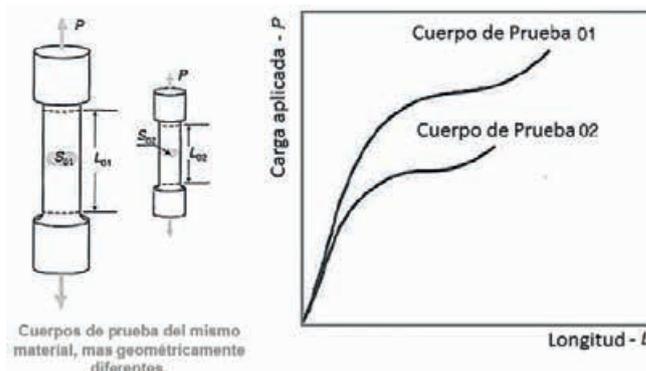


Figura 2. Probetas del mismo material, más geoméricamente diferentes. Las curvas de carga vs. longitud se muestran diferentes.

Fuente: Adaptado de [4].

Sin embargo, el algoritmo para calcular la resistencia convencional es dado por lo siguiente:

$$\sigma_c = \frac{F}{A} \quad (1)$$

Donde:

- $\sigma_c$  : Es la resistencia a la tracción convencional (MPa).
- $F$  : Es la carga aplicada (N).
- $A$  : Es la sección transversal inicial de la probeta.

Ensayos mecánicos en cuerdas fueron reportados bajo el uso de la norma ASTM D2256. Resultados de trabajos para resistencia mecánica en cuerdas lisas de material sintético con diámetro de 5 mm [1] son mostrados en la figura 3. Se observa que la gráfica describe el mecanismo de rotura de la cuerda: aproximadamente a 3,7 kN ocurre la rotura del primer torón. Alrededor de 1,2 kN ocurre la rotura del segundo torón y así sucesivamente si hubiese más torones en la cuerda.

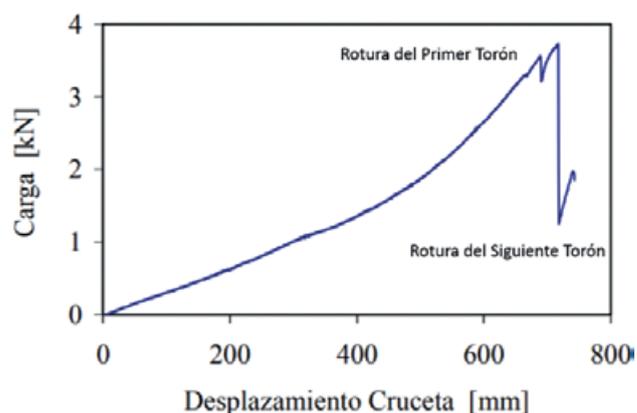


Figura 3. Ensayo de tracción de cuerda sintética.

Fuente: [1].

Para los análisis, fueron utilizados materiales procedentes del puente colgante mostrado en la figura 1 y de la cuerda de agave. La figura 4 muestra las probetas para los ensayos mecánicos de tracción. La muestra de la izquierda corresponde al agave (5 torones) y la muestra de la derecha corresponde a la fibra de ichu (2 torones).



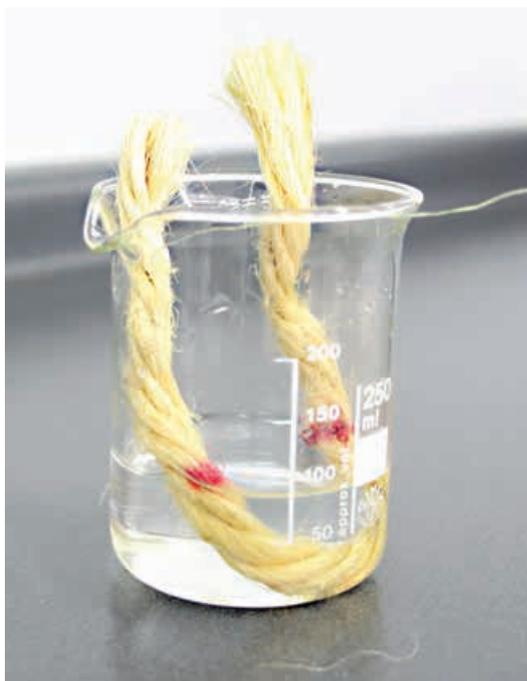
**Figura 4.** Muestras para ensayo de tracción.  
Fuente: Elaboración propia.

Las muestras fueron cortadas en longitudes iguales y se tomó un diámetro promedio en cada torón para calcular la resistencia mecánica convencional. La tabla 1 presenta las dimensiones de las probetas para ser sometidas al ensayo de tracción.

Material	Área transversal promedio (mm <sup>2</sup> )	Longitud entre mordazas (mm)
Ichu seco y húmedo	25,12	50
Agave seco y húmedo	29,70	50

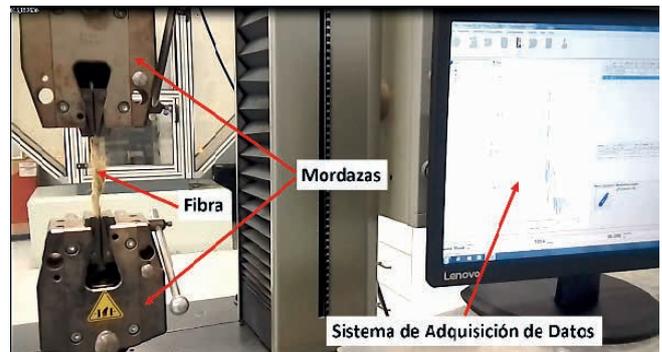
**Tabla 1.** Dimensiones iniciales de las probetas antes del ensayo de tracción.  
Fuente: Elaboración propia.

Se realizaron los ensayos en dos tipos de condiciones: cuerdas secas y húmedas. Estas últimas fueron sumergidas, parcialmente, en agua potable durante 10 minutos [2], con el propósito de simular una situación de humedad extrema. En condiciones normales, un puente colgante en los Andes peruanos está sometido a efectos del clima como la lluvia. Se desea verificar el comportamiento de la cuerda en condiciones semejantes. La figura 5 muestra la preparación de la fibra húmeda antes del ensayo.

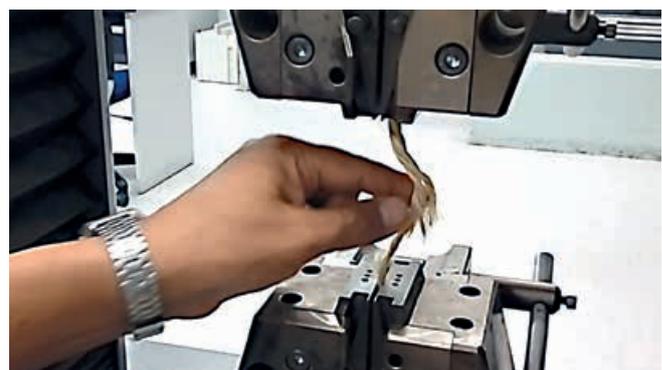


**Figura 6.** Muestras para ensayo húmedo.  
Fuente: Elaboración propia.

Los ensayos fueron realizados en las instalaciones del Laboratorio de Materiales de Tecsup Sede Centro. Fue utilizada una máquina electromecánica Zwick Roell con capacidad máxima de 50 kN de carga. La figura 6 muestra una probeta *in situ*, en (a) la configuración ensayo, en (b) la fibra luego de la rotura. Los datos fueron adquiridos en el software Text Expert II que acompaña al equipo en mención. La velocidad de ensayo utilizada fue de 150 mm/min. (observando la norma ASTM D2256-02) [7].



(a)



(b)

**Figura 5.** Ensayo de tracción en fibra.  
Fuente: Elaboración propia.

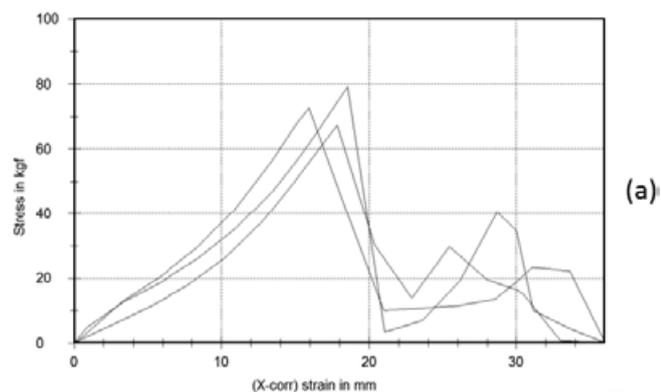
## RESULTADOS

### A. Ensayos de tracción en ichu

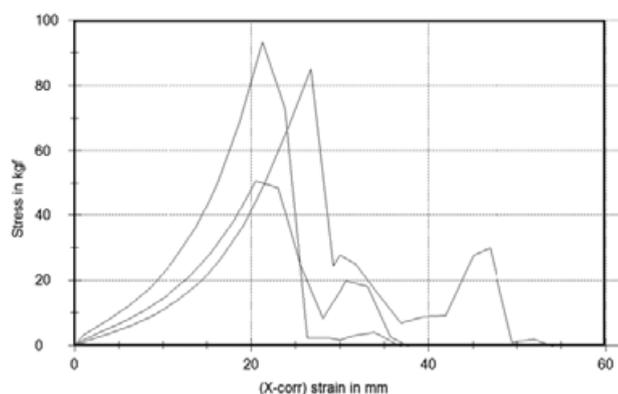
En la figura 6, se muestran las curvas de carga vs. longitud de fibras de ichu. En la figura 6(a), se presentan los resultados de las cuerdas en seco. En la figura 6(b), se muestran los resultados de las fibras húmedas. Se observa que las fibras húmedas presentan un incremento de 22.38 % de la resistencia mecánica en tales condiciones de ensayo.

### B. Ensayos de tracción en agave

En la figura 7, se muestran las curvas de carga vs. longitud de cuerdas de agave. En la figura 7(a), se presentan los resultados de las cuerdas es seco. En la figura 7(b), se muestran los resultados de las cuerdas húmedas. Se observa que las últimas presentan una reducción de 25.89 % de la resistencia mecánica en tales condiciones de ensayo.

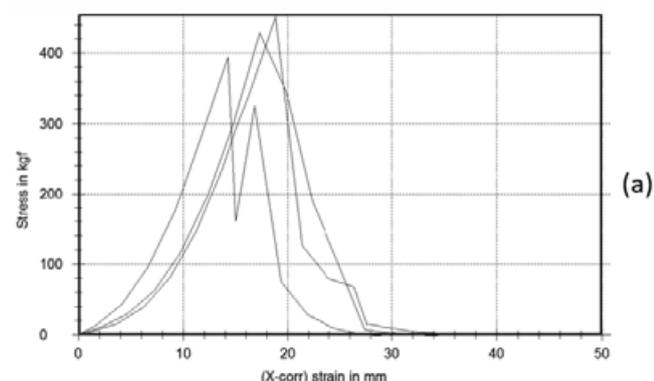


(a)

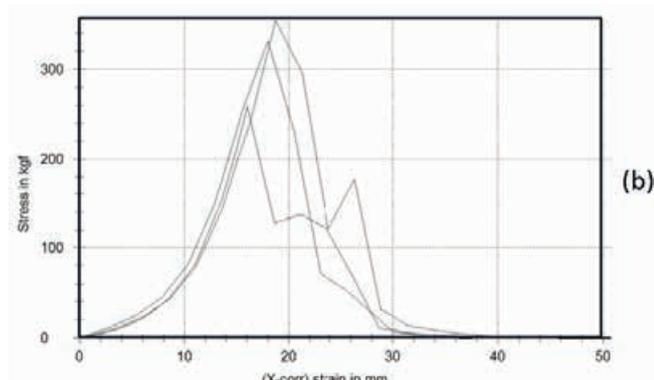


(b)

Figura 6. Resultados del ensayo de tracción en fibras de ichu.  
Fuente: Elaboración propia.



(a)



(b)

Figura 7. Resultados del ensayo de tracción en fibras de agave.  
Fuente: Elaboración propia.

### C. Resistencia mecánica

La tabla 2 muestra los valores de resistencia mecánica calculados (Resultados por cada muestra y el promedio). Como las fibras de ichu y de agave poseen diferentes áreas, se estipula presentar los resultados como máxima resistencia a la tracción.

Material	Seco (MPa)	Promedio (MPa)	Húmedo (MPa)	Promedio (MPa)
Ichu	30,93	28,48	33,23	34,01
	28,29		36,48	
	26,23		32,33	
Agave	148,86	140,20	85,30	103,91
	130,17		116,80	
	141,64		109,65	

Tabla 2. Resistencia mecánica de las fibras ensayadas.  
Fuente: Elaboración propia.

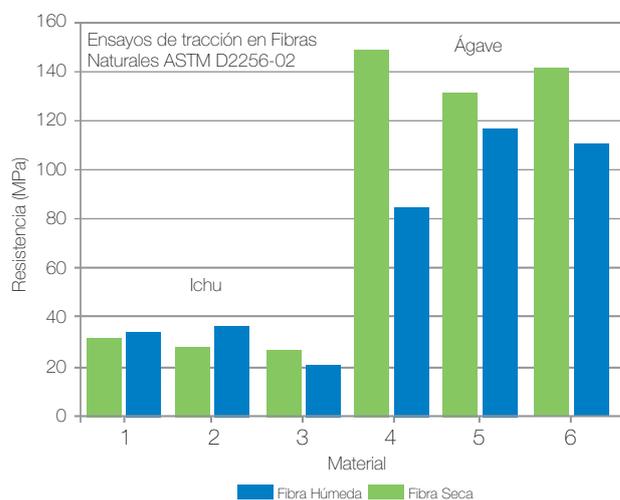


Figura 8. Correlación entre el efecto de la humedad y la resistencia mecánica.  
Fuente: Elaboración propia.

### D. Humedad en las muestras

La masa de agua que fue absorbida tanto por las cuerdas de agave como ichu se observa en la tabla 3. Se midió la masa de las muestras antes y después del contacto con el agua durante 10 minutos conforme fue mostrado en la figura 5.

Material	Seco (gramos)	Húmedo (gramos)	Aumento (%)	Promedio (%)
Ichu (2 torones)	4,50	9,10	49,45	48,61
	5,12	10,23	50,04	
	4,69	10,11	46,38	
Agave (5 torones)	5,97	13,08	45,64	45,12
	6,60	14,94	44,17	
	6,32	13,87	45,56	

Tabla 3. Masa en gramos de las fibras ensayadas.  
Fuente: Elaboración propia.

## CONCLUSIONES

- Las cuerdas de agave presentaron mayor resistencia mecánica, tanto secas como húmedas, al ser traccionadas en comparación a las fibras de ichu.
- La humedad disminuye la resistencia de las cuerdas de agave. Dependerá también del porcentaje de humedad contenido en las fibras. Por otro lado, la humedad incrementa la resistencia de las cuerdas de ichu. Se observa un incremento de 46,8 % en aumento de masa como promedio en todas las cuerdas ensayadas.
- Es necesario evaluar la cuerda de agave expuesta a la intemperie. De esa manera se podrán comparar los resultados con los obtenidos en cuerdas de ichu, pues el puente colgante ha soportado los efectos del sol, la lluvia, el viento, entre otros.

## REFERENCIAS

- [1] Aldazabal, J. (2007). Resistencia a tracción de cuerdas anudadas. *Anales de la Mecánica de Fractura*, 2, 563- 566.
- [2] ASTM Standard D2256. (2002). *Standard Test Method for Tensile Properties of Yarns by the Single-Strand Method*. American Society for Testing and Materials.
- [3] Charca, S. (2015). Assessment of Ichu fibers as non-expensive thermal insulation system for the Andean regions. *Energy and Buildings*, 118. 55-60.
- [4] Garcia, A., Spim, J., y Santos, C. A. (2012). *Ensaio dos Materiais*. (2ª ed.). Rio de Janeiro: LTC.
- [5] Hyslop, J. (2010). *Qhapac Ñan: El Sistema Vial Incaico*. (2ª ed.). Lima: Petróleos del Perú.
- [6] Zuccarello, B. (2017). Toward high performance renewable agave reinforced biocomposites: Optimization of fiber performance and fiber-matrix adhesion analysis. *Composites Part B: Engineering*, 122. 109-120.
- [7] Zuccarello, B. (2017). Experimental analysis and micromechanical models of high performance renewable agave reinforced biocomposites. *Composites Part B: Engineering*, 119. 141-152.

## AGRADECIMIENTOS

Al Arquitecto Walter Gonzales Arnao, docente investigador de la Facultad de Arquitectura de la Universidad Nacional de Ingeniería, quien nos motivo a realizar este estudio de las cuerdas del modelo de puente colgante que mando

a elaborar en el marco del proyecto IGI-UNI, «Instalación de puente colgante con tecnología digital» y al Ingeniero César Cruz Gutiérrez, docente investigador de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad de San Martín de Porres quien nos proporcionó datos sobre el proceso tradicional de tejido realizado por los artesanos tejedores del distrito de Quehue, provincia de Canas, Cuzco.

## ACERCA DE LOS AUTORES

### César R. Nunura

Es doctor en Ingeniería y Tecnología de Materiales por la Pontificia Universidad Católica de Río Grande del Sur (PUCRS, Brasil). Posee maestría en Ingeniería de Procesos de Fabricación por la Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS, Brasil). Es graduado en Ingeniería Mecánica titulado por la Pontificia Universidad Católica de Río Grande del Sur (PUCRS, Brasil). Tiene experiencia en el área de análisis numérico en transferencia de calor, ciencia de los materiales y metalurgia física. Actualmente, es profesor de la Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC) y de la Universidad de Ingeniería y Tecnología (UTEC).

@ cnunura@utec.edu.pe

### César Lecaros

Posee estudios de maestría en Ingeniería y Ciencias de los Materiales por la Pontificia Universidad Católica del Perú. Es ingeniero mecánico por la Universidad Nacional de Ingeniería, con una especialización en Materiales de Ingeniería. Tiene una especialización en Automatización de la Producción en Senai (Brasil). Es especialista en metrología, para lo cual ha seguido capacitaciones en México y Brasil. Forma parte de la *American Society of Mechanical Engineers* (ASME).

@ clecaros@tecsup.edu.pe

### Sixto Roberto Delgado Valdivia

Ingeniero electrónico egresado de la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI). Comenzó su carrera profesional en ITINTEC como ingeniero de diseño en proyectos de investigación de tecnología industrial y también como evaluador de patentes de invención. Más tarde, asumió funciones como supervisor de proyectos de investigación, presidente del Comité de Normalización y jefe de la oficina de ingeniería del departamento de Electrónica de ITINTEC. Trabajó en Entel Perú y empresas privadas en la implementación de proyectos de telecomunicaciones e implementación de laboratorios y talleres para la construcción de equipos electrónicos. Actualmente, es coordinador de Fab Lab Tecsup y coordinador de la carrera de Diseño Industrial en Tecsup. Graduado del diploma de la Academia FAB en el año 2012, es instructor, evaluador global y mentor de la Academia Fab.

@ rdelgado@tecsup.edu.pe