



# UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO

FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA CIVIL



TESIS

---

Evaluación de la curva esfuerzo-deformación mediante ensayos a tracción de las cuerdas principales del puente Q'eswachaka en condiciones húmeda y seca

---

Línea de investigación: Ciencia y tecnología en el uso de materiales

Presentado por : Soto Araujo, Dennys Fausto

ORCID: 0009-0009-0681-6995

Villena Callo, Hardy Virgilio

ORCID: 0009-0009-3164-9199

Para optar al Título Profesional de:

Ingeniero Civil

Asesor : Dr. Mamani Vargas, Elvis Yuri

ORCID: 0000-0001-6139-0960

CUSCO-PERÚ

2024



### Metadatos

Datos del autor	
Nombres y apellidos	DENNYS FAUSTO SOTO ARAUJO
Número de documento de identidad	72739254
URL de Orcid	<a href="https://orcid.org/0009-0009-0681-6995">https://orcid.org/0009-0009-0681-6995</a>
Datos del autor	
Nombres y apellidos	HARDY VIRGILIO VILLENA CALLO
Número de documento de identidad	77436483
URL de Orcid	<a href="https://orcid.org/0009-0009-3164-9199">https://orcid.org/0009-0009-3164-9199</a>
Datos del jurado	
Presidente del jurado (jurado 1)	
Nombres y apellidos	ELIOT PEZO ZEGARRA
Número de documento de identidad	24006901
Jurado 2	
Nombres y apellidos	CAMILO MENDOZA ESCALANTE
Número de documento de identidad	41878365
Jurado 3	
Nombres y apellidos	OMAR GUTIERREZ CAMPANA
Número de documento de identidad	41731830
Jurado 4	
Nombres y apellidos	ADAN RENZO AGUILAR HILARI
Número de documento de identidad	48226102
Datos de la investigación	
Línea de investigación de la Escuela Profesional	Ciencia y tecnología en el uso de materiales



**Informe turnitin:**

# Cuerdas del puente Qeswachaka

by Dennys Fausto SOTO ARAUJO

---

**Submission date:** 09-Apr-2024 09:10PM (UTC-0500)

**Submission ID:** 2237463701

**File name:** TESIS\_Q\_ESWACHAKA\_-VILLENASOTO.pdf (7.02M)

**Word count:** 39988

**Character count:** 227117



## Cuerdas del puente Qeswachaka

### ORIGINALITY REPORT



### PRIMARY SOURCES

<b>1</b>	<b>Submitted to Universidad Andina del Cusco</b> Student Paper	<b>2%</b>
<b>2</b>	<b>hdl.handle.net</b> Internet Source	<b>2%</b>
<b>3</b>	<b>repositorio.uandina.edu.pe</b> Internet Source	<b>1%</b>
<b>4</b>	<b>www.uandina.edu.pe</b> Internet Source	<b>1%</b>
<b>5</b>	<b>repositorio.lamolina.edu.pe</b> Internet Source	<b>1%</b>
<b>6</b>	<b>www.coursehero.com</b> Internet Source	<b>&lt;1%</b>
<b>7</b>	<b>atmorn.com</b> Internet Source	<b>&lt;1%</b>
<b>8</b>	<b>ecotec.edu.ec</b> Internet Source	<b>&lt;1%</b>
<b>9</b>	<b>www.cl.df.gov.br</b> Internet Source	<b>&lt;1%</b>



UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO

FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA CIVIL



TESIS

Evaluación de la curva esfuerzo-deformación mediante ensayos a tracción de las cuerdas principales del puente Q'eswachaka en condiciones húmeda y seca

Línea de investigación: Ciencia y tecnología en el uso de materiales

Presentado por : Soto Araujo, Dennys Fausto

ORCID: 0009-0009-0681-6995

Vilena Callo, Hardy Virgilio

ORCID: 0009-0009-3164-9199

Para optar al Título Profesional de:

Ingeniero Civil

Asesor : Dr. Mamani Vargas, Elvis Yuri

ORCID: 0000-0001-6139-0960

CUSCO-PERÚ

2024



## Cuerdas del puente Qeswachaka

### ORIGINALITY REPORT



### PRIMARY SOURCES

<b>1</b>	<b>Submitted to Universidad Andina del Cusco</b> Student Paper	<b>2%</b>
<b>2</b>	<b>hdl.handle.net</b> Internet Source	<b>2%</b>
<b>3</b>	<b>repositorio.uandina.edu.pe</b> Internet Source	<b>1%</b>
<b>4</b>	<b>www.uandina.edu.pe</b> Internet Source	<b>1%</b>
<b>5</b>	<b>repositorio.lamolina.edu.pe</b> Internet Source	<b>1%</b>
<b>6</b>	<b>www.coursehero.com</b> Internet Source	<b>&lt;1%</b>
<b>7</b>	<b>atmorn.com</b> Internet Source	<b>&lt;1%</b>
<b>8</b>	<b>ecotec.edu.ec</b> Internet Source	<b>&lt;1%</b>
<b>9</b>	<b>www.cl.df.gov.br</b> Internet Source	<b>&lt;1%</b>





## Dedicatoria

*A Ditner, mi querido hermano que me protege y guía desde el cielo por el camino del bien*

*A mi familia y seres queridos, con reconocimiento especial a Virgilio y Elena, mis atesorados padres que con su compañía invaluable fueron soporte fundamental durante esta investigación y mi vida.*

*A Dios por ser mi fuerza.*

*“Aunque ande en valle de sombra de muerte, no temeré mal alguno, porque tú estás conmigo”  
Salmos 23:1-6*

*Atte. Hardy*

*Le dedico el resultado de esta investigación a mi familia. Principalmente, a mis padres, quienes me ayudaron y me sostuvieron en los momentos difíciles, quienes me enseñaron a lidiar con los desafíos, a ser quién soy hoy, así como mis principios, valores, perseverancia y dedicación.*

*Atte. Dennys*





## Agradecimientos

Deseamos expresar mi gratitud a todos aquellos que contribuyeron de manera significativa a la creación y finalización de este trabajo de investigación.

En primer lugar, quiero expresar mi gratitud al Dr. Elvis Mamani, cuya guía experta y apoyo constante fueron cruciales en cada etapa de este proyecto. Su valiosa contribución no solo mejoró el contenido de esta tesis, sino que también tuvo un impacto duradero en nuestra formación académica.

Agradecemos también al Dr. Eliot Pezo y al Mgtr. Renzo Aguilar por su tiempo, dedicación y comentarios útiles, que contribuyeron significativamente a la mejora de la calidad de este trabajo.

Expresamos nuestra gratitud al Dr. Zenón Aguilar por su ayuda y orientación desinteresada, que brindaron a este estudio una perspectiva adicional y enriquecedora.

Por último, agradecemos a nuestra casa de estudios por incentivar la investigación mediante el apoyo financiero que se recibió a través del Instituto Científico de la Universidad Andina del Cusco por medio de la subvención con Resolución Nro. 639-CU-2021-UAC. Puesto que para llevar a cabo la investigación y alcanzar los objetivos propuestos, se necesitó este apoyo financiero.

Este trabajo fue financiado por el CONCYTEC-PROCIENCIA en el marco del concurso “E041-2023-02 Proyectos de Investigación Aplicada” [número de contrato PE501082229-2023].



## Resumen

El puente *Q'eswachaka* (puente tejido- puente de cuerdas) es una muestra de la ingeniería inca, que se mantiene hasta el día de hoy por medio de un ritual de renovación que es parte de costumbres y tradiciones transmitidas a través del tiempo. La investigación consistió en obtener propiedades mecánicas del tipo de cuerdas del puente *Q'eswachaka* como son el esfuerzo máximo, deformación y módulo de elasticidad mediante las curvas esfuerzo-deformación, así mismo, describir el comportamiento de las cuerdas obtenidas a partir de ensayos a tracción.

A tales efectos, en el presente estudio se confeccionaron cuerdas a base de fibra *Q'oya* (*festuca dolichopylla*) a escala real del tipo *Q'eswa* en condiciones húmedas (parcialmente y completamente húmedas) y secas; y a escala 1:4 para las cuerdas del tipo *Maqui* y *Duro* en condiciones secas. Como parte del proceso del estudio se tuvieron etapas que incluyeron ensayos de carga y descarga de humedad, densidad lineal y caracterización geométrica que proporcionaron datos previos a los ensayos de tracción, de éstos últimos se obtuvieron datos de magnitud para el esfuerzo (MPa, N/tex) y deformación (mm/mm, %).

Examinando los resultados alcanzados para la cuerda tipo *Q'eswa*, se observó que las cuerdas con presencia de humedad exhiben una mayor ductilidad, ya que se registraron deformaciones superiores en comparación con aquellas en condición seca; asimismo, al 5% de significancia en cuanto a los esfuerzos máximos en MPa, no se evidenció una variación significativa, en cambio, para los esfuerzos máximos en N/tex, se constató una disminución de los mismos con un mayor contenido de humedad. En relación con las cuerdas del tipo *Maqui* y *Duro*, se registraron mayores deformaciones totales, mientras que los niveles de esfuerzo máximo fueron inferiores en comparación con las cuerdas *Q'eswa*. Respecto al módulo de elasticidad, se apreció un valor significativamente superior de la *Q'eswa* en condición en seca frente a las *Q'eswas* en condición húmeda, así mismo, frente al *Maqui* y *Duro*.

Basándonos en la evaluación de las curvas de esfuerzo-deformación, se establece que se manifiestan fenómenos de endurecimiento y ablandamiento. Estos fenómenos se repiten en concordancia con la cantidad de torones presentes en la cuerda.

Palabras Clave: *Q'oya*, *Festuca Dolichopylla*, ensayo a tracción, módulo de elasticidad, deformación, densidad lineal, carga y descarga de humedad, *Q'eswachaka*, *Q'eswa*, *Maqui*, *Duro*.



## Abstract

The Q'eswachaka bridge (woven bridge-rope bridge) is an example of Inca engineering, which is maintained to this day through a renewal ritual that is part of customs and traditions transmitted over time. The research consisted of obtaining mechanical properties of the type of ropes of the Q'eswachaka bridge, such as maximum stress, deformation and modulus of elasticity through stress-strain curves, as well as describing the behavior of the ropes obtained from tensile tests.

For this purpose, in the present study, ropes based on Q'oya fiber (*festuca dolichopylla*) were made on a full scale of the Q'eswa type in humid (partially and completely humid) and dry conditions; and at a 1:4 scale for Maqui and Duro type ropes in dry conditions. As part of the study process, there were stages that included moisture loading and unloading tests, linear density and geometric characterization that provided data prior to the tensile tests. From the latter, magnitude data for the stress (MPa, N/ tex) and deformation (mm/mm, %).

Examining the results achieved for the Q'eswa type rope, it was observed that ropes with the presence of humidity exhibit greater ductility, since higher deformations were recorded compared to those in dry condition; Likewise, at 5% significance in terms of the maximum stresses in MPa, no significant variation was evident; however, for the maximum stresses in N/tex, a decrease was observed with a higher moisture content. In relation to the Maqui and Duro type ropes, greater total deformations were recorded, while the maximum stress levels were lower compared to the Q'eswa ropes. Regarding the elasticity modulus, a significantly higher value was observed for Q'eswa in dry condition compared to Q'eswas in wet condition, as well as compared to Maqui and Duro.

Based on the evaluation of the stress-strain curves, it is established that hardening and softening phenomena are manifested. These phenomena are repeated in accordance with the number of strands present in the rope.

Keywords: Q'oya, *Festuca Dolichopylla*, tensile test, modulus of elasticity, deformation, linear density, moisture loading and unloading, Q'eswachaka, Q'eswa, Maqui, Duro.



## Introducción

En los andes peruanos en el distrito de *Quehue*, provincia de Canas, departamento de Cusco, pervive una costumbre milenaria del imperio Inca, la cual consiste en la renovación anual del puente Inca *Q'eswachaka*, en las que comunidades de *Chaupibanda*, *Chocchayhua*, *Huinchiri* y *Ccollana* se reúnen para realizar el ritual de renovación del puente cuyos componentes consisten en cuerdas fabricadas a base de una fibra vegetal llamada *Q'oya*.

La investigación presente, nace con la motivación de conocer la parte ingenieril de esta obra con raíces prehispánicas y que constituye una muestra del valioso Patrimonio Inmaterial del Perú; la investigación se enfoca precisamente en las propiedades mecánicas de las cuerdas principales del puente *Q'eswachaka* en las que se pudieron distinguir las *Q'eswas*, *Maquis* y *Duros*. Para lograr esto, los autores se apoyaron en la obtención de curvas esfuerzo-deformación, herramienta ampliamente usada para describir las propiedades mecánicas de un material cuando se le somete a esfuerzos. Cabe mencionar que dentro de los estados de exposición de las cuerdas del puente durante su vida de servicio se encuentra la humedad.

Es así que los autores, en la investigación aplicaron metodologías normativas para llevar a cabo ensayos de carga y descarga de humedad, densidad lineal, caracterización geométrica, ensayos a tracción y ensayos de contenido de humedad para así recopilar datos que confluyan en la obtención de curvas esfuerzo-deformación, que posteriormente fueron tratadas matemáticamente para tener curvas representativas que representen el comportamiento de las cuerdas *Q'eswas*, *Maquis* y *Duros* bajo esfuerzos de tracción; así también mediante dichas curvas representativas, obtener propiedades mecánicas como el módulo de elasticidad, esfuerzo máximo, deformación unitaria máxima y deformación de cuerda.



## Índice

Dedicatoria .....	vii
Agradecimientos.....	viii
Resumen .....	ix
Abstract .....	x
Introducción.....	xi
Índice.....	xii
Índice de Tablas.....	xviii
Índice de Figuras .....	xxi
<i>Capítulo I: Planteamiento del Problema</i> .....	1
1.1. Identificación del Problema.....	1
1.1.1. Descripción del Problema .....	1
1.1.2. Formulación Interrogativa del Problema.....	1
1.1.2.1. Formulación Interrogativa del Problema General. ....	1
1.1.2.2. Formulación Interrogativa de los Problemas Específicos. ....	1
1.2. Justificación e Importancia de la Investigación .....	2
1.2.1. Justificación por Relevancia.....	2
1.2.2. Justificación por Viabilidad.....	2
1.2.3. Justificación Técnica .....	2
1.2.4. Justificación Social.....	3
1.3. Delimitación de la Investigación.....	3
1.3.1. Delimitación Espacial.....	3
1.3.2. Delimitación Temporal.....	4
1.4. Objetivos de Investigación .....	5
1.4.1. Objetivo General .....	5
1.4.2. Objetivos Específicos .....	5
<i>Capítulo II: Marco Teórico</i> .....	6
2.1. Antecedentes de la Tesis o Investigación Actual .....	6
2.1.1. Antecedentes a Nivel Nacional .....	6
2.1.1.1. Antecedente a Nivel Nacional N°01. ....	6
2.1.1.2. Antecedente a Nivel Nacional N°02. ....	6
2.1.2. Antecedentes a Nivel Internacional.....	7



2.1.2.1. Antecedente Internacional N°01. ....	7
2.1.2.2. Antecedente Internacional N°02. ....	8
2.1.2.3. Antecedente Internacional N°03.....	8
2.1.2.4. Antecedente Internacional N°04.....	9
2.1.2.5. Antecedente Internacional N°05.....	10
2.1.2.6. Antecedente Internacional N°06.....	10
2.2. Bases Teóricas.....	11
2.2.1. Fibra.....	11
2.2.1.1. Fibra Natural.....	11
2.2.1.2. Fibra Sintética.....	11
2.2.2. Cuerda .....	11
2.2.3. Tipos de Cuerdas .....	12
2.2.3.1. Cuerda de Fibras Naturales. ....	12
2.2.3.2. Cuerda de Fibras Sintéticas. ....	12
2.2.3.3. Cuerdas Torcidas.....	12
2.2.3.4. Cuerdas Trenzadas. ....	13
2.2.4. Formación de la Estructura de una Cuerda .....	13
2.2.4.1. Hilos de Fibras o Hilos Textiles.....	13
2.2.4.2. Hilos de Cuerda.....	13
2.2.4.3. Torones de Cuerda.....	13
2.2.5. El Imperio Incaico .....	14
2.2.5.1. El Trabajo en el Imperio Incaico.....	14
2.2.5.2. El Qhapaq Ñan. ....	14
2.2.5.3. Puentes en el Qhapaq Ñan.....	15
2.2.5.4. El Puente Q’eswachaka.....	17
2.2.6. La fibra Q’oya (Festuca dolicophylla) .....	21
2.2.6.1. Taxonomía y Características Morfológicas.....	21
2.2.7. Procedimiento de Elaboración de las Cuerdas del Puente Q’eswachaka.....	22
2.2.7.1. Q’eswa.....	23
2.2.7.2. Q’eswaska. ....	24
2.2.7.3. Maqui.....	25
2.2.7.4. Duro.....	25



2.2.8. Propiedades Físicas y Mecánicas de las Cuerdas de Fibra.....	26
2.2.8.1. Propiedades Físicas. ....	26
2.2.8.2. Propiedades Mecánicas. ....	27
2.2.9. Máquinas de Ensayo a Tracción.....	27
2.2.9.1. Tipos de Máquina de Ensayos a Tracción.....	27
2.2.9.2. Diseño Operativo de la Máquina de Tracción.....	28
2.2.9.3. Verificación de la Fuerza y Desplazamiento Indicados. ....	29
2.2.10. Empalmes .....	29
2.2.10.1. Tipos de Empalmes. ....	29
2.2.11. Curva Esfuerzo-Deformación.....	33
2.2.11.1. Propiedades de la Curva Esfuerzo-Deformación. ....	34
2.2.12. Diagramas de Respuesta.....	35
2.2.12.1. Formas Básicas de Respuesta.....	35
2.2.12.2. Formas de Respuesta Complejos.....	36
2.2.13. Método de la Ingeniería o Científico.....	37
2.2.14. OriginPro .....	38
2.2.14.1. Estadística Descriptiva. ....	38
2.2.14.2. Pruebas Paramétricas.....	39
2.2.14.3. Pruebas no Paramétricas.....	39
2.3. Hipótesis.....	39
2.3.1. Hipótesis General .....	39
2.3.2. Hipótesis Específicas.....	40
2.4. Definición de Variables.....	40
2.4.1. Variables.....	40
2.4.1.1. Variable Dependiente. ....	40
2.4.1.2. Variable Independiente.....	40
2.4.2. Cuadro de Operacionalización de Variables. ....	41
<i>Capítulo III: Método</i> .....	42
3.1. Metodología de la Investigación .....	42
3.1.1. Enfoque de la Investigación .....	42
3.1.1.1. Cuantitativo. ....	42
3.1.2. Nivel o Alcance de la Investigación.....	42



3.2. Diseño de la Investigación .....	43
3.2.1. Diseño Metodológico .....	43
3.2.2. Diseño de Ingeniería.....	44
3.3. Población y Muestra.....	44
3.3.1. Población.....	44
3.3.1.1. Descripción de la Población. ....	44
3.3.1.2. Cuantificación de la Población.....	45
3.3.2. Muestra.....	45
3.3.2.1. Descripción y Cuantificación de las Muestras. ....	45
3.3.2.2. Método de Muestreo.....	47
3.3.2.3. Criterios de Evaluación de Muestra. ....	47
3.3.2.4. Criterios de Inclusión. ....	47
3.4. Instrumentos .....	48
3.4.1. Instrumentos Metodológicos o Instrumentos de Recolección de Datos.....	48
3.4.1.1. Instrumentos Para la Recolección de Datos. ....	48
3.4.2. Instrumentos de Ingeniería .....	55
3.5. Procedimientos de Recolección y Análisis de Datos .....	56
3.5.1. Procedimiento Realizado Para la Recolección de Datos.....	60
3.5.1.1. Ensayo de Carga y Descarga de Humedad.....	60
3.5.1.2. Ensayo de Densidad Lineal. ....	61
3.5.1.3. Caracterización Geométrica. ....	63
3.5.1.4. Ensayo de Tracción. ....	64
3.5.1.5. Contenido de Humedad. ....	69
3.5.2. Cálculos Vinculados con la Cuantificación de las Variables/con las Pruebas de Campo o Laboratorio .....	71
3.5.2.1. Cálculos del Ensayo de Carga y Descarga de Humedad.....	71
3.5.2.2. Cálculos del Ensayo de Densidad Lineal. ....	73
3.5.2.3. Cálculos de la Caracterización Geométrica.....	75
3.5.2.4. Cálculos del Ensayo de Contenido de Humedad.....	76
3.5.2.5. Cálculos del Ensayo de Tracción. ....	80
3.5.2.6. Curvas Obtenidas de los Ensayos a Tracción.....	83
3.5.3. Verificación.....	90





3.5.3.1. Verificación de los Resultados de Esfuerzo a Tracción, Deformación Unitaria Máxima y Deformación de Cuerda. ....	90
3.5.3.2. Test de Grubbs para el Descarte de Muestras. ....	93
3.5.3.3. Verificación del Grado de Ajuste Polinómico de Tercer Grado. ....	99
3.5.3.4. Verificación del promedio de curvas múltiples.....	100
3.5.3.5. Verificación del Módulo de elasticidad Mediante Ajuste de Regresión Lineal.....	120
3.5.4. Prueba de hipótesis.....	127
3.5.4.1. Análisis de Varianza ANOVA y Kruskal-Wallis ANOVA para las Q'eswas en las Diferentes Condiciones de Humedad. ....	127
<i>Capítulo IV: Resultados</i> .....	143
4.1. Resultados Respecto al Esfuerzo Máximo para las Principales Cuerdas del Puente Q'eswachaka .....	143
4.1.1. Resumen de Resultados del Esfuerzo Máximo para las Principales Cuerdas del Puente Q'eswachaka en MPa .....	143
4.1.2. Resumen de Resultados del Esfuerzo Máximo para las Principales Cuerdas del Puente Q'eswachaka en N/tex.....	144
4.2. Resultados Respecto a la Deformación de Cuerda para las Principales Cuerdas del Puente Q'eswachaka .....	145
4.2.1. Resumen de Resultados de la Deformación de Cuerda para las Principales Cuerdas del Puente Q'eswachaka en % .....	145
4.3. Resultados Respecto a la Deformación Unitaria Máxima para las Principales Cuerdas del Puente Q'eswachaka.....	146
4.3.1. Resumen de Resultados de la Deformación Unitaria Máxima de la Cuerda Q'eswa ..	146
4.4. Resultados Respecto al Módulo de elasticidad para las Principales Cuerdas del Puente Q'eswachaka .....	147
4.4.1. Resumen de Resultados del Módulo de elasticidad Para las Principales Cuerdas del Puente Q'eswachaka en MPa.....	147
4.4.2. Resumen de Resultados del Módulo de elasticidad para las Principales Cuerdas del Puente Q'eswachaka en N/tex .....	148
4.5. Cuadro Resumen de Resultados .....	149
<i>Capítulo V: Discusión</i> .....	151



5.1. Contraste de los Resultados Obtenidos Respecto a los Antecedentes o con Referentes del Marco Teórico. ....	151
5.2. Interpretación de los Resultados Encontrados en la Investigación .....	152
5.2.1. Interpretación de los Resultados Respecto al Esfuerzo Máximo en MPa.....	152
5.2.2. Interpretación de los resultados respecto al esfuerzo máximo en N/tex .....	153
5.2.3. Interpretación de los Resultados Respecto a la Deformación de Cuerda en %.....	154
5.2.4. Interpretación de los Resultados Respecto a la Deformación Unitaria Máxima en %.	155
5.2.5. Interpretación de los Resultados Respecto al Módulo de elasticidad en MPa .....	156
5.2.6. Interpretación de los Resultados Respecto al Módulo de elasticidad en N/tex.....	156
5.3. Comentario de la Demostración de la Hipótesis .....	157
5.4. Aporte de la Investigación.....	158
Conclusiones .....	159
Sugerencias.....	161
Referencias .....	164
Apéndices .....	169
Matriz de consistencia .....	169



## Índice de Tablas

<b>Tabla 1</b> Cuadro de operacionalización de variables .....	41
<b>Tabla 2</b> Población de Cuerdas.....	45
<b>Tabla 3</b> Formato de datos para el ensayo de carga y descarga de humedad .....	49
<b>Tabla 4</b> Formato de datos para el ensayo de densidad lineal.....	50
<b>Tabla 5</b> Formato de datos para la caracterización geométrica de cuerdas .....	51
<b>Tabla 6</b> Formato para datos del ensayo de tracción.....	52
<b>Tabla 7</b> Formato de datos para ensayo de contenido de humedad de cuerdas en condición completamente húmeda .....	53
<b>Tabla 8</b> Formato de datos para ensayo de humedad para cuerdas en condición parcialmente húmeda .....	53
<b>Tabla 9</b> Formato de datos para ensayo de contenido de humedad para cuerdas en condición ambiente .....	54
<b>Tabla 10</b> Instrumentos de Ingeniería.....	55
<b>Tabla 11</b> Densidad lineal para la Q'eswa seca a temperatura ambiente .....	73
<b>Tabla 12</b> Densidad lineal para la Q'eswa parcialmente húmeda .....	73
<b>Tabla 13</b> Resultados de densidad lineal para la Q'eswa completamente húmeda .....	74
<b>Tabla 14</b> Resultados de densidad lineal para el Maqui seco a temperatura ambiente.....	74
<b>Tabla 15</b> Resultados de densidad lineal para el Duro seco a temperatura ambiente.....	74
<b>Tabla 16</b> Contenidos de humedad (%) para la Q'eswa seca a temperatura ambiente.....	77
<b>Tabla 17</b> Contenidos de humedad (%) para la Q'eswa parcialmente húmeda.....	78
<b>Tabla 18</b> Contenidos de humedad (%) para la Q'eswa completamente húmeda.....	79
<b>Tabla 19</b> Estadística Descriptiva para el esfuerzo máximo en MPa de la cuerda Q'eswa en condición seca a temperatura ambiente.....	94
<b>Tabla 20</b> Estadísticos de prueba para el esfuerzo máximo en MPa de la cuerda Q'eswa en condición seca a temperatura ambiente.....	94
<b>Tabla 21</b> Estadística Descriptiva para el esfuerzo máximo en MPa de la cuerda Q'eswa en condición parcialmente húmeda .....	95
<b>Tabla 22</b> Estadísticos de prueba para el esfuerzo máximo en MPa de la cuerda Q'eswa en condición parcialmente húmeda .....	95
<b>Tabla 23</b> Estadística Descriptiva para el esfuerzo máximo en MPa de la cuerda Q'eswa en condición completamente húmeda .....	96



**Tabla 24** Estadísticos de prueba para el esfuerzo máximo en MPa de la cuerda Q’eswa en condición completamente húmeda .....96

**Tabla 25** Estadística Descriptiva para el esfuerzo máximo en MPa de la cuerda Maqui en condición seca a temperatura ambiente.....97

**Tabla 26** Estadísticos de prueba para el esfuerzo máximo en MPa de la cuerda Maqui en condición seca a temperatura ambiente .....97

**Tabla 27** Estadística Descriptiva para el esfuerzo máximo en MPa de la cuerda Duro en condición seca a temperatura ambiente .....98

**Tabla 28** Estadísticos de prueba para el esfuerzo máximo en MPa de la cuerda Duro en condición seca a temperatura ambiente .....98

**Tabla 29** Estadística descriptiva de las Q’eswa en las condiciones seca a temperatura ambiente (QSA), parcialmente húmeda (QPH) y completamente húmeda (QH) para el Esfuerzo Máximo en MPa ..... 127

**Tabla 30** Supuesto de Normalidad Shapiro-Wilk para las Q’eswas en las condiciones seca a temperatura ambiente (QSA), parcialmente húmeda (QPH) y completamente húmeda (QH) para el esfuerzo máximo en MPa..... 127

**Tabla 31** Prueba de homogeneidad de varianzas, test de Levene’s (Desviación absoluta) de las Q’eswas para el esfuerzo máximo en MPa ..... 129

**Tabla 32** ANOVA unidireccional de las Q’eswas en las diferentes condiciones de humedad para el esfuerzo máximo en MPa..... 129

**Tabla 33** Estadística descriptiva de las Q’eswa en las condiciones seca a temperatura ambiente (QSA), parcialmente húmeda (QPH) y completamente húmeda (QH) para el Esfuerzo Máximo en N/tex..... 130

**Tabla 34** Supuesto de Normalidad Shapiro-Wilk para las Q’eswas en las condiciones seca a temperatura ambiente (QSA), parcialmente húmeda (QPH) y completamente húmeda (QH) para el esfuerzo máximo en N/tex..... 131

**Tabla 35** Prueba de homogeneidad de varianzas, test de Levene’s (Desviación absoluta) para las Q’eswas para el esfuerzo máximo en N/tex..... 132

**Tabla 36** Estadísticos de prueba para las Q’eswas en diferentes condiciones de humedad para el esfuerzo máximo en N/tex..... 133



**Tabla 37** Prueba de Dunn's para las *Q'eswas* en las condiciones seca a temperatura ambiente (QSA), parcialmente húmeda (QPH) y completamente húmeda (QH) para el esfuerzo máximo en *N/tex*..... 133

**Tabla 38** Estadística descriptiva de las *Q'eswa* en las condiciones seca a temperatura ambiente (QSA), parcialmente húmeda (QPH) y completamente húmeda (QH) para la Deformación de cuerda en %..... 134

**Tabla 39** Supuesto de Normalidad Shapiro-Wilk para las *Q'eswas* en las condiciones seca a temperatura ambiente (QSA), parcialmente húmeda (QPH) y completamente húmeda (QH) para la deformación de cuerda en %..... 135

**Tabla 40** Prueba de homogeneidad de varianzas, test de Levene's (Desviación absoluta) de *Q'eswas* para la Deformación de Cuerda % ..... 137

**Tabla 41** Estadísticos de prueba para las *Q'eswas* en diferentes condiciones de humedad para la Deformación de Cuerda en %..... 137

**Tabla 42** Prueba de Dunn's para las *Q'eswas* en las condiciones seca a temperatura ambiente (QSA), parcialmente húmeda (QPH) y completamente húmeda (QH) para la Deformación de Cuerda en %..... 138

**Tabla 43** Estadística descriptiva de las *Q'eswa* en las condiciones seca a temperatura ambiente (QSA), parcialmente húmeda (QPH) y completamente húmeda (QH) para la Deformación Unitaria Máxima en %..... 139

**Tabla 44** Supuesto de Normalidad Shapiro-Wilk para las *Q'eswas* en las condiciones seca a temperatura ambiente (QSA), parcialmente húmeda (QPH) y completamente húmeda (QH) para la deformación unitaria máxima en %..... 139

**Tabla 45** Prueba de homogeneidad de varianzas, test de Levene's (Desviación absoluta) para las *Q'eswas* para la Deformación Unitaria Máxima en % ..... 140

**Tabla 46** Estadísticos de prueba para las *Q'eswas* en diferentes condiciones de humedad para la Deformación Unitaria Máxima en %..... 141

**Tabla 47** Prueba de Dunn's para las *Q'eswas* en las condiciones seca a temperatura ambiente (QSA), parcialmente húmeda (QPH) y completamente húmeda (QH) para la Deformación Unitaria Máxima en %..... 141

**Tabla 48** Cuadro resumen de resultados..... 150



## Índice de Figuras

<b>Figura 1</b> Distrito de Quehue .....	4
<b>Figura 2</b> <i>Formación de la estructura de una cuerda</i> .....	14
<b>Figura 3</b> <i>Segmentos del sistema Inca sometidos a prospecciones</i> .....	15
<b>Figura 4</b> <i>Puente colgante tejido sobre el río Apurímac al oeste de Cusco</i> .....	16
<b>Figura 5</b> <i>The Q'eswachaka Bridge, department of Cusco</i> .....	17
<b>Figura 6</b> <i>Fabricación de Q'eswa por los comuneros</i> .....	18
<b>Figura 7</b> <i>Comuneros estirando y atando las sogas a los estribos</i> .....	19
<b>Figura 8</b> <i>Maestros tejedores se encuentran a la mitad del puente</i> .....	20
<b>Figura 9</b> <i>Comuneros de Quehue celebrando con danzas su logro</i> .....	20
<b>Figura 10</b> <i>Formación secuencial de la estructura de una Q'eswa</i> .....	23
<b>Figura 11</b> <i>Stipa Ichu Fibra vegetal del que está hecho el puente Q'eswachaka</i> .....	23
<b>Figura 12</b> <i>Fibra vegetal enroscada o hilada</i> .....	23
<b>Figura 13</b> <i>Q'eswa o primera soguilla en detalle</i> .....	24
<b>Figura 14</b> <i>Formación secuencial de una Q'eswaska</i> .....	24
<b>Figura 15</b> <i>Q'eswaska en detalle</i> .....	24
<b>Figura 16</b> <i>Formación Secuencial de un Maqui</i> .....	25
<b>Figura 17</b> <i>Maqui en detalle</i> .....	25
<b>Figura 18</b> <i>Formación secuencial de un Duro</i> .....	25
<b>Figura 19</b> <i>Duro en detalle</i> .....	26
<b>Figura 20</b> <i>Primer paso_Empalme de ojo en cuerda de 3 torones</i> .....	30
<b>Figura 21</b> <i>Segundo paso_Empalme de ojo en cuerda de 3 torones</i> .....	31
<b>Figura 22</b> <i>Tercer paso_Empalme de ojo en cuerda de 3 torones</i> .....	31
<b>Figura 23</b> <i>Empalme con abrazaderas tipo U</i> .....	32
<b>Figura 24</b> <i>Métodos para la obtención del módulo de Young, módulo tangente y módulo de elasticidad</i> .....	34
<b>Figura 25</b> <i>Formas básicas de respuesta no lineal: (a) Lineal hasta la falla frágil, (b) Endurecimiento (hardening/stiffening), (c) ablandamiento (softening)</i> .....	36
<b>Figura 26</b> <i>Formas de respuesta complejas: (d) snap-through, (e) snap-back, (f) bifurcación (bifurcation), (g) bifurcación combinada con puntos límite y retroceso</i> .....	37
<b>Figura 27</b> <i>Flujograma</i> .....	44



**Figura 28** Recolección de Q’oya in situ ..... 56

**Figura 29** Grupo de Q’eswas para un torón ..... 57

**Figura 30** Torón (Q’eswaska) para el Maqui ..... 57

**Figura 31** Cuerda Maqui recién torcida..... 58

**Figura 32** Grupos de 9 Q’eswas para torones de Duro ..... 58

**Figura 33** Torones (Q’eswaska) para el Duro ..... 59

**Figura 34** Cuerda Duro recién trenzada ..... 59

**Figura 35** *Ensayo de densidad lineal* ..... 62

**Figura 36** *Medición del paso del torón de la cuerda Duro* ..... 64

**Figura 37** *Esquema de muestra montada en una máquina de tracción (se aprecia los empalmes de ojo)*..... 65

**Figura 38** *Esquema de la máquina de ensayo a tracción empleada en la investigación* ..... 67

**Figura 39** *Montaje de Duro y preparación de máquina*..... 68

**Figura 40** *Ensayo de contenido de humedad*..... 70

**Figura 41** *Ensayo de contenido de humedad para la muestra N°01* ..... 71

**Figura 42** *Ensayo de contenido de humedad para la muestra N°02* ..... 72

**Figura 43** *Ensayo de contenido de humedad para la muestra N°03* ..... 72

**Figura 44** *Curva fuerza-desplazamiento para la cuerda Q’eswa seca a temperatura ambiente (QSA)*..... 83

**Figura 45** *Curva fuerza-desplazamiento para la cuerda Q’eswa parcialmente húmeda (QPH)*.. 83

**Figura 46** *Curva fuerza-desplazamiento para la cuerda Q’eswa completamente húmeda* ..... 84

**Figura 47** *Curva fuerza-desplazamiento para la cuerda Maqui seca a temperatura ambiente (MA)*  
..... 84

**Figura 48** *Curva fuerza-desplazamiento para la cuerda Duro seca a temperatura ambiente (DA)*  
..... 85

**Figura 49** *Curva Esfuerzo-Deformación obtenidas de los ensayos a tracción de la Q’eswa seca a temperatura ambiente (QSA) en MPa vs mm/mm* ..... 85

**Figura 50** *Curva Esfuerzo-Deformación obtenidas de los ensayos a tracción de la Q’eswa seca a temperatura ambiente (QSA) en N/tex vs %*..... 86

**Figura 51** *Curva Esfuerzo-Deformación obtenidas de los ensayos a tracción de la Q’eswa parcialmente húmeda (QPH) en MPa vs mm/mm*..... 86





**Figura 52** Curva Esfuerzo-Deformación obtenidas de los ensayos a tracción de la Q'eswa parcialmente húmeda (QPH) en N/tex vs % .....87

**Figura 53** Curva Esfuerzo-Deformación obtenidas de los ensayos a tracción de la Q'eswa completamente húmeda (QH) en MPa vs mm/mm .....87

**Figura 54** Curva Esfuerzo-Deformación obtenidas de los ensayos a tracción de la Q'eswa completamente húmeda (QH) en N/tex vs %.....88

**Figura 55** Curva Esfuerzo-Deformación obtenidas de los ensayos a tracción del Maqui seco a temperatura ambiente en MPa vs mm/mm .....88

**Figura 56** Curva Esfuerzo-Deformación obtenidas de los ensayos a tracción del Maqui seco a temperatura ambiente en N/tex vs %.....89

**Figura 57** Curva Esfuerzo-Deformación obtenidas de los ensayos a tracción del Duro seco a temperatura ambiente en MPa vs mm/mm .....89

**Figura 58** Curva Esfuerzo-Deformación obtenidas de los ensayos a tracción del Duro seco a temperatura ambiente en N/tex vs %.....90

**Figura 59** Certificado de calibración de la celda de carga de la empresa G&L LABORATORIO S.A.C .....90

**Figura 60** Certificado de calibración de celda de carga .....91

**Figura 61** Cinta métrica calibrada.....92

**Figura 62** Test de Grubbs para la cuerda Q'eswa en condición seca a temperatura ambiente...94

**Figura 63** Test de Grubbs para la cuerda Q'eswa en condición parcialmente húmeda.....95

**Figura 64** Test de Grubbs para la cuerda Q'eswa en condición completamente húmeda.....96

**Figura 65** Test de Grubbs para la cuerda Maqui en condición seca a temperatura ambiente.....97

**Figura 66** Test de Grubbs para la cuerda Duro en condición seca a temperatura ambiente.....98

**Figura 67** Muestras seleccionadas de la cuerda Q'eswa en condición seca a temperatura ambiente (QSA) en unidad MPa vs mm/mm ..... 100

**Figura 68** Ajuste polinómico de tercer grado para las muestras seleccionadas de la cuerda Q'eswa en condición seca a temperatura ambiente (QSA) en unidad MPa vs mm/mm ..... 101

**Figura 69** Curva promedio de la cuerda Q'eswa en condición seca a temperatura ambiente en unidad MPa vs mm/mm ..... 101

**Figura 70** Desviación estándar y error estándar de la cuerda Q'eswa en condición seca a temperatura ambiente para la curva promedio en unidad MPa vs mm/mm..... 102





**Figura 71** Muestras seleccionadas de la cuerda Q'eswa en condición seca a temperatura ambiente (QSA) en unidad N/tex vs %..... 102

**Figura 72** Ajuste polinómico de tercer grado para las muestras seleccionadas de la cuerda Q'eswa en condición seca a temperatura ambiente (QSA) en unidad N/tex vs %..... 103

**Figura 73** Curva promedio de la cuerda Q'eswa en condición seca a temperatura ambiente en unidad N/tex vs %..... 103

**Figura 74** Desviación estándar y error estándar de la cuerda Q'eswa en condición seca a temperatura ambiente para la curva promedio en unidad N/tex vs % ..... 104

**Figura 75** Muestras seleccionadas de la cuerda Q'eswa en condición parcialmente húmeda (QPH) en unidad MPa vs mm/mm ..... 104

**Figura 76** Ajuste polinómico de tercer grado para las muestras seleccionadas de la cuerda Q'eswa en condición parcialmente húmeda (QPH) en unidad MPa vs mm/mm ..... 105

**Figura 77** Curva promedio de la cuerda Q'eswa en condición parcialmente húmeda en unidad MPa vs mm/mm ..... 105

**Figura 78** Desviación estándar y error estándar de la cuerda Q'eswa en condición parcialmente húmeda para la curva promedio en unidad MPa vs mm/mm..... 106

**Figura 79** Muestras seleccionadas de la cuerda Q'eswa en condición parcialmente húmeda (QPH) en unidad N/tex vs %..... 106

**Figura 80** Ajuste polinómico de tercer grado para las muestras seleccionadas de la cuerda Q'eswa en condición parcialmente húmeda (QPH) en unidad N/tex vs %..... 107

**Figura 81** Curva promedio de la cuerda Q'eswa en condición parcialmente húmeda en unidad N/tex vs %..... 107

**Figura 82** Desviación estándar y error estándar de la cuerda Q'eswa en condición parcialmente húmeda para la curva promedio en unidad N/tex vs % ..... 108

**Figura 83** Muestras seleccionadas de la cuerda Q'eswa en condición completamente húmeda (QH) en unidad MPa vs mm/mm ..... 108

**Figura 84** Ajuste polinómico de tercer grado para las muestras seleccionadas de la cuerda Q'eswa en condición completamente húmeda (QH) en unidad MPa vs mm/mm ..... 109

**Figura 85** Curva promedio de la cuerda Q'eswa en condición completamente húmeda en unidad MPa vs mm/mm ..... 109

**Figura 86** Desviación estándar y error estándar de la cuerda Q'eswa en condición completamente húmeda para la curva promedio en unidad MPa vs mm/mm..... 110



**Figura 87** Muestras seleccionadas de la cuerda Q'eswa en condición completamente húmeda (QH) en unidad N/tex vs % ..... 110

**Figura 88** Ajuste polinómico de tercer grado para las muestras seleccionadas de la cuerda Q'eswa en condición completamente húmeda (QH) en unidad N/tex vs % ..... 111

**Figura 89** Curva promedio de la cuerda Q'eswa en condición completamente húmeda en unidad N/tex vs % ..... 111

**Figura 90** Desviación estándar y error estándar de la cuerda Q'eswa en condición completamente húmeda para la curva promedio en unidad N/tex vs % ..... 112

**Figura 91** Muestras seleccionadas de la cuerda Maqui (MA) en condición seca a temperatura ambiente en unidad MPa vs mm/mm ..... 112

**Figura 92** Ajuste polinómico de tercer grado para las muestras seleccionadas de la cuerda Maqui (MA) en condición seca a temperatura ambiente en unidad MPa vs mm/mm ..... 113

**Figura 93** Curva promedio de la cuerda Maqui en condición seca a temperatura ambiente en unidad MPa vs mm/mm ..... 113

**Figura 94** Desviación estándar y error estándar de la cuerda Maqui en condición seca a temperatura ambiente para la curva promedio en unidad MPa vs mm/mm ..... 114

**Figura 95** Muestras seleccionadas de la cuerda Maqui (MA) en condición seca a temperatura ambiente en unidad N/tex vs % ..... 114

**Figura 96** Ajuste polinómico de tercer grado para las muestras seleccionadas de la cuerda Maqui (MA) en condición seca a temperatura ambiente en unidad N/tex vs % ..... 115

**Figura 97** Curva promedio de la cuerda Maqui en condición seca a temperatura ambiente en unidad N/tex vs % ..... 115

**Figura 98** Desviación estándar y error estándar de la cuerda Maqui en condición seca a temperatura ambiente para la curva promedio en unidad N/tex vs % ..... 116

**Figura 99** Muestras seleccionadas de la cuerda Duro (DA) en condición seca a temperatura ambiente en unidad MPa vs mm/mm ..... 116

**Figura 100** Ajuste polinómico de tercer grado para las muestras seleccionadas de la cuerda Duro (DA) en condición seca a temperatura ambiente en unidad MPa vs mm/mm ..... 117

**Figura 101** Curva promedio de la cuerda Duro en condición seca a temperatura ambiente en unidad MPa vs mm/mm ..... 117

**Figura 102** Desviación estándar y error estándar de la cuerda Duro en condición seca a temperatura ambiente para la curva promedio en unidad MPa vs mm/mm ..... 118



**Figura 103** Muestras seleccionadas de la cuerda Duro (DA) en condición seca a temperatura ambiente en unidad N/tex vs % ..... 118

**Figura 104** Ajuste polinómico de tercer grado para las muestras seleccionadas de la cuerda Duro (DA) en condición seca a temperatura ambiente en unidad N/tex vs %..... 119

**Figura 105** Curva promedio de la cuerda Duro en condición seca a temperatura ambiente en unidad N/tex vs %..... 119

**Figura 106** Desviación estándar y error estándar de la cuerda Duro en condición seca a temperatura ambiente para la curva promedio de curvas en unidad N/tex vs %..... 120

**Figura 107** Ajuste lineal para la obtención de módulo de elasticidad para la Q'eswa seca a temperatura ambiente (QSA) en MPa ..... 122

**Figura 108** Ajuste lineal para la obtención de módulo de elasticidad para la Q'eswa seca a temperatura ambiente (QSA) en N/tex ..... 122

**Figura 109** Ajuste lineal para la obtención de módulo de elasticidad para la Q'eswa parcialmente húmeda (QPH) en MPa ..... 123

**Figura 110** Ajuste lineal para la obtención de módulo de elasticidad para la Q'eswa parcialmente húmeda (QPH) en N/tex ..... 123

**Figura 111** Ajuste lineal para la obtención de módulo de elasticidad para la Q'eswa completamente húmeda (QH) en MPa ..... 124

**Figura 112** Ajuste lineal para la obtención de módulo de elasticidad para la Q'eswa completamente húmeda (QH) en N/tex ..... 124

**Figura 113** Ajuste lineal para la obtención de módulo de elasticidad para el Maqui (MA) seco a temperatura ambiente en MPa ..... 125

**Figura 114** Ajuste lineal para la obtención de módulo de elasticidad para el Maqui (MA) seco a temperatura ambiente en N/tex ..... 125

**Figura 115** Ajuste lineal para la obtención de módulo de elasticidad para el Duro (DA) seco a temperatura ambiente en MPa ..... 126

**Figura 116** Ajuste lineal para la obtención de módulo de elasticidad para el Duro (DA) seco a temperatura ambiente en N/tex ..... 126

**Figura 117** Histograma de normalidad para las Q'eswas en las condiciones seca a temperatura ambiente (QSA), parcialmente húmeda (QPH) y completamente húmeda (QH) para el esfuerzo máximo en MPa..... 128



**Figura 118** Diagrama de Cajas del esfuerzo máximo en MPa para las Q'eswas en las condiciones seca a temperatura ambiente (QSA), parcialmente húmeda (QPH) y completamente húmeda (QH) ..... 130

**Figura 119** Histograma de normalidad para las Q'eswas en las condiciones seca a temperatura ambiente (QSA), parcialmente húmeda (QPH) y completamente húmeda (QH) para el esfuerzo máximo en N/tex ..... 132

**Figura 120** Comparación emparejada para la Q'eswa en las condiciones seca a temperatura ambiente (QSA), parcialmente húmeda (QPH) y completamente húmeda (QH) para el esfuerzo máximo en N/tex ..... 134

**Figura 121** Histograma de normalidad para las Q'eswas en las condiciones seca a temperatura ambiente (QSA), parcialmente húmeda (QPH) y completamente húmeda (QH) para la Deformación de Cuerda en % ..... 136

**Figura 122** Comparación emparejada para la Q'eswa en las condiciones seca a temperatura ambiente (QSA), parcialmente húmeda (QPH) y completamente húmeda (QH) para la Deformación de Cuerda en % ..... 138

**Figura 123** Histograma de normalidad para las Q'eswas en las condiciones seca a temperatura ambiente (QSA), parcialmente húmeda (QPH) y completamente húmeda (QH) para la Deformación Unitaria Máxima en % ..... 140

**Figura 124** Comparación emparejada para la Q'eswa en las condiciones seca a temperatura ambiente (QSA), parcialmente húmeda (QPH) y completamente húmeda (QH) para la Deformación Unitaria Máxima en % ..... 142

**Figura 125** Resumen grafico del esfuerzo máximo (MPa) de las principales cuerdas del puente Q'eswachaka ..... 143

**Figura 126** Resumen gráfico del esfuerzo máximo (N/tex) de las principales cuerdas del puente Q'eswachaka ..... 144

**Figura 127** Resumen gráfico de la deformación de cuerda de las principales cuerdas del puente Q'eswachaka ..... 145

**Figura 128** Resumen gráfico de la deformación unitaria máxima de las principales cuerdas del puente Q'eswachaka ..... 146

**Figura 129** Resumen gráfico del módulo de elasticidad (MPa) de las principales cuerdas del puente Q'eswachaka ..... 147



**Figura 130** *Resumen gráfico del módulo de elasticidad (N/tex) de las principales cuerdas del puente Q'eswachaka.....* 148

**Figura 131** *Curvas representativas agrupadas en MPa-mm/mm.....* 149

**Figura 132** *Curvas representativas agrupadas en N/tex-% ..... 149*



## Capítulo I: Planteamiento del Problema

### 1.1. Identificación del Problema

#### 1.1.1. Descripción del Problema

Durante el desarrollo del imperio Inca, se hicieron grandiosas obras de ingeniería, destacando los puentes colgantes. Regal (1972) indica que los puentes colgantes fueron las obras más importantes que se desarrollaron durante la existencia de la civilización Inca, se emplearon para el paso de mensajeros, funcionarios administrativos y el ejército; tal fue su importancia que, sin estos, la organización del imperio Inca no se hubiera podido mantener.

El proceso de renovación del puente se realiza con el apoyo de las familias de comunidades aledañas, quienes fabrican las cuerdas y realizan el montaje del puente, bajo la supervisión de maestros experimentados en el proceso. Todo este proceso se realiza con conocimientos empíricos transmitidos de generación en generación. Sin embargo, a la fecha se carece de información técnica de la ingeniería estructural de los componentes de este puente, por lo que no se puede brindar datos del impacto que pueden sufrir las propiedades mecánicas de las cuerdas del puente Q'eswachaka a condiciones climáticas, así como también se desconoce la curva esfuerzo-deformación lo cual permitiría comprender como las cuerdas del puente Q'eswachaka responden a esfuerzos de tracción y como se deforman en relación a estos esfuerzos.

#### 1.1.2. Formulación Interrogativa del Problema

##### 1.1.2.1. Formulación Interrogativa del Problema General.

¿Cómo es la curva esfuerzo-deformación del tipo de cuerdas principales en condiciones húmeda y seca del puente *Q'eswachaka* ensayadas a tracción?

##### 1.1.2.2. Formulación Interrogativa de los Problemas Específicos.

- ¿Cuál es la magnitud del módulo de elasticidad en condiciones húmeda y seca del tipo de cuerdas principales del puente *Q'eswachaka* ensayadas a tracción?

- ¿Cuál es la magnitud del esfuerzo máximo en condiciones húmeda y seca del tipo de cuerdas principales del puente *Q'eswachaka*?

- ¿Cuál es la magnitud de la deformación unitaria máxima en condiciones húmeda y seca del tipo de cuerdas principales del puente *Q'eswachaka* ensayadas a tracción?



- ¿Cuál es la magnitud de la deformación de cuerda en condiciones húmeda y seca del tipo de cuerdas principales del puente *Q'eswachaka* ensayadas a tracción?

## **1.2. Justificación e Importancia de la Investigación**

### ***1.2.1. Justificación por Relevancia***

El puente *Q'eswachaka* es una muestra activa de lo que fue la ingeniería Inca, actualmente es un importante afluente turístico, por ende, es de gran interés que se incremente y precise la información sobre sus características técnicas ingenieriles para su valoración, así como para la seguridad de las personas que transiten por esta estructura.

Las propiedades mecánicas de cuerdas fabricadas a base de fibras naturales zonas altoandinas es un tema con escasa bibliografía e investigación en nuestro país, lo que motiva realizar una investigación en este aspecto.

### ***1.2.2. Justificación por Viabilidad***

La investigación es viable porque se cuenta con asesoría especializada, instrumentos de ensayo, información adecuada y presupuesto.

Se cuenta con disponibilidad para realizar visitas al puente y poder realizar las inspecciones correspondientes, asimismo se tiene acceso a la recolección de las fibras de *Q'oya (festuca dolichopylla)* in situ, pues las cuerdas se fabricarán con el material recolectado de la misma zona que las comunidades usan de acopio para el reemplazo del puente, lo que permitirá obtener resultados con condiciones cercanas a la realidad; también, se dispone de la correspondiente normativa para la realización de los ensayos como la Cordage Institute-1500 (CI 1500, 2002), International Organization for Standardization – 2307 (ISO 2307, 2010), American Society for Testing and Materials – 4268 (ASTM D4268, 1993).

### ***1.2.3. Justificación Técnica***

Con el trabajo de investigación se pretende que, a partir de la obtención de las curvas esfuerzo-deformación se conozcan las propiedades mecánicas de las cuerdas principales del puente *Q'eswachaka* en condiciones húmeda y seca y que así, las curvas sean herramientas de información para futuras investigaciones que contemplen modelos numéricos y analíticos del puente *Q'eswachaka* o de estructuras que se compongan de cuerdas de fibra natural.



#### **1.2.4. Justificación Social.**

La investigación aportará al incremento de la valorización del puente *Q'eswachaka* como destino turístico, pues se proveerá de conocimiento respecto a la parte ingenieril de éste. El puente es parte de la red de caminos Inca "*Qhapaq Ñan*", es un dinamizador de distintos puntos sociales, políticos y económicos del país (Ministerio de Cultura, 2010).

Así mismo la investigación brindará resultados de resistencia de cuerdas fabricadas en *Q'oya* y a partir de ello se promoverá el uso de sogas a base de materiales naturales de zonas alto andinas.

### **1.3. Delimitación de la Investigación**

#### **1.3.1. Delimitación Espacial.**

Se delimita la investigación de acuerdo a la zona de origen de extracción de la materia prima para la elaboración de las cuerdas; la *Q'oya* (*festuca dolichopylla*), se recolectó de zonas aledañas a la ubicación del puente *Q'eswachaka* que cruza el río Apurímac en el distrito de *Quehue*, provincia de Canas. Los ensayos y los análisis de datos se realizaron en la ciudad de Cusco.

La ubicación geográfica del puente *Q'eswachaka* es:

Latitud: 14° 22' 53.9"  
Longitud: 71° 29' 3.17"  
Altitud: 3792 msnm  
Cruza: Río Apurímac

La ubicación política del puente *Q'eswachaka* es:

Distrito: *Quehue*  
Provincia: Canas  
Departamento : Cusco



**Figura 1**

*Distrito de Quehue*



*Nota.* Adaptado de *El Q'eswachaka de Canas: Ingeniería y tradición en las comunidades de Quehue* (p. 52), Por P. Mendizábal, M. Hernández, I. Huamani, 2015, Ministerio de Cultura del Perú.

### **1.3.2. Delimitación Temporal**

En el desarrollo de la investigación, la recolección de materia prima, fabricación de cuerdas y ensayos se llevó a cabo en 10 meses, desde junio del 2022 hasta abril del 2023 y el procesamiento de datos y redacción en 6 meses, desde mayo hasta octubre del 2023.



## 1.4. Objetivos de Investigación

### 1.4.1. Objetivo General

Evaluar la curva esfuerzo-deformación mediante ensayos a tracción del tipo de cuerdas principales del puente *Q'eswachaka* en condiciones húmeda y seca.

### 1.4.2. Objetivos Específicos

#### **Objetivo Específico N°1**

Determinar la magnitud del módulo de elasticidad mediante ensayos a tracción del tipo de cuerdas principales del puente *Q'eswachaka* en condiciones húmeda y seca.

#### **Objetivo Específico N°2**

Determinar la magnitud del esfuerzo máximo del tipo de cuerdas principales del puente *Q'eswachaka* en condiciones húmeda y seca.

#### **Objetivo Específico N°3**

Determinar la magnitud de la deformación unitaria máxima mediante ensayos a tracción del tipo de cuerdas principales del puente *Q'eswachaka* en condiciones húmeda y seca.

#### **Objetivo Específico N°4**

Determinar la magnitud de la deformación de cuerda mediante ensayos a tracción del tipo de cuerdas principales del puente *Q'eswachaka* en condiciones húmeda y seca.



## Capítulo II: Marco Teórico

### 2.1. Antecedentes de la Tesis o Investigación Actual

#### 2.1.1. Antecedentes a Nivel Nacional

##### 2.1.1.1. Antecedente a Nivel Nacional N°01.

Arróspide (2016) en la investigación “La reinención cultural como factor de desarrollo sostenible. Caso: puente Inca de *Q’eswachaka*”, aborda la necesidad de conocer el proceso de construcción y renovación del puente *Q’eswachaka* como un ejemplo de la permanente reinención y práctica de costumbres que enriquecen la cultura sosteniblemente.

La investigación presenta datos recopilados durante ocho años de renovación del puente según se menciona; se brinda información de las características del puente, de las comunidades que forman parte de la mano de obra y del ritual de renovación que es parte una reinención cultural como una obra de ingeniería; es en este último aspecto (reinención cultural como obra de ingeniería) en donde se realizaron pruebas de carga y una breve descripción estructural de las cuerdas del puente.

Las pruebas de carga consistieron en someter a las cuerdas *Q’eswa* y *Duro* a “mano” y con vehículos respectivamente. La prueba de la *Q’eswa* consistió en sostenerla en un punto fijo adosada a un dinamómetro y jalar constantemente hasta obtener marcas límite del dinamómetro, se observó que las cuerdas permanecieron intactas, por lo que se supuso que las *Q’eswas* soportan cargas superiores a los 15kg ó 0.125 kg/cm<sup>2</sup>. La prueba en el *Duro* consistió en atar un extremo de la cuerda a una camioneta pick up sin frenar y frenada de 1800kg que funcionó como punto fijo y el otro a un camión de 4000kg que funcionó como punto móvil; el camión se puso en estado neutro (dejándola avanzar por gravedad) y con aceleración, se observó que las cuerdas quedaron intactas, por lo que mediante esta prueba se supuso que las cuerdas resisten más de 4000kg ó 0.33kg/cm<sup>2</sup>.

##### 2.1.1.2. Antecedente a Nivel Nacional N°02.

De acuerdo a la investigación realizada por Nunura, Lecaros y Delgado (2018), en la que se abordó el estudio de la resistencia mecánica de materiales empleados en puentes colgantes en la zona andina; esto, mediante pruebas a tracción de cuerdas de *ichu* y cuerdas de agave. Las pruebas se realizaron con cuerdas en condiciones secas y humedecidas en agua para simular las condiciones



normales de un puente colgante en los Andes peruanos; la condición húmeda de las cuerdas se simuló con la sumersión en agua durante 10 minutos.

En la investigación, se emplearon testigos de cuerdas de *ichu* y agave de 25.12mm<sup>2</sup> y 29.7mm<sup>2</sup> de sección transversal respectivamente y 50mm de longitud entre mordazas para todos los testigos; éstos fueron sometidos a tracción mediante una máquina de tracción *zwick roell* a velocidad de 150mm/min; los ensayos se hicieron siguiendo los lineamientos de la norma ASTM D2256.

Los resultados de la investigación muestran que las cuerdas de *ichu* en condición seca y húmeda alcanzaron una resistencia promedio de 28.48MPa y 34.01MPa respectivamente. Por otro lado, las cuerdas de agave en condición seca y húmeda mostraron resistencias promedio de 140.20MPa y 103.91MPa respectivamente.

La investigación tuvo como una de sus conclusiones que la humedad incrementó la resistencia de las cuerdas de *ichu* en un 22.38%; así como un incremento de 46.8% de su masa.

### **2.1.2. Antecedentes a Nivel Internacional**

#### **2.1.2.1. Antecedente Internacional N°01.**

Palomo (2018), tuvo como objetivo analizar el comportamiento estructural del puente *Q'eswachaka* con respecto a diferentes condiciones de carga. Modeló y analizó la estructura de este puente, recreando los materiales y cargas de la época. Para modelar los materiales con los que se construye el puente, se tienen en cuenta sus propiedades físicas y su resistencia. Para las teorías de la carga se determina la acción típica de los trenes de carga de la época, es decir, animales como la llama, utilizada por los *Incas* como animal de carga, y el caballo, que era utilizado por los humanos. como medio de transporte de la caballería.

Respecto a los materiales, tuvo en cuenta que el puente está constituido a partir de la fibra *Q'oya*, ya sea de las especies *stipa Ichu* o *stipa obtusa*, para el modelamiento del puente se consideró la resistencia del material de acuerdo a la resistencia de la fibra, mas no de la resistencia de las cuerdas como material. Las resistencias consideradas de la fibra fueron:

Para la *stipa Ichu*: un módulo de Young de 6.2 GPa, un valor de 94 Mpa para la resistencia a la tracción (esfuerzo máximo), y una deformación de 1.6%.



Para la *stipa obtusa*: un módulo de Young de 23.4, 27.3 y 18.4 GPa, valores de 322, 428 y 373 Mpa para la resistencia a la tracción (esfuerzo máximo), densidades de 1253, 1470 y 1398 kgf/m<sup>3</sup> y deformaciones de 1.4, 1.8 y 2.6%.

Se concluyó con que el modelo estructural del puente planteado se asemeja al puente real; cumpliéndose que la resistencia del material, provee al modelo de un factor de seguridad de 1.2 respecto a cargas como llamas y caballos, mas no para cargas mayoradas bajo un enfoque de estado límite de servicio.

#### **2.1.2.2. Antecedente Internacional N°02.**

Candiotti (2020) realizó el estudio de las propiedades mecánicas de la fibra de *Ichu* (*Stipa obtusa*) con tratamiento alcalino en diferentes tiempos.

Para la realización de los ensayos de la investigación se contemplaron fibras de *Ichu* cosechadas en el distrito de Tinta (Cusco-Perú), respecto al procedimiento de tratamiento, se hizo en un medio alcalino con hidróxido de sodio y secadas al horno a una temperatura de 60°C durante 24h, para eliminar el agua en las fibras.

La investigación concluyó que las propiedades mecánicas mejoran según se incrementa el tiempo de tratamiento, obteniéndose valores máximos de 569Mpa para la resistencia, 28GPa para el módulo de elasticidad y 0.026 para la deformación. De acuerdo a los resultados se pudo concluir que las fibras de *Stipa obtusa* son competentes frente a otras fibras naturales comerciales que se emplean como refuerzo en compuestos de matriz polimérica.

#### **2.1.2.3. Antecedente Internacional N°03.**

Li, B. (2023) investigó las propiedades mecánicas del concreto reforzado con fibra de polipropileno de baja fluidez (PPF) después de ser expuesto a altas temperaturas.

El artículo aborda también el proceso de preparación y curado de los bloques de prueba, así como las propiedades físicas y mecánicas del concreto reforzado con fibra de polipropileno. Además, describe los instrumentos y dispositivos experimentales utilizados en las pruebas, como una máquina de ensayo universal y un dispositivo de calentamiento. Los resultados de las pruebas de compresión axial muestran la relación entre la deformación máxima y la temperatura del concreto PPF después de su exposición a altas temperaturas. La deformación máxima del concreto PPF se compara con la del concreto normal y se analizan los efectos de la temperatura.



También se destaca para el ajuste de curvas esfuerzo-deformación el uso de una función polinómica de tercer grado para la parte ascendente de la curva y una función de fracción racional para la parte descendente. El método de ajuste de curva sugerido por Zhenhai Guo se utilizó para simular la curva de tensión-deformación del concreto PPF con diferentes longitudes y dosis de fibras. Se obtuvieron valores de ajuste cercanos a 1, lo que indica una buena simulación de la curva.

Se concluyó que el comportamiento mecánico del concreto reforzado con fibra de polipropileno de baja fluidez (PPF) es mejor que el del concreto ordinario, especialmente a altas temperaturas. La presencia de PPF mejora la resistencia del concreto a la compresión y la tracción, y su capacidad para absorber energía. Sin embargo, la resistencia y la deformación máxima del concreto PPF disminuyen a temperaturas más altas, lo que indica que el efecto de la temperatura debe tenerse en cuenta al diseñar estructuras de concreto reforzado con PPF. Además, se destaca que la longitud y la dosis de las fibras de polipropileno afectan significativamente las propiedades mecánicas del concreto.

#### ***2.1.2.4. Antecedente Internacional N°04.***

El artículo de investigación elaborado por Gonzales F. (2008), obtuvo el gráfico promedio de esfuerzo-deformación para analizar el comportamiento mecánico del material compuesto Resina Poliéster-Cuerda reforzado con fibra de cáñamo. Para ello, se realizaron pruebas de resistencia a la tracción en una máquina universal de ensayos, obteniendo datos de esfuerzo y deformación de cada probeta de muestra. Posteriormente, los datos de cada serie de probetas se promediaron para crear la curva esfuerzo-deformación promedio.

Los datos se analizaron utilizando el cálculo de desviación estándar para determinar la confiabilidad de los datos. Este método de promediar las curvas de esfuerzo-deformación individuales permite obtener un comportamiento promedio representativo del material compuesto, lo que es fundamental para comprender su desempeño mecánico en condiciones de carga reales.

En la investigación se concluye que el refuerzo con fibra corta hizo al material más rígido y frágil, mientras que el refuerzo con fibra continua mejoró la resiliencia y el esfuerzo de fractura hasta un porcentaje de fibra. Además, el refuerzo con fibra continua demostró una falta de adhesión entre la fibra y la matriz.



#### ***2.1.2.5. Antecedente Internacional N°05.***

En el artículo científico de Vannei Sry et al (2018). Se centra en la predicción del módulo específico longitudinal de cuerdas trenzadas de fibra sintética de alta resistencia sin una matriz, utilizando la Teoría Clásica de Laminados (CLT). Se destaca que la unidad de N/tex se utilizó en el estudio debido a la dificultad para predecir el módulo utilizando la unidad convencional de MPa, ya que el factor de empaque (PF) de la cuerda trenzada de fibra sintética sin matriz cambia fácilmente durante la carga. El PF se refiere a la relación entre el área transversal de los hilos o hebras de una cuerda o cable y el área transversal total de la cuerda o cable, y es crucial para considerar los espacios vacíos entre los hilos o hebras en la predicción de las propiedades mecánicas de la cuerda.

Además, se señala que los cambios en el factor de empaque debido a cambios en los espacios vacíos pueden ser ignorados al utilizar la unidad de N/tex. En conclusión, el artículo resalta la utilidad de la unidad de N/tex en la predicción del módulo específico longitudinal de cuerdas trenzadas de fibra sintética sin matriz, y destaca la importancia de considerar el factor de empaque en este tipo de estudios.

#### ***2.1.2.6. Antecedente Internacional N°06.***

En el artículo científico elaborado por Hwang J. et al. (2014) se enfoca en los estándares de seguridad para los empalmes de ojo de cuerdas de fibra sintética para embarcaciones de remolque. Se discute la necesidad de estos estándares debido a los accidentes que involucran embarcaciones de remolque, se analizan los informes de accidentes, las características de las cuerdas de remolque y los empalmes de ojo. Además, se presenta una comparación de cuerdas de fibra sintética respecto a los empalmes de ojo de 3 y 8 torones.

El objetivo del estudio fue establecer estándares de seguridad para los empalmes de ojo de cuerdas de fibra sintética mediante la realización de pruebas de resistencia a la tracción, analizados mediante los estándares nacionales e internacionales, así como los hallazgos de pruebas de terceros. Los hallazgos del experimento demostraron que las cuerdas empalmadas cumplían con los estándares internacionales, que sugieren al menos cuatro empalmes.

El empalme de cuerdas requiere precisión, y el descuido en el mantenimiento después de la fabricación puede causar el desgaste de la cuerda. Se enfatiza la importancia de que los trabajadores



de embarcaciones reciban capacitación de empresas especializadas y que las cuerdas sean verificadas con frecuencia para garantizar su estado.

## **2.2. Bases Teóricas**

### **2.2.1. Fibra**

Las fibras se definen como materiales fibrosos, típicamente de origen natural o sintético, que se caracterizan por su alta resistencia, bajo peso y flexibilidad, y que pueden ser hiladas, torcidas, tejidas o entrelazadas para formar cuerdas de alta resistencia utilizadas en aplicaciones ingenieriles. Estas fibras pueden ser clasificadas en términos de su geometría, composición química, propiedades mecánicas y estructurales, y su procesamiento y tratamiento térmico para lograr las características deseadas. La selección de la fibra adecuada para una aplicación específica depende de una variedad de factores, como la resistencia, la durabilidad, la estabilidad química y ambiental, y la facilidad de procesamiento y manipulación.

#### **2.2.1.1. Fibra Natural.**

Según Vidal y Hormazábal (2016) una fibra natural es un material derivado de una fuente animal, vegetal o mineral; se compone de una o más filamentos largos y estrechos que muestran alta relación longitud/diámetro, lo que permite desarrollar propiedades como resistencia, elasticidad, flexibilidad y durabilidad. Su uso económico y cultural es importante en comunidades rurales y campesinas en diversos rincones del mundo.

#### **2.2.1.2. Fibra Sintética.**

Como indican Gupta y Kothari (2012) las fibras sintéticas son filamentos fabricados por el hombre, debido a sus buenas características físicas y químicas que proveen a estas fibras de resistencia a la tracción, al desgaste y a la abrasión, así como tener buen comportamiento ante los rayos UV, permite que tengan variadas aplicaciones como en la fabricación de textiles, industria automotriz y aeroespacial. Los materiales base de estas fibras son polímeros sintéticos como el nailon, poliéster, acrílico y polipropileno.

### **2.2.2. Cuerda**

Es un elemento de sección aparentemente cilíndrica, la misma que es pequeña en comparación a su longitud; es flexible con comodidad de manipulación y con capacidad sólo a esfuerzos de tensión; la componen elementos alargados que generalmente son fibras sintéticas o





naturales, hilos o sub cuerdas que están dispuestas de manera compacta y coherente (McKenna, 2000).

Normas internacionales también definen a la cuerda como una estructura generalmente con diámetros mayores a 3/16” que transmiten fuerzas de tracción entre dos puntos, sus características es que es compacta, flexible y torsionalmente balanceada compuestas a partir de torones trenzados o colocados juntos. La cuerda es un elemento de más de 4mm de diámetro producido a partir del trenzado, retorcido o colocado paralelo de torones (ISO 2001 *fibre Ropes and cordage* términos y definiciones).

### ***2.2.3. Tipos de Cuerdas***

#### ***2.2.3.1. Cuerda de Fibras Naturales.***

Las cuerdas de fibras naturales tienen como materia prima a las fibras naturales, como menciona McKenna (2000), poseen ventajas como no derretirse a elevadas temperaturas y buen agarre en su superficie lo que permite tener altas fricciones en los nudos, sin embargo, tiene desventajas como el deterioro por la exposición biológica y ambiental, respecto a las cuerdas de fibras sintéticas, sus propiedades de tracción son mayúsculamente menores, asimismo poseen menor longevidad.

#### ***2.2.3.2. Cuerda de Fibras Sintéticas.***

Las cuerdas de fibras sintéticas tienen como materia prima a las fibras sintéticas. Entre las ventajas de estas cuerdas se tiene la alta resistencia en comparación a su peso, respecto a las cuerdas de fibras naturales, sus propiedades de tracción y longevidad son mayores.

#### ***2.2.3.3. Cuerdas Torcidas.***

Son aquellas cuerdas formadas a partir de torsión de fibras, de acuerdo a la norma ASTM D4268 (1993), son cuerdas fabricadas a partir de torones torcidos entre sí en una dirección que es opuesta al sentido de torsión que tienen los torones, una definición similar es indicada por la CI 1202 (2003) que indica que una cuerda torcida es hecha por el torcido de tres o más torones en sentido opuesto a la dirección de torsión de los torones.



#### ***2.2.3.4. Cuerdas Trenzadas.***

Son cuerdas formadas por medio de trenzado o entrelazado de fibras. La norma ASTM D4286 define a las cuerdas trenzadas como una cuerda hecha cilíndricamente por entrelazado de torones que contienen hilos. Del mismo modo la CI 1202 (2003) define a una cuerda trenzada como una cuerda que ha sido formada por un proceso de entrelazamiento de torones.

#### ***2.2.4. Formación de la Estructura de una Cuerda***

##### ***2.2.4.1. Hilos de Fibras o Hilos Textiles.***

El comienzo de una cuerda se da con los filamentos, que generalmente son fibras cortadas. Las fibras se producen en empresas especializadas, hiladoras básicas o también por cordeleros empíricos. Las fibras se entrelazan o tuercen entre sí para tener cierta continuidad.

##### ***2.2.4.2. Hilos de Cuerda.***

Son la unidad básica para elaborar el torón de una cuerda; son el resultado del torcido de los hilos de fibras en hilos más gruesos; los hilos de cuerda pueden ser producidos en una o dos etapas de torsión. La primera etapa se reconoce como una primera operación de torsión de hilos simples; la segunda etapa consiste en realizar una segunda operación de torsión de los grupos de hilos conseguidos en la primera etapa.

McKenna (2000), indica que, para cuerdas pequeñas, los hilos de cuerda pueden considerarse como torones; en cuerdas gruesas un torón puede estar constituido de una gran cantidad de hilos de fibra torcidos entre sí, en lugar de constituirse de hilos de cuerda intermedios torcidos entre sí.

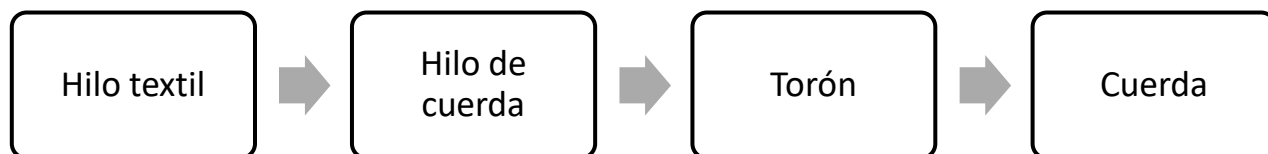
##### ***2.2.4.3. Torones de Cuerda.***

Es la última unidad de elaboración de una cuerda. Un torón es resultado de la torsión o entrelazado de unidades básicas como son los hilos de cuerda; a partir de los torones se pueden construir cuerdas largas ya sean torcidas o trenzadas (McKenna, 2000).



**Figura 2**

*Formación de la estructura de una cuerda*



### **2.2.5. El Imperio Incaico**

El imperio Incaico se convirtió en una gran potencia en los últimos cien años antes de su descubrimiento. Dominó gran parte de toda Sudamérica y su expansión fue debida a la genialidad de tres de sus Incas: Pachacútec, Túpac Yupanqui y Huayna Cápac (Rostworowski, 1999).

Al comienzo de la expansión, el poder del Incanato no comenzó de inmediato, pero se ejerció la *m'inka* que hace referencia a la reciprocidad y según Holguín (1952) significa “*rogar de alguno que me ayude prometiéndole algo*”.

#### **2.2.5.1. El Trabajo en el Imperio Incaico.**

Según Rostworowski (1999) el sistema de trabajo del imperio Incaico permitió llegar a un gran número de mano de obra, es así, que se logró grandes proyectos constructivos entre los cuales se llevaron a cabo palacios, santuarios, templos, caminos y puentes.

La fuerza reguladora de trabajo se denominaba *mita* que según el concepto andino es la prestación de trabajos ordenados que se realizan cíclicamente, todo trabajo durante el Incanato se realizaba con prestaciones rotativas ya sea para caminos, puentes, cuidado de depósitos entre otros. Es así que durante el predominio del imperio Incaico se trabajaban por medio de la *mita* y la *m'inka* acompañados de música, cantos y comidas brindadas por que iba a ser beneficiario del trabajo (p. 258-260).

#### **2.2.5.2. El Qhapaq Ñan.**

El *Qhapaq Ñan* o por su traducción del quechua “Gran Camino” es un sistema vial que conecta todo el territorio del *Tahuantinsuyo* (ver Figura 3), de un aproximado de 23 000 km de longitud usando como red principal a la Cordillera de los Andes.

El *Qhapaq Ñan* fue un punto clave para que se desarrolle la cultura Inca, debido a que su naturaleza corresponde en esencia al del sistema vial asegurando el tránsito, la comunicación y la administración tres rasgos destacados de la unificación del estado Inca. Hay tres motivos principales detrás de la construcción de este camino:

- Es necesario conectar áreas densamente pobladas a través de áreas desoladas.
- Es necesario conectar diferentes regiones ecológicas mediante relaciones económicas.
- El interés de un segmento de élite en la transmisión y difusión de la ideología Inca.

### Figura 3

*Segmentos del sistema Inca sometidos a prospecciones*



*Nota.* Adaptado de *Qhapaq Ñan* (p. 63), por J. Hyslop, 2014, Ediciones Copé.

#### 2.2.5.3. Puentes en el *Qhapaq Ñan*.

En los registros históricos y los restos arqueológicos que se encontraron muestran que no se utilizó una sola tecnología de construcción en puentes en todo el *Tahuantinsuyo*, como es el caso



del puente ubicado en Apurímac al oeste de Cusco (Figura 4), que describe Squier (1877) en su libro *The Imperial Inca Road System*. Esto debido a que había que atravesar la diversa geografía, y los registros hidrológicos muestran que la ruta no solo tenía que cruzar ríos, sino también lagos, arroyos humedales y otros lugares. Además, se evaluaba sobre las ventajas en la disponibilidad de material cercano, el ancho de la sección a ser cruzada, como también el espacio físico a atravesar, por ejemplo, profundidad, firmeza de la cimentación y altura del terraplén de la base natural a utilizar (Hyslop, 2014).

Por otra parte, Regal (1972) identifica a los puentes de la cultura Inca desde otro punto de vista, en la que hace énfasis más a estudiar la estructura que a su función y uso dentro de la sociedad Inca. Tanto Hyslop como Regal realizaron algunas aproximaciones de aprendizaje para facilitar el entendimiento de estos puentes. Dentro de sus descripciones el aporte novedoso de la cultura Inca está dentro de los puentes colgantes con superestructura de fibra. Este tipo de puentes probablemente fueron los más utilizados dentro del *Qhapaq Ñan*, ya que casi todos los documentos históricos hacen referencia a ellos.

Estas estructuras se basan en técnicas avanzadas de tejidos y trenzado basadas en plantas, lo cual es un avance de relevancia dentro de la ingeniería. Estas técnicas y sus resultados causaron una fuerte impresión tanto en los colonos como en los nativos (L. Condori, J. Rucabado, 2014).

#### **Figura 4**

*Puente colgante tejido sobre el río Apurímac al oeste de Cusco*



*Nota.* Adaptado de *The Imperial Inca Road System: exploring new paths* (p. 544), Por E.J. Squier, 1877, Editorial Rozas.

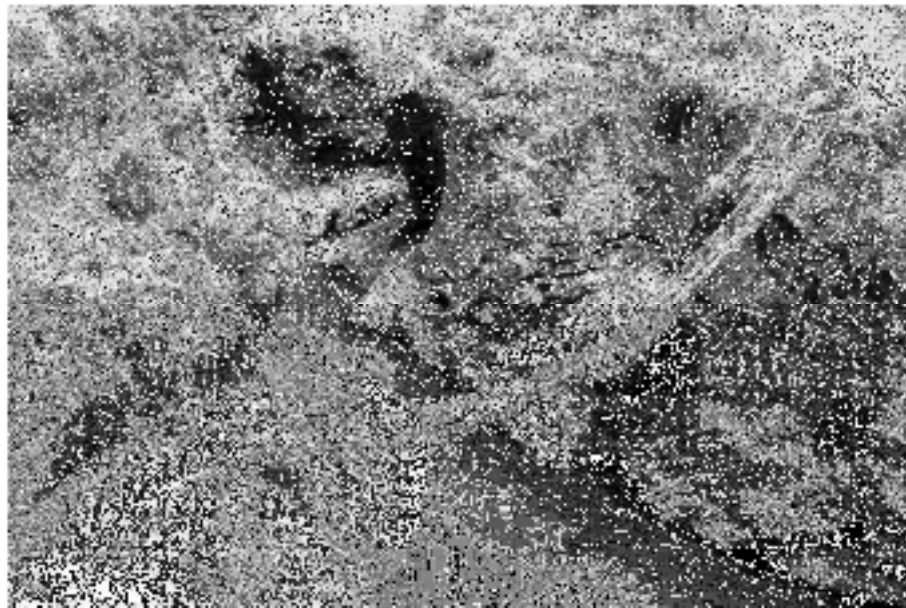


#### 2.2.5.4. El Puente *Q'eswachaka*.

El puente *Q'eswachaka* que se ubica en el distrito de *Quehue*, en la provincia de Canas, perteneciente al departamento del Cusco (Figura 5). Es utilizado para unir dos vertientes y por lo tanto posible de cruzar el río Apurímac, en una de las zonas más altas dentro del sistema vial al que pertenece, a alturas de más de 3 700 metros sobre el nivel del mar. Su nombre proviene de una combinación de los vocablos quechuas *Q'eswa*, que significa “cuerda trenzada”, y *chaka*, que significa puente, por lo que *Q'eswachaka* significa “puente trenzado”. Está elaborado de paja andina o también llamado *Ichu* y tiene más de cinco siglos de antigüedad, parte integral de la extensa red vial de las rutas Inca o *Qhapaq Ñan*. Al ser una estructura totalmente vegetal, esta condición más otros factores, como el clima, la lluvia y la insolación, se deteriora rápidamente y se renueva cada año, gracias a las decisiones de cuatro comunidades adheridas las cuales son: *Huinchiri*, *Chaupibanda*, *Collana Quehue* y *Chocayhua* (Condori, Rucabado; 2014).

#### Figura 5

*The Q'eswachaka Bridge, department of Cusco*



*Nota.* Adaptado de *The Development of the Inca State* (p. 490) Por B.S. Bauer, 1987, University of Texas Press.

Las principales cuerdas que presenta el puente *Q'eswachaka* son el *Duro* y el *Maqui*. La tecnología Inca en el trenzado de cuerdas inicia con el hilado que forman las soguillas a base de fibra, pieza que es denominada *Q'eswa* que en promedio son de 2cm de diámetro. A continuación,





con 22 de estas *Q'eswas* todas con una longitud entre los 50 metros son enroscas entre 30 a 35 varones de las comunidades y llegan a formar a lo que se le conoce como *Q'eswaska*. Y finalmente para llegar a formar los cables principales que son el *Duro* y el *Maqui* se trenzan tres *Q'eswaskas* y dos *Q'eswaskas* respectivamente. De estos dos el *Duro* vendría a ser el cable principal y el *Maqui* el cable secundario (Arróspide, 2016).

A lo largo de cuatro días, más precisamente la segunda semana de junio, cuatro comunidades designadas se reúnen en estos días, bajo la práctica de la *m'inka* o trabajo comunitario, es decir, trabajando beneficiar los miembros de la comunidad. Por lo tanto, los deberes y rituales relacionados son los siguientes (Condori, Rucabado; 2014):

**Trabajo Previo:** Con días de anterioridad, tanto hombres como mujeres y niños apilan la materia prima para secarlas, después de haber cortado y quitado las piezas más pequeñas. Luego se muele con herramientas de piedra y se sumerge en agua para aumentar la ductilidad para un mejor manejo. Cada comunidad debe respetar una cuota específica. A continuación, se inicia con el trenzado (Condori, Rucabado; 2014).

**Primer día:** Inicia el jueves en el cual se lleva a cabo el pago a la tierra, se recoge el material de trabajo y se forman las partes estructurales del puente como se aprecia en la Figura 6 (Condori, Rucabado; 2014).

### Figura 6

*Fabricación de Q'eswa por los comuneros*



*Nota.* Adaptado de *El Q'eswachaka de Canas: Ingeniería y tradición en las comunidades de Quehue* (p. 179), Por P. Mendizábal, M. Hernández, I. Huamaní, 2015, Ministerio de Cultura del Perú.



**Segundo día:** Inicia el viernes, los *Duros* se amarran a estructuras de piedra, que actúan como soportes (Figura 7). Cada *Duro* posee doce nudos, y la colocación correcta de los puentes depende de su dirección y tensión (Condori, Rucabado; 2014).

**Figura 7**

*Comuneros estirando y atando las sogas a los estribos*



*Nota.* Adaptado de *El Q'eswachaka de Canas: Ingeniería y tradición en las comunidades de Quehue* (p. 179), Por P. Mendizábal, M. Hernández, I. Huamani, 2015, Ministerio de Cultura del Perú.

**Tercer día:** El día sábado se empieza a colocar los cables desde cada extremo haciendo uso del *machu puente* (puente viejo), función que realizan los constructores/maestros tejedores o también llamados *Chakaruwaq* (Figura 8); con el siguiente orden: Primero un *Duro* y un *Maqui*, trenzados por la comunidad de Ccollana *Quehue*; a continuación, los dos *Duros* trenzados por la comunidad de *Huinchiri* y por último el *Maqui* elaborado por la comunidad de *Chaupibanda* (Arróspide, 2016).

Al término de la colocación de los *Duros* y *Maquis* es arrojado completamente el *machu puente* al río Apurímac y se procede a tensar los cables de ambos lados con veinte comuneros por lado hasta lograr el arco deseado del puente *Q'eswachaka*. Finalmente se procede al tejido mismo del puente que comprenden el *callapu* y la *mast'a*, que vendrían a ser soguillas que unen los *Duros* y *Maquis* de ambos lados del puente y el piso del puente a modo de alfombra respectivamente (Arróspide, 2016).



### Figura 8

*Maestros tejedores se encuentran a la mitad del puente*



*Nota.* Adaptado de El *Q'eswachaka* de Canas: Ingeniería y tradición en las comunidades de *Quehue* (p. 185), Por P. Mendizábal, M. Hernández, I. Huamaní, 2015, Ministerio de Cultura del Perú.

**Cuarto día:** Domingo, este día es completamente dedicado a celebrar la elaboración del puente *Q'eswachaka* donde se realizan danzas y rituales de agradecimiento (Figura 9) (Condori, Rucabado; 2014).

### Figura 9

*Comuneros de Quehue celebrando con danzas su logro*



*Nota.* Adaptado de *Festival de construcción del último puente Inca Waqra Pukara Peru Tours* (fotografía), 2022, <https://www.waqrapukaraperutours.com/festival-de-construccion-del-ultimo-puente-Inca>.



### 2.2.6. La fibra *Q'oya* (*Festuca dolicophylla*)

La fibra *Q'oya*, comúnmente llamada así en la zona de *Quehue*, la *Q'oya* es una especie de paja o pasto de la especie *festuca dolicophylla*.

De acuerdo a Vilca (2018), la *festuca dolicophylla* es una familia botánica de las gramíneas, distribuida en regiones frías, principalmente en cordilleras; se concentra en regiones alto-andinas con alturas entre los 3900msnm y 4500msnm.

#### 2.2.6.1. Taxonomía y Características Morfológicas.

Vilca (2018), indica que para la *festuca dolicophylla*:

Reino: *Plantae*

División: *Fanerógamas*

Sub División: *Angiospermas*

Clase: *Liliópsidas*

Sub Clase: *Monocotiledóneas*

Orden: *Graminales*

Familia: *Poaceace o Gramineae*

Sub Familia: *Festucoideas*

Tribu: *Festuceae*

Género: *Festuca*

Especie: *Festuca Dolichophylla*

Es una planta perenne con macollos en abundancia, su tamaño (de 40 a 90cm) varía de acuerdo a su edad. Con lígula menor a 1mm de largo, sus laminas foliares varían de 10 a 35cm de largo, sin embargo, pueden llegar a sobrepasar al tallo, panícula variable de 9 a 16cm de largo, glumas agudas y desiguales, con forma oblongo lanceolada y en ocasiones ligeramente acuminada y escabrosa en dirección al ápice.



### 2.2.6.2. *Composición Química.*

Las fibras naturales, como indican Mediavilla et al. (2018), se componen en su mayoría por los polímeros estructurales: celulosa, hemicelulosa y lignina. En una menor medida por compuestos de bajo peso molecular, proteínas, sales minerales y solubles.

- Celulosa: La celulosa es un polímero de glucosa que proporciona resistencia y rigidez a la fibra de ichu. Esta propiedad le confiere una alta durabilidad y capacidad para soportar tensiones mecánicas.
- Hemicelulosa: Las hemicelulosas son polisacáridos que, junto con la celulosa, forman la matriz de la pared celular de las plantas. La presencia de hemicelulosas en la fibra *Q'oya* le confiere propiedades adhesivas y de retención de agua. Esto hace que la fibra sea útil en aplicaciones donde se necesite un material que pueda retener la humedad.
- Lignina: La lignina es un polímero complejo que proporciona rigidez y resistencia a la compresión a las paredes celulares de las plantas. La presencia de lignina en la fibra le confiere resistencia a la degradación biológica y a los agentes externos como la humedad y los microorganismos. Esto hace que la fibra de *Q'oya* sea un material duradero y resistente, adecuado para aplicaciones donde se requiera estabilidad estructural a largo plazo.

### 2.2.7. *Procedimiento de Elaboración de las Cuerdas del Puente Q'eswachaka*

El proceso para la elaboración de la superestructura del puente *Q'eswachaka* (Cuerdas) se puede resumir a grandes rasgos en:

- Acopio: Recolección de la *Q'oya*.
- Secado: Secado a temperatura ambiente en domicilios
- Ablandado: Con las fibras de *Q'oya* humedecidas previamente, se golpea con una piedra para quitar las espinas y darles mayor trabajabilidad al momento de realizar el tejido de las cuerdas.
- Hilado: Soguilla formado por un manojo de *Q'oya* (Figura 12) la cual es hilada y se le conoce como *Q'eswa* (Figura 13).
- Tendido: Se extienden *Q'eswas* que son enroscadas por los hombres de la comunidad de *Quehue* para formar una soga que denominan *Q'eswaska* (Figura 15).



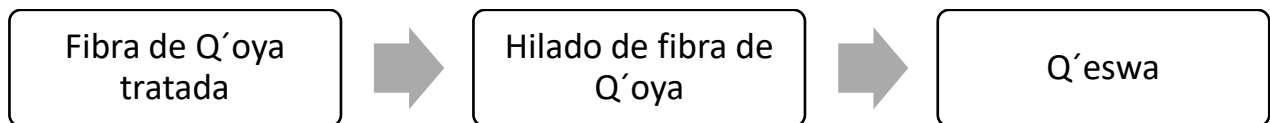
- Trenzado: Se trenzan las *Q'eswaskas* para formar la cuerda secundaria denominada *Maqui* (Figura 17) formada por dos *Q'eswaskas* y la cuerda principal denominada *Duro* (Figura 19) formado por tres *Q'eswaskas*.

### 2.2.7.1. *Q'eswa*.

Es la cuerda que constituye la unidad básica de la estructura de las cuerdas más grandes del puente *Q'eswachaka*, es una cuerda torcida, fabricada a partir de torsión en dos etapas de dos grupos de manojos de fibras de *Q'oya*.

#### Figura 10

*Formación secuencial de la estructura de una Q'eswa*



#### Figura 11

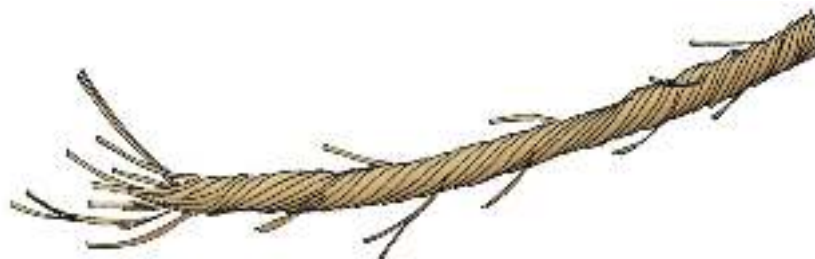
*Stipa Ichu Fibra vegetal del que está hecho el puente Q'eswachaka*



*Nota.* Adaptado de *La reinención cultural como factor de desarrollo sostenible. Caso: puente Inca de Q'eswachaka* (p. 95), Por A. Arróspide, 2016, Universidad nacional Mayor de San Marcos.

#### Figura 12

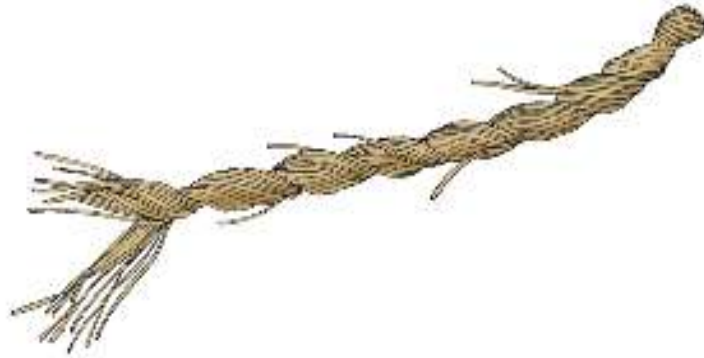
*Fibra vegetal enroscada o hilada*



*Nota.* Adaptado de *La reinención cultural como factor de desarrollo sostenible. Caso: puente Inca de Q'eswachaka* (p. 95), Por A. Arróspide, 2016, Universidad nacional Mayor de San Marcos.

**Figura 13**

*Q'eswa o primera soguilla en detalle*



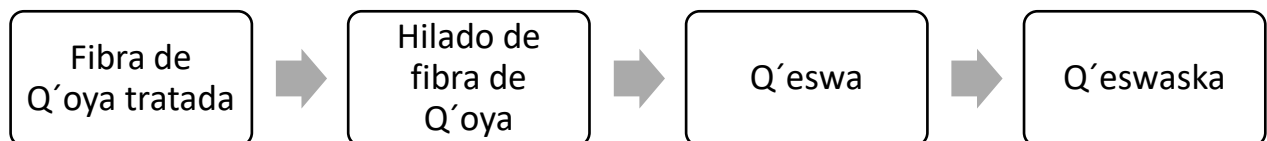
Nota. Adaptado de *La reinención cultural como factor de desarrollo sostenible. Caso: puente Inca de Q'eswachaka* (p. 96) Por A. Arróspide, 2016, Universidad nacional Mayor de San Marcos.

#### 2.2.7.2. *Q'eswaska*.

Es una cuerda producto de la torsión de un grupo de *Q'eswas*, es el torón con el que se tuercen los *Maquis* y con la que se trenzan los *Duros*.

**Figura 14**

*Formación secuencial de una Q'eswaska*



**Figura 15**

*Q'eswaska en detalle*



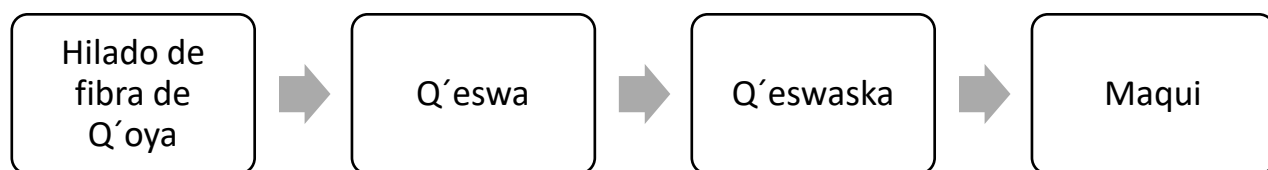
Nota. Adaptado de *La reinención cultural como factor de desarrollo sostenible. Caso: puente Inca de Q'eswachaka* (p. 96), Por A. Arróspide, 2016, Universidad nacional Mayor de San Marcos.

### 2.2.7.3. Maqui.

Un *Maqui* es una cuerda torcida; se compone de dos *Q'eswaskas* (los mismos que son los torones para esta cuerda), torcidas entre sí.

**Figura 16**

*Formación Secuencial de un Maqui*



**Figura 17**

*Maqui en detalle*



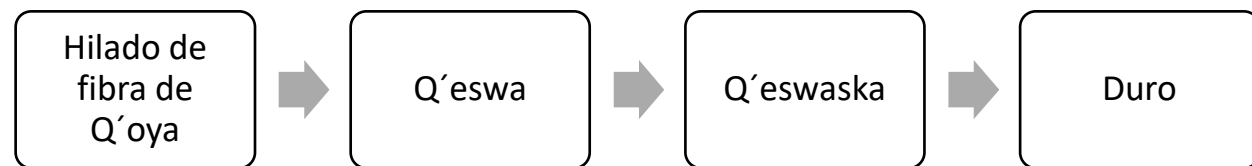
*Nota.* Adaptado de *La reinención cultural como factor de desarrollo sostenible. Caso: puente Inca de Q'eswachaka* (p. 97), Por A. Arróspide, 2016, Universidad nacional Mayor de San Marcos.

### 2.2.7.4. Duro.

Un *Duro* es una cuerda trenzada; formada por tres *Q'eswaskas* (torones para esta cuerda) que se entrelazan entre sí bajo un mismo patrón.

**Figura 18**

*Formación secuencial de un Duro*

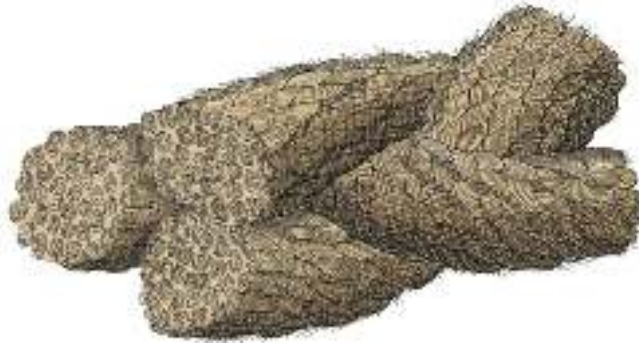






## Figura 19

*Duro en detalle*



*Nota.* Adaptado de *La reinención cultural como factor de desarrollo sostenible. Caso: puente Inca de Q'eswachaka* (p. 97), Por A. Arróspide, 2016, Universidad nacional Mayor de San Marcos.

### **2.2.8. Propiedades Físicas y Mecánicas de las Cuerdas de Fibra**

Las propiedades físicas y mecánicas son dos tipos de propiedades que se utilizan para describir el comportamiento de los materiales. La principal diferencia entre ellas radica en que las propiedades físicas son aquellas que se pueden medir sin cambiar la composición química del material, mientras que las propiedades mecánicas se refieren a la respuesta del material ante fuerzas o cargas externas.

#### **2.2.8.1. Propiedades Físicas.**

- a) Densidad Lineal: Cantidad de masa por unidad de longitud ISO 1968 (2004).
- b) Densidad: La densidad de una cuerda es la cantidad de masa por unidad de volumen, y puede afectar su flotabilidad y su capacidad para hundirse o permanecer en la superficie del agua ASTM D4268 (1993).
- c) Longitud de Tendido: Longitud de una vuelta completa de un hilo en una hebra, o una hebra en una cuerda, medida en línea recta paralela al eje de la hebra o cuerda ISO 1968 (2004).
- d) Paso Trenzado: Distancia longitudinal a lo largo del eje de la cuerda desde un punto en la corona de una trenza hasta el punto correspondiente de una trenza a lo largo ISO 1968 (2004).
- e) Diámetro: es la distancia entre dos puntos opuestos en la superficie exterior de la cuerda. El diámetro puede variar según el tipo de cuerda y su aplicación ISO 2307 (2010).



La densidad lineal, longitud de tendido y el paso trenzado se miden con el cable bajo una tensión específica llamada tensión de referencia.

### ***2.2.8.2. Propiedades Mecánicas.***

Entre las principales propiedades mecánicas podemos mencionar:

- a) Esfuerzo máximo: Es la máxima carga que una cuerda puede soportar antes de romperse. Esta propiedad se mide de acuerdo a la norma ISO 2307 (2010).
- b) Elasticidad: es la capacidad de la cuerda para deformarse bajo carga y recuperarse completamente cuando se libera la carga. La elasticidad se mide de acuerdo a la norma CI 1500- (2002).
- c) Deformación de cuerda: La deformación de cuerda corresponde al incremento medido en la longitud de la cuerda cuando la tensión a la que está sometido aumenta desde un valor inicial (tensión de referencia) hasta un valor igual al 75% de la resistencia a la rotura mínima especificada en la cuerda ASTM D4268 (1993).
- d) Deformación Unitaria: según mencionan Pytel A. y Singer F. (1987), la deformación unitaria es el cociente del alargamiento y la longitud en la que se ha producido.

### ***2.2.9. Máquinas de Ensayo a Tracción***

La mayoría de las máquinas de prueba registran solo datos de extensión de fuerza. Cuando la capacidad de una máquina de prueba se ajusta para adaptarse a la densidad lineal predeterminada o el área de la sección transversal de la muestra, en lugar de la fuerza, se registrará la tensión. Cuando la máquina se ajusta para registrar extensión en términos de longitud de muestra unitaria, el gráfico se puede leer directamente en porcentaje de elongación o esfuerzo. Cuando estas condiciones no existen, la curva de fuerza-extensión debe convertirse para obtener las características de esfuerzo-deformación.

#### ***2.2.9.1. Tipos de Máquina de Ensayos a Tracción.***

##### **Según su Principio de funcionamiento**

- a) CRE: Tasa de extensión constante.

Una máquina de ensayo en la que la tasa de aumento de la longitud del espécimen es uniforme con el tiempo ASTM D5035 (1995).





b) CRT: Tasa de velocidad constante.

Máquina de prueba en la que la abrazadera de tracción se mueve a un ritmo constante y la fuerza se aplica a través de la otra abrazadera, que se mueve apreciablemente para activar un mecanismo de medición de fuerza, produciendo una tasa de aumento de fuerza o extensión que generalmente no es constante y es dependiendo de las características de extensión del espécimen ASTM D76 (2011).

c) CRL: Tasa de carga constante (fuerza)

Una máquina de ensayo en la que la tasa de aumento de la carga que se aplica a la muestra es uniforme con el tiempo después de los primeros 3s ASTM D5035 (1995).

### **Según su sistema de sujeción**

a) Máquina de ensayo tipo polea (*cors de chasse*): En el caso de esta máquina de ensayo de tracción el diámetro de las poleas o trinquetes que se sujeten las probetas debe ser igual a al menos 10 veces el diámetro del cable del ensayo (ISO 2307, 2010).

b) Máquina de ensayo con bolardos para empalmes de ojo: El diámetro de los bolardos que pasan a través de las piezas de prueba con empalme de ojo debe ser al menos el doble del diámetro de la cuerda que se está probando (ISO 2307, 2010) (ASTM D76, 2011).

c) Máquina de ensayo de agarre de cuña: La cuña se utiliza para sujetar el material de forma segura y reducir el riesgo de deslizamiento durante la prueba (ISO 2307, 2010) (ASTM D76, 2011).

#### **2.2.9.2. Diseño Operativo de la Máquina de Tracción.**

Se prefiere el uso de máquinas accionadas por motor en lugar de máquinas accionadas manualmente debido a un mejor control de las pruebas (ASTM D76, 2011).

a) El funcionamiento de las máquinas de tracción está diseñado para trabajar en el tiempo promedio en el cual especifica las normas individuales, en la norma ASTM D4268 (1993) indica que la duración del ensayo hasta el 20% de la fuerza de rotura estimada debe darse para un tiempo de 20 a 200 segundos; por lo tanto, su tasa de operación de rotura debe ser ajustable.

b) El montaje de las *Maquinas* pueden estar diseñadas para el montaje manual o automático de la muestra de cuerda en la colocación a las abrazaderas o dispositivos de sujeción.



### **2.2.9.3. Verificación de la Fuerza y Desplazamiento Indicados.**

- a) La verificación de la calibración de las máquinas de tracción debe ser realizada o supervisada por una persona calificada competente para ejercer un juicio científico en asuntos que no estén cubiertos en normas internacionales sobre máquinas de tracción universal.
- b) Se deberá verificar las condiciones en que la máquina opera, teniendo en cuenta todos los accesorios y mecanismos de registro en funcionamiento.
- c) Según indica la norma ASMT D76 (2011) La recolección de datos de fuerza y desplazamiento puede realizarse de manera automática preferiblemente debido a un mejor control de pruebas o en su defecto de manera manual mediante dispositivos de grabación.

### **2.2.10. Empalmes**

La norma ISO 1968 (2004) indica que el empalme es un método de unir una cuerda a sí misma, a otra cuerda, o de producir un ojo en su extremo o extremos entretejiendo o torciendo los hilos para dar una unión que retiene una alta proporción de la fuerza original de la cuerda.

#### **2.2.10.1. Tipos de Empalmes.**

- a) El empalme de ojo (*eye splice*); es cuando un extremo de la cuerda se empalme dentro del cuerpo de la misma cuerda.
- b) El empalme de extremo a extremo; es cuando dos cuerdas se unen de extremo a extremo entrelazando sus torones.
- c) El empalme de extremos de una misma cuerda para formar una arandela circular.
- d) Empalme con clips en las que se usan abrazaderas.

#### **Empalme tipo ojo.**

La norma CI 1303 (1998) la define como una terminación final en forma de bucle en una cuerda, para facilitar su prueba y/o uso independientemente de la construcción. El empalme de ojo se puede aprender mediante manuales cuando nos referimos a cuerdas de diámetros no considerables, como los de tres torones, que a menudo se requieren pequeñas prácticas para producir los mejores resultados. Los más experimentados pueden hacer empalmes que coincidan con la resistencia de la cuerda. El empalme de ojo (*eye splice*) se puede realizar alrededor de un tambor en una máquina de tracción universal. Este tipo de empalme se realiza separando los torones



en el extremo a una distancia requerida según el diámetro de la cuerda y diámetro del tambor doblando la cuerda en un lazo alrededor del tambor, posteriormente estos torones se introducen dentro del cuerpo de la misma cuerda. Esta zona empalmada se tensará y adquirirá agarre a medida que se vaya aplicando cargas de tracción.

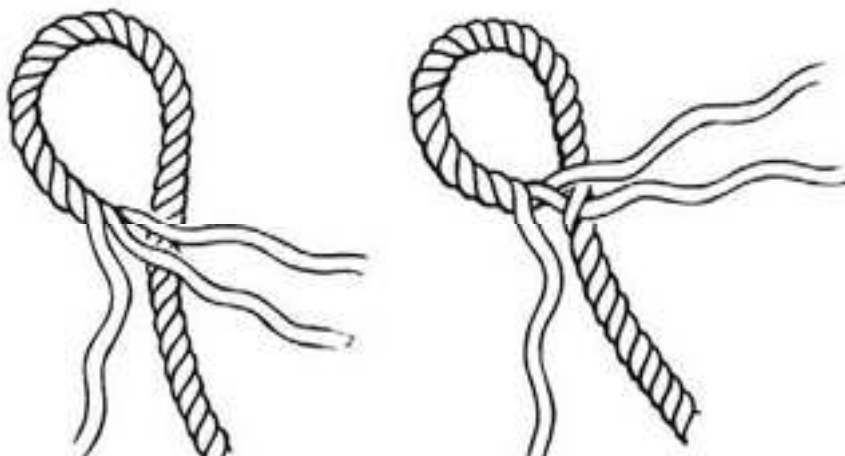
### Ejemplo de empalme tipo ojo

Los pasos para realizar el empalme de ojo de en el caso de una cuerda de tres torones es:

- El primer paso a realizar (Figura 20) es desatar el extremo de la cuerda y se debe determinar el tamaño del ojo, el cual estará condicionado por el diámetro del tambor.
- Se debe de aflojar el extremo de la cuerda una distancia suficiente para que cumpla con la longitud de empalme que se requiera, por lo general se deben prever que el empalme genere como mínimo 3 pasos en la cuerda trenzada del cuerpo.
- Los torones desenredados de la cuerda se envuelven y pegan con cinta para evitar que se deshagan.
- Se deberá colocar el torón número 2 entre uno de los torones del cuerpo de la cuerda de tal manera que el torón número 1 quede en la parte superior del torón número 2 y el torón número 3 por debajo del torón número 2 como se muestra en la figura.

### Figura 20

*Primer paso \_Empalme de ojo en cuerda de 3 torones*



*Nota.* Adaptado de *A development on the eye splice's safety standards of synthetic fibre Ropes for towing vessel* (p. 30), Por J. Hwang, 2014, Journal of Korea Ship Safety Technology Authority.



- A continuación, para el segundo paso (Figura 21), el torón que queda por debajo del torón número 2 se levanta por introducir el torón número 1.

### Figura 21

*Segundo paso \_Empalme de ojo en cuerda de 3 torones*



*Nota.* Adaptado de *A development on the eye splice's safety standards of synthetic fibre Ropes for towing vessel* (p. 30), Por J. Hwang, 2014, Journal of Korea Ship Safety Technology Authority.

- Para el tercer paso (Figura 22), se deberá pasar el torón número 3 por el ultimo torón del cuerpo de la cuerda como se realizó para los anteriores torones. Esto hace que los torones se tuerzan y de esta manera nos aseguramos que el empalme quede totalmente asentado.

### Figura 22

*Tercer paso \_Empalme de ojo en cuerda de 3 torones*



*Nota.* Adaptado de *A development on the eye splice's safety standards of synthetic fibre Ropes for towing vessel* (p. 31), Por J. Hwang, 2014, Journal of Korea Ship Safety Technology Authority.



- En este punto se vuelve a repetir los anteriores pasos torciendo desde el torón número 2, de esta manera hasta cumplir con la longitud de empalme que se requiera para el tipo de cuerda o generar 3 pasos de cuerda.
- Al realizar correctamente este empalme se generará una longitud empalmada delgada y que se vea bien.

### Empalme con clips para cuerdas de fibra

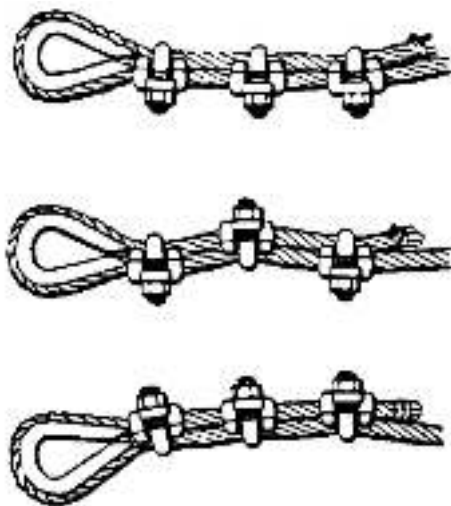
Este tipo empalmes no es muy recomendable para fibras, debido a que la eficiencia de una conexión como estas realizadas no llega al máximo de su eficiencia.

La forma correcta de hacer estos empalmes es colocar las abrazaderas en U en el extremo corto o muerto de la cuerda. Esto es para proteger la parte de la cuerda que soporta tensión contra el aplastamiento.

Según la norma *Wire and fiber Rope and rigging* (1999), se indica que se pueden usar como mínimo dos abrazaderas de 3/8" que es lo recomendable para obtener una fijación satisfactoria. Aunque es posible sujetar la cuerda con menos abrazaderas, sin embargo, será necesario aplicar mayor fuerza presión en las abrazaderas por lo tanto aumenta el aplastamiento en la cuerda y en consecuencia disminuye la eficiencia de la cuerda.

### Figura 23

*Empalme con abrazaderas tipo U*



*Nota.* Adaptado de *Wire and Fiber Rope and Rigging* (p. 48), Por Naval Sea Systems Command, 1999, <https://man.fas.org/dod-101/sys/ship/nstm/ch613.pdf>



### 2.2.11. Curva Esfuerzo-Deformación

La manera más adecuada de poder obtener las propiedades y conocer el comportamiento del material es representar el esfuerzo de tracción ( $\sigma$ ) versus a su deformación unitaria ( $\epsilon$ ).

Shengwen et al. (2019) indican que, la curva esfuerzo-deformación se puede obtener del ensayo de tracción uniaxial convencional. La deformación está definida por la deformación uniaxial en dirección de la tracción entre la longitud inicial de referencia; el esfuerzo está definido por la carga entre el área de sección inicial.

Asimismo, de acuerdo a la ASTM E 111 (2010), la curva de esfuerzo-deformación muestra cómo se relaciona el nivel de esfuerzo aplicado a un material con la cantidad resultante de deformación. Es una herramienta fundamental para analizar el comportamiento mecánico y determinar propiedades clave como el módulo de elasticidad, resistencia a la tracción, ductilidad y fragilidad del material.

La curva esfuerzo-deformación se divide en tres regiones principales: elástica, plástica y de fractura. En la región elástica, el material se deforma reversiblemente siguiendo la ley de Hooke, donde el esfuerzo está directamente relacionado con la deformación. El módulo de elasticidad puede ser determinado a partir de la pendiente encontrada en esta región específicamente.

En la región plástica, el material sufre una deformación permanente e irreversible. El esfuerzo en esta zona puede variar dependiendo del tipo de material y las circunstancias de carga. La resistencia a la tracción y compresión se determinan mediante los puntos máximos que aparecen en la curva tensión-deformación.

La región de fractura es el lugar donde ocurre la falla del material. Esta puede ser una fractura frágil, en la que el material se rompe sin sufrir deformación significativa, o una fractura dúctil, en la que el material se deforma considerablemente antes de romperse. La ductilidad y fragilidad pueden evaluarse a partir de esta región específica representada por la curva esfuerzo-deformación.

### 2.2.11.1. Propiedades de la Curva Esfuerzo-Deformación.

#### Módulo de elasticidad

Es la relación entre el cambio de tensión y el cambio de deformación dentro de la región elástica del material en una curva esfuerzo-deformación. Esta relación se calcula a partir del esfuerzo expresado en fuerza por unidad de área de sección transversal y la deformación se expresa como una fracción de la longitud original con unidad adimensional ASTM D4848 (1998).

#### Módulo de cuerda

Es la relación entre el cambio de tensión y el cambio de deformación entre dos puntos específicos de la curva esfuerzo-deformación ASTM D4848 (1998).

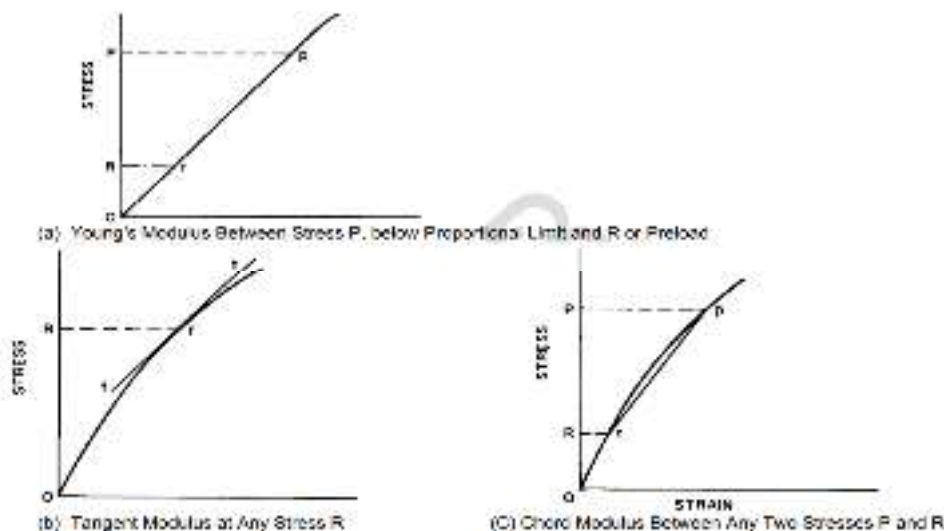
Estimar el valor del módulo cuerda o del módulo de elasticidad para el cambio en la deformación en un rango de tensión específico es útil para materiales que tienen un comportamiento de esfuerzo-deformación de manera elástica no lineal ASTM E111 (2010).

#### Módulo Tangente

Es la relación entre el cambio de deformación derivado de la tangente en cualquier punto de la curva esfuerzo-deformación ASTM D4848 (1998).

#### Figura 24

*Métodos para la obtención del módulo de Young, módulo tangente y módulo de elasticidad*



Nota. Adaptado de *Standard Test Method for Young's Modulus, Tangent Modulus, and Chord Modulus* (p. 2), Por ASTM E111 (2010).



### **Esfuerzo máximo**

Según Chang y Perez (2015), el esfuerzo máximo corresponde al máximo valor obtenido en la ordenada del diagrama de esfuerzo-deformación.

### **Deformación**

Cambio en la forma de un material causado por fuerzas de compresión, corte, tensión o torsión ASTM D2731 (2001).

### **Deformación de cuerda o elongación**

Algunos usos finales del cable de fibra requieren información sobre el aumento de la longitud del cable cuando se aplican fuerzas iniciales y otros usuarios requieren información sobre la capacidad potencial de absorción de energía del cable de fibra cuando se usa por primera vez.

Es la relación entre la extensión de un material y la longitud del material antes de su estiramiento ASTM D2731 (2001).

#### ***2.2.12. Diagramas de Respuesta***

A través de estas representaciones muchos puntos clave pueden ilustrarse e interpretarse en términos físicos, matemáticos o computacionales.

El comportamiento estático de muchas estructuras se puede caracterizar por una respuesta de esfuerzo-deformación o fuerza-desplazamiento en la que los gráficos reales obtenidos por ensayos experimentales generalmente son no lineales sin embargo estas curvas se pueden normalizarse para obtener respuestas lineales en su forma elástica hasta que llega a su esfuerzo máximo y continua con un comportamiento no lineal hasta su fractura o falla (Felippa,2001).

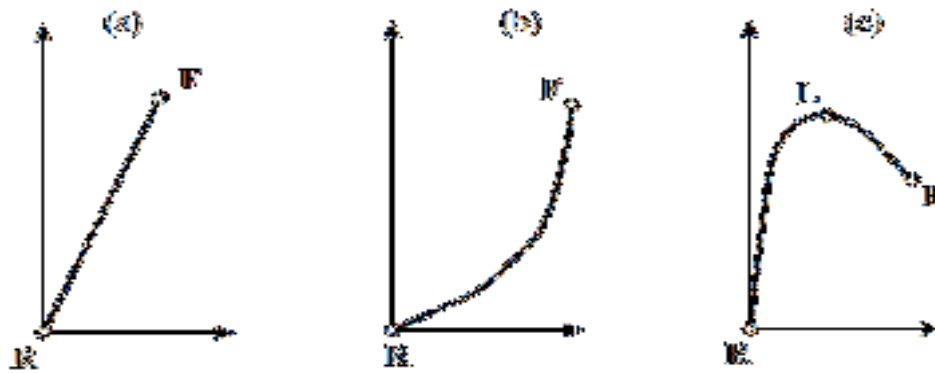
##### ***2.2.12.1. Formas Básicas de Respuesta.***

Los diagramas de respuesta según Felippa (2001) son de 3 tipos como se muestra en la Figura 25 y son: Lineal, endurecimiento/rigidización (*hardening/stiffening*) y ablandamiento (*softening*). Los símbolos F y L identifican los puntos de falla y limite respectivamente.



**Figura 25**

Formas básicas de respuesta no lineal: (a) Lineal hasta la falla frágil, (b) Endurecimiento (*hardening/stiffening*), (c) ablandamiento (*softening*)



*Nota.* Adaptado de *Nonlinear Finite Element Methods*. Por C. Felippa, 2001, Department of Aerospace Engineering Sciences and Center for Space Structures and Controls University of Colorado.

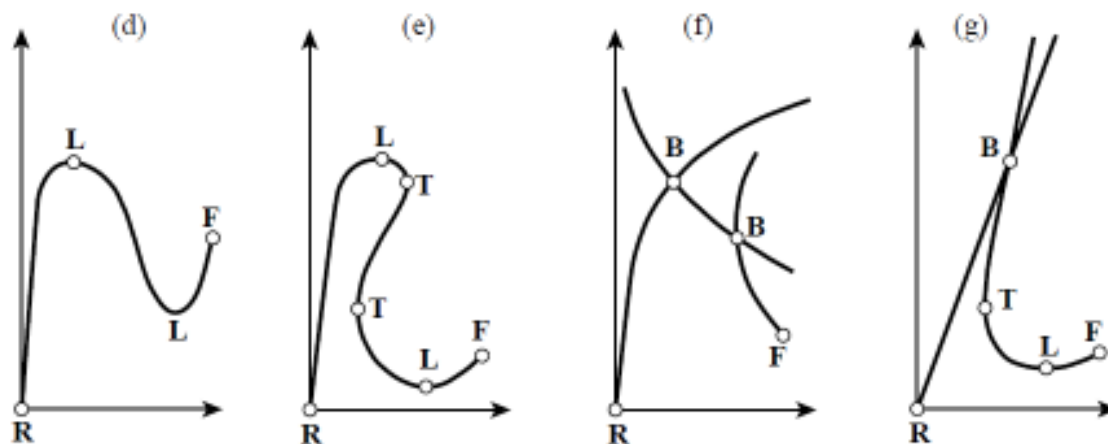
- (a) Lineal hasta la falla frágil, es característica de los cristales puros, vitreos y de ciertos materiales compuestos de alta resistencia que contienen fibras.
- (b) Endurecimiento/Rigidización (*hardening/stiffening*), es característica típica de cables, redes y aquellas que son llamadas tenso estructuras. El efecto de endurecimiento/rigidización es a causa de la adaptación de la geometría a las cargas que se aplican.
- (c) Ablandamiento (*softening*), es una característica más común para materiales estructurales que las dos respuestas anteriores. La respuesta sigue un efecto de ablandamiento repentino o gradual.

#### **2.2.12.2. Formas de Respuesta Complejos.**

Según Felippa (2001), se tienen otras formas de diagramas de respuesta como se muestran en la Figura 26 y son: *snap-through*, *snap-back*, bifurcación (*bifurcation*), bifurcación combinada con puntos límite y retroceso.

**Figura 26**

*Formas de respuesta complejas: (d) snap-through, (e) snap-back, (f) bifurcación (bifurcation), (g) bifurcación combinada con puntos límite y retroceso*



*Nota.* Adaptado de *Nonlinear Finite Element Methods*. Por C. Felippa, 2001, Department of Aerospace Engineering Sciences and Center for Space Structures and Controls University of Colorado.

- (d) *snap-through* combina el ablandamiento con el endurecimiento siguiendo el segundo punto límite.
- (e) *snap-back* es un “*snap-through* exagerado” en el que la curva de respuesta “retrocede” con la aparición de puntos de inflexión.
- En los diagramas anteriores la respuesta era una única curva. La presencia de puntos de bifurcación (pandeo) como en (f) y (g) introduce más características.

### **2.2.13. Método de la Ingeniería o Científico**

Según Montgomery (2002):

Es el enfoque que se aplica para formular y resolver problemas de investigación. Se considera los siguientes pasos

- Formular una descripción clara y concisa del problema.
- Identificar los problemas más importantes que pueden intervenir en la solución del problema



- Plantear un modelo del problema haciendo uso de conocimiento científico o de la ingeniería consignando limitaciones.
- Realizar los experimentos apropiados y recolectar datos para probar o validar el modelo tentativo o las conclusiones planteadas.
- Refinar el modelo con base a los datos observados.
- Manipular el modelo para contribuir a desarrollar una solución al problema.
- Realizar un experimento apropiado para confirmar que la solución propuesta del problema es efectiva.
- Sacar conclusiones o hacer recomendaciones con base a la solución del problema.

#### **2.2.14. OriginPro**

*OriginPro* es un software utilizado para fines de análisis de datos y gráficos, es ampliamente utilizado por un número sustancial de científicos e ingenieros en diversos sectores, incluyendo empresas comerciales, académicos y laboratorios gubernamentales de todo el mundo. *OriginPro* tiene una interfaz fácil de usar adecuada para personas con menos experiencia, mientras que también ofrece opciones avanzadas de personalización para los usuarios que han desarrollado un mayor nivel de competencia con el software (OriginLab, s.f.).

En la investigación las gráficas de: las curvas agrupadas, ajuste polinómico de 3er grado, curva representativa mediante promedio de curvas múltiples, error y desviación estándar de curva promedio, módulo de cuerda; fueron realizadas en el software *OriginPro* versión 2021 v9.8.0.200.

*OriginPro* proporciona una amplia gama de herramientas para el análisis estadístico y son los siguientes:

##### **2.2.14.1. Estadística Descriptiva.**

Un conjunto de técnicas estadísticas que se utilizan para resumir y describir datos, incluyendo tablas, gráficas y realizar cálculos. (Zamora, 2003). A continuación, se presentan algunas pruebas de estadística descriptiva.

- Medidas de tendencia central: Media aritmética, mediana, Moda.
- Medidas de dispersión: Varianza, Desviación estándar, Rango, Rango intercuartílico
- Tablas de frecuencia



- Histogramas y gráficos de barras
- Diagrama de cajas
- Diagramas de dispersión
- Gráficos circulares

#### ***2.2.14.2.Pruebas Paramétricas.***

Según Walpole (2013) se basa en la suposición que los datos siguen típicamente una distribución norma. Además, se asume que las observaciones sean independientes y muestren varianzas homogéneas.

Ejemplos de pruebas paramétricas:

- t de Student
- Analisis de varianza (ANOVA)
- Regresion Lineal (Ajuste polinómico)
- Correlacion de Pearson
- Test de Grubbs

#### ***2.2.14.3.Pruebas no Paramétricas.***

Según Siegel (1995) no se asume que los datos sigan una distribución específica, es decir no cumple con los supuestos de normalidad ni de homogeneidad de varianzas. Por lo cual se tienen pruebas más flexibles y robustas. Ejemplos de pruebas no paramétricas.

- Test de Wilconxon
- Test de Kruskall-Wallis
- U Mann Whitney
- Correlación de Spearman
- Chi cuadrado

### **2.3.Hipótesis**

#### ***2.3.1.Hipótesis General***

La curva esfuerzo-deformación del tipo de cuerdas principales del puente *Q'eswachaka* es una curva que presenta los fenómenos de endurecimiento en una primera fase y ablandamiento en una fase posterior.



### **2.3.2. Hipótesis Específicas**

- El módulo de elasticidad del tipo de cuerdas principales del puente *Q'eswachaka* será superior a 44.71Mpa tanto para la condición húmeda y condición seca (Ver Anexo I).
- El esfuerzo máximo del tipo de cuerdas principales del puente *Q'eswachaka* es mayor a 8.59Mpa tanto para la condición húmeda y condición seca (Ver Anexo I).
- La deformación unitaria máxima del tipo de cuerdas principales del puente *Q'eswachaka* será superior al 14.71% tanto para la condición húmeda y condición seca (Ver Anexo I).
- La deformación de cuerda del tipo de cuerdas principales del puente *Q'eswachaka* será superior a 5% (Ver Anexo I).

## **2.4. Definición de Variables**

### **2.4.1. Variables**

#### **2.4.1.1. Variable Dependiente.**

La variable dependiente para la investigación es la curva esfuerzo-deformación.

#### **2.4.1.2. Variable Independiente.**

La variable independiente para esta investigación es el estado de las cuerdas principales del puente *Q'eswachaka* en condiciones húmeda y seca.



2.4.2. Cuadro de Operacionalización de Variables.

**Tabla 1**

Cuadro de operacionalización de variables

“EVALUACIÓN DE LA CURVA ESFUERZO-DEFORMACIÓN MEDIANTE ENSAYOS A TRACCIÓN DEL TIPO DE CUERDAS PRINCIPALES DEL PUENTE Q’ESWACHAKA EN CONDICIONES HÚMEDA Y SECA”				
Variable	Definición Conceptual	Dimensiones	Indicadores	Unidades
Variable dependiente:	Según Shengwen et al. (2018) la curva esfuerzo-deformación se puede obtener del ensayo de tracción uniaxial convencional. La deformación está definida por la deformación uniaxial en dirección de la tracción entre la longitud inicial de referencia; el esfuerzo está definido por la carga entre el área de sección inicial	Módulo de elasticidad	Secante de la recta elástica	MPa,
Curva esfuerzo-deformación		Esfuerzo	Esfuerzo Máximo	MPa,
		Deformación	Deformación en rotura	mm/mm, %
Variable independiente:	Se identifican como cuerdas principales del puente <i>Q’eswachaka</i> a las sogas denominadas <i>Maqui</i> y <i>Duro</i> que están conformadas por dos y tres <i>Q’eswaska</i> respectivamente, esta última compuesta por <i>Q’eswas</i> (Arróspide, 2016) las cuales tienen propiedades inherentes como el contenido de humedad, características geométricas (área de sección transversal y longitud), y densidad lineal. (Chang y Pérez 2015)	Contenido de humedad	Porcentaje	%
Estado de las cuerdas principales del puente		Características geométricas	Longitud	cm
<i>Q’eswachaka</i> en condiciones húmeda y seca			Área de sección transversal	cm <sup>2</sup>
		Densidad lineal	Masa/longitud	g/km (tex)



## Capítulo III: Método

### 3.1. Metodología de la Investigación

#### 3.1.1. Enfoque de la Investigación

##### 3.1.1.1. Cuantitativo.

La presente investigación tiene un enfoque tipo cuantitativo ya que según Hernández et al. (2014) en el enfoque cuantitativo se tiene la necesidad de medir magnitudes, además de que la medición es el fundamento de la recolección de datos. Para el caso de la investigación presente se justifica este enfoque ya que en su desarrollo se manipulan ensayos secuenciales según los parámetros y criterios de la normativa vigente para la realización de ensayos a tracción mediante la máquina de tracción universal con lo que se obtendrán resultados de magnitudes cuantificables que al interpretarlas podremos determinar la curva de esfuerzo-deformación de los elementos estructurales del puente de *Q'eswachaka*.

#### 3.1.2. Nivel o Alcance de la Investigación

El nivel de investigación de esta tesis es descriptivo correlacional, porque según a lo que menciona Hernández et al. (2014) una investigación puede clasificarse en varios tipos, incluyendo exploratoria, descriptiva, correlacional y explicativa. Sin embargo, hay que señalar que la investigación no puede definirse únicamente por estas categorías. En otras palabras, incluso si un estudio es primordialmente exploratorio en su naturaleza, seguirá incorporando características descriptivas. Asimismo, un estudio de correlación abarcará componentes descriptivos, al igual que otros tipos de investigación dentro del mismo ámbito.

El nivel descriptivo pretende definir con precisión los atributos, cualidades y perfiles de los individuos, colectivos, comunidades, procedimientos, objetos o cualquier otra entidad que esté bajo control. En otras palabras, el objetivo primordial de su estudio es únicamente evaluar o reunir datos relativos a los conceptos o variables que se investigan, sin tratar de establecer ninguna relación causal o correlacional entre ellos mientras que el nivel correlacional busca determinar la correlación o el nivel de enlace entre dos o más conceptos, categorías o variables dentro de una determinada muestra. En algunos casos, se realiza el examen de una relación entre dos variables; sin embargo, se observa con frecuencia que las investigaciones identifican conexiones entre tres, cuatro o más variables.



En esta investigación, el aspecto descriptivo pretende proporcionar un análisis detallado de las características de esfuerzo y deformación expuestas por diversas cuerdas bajo condiciones específicas. El aspecto correlativo, por otro lado, se centra en investigar las relaciones entre un tipo de cuerda, los niveles de humedad y las propiedades mecánicas observadas. En consecuencia, la interacción entre estas variables requiere la medición y evaluación de diversas características, dimensiones y componentes. Finalmente, se lleva a cabo un diagnóstico científico para describir las propiedades mecánicas de los diferentes elementos estructurales del puente de *Q'eswachaka* en condiciones tanto húmedas como secas.

### **3.2. Diseño de la Investigación**

#### ***3.2.1. Diseño Metodológico***

El diseño de la presente investigación es experimental del tipo cuasiexperimental, pues como Hernández et al. (2014) indica “manipulan deliberadamente, al menos, una variable independiente para observar su efecto y relación con una o más variables dependientes, sólo que difieren de los experimentos “puros” en el grado de seguridad o confiabilidad que pueda tenerse sobre la equivalencia inicial de los grupos. En los diseños cuasiexperimentales los sujetos no se asignan al azar a los grupos ni se emparejan, sino que dichos grupos ya están formados antes del experimento: son grupos intactos (la razón por la que surgen y la manera como se formaron es independiente o aparte del experimento)” (p. 151).

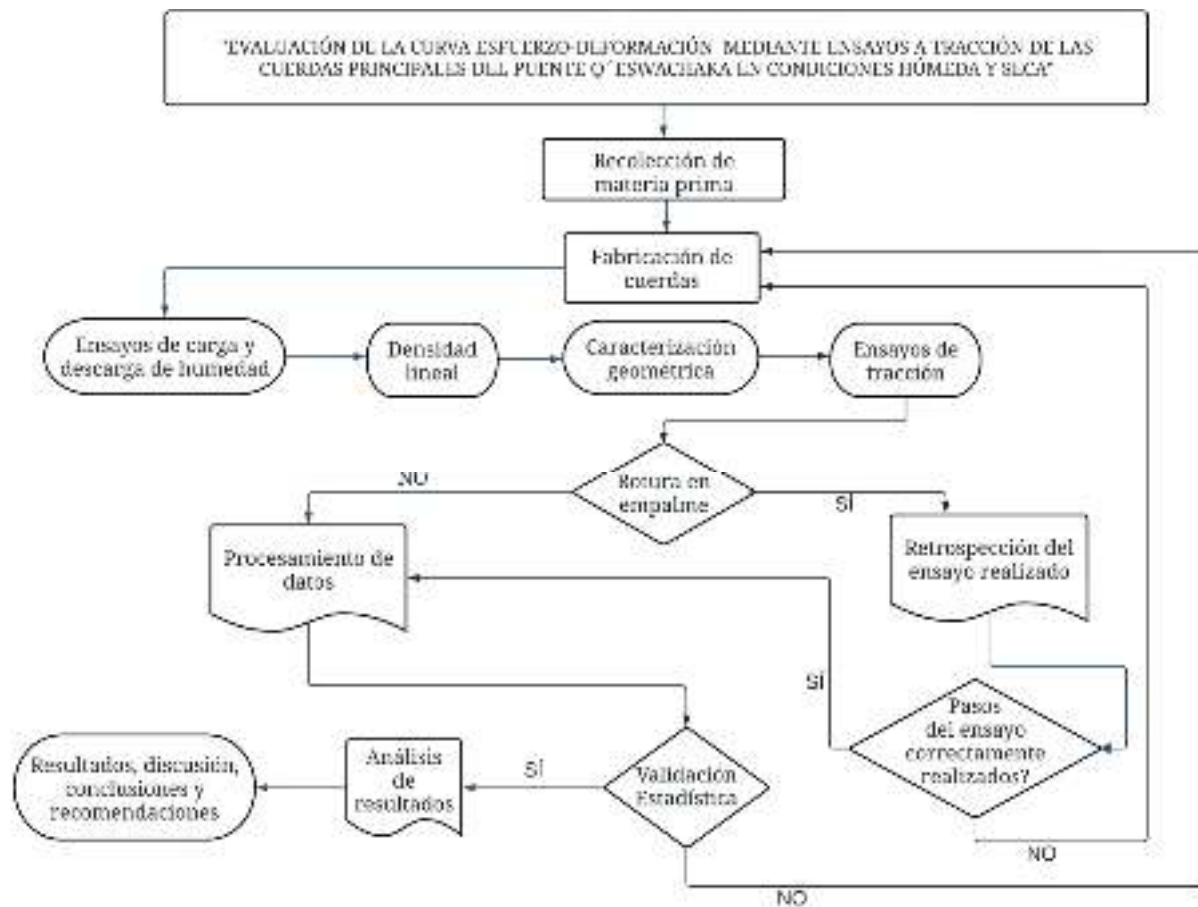
La investigación será cuasiexperimental porque se acondicionarán las cuerdas del tipo *Q'eswa* en condición húmeda y seca (variable independiente) para evaluar la curva esfuerzo-deformación (variable dependiente) y como consecuencia sus propiedades mecánicas como el esfuerzo máximo, deformación y módulo de elasticidad.



### 3.2.2. Diseño de Ingeniería

Figura 27

Flujograma



### 3.3. Población y Muestra

#### 3.3.1. Población

##### 3.3.1.1. Descripción de la Población.

La población son los tipos de cuerdas principales del puente *Q'eswachaka* que se fabriquen con fines para esta investigación. Específicamente la población se refiere a las cuerdas tipo *Q'eswa* (en condiciones seca a temperatura ambiente, parcialmente húmeda y completamente húmeda) en escala real, tipo *Maqui* y tipo *Duro*, ambos en escala 1:4 (respecto al número de *Q'eswas*) (la escala 1:4 se refiere a 9 *Q'eswas* por torón) (cada torón del *Maqui* y *Duro* en escala real se compone de 36 *Q'eswas*), que sean fabricadas con asistencia de personal que participa directamente en el ritual



de renovación del puente *Q'eswachaka*; asimismo que la materia prima de las cuerdas sea la fibra *Q'oya (festuca dolichopylla)*.

### 3.3.1.2. Cuantificación de la Población.

La población se verá conformada por el número de cuerdas fabricadas para la investigación; pues según Hernández et al. (2017) en las muestras no probabilísticas, la elección de las unidades no depende de la probabilidad, sino de razones relacionadas con las características de la investigación. La cuantificación de la población no se realizará en función a probabilidades, sino que se hará en base a decisiones de juicio de acuerdo a criterios como referencia en investigaciones y normativa.

Por lo tanto, la población es única y constituida por las poblaciones de cada tipo de cuerda. La población es igual a la muestra.

**Tabla 2**

*Población de Cuerdas*

Cuerda		Población Única
Q'eswa	75 muestras	25 muestras en condición seca a temperatura ambiente (QSA)
		25 muestras en condición parcialmente húmeda (QPH)
		25 muestras en condición completamente húmeda (QH)
Maqui	5 muestras	5 muestras en condición seca a temperatura ambiente (MA)
Duro	5 muestras	5 muestras en condición seca a temperatura ambiente (DA)

### 3.3.2. Muestra

#### 3.3.2.1. Descripción y Cuantificación de las Muestras.

##### Descripción de la Muestra.

Las muestras se conforman de los distintos tipos de cuerdas (fabricadas para la investigación) que componen el puente *Q'eswachaka*. En donde las muestras se presentan en cuerdas de escala reales y escala 1:4 en cuanto a la cantidad de *Q'eswas* por tipo de cuerda. Las



*Q'eswas* serán en escala real, los *Maquis* y *Duros* serán en escala 1:4 respectivamente; la escala 1:4 se refiere a que los torones se componen de 9 *Q'eswas*, siendo la escala real de los torones de las cuerdas *Maqui* y *Duro* que se encuentran en el puente de 36 *Q'eswas* por torón.

### **Cuantificación de la Muestra.**

Para la investigación, basándonos en la investigación de Vannei Sry et al. (2018), donde se evaluaron tres muestras de cuerdas de fibra sintética bajo características similares a los ensayos de tracción; por otra parte, Khalid et al. (2020), ensayó cinco muestras de cuerdas híbridas para conocer sus características de rigidez y resistencia; del mismo modo Nouri et al. (2015), en su estudio, realizó ensayos a tracción con tres muestras de cuerdas de yute hibridizadas con fibra de carbono para determinar sus propiedades mecánicas.

La norma ISO 2307, por su parte indica una metodología para obtener el número de pruebas para un lote de cuerda, que consiste en la siguiente solución:

$$N_s = 0.4 \times \sqrt{N}$$

Donde:

$N_s$ : Número de muestras a ser ensayadas

N: Número de rollos de cuerda

Siendo que, para nuestro caso, se mandaron a fabricar 40 rollos de cuerda tipo *Q'eswa*, por lo tanto, el número de muestras a evaluar sería de 2.5 ~ 3 (tres).

Por lo tanto, para la presente investigación se consideró que la muestra se constituya por:

### ***Q'eswas:***

Se fabricarán cuerdas de este tipo en escala real, 25 muestras para ensayos en condición seca a temperatura ambiente, 25 muestras para ensayos en condición parcialmente húmeda y 25 muestras para ensayos en condición completamente húmeda.



***Maquis:***

Se fabricarán cuerdas de este tipo en escala 1:4 (compuesta por 18 *Q'eswas*), 5 muestras para ensayos en condición seca.

***Duros:***

Se fabricarán cuerdas de este tipo en escala 1:4 (compuesta por 27 *Q'eswas*), 5 muestras para ensayos en condición seca.

***3.3.2.2. Método de Muestreo.***

El método de muestreo es no probabilístico a criterio, en función de las características de los ensayos, ciertas limitantes de las mismas, investigaciones similares y normativa. Es decir, la selección no se basará en una selección al azar de una población (probabilística).

***3.3.2.3. Criterios de Evaluación de Muestra.***

La aplicación de los criterios de evaluación de muestra se realizó tomando en cuenta estándares como los procedimientos de fabricación de cuerdas para el ritual de renovación del puente *Q'eswachaka*, en los cuales las cuerdas deben tener como materia prima a la fibra *Q'oya* (*festuca dolichophylla*). Asimismo, para la evaluación de muestras se consideraron procedimientos de: caracterización geométrica (longitud, paso de torones, diámetro), carga y descarga de humedad (tiempo de sumersión en agua y secado en horno para acondicionamiento de muestras), densidad lineal (peso por unidad de longitud) y ensayos de tracción que se mencionan en las normativas CI 1500, ISO 2307 y ASTM D4268.

***3.3.2.4. Criterios de Inclusión.***

Para la inclusión de la muestra se consideró:

- Que las cuerdas *Q'eswa*, *Maqui* y *Duro* sean fabricadas con fibra seleccionada y madura *Q'oya* (*festuca dolichophylla*) cosechadas en el distrito de *Quehue* o en defecto en sus proximidades.
- Que la cuerda *Q'eswa*, que es la cuerda básica de las que se componen los torones de las cuerdas *Maqui* y *Duro* sea en escala real y tejida por participantes directos del ritual de renovación del puente *Q'eswachaka*.



- Que las cuerdas *Q'eswa* sean evaluadas en condiciones de humedad controlada (seca a temperatura ambiente, parcialmente húmeda y completamente húmeda) de acuerdo a los ensayos de carga y descarga de humedad.
- Que el proceso de tejido de *Maquis* y *Duros* sea asistido por participantes directos del ritual de renovación del puente *Q'eswachaka*, para obtener cuerdas con sentidos de torsión y tejido como los que se presentan en el puente.
- Que las longitudes de las cuerdas sean ensayadas de acuerdo a las normas CI 1500 (2002), ASTM D4268 (1993) e ISO 2307 (2010).
- Las *Q'eswas* deberán tener diámetros de  $8.75 \pm 2.75$  mm de acuerdo a lo observado en las péndolas del puente *Q'eswachaka*.
- Las *Q'eswas* deberán tener densidades lineales en condiciones ambientales de  $0.135 \pm 0.010$  g/cm.
- Las *Q'eswas* no presentarán rasgos de degradación biológica a lo largo de su longitud.
- Las *Q'eswas* serán cuerdas torcidas en sentido "S".
- Los torones de los *Maquis* y *Duros* se compondrán de 9 *Q'eswas* que cumplan con los 3 últimos criterios antes mencionados.
- Los *Maquis* serán cuerdas torcidas en sentido "Z".

### **3.4. Instrumentos**

#### ***3.4.1. Instrumentos Metodológicos o Instrumentos de Recolección de Datos***

##### ***3.4.1.1. Instrumentos Para la Recolección de Datos.***

Para la presente investigación se emplearon fichas de datos, fotos de procedimientos.



Tabla 3

Formato de datos para el ensayo de carga y descarga de humedad

		<b>Universidad Andina del Cusco</b>			
		Escuela Profesional de Ingeniería Civil			
<b>ENSAYO DE CARGA Y DESCARGA DE HUMEDAD</b>					
<b>PROYECTO:</b>		"EVALUACIÓN DE LA CURVA ESFUERZO-DEFORMACIÓN MEDIANTE ENSAYOS A TRACCIÓN DE LAS CUERDAS PRINCIPALES DEL PUENTE Q'ESWACHAKA EN CONDICIONES HÚMEDA Y SECA"			
<b>Tesistas:</b>		HARDY VIRGILIO VILLENAL CALLO DENNY SOTO ARAUJO			
<b>Asesor:</b>		DR. ELVIS YURI MAMANI VARGAS			
<b>Ubicación del proyecto:</b>		MATERIA PRIMA DE QEHUE-CANAS-CUSCO; ENSAYO REALIZADO EN SAN SEBASTIAN-CUSCO-CUSCO			
<b>Fecha de ensayo:</b>					
<b>Código de muestra:</b>	<b>Tipo de muestra:</b>	<b>Grupos:</b>	<b>Escala:</b>	<b>SL:</b>	
<b>Características geométricas de la muestra:</b>			<b>Humedad de la muestra:</b>		
<b>l (cm):</b>			<b>Peso total (gr):</b>		
<b>Carga de humedad y descarga de humedad</b>					
<b>CARGA DE HUMEDAD POR TIEMPO</b>				<b>DESCARGA DE HUMEDAD POR TIEMPO</b>	
<b>t sumersión (min)</b>	<b>Peso muestra(gr)</b>	<b>Contenido de agua</b>	<b>% de humedad</b>	<b>t secado (min)</b>	<b>Peso muestra(gr)</b>
0				0	
10 SEG				10 SEG	
10				10	
15				15	
20				20	
25				25	
30				30	
35				35	
60				60	
360				120	
secado > 4h				180	
60				240	
360				6hr	
24hrs				24hrs	



Tabla 4

Formato de datos para el ensayo de densidad lineal

	<b>ENSAYO DE DENSIDAD LINEAL</b>				
<b>PROYECTO:</b>	"EVALUACIÓN DE LA CURVA ESFUERZO-DEFORMACIÓN MEDIANTE ENSAYOS A TRACCIÓN DE LAS CUERDAS PRINCIPALES DEL PUENTE Q'ESWACHAKA EN CONDICIONES HÚMEDA Y SECA"				
<b>Testistas:</b>	HARDY VIRGILIO VILLENA CALLO DENNY SOTO ARAUJO				
<b>Asesor:</b>	DR. ELVIS YURI MAMANI VARGAS				
<b>Ubicación del proyecto:</b>	MATERIA PRIMA DE QUEHUE-CANAS-CUSCO; ENSAYO REALIZADO EN SAN SEBASTIAN-CUSCO-CUSCO				
<b>Fecha:</b>					
<b>Tipo de cuerda:</b>	.....	<b>Escala:</b>	.....	<b>Condiciones:</b>	.....
<b>FORMULA</b>					
$\rho = \frac{W}{L}$	<b>Donde:</b> ρ: Densidad lineal en gramos por kilómetro (g/km) W: Peso en gramos L: Longitud en kilómetros				
<b>DATOS</b>					
	<i>Peso</i>	<i>Longitud</i>	<i>Longitud</i>	<i>Densidad lineal</i>	<i>Densidad lineal</i>
	<i>g</i>	<i>cm</i>	<i>km</i>	<i>g/km</i>	<i>g/km</i>
1					
2					
3					
4					
5					

Tabla 5

Formato de datos para la caracterización geométrica de cuerdas

	<b>CARACTERIZACIÓN GEOMÉTRICA: LONGITUD (LIBRE Y ENTRE EJE DE TAMBORES), DIÁMETRO Y PASO DE TORONES</b>											
<b>PROYECTO:</b>	"EVALUACIÓN DE LA CURVA ESFUERZO-DEFORMACIÓN MEDIANTE ENSAYOS A TRACCIÓN DE LAS CUERDAS PRINCIPALES DEL PUENTE Q'ESWACHAKA EN CONDICIONES HÚMEDA Y											
<b>Tesistas:</b>	HARDY VIRGILIO VILLENAL CALLO DENNY FAUSTO SOTO ARAUJO											
<b>Asesor:</b>	DR. ELVIS YURI MAMANI VARGAS											
<b>Ubicación del proyecto:</b>	MATERIA PRIMA DE QUEHUE-CANAS-CUSCO; ENSAYO REALIZADO EN SAN SEBASTIAN-CUSCO-CUSCO											
<b>Fecha y hora:</b>												
<b>Código de muestra:</b>	<b>Tipo de cuerda:</b>	<b>Escala:</b>										
<b>Geometría de la cuerda (longitudes, diámetros "circulares" y paso de torones.</b>												
<table border="1"><thead><tr><th>A mm</th><th>B mm</th><th>C mm</th></tr></thead><tbody><tr><td>∅1=</td><td>∅1=</td><td>∅1=</td></tr><tr><td>∅2=</td><td>∅2=</td><td>∅2=</td></tr></tbody></table>			A mm	B mm	C mm	∅1=	∅1=	∅1=	∅2=	∅2=	∅2=	
A mm	B mm	C mm										
∅1=	∅1=	∅1=										
∅2=	∅2=	∅2=										







**Tabla 7**

*Formato de datos para ensayo de contenido de humedad de cuerdas en condición completamente húmeda*

 Universidad Andina del Cusco Escuela Profesional de Ingeniería Civil			
ENSAYO DE CONTENIDO DE HUMEDAD EN CONDICION COMPLETAMENTE HUMEDA			
<b>PROYECTO:</b>	"EVALUACIÓN DE LA CURVA ESFUERZO-DEFORMACIÓN MEDIANTE ENSAYOS A TRACCIÓN DE LAS CUERDAS PRINCIPALES DEL PUENTE Q'ESWACHAKA EN CONDICIONES HÚMEDA Y SECA"		
<b>Testistas:</b>	HARDY VIRGILIO WILLENA CALLO DENNY FAUSTO SOTO ARAUJO		
<b>Auxiliar:</b>	DR. ELVIS YURI MAMANI VARGAS		
<b>Ubicación del proyecto:</b>	MATERIA PRIMA DE Q'EHUFCANASHTINCO ENSAYO REALIZADO EN SAN SEBASTIAN-CUSCO-CUSCO		
<b>Fecha de ensayo:</b>			
<b>Código de muestra:</b>	.....	<b>Tipo de cuerdas:</b> OH	<b>Escala:</b> .....
N° PRUEBA	PESO DE MUESTRA SUMERGIDA (gr) "A"	PESO SECAO AL HORNO (gr) "B"	CONTENIDO DE HUMEDAD (%) " $\frac{A-B}{A} \times 100$ "

**Tabla 8**



*Formato de datos para ensayo de humedad para cuerdas en condición parcialmente húmeda*

 Universidad Andina del Cusco Escuela Profesional de Ingeniería Civil				
ENSAYO DE CONTENIDO DE HUMEDAD EN CONDICION PARCIALMENTE HUMEDA				
<b>PROYECTO:</b>	"EVALUACIÓN DE LA CURVA ESFUERZO-DEFORMACIÓN MEDIANTE ENSAYOS A TRACCIÓN DE LAS CUERDAS PRINCIPALES DEL PUENTE Q'ESWACHAKA EN CONDICIONES HÚMEDA Y SECA"			
<b>Testistas:</b>	HARDY VIRGILIO WILLENA CALLO DENNY FAUSTO SOTO ARAUJO			
<b>Auxiliar:</b>	DR. ELVIS YURI MAMANI VARGAS			
<b>Ubicación del proyecto:</b>	MATERIA PRIMA DE Q'EHUFCANASHTINCO ENSAYO REALIZADO EN SAN SEBASTIAN-CUSCO-CUSCO			
<b>Fecha de ensayo:</b>				
<b>Código de muestra:</b>	.....	<b>Tipo de cuerdas:</b> OPII	<b>Escala:</b> .....	
N° PRUEBA	PESO EN HUMEDAD AMBIENTE (gr) "A"	PESO DE MUESTRA SUMERGIDA (gr) "B"	PESO SECAO AL HORNO PARA ACONDICIONADO DE MUESTRA (gr) "C"	CONTENIDO DE HUMEDAD (%) " $\frac{(B-A)}{(C-B)} \times 100$ "



**Tabla 9**

*Formato de datos para ensayo de contenido de humedad para cuerdas en condición ambiente*

 Universidad Andina del Cusco Escuela Profesional de Ingeniería Civil			
<b>ENSAYO DE CONTENIDO DE HUMEDAD EN CONDICIÓN SECA A TEMPERATURA AMBIENTE</b>			
<b>PROYECTO:</b>	"EVALUACIÓN DE LA CURVA ESFUERZO-DEFORMACIÓN MEDIANTE ENSAYOS A TRACCIÓN DE LAS CUERDAS PRINCIPALES DEL PUENTE Q'ESWACHARA EN CONDICIONES HÚMEDA Y SECA"		
<b>Tesistas:</b>	HARDY VIRGILIO VILLENA CALLO DENNY S FAUSTO SOTO ARAUJO		
<b>Asesor:</b>	DR. ELVIS YURI MAMANI VARGAS		
<b>Ubicación del proyecto:</b>	MATERIA PRIMA DE QEHUE-CANAS-CUSCO ENSAYO REALIZADO EN SAN SEBASTIAN-CUSCO-CUSCO		
<b>Fecha de ensayo:</b>			
<b>Código de muestra:</b>	.....	<b>Tipo de ensayos</b>	<b>QSA</b>
			<b>Escala:</b> .....
NO. DE MUESTRA	RESUMEN DE RESULTADOS AMBIENTE (g/g)	RESUMEN DE RESULTADOS SECA AL HORNO (g/g)	CONTENIDO DE HUMEDAD (%) "g/g/100g"



3.4.2. Instrumentos de Ingeniería

Tabla 10

Instrumentos de Ingeniería

Ensayo/Procedimiento	Equipos, Materiales e Insumos
Ensayo de Carga y descarga de Humedad	Balanza (0.1g de precisión)
	Horno
	Recipientes Agua
Densidad Lineal	Balanza (0.1g de precisión)
	Cinta Métrica (graduada para lectura hasta 1mm)
	Vernier
	Máquina de tracción de 3tnf de capacidad con celda de carga
	Cúter
	Cinta adhesiva Marcador
Caracterización Geométrica	Vernier
	Cinta Métrica (graduada para lectura hasta 1mm)
Ensayo de Tracción	Dispositivos de grabación de video
	Máquina de tracción de 3tnf de capacidad con celda de carga
Contenido de Humedad	Balanza (0.1g de precisión)
	Recipientes
	Horno Bolsas herméticas
Procesamiento de Datos	Microsoft Excel 2016
	Origin Pro 2021 v9.8.0.200



### 3.5. Procedimientos de Recolección y Análisis de Datos

#### Procedimiento de fabricación de cuerdas.

El procedimiento de la fabricación de las cuerdas tiene su inicio con la recolección de las fibras de *Q'oya*, esto se realizó en los meses de octubre, noviembre, diciembre del año 2022. Como método de selección de fibras maduras para la fabricación de cuerdas, se tomó un manojo de fibra cortada de una planta de *Q'oya*, se agitó tomando el manojo por un extremo, cayendo las fibras más delgadas y menos maduras del manojo.

#### Figura 28

*Recolección de Q'oya in situ*



Posterior a la recolección de las fibras de *Q'oya*, se acopiaron las mismas en un ambiente seco, dejándolas extendidas para que se complete su proceso de secado.

Se encargó la elaboración de las *Q'eswas* a un participante directo de la renovación anual del puente *Q'eswachaka*, esto, por tratarse de la unidad básica de las demás cuerdas del puente. Se observó el procedimiento de tejido de las *Q'eswas* en la que se pudo apreciar que se remojaron las fibras de *Q'oya* en agua y se machacaron con una piedra de forma redondeada para adquirir mejor suavidad y trabajabilidad. El proceso de tejido continuó tomando dos grupos de fibras con cada mano, torciendo cada grupo y al mismo tiempo torciendo entre sí ambos grupos de fibras de modo que se obtenga una cuerda de dos torones.

Cuando se terminaba la longitud de trabajo de un grupo de fibras, se procedía a tomar otro grupo de fibras de similar cantidad y se traslapaba mediante el torcido para continuar con el tejido



de la *Q'eswa*, este procedimiento se repetía hasta obtener *Q'eswas* de 40m de longitud aproximadamente.

Como parte del procedimiento del tejido de los *Maquis*, se tuvo asistencia calificada para su elaboración. El tejido de esta cuerda consistió en separar dos grupos de nueve (9) *Q'eswas* cada uno. Las *Q'eswas* se separaron en longitudes de 10m aproximadamente.

### Figura 29

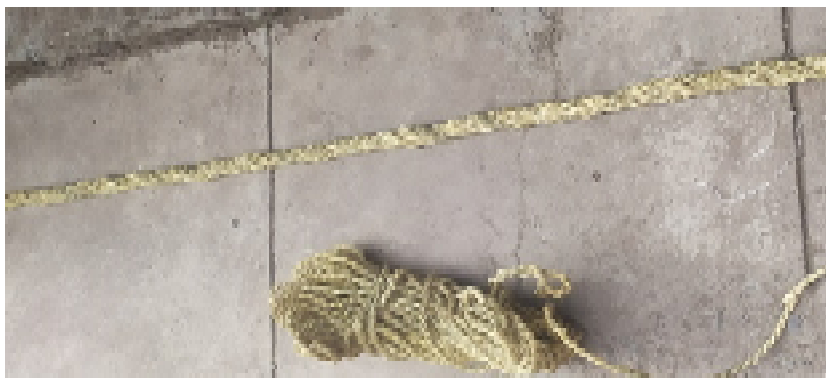
*Grupo de Q'eswas para un torón*



Con cada grupo de 9 *Q'eswas*, se procedió a torcerlas manualmente entre sí de extremo a extremo, esto hasta tener una cuerda única compacta que se denomina *Q'eswaska* y que es un torón que conforma el *Maqui*.

### Figura 30

*Torón (Q'eswaska) para el Maqui*



Posterior a esto, se procedieron a tomar ambos torones (*Q'eswaskas*) y se torcieron entre sí, hasta formar una cuerda única y compacta que resultó en el *Maqui*.



**Figura 31**

*Cuerda Maqui recién torcida*



Para el tejido de los *Duros*, al igual que los *Maquis*, se tuvo asistencia calificada. Para formar esta cuerda se separaron tres grupos de 9 *Q'eswas* cada uno. Se tomaron los grupos conformados por 9 *Q'eswas* y se procedió a torcerlas entre sí desde cada extremo, hasta formar una *Q'eswaska* única y compacta que es el torón y forma parte del duro.

**Figura 32**

*Grupos de 9 Q'eswas para torones de Duro*





**Figura 33**  
*Torones (Q'eswaska) para el Duro*



Obtenidos los tres torones, se procedieron a trenzar entre sí, para este procedimiento, debido a la envergadura de la cuerda, se tuvo que realizar entre tres personas para obtener una cuerda (*Duro*) Homogéneo.

**Figura 34**  
*Cuerda Duro recién trenzada*







### **3.5.1. Procedimiento Realizado Para la Recolección de Datos**

#### **3.5.1.1. Ensayo de Carga y Descarga de Humedad.**

Los ensayos de carga y descarga de humedad se aplican para determinar el tiempo de saturación de una cuerda de fibras naturales, así como el tiempo en que demora en secarse a cierta temperatura.

Para realizar este ensayo, se considera lo referido en la norma ISO 2307 (2010), en el apartado de “Determinación de la repelencia de agua” para cuerdas de fibra natural.

#### **Materiales y Equipos**

- Balanza de precisión (0.1gr de precisión)
- Horno.
- Recipientes
- Agua

#### **Procedimiento**

- Las muestras se prepararán en longitudes de 700mm, realizándose cortes rectos y limpios en sus terminaciones.
- Se pesarán las muestras antes de la sumersión en agua.
- Seguidamente se sumergirán las muestras en agua a una profundidad de más de 150mm, cuidando que todo el espécimen este completamente sumergido.
- El primer tiempo de sumersión en agua será de 60 min como indica la ISO 2307 (2010).
- Durante el intervalo de los primeros 60 minutos de sumersión se pesarán las muestras a los 20 segundos y después en intervalos de 5 minutos debido a que las cuerdas de fibra *Festuca dolicophila* mostraron rápida absorción de agua en observaciones previas.
- Terminados los primeros 60 minutos efectivos de inmersión, se extraerán las muestras y se agitarán para eliminar el agua superficial, seguidamente se harán los especímenes en papel hasta no observar humectación en el papel, se secarán con toallas absorbentes de tela y se procederá a pesar.



- Las muestras tendrán que sumergirse nuevamente en agua por el periodo de 5 horas adicionales y posterior a esto, se colocarán en el horno a una temperatura de 50°C hasta que tengan una masa ligeramente inferior a su masa inicial; tomando datos de los pesos de los especímenes después de cada sumersión en agua y secado en horno.
- Se repetirá el procedimiento anteriormente indicado para cada muestra.

### **Toma de datos**

Los datos obtenidos de los ensayos de carga y descarga de humedad, se presentan en el anexo III (ver anexos).

#### ***3.5.1.2. Ensayo de Densidad Lineal.***

El procedimiento de este ensayo se realizó tomando en consideración los lineamientos para el ensayo de densidad lineal de las normas CI 1500 (2002), ASTM D2468 (1993) y la norma ISO 2307 (2010).

### **Materiales y Equipos**

- Balanza de precisión (0.1gr de precisión)
- Cinta métrica (graduada para lectura hasta 1mm)
- Vernier
- Máquina de tracción con celda de carga
- Cúter
- Cinta adhesiva
- Marcador

### **Procedimiento**

- La muestra a preparar será lo suficientemente larga de manera que al colocarla en la máquina de tracción se tenga una longitud efectiva o libre que se requiera según el diámetro de cuerda.
- Al retirar la longitud de cuerda del rollo, se realizará con cuidado, evitando las vueltas anormales.
- Las muestras de cuerda a someter a carga serán sujetadas en la máquina de tracción universal mediante empalmes de ojo.



- Se someterá la cuerda a una tensión de referencia que es un valor de carga requerido según el diámetro de cuerda.
- La tensión de referencia según la norma ASTM D4268 (1993) se determina según la siguiente fórmula:

$$N = 1.38D^2 \quad (1)$$

Donde:

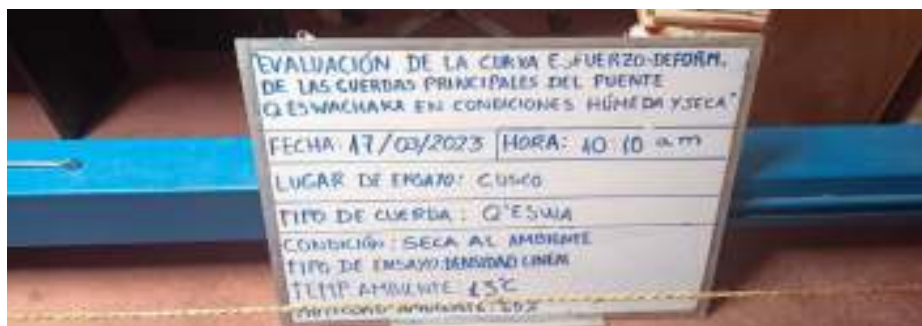
N: Tensión de referencia en Newtons

D: Diámetro en milímetros

- Se aplicará manteniendo recta la línea axial la tensión establecida en el punto anterior y se aplicará durante un (1) minuto.
- Se deberán colocar dos marcas en la cuerda (fuera de los empalmes) a una distancia equidistante del centro, esto vendría a ser la longitud útil de la muestra.
- Para las *Q'eswas*, *Maquis* y *Duros*, las marcas deberán estar separadas en 2m y no a menos de 1.5cm de cercanía del empalme.
- Se quitará la tensión en la cuerda y se procederá a separar la longitud útil cortando limpiamente en las dos marcas.
- Como parte final del ensayo, consiste en pesar la cuerda cortada entre las dos marcas.

### Figura 35

*Ensayo de densidad lineal*



### Toma de Datos

Los datos obtenidos de los ensayos de densidad lineal, se presentan en el anexo IV.



### 3.5.1.3. Caracterización Geométrica.

El procedimiento para este ensayo se realizó de acuerdo a lo indicado en las normas CI 1500 (2002), ASTM D4268 (1993) e ISO 2307 (2010).

#### **Materiales y Equipos.**

- Vernier
- Cinta métrica (graduada para lectura hasta 1mm)

#### **Procedimiento**

**Medición del diámetro:** el diámetro o la circunferencia de la cuerda puede ser medido mediante dispositivos como vernieres, cintas métricas calibradas, cintas de medición directa de diámetro y cintas o cordeles no calibrados de baja elasticidad. Si se realiza con vernier, se colocarán en contacto y con moderada compresión las mordazas con las coronas de los torones y se medirá la distancia. Si la medición se realiza con una cinta métrica, se dará vuelta con moderada compresión con la cinta a la sección de la cuerda y se leerá la longitud de la circunferencia, esta medida se dividirá entre Pi para obtener el diámetro. Si se decide realizar la medición con alguna cinta o cordel de baja elasticidad no calibrados, se envolverá con compresión moderada a la sección de la cuerda y se marcará el punto de superposición, se medirá la parte de la cinta o cordel marcado y esta medida se dividirá entre Pi para tener el diámetro.

Estos procedimientos de medición se realizarán con la cuerda sin aplicación de tensión y a la tensión de referencia, según convenga. Las mediciones se tomarán como mínimo tres veces y espaciadas equidistantemente sobre la longitud entre los empalmes.

**Medición de la longitud:** Se medirá la longitud útil que comprende entre los empalmes de ojo (*eye splice*) con la ayuda de una cinta métrica. Estos procedimientos de medición se realizarán con la cuerda sin aplicación de tensión y a la tensión de referencia, según convenga.

**Medición del paso de torón:** Se medirá el paso de trenza realizando una marca en el centro de uno de los torones y se volverá a realizar la marca en su centro al momento de identificar cuando se repita su ciclo y con una cinta métrica se realizará la medición. Estas mediciones se recomiendan hacer como mínimo tres o más para tener mayor precisión y el resultado será el promedio de las mediciones realizadas.

### Figura 36

*Medición del paso del torón de la cuerda Duro*



#### **Toma de Datos**

Los datos obtenidos de la caracterización geométrica, se presentan en el anexo V (ver anexos).

#### **3.5.1.4. Ensayo de Tracción.**

##### **Materiales y Equipos**

- Máquina de tracción equipada con celda de carga, distanciómetro y tekle de fuerza. Es del tipo máquina de ensayo con bolardos para empalmes de ojos y de funcionamiento de extensión constante.
- Dispositivos de grabación de video.

##### **Procedimiento**

###### **Para el acondicionamiento de cuerdas**

###### **i. Acondicionamiento de muestras en condición completamente húmeda (humedad al 50%)**

- Se prepararán las muestras con cortes rectos para realizar los ensayos a tracción.
- De acuerdo a los ensayos de carga y descarga de humedad, cada una de las muestras se sumergirán por lo menos 25 minutos para alcanzar su máxima saturación.

###### **ii. Acondicionamiento de muestras en condición parcialmente húmeda (humedad al 30%)**

- Se prepararán las muestras con cortes rectos para realizar los ensayos a tracción.
- Se realizará un acondicionamiento para que las muestras tengan un porcentaje de humedad intermedio entre el estado completamente húmedo y el estado seco a temperatura ambiente, se fijó que este estado de humedad sea de aproximadamente 30%.



- De acuerdo a los ensayos de carga y descarga de humedad, cada una de las muestras deberá estar primeramente sumergidas por lo menos 25 minutos para alcanzar su máxima saturación.
- Luego de los 25 minutos (al menos), las muestras se sellarán herméticamente y serán llevadas al horno.
- Se colocará cada muestra saturada en el horno a una temperatura de 50°C.
- Según los ensayos de carga y descarga de humedad, el tiempo que deben pasar las muestras en el horno, es de 45 minutos para llegar a un estado de humedad del 30% aproximadamente.
- Pasados los 45 minutos, se retirarán las muestras y pesarán.
- Inmediatamente después, se colocarán las muestras en bolsas herméticas y se llevarán a ensayar en la máquina de tracción.

**iii. Acondicionamiento de muestras en condición seca a temperatura ambiente (humedad 7-10%)**

- Se preparará cada muestra para realizar el ensayo a tracción.
- Las muestras a ensayar serán almacenadas de manera tal que las variaciones climáticas no afecten de manera brusca el equilibrio de humedad, siendo así que sus pesajes sucesivos (en lapsos no menores de 15 minutos) difieran en más de 0.1% del peso.

**Figura 37**

*Esquema de muestra montada en una máquina de tracción (se aprecia los empalmes de ojo)*



*Nota: Adaptado de Organización Internacional de Normalización. (2010). Fiber Ropes – Determination of certain physical and mechanical Properties. ISO2307.*



### **Para la preparación de la máquina.**

- Se realizará la sincronización de los dispositivos de grabación para obtener los datos en cada instante de la marcha del ensayo.
- El movimiento manual del tekle se deberá realizar para tener una velocidad de desplazamiento del tambor móvil controlado, de tal manera que para el 20% de la fuerza de rotura, el ensayo tenga una duración no menor de 20 segundos ni mayor a 200 segundos.

### **Montaje de la cuerda en la máquina de ensayo a la máquina de tracción.**

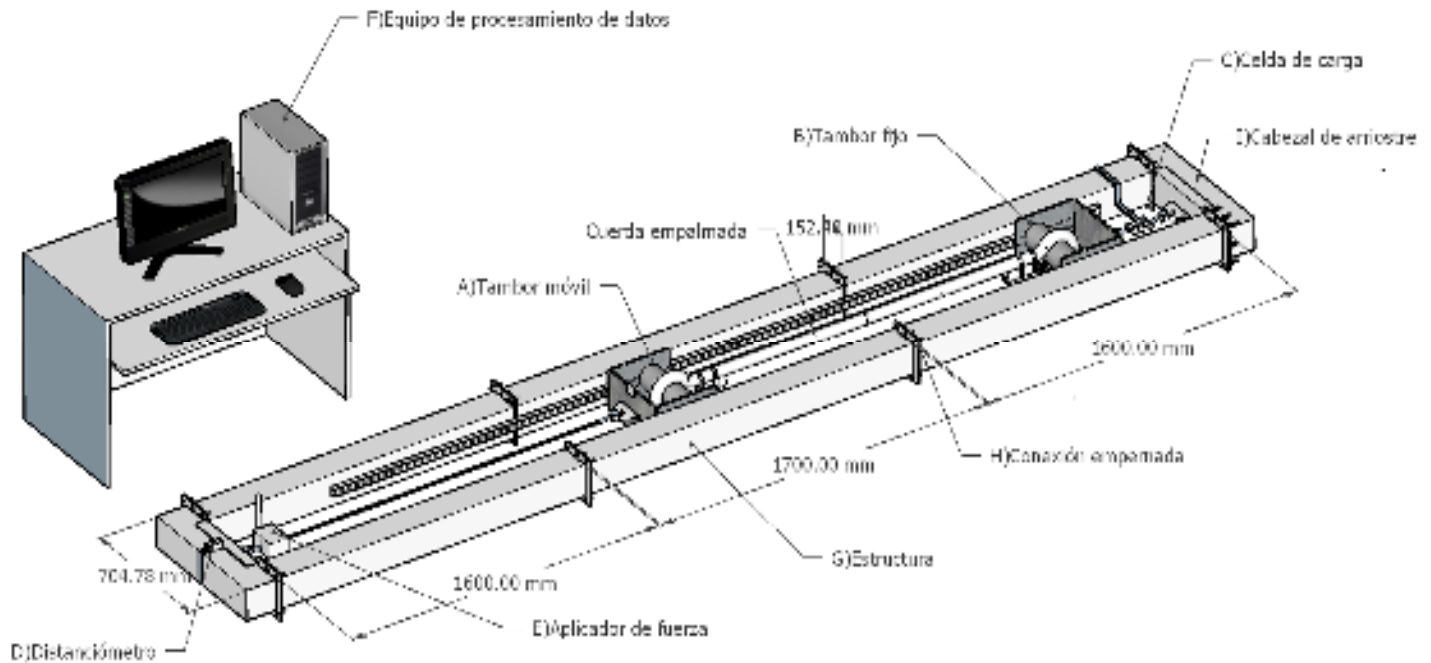
- Se prepararán muestras en longitudes de manera tal que al colocarlas en la máquina de tracción tengan las longitudes libres suficientes para el diámetro de la cuerda.
- Se deberá colocar la muestra de la cuerda a ensayar en la máquina de tracción universal y así determinar la longitud efectiva de la cuerda.
- En el caso de la presente investigación, debido al uso de una máquina de tracción que cuenta con bolardos o tambores para sujetar las cuerdas, se debe tener en cuenta la longitud interna del ojo que es como mínimo 6 veces el diámetro de la cuerda.
- Se delimitará una longitud útil con dos marcas separadas a una distancia que varía según el diámetro de la cuerda.
- Las muestras se manipularán de modo que no tengan dobleces de 10 veces su diámetro.
- Se medirán en la cuerda: los empalmes, la longitud libre y la longitud de eje a eje de abrazaderas de tambor; siendo estas longitudes diferentes en cada ensayo.
- Se aplicó la carga por medio del tekle de fuerza hasta que la cuerda se rompa completamente, anotando la distancia (respecto a uno de los tambores) en que se produjo la falla.
- Finalizado el ensayo, se tomó un pedazo de la muestra ensayada y se colocó en una bolsa hermética y puesta en un ambiente fresco y seco.

## Toma de datos

Los datos obtenidos de los ensayos de tracción se presentan en el anexo VI” (ver anexos).

### Figura 38

*Esquema de la máquina de ensayo a tracción empleada en la investigación*



*Nota:* Mamani E., Pezo E. (2023) Máquina para ensayos a tracción de cuerdas hechas a base de fibras naturales (Patente de Perú. No. De Expediente 002775-2022/DIN)

### Comentario:

A) Tambor móvil: El tambor móvil es el elemento en el que se sujeta uno de los extremos de la cuerda y el que se desplaza producto de la aplicación de fuerzas.

B) Tambor fijo: Elemento que se sujeta a otro de los extremos de la cuerda y no se desplaza.

C) Celda de carga: De capacidad de 5tnf, brinda los datos de las fuerzas aplicadas en cada instante.

D) Distanciómetro: Brinda los datos del desplazamiento del tambor móvil en cada instante.

E) Aplicador de fuerza: Para el caso se empleó un tekle de fuerza de 3.00 tnf de capacidad.

F) Equipo de procesamiento de datos: Un computador provisto de softwares de procesamiento de videos y de datos que brinden una gráfica de las curvas obtenidas.





G) Estructura: A base de perfiles tubulares 15cmx15cmx4mm unidos mediante conexiones empernadas.

H) Conexión empernada: Consiste a base de una plancha de acero con 7 agujeros y pernos 5/8”

I) Cabezal de arriostre: A base de perfil tubular 15cmx15cmx4mm, que permite la adecuada unión de la estructura metálica.

Cuerda empalmada\*: Cuerda de fibra natural acoplada a los tambores en sus extremos mediante el empalme tipo “*eye splice*”, adosada en toda su longitud a un flexómetro para las cuerdas *Maqui* y *Duro*.

### Figura 39

Montaje de Duro y preparación de máquina





### **3.5.1.5. Contenido de Humedad.**

Este se realizó con el propósito de conocer la cantidad de agua mediante un porcentaje de humedad en las muestras ensayadas previamente acondicionadas.

#### **Materiales y Equipos**

- Balanza (0.1g de precisión)
- Cinta métrica (graduada para lectura hasta 1mm)
- Recipientes
- Horno
- Bolsas herméticas

#### **Procedimiento**

##### **i. Para las muestras en condición completamente húmeda (humedad al 50%)**

- Inmediatamente terminado el ensayo se realizará el pesaje de cada muestra.
- Cada muestra ensayada será sellada herméticamente, etiquetada y almacenada para ser llevadas al horno.
- Cuando las muestras se lleven al laboratorio, antes de ser colocadas en el horno se pesarán con bolsa hermética y sin bolsa hermética para comprobar si hubo pérdida de humedad.
- Después de realizado el pesaje se colocarán las muestras en el horno a una temperatura de 50°C durante 24 horas.
- Para finalizar, pasadas las 24 horas, se retirarán las muestras del horno y se pesarán las muestras secadas por el horno.

##### **ii. Para las muestras en condición parcialmente húmeda (humedad al 30%)**

- Se prepararán las muestras con cortes rectos para realizar los ensayos a tracción.
- Se realizará un acondicionamiento para que las muestras tengan un porcentaje de humedad intermedio entre el estado completamente húmedo y el estado seco al ambiente, se fijó que este estado de humedad sea de 30% aproximadamente.



- De acuerdo a los ensayos de carga y descarga de humedad, cada una de las muestras deberá estar primeramente sumergidas por 25 minutos para alcanzar su máxima saturación.
- Luego de los 25 minutos, las muestras se sellarán herméticamente y serán llevadas al horno.
- Se colocará cada muestra saturada en el horno a una temperatura de 50°C.
- Según los ensayos de carga y descarga de humedad, el tiempo que deben pasar las muestras en el horno, es de 45 minutos para llegar a un estado de humedad del 30%.
- Pasados los 45 minutos, se retirarán las muestras y pesarán.
- Inmediatamente después, se colocarán las muestras en bolsas herméticas y se llevarán a ensayar en la máquina de tracción. Esto, debido a que las muestras ya se encuentran acondicionadas.

**iii. Para las muestras en condición seca al ambiente (humedad 7-10%)**

- Cada muestra ensayada será sellada herméticamente, etiquetada y almacenada para ser llevadas al horno.
- Cuando las muestras se lleven al laboratorio, se retirarán de las bolsas herméticas y se pesarán.
- Después de realizado el pesaje se colocarán las muestras en el horno a una temperatura de 50°C durante 24 horas.
- Para finalizar, pasadas las 24 horas, se retirarán las muestras del horno y se pesarán las muestras secadas por el horno.

**Figura 40**

*Ensayo de contenido de humedad*





## Toma de datos

Los datos obtenidos de los ensayos de humedad se presentan en el anexo VII” (ver anexos).

### 3.5.2. Cálculos Vinculados con la Cuantificación de las Variables/con las Pruebas de Campo o Laboratorio

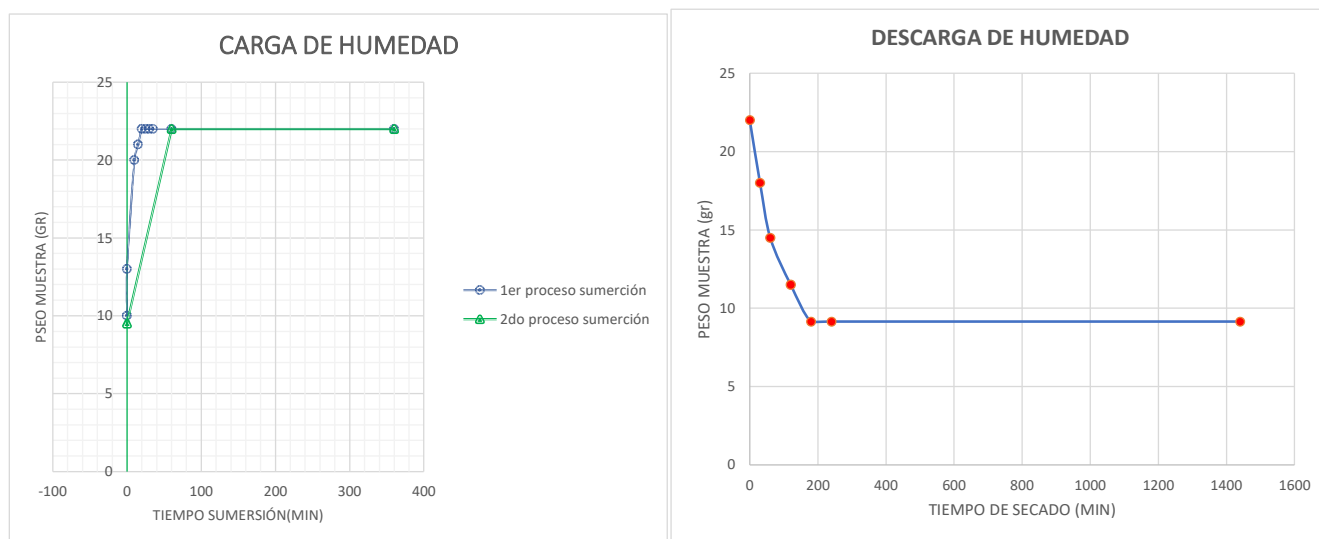
#### 3.5.2.1. Cálculos del Ensayo de Carga y Descarga de Humedad.

Respecto a los cálculos del ensayo de carga y descarga de humedad, se realizaron pesajes de acuerdo al tiempo en sumersión en agua y en secado al horno a 50°C.

- Se muestra a continuación el procesamiento de datos en gráficas de tres muestras sometidas a sumersión en agua y secado en horno como parte del proceso del ensayo de carga y descarga de humedad.

### Figura 41

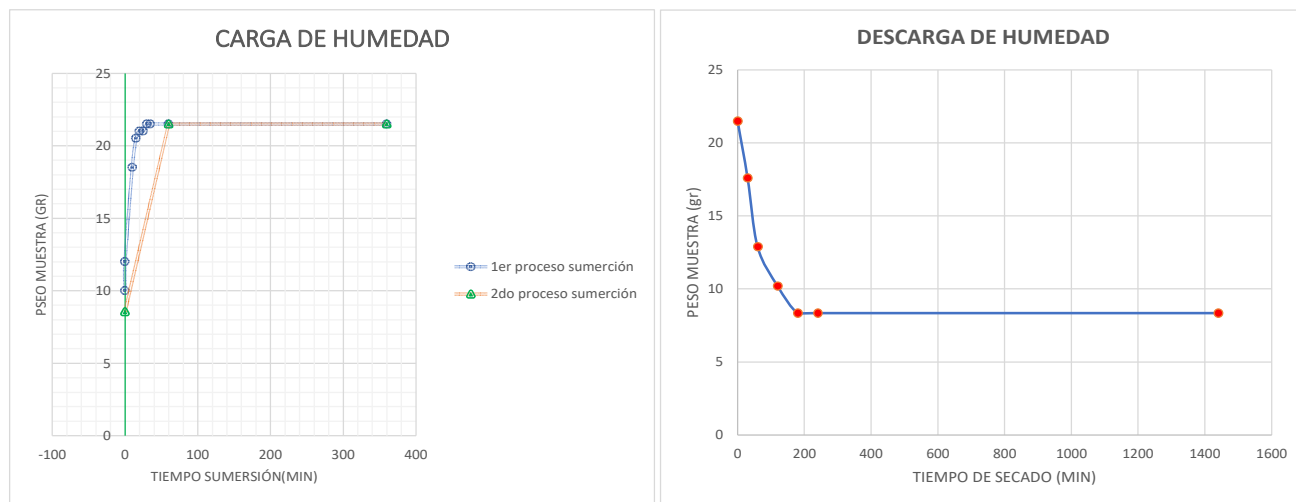
Ensayo de contenido de humedad para la muestra N°01





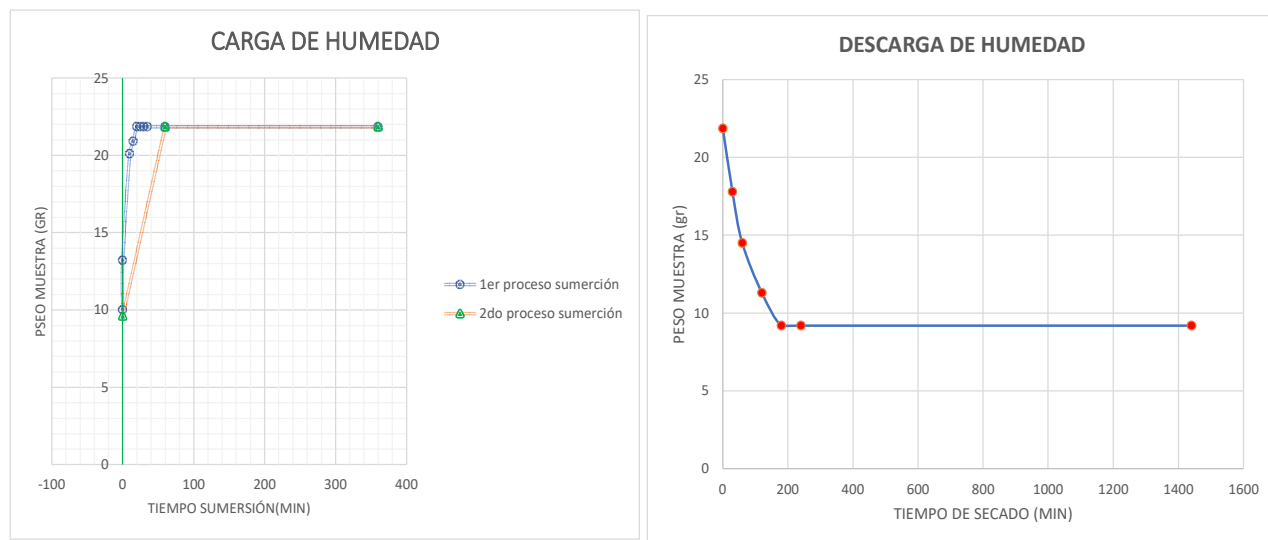
**Figura 42**

*Ensayo de contenido de humedad para la muestra N°02*



**Figura 43**

*Ensayo de contenido de humedad para la muestra N°03*





### 3.5.2.2. Cálculos del Ensayo de Densidad Lineal.

Los cálculos del ensayo de densidad lineal se realizaron bajo los lineamientos de la norma ISO 2307 (2010), donde se indica que el resultado numérico de la prueba es el promedio aritmético de los resultados individuales de las pruebas.

$$\rho = \frac{m}{l} \quad (2)$$

Donde:

m: es la masa de la muestra en metros

l: es la longitud en metros

De los datos tomados en los ensayos de densidad lineal, el análisis consiste en conseguir los valores de densidad lineal para cada muestra ensayada. De la toma de datos se tiene:

**Tabla 11**

*Densidad lineal para la Q'eswa seca a temperatura ambiente*

<b>Peso</b>	<b>Longitud</b>	<b>Densidad Lineal</b>
<b>gr</b>	<b>km</b>	<b>gr/km (tex)</b>
28,000	0,002	14000,000
25,000	0,002	12500,000
29,000	0,002	14500,000
27,000	0,002	13500,000
26,000	0,002	13000,000

**Tabla 12**

*Densidad lineal para la Q'eswa parcialmente húmeda*

<b>Peso</b>	<b>Longitud</b>	<b>Densidad Lineal</b>
<b>gr</b>	<b>km</b>	<b>gr/km (tex)</b>
40,000	0,002	20000,000
43,000	0,002	21500,000
44,000	0,002	22000,000
45,000	0,002	22500,000
44,000	0,002	22000,000



**Tabla 13**

*Resultados de densidad lineal para la Q'eswa completamente húmeda*

<b>Peso</b>	<b>Longitud</b>	<b>Densidad Lineal</b>
<b>gr</b>	<b>km</b>	<b>gr/km (tex)</b>
69,000	0,002	34500,000
64,000	0,002	32000,000
70,000	0,002	35000,000
66,000	0,002	33000,000
67,000	0,002	33500,000

**Tabla 14**

*Resultados de densidad lineal para el Maqui seco a temperatura ambiente*

<b>Peso</b>	<b>Longitud</b>	<b>Densidad Lineal</b>
<b>gr</b>	<b>km</b>	<b>gr/km (tex)</b>
640,000	0,002	320000,000
690,000	0,002	345000,000
750,000	0,002	375000,000
630,000	0,002	315000,000
675,000	0,002	337500,000

**Tabla 15**

*Resultados de densidad lineal para el Duro seco a temperatura ambiente*

<b>Peso</b>	<b>Longitud</b>	<b>Densidad Lineal</b>
<b>gr</b>	<b>km</b>	<b>gr/km</b>
943,500	0,002	471750,000
994,500	0,002	497250,000
1062,500	0,002	531250,000
1011,500	0,002	505750,000
1079,500	0,002	539750,000



### 3.5.2.3. Cálculos de la Caracterización Geométrica.

El procedimiento de este ensayo se realizó según las normas CI 1500 (2002), ASTM D 4268 (1993) y la norma ISO 2307 (2010).

Para el área: Para obtener el área de las cuerdas tipo *Q'eswa* se realizó la medición del diámetro con un vernier de la parte más externa o corona de las cuerdas estudiadas y se realizó el cálculo para el área según el diámetro, en cambio, para las cuerdas Maqui y Duro se realizó la medición del perímetro de la corona, de este perímetro se obtuvo el diámetro y posteriormente se calculó el área de la cuerda.

$$D = \frac{p}{\pi} \quad (3)$$

Donde:

$p$ : Perímetro de cuerda

$D$ : Diámetro de cuerda

$$A = \frac{\pi D^2}{4} \quad (4)$$

$D$ : Diámetro de cuerda

$A$ : Área de cuerda

a) Para el paso de trenza: Se realizó la medición de la longitud total de eje a eje de tambor o de empalme a empalme y se obtuvo el punto medio de la cuerda realizando en esta una marca, posteriormente se colocaron otras dos marcas equidistantes al punto medio con una separación de 5cm a los empalmes o terminaciones.

$$PM = \frac{L}{2} \quad (5)$$

$L$ : Longitud Total de eje a eje de tambor o de empalme a empalme

$PM$ : Punto medio de cuerda





#### 3.5.2.4. Cálculos del Ensayo de Contenido de Humedad.

Realizados los ensayos de humedad en el laboratorio, se determinaron los pesos finales e iniciales, calculando el porcentaje de humedad que contienen las Q'eswas mediante la siguiente expresión:

$$\%H = \frac{100\% * (P_0 - P_f)}{P_0} \quad (6)$$

Donde:

%H: es el contenido de humedad en porcentaje

$P_0$ : peso inicial de la muestra inmediatamente después del ensayo a tracción.

$P_f$ : peso de la muestra secada al horno

La tabla siguiente muestra los pesos de las cuerdas inmediatamente después de realizado el ensayo, así como el porcentaje de humedad calculado.



**Tabla 16**

*Contenidos de humedad (%) para la Q'eswa seca a temperatura ambiente*

MUESTRA	$P_0(\text{gr})$	$P_f(\text{gr})$	AGUA (gr)= $P_0 - P_f$	% HUMEDAD
QSA-01	15.1	13.8	1.30	8.61
QSA-02	15.5	14.1	1.40	9.03
QSA-03	19.1	17.4	1.70	8.90
QSA-04	14.4	13.1	1.30	9.03
QSA-05	13.3	12.1	1.20	9.02
QSA-06	14.1	12.9	1.20	8.51
QSA-07	15.2	13.9	1.30	8.55
QSA-08	12.5	11.4	1.10	8.80
QSA-09	14.4	13.1	1.30	9.03
QSA-10	12.3	11.2	1.10	8.94
QSA-11	15.3	14	1.30	8.50
QSA-12	14.1	12.9	1.20	8.51
QSA-13	20.1	18.3	1.80	8.96
QSA-14	15.3	14	1.30	8.50
QSA-15	15.2	13.9	1.30	8.55
QSA-16	15.7	14.3	1.40	8.92
QSA-17	17	15.5	1.50	8.82
QSA-18	14.1	12.9	1.20	8.51
QSA-19	12.3	11.2	1.10	8.94
QSA-20	12.2	11.1	1.10	9.02
QSA-21	14.4	13.1	1.30	9.03
QSA-22	15.6	14.3	1.30	8.33
QSA-23	12.6	11.5	1.10	8.73
QSA-24	15	13.7	1.30	8.67
QSA-25	12.5	11.4	1.10	8.80
<i>promedio</i>				8.77
<i>desviación estándar</i>				0.22



**Tabla 17**

*Contenidos de humedad (%) para la Q'eswa parcialmente húmeda*

MUESTRA	$P_0$ (gr)	$P_f$ (gr)	AGUA (gr)= $P_0 - P_f$	% HUMEDAD
QPH-01	57.1	40.50	16.60	29.07
QPH-02	51.3	35.70	15.60	30.41
QPH-03	62.2	43.10	19.10	30.71
QPH-04	60.8	42.70	18.10	29.77
QPH-05	52.6	37.20	15.40	29.28
QPH-06	50.1	34.60	15.50	30.94
QPH-07	45.2	31.30	13.90	30.75
QPH-08	45.3	31.00	14.30	31.57
QPH-09	55.3	38.30	17.00	30.74
QPH-10	57.1	39.70	17.40	30.47
QPH-11	58.7	40.80	17.90	30.49
QPH-12	44	30.50	13.50	30.68
QPH-13	54.5	38.30	16.20	29.72
QPH-14	49.1	33.90	15.20	30.96
QPH-15	68.1	46.90	21.20	31.13
QPH-16	52.5	36.50	16.00	30.48
QPH-17	53	37	16.00	30.19
QPH-18	52.2	36.7	15.50	29.69
QPH-19	57.2	40.2	17.00	29.72
QPH-20	51.6	35.8	15.80	30.62
QPH-21	50.9	36.1	14.80	29.08
QPH-22	49.7	34.8	14.90	29.98
QPH-23	50.5	35	15.50	30.69
QPH-24	59	41	18.00	30.51
QPH-25	54	37.2	16.80	31.11
<i>promedio</i>				30.35
<i>desviación estándar</i>				0.66



**Tabla 18**

*Contenidos de humedad (%) para la Q'eswa completamente húmeda*

MUESTRA	$P_0(\text{gr})$	$P_f(\text{gr})$	AGUA (gr)= $P_0 - P_f$	% HUMEDAD
QH-01	59.40	29.40	30.00	50.51
QH-02	58.30	26.90	31.40	53.86
QH-03	64.70	30.70	34.00	52.55
QH-04	60.00	27.70	32.30	53.83
QH-05	55.80	27.00	28.80	51.61
QH-06	60.20	28.50	31.70	52.66
QH-07	64.30	29.60	34.70	53.97
QH-08	54.90	26.80	28.10	51.18
QH-09	59.10	28.10	31.00	52.45
QH-10	61.10	29.20	31.90	52.21
QH-11	57.90	29.40	28.50	49.22
QH-12	57.40	29.30	28.10	48.95
QH-13	61.60	29.30	32.30	52.44
QH-14	58.20	29.00	29.20	50.17
QH-15	57.40	29.00	28.40	49.48
QH-16	62.10	30.50	31.60	50.89
QH-17	58.50	28.20	30.30	51.79
QH-18	55.80	28.50	27.30	48.92
QH-19	66.20	31.50	34.70	52.42
QH-20	66.40	31.10	35.30	53.16
QH-21	60.80	30.90	29.90	49.18
QH-22	63.50	30.90	32.60	51.34
QH-23	65.40	31.60	33.80	51.68
QH-24	64.60	31.60	33.00	51.08
QH-25	56.00	27.50	28.50	50.89
<i>promedio</i>				51.46
<i>desviación estándar</i>				1.54



### 3.5.2.5. Cálculos del Ensayo de Tracción.

De las muestras ensayadas a tracción, se obtuvieron datos para los grupos de las Q'eswas en las tres condiciones de humedad (seca a temperatura ambiente, parcialmente húmeda, completamente húmeda), y condición seca a temperatura ambiente para el *Maqui* y el *Duro*.

a) Para el esfuerzo: Los datos obtenidos del ensayo a tracción para la resistencia a tracción de la cuerda fueron tomados en kg la cual fue convertida en Newtons. Posterior a este cálculo se determinó el esfuerzo en MPa y N/tex dividiendo la fuerza en Newtons por el área de la cuerda ( $\text{mm}^2$ ) y por la densidad lineal de la cuerda (tex) respectivamente.

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (7)$$

Donde:

$\sigma$ : Esfuerzo (MPa)

$F$ : Carga (N)

$A$ : Área ( $\text{mm}^2$ )

$$\sigma = \frac{F}{\rho} \quad (8)$$

Donde:

$\sigma$ : Esfuerzo (N/tex)

$F$ : Carga (N)

$\rho$ : Densidad Lineal (tex)

b) Para la deformación unitaria: Los datos obtenidos del ensayo a tracción para el alargamiento de la cuerda en cada punto fueron tomados en cm, posteriormente transformados a mm y divididos entre la longitud inicial o útil de la cuerda a ensayar para obtener la deformación unitaria en mm/mm y para obtenerlas en % multiplicadas por 100.

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (9)$$



Donde:

$\varepsilon$ : Deformación Unitaria (mm/mm)

$\Delta L$ : Alargamiento (mm)

$L$ : Longitud Inicial o Longitud Útil (mm)

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} * 100 \quad (10)$$

Donde:

$\varepsilon$ : Deformación Unitaria (%)

$\Delta L$ : Alargamiento (mm)

$L$ : Longitud Inicial o Longitud Útil (mm)

c) Para la deformación de cuerda: Se realizó el cálculo entre la tensión de referencia y al 75% del esfuerzo máximo de la cuerda, para esto se tomaron las medidas de la longitud en estos dos puntos y se realizó el siguiente cálculo.

$$\varepsilon_c = \frac{L_{75} - L_{tr}}{L_{tr}} * 100 \quad (11)$$

Donde:

$\varepsilon_c$ : Deformación de Cuerda (%)

$L_{75}$ : Longitud al 75% del esfuerzo máximo

$L_{tr}$ : Longitud a la tensión de referencia

d) Para el ajuste polinómico de 3er grado: Según la documentación oficial de la empresa OriginLab el ajuste polinómico se realiza de la siguiente manera.

i. El modelo matemático para un ajuste polinómico en *OriginPro* (versión 2021 v9.8.0.200) es representado por la ecuación:

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_i + \beta_2 x_i^2 + \beta_3 x_i^3 + \dots + \beta_k x_i^k + \varepsilon_i \quad (12)$$



- ii. En donde  $k$  representa el grado del polinomio, para un ajuste polinómico de tercer grado  $k=3$ .
  - iii. Los coeficientes del polinomio ( $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3$ ) son estimados utilizando el método de mínimos cuadrados ponderados.
  - iv. Una vez realizado el ajuste, el modelo se evalúa utilizando pruebas de hipótesis y gráficos residuales para entender la calidad de ajuste y verificar los supuestos subyacentes del modelo.
- e) Para el promedio de curvas múltiples: Este método se basa en establecer un intervalo, para nuestro caso de deformaciones para todas las muestras, en los cuales los datos de esfuerzo que corresponden a un mismo valor de deformación se promedian en un solo valor para obtener distintos puntos y obtener una curva representativa de un conjunto de curvas. Según la documentación oficial de la empresa OriginLab el promedio de curvas múltiples realizado por el software *OriginPro* utiliza el siguiente algoritmo:
- i. Se especifica el rango de valores del eje X (deformación) a interpolarse
  - ii. *OriginPro* interpola las curvas de entrada individualmente para establecer un conjunto común de valores X (deformación).
  - iii. Los valores de Y (esfuerzo) correspondientes se obtienen luego promediando los valores de Y en cada X.
- f) Para el módulo de elasticidad: Al obtener la curva promedio representativa de la curva esfuerzo-deformación para cada tipo de cuerda se realiza los siguientes pasos:
- i. Se determina el rango de la región elástica, para el caso de esta investigación se determinó este rango entre la tensión de referencia y el 75% del esfuerzo máximo obtenido de la curva promedio representativa.
  - ii. Se realiza el ajuste lineal pertinente en esta región para obtener una recta donde la pendiente de esta nos indicará el valor del módulo de elasticidad en MPa o N/tex. El algoritmo utilizado para el ajuste lineal según la documentación de OriginLab es el método de mínimos cuadrados.
  - iii. Una vez realizado este ajuste se verifican aspectos como el coeficiente de verificación ( $R^2$ ) donde un  $R^2$  cercano a 1 indica un buen ajuste.



### 3.5.2.6. Curvas Obtenidas de los Ensayos a Tracción.

#### Curvas Experimentales de Fuerza-Desplazamiento.

Figura 44

Curva fuerza-desplazamiento para la cuerda Q'eswa seca a temperatura ambiente (QSA)

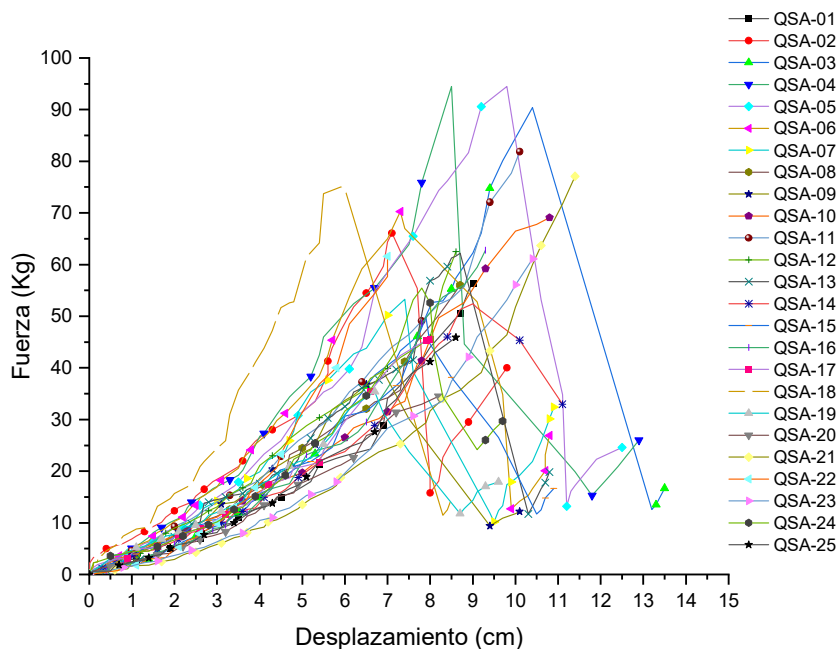
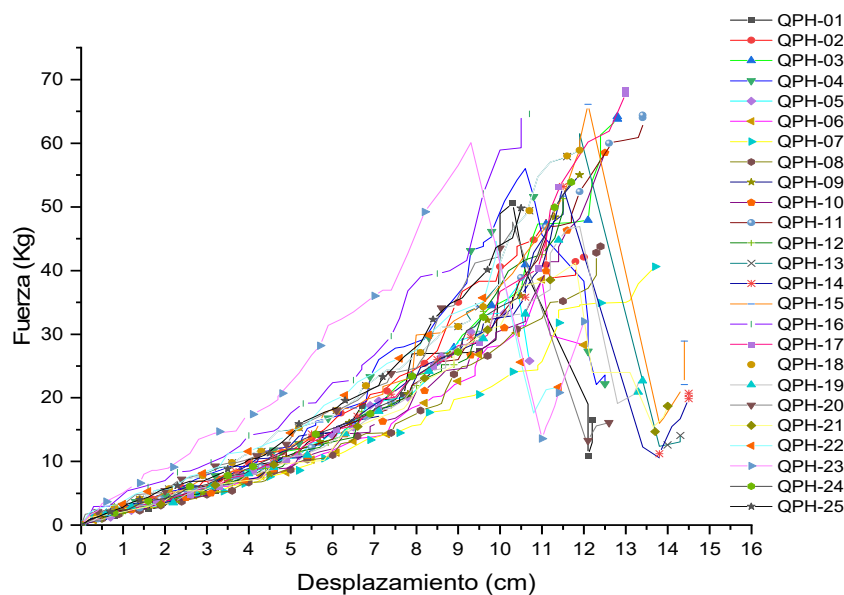


Figura 45

Curva fuerza-desplazamiento para la cuerda Q'eswa parcialmente húmeda (QPH)

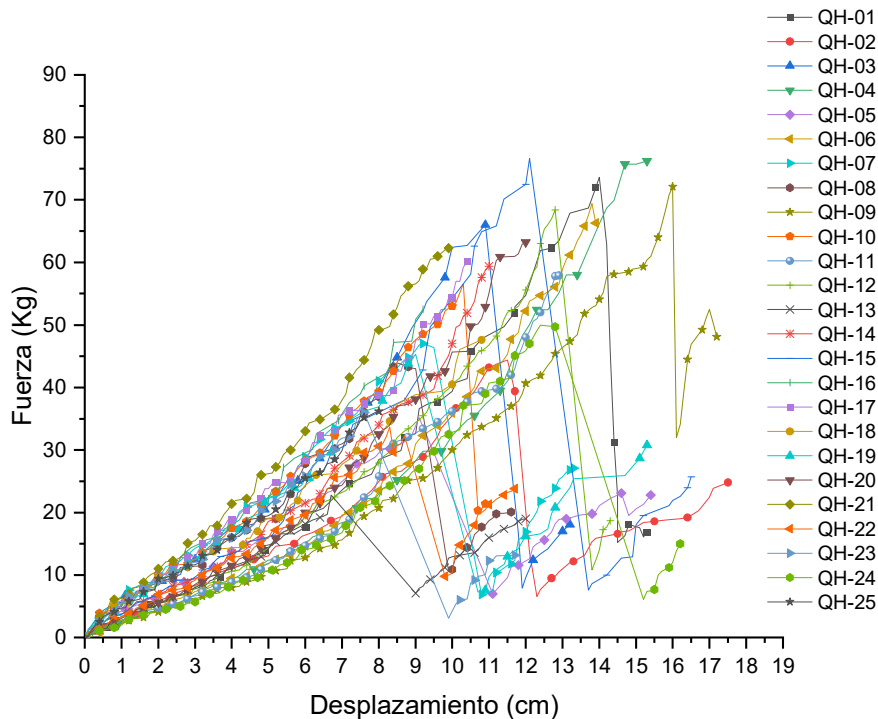






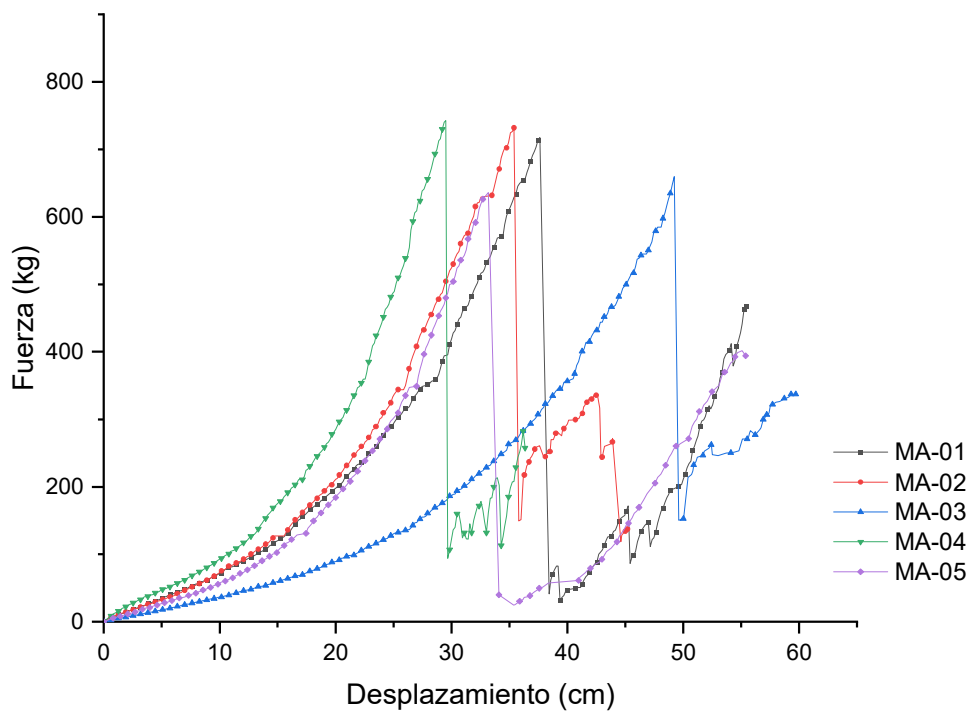
**Figura 46**

*Curva fuerza-desplazamiento para la cuerda Q'eswa completamente húmeda*



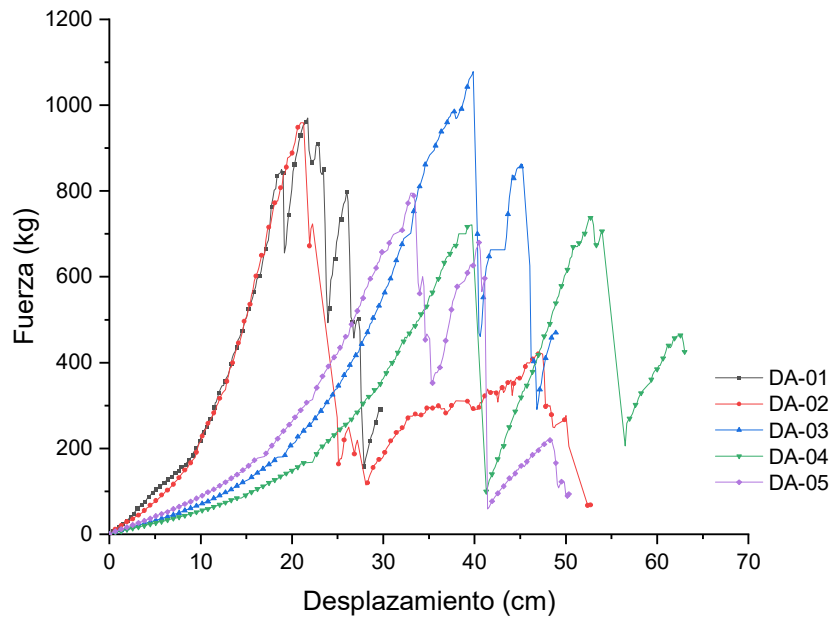
**Figura 47**

*Curva fuerza-desplazamiento para la cuerda Maqui seca a temperatura ambiente (MA)*



**Figura 48**

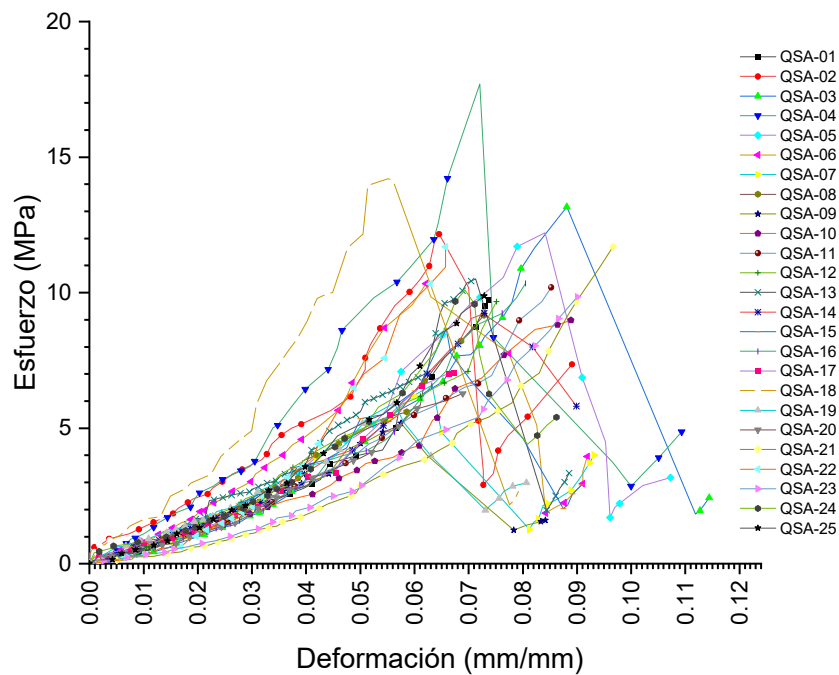
*Cuerva fuerza-desplazamiento para la cuerda Duro seca a temperatura ambiente (DA)*



**Curvas Experimentales de Esfuerzo-Deformación.**

**Figura 49**

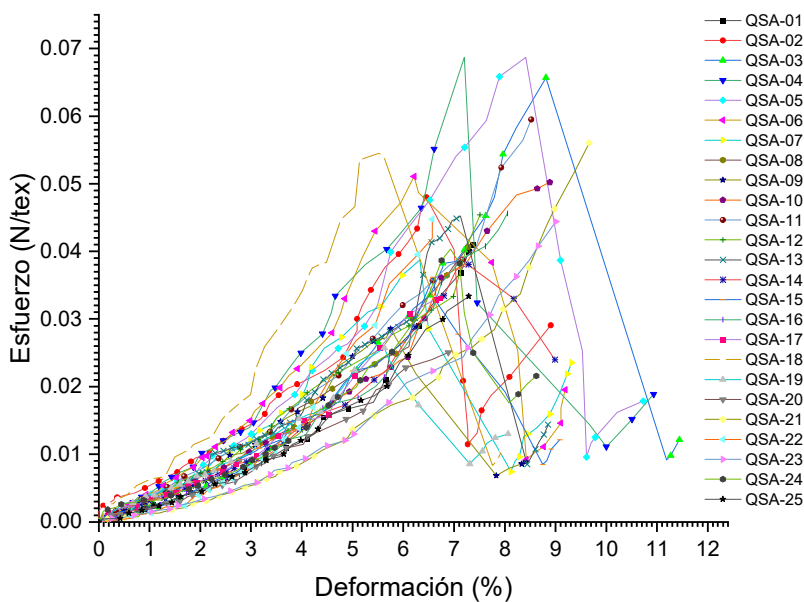
*Curva Esfuerzo-Deformación obtenidas de los ensayos a tracción de la Q'eswa seca a temperatura ambiente (QSA) en MPa vs mm/mm*





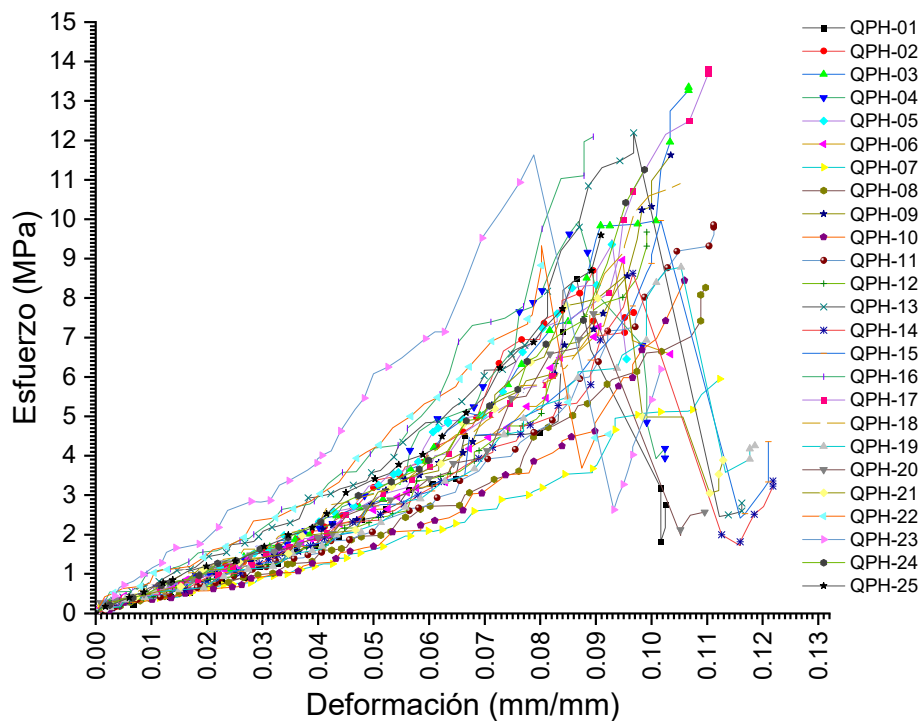
**Figura 50**

*Curva Esfuerzo-Deformación obtenidas de los ensayos a tracción de la Q'eswa seca a temperatura ambiente (QSA) en N/tex vs %*



**Figura 51**

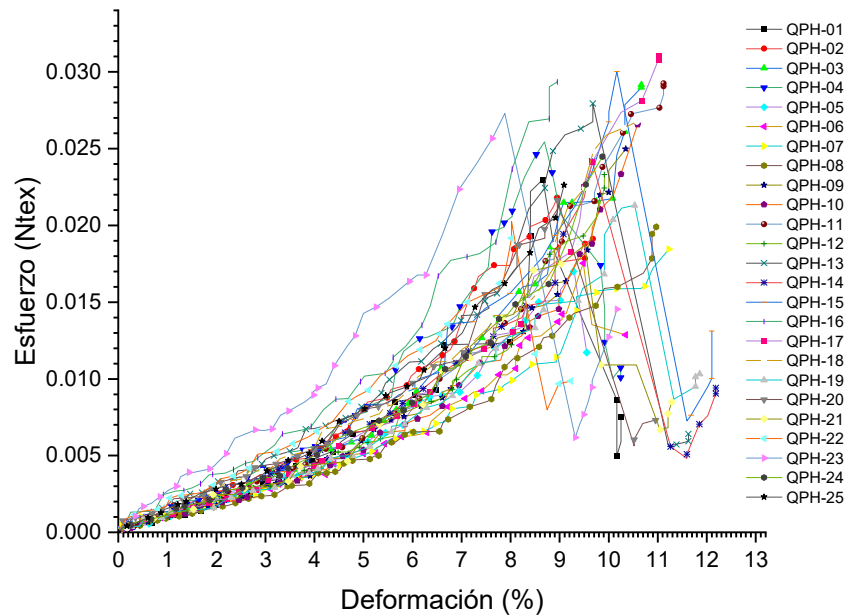
*Curva Esfuerzo-Deformación obtenidas de los ensayos a tracción de la Q'eswa parcialmente húmeda (QPH) en MPa vs mm/mm*





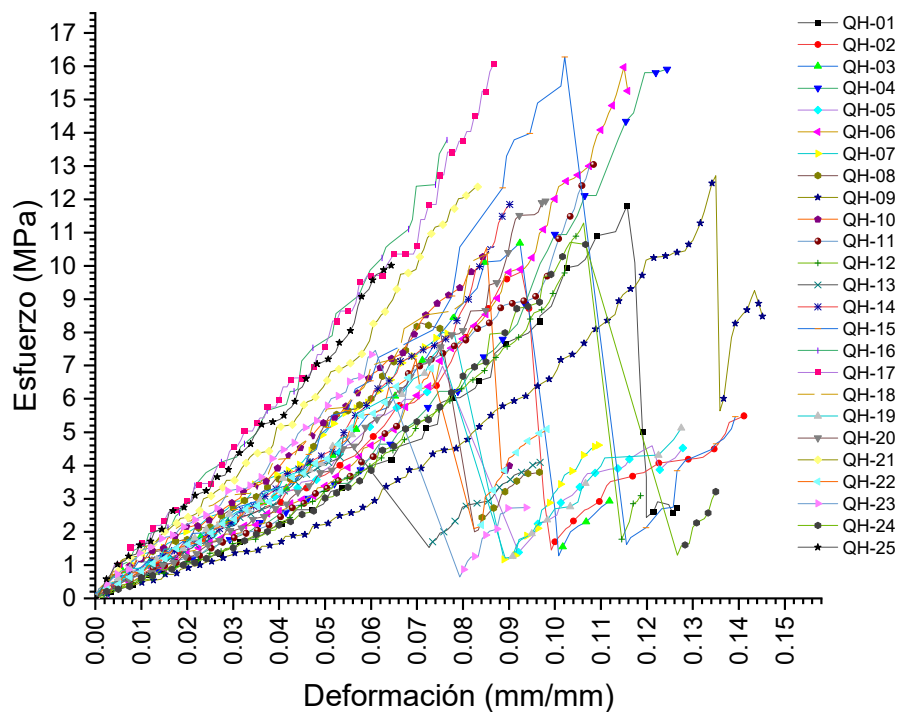
**Figura 52**

*Curva Esfuerzo-Deformación obtenidas de los ensayos a tracción de la Q'eswa parcialmente húmeda (QPH) en N/tex vs %*



**Figura 53**

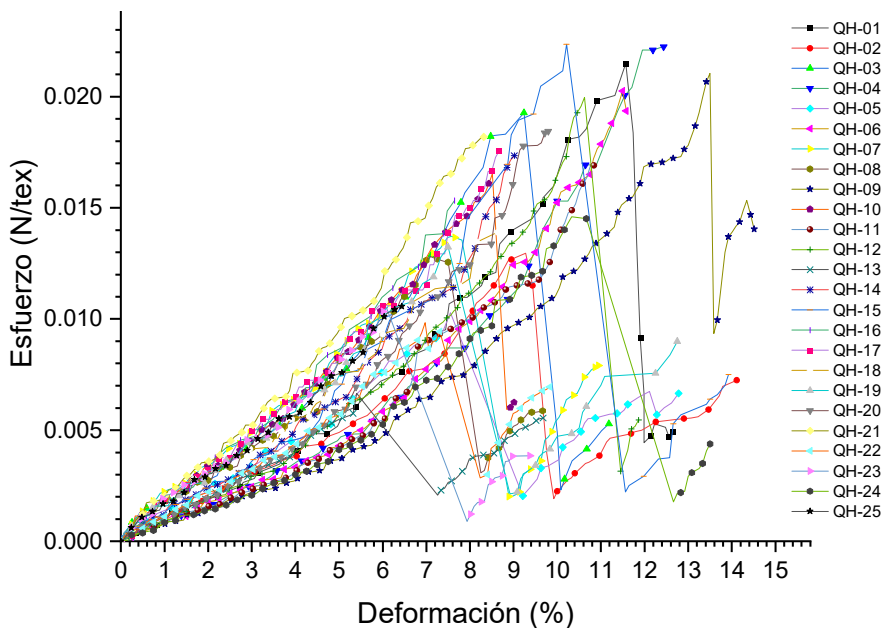
*Curva Esfuerzo-Deformación obtenidas de los ensayos a tracción de la Q'eswa completamente húmeda (QH) en MPa vs mm/mm*





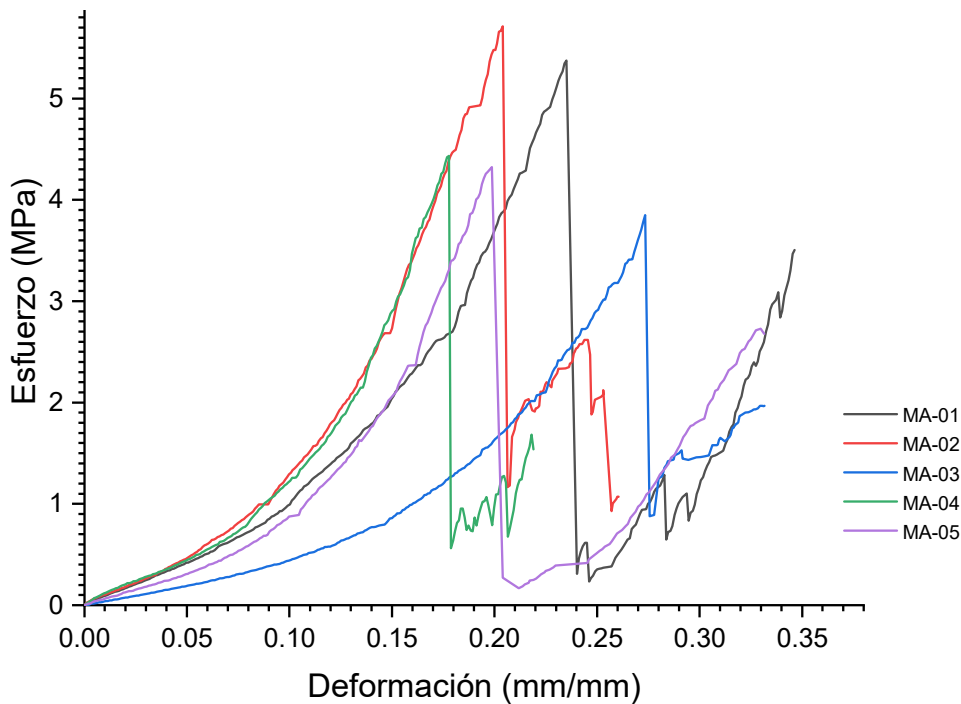
**Figura 54**

*Curva Esfuerzo-Deformación obtenidas de los ensayos a tracción de la Q'eswa completamente húmeda (QH) en N/tex vs %*



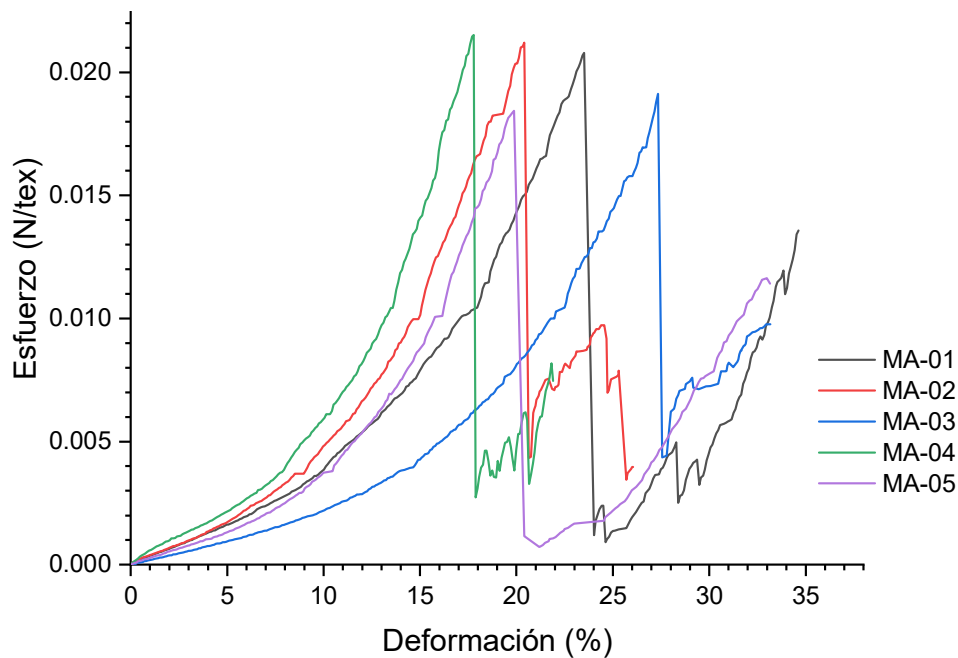
**Figura 55**

*Curva Esfuerzo-Deformación obtenidas de los ensayos a tracción del Maqui seco a temperatura ambiente en MPa vs mm/mm*



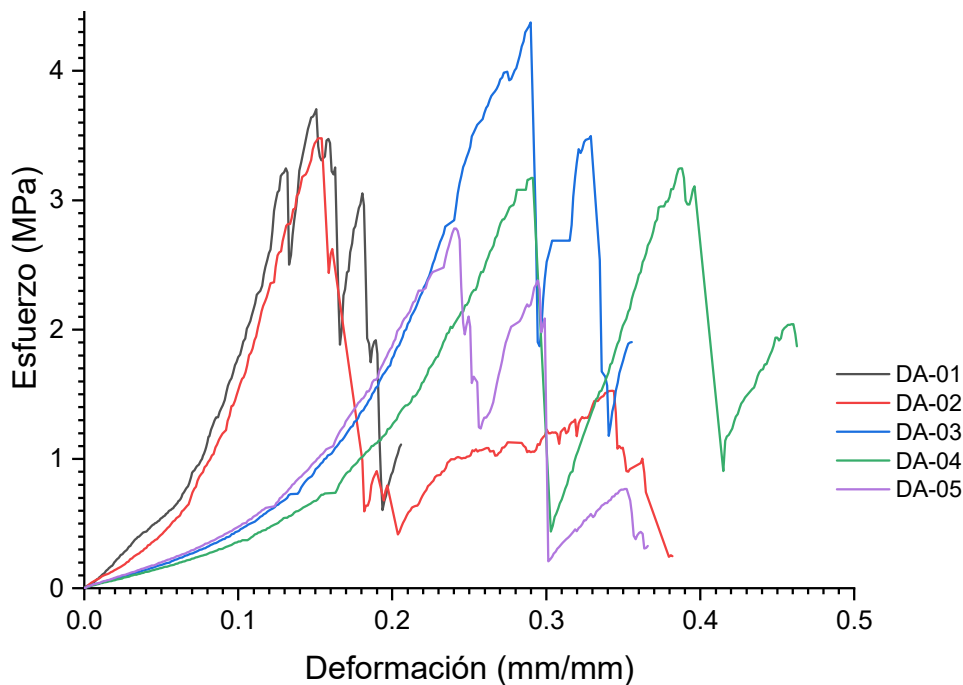
**Figura 56**

*Curva Esfuerzo-Deformación obtenidas de los ensayos a tracción del Maqui seco a temperatura ambiente en N/tex vs %*



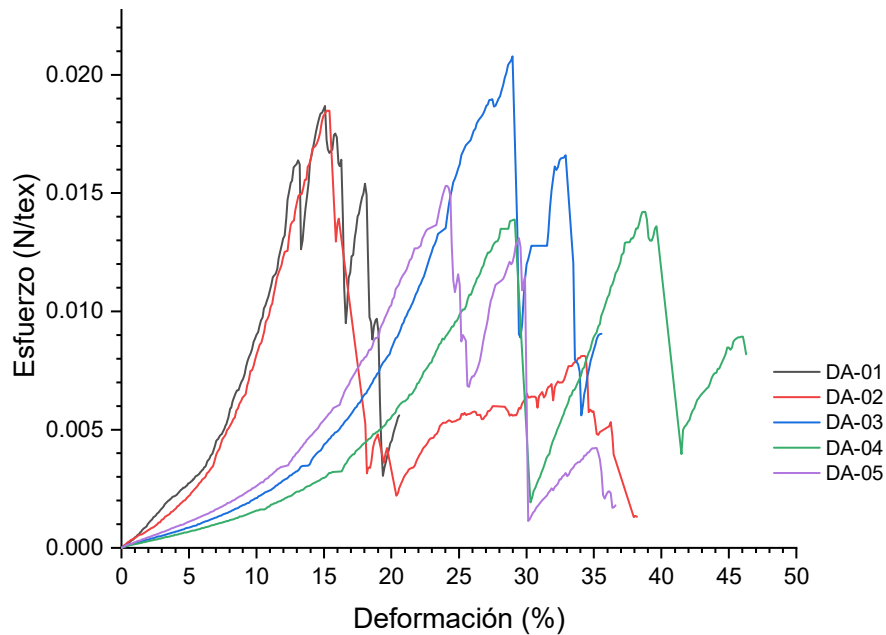
**Figura 57**

*Curva Esfuerzo-Deformación obtenidas de los ensayos a tracción del Duro seco a temperatura ambiente en MPa vs mm/mm*



**Figura 58**

*Curva Esfuerzo-Deformación obtenidas de los ensayos a tracción del Duro seco a temperatura ambiente en N/tex vs %*



### 3.5.3. Verificación

#### 3.5.3.1. Verificación de los Resultados de Esfuerzo a Tracción, Deformación Unitaria Máxima y Deformación de Cuerda.

Para los ensayos a tracción la verificación de los resultados de esfuerzo, fueron contrastados mediante la calibración de la celda de carga.

**Figura 59**

*Certificado de calibración de la celda de carga de la empresa G&L LABORATORIO S.A.C*





Figura 60

Certificado de calibración de celda de carga



SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD  
NTP ISO / IEC 17025:2017



## CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN

TC - 25273 - 2023

PROFORMA : 25356A Fecha de emisión: 2024-01-04 Página : 1 de 2

SOLICITANTE : UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO  
Dirección : Mica, A Lote 5 Urb. Ingeniería Laraja Grande Cusco-Cusco-San Jerónimo

**INSTRUMENTO DE MEDICIÓN :** Celda de Carga  
Marca : ZEMIC  
Modelo : H35-C3-5.0E-6R  
Nº de Serie : 012-WC2088540318  
Alcance de Indicación : 5000 kgf  
División de Escala : 0,01 kgf  
Precedencia : NO INDICA  
Identificación : NO INDICA  
Fecha de Calibración : 2023-12-14  
Gravedad Local : 9.7823 m/s<sup>2</sup>  
Ubicación : NO INDICA

**LUGAR DE CALIBRACIÓN**  
Laboratorio de TEST & CONTROL S.A.C.

**MÉTODO DE CALIBRACIÓN**  
La calibración se efectúa por comparación directa tomando como referencia la norma UNE-EN ISO 376. Calibración de los instrumentos de medida de fuerza utilizados para la verificación de las máquinas de ensayo uniaxial.

**CONDICIONES AMBIENTALES**

Magnitud	Inicial	Final
Temperatura	21,3 °C	21,8 °C
Humedad Relativa	65 % HR	66 % HR

TEST & CONTROL S.A.C. es un Laboratorio de Calibración y Certificación de equipos de medición basado a la Norma Técnica Peruana ISO/IEC 17025. TEST & CONTROL S.A.C. brinda los servicios de calibración de instrumentos de medición con los más altos estándares de calidad, garantizando la satisfacción de nuestros clientes. Este certificado de calibración documenta la trazabilidad a los patrones nacionales o internacionales, de acuerdo con el Sistema Internacional de Unidades (SI).

Con el fin de asegurar la calidad de sus mediciones se le recomienda al usuario recalibrar sus instrumentos a intervalos apropiados de acuerdo al uso.

Los resultados en el presente documento no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.

TEST & CONTROL S.A.C. no se responsabiliza de los perjuicios que puedan ocurrir después de su calibración debido a la mala manipulación de este instrumento, ni de una incorrecta interpretación de los resultados de la calibración declarados en el presente documento.

El presente documento carece de valor sin firma y sello.

Lic. Nicolás Ramos Paucar  
Gerente Técnico  
CPI: 0516





Certificado : TC - 25273 - 2023  
Página : 2 de 2

**TRAZABILIDAD**

Patrón de Referencia	Patrón de Trabajo	Certificado de Calibración
Patrones de Referencia de ACP TRANSUCERS.	Celda de carga de capacidad 3 MN Modelo CI Flex Indicador digital modelo MPiplus	LAT 093 8523F

**RESULTADOS DE MEDICIÓN**

RESULTADOS			
INDICACIÓN DEL EQUIPO BAJO CALIBRACIÓN	INDICACIÓN DEL PATRÓN	ERROR	INCERTIDUMBRE
kgf	kgf	kgf	kgf
0.00	0.00	0.00	0.01
100.1	100.00	0.10	0.01
200.1	200.00	0.10	0.02
500.2	500.00	0.20	0.02
999.8	1000.00	-0.20	0.03
1999.2	2000.00	-0.80	0.03
2998.6	3000.00	-1.40	0.04
3998.5	4000.00	-1.50	0.05
4998.2	5000.00	-1.80	0.06

**OBSERVACIONES**

Con fines de identificación de la calibración se colocó una etiqueta autoadhesiva con número de certificado.

**DECLARACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE EXPANDIDA U**

La incertidumbre expandida se ha obtenido multiplicando la incertidumbre típica de medición por el factor de cobertura  $k=2$  que, para una distribución normal, corresponde a una probabilidad de cobertura de aproximadamente el 95%.

FIN DEL DOCUMENTO

Para la medición longitudes y deformaciones se hizo uso de un flexómetro calibrado.

**Figura 61**

*Cinta métrica calibrada*





### 3.5.3.2. Test de Grubbs para el Descarte de Muestras.

Según Frank E. Grubbs es un método estadístico que trata sobre el problema de las observaciones atípicas en las muestras y como probar la significancia de estas mismas. Las observaciones atípicas son aquellas que parecen desviarse notablemente de otros miembros de la muestra en la que ocurre. Es por eso que se pueden tomar dos alternativas según este test:

- Una observación atípica puede ser simplemente una manifestación extrema de la variabilidad aleatoria inherente a los datos. Si esto se confirma, los valores deben conservarse y procesarse de la misma manera que las demás observaciones de la muestra.
- En cambio, si una observación atípica es resultado de una desviación grave del procedimiento experimental prescrito o de un error al calcular o registrar el valor numérico es conveniente realizar una investigación o revisar anotaciones del ensayo realizado y posteriormente ser rechazada y excluida del conjunto de muestras.

Para este trabajo de investigación realizado, la aplicación del test de Grubbs para el descarte de datos atípicos se basó en contraste con la norma ASTM D2256 (2008) para tomar la decisión de descarte de muestras durante los ensayos y la variabilidad inherente a la cuerda, nos indica lo siguiente:

- Descartar muestras que sufran roturas en los empalmes o roturas en el ojo de empalme (*eye splice*).
- Descartar muestras con roturas cercanas a los empalmes que dé como resultado un valor inferior al 20% del promedio de la fuerza de rotura del conjunto de muestras, se descarta el resultado y se prueba otra muestra hasta obtener el número de roturas aceptables.
- No se descartará ninguna otra rotura a menos que se sepa que la muestra es defectuosa.
- Sin embargo, si se debe simplemente a puntos débiles distribuidos aleatoriamente es un resultado legítimo.

El test de Grubbs fue realizado solo para la propiedad de esfuerzo máximo en MPa como se indican en la norma ASTM D2256 (2008).

- a) Test de Grubbs para la cuerda *Q'eswa* en condición seca a temperatura ambiente.



**Tabla 19**

*Estadística Descriptiva para el esfuerzo máximo en MPa de la cuerda Q'eswa en condición seca a temperatura ambiente*

	N	Media	Desviación Estándar	Error Estándar de la Media
B	25	10.023	2.747	0.549

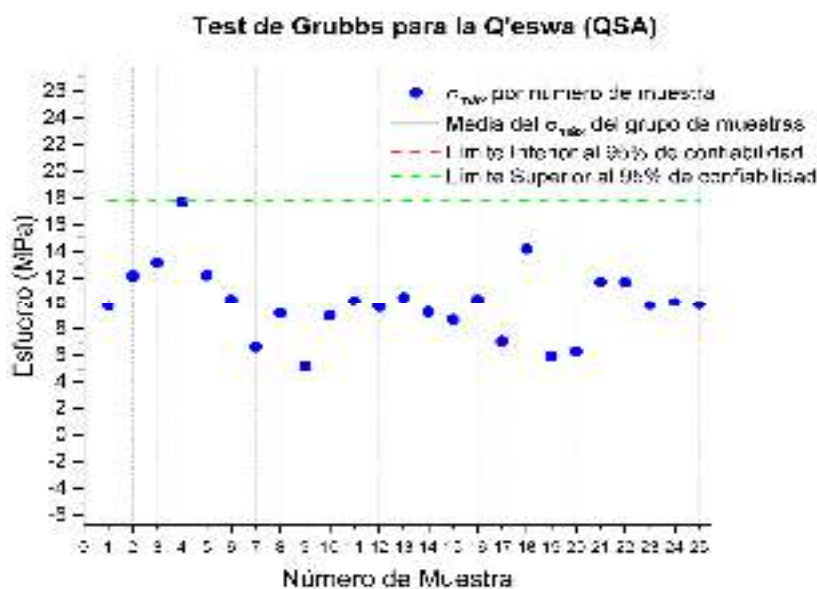
**Tabla 20**

*Estadísticos de prueba para el esfuerzo máximo en MPa de la cuerda Q'eswa en condición seca a temperatura ambiente*

	Punto de dato con mayor estadístico G	Estadístico G	Valor Critico	P valor aproximado	Significancia
B	17.698	2.794	2.822	0.0566	0

**Figura 62**

*Test de Grubbs para la cuerda Q'eswa en condición seca a temperatura ambiente*



**Comentario:** Según el test de Grubbs al 95% de confiabilidad no existe un valor atípico significativo, sin embargo, las muestras QSA-07, QSA-09, QSA-17, QSA-19 y QSA-20 están por debajo del 20% del esfuerzo máximo promedio, debido a que estas roturas no ocurrieron cerca a los empalmes, se asume que son simplemente puntos débiles distribuidos aleatoriamente por lo cual estas muestras no son descartadas.

b) Test de Grubbs para la cuerda *Q'eswa* en condición parcialmente húmeda.

**Tabla 21**

*Estadística Descriptiva para el esfuerzo máximo en MPa de la cuerda Q'eswa en condición parcialmente húmeda*

	N	Media	Desviación Estándar	Error Estándar de la Media
B	25	9.886	1.842	0.368

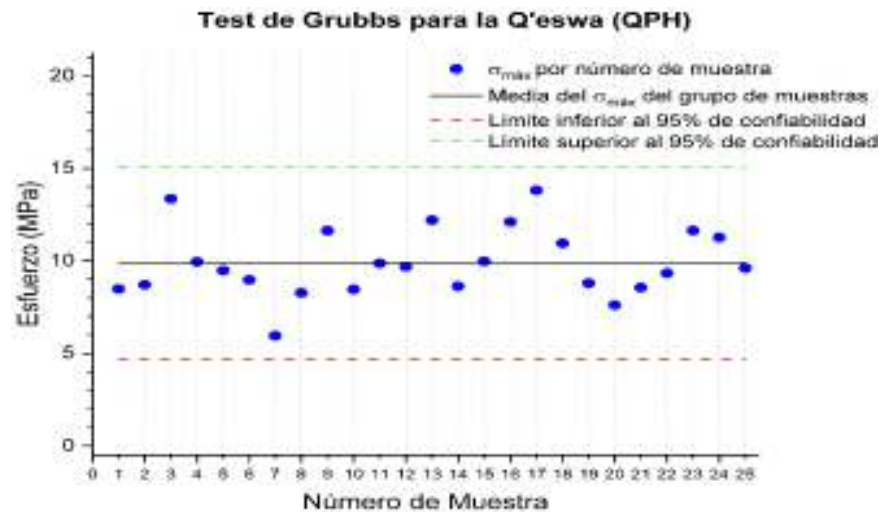
**Tabla 22**

*Estadísticos de prueba para el esfuerzo máximo en MPa de la cuerda Q'eswa en condición parcialmente húmeda*

	Punto de dato con mayor estadístico G	Estadístico G	Valor Critico	P valor aproximado	Significancia
B	5.948	2.138	2.822	0.642	0

**Figura 63**

*Test de Grubbs para la cuerda Q'eswa en condición parcialmente húmeda*



**Comentario:** Según el test de Grubbs al 95% de confiabilidad no existe un valor atípico significativo, sin embargo, las muestras QPH-07 y QPH-20 están por debajo del 20% del esfuerzo máximo promedio, debido a que estas roturas no ocurrieron cerca a los empalmes se asume que son simplemente puntos débiles distribuidos aleatoriamente por lo cual estas muestras no son descartadas.



c) Test de Grubbs para la cuerda *Q'eswa* en condición completamente húmeda

**Tabla 23**

*Estadística Descriptiva para el esfuerzo máximo en MPa de la cuerda Q'eswa en condición completamente húmeda*

	N	Media	Desviación Estándar	Error Estándar de la Media
B	25	10.756	3.255	0.651

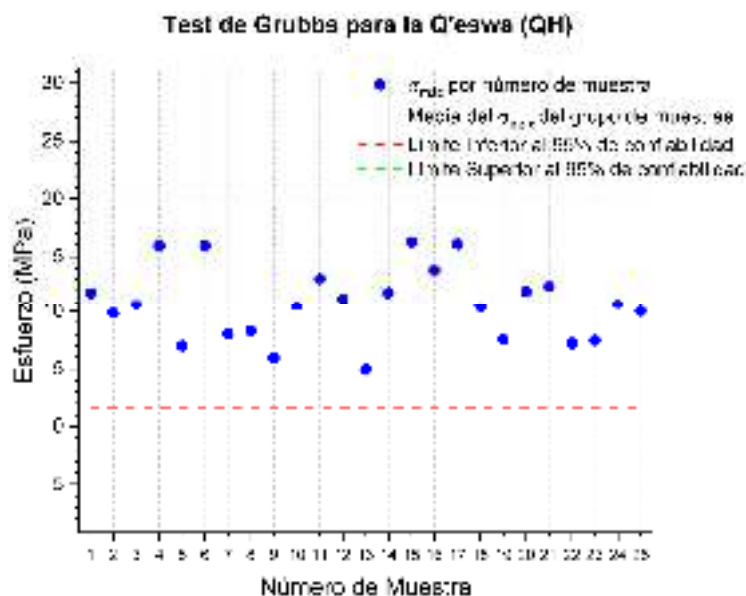
**Tabla 24**

*Estadísticos de prueba para el esfuerzo máximo en MPa de la cuerda Q'eswa en condición completamente húmeda*

	Punto de dato con mayor estadístico G	Estadístico G	Valor Critico	P valor aproximado	Significancia
B	4.913	1.795	2.822	1.639	0

**Figura 64**

*Test de Grubbs para la cuerda Q'eswa en condición completamente húmeda*



**Comentario:** Según el test de Grubbs al 95% de confiabilidad no existe un valor atípico significativo, sin embargo, las muestras QH-05, QH-07, QH-08, QH-09, QH-13, QH-19, QH-22 y QH-23 están por debajo del 20% del esfuerzo máximo



promedio, debido a que estas roturas no ocurrieron cerca a los empalmes se asume que son simplemente puntos débiles distribuidos aleatoriamente por lo cual estas muestras no son descartadas.

d) Test de Grubbs para la cuerda *Maqui* en condición seca a temperatura ambiente

**Tabla 25**

*Estadística Descriptiva para el esfuerzo máximo en MPa de la cuerda Maqui en condición seca a temperatura ambiente*

	N	Media	Desviación Estándar	Error Estándar de la Media
B	5	4.739	0.775	0.347

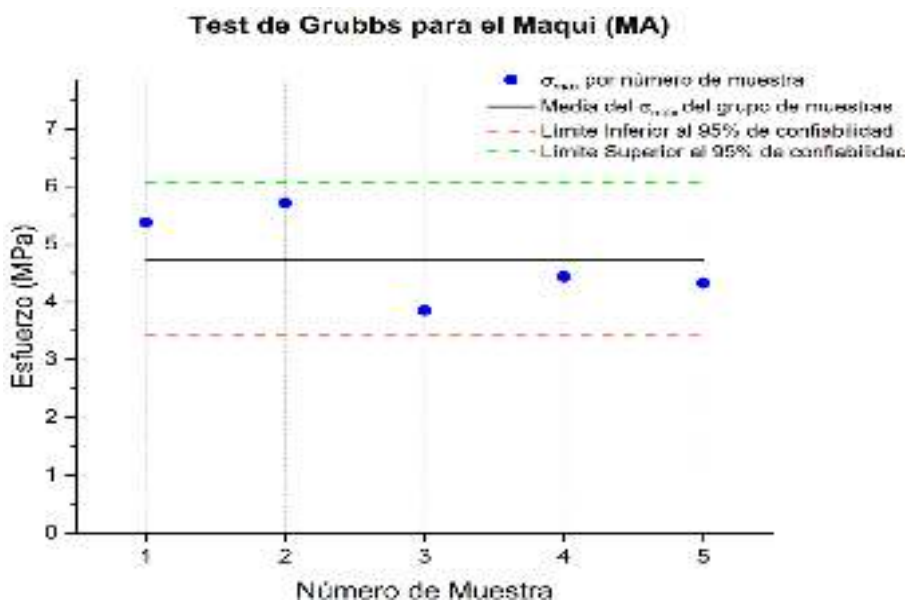
**Tabla 26**

*Estadísticos de prueba para el esfuerzo máximo en MPa de la cuerda Maqui en condición seca a temperatura ambiente*

	Punto de dato con mayor estadístico G	Estadístico G	Valor Critico	P valor aproximado	Significancia
B	5.713	1.256	1.715	0.931	0

**Figura 65**

*Test de Grubbs para la cuerda Maqui en condición seca a temperatura ambiente*





**Comentario:** Según el test de Grubbs al 95% de confiabilidad no existe un valor atípico significativo, a su vez no existe muestra que esté por debajo del 20% del esfuerzo máximo promedio como también no existen muestras con roturas cercana a los empalmes. Por lo cual ninguna de las muestras fue descartada.

e) Test de Grubbs para la cuerda *Duro* en condición seca a temperatura ambiente

**Tabla 27**

*Estadística Descriptiva para el esfuerzo máximo en MPa de la cuerda Duro en condición seca a temperatura ambiente*

	N	Media	Desviación Estándar	Error Estándar de la Media
B	5	3.517	0.589	0.263

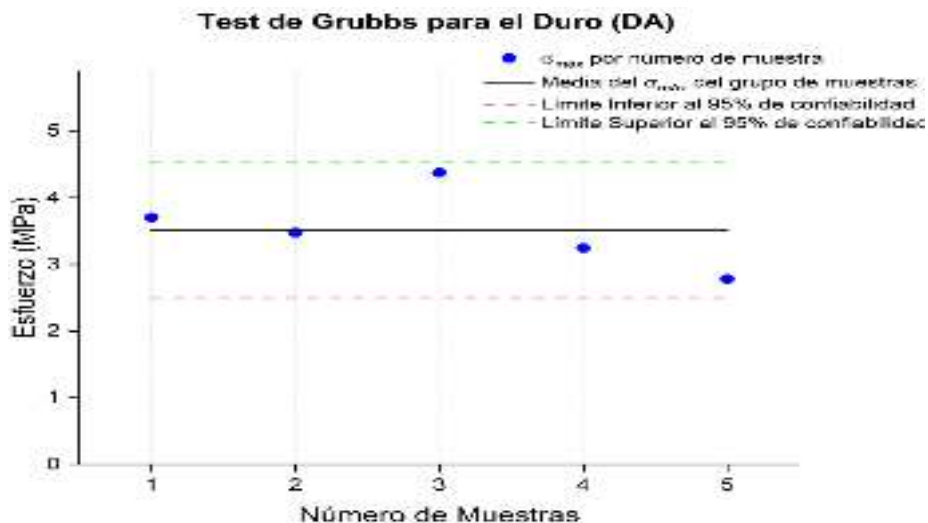
**Tabla 28**

*Estadísticos de prueba para el esfuerzo máximo en MPa de la cuerda Duro en condición seca a temperatura ambiente*

	Punto de dato con mayor estadístico G	Estadístico G	Valor Critico	P valor aproximado	Significancia
B	4.375	1.457	1.715	0.467	0

**Figura 66**

*Test de Grubbs para la cuerda Duro en condición seca a temperatura ambiente*







**Comentario:** Según el test de Grubbs al 95% de confiabilidad no existe un valor atípico significativo, sin embargo, la muestra DA-05 está por debajo del 20% del esfuerzo máximo promedio, debido a que esta rotura no ocurrió cerca a los empalmes se asume que son simplemente puntos débiles distribuidos aleatoriamente por lo cual esta muestra no es descartada.

### 3.5.3.3. Verificación del Grado de Ajuste Polinómico de Tercer Grado.

La elección de un modelo matemático para ajustar los datos experimentales es una decisión crítica que tiene el potencial de influir en la interpretación y la aplicabilidad de los hallazgos. En el caso de esta investigación se optó por un ajuste polinómico de tercer grado para la curva de esfuerzo-deformación de las cuerdas ensayadas por los siguientes factores.

- a) Referencia bibliográfica: Durante el proceso de revisión y búsqueda de literatura, se identificó información relevante en la que se usa este grado de ajuste polinómico como se indica en el artículo científico “*Study on the Compressive Stress–Strain Curve and Performance of Low-Slump Polypropylene Fiber Concrete after High Temperature*” de Li B, et al (2023) que divide la curva esfuerzo-deformación en una parte ascendente y otra descendente. Para el caso de esta investigación se hizo uso de la parte ascendente de la curva esfuerzo-deformación la cual se considera hasta el punto de esfuerzo máximo debido a que es la que representa fielmente el comportamiento real de la cuerda cuando se somete a esfuerzos crecientes. Es en este segmento donde se pueden observar las características inherentes a la cuerda, su capacidad de resistencia y su comportamiento elástico antes de alcanzar su límite y también a que los siguientes segmentos de la curva esfuerzo-deformación están perturbadas por las roturas internas de fibras de la cuerda y no representa el fenómeno físico descrito por una cuerda constituida de torones o torcidas. Así mismo, indica Montgomery D. (2012) en el libro “*Introduction to Linear Regression Analysis*” que el ajuste cubico de polinomios suele ser la más adecuada para la mayoría de problemas prácticos.
- b) Aplicación estadística “*Rank Models*”: Esta aplicación del software *OriginPro* nos permite ajustar y clasificar múltiples funciones para identificar el modelo que mejor se ajuste a nuestros datos mediante informes de ajuste, encontrando el modelo óptimo por criterios como el Criterio de Información de Akaike (AIC), el Criterio de Información Bayesiano (BIC), el R-cuadrado ajustado, el Chi-cuadrado reducido o la Suma de Residuos al Cuadrado (*OriginLab*, s.f.).





Los modelos de mayor grado polinómico tienden a ser más flexibles y pueden ajustarse mejor a datos más complicados, pero también pueden sobreajustarse a los datos, lo que significa que se ajustan demasiado a los detalles específicos de los datos obtenidos en los ensayos de tracción de las cuerdas y pueden no generalizar bien a nuevos datos. Por otro lado, los modelos de menor grado polinómico pueden ser más simples y generalizables, pero pueden no capturar todas las complejidades de los datos si estos son muy no lineales.

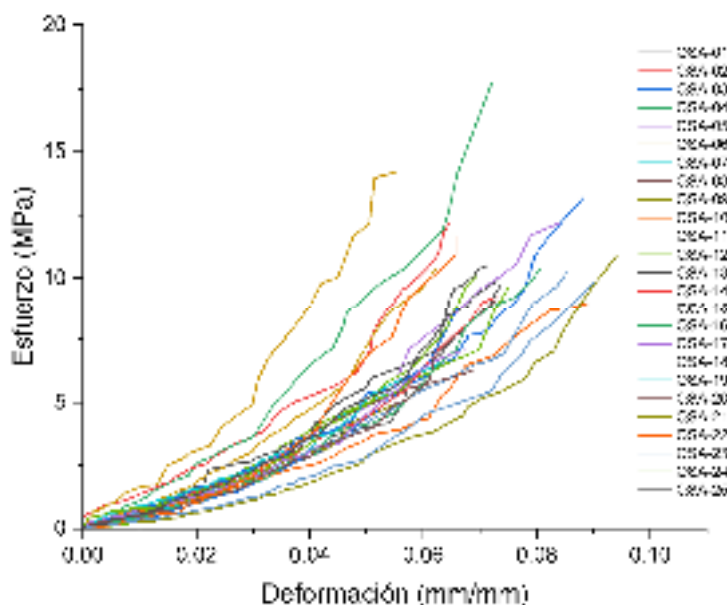
Por lo observado en el *Anexo VIII* se obtuvo ajustes que se adecuaban a las curvas en su mayoría para polinomios de tercer y cuarto grado, por lo tanto, se optó en realizar el ajuste polinómico de tercer grado para todas las curvas esfuerzo-deformación y así evitar posibles sobreajustes.

#### 3.5.3.4. Verificación del Promedio de Curvas Múltiples.

a) Desviación estándar y error estándar de la cuerda *Q'eswa* en condición seca a temperatura ambiente.

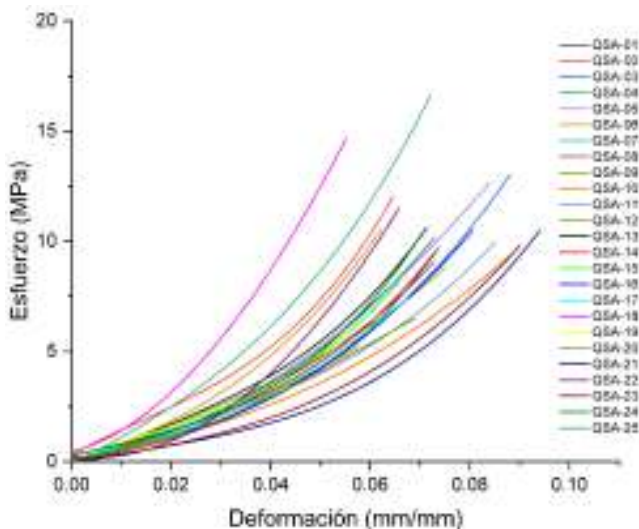
**Figura 67**

*Muestras seleccionadas de la cuerda Q'eswa en condición seca a temperatura ambiente (QSA) en unidad MPa vs mm/mm*



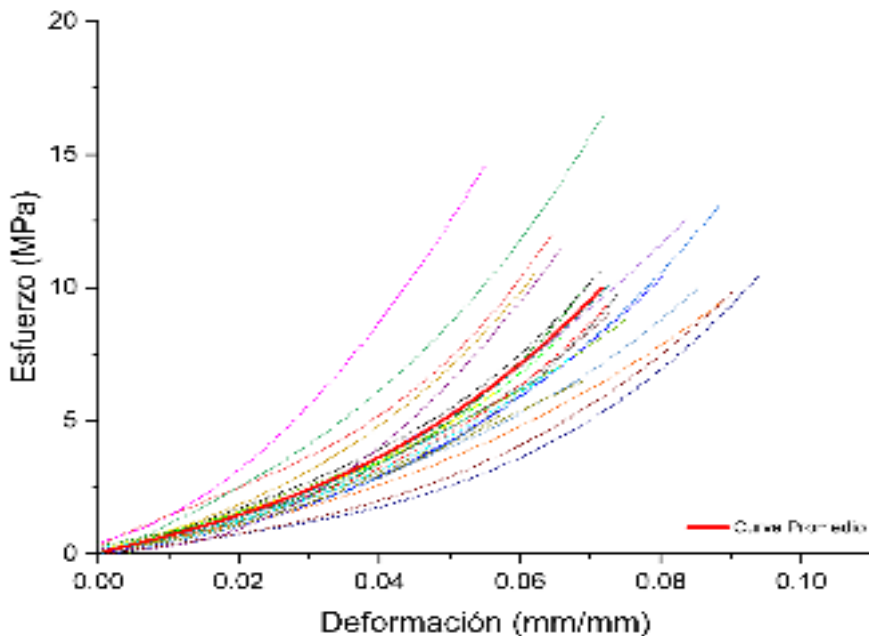
**Figura 68**

*Ajuste polinómico de tercer grado para las muestras seleccionadas de la cuerda Q'eswa en condición seca a temperatura ambiente (QSA) en unidad MPa vs mm/mm*



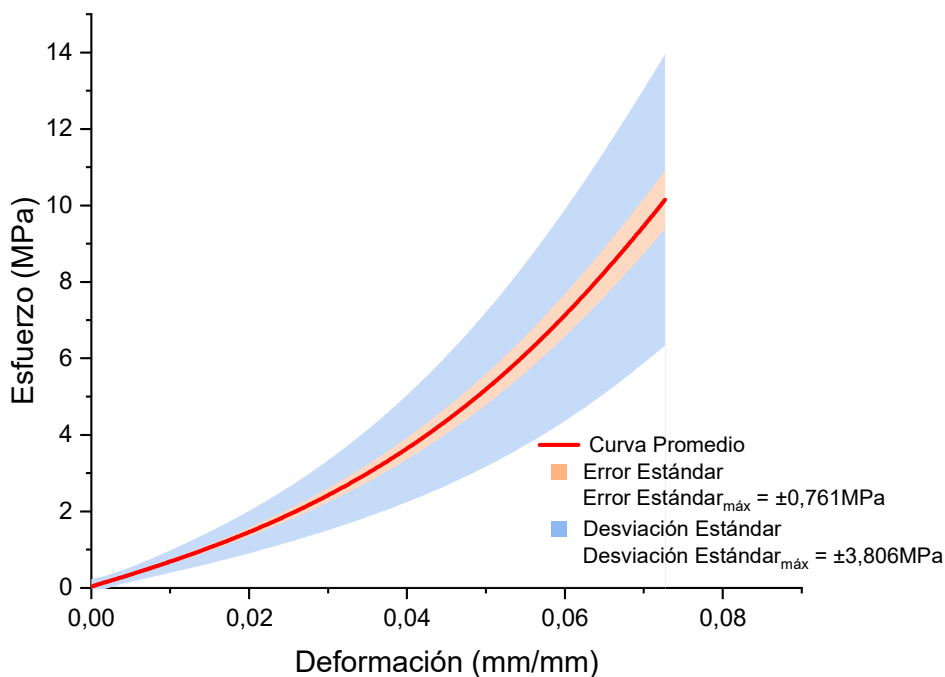
**Figura 69**

*Curva promedio de la cuerda Q'eswa en condición seca a temperatura ambiente en unidad MPa vs mm/mm*



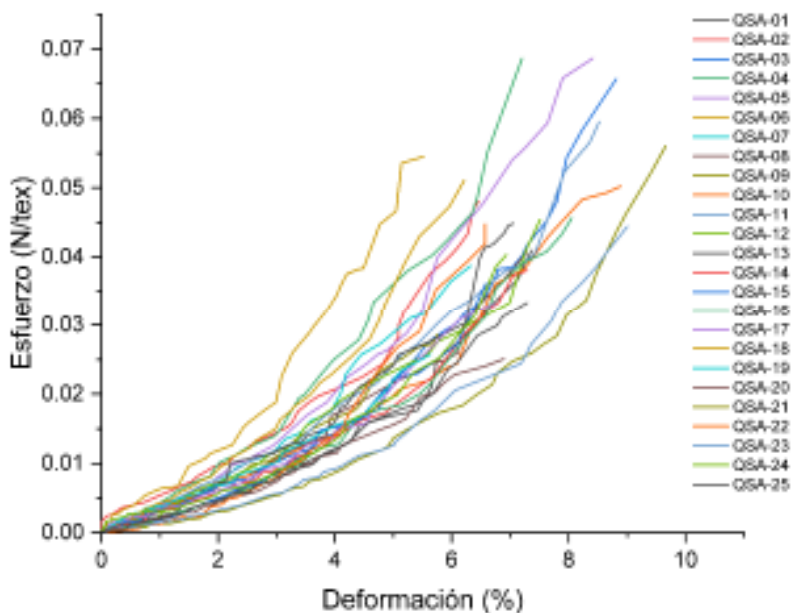
**Figura 70**

*Desviación estándar y error estándar de la cuerda Q'eswa en condición seca a temperatura ambiente para la curva promedio en unidad MPa vs mm/mm*



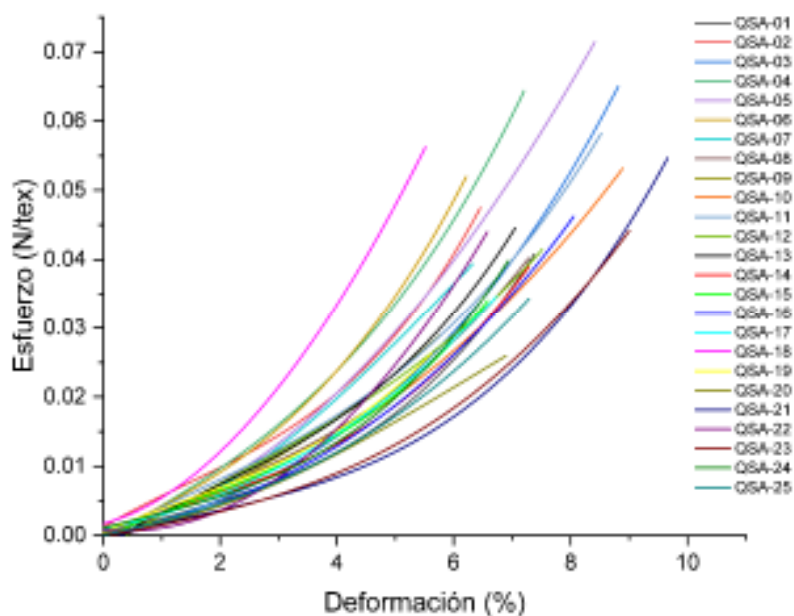
**Figura 71**

*Muestras seleccionadas de la cuerda Q'eswa en condición seca a temperatura ambiente (QSA) en unidad N/tex vs %*



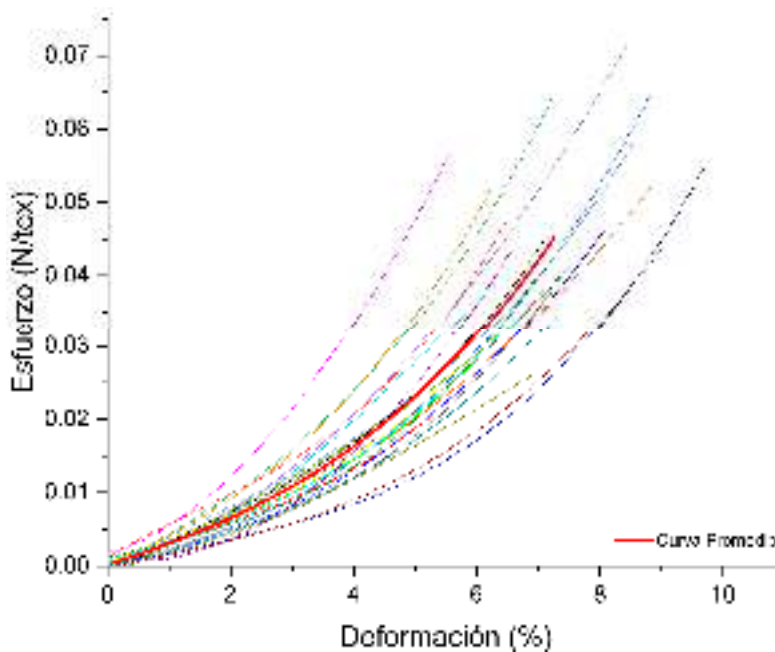
**Figura 72**

*Ajuste polinómico de tercer grado para las muestras seleccionadas de la cuerda Q'eswa en condición seca a temperatura ambiente (QSA) en unidad N/tex vs %*



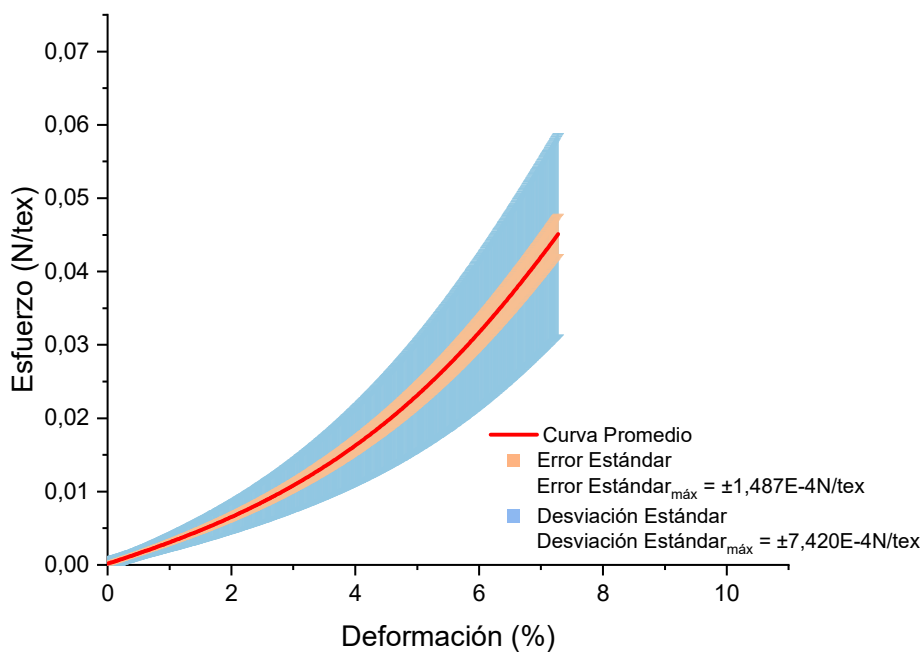
**Figura 73**

*Curva promedio de la cuerda Q'eswa en condición seca a temperatura ambiente en unidad N/tex vs %*



**Figura 74**

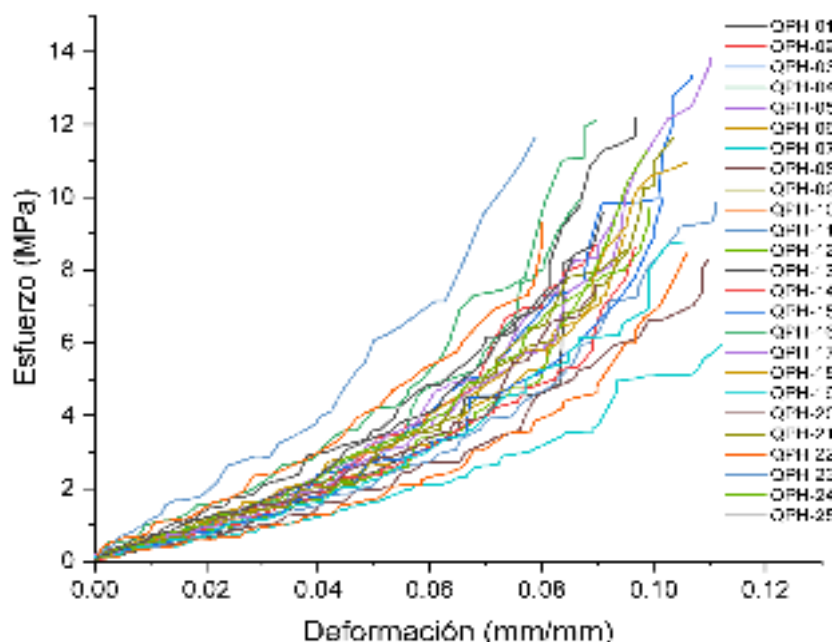
*Desviación estándar y error estándar de la cuerda Q'eswa en condición seca a temperatura ambiente para la curva promedio en unidad N/tex vs %*



b) Desviación estándar y error estándar de la cuerda Q'eswa en condición parcialmente húmeda

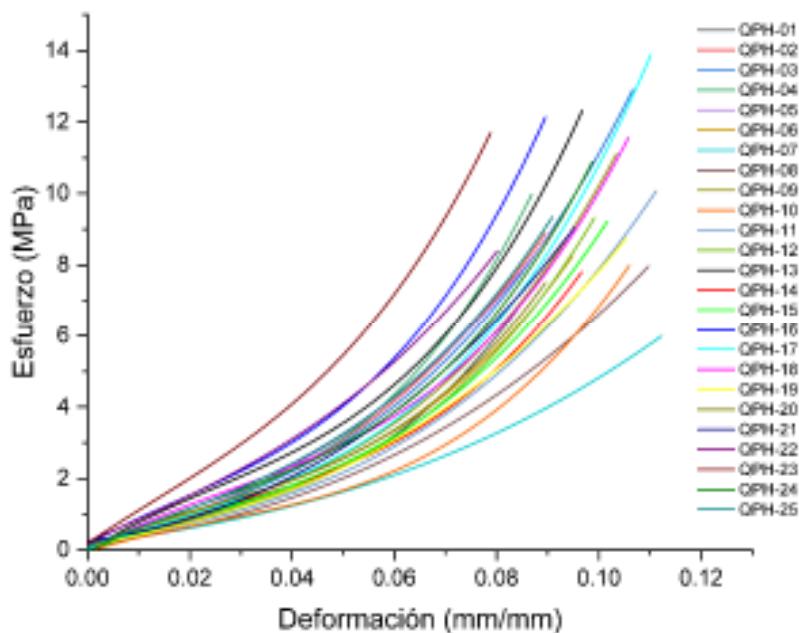
**Figura 75**

*Muestras seleccionadas de la cuerda Q'eswa en condición parcialmente húmeda (QPH) en unidad MPa vs mm/mm*



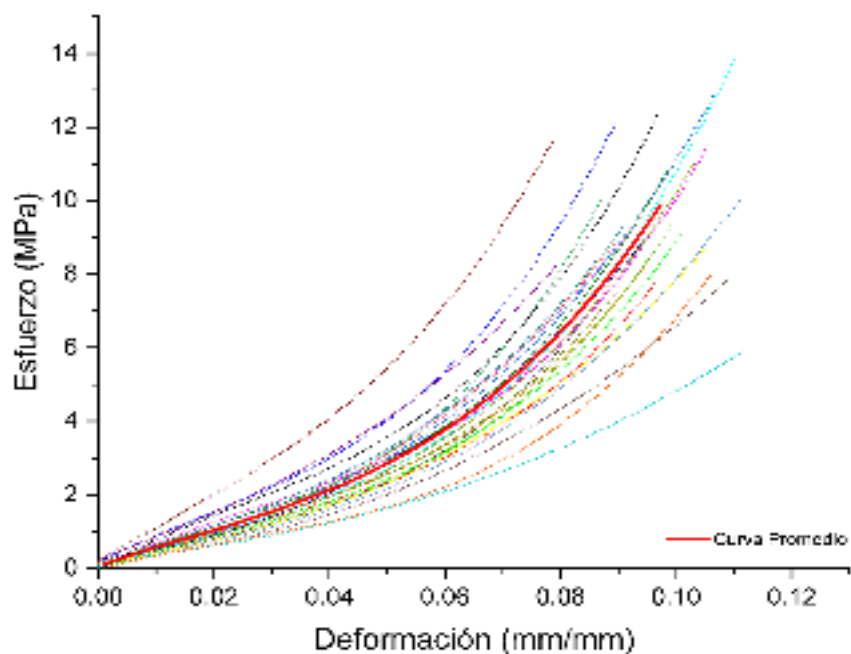
**Figura 76**

*Ajuste polinómico de tercer grado para las muestras seleccionadas de la cuerda Q'eswa en condición parcialmente húmeda (QPH) en unidad MPa vs mm/mm*



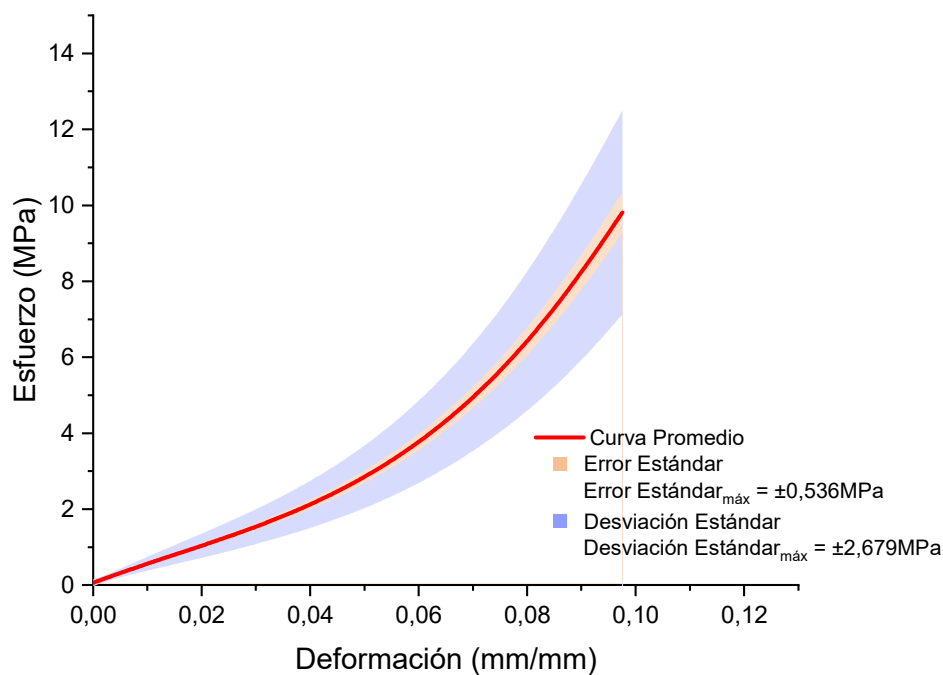
**Figura 77**

*Curva promedio de la cuerda Q'eswa en condición parcialmente húmeda en unidad MPa vs mm/mm*



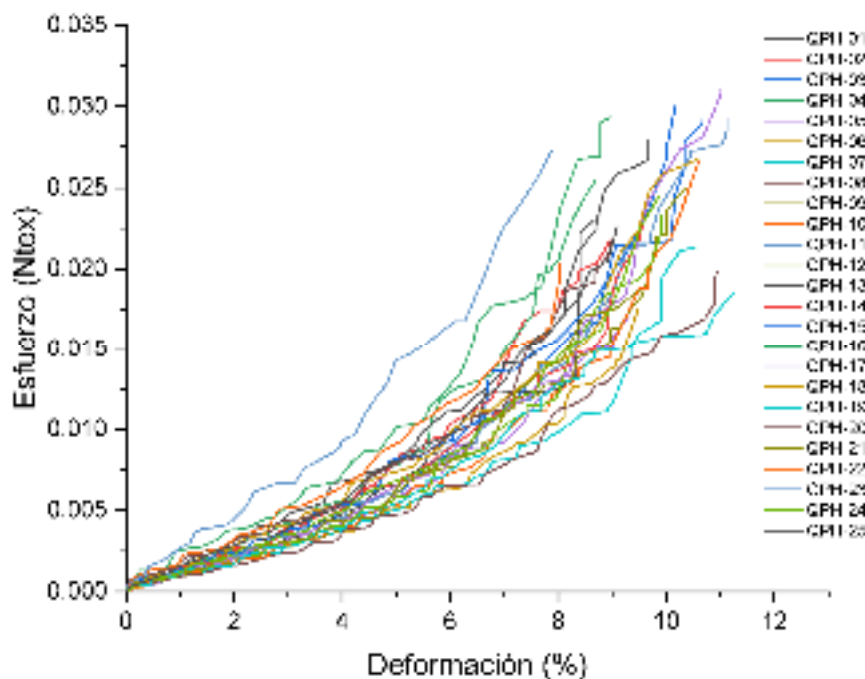
**Figura 78**

*Desviación estándar y error estándar de la cuerda Q'eswa en condición parcialmente húmeda para la curva promedio en unidad MPa vs mm/mm*



**Figura 79**

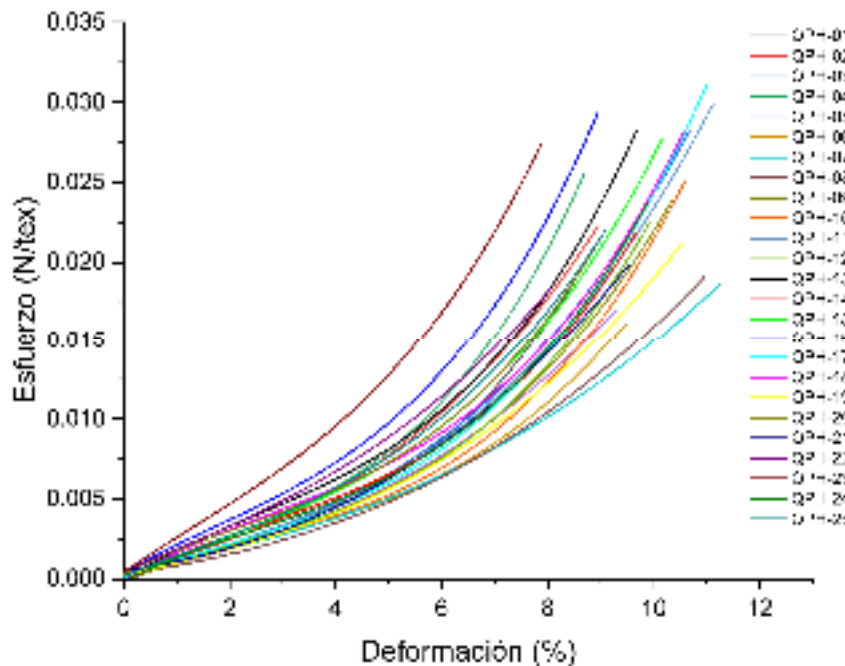
*Muestras seleccionadas de la cuerda Q'eswa en condición parcialmente húmeda (QPH) en unidad N/tex vs %*





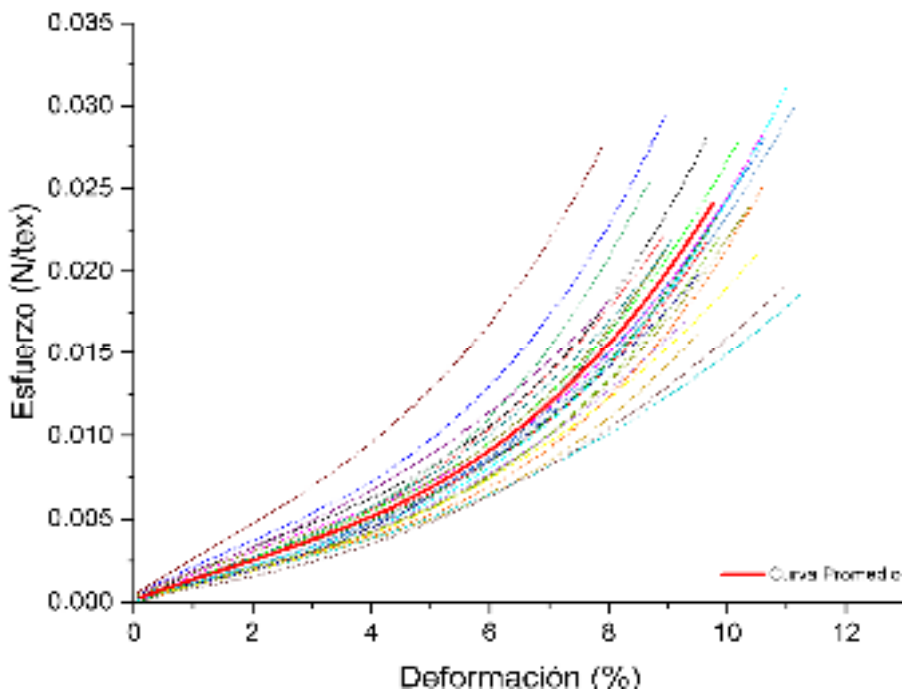
**Figura 80**

*Ajuste polinómico de tercer grado para las muestras seleccionadas de la cuerda Q'eswa en condición parcialmente húmeda (QPH) en unidad N/tex vs %*



**Figura 81**

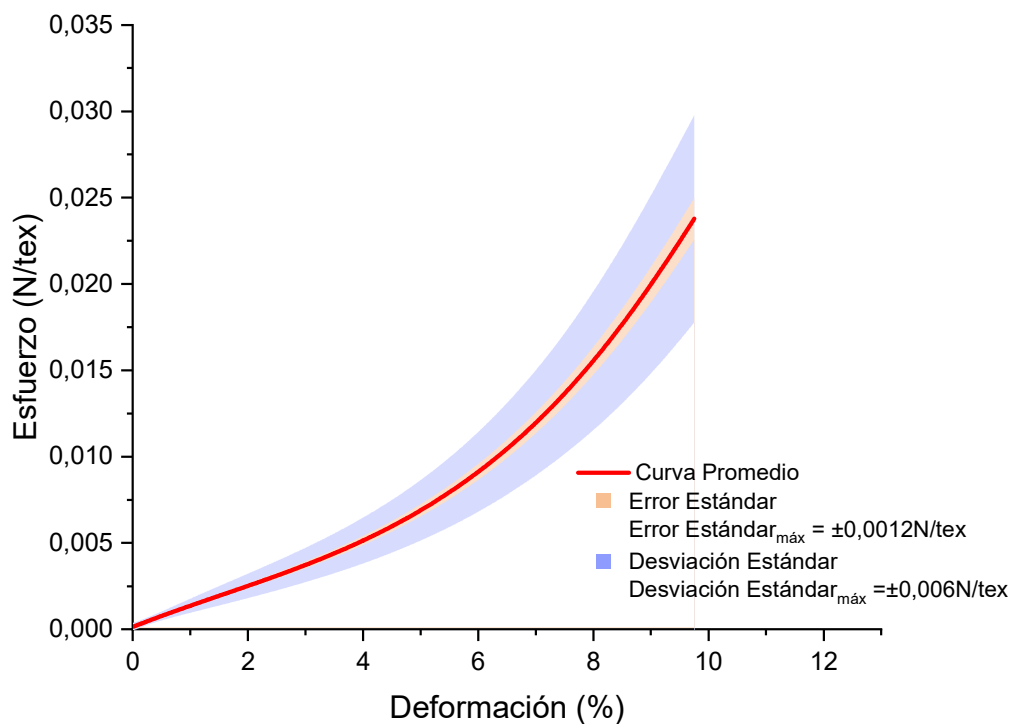
*Curva promedio de la cuerda Q'eswa en condición parcialmente húmeda en unidad N/tex vs %*





**Figura 82**

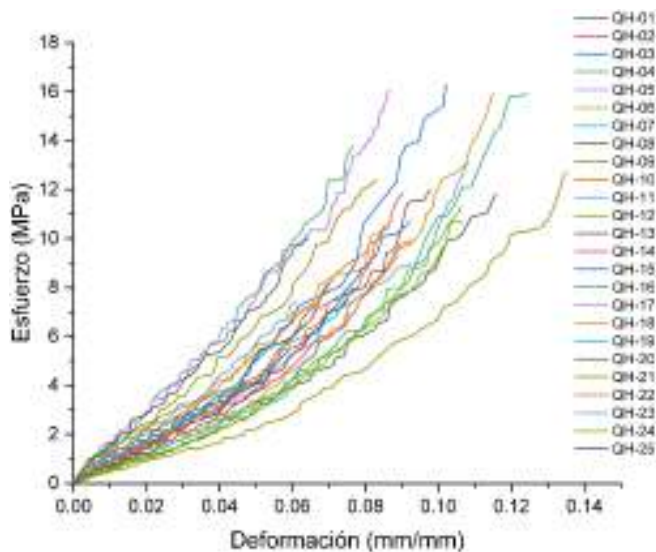
*Desviación estándar y error estándar de la cuerda Q'eswa en condición parcialmente húmeda para la curva promedio en unidad N/tex vs %*



c) Desviación y error estándar de la cuerda Q'eswa en condición completamente húmeda

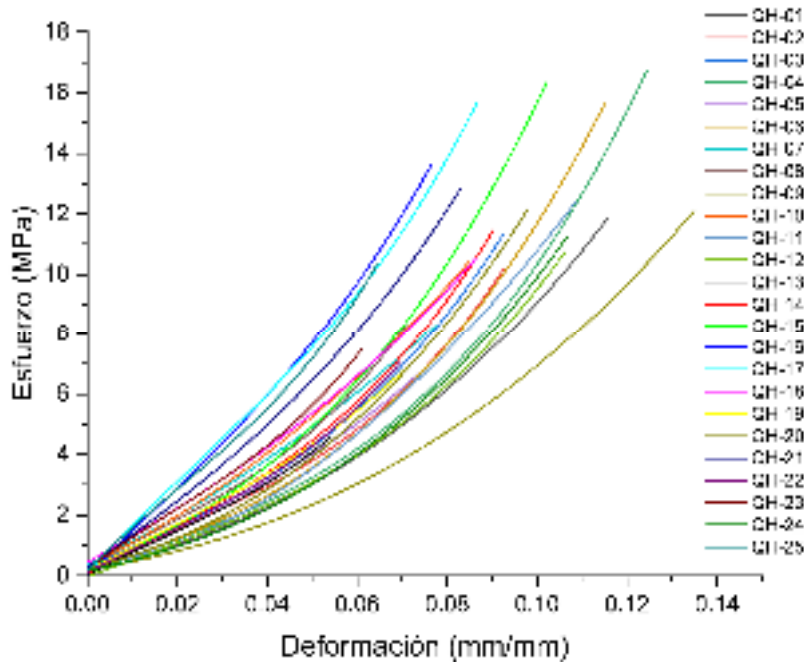
**Figura 83**

*Muestras seleccionadas de la cuerda Q'eswa en condición completamente húmeda (QH) en unidad MPa vs mm/mm*



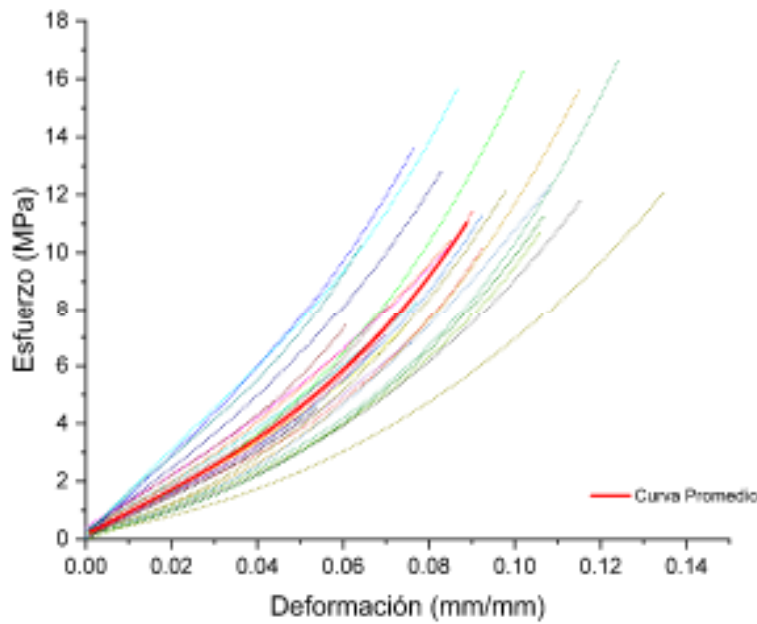
**Figura 84**

*Ajuste polinómico de tercer grado para las muestras seleccionadas de la cuerda Q'eswa en condición completamente húmeda (QH) en unidad MPa vs mm/mm*



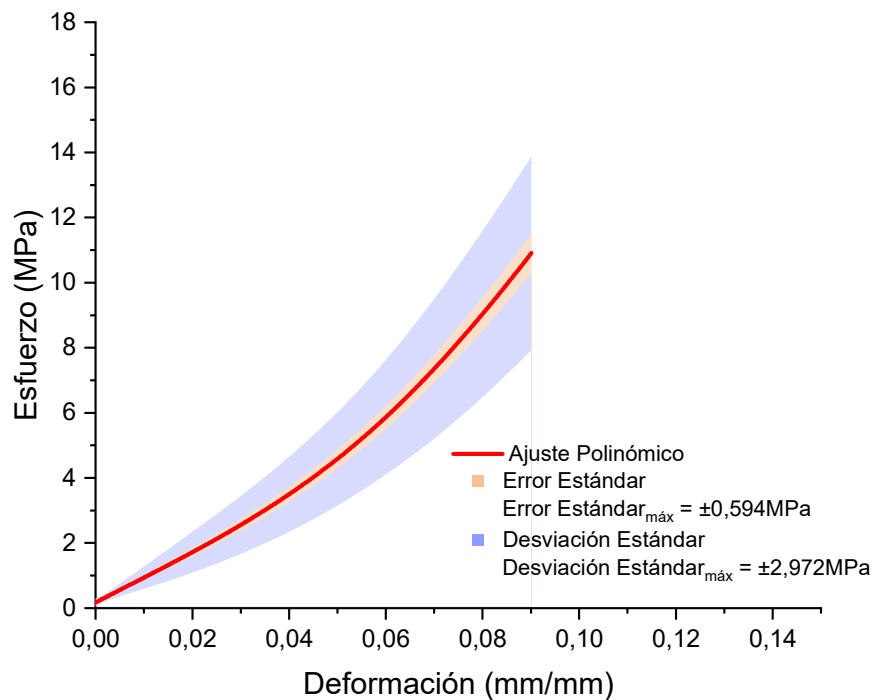
**Figura 85**

*Curva promedio de la cuerda Q'eswa en condición completamente húmeda en unidad MPa vs mm/mm*



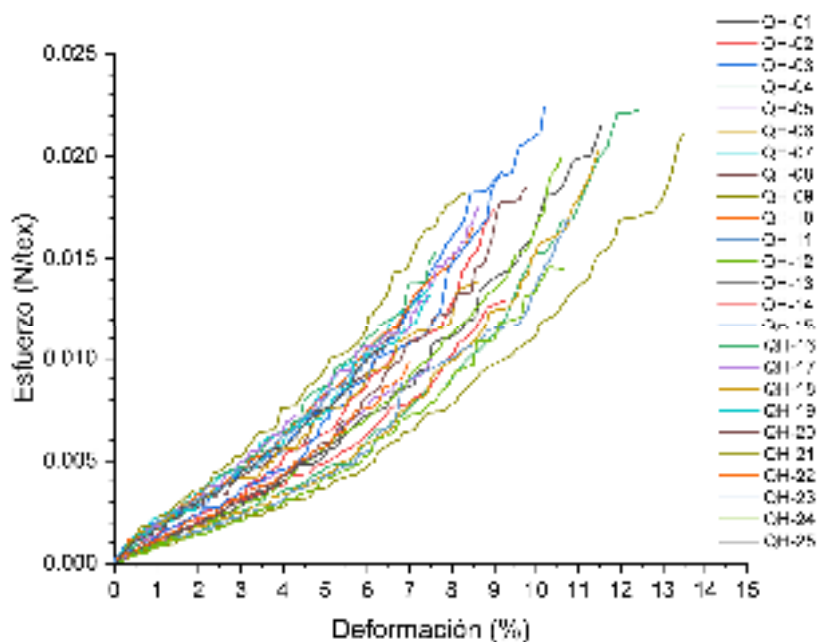
**Figura 86**

*Desviación estándar y error estándar de la cuerda Q'eswa en condición completamente húmeda para la curva promedio en unidad MPa vs mm/mm*



**Figura 87**

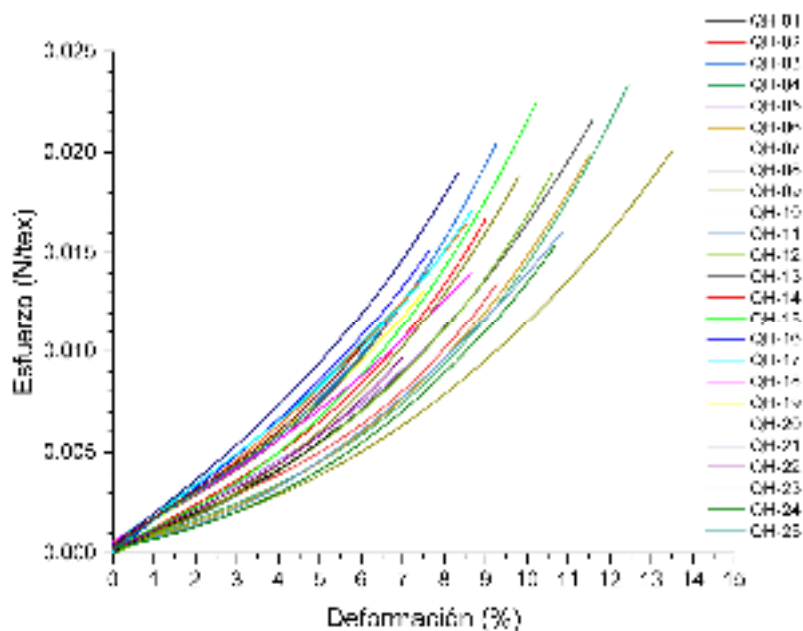
*Muestras seleccionadas de la cuerda Q'eswa en condición completamente húmeda (QH) en unidad N/tex vs %*





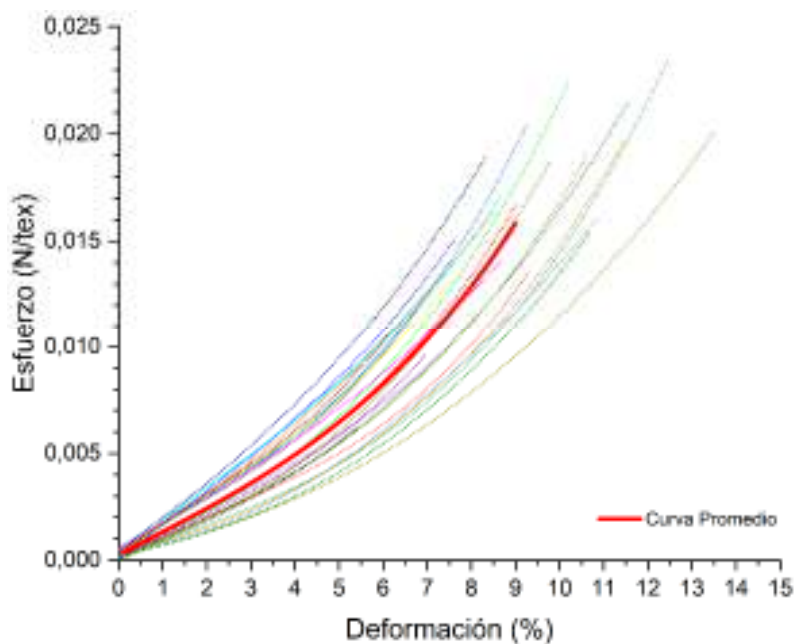
**Figura 88**

*Ajuste polinómico de tercer grado para las muestras seleccionadas de la cuerda Q'eswa en condición completamente húmeda (QH) en unidad N/tex vs %*



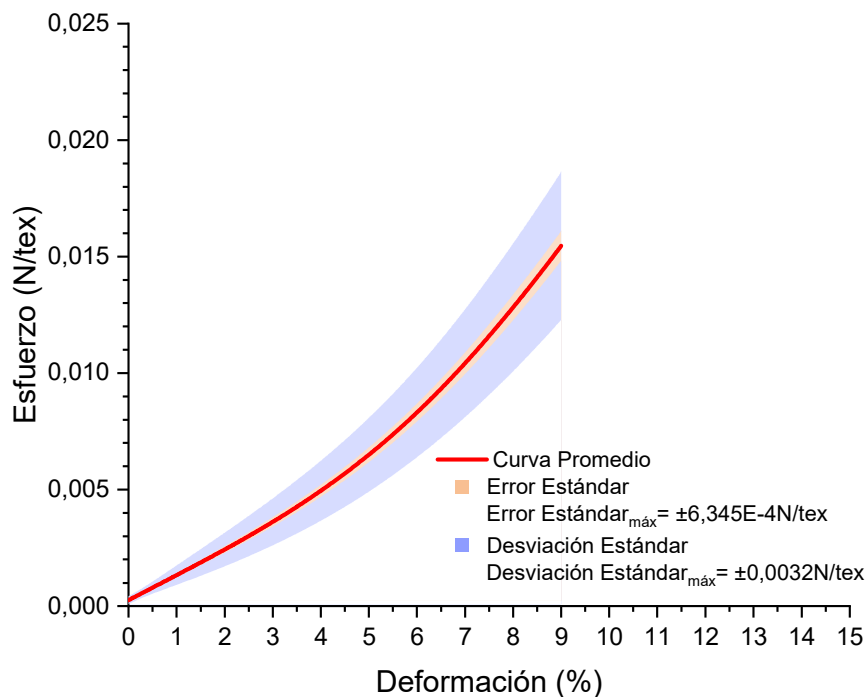
**Figura 89**

*Curva promedio de la cuerda Q'eswa en condición completamente húmeda en unidad N/tex vs %*



**Figura 90**

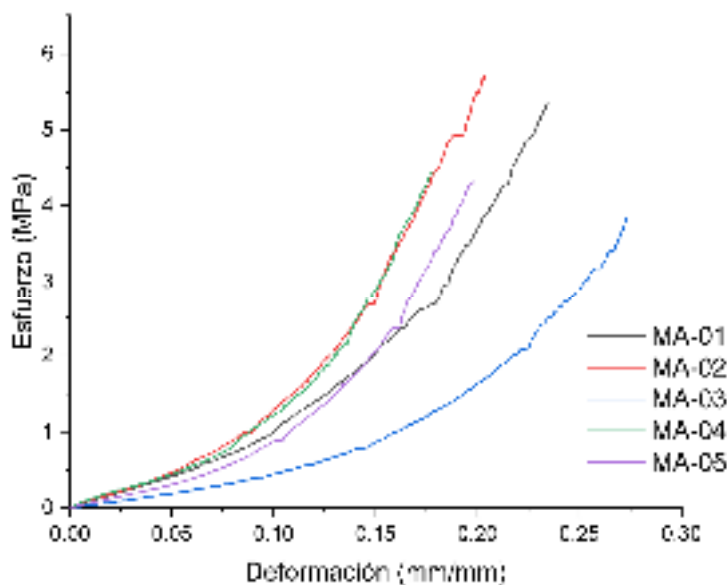
*Desviación estándar y error estándar de la cuerda Q'eswa en condición completamente húmeda para la curva promedio en unidad N/tex vs %*



d) Desviación y error estándar de la cuerda Maqui en condición seca a temperatura ambiente

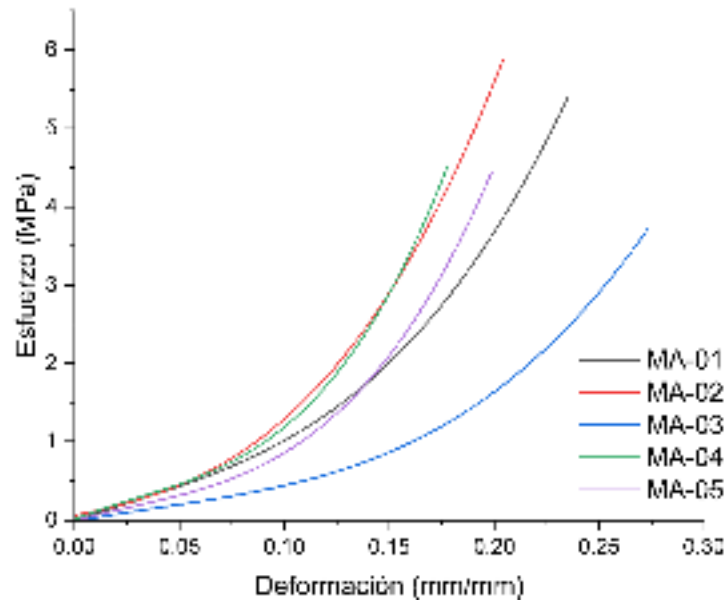
**Figura 91**

*Muestras seleccionadas de la cuerda Maqui (MA) en condición seca a temperatura ambiente en unidad MPa vs mm/mm*



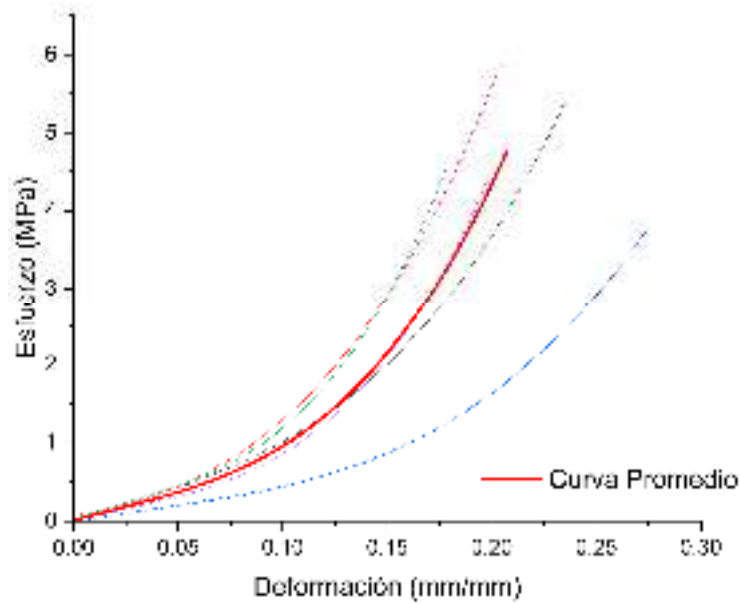
**Figura 92**

*Ajuste polinómico de tercer grado para las muestras seleccionadas de la cuerda Maqui (MA) en condición seca a temperatura ambiente en unidad MPa vs mm/mm*



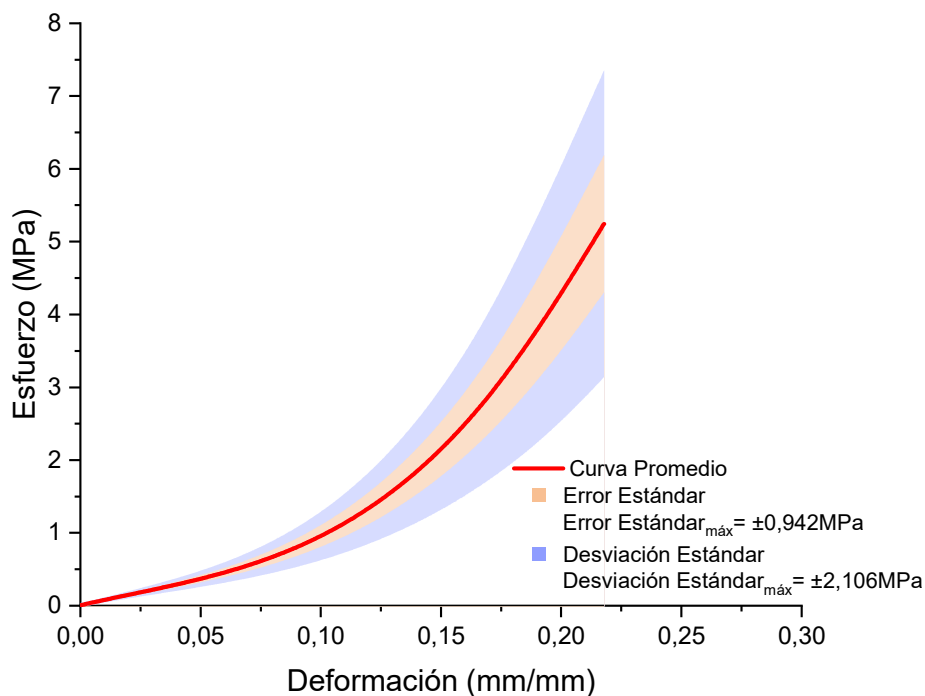
**Figura 93**

*Curva promedio de la cuerda Maqui en condición seca a temperatura ambiente en unidad MPa vs mm/mm*



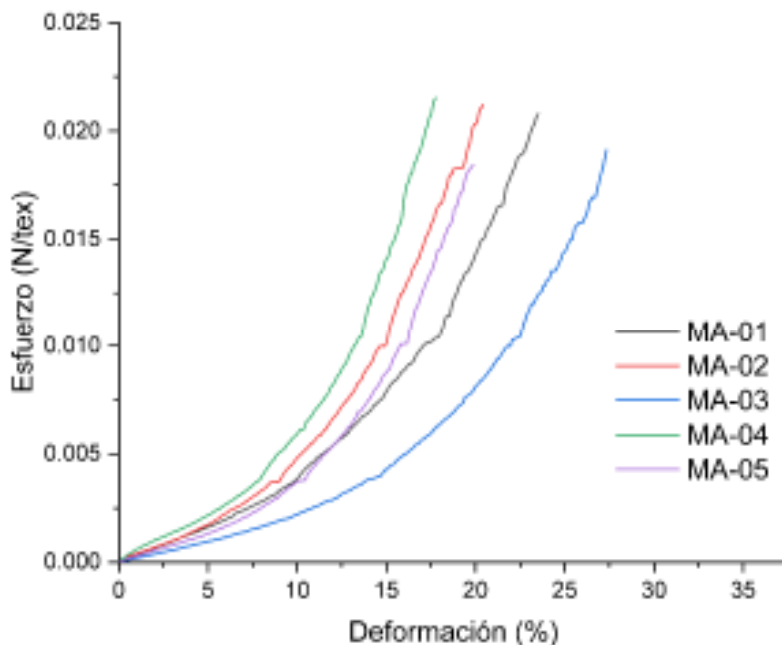
**Figura 94**

*Desviación estándar y error estándar de la cuerda Maqui en condición seca a temperatura ambiente para la curva promedio en unidad MPa vs mm/mm*



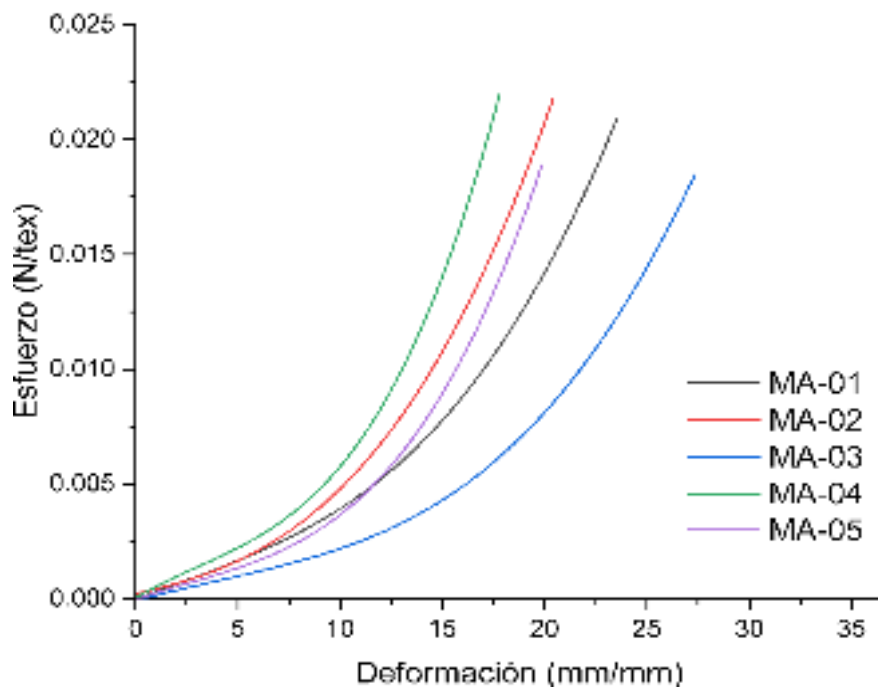
**Figura 95**

*Muestras seleccionadas de la cuerda Maqui (MA) en condición seca a temperatura ambiente en unidad N/tex vs %*



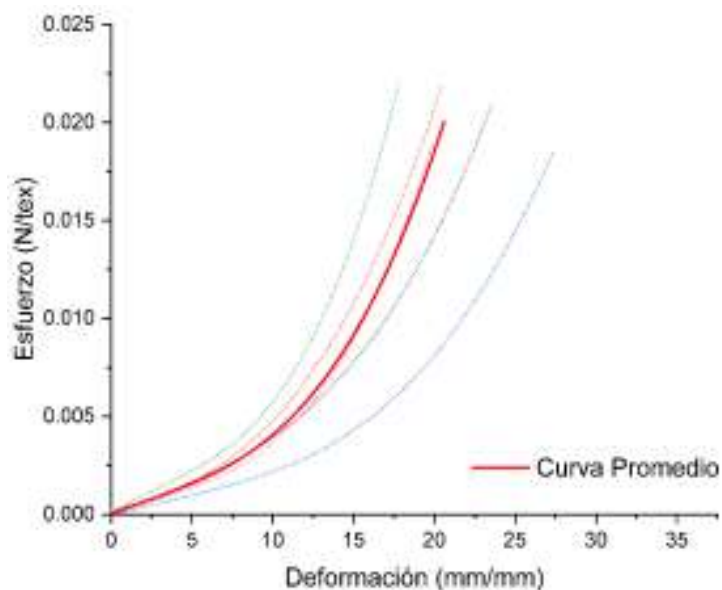
**Figura 96**

*Ajuste polinómico de tercer grado para las muestras seleccionadas de la cuerda Maqui (MA) en condición seca a temperatura ambiente en unidad N/tex vs %*



**Figura 97**

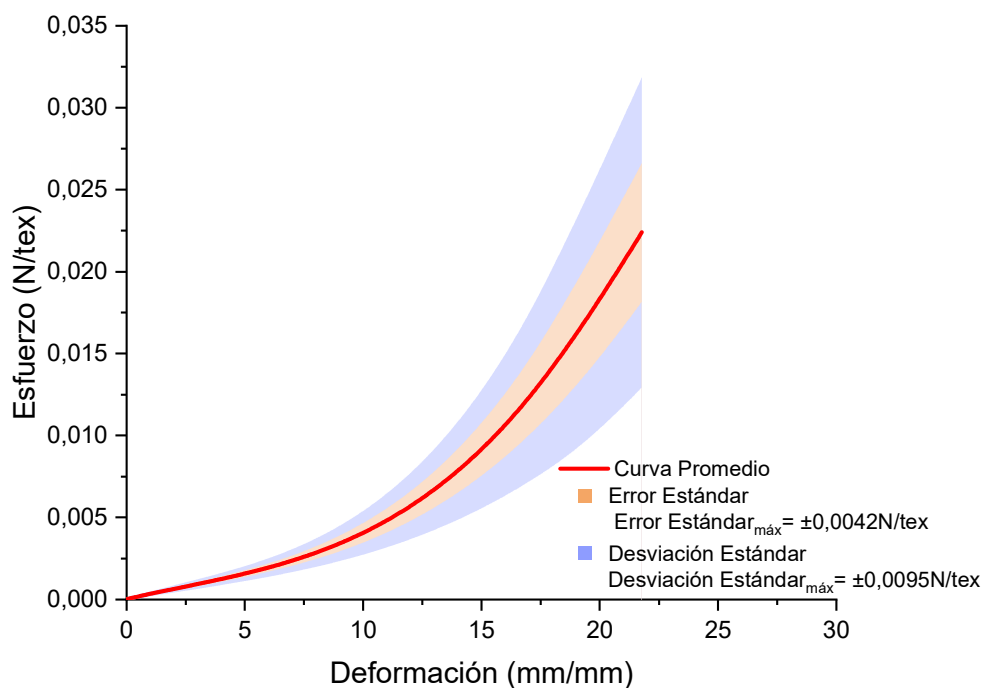
*Curva promedio de la cuerda Maqui en condición seca a temperatura ambiente en unidad N/tex vs %*





**Figura 98**

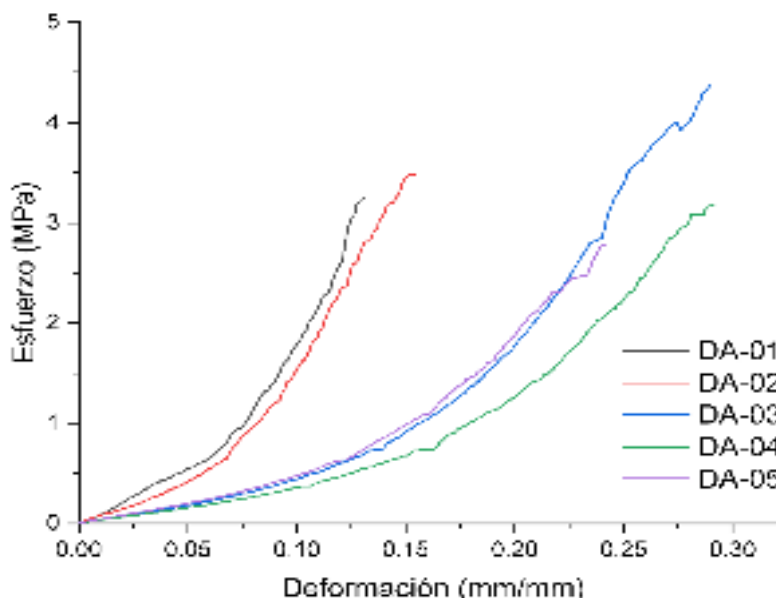
*Desviación estándar y error estándar de la cuerda Maqui en condición seca a temperatura ambiente para la curva promedio en unidad N/tex vs %*



e) Desviación y error estándar de la cuerda *Duro* en condición seca a temperatura ambiente

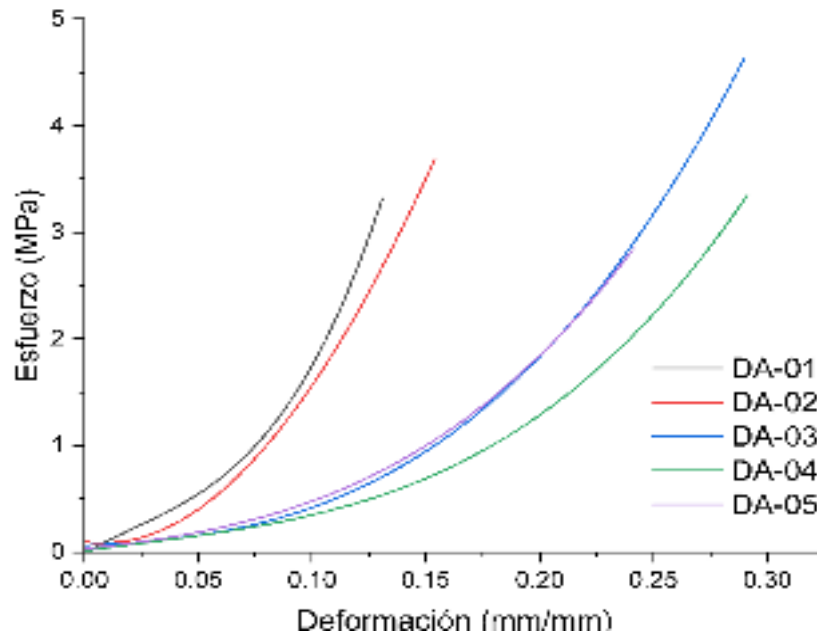
**Figura 99**

*Muestras seleccionadas de la cuerda Duro (DA) en condición seca a temperatura ambiente en unidad MPa vs mm/mm*



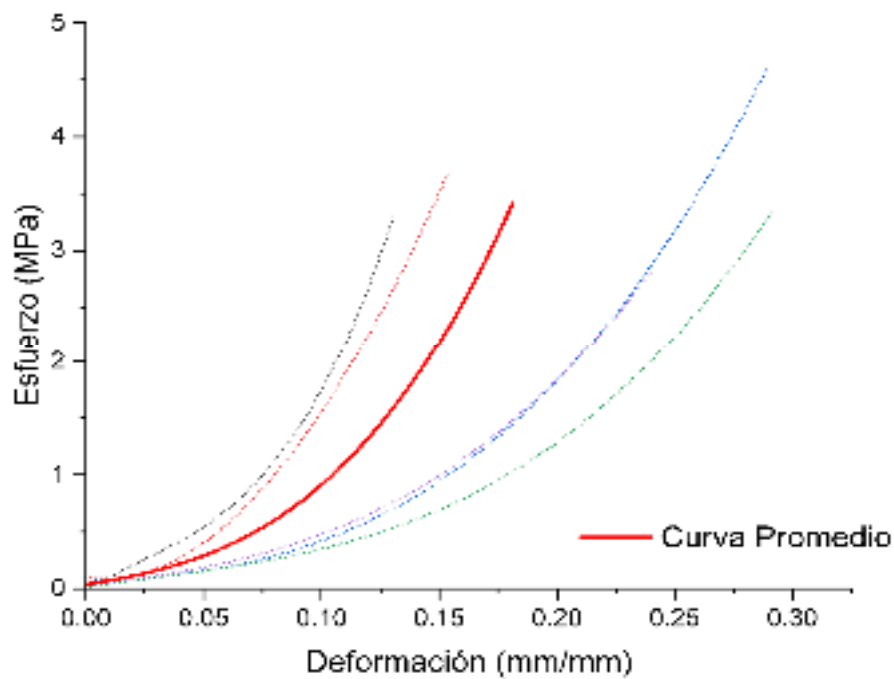
**Figura 100**

*Ajuste polinómico de tercer grado para las muestras seleccionadas de la cuerda Duro (DA) en condición seca a temperatura ambiente en unidad MPa vs mm/mm*



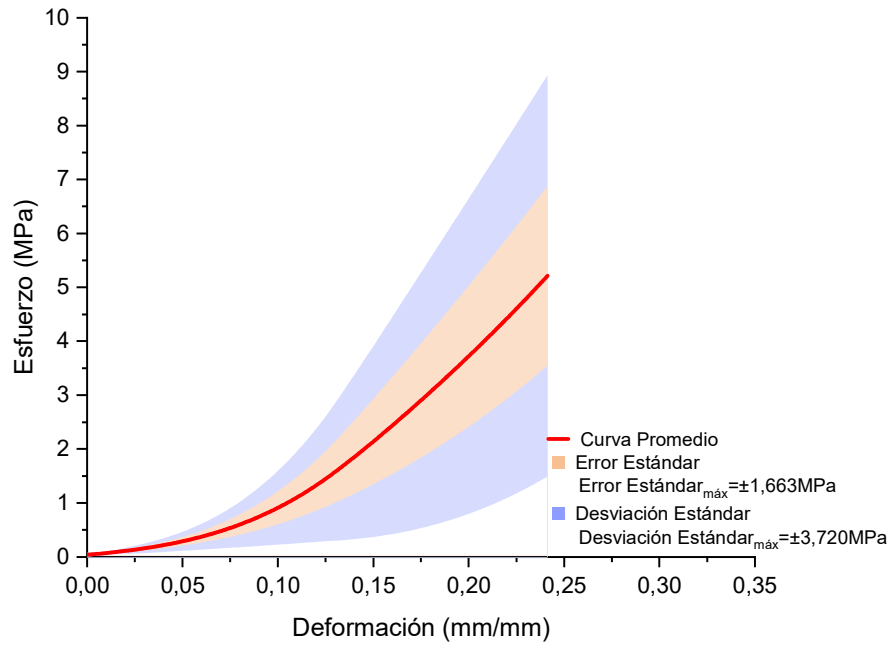
**Figura 101**

*Curva promedio de la cuerda Duro en condición seca a temperatura ambiente en unidad MPa vs mm/mm*



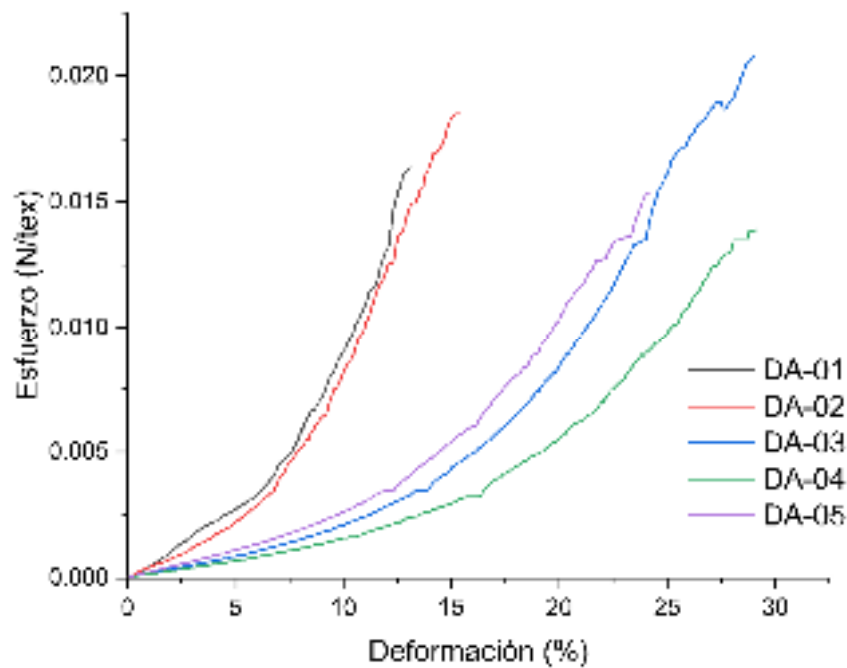
**Figura 102**

*Desviación estándar y error estándar de la cuerda Duro en condición seca a temperatura ambiente para la curva promedio en unidad MPa vs mm/mm*



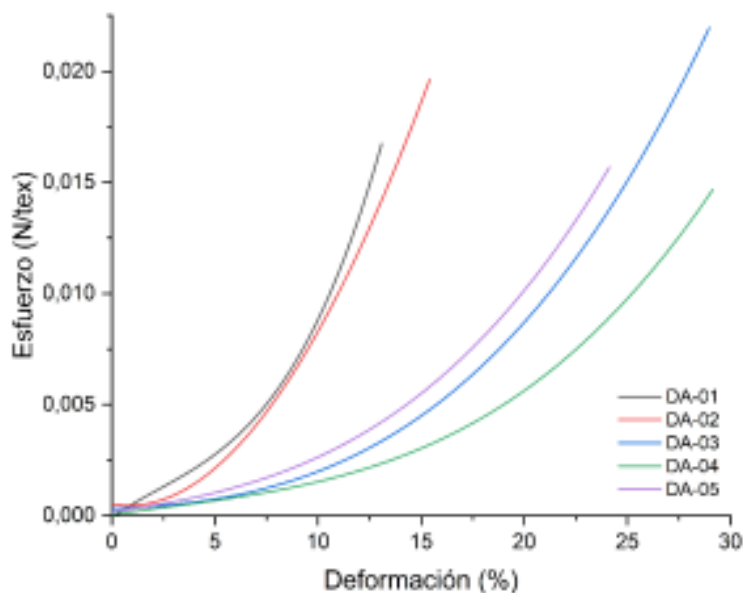
**Figura 103**

*Muestras seleccionadas de la cuerda Duro (DA) en condición seca a temperatura ambiente en unidad N/tex vs %*



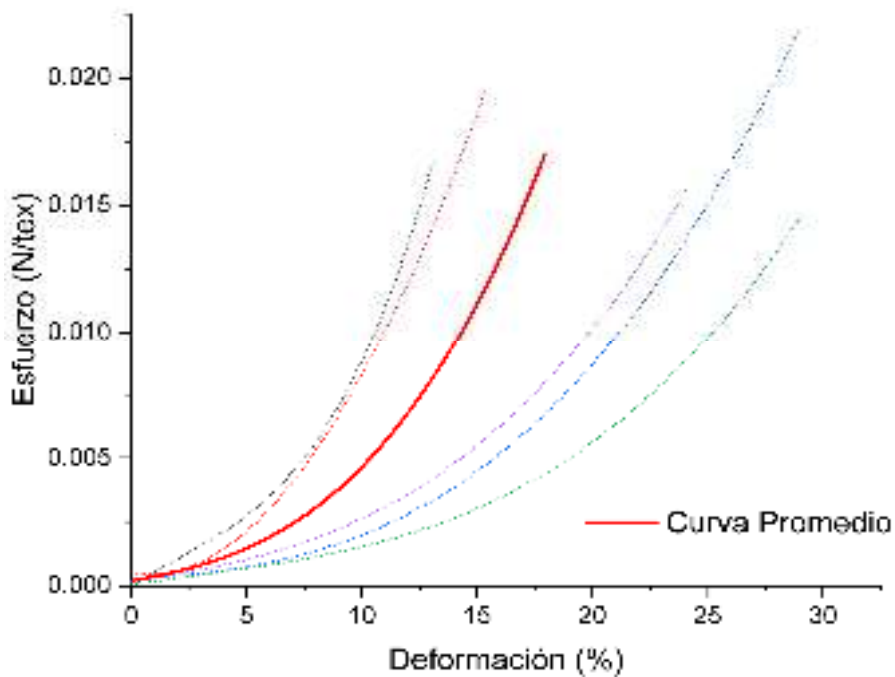
**Figura 104**

*Ajuste polinómico de tercer grado para las muestras seleccionadas de la cuerda Duro (DA) en condición seca a temperatura ambiente en unidad N/tex vs %*



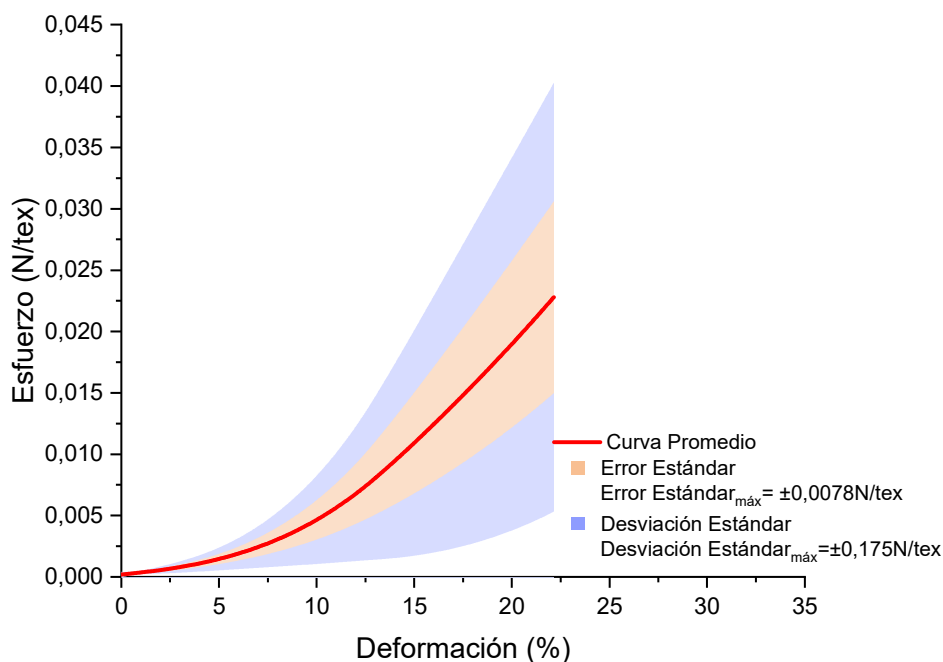
**Figura 105**

*Curva promedio de la cuerda Duro en condición seca a temperatura ambiente en unidad N/tex vs %*



**Figura 106**

*Desviación estándar y error estándar de la cuerda Duro en condición seca a temperatura ambiente para la curva promedio de curvas en unidad N/tex vs %*



**Comentario:** En los gráficos para las *Q'eswas* en sus diferentes condiciones de humedad, se indica que hay una variabilidad consistente y una alta precisión en las medidas de esfuerzo a lo largo de las deformaciones experimentadas. La falta de un ensanchamiento significativo de las bandas sugiere que no hay grandes inconsistencias o errores en los datos. En cambio, para el *Maqui* y el *Duro* se muestra un mayor ensanchamiento debido a que solo se tuvieron cinco muestras de ensayo por cada cuerda, sin embargo, la variabilidad es continua y no se muestran cambios repentinos. Esto indica que el promedio de la curva esfuerzo-deformación ha sido calculado correctamente y que refleja con precisión la relación entre el esfuerzo y la deformación para el conjunto de datos proporcionado tanto para las *Q'eswas* como para los *Maquis* y *Duros*.

### ***3.5.3.5. Verificación del Módulo de elasticidad Mediante Ajuste de Regresión Lineal.***

La validación del módulo de elasticidad se realizará mediante el análisis del coeficiente de determinación  $R^2$ , el cual evalúa la validez del ajuste de datos al modelo lineal. Este parámetro nos proporcionará la pendiente del ajuste lineal, representando así el módulo de elasticidad correspondiente, ya que, siguiendo lo indicado por McKenna (2000), para cálculos manuales es más adecuado leer los datos directamente desde los gráficos y aplicar métodos de cálculo como el



módulo tangente o secante, sin embargo, para modelos computacionales o matemáticos, se puede cuantificar la rigidez de la cuerda directamente la pendiente de la curva realizando aproximaciones de línea recta si se tiene linealidad razonable como es el método de ajuste por mínimos cuadrados. El método de ajuste lineal por medio de los mínimos cuadrados, representa el ajuste en el contexto estadístico de los puntos obtenidos de la curva promedio para la zona determinada, en la que un valor de  $R^2$ , aproximándose a 1, denota un ajuste adecuado.

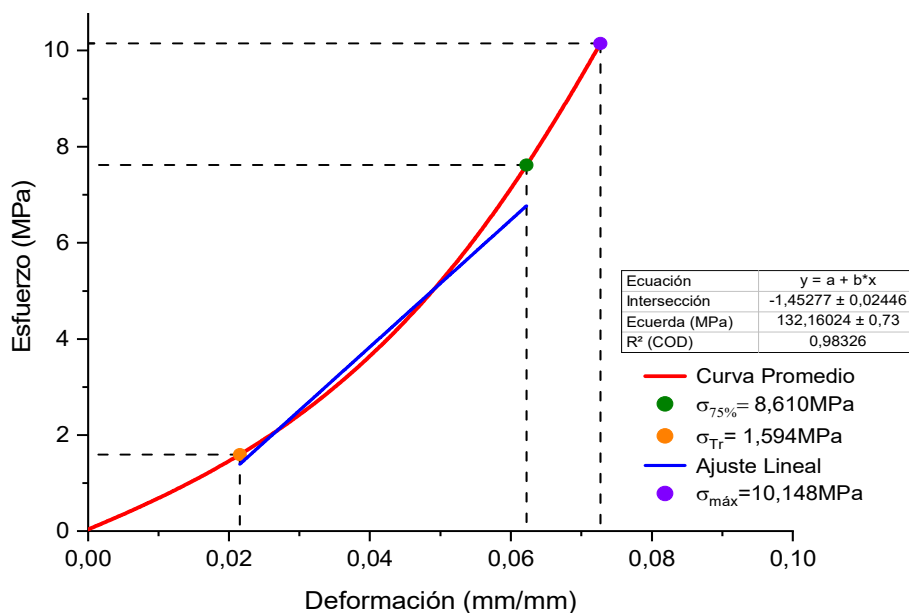
En la investigación presente, para la obtención del módulo de elasticidad se eligió realizar el ajuste lineal entre la zona que abarca el punto de tensión de referencia y al 75% del esfuerzo máximo de la curva correspondiente a cada tipo de cuerda, pues todas las variaciones de longitud, deben medirse a partir de la tensión de referencia (McKenna, 2000), en la normativa se sugieren niveles de carga respecto a esfuerzos máximos para cuerdas de uso general como el 20%, 50% o 75%, debido a que se espera que, durante la vida útil de las cuerdas, las cargas de trabajo no superen estos niveles, es por eso que en la investigación se eligió linealizar las curvas hasta un 75% respecto del esfuerzo máximo. La norma ASTM D4268, indica que, para cuerdas nuevas con primera aplicación de carga, este nivel de carga respecto del esfuerzo máximo sea del 75%.

Además, en métodos refinados como el de “estabilización de cuerda” que consiste en aplicar ciclos de carga y descarga para eliminar los alargamientos permanentes de los espacios vacíos de las cuerdas sirven para encontrar una mejor aproximación del módulo de elasticidad en cuerdas. En la investigación, se eligió el 75% del esfuerzo máximo, que es el mayor valor encontrado en la normativa, debido a que, al no pasar por un proceso de “estabilización de cuerda” el tomar el mayor valor recomendado según normativas nos proporcionaría la mejor aproximación de la pendiente.

a) Módulo de elasticidad para las  $Q'$ eswas en condición seca a temperatura ambiente.

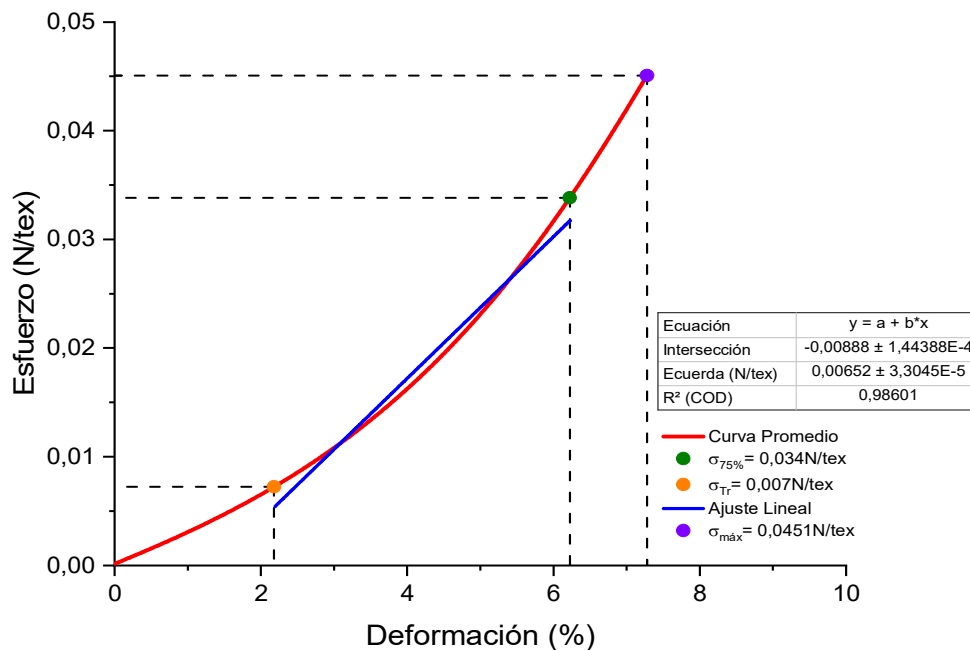
**Figura 107**

*Ajuste lineal para la obtención de módulo de elasticidad para la  $Q'$ eswa seca a temperatura ambiente (QSA) en MPa*



**Figura 108**

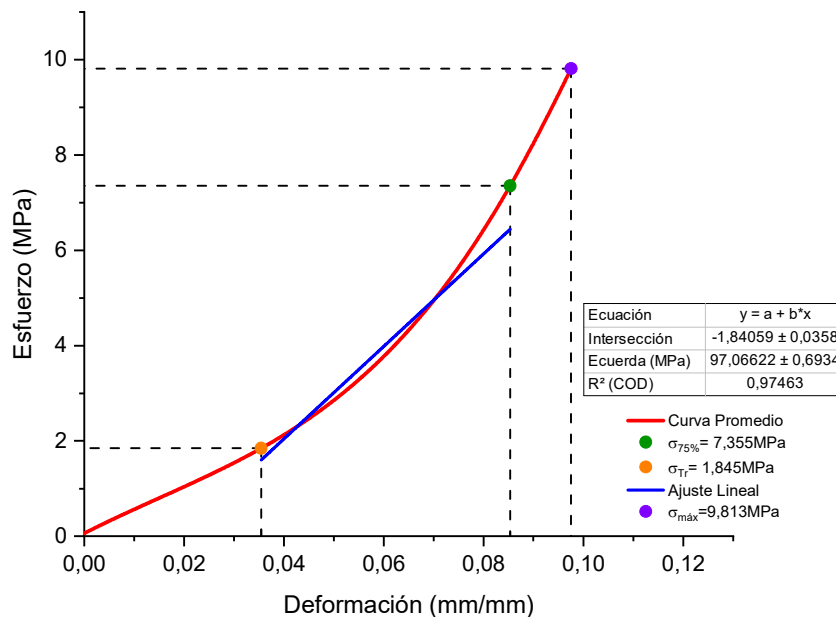
*Ajuste lineal para la obtención de módulo de elasticidad para la  $Q'$ eswa seca a temperatura ambiente (QSA) en N/tex*



b) Módulo de elasticidad para las  $Q'$ eswas en condición parcialmente húmeda

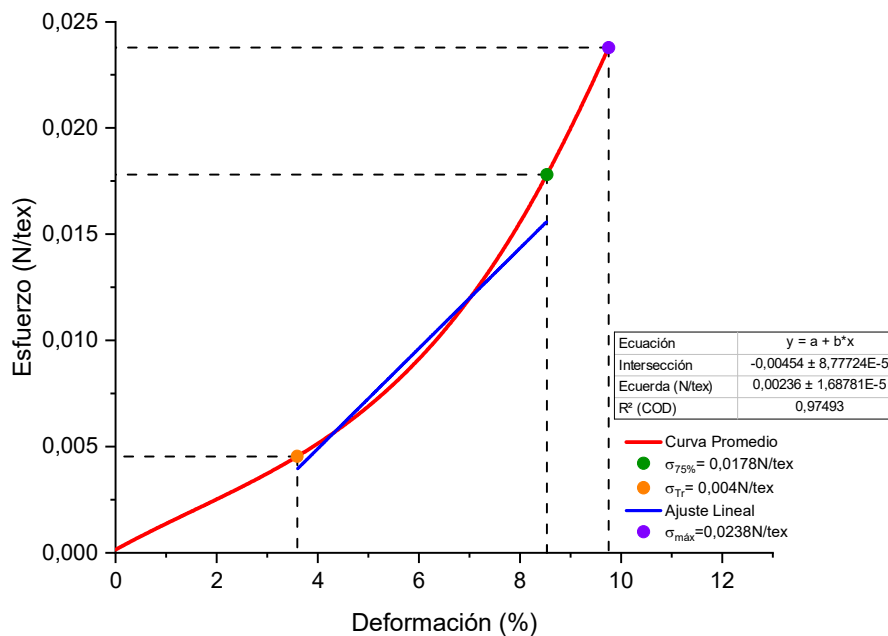
**Figura 109**

*Ajuste lineal para la obtención de módulo de elasticidad para la  $Q'$ eswa parcialmente húmeda (QPH) en MPa*



**Figura 110**

*Ajuste lineal para la obtención de módulo de elasticidad para la  $Q'$ eswa parcialmente húmeda (QPH) en N/tex*

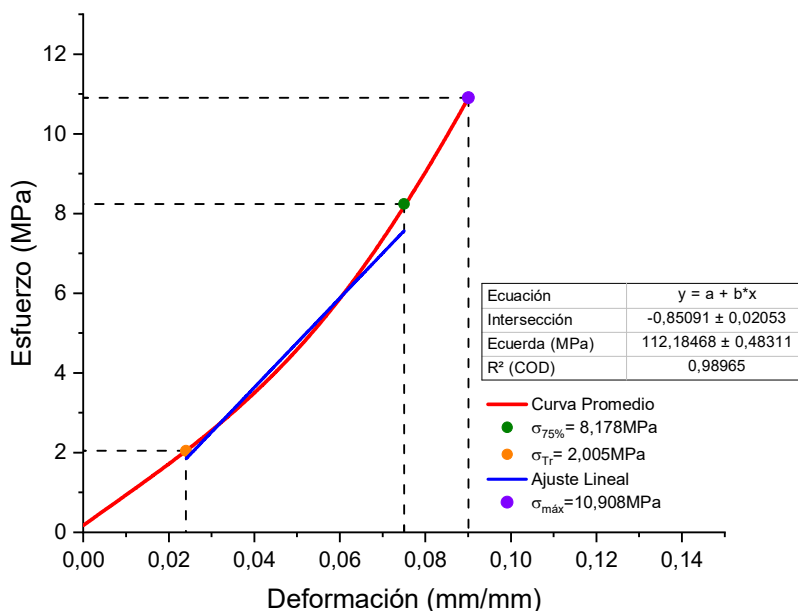




c) Módulo de elasticidad para las  $Q'$ eswas en condición completamente húmeda

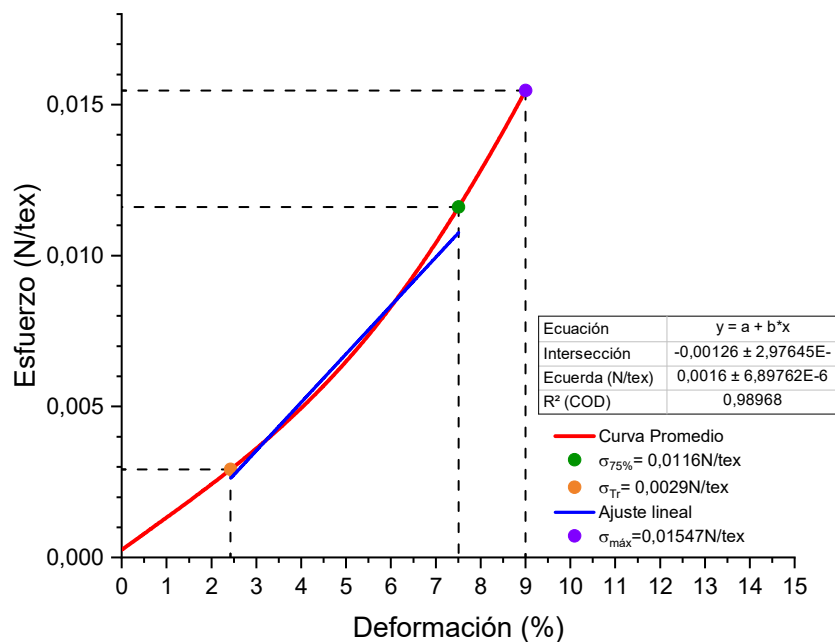
**Figura 111**

*Ajuste lineal para la obtención de módulo de elasticidad para la  $Q'$ eswa completamente húmeda (QH) en MPa*



**Figura 112**

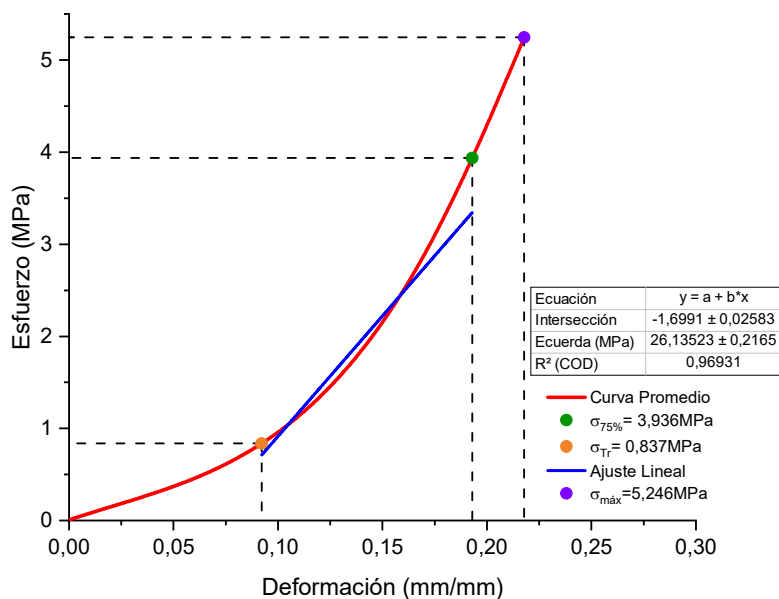
*Ajuste lineal para la obtención de módulo de elasticidad para la  $Q'$ eswa completamente húmeda (QH) en N/tex*



d) Módulo de elasticidad para el *Maqui* en condición seca temperatura ambiente

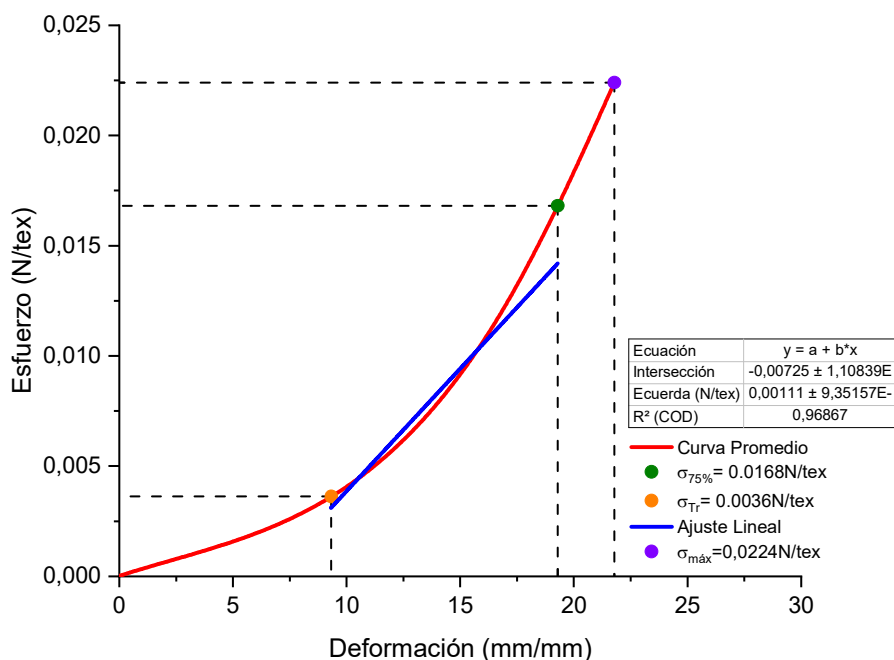
**Figura 113**

*Ajuste lineal para la obtención de módulo de elasticidad para el Maqui (MA) seco a temperatura ambiente en MPa*



**Figura 114**

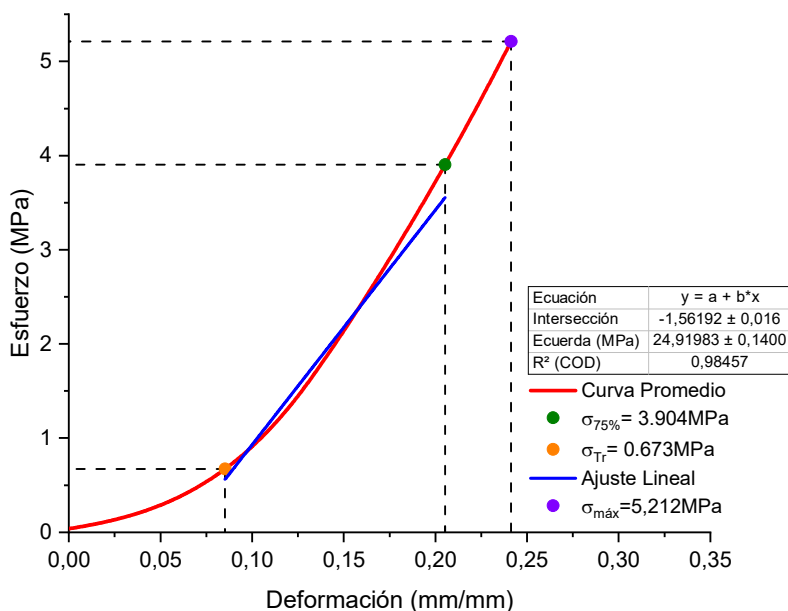
*Ajuste lineal para la obtención de módulo de elasticidad para el Maqui (MA) seco a temperatura ambiente en N/tex*



e) Módulo de elasticidad para el *Duro* en condición seca temperatura ambiente

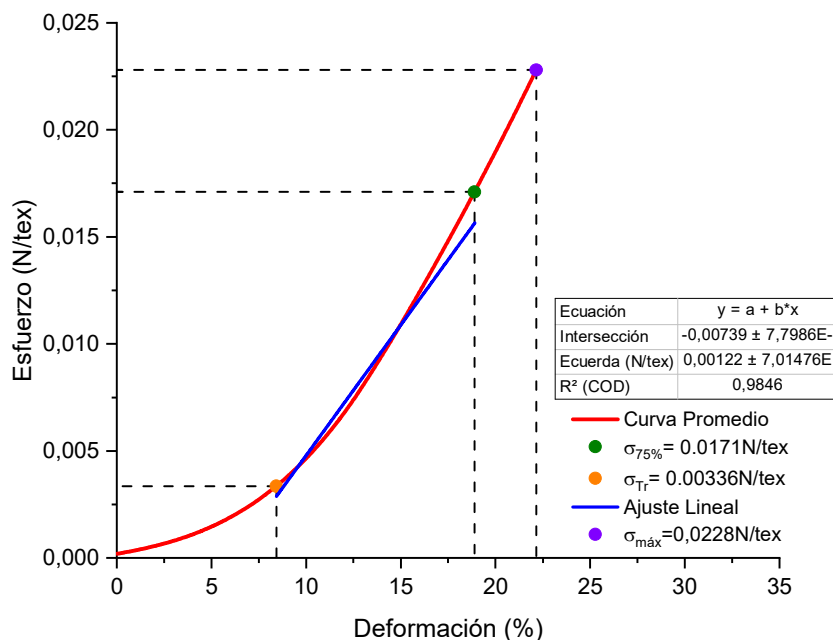
**Figura 115**

*Ajuste lineal para la obtención de módulo de elasticidad para el Duro (DA) seco a temperatura ambiente en MPa*



**Figura 116**

*Ajuste lineal para la obtención de módulo de elasticidad para el Duro (DA) seco a temperatura ambiente en N/tex*





**Comentario:** El coeficiente de determinación  $R^2$  (COD) para las cuerdas estudiadas varían entre 0.96 y 0.98, lo cual es muy cercano a 1. Esto indica que el ajuste lineal es adecuado para la relación entre esfuerzo y deformación para el rango de datos utilizado.

### 3.5.4. Prueba de hipótesis

#### 3.5.4.1. Análisis de Varianza ANOVA y Kruskal-Wallis ANOVA para las $Q'$ eswas en las Diferentes Condiciones de Humedad.

##### Análisis de Varianza (ANOVA) para el Esfuerzo Máximo en MPa.

**Tabla 29**

*Estadística descriptiva de las  $Q'$ eswa en las condiciones seca a temperatura ambiente (QSA), parcialmente húmeda (QPH) y completamente húmeda (QH) para el Esfuerzo Máximo en MPa*

Tipo de Cuerda	N muestras	Media	Desviación Estándar	SE de la media
QSA	25	10.023	2.747	0.549
QPH	25	9.886	1.842	0.368
QH	25	10.756	3.255	0.651

**Tabla 30**

*Supuesto de Normalidad Shapiro-Wilk para las  $Q'$ eswas en las condiciones seca a temperatura ambiente (QSA), parcialmente húmeda (QPH) y completamente húmeda (QH) para el esfuerzo máximo en MPa*

Tipo de Cuerda	N Muestras	Estadística	p-valor	Decisión a nivel (5%)
QSA	25	0.949	0.237	Se acepta la normalidad
QPH	25	0.961	0.426	Se acepta la normalidad
QH	25	0.956	0.348	Se acepta la normalidad

QSA: Al nivel 0.05, los datos se extrajeron significativamente de una población con distribución normal.

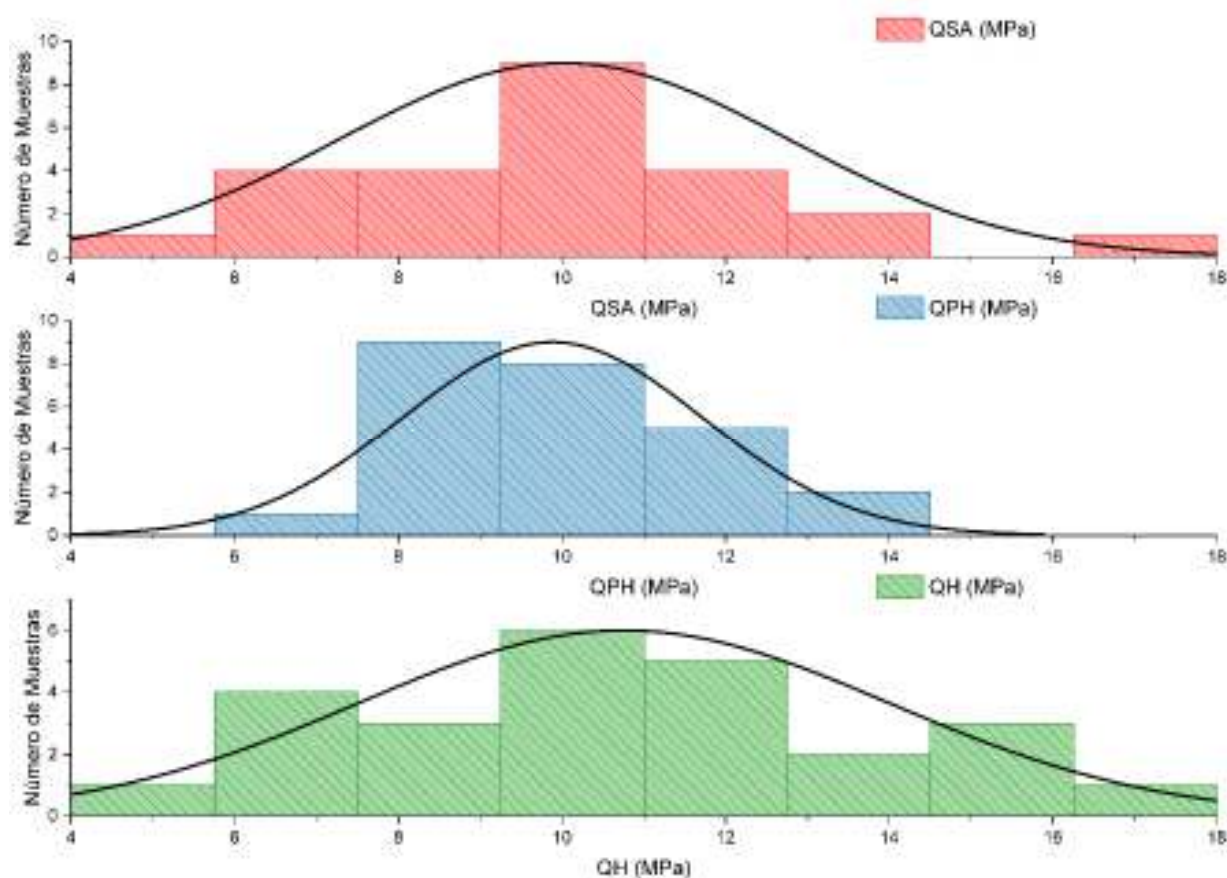


QPH: Al nivel 0.05, los datos se extrajeron significativamente de una población con distribución normal.

QH: Al nivel 0.05, los datos se extrajeron significativamente de una población con distribución normal.

**Figura 117**

*Histograma de normalidad para las Q'eswas en las condiciones seca a temperatura ambiente (QSA), parcialmente húmeda (QPH) y completamente húmeda (QH) para el esfuerzo máximo en MPa*





**Tabla 31**

*Prueba de homogeneidad de varianzas, test de Levene's (Desviación absoluta) de las Q'eswas para el esfuerzo máximo en MPa*

	<b>Grados de Libertad</b>	<b>Suma de Cuadrados</b>	<b>Media Cuadrática</b>	<b>F Valor</b>	<b>Prob&gt;F</b>
Modelo	2	15.944	7.972	2.753	0.070
Error	72	208.508	2.896		

En el nivel 0.05, las varianzas poblacionales no son significativamente diferentes.

Habiendo cumplido con los supuestos para realizar el Análisis de Varianza (ANOVA) se procede a realizar el ANOVA unidireccional para las Q'eswas.

**Tabla 32**

*ANOVA unidireccional de las Q'eswas en las diferentes condiciones de humedad para el esfuerzo máximo en MPa*

	<b>Grados de Libertad</b>	<b>Suma de Cuadrados</b>	<b>Media Cuadrática</b>	<b>F Valor</b>	<b>Prob&gt;F</b>
Modelo	2	10.934	5.467	0.762	0.471
Error	72	516.843	7.178		
Total	74	527.776			

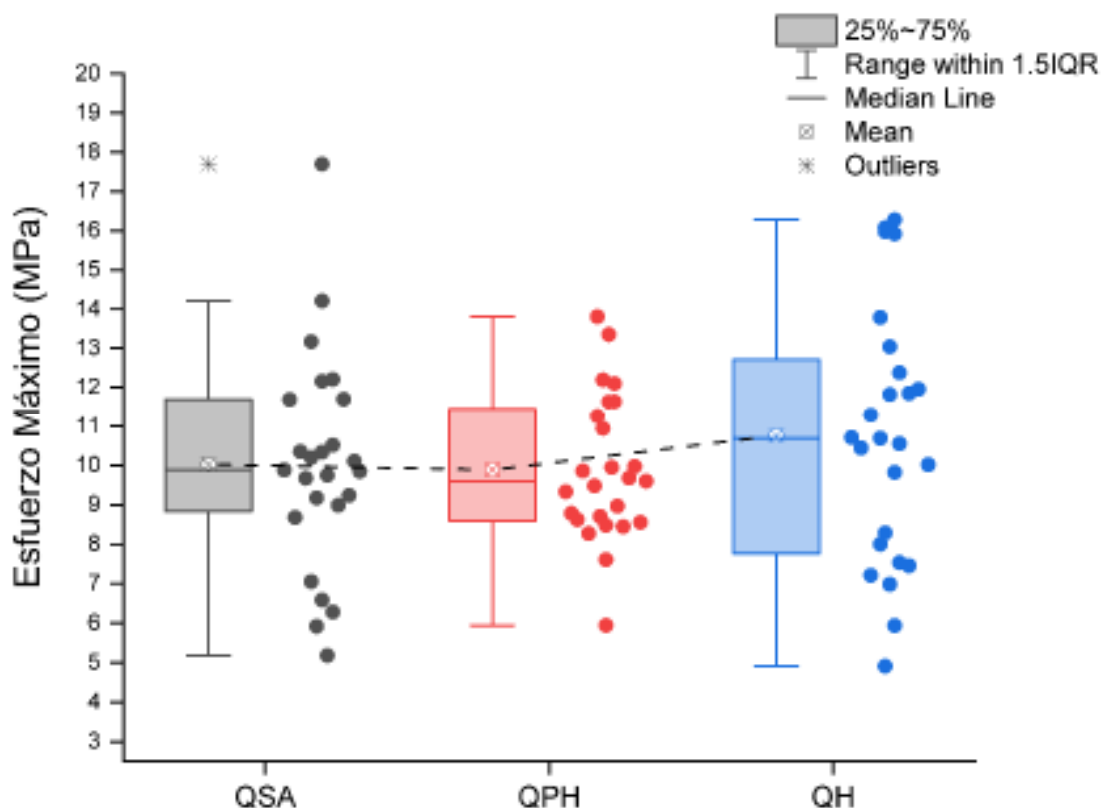
Hipótesis Nula: Las medias de todos los niveles son iguales.

Hipótesis alternativa: La media de uno o más niveles son diferentes.

Al 0.05 de significancia, las medias poblacionales no son significativamente diferentes.

**Figura 118**

Diagrama de Cajas del esfuerzo máximo en MPa para las Q'eswas en las condiciones seca a temperatura ambiente (QSA), parcialmente húmeda (QPH) y completamente húmeda (QH)



**Análisis de Varianza (ANOVA) para el Esfuerzo Máximo en N/tex.**

**Tabla 33**

Estadística descriptiva de las Q'eswa en las condiciones seca a temperatura ambiente (QSA), parcialmente húmeda (QPH) y completamente húmeda (QH) para el Esfuerzo Máximo en N/tex

Tipo de Cuerda	N muestras	Media	Desviación estándar	SE de la media
QSA	25	0.045	0.012	0.002
QPH	25	0.024	0.004	8.20E-04
QH	25	0.015	0.004	8.37E-04



**Tabla 34**

*Supuesto de Normalidad Shapiro-Wilk para las Q'eswas en las condiciones seca a temperatura ambiente (QSA), parcialmente húmeda (QPH) y completamente húmeda (QH) para el esfuerzo máximo en N/tex*

<b>Tipo de Cuerda</b>	<b>N Muestras</b>	<b>Estadística</b>	<b>p-valor</b>	<b>Decisión a nivel (5%)</b>
QSA	25	0.961	0.434	Se acepta la normalidad
QPH	25	0.960	0.423	Se acepta la normalidad
QH	25	0.963	0.469	Se acepta la normalidad

QSA: Al nivel 0.05, los datos se extrajeron significativamente de una población con distribución normal.

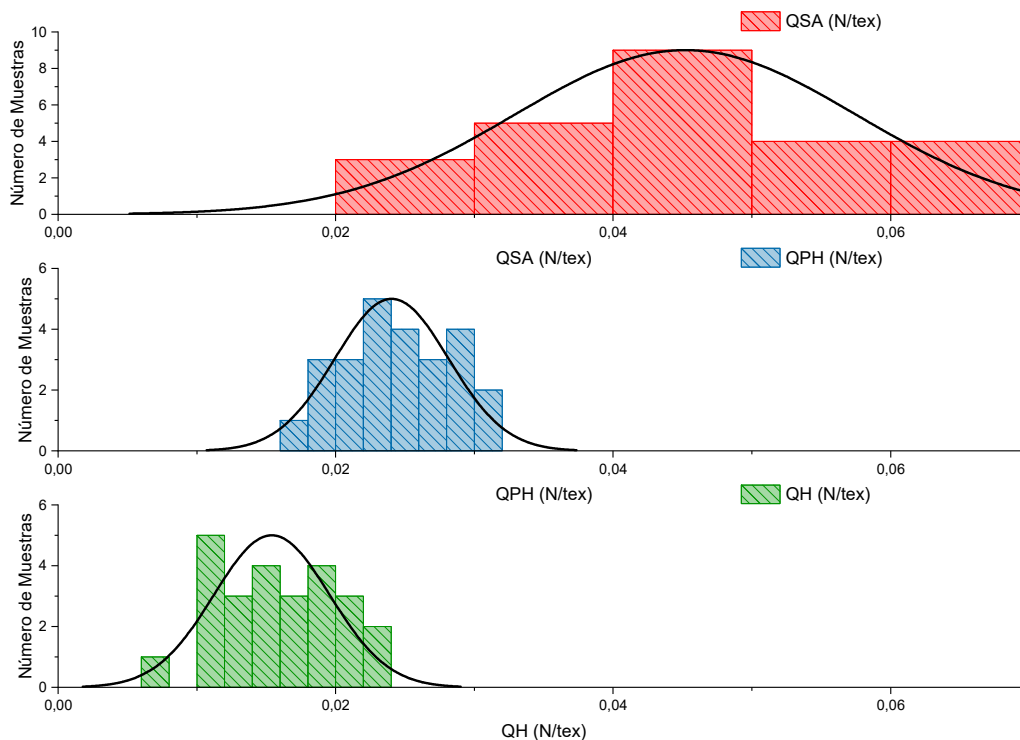
QPH: Al nivel 0.05, los datos se extrajeron significativamente de una población con distribución normal.

QH: Al nivel 0.05, los datos se extrajeron significativamente de una población con distribución normal.



**Figura 119**

*Histograma de normalidad para las Q'eswas en las condiciones seca a temperatura ambiente (QSA), parcialmente húmeda (QPH) y completamente húmeda (QH) para el esfuerzo máximo en N/tex*



**Tabla 35**

*Prueba de homogeneidad de varianzas, test de Levene's (Desviación absoluta) para las Q'eswas para el esfuerzo máximo en N/tex*

	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados	Media Cuadrática	F Valor	Prob>F
Modelo	2	5.94E-04	2.97E-04	13.117	1.39E-05
Error	72	0.002	2.26E-05		

En el nivel 0.05, las varianzas poblacionales son significativamente diferentes.



Al no haber cumplido con el supuesto de homogeneidad de varianzas la estadística que se debe realizar es una no paramétrica por lo tanto no se puede realizar el análisis de varianza clásico (ANOVA) y se realiza el ANOVA de Kruskal-Wallis.

**Tabla 36**

*Estadísticos de prueba para las Q'eswas en diferentes condiciones de humedad para el esfuerzo máximo en N/tex*

Chi-Cuadrado	GL	Prob>Chi-Cuadrado
59.159	2	1.42E-13

Hipótesis Nula: Las muestras provienen de la misma población.

Hipótesis alternativa: Las muestras provienen de diferentes poblaciones.

Según el valor de chi-cuadrado se cumple la hipótesis alternativa y podemos decir:

Al nivel 0.05, las poblaciones son significativamente diferentes.

**Tabla 37**

*Prueba de Dunn's para las Q'eswas en las condiciones seca a temperatura ambiente (QSA), parcialmente húmeda (QPH) y completamente húmeda (QH) para el esfuerzo máximo en N/tex*

	Diferencia de rango medio	Z	Prob	Sig
"QSA" "QPH"	24.94	4.048	1.55E-04	1
"QSA" "QH"	47.36	7.688	4.49E-14	1
"QPH" "QH"	22.42	3.639	8.20E-04	1

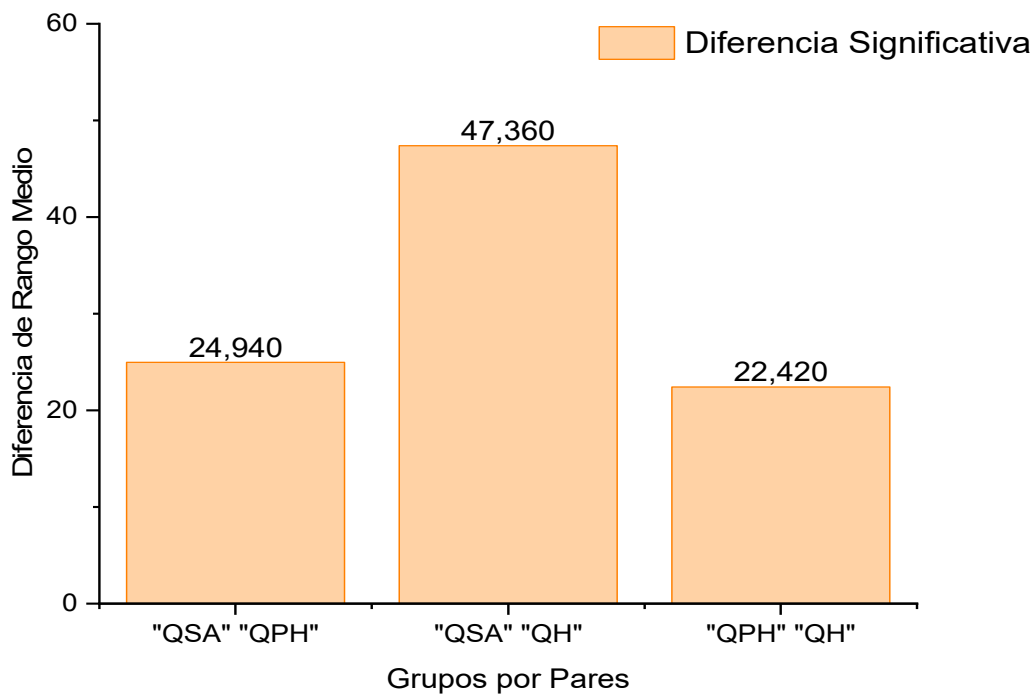
Sig igual a 1 indica que la diferencia de medias es significativa al nivel 0.05

Sig igual a 0 indica que la diferencia de medias no es significativa al nivel 0.05



**Figura 120**

Comparación emparejada para la *Q'eswa* en las condiciones seca a temperatura ambiente (*QSA*), parcialmente húmeda (*QPH*) y completamente húmeda (*QH*) para el esfuerzo máximo en *N/tex*



**Análisis de Varianza (ANOVA) para la Deformación de Cuerda en %.**

**Tabla 38**

Estadística descriptiva de las *Q'eswa* en las condiciones seca a temperatura ambiente (*QSA*), parcialmente húmeda (*QPH*) y completamente húmeda (*QH*) para la Deformación de cuerda en %

Tipo de Cuerda	N muestras	Media	Desviación Estándar	SE de la media
QSA	25	3.849	1.026	0.205
QPH	25	4.949	0.729	0.146
QH	25	5.018	1.467	0.293



**Tabla 39**

*Supuesto de Normalidad Shapiro-Wilk para las Q'eswas en las condiciones seca a temperatura ambiente (QSA), parcialmente húmeda (QPH) y completamente húmeda (QH) para la deformación de cuerda en %*

Tipo de Cuerda	N Muestras	Estadística	p-valor	Decisión a nivel (5%)
QSA	25	0.975	0.766	Se acepta la normalidad
QPH	25	0.970	0.652	Se acepta la normalidad
QH	25	0.987	0.979	Se acepta la normalidad

QSA: Al nivel 0.05, los datos se extrajeron significativamente de una población con distribución normal.

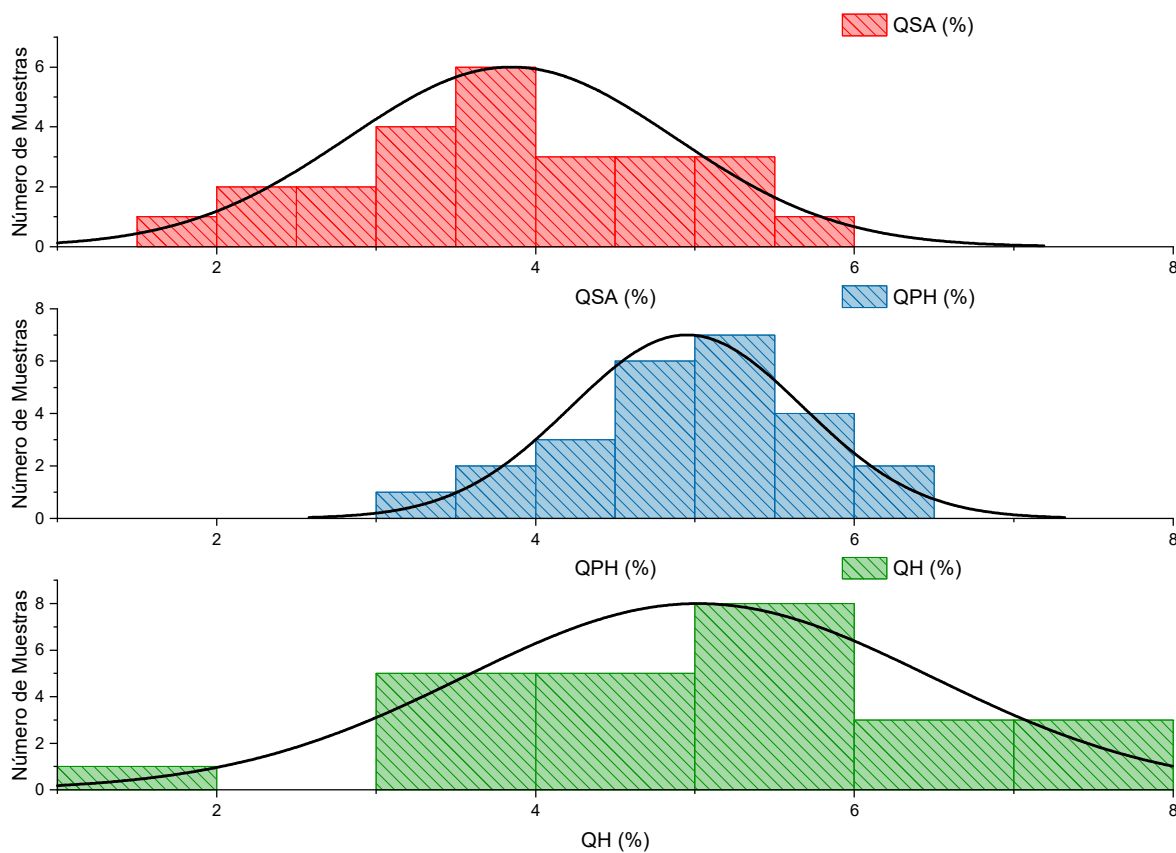
QPH: Al nivel 0.05, los datos se extrajeron significativamente de una población con distribución normal.

QH: Al nivel 0.05, los datos se extrajeron significativamente de una población con distribución normal.



Figura 121

Histograma de normalidad para las  $Q$ 'eswas en las condiciones seca a temperatura ambiente (QSA), parcialmente húmeda (QPH) y completamente húmeda (QH) para la Deformación de Cuerda en %





**Tabla 40**

*Prueba de homogeneidad de varianzas, test de Levene's (Desviación absoluta) de Q'eswas para la Deformación de Cuerda %*

	<b>Grados de Libertad</b>	<b>Suma de Cuadrados</b>	<b>Media Cuadrática</b>	<b>F Valor</b>	<b>Prob&gt;F</b>
Modelo	2	3.500	1.750	4.178	0.019
Error	72	30.155	0.419		

En el nivel 0.05, las varianzas poblacionales son significativamente diferentes

Al no haber cumplido con el supuesto de homogeneidad de varianzas la estadística que se debe realizar es una no paramétrica por lo tanto no se puede realizar el análisis de varianza clásico (ANOVA) y se realiza el ANOVA de Kruskal-Wallis

**Tabla 41**

*Estadísticos de prueba para las Q'eswas en diferentes condiciones de humedad para la Deformación de Cuerda en %*

<b>Chi-Cuadrado</b>	<b>GL</b>	<b>Prob&gt;Chi-Cuadrado</b>
15.563	2	4.17326E-4

Hipótesis Nula: Las muestras provienen de la misma población

Hipótesis alternativa: Las muestras provienen de diferentes poblaciones

Según el valor de chi-cuadrado se cumple la hipótesis alternativa y podemos decir:

Al nivel 0.05, las poblaciones son significativamente diferentes



**Tabla 42**

*Prueba de Dunn's para las Q'eswas en las condiciones seca a temperatura ambiente (QSA), parcialmente húmeda (QPH) y completamente húmeda (QH) para la Deformación de Cuerda en %*

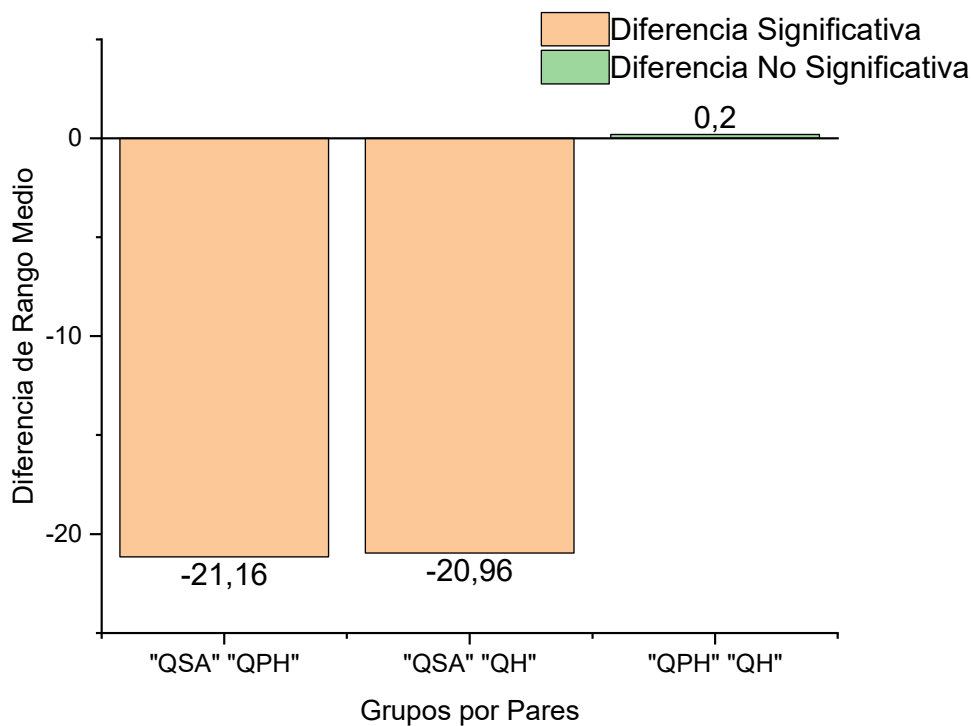
	Diferencia de rango medio	Z	Prob	Sig
"QSA" "QPH"	-21.16	-3.433	1.79E-03	1
"QSA" "QH"	-20.96	-3.400	2.02E-03	1
"QPH" "QH"	0.2	0.032	1.00E+00	0

Sig igual a 1 indica que la diferencia de medias es significativa al nivel 0.05

Sig igual a 0 indica que la diferencia de medias no es significativa al nivel 0.05

**Figura 122**

*Comparación emparejada para la Q'eswa en las condiciones seca a temperatura ambiente (QSA), parcialmente húmeda (QPH) y completamente húmeda (QH) para la Deformación de Cuerda en %*





**Análisis de Varianza (ANOVA) para la Deformación Unitaria Máxima en %.**

**Tabla 43**

*Estadística descriptiva de las Q'eswa en las condiciones seca a temperatura ambiente (QSA), parcialmente húmeda (QPH) y completamente húmeda (QH) para la Deformación Unitaria Máxima en %*

Tipo de Cuerda	N muestras	Media	Desviación Estándar	SE de la media
QSA	25	8.541	1.268	0.254
QPH	25	10.554	0.897	0.179
QH	25	10.551	2.065	0.413

**Tabla 44**

*Supuesto de Normalidad Shapiro-Wilk para las Q'eswas en las condiciones seca a temperatura ambiente (QSA), parcialmente húmeda (QPH) y completamente húmeda (QH) para la deformación unitaria máxima en %*

Tipo de Cuerda	N Muestras	Estadística	p-valor	Decisión a nivel (5%)
QSA	25	0.955	0.326	Se acepta la normalidad
QPH	25	0.978	0.852	Se acepta la normalidad
QH	25	0.964	0.508	Se acepta la normalidad

QSA: Al nivel 0.05, los datos se extrajeron significativamente de una población con distribución normal

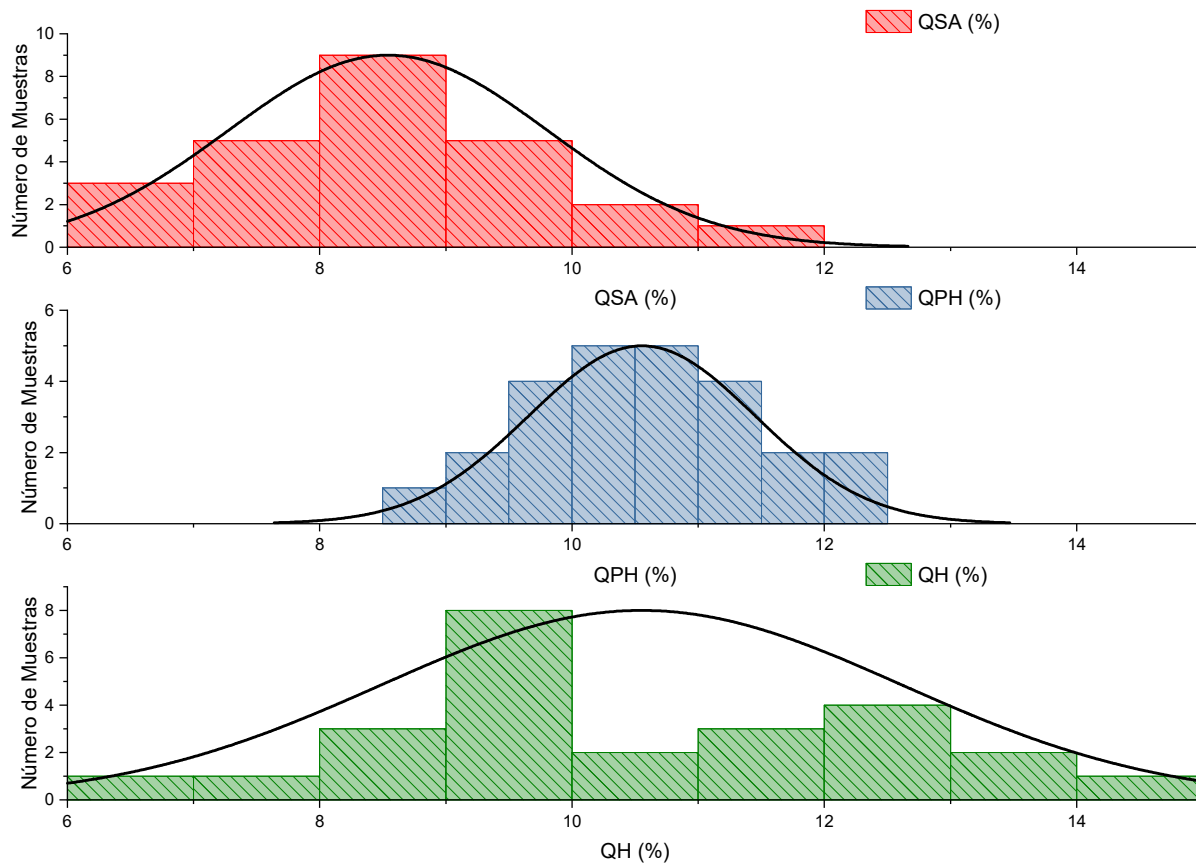
QPH: Al nivel 0.05, los datos se extrajeron significativamente de una población con distribución normal

QH: Al nivel 0.05, los datos se extrajeron significativamente de una población con distribución normal



**Figura 123**

*Histograma de normalidad para las Q'eswas en las condiciones seca a temperatura ambiente (QSA), parcialmente húmeda (QPH) y completamente húmeda (QH) para la Deformación Unitaria Máxima en %*



**Tabla 45**

*Prueba de homogeneidad de varianzas, test de Levene's (Desviación absoluta) para las Q'eswas para la Deformación Unitaria Máxima en %*

	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados	Media Cuadrática	F Valor	Prob>F
Modelo	2	14.59463	7.29732	11.3775	5.09E-05
Error	72	46.17948	0.64138		

En el nivel 0.05, las varianzas poblacionales son significativamente diferentes



Al no haber cumplido con el supuesto de homogeneidad de varianzas la estadística que se debe realizar es una no paramétrica por lo tanto no se puede realizar el análisis de varianza clásico (ANOVA) y se realiza el ANOVA de Kruskal-Wallis

**Tabla 46**

*Estadísticos de prueba para las Q'eswas en diferentes condiciones de humedad para la Deformación Unitaria Máxima en %*

Chi-Cuadrado	GL	Prob>Chi-Cuadrado
25.162	2	3.43713E-6

Hipótesis Nula: Las muestras provienen de la misma población

Hipótesis alternativa: Las muestras provienen de diferentes poblaciones

Según el valor de chi-cuadrado se cumple la hipótesis alternativa y podemos decir:

Al nivel 0.05, las poblaciones son significativamente diferentes

**Tabla 47**

*Prueba de Dunn's para las Q'eswas en las condiciones seca a temperatura ambiente (QSA), parcialmente húmeda (QPH) y completamente húmeda (QH) para la Deformación Unitaria Máxima en %*

	Diferencia de rango medio	Z	Prob	Sig
"QSA" "QPH"	-28.46	-4.617	1.17E-05	1
"QSA" "QH"	-24.7	-4.007	1.85E-04	1
"QPH" "QH"	3.76	0.610	1.00E+00	0

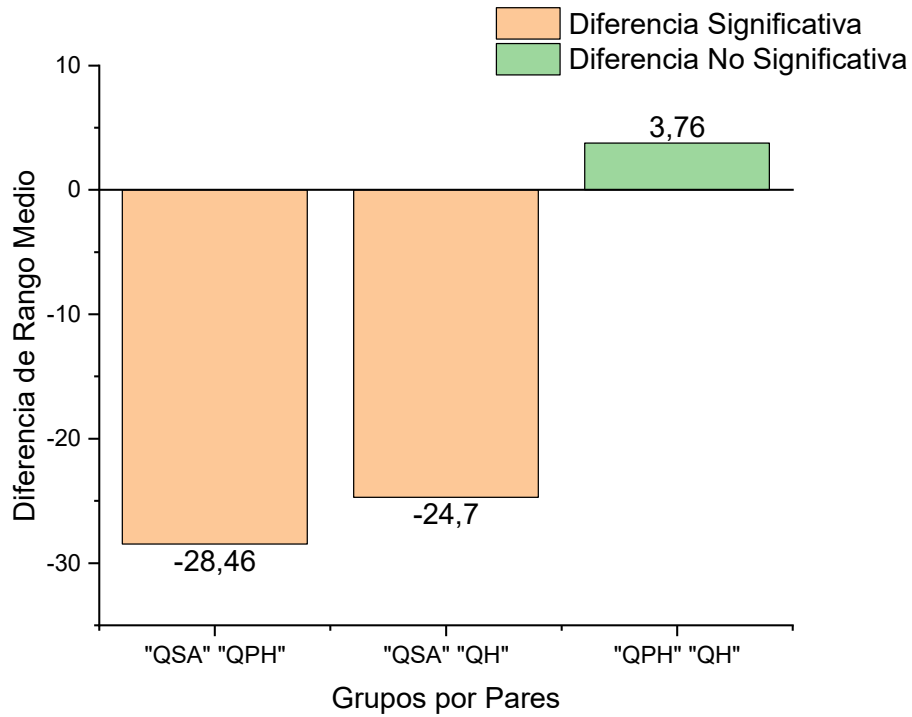
Sig igual a 1 indica que la diferencia de medias es significativa al nivel 0.05

Sig igual a 0 indica que la diferencia de medias no es significativa al nivel 0.05



**Figura 124**

*Comparación emparejada para la Q'eswa en las condiciones seca a temperatura ambiente (QSA), parcialmente húmeda (QPH) y completamente húmeda (QH) para la Deformación Unitaria Máxima en %*



## Capítulo IV: Resultados

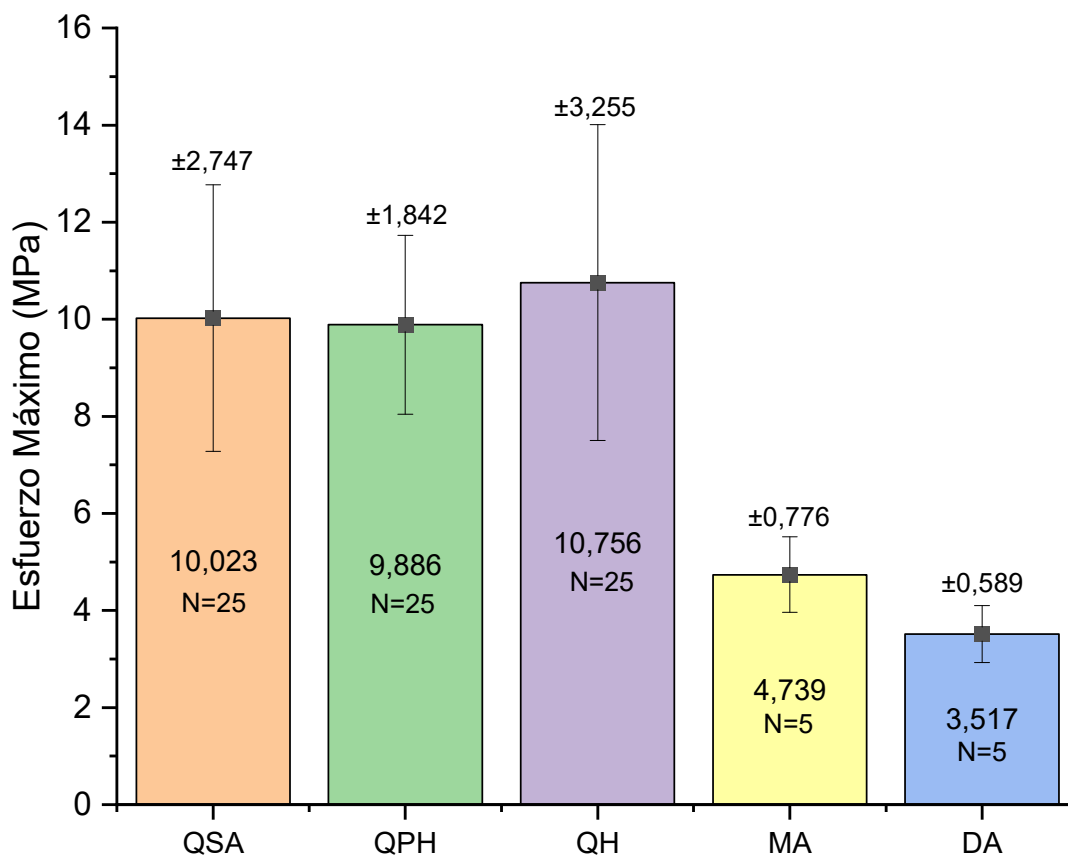
Los siguientes resultados obtenidos a través de los ensayos a tracción realizados en las cuerdas principales del puente *Q'eswachaka* en diferentes condiciones humedad se presentan a continuación:

### 4.1. Resultados Respecto al Esfuerzo Máximo para las Principales Cuerdas del Puente *Q'eswachaka*

#### 4.1.1. Resumen de Resultados del Esfuerzo Máximo para las Principales Cuerdas del Puente *Q'eswachaka* en MPa

Figura 125

Resumen grafico del esfuerzo máximo (MPa) de las principales cuerdas del puente *Q'eswachaka*



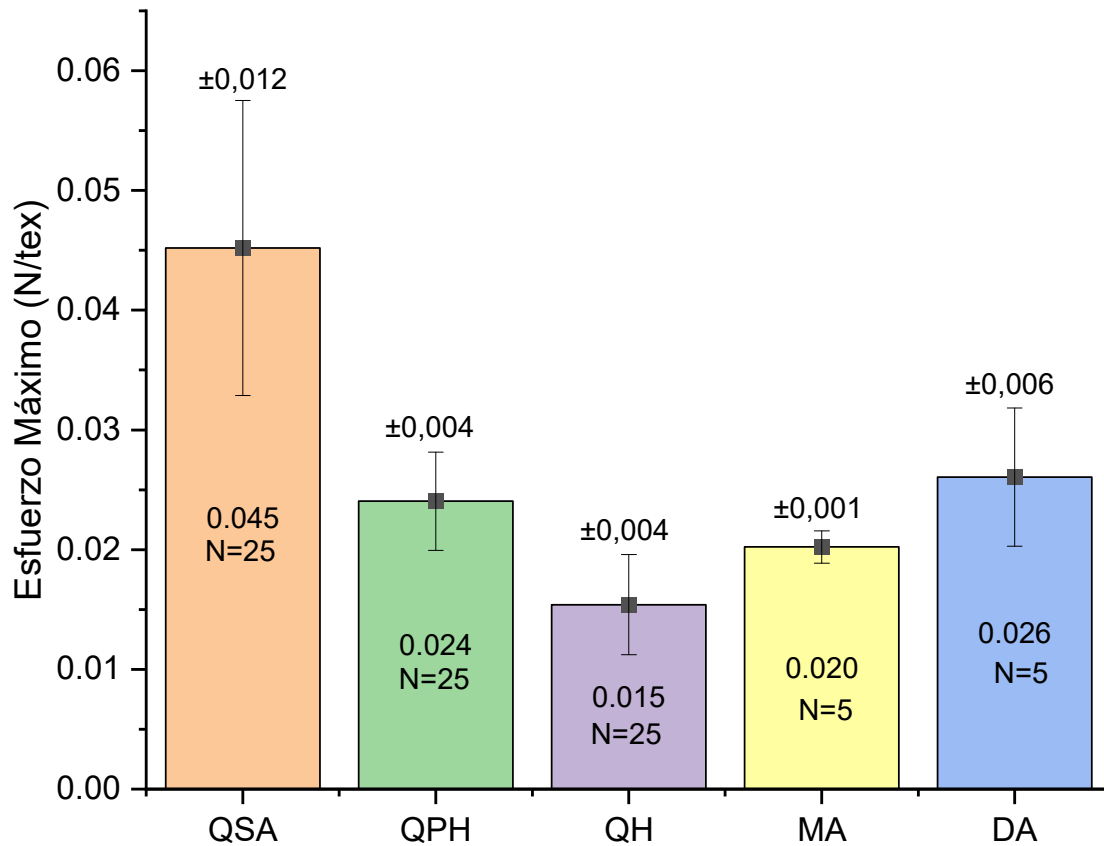
Nota: Q: Q'eswa, S: Seca, A: Temperatura Ambiente, P: Parcialmente, H: Húmeda, M: Maqui y D: Duro

#### 4.1.2. Resumen de Resultados del Esfuerzo Máximo para las Principales Cuerdas del Puente

##### *Q'eswachaka en N/tex*

Figura 126

Resumen gráfico del esfuerzo máximo (N/tex) de las principales cuerdas del puente Q'eswachaka



Nota: Q: Q'eswa, S: Seca, A: Temperatura Ambiente, P: Parcialmente, H: Húmeda, M: Maqui y D: Duro

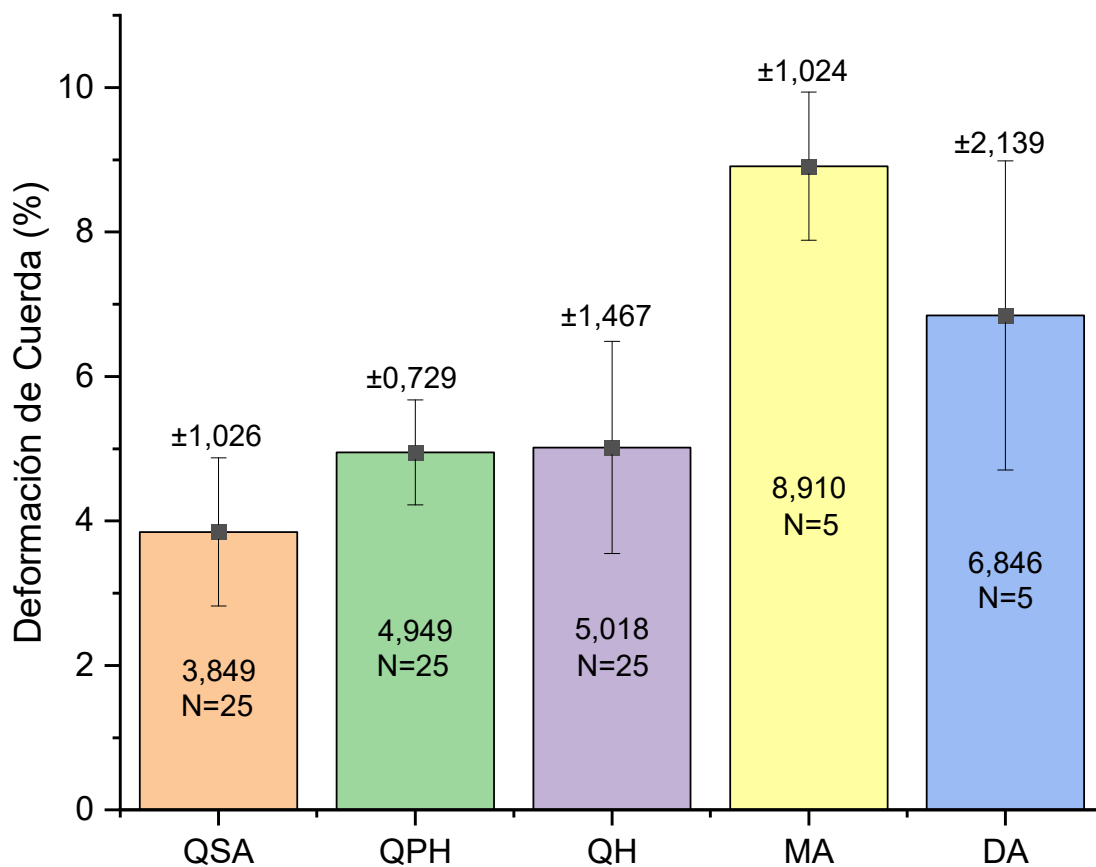


## 4.2. Resultados Respecto a la Deformación de Cuerda para las Principales Cuerdas del Puente *Q'eswachaka*

### 4.2.1. Resumen de Resultados de la Deformación de Cuerda para las Principales Cuerdas del Puente *Q'eswachaka* en %

**Figura 127**

Resumen gráfico de la deformación de cuerda de las principales cuerdas del puente *Q'eswachaka*



Nota: Q: Q'eswa, S: Seca, A: Temperatura Ambiente, P: Parcialmente, H: Húmeda, M: Maqui y D: Duro

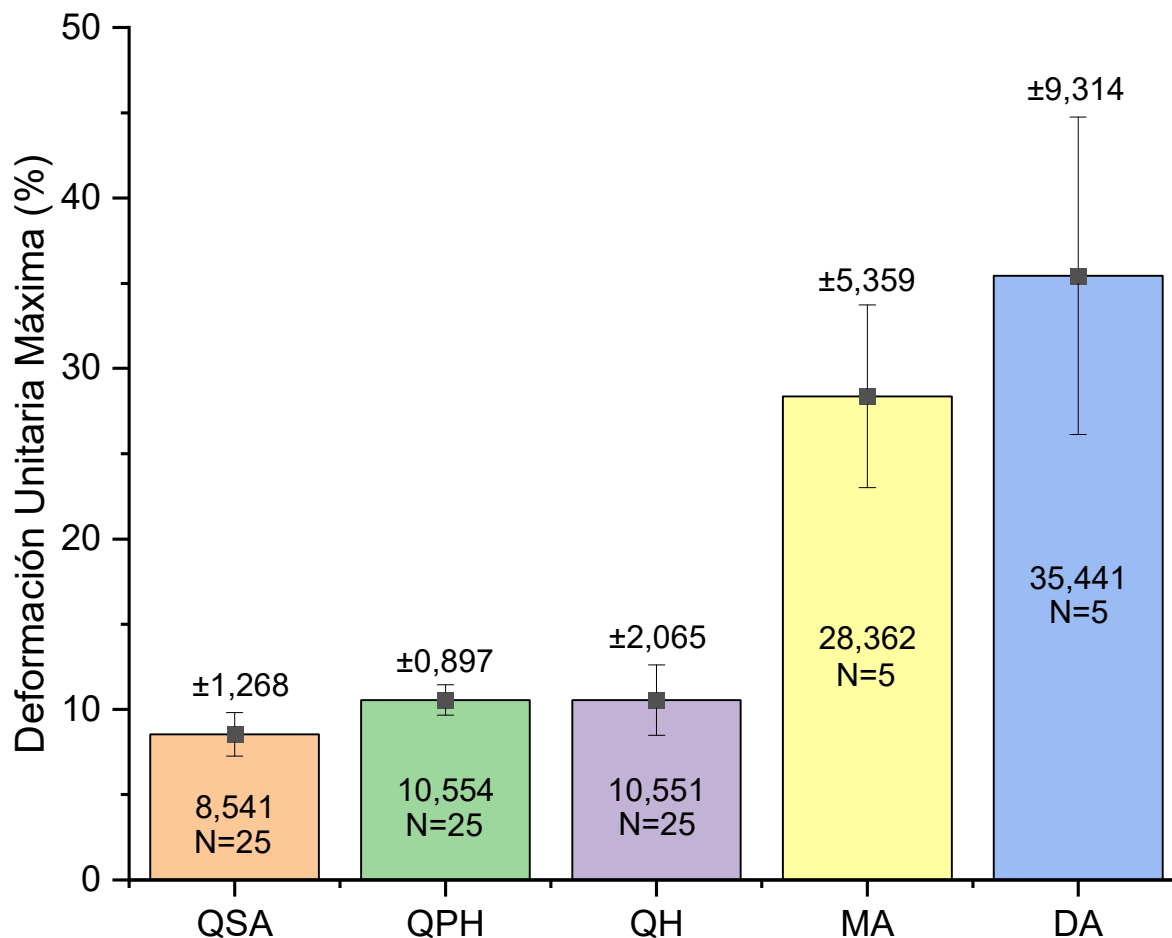


### 4.3. Resultados Respecto a la Deformación Unitaria Máxima para las Principales Cuerdas del Puente *Q'eswachaka*

#### 4.3.1. Resumen de Resultados de la Deformación Unitaria Máxima de la Cuerda *Q'eswa*

Figura 128

Resumen gráfico de la deformación unitaria máxima de las principales cuerdas del puente *Q'eswachaka*



Nota: Q: *Q'eswa*, S: Seca, A: Temperatura Ambiente, P: Parcialmente, H: Húmeda, M: Maqui y D: Duro

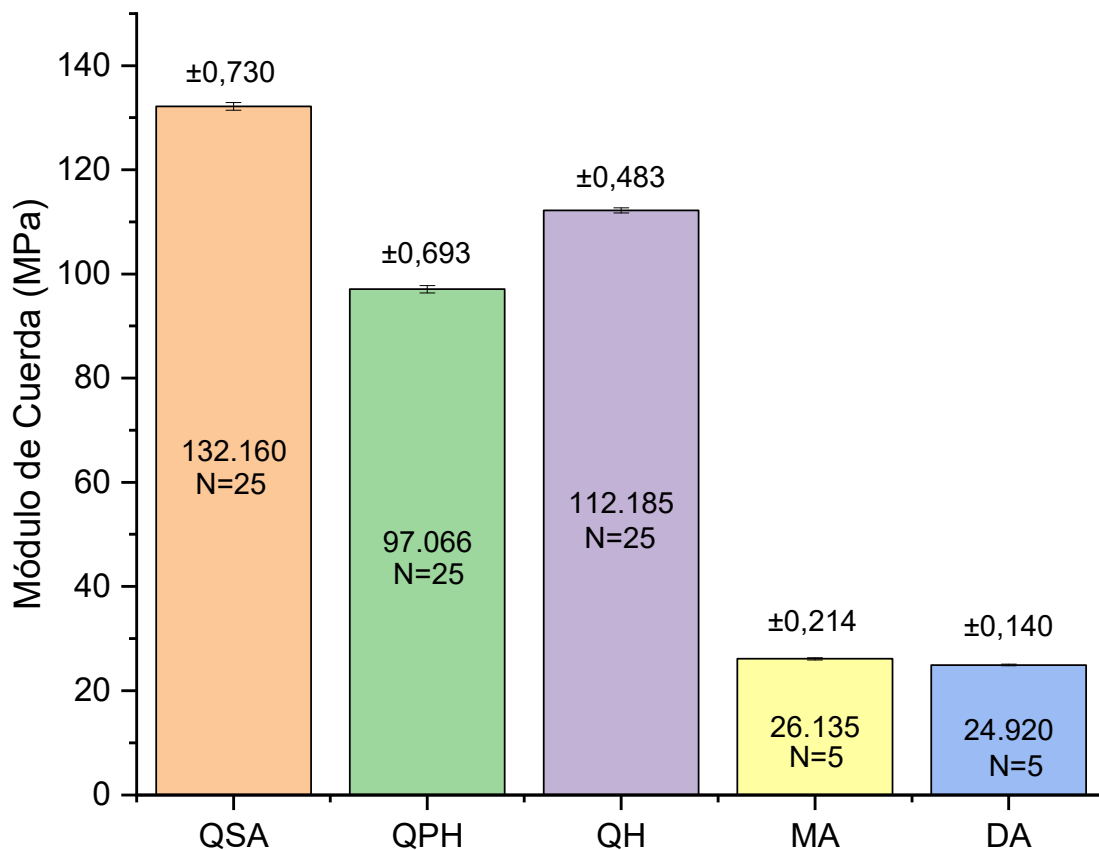


#### 4.4. Resultados Respecto al Módulo de elasticidad para las Principales Cuerdas del Puente *Q'eswachaka*

##### 4.4.1. Resumen de Resultados del Módulo de elasticidad Para las Principales Cuerdas del Puente *Q'eswachaka* en MPa

**Figura 129**

Resumen gráfico del módulo de elasticidad (MPa) de las principales cuerdas del puente  
*Q'eswachaka*



Nota: Q: Q'eswa, S: Seca, A: Temperatura Ambiente, P: Parcialmente, H: Húmeda, M: Maqui y  
D: Duro

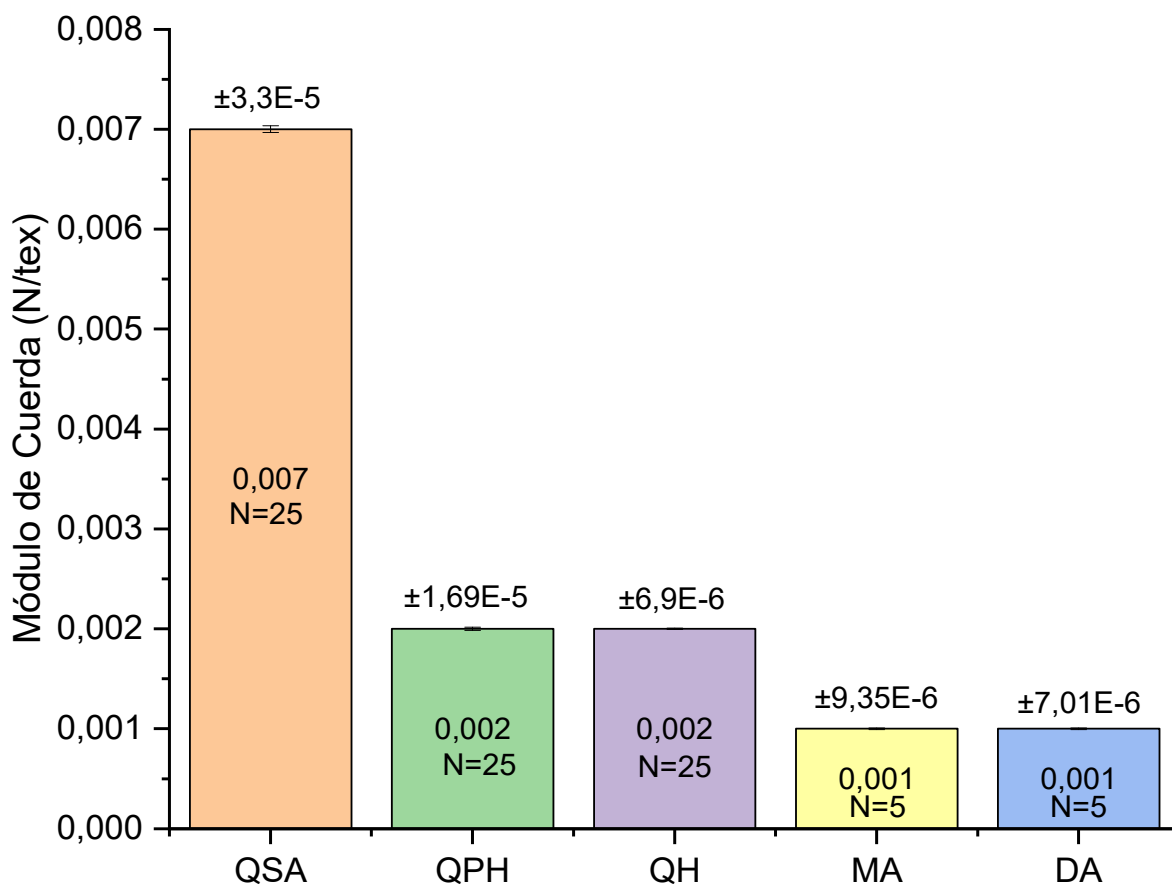




#### 4.4.2. Resumen de Resultados del Módulo de elasticidad para las Principales Cuerdas del Puente Q'eswachaka en N/tex

Figura 130

Resumen gráfico del módulo de elasticidad (N/tex) de las principales cuerdas del puente Q'eswachaka



Nota: Q: Q'eswa, S: Seca, A: Temperatura Ambiente, P: Parcialmente, H: Húmeda, M: Maqui y D: Duro



#### 4.5. Resumen de Resultados

Figura 131

Curvas representativas agrupadas en MPa-mm/mm

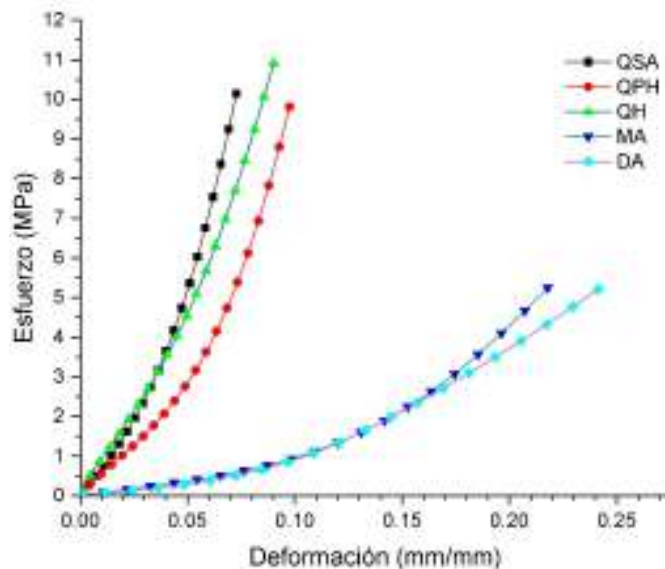
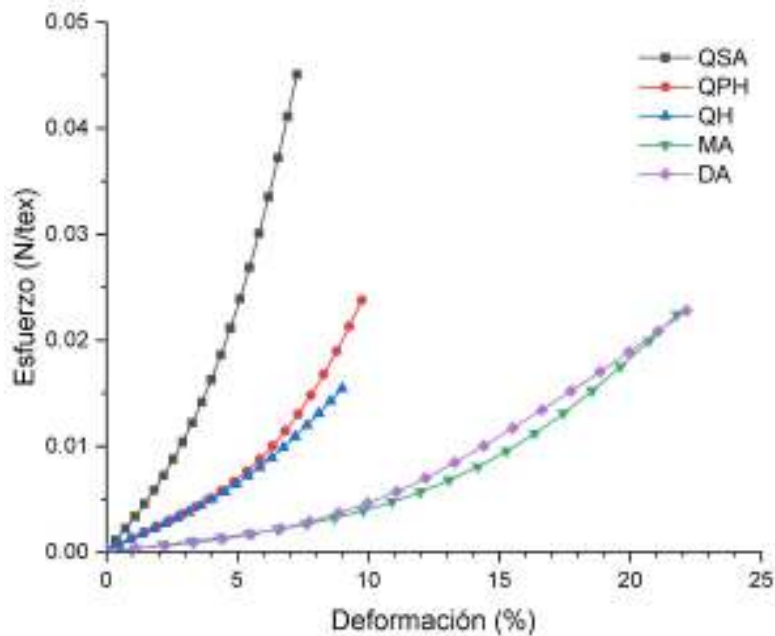


Figura 132

Curvas representativas agrupadas en N/tex-%





**Tabla 48**

*Cuadro resumen de resultados*

Tipo de Cuerda	Ítem	Esfuerzo Máximo		Def. Unitaria Máxima	Def. Cuerda	Módulo de Elasticidad	
		Mpa	N/tex	%	%	Mpa	N/tex
<b>Q'eswa</b>	QSA	10.023±2.747	0.045±0.012	8.541±1.268	3.849±1.026	132.16±0.73	0.007±3.33e <sup>-5</sup>
	QPH	9.886±1.842	0.024±0.004	10.554±0.897	4.949±0.729	97.066±0.693	0.002±1.69e <sup>-5</sup>
	QH	10.56±3.255	0.015±0.004	10.551±2.065	5.018±1.467	112.185±0.483	0.002±0.69e <sup>-5</sup>
<b>Maqui</b>	MA	4.739±0.775	0.020±0.001	28.362±5.359	8.91±1.024	26.135±0.214	0.001±0.935e <sup>-5</sup>
<b>Duro</b>	DA	3.517±0.589	0.026±0.006	35.441±9.314	6.846±2.139	24.92±0.140	0.001±0.701e <sup>-5</sup>

*Nota:* Q: Q'eswa, S: Seca, A: Temperatura Ambiente, P: Parcialmente, H: Húmeda, M: Maqui y D: Duro



## Capítulo V: Discusión

### 7.1. Contraste de los Resultados Obtenidos Respecto a los Antecedentes o con Referentes del Marco Teórico.

- a) Para las cuerdas *Q'eswa* en condición seca a temperatura ambiente, parcialmente húmeda y completamente húmeda se obtuvo los valores para su resistencia  $10.023 \pm 2.747$ ,  $9.886 \pm 1.842$  y  $10.756 \pm 3.255$  en MPa respectivamente, a diferencia del Antecedente a Nivel Nacional N°01 del presente documento que concluye en: ... ***“se observó que las cuerdas permanecieron intactas, por lo que se supuso que las Q'eswas soportan cargas superiores a los 15kg ó 0.125 kg/cm<sup>2</sup> (0.0123MPa).”***
- b) Para las cuerdas *Maqui* en condición seca a temperatura ambiente y para la cuerda *Duro* seca a temperatura ambiente se obtuvieron valores para su resistencia de  $4.739 \pm 0.776$  y  $3.517 \pm 0.589$  respectivamente a diferencia del Antecedente a Nivel Nacional N°01 del presente documento que concluye en: ***“La prueba en el Duro consistió en atar un extremo de la cuerda a una camioneta pick up sin frenar y frenada de 1800kg que funcionó como punto fijo y el otro a un camión de 4000kg que funcionó como punto móvil; el camión se puso en estado neutro (dejándola avanzar por gravedad) y con aceleración, se observó que las cuerdas quedaron intactas, por lo que mediante esta prueba se supuso que las cuerdas resisten más de 4000kg ó 0.33kg/cm<sup>2</sup> (0.0324MPa)”***
- c) Para las cuerdas *Q'eswa* en condición seca a temperatura ambiente, parcialmente húmeda y completamente húmeda; cuerdas *Maqui* seco a temperatura ambiente y *Duro* seco a temperatura ambiente se determinó el valor de su deformación unitaria máxima los siguientes valores en %  $8.541 \pm 1.268$ ,  $10.554 \pm 0.897$ ,  $10.551 \pm 2.065$ ,  $28.362 \pm 5.359$  y  $35.441 \pm 9.314$  respectivamente, a diferencia del Antecedente Internacional N°02 del presente documento concluye ***que se obtuvo para la fibra Stipa obtusa una deformación unitaria máxima de 2.6%.***
- d) Para las cuerdas *Q'eswa* en condición seca a temperatura ambiente, parcialmente húmeda y completamente húmeda; cuerdas *Maqui* seco a temperatura ambiente y *Duro* seco a temperatura ambiente se determinó el valor de su deformación cuerda obteniendo los siguientes valores en %  $3.849 \pm 1.026$ ,  $4.949 \pm 0.729$ ,  $5.018 \pm 1.467$ ,  $8.910 \pm 1.024$  y  $6.846 \pm 2.139$  respectivamente. Como se indica en el marco teórico en el ítem 2.2.11.1: ***Algunos usos finales del cable de fibra requieren información sobre el aumento de la longitud del cable cuando se aplican fuerzas***



*iniciales y otros usuarios requieren información sobre la capacidad potencial de absorción de energía del cable de fibra cuando se usa por primera vez.*

- e) Para las cuerdas *Q'eswa* en condición seca a temperatura ambiente, parcialmente húmeda y completamente húmeda; cuerdas *Maqui* seco a temperatura ambiente y *Duro* seco a temperatura ambiente se determinó el valor del módulo de elasticidad obteniendo los siguientes valores 132.160, 97.066, 112.185, 26.135 y 24.920 en MPa respectivamente a diferencia del Antecedente Internacional N°02 del presente documento que concluye en que: **“Se obtuvieron valores máximos de 28GPa para el módulo de elasticidad”**

## **7.2. Interpretación de los Resultados Encontrados en la Investigación**

### **7.2.1. Interpretación de los Resultados Respecto al Esfuerzo Máximo en MPa**

- a) Como se observa en la Figura 125 para QSA (*Q'eswa* seca a temperatura ambiente) se puede apreciar que esta cuerda demuestra una buena resistencia en condiciones secas con una media de 10.023 MPa. La desviación estándar es considerablemente alta (2.747 MPa) indica que las propiedades de resistencia pueden variar significativamente entre las diferentes muestras de cuerda. Esta variabilidad podría ser una señal de que elementos como la fabricación debido a que no son fibras continuas en toda la extensión de la cuerda genera fallas aleatorias en la condición seca que puede tener un impacto significativo en la resistencia de la cuerda.
- b) Como se observa en la Figura 125 en cuanto a QPH (Parcialmente húmeda) se tiene que la resistencia media disminuye ligeramente a 9,886 MPa en una condición parcialmente húmeda respecto a la condición seca temperatura ambiente, lo que sugiere que, aunque no significativamente, la exposición a la humedad tiene un impacto negativo en la propiedad de esfuerzo. La desviación estándar es más baja (1.842 MPa) en comparación con QSA, podría ser el resultado de una estabilización de la humedad en el comportamiento del material o un control de calidad más consistente en estas condiciones.
- c) Como se observa en la Figura 125 para QH (Completamente húmeda) se tiene que la resistencia media de la cuerda en condición completamente húmeda es 10.756 MPa. Es la de mayor resistencia media de las tres condiciones en que se experimentó con la *Q'eswa*. Aunque esto pueda parecer contradictorio, puede ser el resultado de procesos a nivel molecular como el hinchamiento de las fibras que ocurren cuando la cuerda está saturada con agua. Sin embargo,



la alta desviación estándar (3.255 MPa) indica que la humedad total causa la mayor variabilidad en la resistencia entre las cuerdas *Q'eswa*.

- d) Como se observa en la tabla 32 se puede interpretar basado en el análisis estadístico (ANOVA) que las condiciones de humedad no afectan sustancialmente el esfuerzo máximo que las cuerdas del tipo *Q'eswa* pueden soportar.
- e) Como se observa en la Figura 125 respecto a MA y DA la media de esfuerzo máximo es mayor en las cuerdas MA que en las DA, lo que indica que, en promedio, las cuerdas MA soportaron una carga mayor antes de fallar, además, ambas desviaciones estándar son relativamente bajas, lo que sugiere que las mediciones son consistentes.

### **7.2.2. Interpretación de los resultados respecto al esfuerzo máximo en *N/tex***

- f) Como se observa en la Figura 126 para QSA (seca a temperatura ambiente) presenta una media de esfuerzo máximo de 0.045 N/tex y la desviación estándar más alta entre las cuerdas *Q'eswas* (0.012), lo que indica una mayor variabilidad en la resistencia de estas cuerdas.
- g) Como se observa en la Figura 126 para QPH (parcialmente húmeda) tiene una media de esfuerzo máximo considerablemente menor (0.024 N/tex) comparada con la QSA, y una desviación estándar más baja (0.004), lo que implica una menor variabilidad y, aparentemente, una resistencia inferior en esta condición de humedad.
- h) Como se observa en la Figura 126 para QH (completamente húmeda) exhibe la menor media de esfuerzo máximo (0.015 N/tex) y una desviación estándar (0.004) similar a la QPH, lo que sugiere una aparente disminución de la resistencia, aún más cuando la cuerda está completamente húmeda y mantiene una variabilidad similar a la cuerda parcialmente húmeda.
- i) Como se observa en la tabla 37 las diferencias entre cada par de condiciones de humedad son estadísticamente significativas, lo que implica que la humedad afecta considerablemente la resistencia de estas cuerdas del tipo *Q'eswa*, sin embargo, estas diferencias de resistencia se pueden explicar en la densidad lineal de las *Q'eswas* en sus diferentes condiciones de humedad, pues el agua incrementa la masa por unidad de longitud, pero no necesariamente el área resistente.
- j) Como se observa en la Figura 126 respecto a MA y DA, las cuerdas *Maqui* son en promedio menos resistentes que las cuerdas *Duro*, aunque ambas tienen una baja variabilidad en sus



medidas. Al igual que en las *Q'eswas*, la interpretación de la diferencia de los esfuerzos máximos se puede dar en la densidad lineal de estas cuerdas.

### 7.2.3. Interpretación de los Resultados Respecto a la Deformación de Cuerda en %

- k) Como se observa en la Figura 127 para QSA (seca a temperatura ambiente) se tiene una media de deformación de cuerda de 3.849% con una desviación estándar de 1.026. Esto sugiere que, bajo condiciones normales y secas, las cuerdas QSA tienen una deformación moderada y la variabilidad de esta deformación entre diferentes muestras es relativamente baja, lo que indica una consistencia en la respuesta de estas cuerdas al ser estiradas.
- l) Como se observa en la Figura 127 para QPH (parcialmente húmeda) presenta una media de deformación mayor que la QSA, con un valor de 4.949%, y una desviación estándar de 0.729, que es menor que la de QSA. Esto indica que, al humedecerse parcialmente, las cuerdas *Q'eswa* se deforman más que en seco, pero la consistencia entre las muestras es mayor (menor desviación estándar) en comparación con la QSA.
- m) Como se observa en la Figura 127 para QH (completamente húmeda) muestra la mayor media de deformación, con 5.018%, y la mayor desviación estándar de 1.467. Esto significa que la humedad total aumenta aún más la deformación de las cuerdas y que existe una mayor variabilidad en la respuesta de estas cuerdas cuando están completamente húmedas.
- n) De la tabla 42 nos muestra que hay una variabilidad significativa en la deformación de las cuerdas cuando se comparan las *Q'eswas* QSA con QPH y QH con QSA teniendo una menor deformación. Sin embargo, no hay una diferencia significativa en la deformación entre las cuerdas QPH y QH, lo que indica que el nivel de humedad entre parcial y completo no afecta de manera significativa la deformación de la cuerda.
- o) Como se observa en la Figura 127 respecto a MA y DA al tener mayores medias de deformación de cuerda que las cuerdas *Q'eswa*, parecen ser menos resistentes a la carga antes de deformarse. La alta desviación estándar en las cuerdas *Duro* en particular sugiere que la consistencia de estas cuerdas bajo carga es la más baja, lo que podría ser un factor importante a considerar para aplicaciones donde se requiere una respuesta predecible bajo tensión.
- p) Como se observa en la Figura 127 la cuerda MA tiene mayor Deformación de cuerda respecto a la cuerda DA esto puede ser debido a que la cuerda MA es una cuerda torcida compuesta por



dos torones, este tipo de estructura permite una mayor flexibilidad y capacidad de estiramiento antes de la rotura. Cuando se aplica una carga de tracción, los torones individuales pueden desenrollarse ligeramente, permitiendo que la cuerda se alargue más en su zona elástica. Por otro lado, la cuerda Duro es una cuerda trenzada compuesta por tres torones entrelazados, aunque las cuerdas trenzadas tienden a ser más fuertes y resistentes a la tracción, su estructura puede ser menos flexible en comparación con las cuerdas torcidas. Los torones entrelazados están más restringidos en su movimiento individual, lo que puede limitar la capacidad de la cuerda para estirarse y deformarse en su zona elástica.

#### ***7.2.4. Interpretación de los Resultados Respecto a la Deformación Unitaria Máxima en %***

- q) Como se observa en la Figura 128 para QSA (seca a temperatura ambiente) tiene una media de deformación unitaria máxima del 8.541%, lo que indica que bajo condiciones secas y a temperatura ambiente, la cuerda se deforma en menor medida bajo carga máxima en comparación con las cuerdas en condiciones húmedas. La desviación estándar es de 1.268%, que muestra una variabilidad moderada en los datos.
- r) Como se observa en la Figura 128 para QPH (parcialmente húmeda) presenta una media de deformación unitaria máxima significativamente más alta de 10.554% en comparación con la QSA, lo que sugiere que la presencia de humedad afecta la capacidad de la cuerda para resistir la deformación bajo carga. La desviación estándar es de 0.897%, indicando una menor variabilidad en la respuesta de la cuerda bajo estas condiciones.
- s) Como se observa en la Figura 128 para QH (completamente húmeda) tiene una media de deformación unitaria casi idéntica a la QPH con un valor de 10.551%, lo que sugiere que no hay una diferencia significativa en la deformación máxima entre cuerdas parcialmente y completamente húmedas. Sin embargo, su desviación estándar es mayor (2.065%), lo que indica una variabilidad más alta en la deformación de estas cuerdas cuando están completamente húmedas.
- t) De la tabla 47 nos muestra la variabilidad en términos de deformación unitaria máxima de la cuerda es significativamente diferente cuando se compara la cuerda QSA con las cuerdas QPH y QH, pero no hay una diferencia significativa entre las cuerdas QPH y QH, lo que sugiere que el nivel de humedad no altera significativamente la deformación unitaria máxima de la cuerda en este caso.





u) Como se observa en la Figura 128 respecto a MA y DA ambas cuerdas muestran una capacidad de deformación mucho mayor que las cuerdas  $Q'eswa$  en cualquier estado de humedad.

#### ***7.2.5. Interpretación de los Resultados Respecto al Módulo de elasticidad en MPa***

v) Como se observa en la Figura 129 para QSA (seca a temperatura ambiente) tiene el módulo de elasticidad más alto (132.160 MPa) con un error estándar de 0.730. Esto significa que de las tres cuerdas examinadas bajo las diferentes condiciones (QSA, QPH y QH), la cuerda QSA es la más rígida y resiste más la deformación.

w) Como se observa en la Figura 129 para QPH (parcialmente húmeda) presenta un módulo de elasticidad de 97.066 MPa con un error estándar de 0.693, lo que indica que es menos rígida que la QSA y, por ende, tiende a deformarse más bajo carga.

x) Como se observa en la Figura 129 para QH (completamente húmeda) tiene un módulo de 112.185 MPa, que es mayor que el de QPH, pero menor que el de QSA, y un error estándar de 0.483, el más bajo entre las tres, indicando una estimación más precisa de su módulo de elasticidad. Esto coloca a la QH en una posición intermedia en términos de rigidez.

y) Al comparar MA y DA según la Figura 129, ambas cuerdas son mucho menos rígidas que las cuerdas QSA, QPH y QH, lo que podría ser indicativo de diferencias en los materiales o en la técnica de fabricación. Además, las mediciones de MA y DA son más consistentes, como lo sugiere su menor error estándar.

#### ***7.2.6. Interpretación de los Resultados Respecto al Módulo de elasticidad en N/tex***

z) Como se observa en la Figura 130 para QSA (seca a temperatura ambiente) con un módulo de elasticidad de 0.007 N/tex y un error estándar de 3.30E-05, es la cuerda con el módulo de elasticidad más alto, lo que indica que es más rígida en comparación con las otras cuerdas.

aa) Como se observa en la Figura 130 para QPH (parcialmente húmeda) tiene un módulo de elasticidad significativamente menor de 0.002 N/tex y un error estándar de 1.69E-05. Esto sugiere que es menos rígida que la QSA.

bb) Como se observa en la Figura 130 para QH (completamente húmeda) presenta el menor módulo de elasticidad de las tres con 0.002 N/tex y el error estándar más bajo (6.90E-06), lo que indica la mayor precisión entre las medidas de las tres cuerdas y, además, la menor rigidez.



cc) Al comparar MA y DA según la Figura 130, son menos rígidas que las cuerdas del tipo *Q'eswa*, con DA mostrando una ligera ventaja sobre MA en términos de rigidez.

### **7.2.7. Interpretación de los Resultados Respecto al tipo de rotura de las cuerdas**

dd) Las cuerdas del tipo *Q'eswa* en sus diferentes condiciones mostraron tanto roturas frágiles como dúctiles. En las roturas frágiles, ambos torones se rompieron simultáneamente, lo que indica una distribución uniforme de esfuerzos y una respuesta similar de los torones ante la carga aplicada. En las roturas dúctiles, un torón se rompió primero, lo que sugiere una distribución desigual de esfuerzos o una variabilidad en la resistencia de los torones.

ee) Para las cuerdas del tipo Maqui y Duro experimentaron roturas dúctiles con la aparición de "picos" de esfuerzo máximo por cada torón que se rompió. Esto sugiere una distribución desigual de esfuerzos a lo largo de la cuerda, con ciertas áreas experimentando una carga más alta que otras, lo que resulta en la rotura secuencial de los torones.

ff) Las roturas dúctiles por distribución desigual de esfuerzos se presumen que es debido a la variabilidad inherente con la que son fabricadas las *Q'eswa* que a su vez también es la cuerda base que forman los torones de la cuerda Maqui y Duro. Puesto que las *Q'eswas* están elaborados por manojos de *Ichu* empalmados por la torsión de estos. A su vez también es posible que la fricción entre los torones de las cuerdas pueda entenderse como un fenómeno de disipación de energía lo que conllevaría a la rotura prematura de uno de los torones considerando que estas rotan en su eje al momento de tensionarlas con lo cual se genera la fricción.

### **7.3. Comentario de la Demostración de la Hipótesis**

La hipótesis general presente de la investigación ha sido demostrada parcialmente, puesto que las *Q'eswas* según sus curvas esfuerzo-deformación para sus diferentes condiciones de humedad se visualizaron curvas que presentaron solo el fenómeno de endurecimiento debido a una falla frágil por rotura de ambos torones al mismo tiempo.

Respecto a la cuerda *Maqui* se visualiza en sus curvas esfuerzo-deformación que además de sufrir el endurecimiento y ablandamiento inicial respecto a la rotura del primer torón, se pudo visualizar un segundo fenómeno de endurecimiento hasta su rotura final.



Respecto a la cuerda *Duro* se visualiza en sus curvas esfuerzo-deformación que además de sufrir el endurecimiento y ablandamiento inicial respecto a la rotura del primer torón, se pudo visualizar un segundo fenómeno de endurecimiento y ablandamiento correspondiente a su segundo torón. Debido a que el *Duro* está compuesto por 3 torones se visualizó un tercer endurecimiento hasta su rotura final.

#### 7.4. Aporte de la Investigación

La presente investigación estableció un antecedente para el procedimiento de ensayos a tracción para cuerdas de fibras naturales como la *Q'oya*.

Se pudo conocer mediante la visualización e interpretación de las gráficas de las curvas esfuerzo-deformación los fenómenos que se presentan en las cuerdas cuando son sometidas a ensayos de tracción.

Se establecieron los tiempos en los que las cuerdas de *Q'oya* se cargan y descargan de humedad mediante sumersión en agua y secado en horno.

Se dio a conocer como los contenidos de humedad influyen de las propiedades mecánicas de esfuerzo, deformación y módulo de elasticidad.

Las cuerdas *Q'eswa*, al ser una escala menor en comparación con las cuerdas *Maqui* y *Duro*, proporcionan información detallada sobre las propiedades mecánicas a una escala más manejable. Esto permite realizar pruebas más específicas y detalladas que pueden ser extrapoladas a las cuerdas de mayor tamaño. Por lo tanto, los resultados de los ensayos de las cuerdas *Q'eswa* debieran proporcionar una base sólida para comprender cómo estas cuerdas contribuyen a la resistencia y estabilidad de las cuerdas *Maqui* y *Duro*, sin embargo, los resultados no muestran una proporcionalidad lineal entre las *Q'eswas* y los *Maquis* y *Duros*, esta no proporcionalidad también se ve reflejada en información que brinda la normativa ISO 1181, en la que la resistencia cuerdas de sisal y manila no refleja proporcionalidad lineal entre el incremento de diámetro de estas cuerdas. Esto sugiere que otros factores, además del diámetro, pueden influir significativamente en las propiedades mecánicas de las cuerdas, como la calidad de las fibras, la distribución de las cargas internas o la estructura de torsión. Este aporte subraya la necesidad de un análisis detallado y específico de las cuerdas en lugar de depender únicamente de relaciones lineales simplificadas, lo que puede conducir a una comprensión más precisa de su comportamiento y aplicaciones potenciales.



## Conclusiones

La hipótesis general de la presente investigación ha sido confirmada parcialmente respecto al tipo de cuerda, según las figuras en el ítem 3.5.2.6 *Curvas obtenidas de los ensayos a tracción*, donde se demuestra que todas las curvas para los distintos tipos de cuerdas en sus respectivas condiciones de humedad sufren un endurecimiento en su primer segmento hasta alcanzar el esfuerzo máximo y posteriormente sufren ablandamiento donde el esfuerzo disminuye, pero la deformación unitaria sigue aumentando. Para algunos casos de las cuerdas *Q'eswa* solo se presenta el endurecimiento debido a que sufren una falla frágil donde ambos torones se fracturan al mismo tiempo sin embargo en las cuerdas *Maqui* y *Duro* después de sufrir el ablandamiento tienden a sufrir nuevamente un endurecimiento hasta alcanzar el siguiente punto límite respecto a su esfuerzo.

Respecto a las hipótesis específicas se tiene:

**Primero:** Respecto a la hipótesis específica N°01 referente al módulo de elasticidad, se tiene la Figura 129 donde nos indica los valores del módulo de elasticidad en MPa para los diferentes tipos de cuerda. Para verificar la hipótesis, cada tipo de cuerda debería tener un módulo de elasticidad superior a 44.71 MPa en todas las condiciones. Según los datos suministrados en dicha figura, las cuerdas QSA, QPH y QH muestran valores significativamente superiores al umbral de 44.71 MPa, por lo que esta hipótesis específica se sostiene según los datos proporcionados sin embargo para las cuerdas MA y DA no se confirma la hipótesis.

**Segundo:** Respecto a la hipótesis específica N°02 referente al esfuerzo máximo se tiene la Figura 125 donde nos indica los valores del módulo de elasticidad en MPa para los diferentes tipos de cuerda. Se deberá verificar que los valores sean mayores 8.59MPa en todas las condiciones. Según los datos suministrados en dicha figura, las cuerdas QSA, QPH y QH muestran valores superiores al umbral de 8.59 MPa, por lo que esta hipótesis específica se sostiene según los datos proporcionados sin embargo para las cuerdas MA y DA no se confirma la hipótesis.

**Tercero:** Respecto a la hipótesis específica N°03 referente a la deformación unitaria máxima la Figura 128 proporciona información sobre la deformación unitaria máxima. Según los valores proporcionados, solo las cuerdas MA y DA superan significativamente el umbral



del 14.71%, por lo cual cumplen con esta hipótesis específica. Sin embargo, todas las cuerdas *Q'eswa* quedan por debajo y no cumple con la hipótesis.

**Cuarto:** Respecto a la hipótesis específica N°01 referente a la deformación de cuerda la Figura 127 proporciona datos sobre la deformación de cuerda en porcentaje. Los datos indican que todas las cuerdas MA y DA tienen una deformación significativamente superior al 5%, por lo que se cumple esta hipótesis específica, la cuerda QH está al límite de cumplir esta hipótesis con apenas un 0.018% superior al 5% de deformación de cuerda. Las cuerdas QSA y QPH quedan por debajo y no cumple con la hipótesis.



## Sugerencias

**Primero:** Se sugiere a futuras investigaciones realizar el estudio de la zona elástica de la curva esfuerzo-deformación de las cuerdas del puente *Q'eswachaka* mediante el proceso de estabilización de cuerda. La estabilización es un método de carga y descarga de la tensión de referencia a la cuerda mediante el cual se elimina el alargamiento permanente y que a partir de la cual se pueden obtener mejores aproximaciones de valores de módulo de elasticidad tangente o secante.

**Segundo:** Se sugiere que investigaciones posteriores, realicen los ensayos para las cuerdas *Maqui* y *Duro* a diferentes escalas y con mayores longitudes de cuerda libre que las empleadas en la presente investigación.

Los diagramas de puntos son una herramienta estadística que sirve para tener mejor perspectiva entre la relación de dos parámetros; por lo cual, realizar ensayos con escalas y longitudes libres diversas permitiría conocer las condiciones óptimas de ensayo y fabricación de las cuerdas a base de *festuca dolichopylla*.

**Tercero:** Se sugiere determinar el área neta de las cuerdas por métodos refinados (como encontrar el factor de empaquetamiento para cuerdas de *festuca dolichopylla*) para no asumir el área de la cuerda como un círculo perfecto.

Las unidades clásicas del esfuerzo (Mpa) requieren definir un área de la sección transversal, sin embargo, las cuerdas de fibras tienen espacios vacíos que no son parte resistente de la cuerda, por lo que es necesario conocer el área neta resistente.

**Cuarto:** Se recomienda ampliar la investigación de cuerdas de fibra de *Q'oya* hibridizadas con fibras sintéticas.

En el mundo, existen muchas muestras de cuerdas de fibras naturales hibridizadas con fibras sintéticas, debido a las ventajas que conlleva la combinación entre ambos materiales.

**Quinto:** Mejorar gradualmente la Máquina a tracción. Para realizar ensayos con velocidades de desplazamiento constante y tener mecanismos automatizados que midan la deformación en la longitud libre de la cuerda.



**Sexto:** En futuras investigaciones, considerar los fenómenos de degradación del material a efectos ambientales en el tiempo.

Las cuerdas de fibra natural son susceptibles a la degradación biológica, por la exposición a diferentes condiciones ambientales, la

**Séptimo:** Realizar investigación respecto a la resistencia a la abrasión para evaluar la resistencia al desgaste de las cuerdas cuando se friccionan a sus anclajes de piedra.

Durante la vida útil de una cuerda, se requiere realizar anclajes, nudos, amarres, etc. para distintas labores; esto supone a la cuerda estar sujeto al desgaste por abrasión; en el caso del puente *Q'eswachaka*, la estructura colgante se encuentra anclada a piedras a ambos extremos, durante su vida útil, se puede observar que se encuentra sometida a la abrasión, por lo que es de interés conocer la resistencia de sus cuerdas a la abrasión.

**Octavo:** Realizar el procesamiento de las curvas esfuerzo-deformación de las *Q'eswas* en las diferentes condiciones de humedad, en unidades N/tex-% tomando en consideración una misma densidad lineal que bajo condiciones ambientales normales (sin sumersión en agua). Debido a que, al acondicionar cuerdas por medio de sumersión en agua, el contenido de humedad aumenta el peso de las cuerdas, incrementando la densidad lineal, sin embargo, el contenido de humedad es una condición que varía y que no es inherente ni con valor constante en las cuerdas; tampoco es una condición que incrementa o disminuye la sección resistente de las cuerdas, por lo cual se sugiere que las unidades de la densidad lineal no se vean afectadas por el contenido de humedad.

**Noveno:** Se sugiere realizar investigaciones más profundas y especializadas del porque el módulo de elasticidad o módulo de cuerda tienen mucha variabilidad en sus valores respecto a las diferentes escalas debido a que se esperaría que tengan un valor de módulo de elasticidad cercanos en cuanto a sus valores.

**Décimo:** Se sugiere realizar una mayor cantidad de ensayos respecto a las cuerdas Maqui y Duro debido a la gran variabilidad que se encontró en la desviación estándar y error estándar para el promedio de las curvas individuales obtenidas de los ensayos realizados

**Undécimo:** Realizar el procesamiento de las curvas esfuerzo-deformación de las *Q'eswas* en las diferentes condiciones de humedad, en unidades N/tex-% tomando en consideración una misma densidad lineal que bajo condiciones ambientales normales (sin sumersión en agua). Debido a que esto explicaría la figura 129 respecto a la variación del módulo de elasticidad entre las *Q'eswas* parcialmente húmeda y completamente húmeda para la



unidad de MPa , ya que al utilizar la unidad de N/tex despreciamos los espacios vacíos entre las fibras y al acondicionar cuerdas por medio de sumersión en agua, el contenido de humedad aumenta el peso de las cuerdas, incrementando la densidad lineal, sin embargo, el contenido de humedad es una condición que varía y que no es inherente ni con valor constante en las cuerdas; tampoco es una condición que incrementa o disminuye la sección resistente de las cuerdas, por lo cual se sugiere que las unidades de la densidad lineal no se vean afectadas por el contenido de humedad.





## Referencias

American Society for Testing and Materials. (1993). *Standard Test Methods for Testing Fiber Ropes* (ASTM D4268).

American Society for Testing and Materials. (2003). *Standard Terminology Relating to Textiles* (ASTM D 123).

American Society for Testing and Materials. (2003). *Standard Test Methods for Breaking Force and Elongation of Textile Fabrics (Strip Method)* (ASTM D5035).

American Society for Testing and Materials. (2004). *Standard Test Method for Moisture Absorption Properties and Equilibrium Conditioning of Polymer Matrix Composite Materials* (ASTM D5229).

American Society for Testing and Materials. (2008). *Standard Test Method for Tensile Properties of Yarns by the Single-Strand Method* (ASTM D2256).

American Society for Testing and Materials. (2010). *Standard Test Method for Young's Modulus, Tangent Modulus, and Chord Modulus* (ASTM E111).

American Society for Testing and Materials. (2011). *Standard Specification for Tensile Testing Machines for Textiles* (ASTM D76).

American Society for Testing and Materials. (2013). *Standard Practice of Calibration of Force-Measuring Instruments for Verifying the Force Indication of Testing Machines* (ASTM E74-13a).

American Society for Testing and Materials. (2014). *Standard Test Methods for Tire Cords, Tire Cords Fabrics, and Industrial Filament Yarns made from Manufactured Organic-Base Fibers* (ASTM D885).

American Society for Testing and Materials. (2018). *Standard Terminology Related to Force, Deformation and Related Properties of Textiles* (ASTM D4848).

American Society for Testing and Materials. (2020). *Standard Test Method for Tensile Strength and Young's Modulus of Fibers* (ASTM C1557).



Arróspide, A. (2016). *La reinención cultural como factor de desarrollo sostenible. Caso: puente Inca de Q'eswachaka*. [Tesis de maestría, Universidad Nacional Mayor de San Marcos]. <http://repositorio.unsch.edu.pe/handle/UNSCH/3099>

Bauer, B. (1989). *Suspension Bridges of the Inca Empire*. Recuperado de [https://www.academia.edu/en/6953894/Suspension\\_Bridges\\_of\\_the\\_Inca\\_Empire](https://www.academia.edu/en/6953894/Suspension_Bridges_of_the_Inca_Empire)

Candiotti, S., Mantari, J. L., Flores, C. E., & Charca, S. (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(105950), 105950. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2020.105950>

Chang G. y Pérez D. (2015). *Guías de laboratorio de resistencia de materiales*. Santa Marta: Editorial de la Universidad del Magdalena.

Cordage Institute (2006). *Test Methods for Fiber Rope* (CI 1500)

Cordage Institute (2013). *Terminology for Fiber Rope* (CI 1202)

Cordage Institute (1998). *Standard: Nylon (Polyamide) Fiber Rope, 3-Strand Laid and 8-Strand Plaited Constructions* (CI 1303)

Denton, M. J., & Daniels, P. N. (2002). *Textile Terms and Definitions*. Textile Institute.

Devore, J. L. (2011). *Probabilidad y Estadística para Ingeniería y Ciencias* (8a ed.). Cengage Learning Editores S.A. de C.V.

Escurra, L. M. (1998). Siegel, S. & Castellan, N. J. (1995). *Estadística no paramétrica, aplicada a las ciencias de la conducta*. 4a. edición. México: Editorial Trillas. Persona, 0(001), 195. <https://doi.org/10.26439/persona1998.n001.1715>

Felippa C. (2001). *Nonlinear Finite Element Methods*. Colorado: Department of Aerospace Engineering Sciences and Center for Space Structures and Controls University of Colorado.

Fitzgerald R. (1996). *Mechanics of Materials*. Massachusetts: Addison-Wesley Publishing Company Inc.

Gonzáles, F. (2008). *Análisis de tensión (según norma Icontec 595) para el material compuesto resina poliéster-cuerda de cáñamo*. Vol. 5, Núm. 1 (2008): Revista Tekhnê, p. 3-12.



Grubbs, F. E. (1969). *Procedures for detecting outlying observations in samples*. *Technometrics: A Journal of Statistics for the Physical, Chemical, and Engineering Sciences*, 11(1), 1–21. <https://doi.org/10.1080/00401706.1969.10490657>

Gupta, V. B., & Kothari, V. K. (1997). *Manufactured Fibre Technology* (V. B. Gupta & V. K. Kothari, Eds.; 1997a ed.). Chapman and Hall.

Hearle McKenna, H. A. (2004). *Handbook of fibre Rope technology*. Woodhead Publishing

Hernández, R., Fernández, C. y Baptista, M. (2010). *Metodología de la investigación*. Mc Graw Hill

Herrmann, D. (2020). *Methods for determining the modulus of elasticity of wire and fibre Ropes*. *innoTRAC Journal*, 1, 47–54. <https://doi.org/10.14464/innotrac.v1i0.463>

Hwang, Jeong-Il, Lee, Hee-Joon, Lee, Kyoung-Hoon, Kim, Kyoung-Woo. (2014). *A Development on the Eye splice's Safety Standards of Synthetic Fibre Ropes for Towing Vessel*. Journal of Korea Ship Safety Technology Authority

International Organization for Standardization (2010). *Fibre ropes and cordage Vocabulary* (ISO 1968).

International Organization for Standardization (2004). *Fibre Ropes – Determination of Certain Physical and Mechanical Properties* (ISO 2307).

Iza, G. (2017). *Caracterización mecánica del material compuesto de matriz epoxi reforzada con fibra vegetal(algodón) y fibra natural de stipa Ichu (pasto de páramo) con secado natural y precocido para determinar propiedades mecánicas en la fabricación de elementos livianos de alta resistencia*. Ambato: Universidad Técnica de Ambato.

Karahan, M., & Karahan, N. (2015). *Investigation of the tensile Properties of natural and natural/synthetic hybrid fiber woven fabric composites*. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 34(10), 795–806. <https://doi.org/10.1177/0731684415581071>

Khalid, F., Davies, P., Halswell, P., Lacotte, N., Thies, P. R., & Johanning, L. (2020). *Evaluating mooring line test procedures through the application of a round robin test approach*. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(6), 436. <https://doi.org/10.3390/jmse8060436>



Li, B., Zheng, W., & Zhang, Y. (2023). *Study on the compressive stress–strain curve and performance of low-slump polypropylene fiber concrete after high temperature*. *Applied Sciences* (Basel, Switzerland), 13(12), 7222. <https://doi.org/10.3390/app13127222>

Li, C., Zhang, R., Jia, J., Wang, G., & Shi, Y. (2019). *The low-velocity impact and post-impact Properties of ultra-high-molecular-weight polyethylene fiber weft plain knitted structural composites*. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, 14, 155892501983252. <https://doi.org/10.1177/1558925019832524>

Mediavilla, V., Bassetti, P., Leupin, M. y Mosimann, E. (1999). *Agronomische Eigenschaften von Hanfsorten*. (vol. 393, no. 6). *Agarforschung*.

Méndizábal P., Hernández M. y Huamaní I. (2015). *El Q'eswachaka de Canas: Ingeniería y tradición en las comunidades de Quehue*. Recuperado de <https://www.gob.pe/institucion/cultura/informes-publicaciones/1384-el-q-eswachaka-de-canas-ingenieria-y-tradicion-en-las-comunidades-de-Quehue>

Montgomery, D. (2002) *Probabilidad y estadística aplicadas a la ingeniería*. Limusa Wiley

Dagnino, J. (2014). *Análisis De Varianza*. *Rev Chil Anest*, 306-310

Montgomery, D. C., Peck, E. A., & Vining, G. G. (2012). *Introduction to Linear Regression Analysis* (5a ed.). Wiley-Blackwell.

Mori, S., Tenazona, C., Candiotti, S., Flores, E. y Charca, S. (2018). *Assessment of Ichu Fibers Extraction and Their Use as Reinforcement in Composite Materials*. Recuperado de <https://doi.org/10.1080/15440478.2018.1527271>

NAVAL SEA SYSTEMS COMMAND. (1999). *WIRE AND FIBER ROPE AND RIGGING*. <https://man.fas.org/dod-101/sys/ship/nstm/ch613.pdf>

Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura. (s.f). *Conocimientos, técnicas y rituales vinculados a la renovación anual del puente Q'eswachaka*. Recuperado de <https://ich.unesco.org/es/RL/conocimientos-tecnicas-y-rituales-vinculados-a-la-renovacion-anual-del-puente-qeswachaka-00594>



OriginLab (2021) *Origin Pro: Data analysis and graphing software*. (Versión 2021 v9.8.0.200) [Software de computadora]. Recuperado el 29 de octubre de 2023, de <https://www.OriginLab.com/origin>

Palomo, E. (2020). *Análisis de comportamiento estructural de puentes de hamaca precolombinos: el caso del puente Q'eswachaka (Perú)*. Oviedo: Escuela Politécnica de Mieres de la Universidad de Oviedo.

Pytel A. y Singer F. (1987) *Strength of materials*. New York: Harpercollins College Div

Regal, A. (1972). *Los puentes del Inca en el antiguo Perú*. Lima: s.n

Shengwen T., Xiaobo R., Jianying H. y Zhiliang Z. (2019). *Stress strain curves of metallic materials and post-neckinh strain hardening characterization: A review*. Trondheim: Department of Structural Engineering, Norwegian University of Science and Technology.

Sry, V., Mizutani, Y., Endo, G., Suzuki, Y., & Todoroki, A. (2018). *Estimation of the longitudinal elasticity modulus of braided synthetic fiber Rope utilizing classical laminate theory with the unit N/tex*. *Applied sciences (Basel, Switzerland)*, 8(7), 1096.  
<https://doi.org/10.3390/app8071096>

Vilca, F. (2018). *Caracterización morfológica de cinco especies nativas altoandinas para la producción de semillas en Ayacucho y Huancavelica*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de San Cristobal de Huamanga]. <http://repositorio.unsch.edu.pe/handle/UNSCH/3099>

Walpole, R. E., Myers, R. H., Myers, S. L., & Ye, K. (2013). *Essentials of probability & statistics for engineers & scientists*. Pearson new international edition. Pearson Education.

Zamora, M. C. (2003). *Estadística descriptiva e inferencial aplicaciones*. Moshera s.r.l.



## Apéndices

### Matriz de consistencia

“EVALUACIÓN DE LA CURVA ESFUERZO-DEFORMACIÓN MEDIANTE ENSAYOS A TRACCIÓN DEL TIPO DE CUERDAS PRINCIPALES DEL PUENTE Q'ESWACHAKA EN CONDICIONES HÚMEDA Y SECA”

<b>Problemas</b>	<b>Objetivos</b>	<b>Hipótesis</b>
<b>Problema General</b>	<b>Objetivo General</b>	<b>Hipótesis General</b>
¿Cómo es la curva esfuerzo-deformación del tipo de cuerdas principales en condiciones húmeda y seca del puente <i>Q'eswachaka</i> ensayadas a tracción?	Evaluar la curva esfuerzo-deformación mediante ensayos a tracción del tipo de cuerdas principales del puente <i>Q'eswachaka</i> en condiciones húmeda y seca.	La curva esfuerzo-deformación del tipo de cuerdas principales del puente <i>Q'eswachaka</i> es una curva que presenta los fenómenos de endurecimiento en una primera fase y ablandamiento en una fase posterior, tanto para la condición húmeda y seca.
<b>Problemas Específicos</b>	<b>Objetivos Específicos</b>	<b>Hipótesis Especifica</b>
¿Cuál es la magnitud del módulo de elasticidad en condiciones húmeda y seca del tipo de cuerdas principales del puente <i>Q'eswachaka</i> ensayadas a tracción?	Determinar la magnitud del módulo de elasticidad mediante ensayos a tracción del tipo de cuerdas principales del puente <i>Q'eswachaka</i> en condiciones húmeda y seca.	El módulo de elasticidad del tipo de cuerdas principales del puente <i>Q'eswachaka</i> será superior a 44.71Mpa tanto para la condición húmeda y condición seca (Ver Anexo I).
¿Cuál es la magnitud del esfuerzo máximo en condiciones húmeda y seca del tipo de cuerdas principales del puente <i>Q'eswachaka</i> ensayadas a tracción?	Determinar la magnitud del esfuerzo máximo mediante ensayos a tracción del tipo de cuerdas principales del puente <i>Q'eswachaka</i> en condiciones húmeda y seca.	El esfuerzo máximo del tipo de cuerdas principales del puente <i>Q'eswachaka</i> es mayor a 8.59Mpa tanto para la condición húmeda y condición seca (Ver Anexo I).
¿Cuál es la magnitud de la deformación unitaria máxima en condiciones húmeda y seca de las cuerdas principales del	Determinar la magnitud de la deformación unitaria máxima mediante ensayos a tracción del tipo de cuerdas principales	La deformación unitaria máxima del tipo de cuerdas principales del puente <i>Q'eswachaka</i> será superior al 14.71%



---

puente <i>Q'eswachaka</i> ensayadas a tracción?	del puente <i>Q'eswachaka</i> en condiciones húmeda y seca.	tanto para la condición húmeda y condición seca (Ver Anexo I).
¿Cuál es la magnitud de la deformación de cuerda en condiciones húmeda y seca del tipo de cuerdas principales del puente <i>Q'eswachaka</i> ensayadas a tracción?	Determinar la magnitud de la deformación de cuerda mediante ensayos a tracción del tipo de cuerdas principales del puente <i>Q'eswachaka</i> en condiciones húmeda y seca.	La deformación de cuerda del tipo de cuerdas principales del puente <i>Q'eswachaka</i> será superior a 5% (Ver Anexo I).

---