UNIVERSIDAD DE LA FRONTERA
FACULTDAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA EN OBRAS CIVILES

"Desarrollo de un estándar de inspección de deterioro estructural para puentes de madera en la Región de La Araucanía"

RICARDO IGNACIO REDEL ROJAS

2019

UNIVERSIDAD DE LA FRONTERA
FACULTDAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA EN OBRAS CIVILES

"Desarrollo de un estándar de inspección de deterioro estructural para puentes de madera en la Región de La Araucanía"

TRABAJO PARA OPTAR AL TÍTULO
DE INGENIERO CIVIL

Profesor Guía: Ing. Elisa Gallardo Arriagada.

RICARDO IGNACIO REDEL ROJAS

2019

DESARROLLO DE UN ESTÁNDAR DE INSPECCIÓN DE DETERIORO ESTRUCTURAL PARA PUENTES DE MADERA EN LA REGIÓN DE LA ARAUCANÍA

RICARDO IGNACIO REDEL ROJAS

COMISION EXAMINADORA

ELISA GALLARDO ARRIAGADA
Profesor guía

GUILLERMO JIMÉNEZ VON BISHOFFSHAUSEN
Académico Evaluador

JONATHAN JARA ALCARRAS
Académico Evaluador

Calificación trabajo escrito :

Calificación examen :

Calificación final :

Dedicatoria.

La dedicatoria de este trabajo de titulo la quiero hacer especialmente a mis padres y mi hermana, por darme todo el amor incondicional y el apoyo único, cada día y cada noche de estudio para enfrentar esta linda carrera en la Universidad. Su entusiasmo, energía y orgullo me empujaron a esforzarme cada vez más para salir adelante y me inculcaron valores primordiales para enfrentar la vida. Como dice mi padre: "la educación es lo único que le puedo dejar a mis hijos". Soy un privilegiado de tenerlos, me dieron todo lo necesario para estudiar y concentrarme en mis tareas, con el corazón este trabajo de título es para ustedes, LOS AMO.

Agradecimientos.

En primer lugar, quiero agradecer a mis padres, Reinaldo y Kathleen, y mi hermana, Cynthia, por todo lo entregado en estos años en la universidad, el apoyo ha sido absoluto y fundamental para enfrentar las distintas pruebas de la carrera. Los Amo.

En segundo lugar, a mis abuelitas porque son las que me regalonean, entregándome energía y confianza para mantenerme en el camino, preocupándose por mí y dándome algún engañito para mantener el ánimo arriba.

En tercer lugar, a toda mi familia más grande, me refiero a tíos, primos grandes y chicos, abuelos, porque la familia es una sola, hay que cuidarla y apoyarla siempre.

En cuarto lugar, a mis amigos de la universidad, porque formamos un lindo grupo de amistad, haciendo trabajos juntos, carreteando, paseando, pasando rabias y alegrías juntos. Fue fundamental como nos apoyamos entre todos para sacar adelante cada trabajo o prueba que nos dieron en la universidad, formando un lazo de amistad muy bonito que espero se mantenga en el tiempo.

A mi polola bonita, Macarena, vaya que ha sido un apoyo en la universidad, ella me ha entregado una cantidad de amor incondicional, siempre me ha empujado a superar mis límites y a creer en mí, ha sido una fuente de inspiración y crecimiento sumamente fuerte, mostrándome que se pueden hacer muchas más cosas de las que creía. Me entiende y me ha tenido una paciencia gigante que debo agradecer con el corazón. Te Amo.

A la profe Elisa, por darme herramientas fundamentales para conocer las estructuras, además, por acoger este proyecto y apoyarlo constantemente, enseñándome y guiando la investigación para tener buenos frutos.

Al personal del Área de Puentes de la Dirección de Vialidad, región de La Araucanía, por recibirme en la oficina, dándome las herramientas para trabajar, aprender, ganar experiencia y tener contacto con el mundo laboral, abriéndome los ojos más allá de la universidad. Siempre que pedí algo me lo facilitaron, siendo fundamental para sacar este trabajo adelante.

A la empresa Mardones BPB, en especial a Carlos, por gestionar gran parte de los recursos que solicitó esta investigación, brindando herramientas fundamentales, generando contactos que aportarían gran contenido al trabajo hecho.

Resumen

En la actualidad determinar el estado y condiciones estructurales de los puentes de madera es técnicamente incierto. Esto ha resultado en inspecciones poco certeras, con las consecuentes caídas de puentes en distintas zonas tanto de la región como del país. Actualmente no existe un instructivo para inspeccionar correctamente los puentes de madera y es ahí donde nace la necesidad de crear uno, apuntando a estandarizar todas las inspecciones que se realizan.

Para esto, se investiga el estado del arte tanto en Chile, como en el extranjero. En Chile se encuentran los tipos de deterioros que afectan la madera del país. En cambio, en Estados Unidos se encuentran las metodologías de inspección aplicadas a puentes de madera. Por lo tanto, mediante la presente investigación se busca definir un proceso de inspección aplicable a los puentes de la región.

El objetivo planteado es desarrollar un instructivo de inspección para puentes de madera en la Región de La Araucanía, que permita calificar su estado de deterioro estructural mediante procedimientos normalizados. Para esto, se propone estudiar distintos puentes en terreno y calibrar los instrumentos importados con la madera chilena.

Se importaron dos instrumentos (Medidor de onda de estrés y Resistógrafo), luego se utilizaron sobre madera sana clasificada visualmente. Así se logra conocer los parámetros de la madera en buenas condiciones. Posteriormente, se aplicaron los instrumentos sobre distintos puentes de estudio, separados por año de construcción y ubicación de estos. Toda la investigación contó con el apoyo del personal de Área de Puentes de la Dirección de Vialidad, Región de La Araucanía., aportando con su experiencia en inspección.

Como resultado del trabajo de la práctica controlada, se obtuvo el primer instructivo de inspección de puentes de madera que es capaz de definir las condiciones estructurales de un puente, esto incluye una rubrica de inspección visual estandarizada y un procedimiento técnico de inspección. Además, se logró calibrar y definir rangos de deterioro de la madera utilizando dos instrumentos especiales, Medidor de onda de estrés y Resistógrafo.

El instructivo se ha diseñado para puentes de la Región de La Araucanía, con la limitante que estos sean completamente de Roble (Nothofagus OBLIQUA), ya que los parámetros calibrados consideraron madera de Roble, especie usada en puentes. La investigación y desarrollo de parámetros de otras especies, como el Coigüe (Nothofagus DOMBEYI), queda abierta para que alguien los determine utilizando los mismos instrumentos en un trabajo futuro.

Índice de Contenidos

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN 1
1.1 Objetivos 3
1.1.1 Objetivo General 3
1.1.2 Objetivos Específicos 3
CAPÍTULO 2 ANTECEDENTES GENERALES 4
2.1 Marco general 4
2.2 Desintegración de la madera. 12
2.2.1 Agentes biológicos. 12
2.2.2 Agentes físicos. 15
2.3 Métodos de inspección física. 16
2.4 Métodos de inspección avanzada. 17
2.5 Herramientas 18
2.5.1 Herramientas básicas 18
2.5.2 Xilohigrómetro o un medidor del contenido de humedad para maderas. 19
2.5.3 Medidor de Onda de Estrés, Ultrasonido. 19
2.5.4 Resistógrafo. 21
CAPÍTULO 3 DESCRIPCIÓN DE ACTIVIDADES REALIZADAS. 24
3.1 Estudio de la bibliografía internacional. 24
3.2 Tareas designadas por el Área de Puentes de la Dirección de Vialidad. 26
3.3 Selección de Puentes de Estudio. 26
3.4 Conformación de instructivo de inspección en primera versión. 28
3.5 Ensayos en Laboratorio sobre madera en buenas condiciones. 29
3.5.1 Medidor de onda de estrés (ultrasonido). 29
3.5.2 Resistógrafo. 33
3.6 Capacitación y asistencia internacional. 34
3.7 Generar criterios para evaluar el deterioro. 34
3.8 Evaluación e inspección de puentes seleccionados. 35
3.9 Análisis de resultados 36
3.9.1 Escala de Medidor de Ultrasonido. 37
3.9.2 Escala para Resistógrafo. 38
3.10 Entrega del instructivo en el Área de Puentes. 40
CAPÍTULO 4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN. 41
4.1 Medidor de Onda de estrés en la muestra Patrón. 41
4.1.1 Módulo de Elasticidad. 41
4.1.2 Velocidad de propagación transversal (m/s). 43

4.2 Medidor de Onda de estrés en elementos principales de los puentes. 43
4.3 Escala para Elementos Principales Aceptables, Dañados y Críticos. 47
4.3.1 Escala Módulo de Elasticidad, Velocidad Transversal y Resistógrafo. 47
4.4 Tercera escala de verificación en sentido transversal con el Medidor de Onda de Estrés... 50
4.5 Resistógrafo en la muestra Patrón. 51
4.6 Segunda escala para el Resistógrafo. 53
4.7 Comparación de Resistógrafo y Medidor de Onda de Estrés. 55
4.8 Clasificación de los elementos de un puente y tipos de inspección. 57
4.8.1 Definición de 3 tipos de elementos en un puente. 57
4.9 Ficha de evaluación de las condiciones estructurales para puentes de madera. 65
4.9.1 Alcance 65
4.9.2 Inspección Primaria, F 1. 65
4.9.3 Inspección Rutinaria, Inspección Visual y Física, Ficha F 2. 67
4.9.4 Inspección en profundidad, Ficha F 3-A, F 3-B y F 3-C. 68
4.9.5 Anexo Ficha de Inspección, Clasificación y criterio visual de los elementos. 72
4.10 Ejemplo de ficha de inspección actual. 81
CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES. 83
5.1 Aporte de la práctica controlada. 83
5.2 Experiencia con el uso de instrumentos. 83
5.3 Análisis de los resultados de los ensayos. 85
5.4 Experiencia en las inspecciones realizadas. 85
5.5 Precauciones y recomendaciones en el uso del ultrasonido. 86
5.6 Precauciones y recomendaciones en el uso del Resistógrafo 86
Bibliografía 88
5.7 NOMENCLATURA 90
ANEXO A Deterioro encontrado en puentes. 91
ANEXO B Mediciones cada un metro en vigas de un puente (Cumbli) 93
ANEXO C Niveles de inspección. 94
C.1. Inspección Primaria. 94
C.2. Inspección Rutinaria. 95
C.3. Inspección en Profundidad. 97
C.4. Inspección Especial. 99
ANEXO D Anomalías de estructura. 101
D.1 Anomalías propias de la madera. 101
D.2 Anomalías causadas por hongos e insectos. 101

Índice de tablas.

Tabla 2.1 Vida útil de la madera según la clasificación de durabilidad natural. Fuente: CORMA 4
Tabla 2.2 Relación de la especie de árbol y la categoría de durabilidad. Fuente: CORMA 5
Tabla 3.1 Puentes seleccionados por zona geográfica y año de construcción o reparación según fichas de Vialidad. 27
Tabla 3.2 Piezas de madera ensayadas en Yumbel según la especie y la clasificación. 31
Tabla 3.3 Imágenes de la metodología de ensayo aplicado en Yumbel. 32
Tabla 4.1 Promedio de MOE estático en MPa según especie ensayada. 42
Tabla 4.2 Promedio de velocidad de propagación en la sección transversal. 43
Tabla 4.3 Comparación de puentes por año fecha y velocidad de propagación transversal (m/s). 44
Tabla 4.4 Comparación de puentes por año y ubicación vs el MOE (MPa). 44
Tabla 4.5 Elementos clasificados como mala calidad y sus propiedades. 48
Tabla 4.6 Elementos clasificados como Sospechosos y sus propiedades. 48
Tabla 4.7 Elementos considerados de Buena calidad y sus propiedades. 48
Tabla 4.8 Tabla resumen de los valores asociados a cada categoría. 49
Tabla 4.9 Mediciones de Ultrasonido aplicadas en una pieza con deterioro. 50
Tabla 4.10 Resultados de escala de Resistógrafo sobre Coigüe sano. 52
Tabla 4.11 Resultados de escala de Resistógrafo sobre Roble sano. 52
Tabla 4.12 Resultados de escala de Resistógrafo sobre madera de puentes. 54
Tabla 4.13 Comparación entre Ultrasonido y Resistógrafo. 56
Tabla 4.14 Clasificación de los elementos de un puente y nivel de inspección necesario. 58
Tabla 4.15 Elementos de un puente guiándose por las imágenes. 66
Tabla 4.16 Ficha F 2. Resumen de cantidad de elementos en las distintas clasificaciones. 67
Tabla 4.17 Ficha F 3-A Registro de mediciones realizadas con Medidor de Onda de Estrés 68
Tabla 4.18 Ficha F 3-B Registro de mediciones realizadas con el Resistógrafo. 68
Tabla 4.19 Ficha F 3-C. Resumen de Resultados obtenidos con el uso de instrumentos sobre distintos elementos sospechosos 69
Tabla 4.20 Ficha F 4. Cuadro resumen de la información levantada desde los elementos estructurales. 69
Tabla 4.21 Resumen del criterio para clasificar un conjunto de elementos. 70
Tabla.4.22 Descripción de elementos de seguridad y técnicas de evaluación. 72
Tabla 4.23 Rubrica e índices para una inspección visual de deterioro en elementos de seguridad. 74
Tabla 4.24 Descripción de elementos de serviciabilidad y técnicas de evaluación. 75
Tabla 4.25 Rubrica e índices para una inspección visual de deterioro en elementos de serviciabilidad. 76
Tabla 4.26 Descripción de elementos Estructurales y técnicas de evaluación 78
Tabla 4.27 Rubrica e índices para una inspección visual de deterioro en elementos Estructurales. 79
Tabla 4.28 Rubrica de clasificación de elementos estructurales. 80
Tabla 4.29 Actual ficha de inspección para el análisis de un puente, ejemplo extraído de la información de la oficina de trabajo. 81
Tabla B.1 Mediciones realizadas cada un metro en dos vigas de un mismo puente, mostrando la diferencia en sus resultados, sospecha de deterioro confirmada con el Resistógrafo. 93
Tabla C.1 Parámetros de clasificación para los elementos de un puente. 99

Índice de figuras.

Figura 2.1 Tabla 6 de NCh 1198-2014, obtención de clase estructural, madera verde. Fuente: INN, 2014. 5
Figura 2.2 Tabla 1 de NCh 992 Madera - Defectos a considerar en la clasificación, terminología y métodos de medición. 7
Figura 2.3 Diagrama de las partes de un puente. 9
Figura 2.4 Vista Lateral y Longitudinal de puentes de madera. Fuente: Manual de Carreteras. . 10
Figura 2.5 Lamina tipo corte transversal. Fuente: Manual de Carreteras. 11
Figura 2.6 Detalles de alas en estribo de un puente de madera. Fuente: Manual de Carreteras. . 11
Figura 2.7 Planta de elementos en el tablero de un puente. Fuente: Manual de Carreteras 12
Figura 2.8 Ejemplos de tipo de deterioro en la madera. Fuente: Advanced Timber Bridge Inspection. (Brashaw et al., 2014). 14
Figura 2.9 Ejemplos de deterioros por efectos ambientales. Fuente: Advanced Timber Bridge Inspection. (Brashaw et al., 2014). 15
Figura 2.10 Esquema del funcionamiento de Ultrasonido. Fuente: www.researchgate.net 20
Figura 2.11 Resultados y comparación de una prueba con un Resistógrafo. 22
Figura 2.12 Resistógrafo en uso. www.imldistribution.wordpress.com 23
Figura 3.1 Referencia de la ubicación de puentes sometidos a estudio. Fuente: Google Earth. .. 28
Figura 3.2 Esquema de medición de Ultrasonido en 45°. 31
Figura 3.3 Carta de Resistógrafo en escala 1:1. 33
Figura 3.4 Carta de Resultados del Resistógrafo correspondiente a madera de Coigüe de Rechazo. 38
Figura 3.5 Digitalización y obtención de puntos representativos de la función, aprox. 350 puntos. Madera de Coigüe de Rechazo. 39
Figura 4.1 Base de pila en evidentes condiciones de deterioro, Puente El Seco. 46
Figura 4.2 Deterioro encontrado en una pieza y medido para comparar. 50
Figura 4.3 Puntos que indican donde debiese medir transversalmente, idealmente cada 50 cm. 51
Figura 4.4 Primer Resistógrafo aplicado en la viga 4 de la salida del puente Donguil. 53
Figura 4.5 Segundo Resistógrafo aplicado en la viga 4 de la salida del puente Donguil. 53
Figura 4.6 Resistógrafo 1 aplicado sobre la viga 1 de la salida del puente Donguil. 54
Figura 4.7 Carta de Resistografía de la Viga 1 de puente El Temo 1. 56
Figura 4.8 Carta de Resistografía obtenida de una pieza de primera calidad. 57
Figura 4.9 Diagrama de Flujo para proceder en una inspección de puentes. 60
Figura 4.10 Diagrama de flujo para explicar el proceso de Calificación de los elementos, complementado con **Figura 4.11**, **Figura 4.12** y **Figura 4.13**. 61
Figura 4.11 Diagrama de flujo para explicar la obtención del indicador 1 62
Figura 4.12 Diagrama de Flujo que explica el proceso de obtención del Indicador 2. 63
Figura 4.13 Diagrama de Flujo que explica el proceso para la obtención del Indicador 3. 64
Figura 4.14 Vista superior de un Puente y sus Elementos 66
Figura 4.15 Vista Inferior de Puente y sus Elementos. 66
Figura A.1 Vigas de los puentes El Temo 1 (A) y El Seco (B). 91
Figura A.2 Ejemplos de vigas que requieren cambio cuando se evalúa visualmente. 92
Figura D.1 Pudrición Cubica Café. 102
Figura D.2 Pudrición Cubica blanca. 102
Figura D.3 Daño de insectos en la madera. 103
Figura D.4 Distintos tipos de grietas, rajaduras, fisuras. 103

CAPÍTULO 1
INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

El Ministerio de Obras Publicas (en adelante MOP) tiene la tuición de todos los puentes a nivel nacional; lo que involucra estar encargado de la inspección, mantención, cambios, construcción y todo aquello que tenga relación con la operabilidad y serviciabilidad de algún puente.

Hoy en día existe un registro de 1983 puentes en la Región de La Araucanía, de acuerdo a la base de datos del Área de Puentes del MOP, de los cuales al menos un 43% posee algún elemento estructural de madera, ya sea en la infraestructura, en las vigas o el tablero. Del total de puentes en la región, un 15% corresponde a puentes que son completamente de madera, alrededor de 297 puentes, esta cantidad aumenta considerablemente si se piensa en el resto del país.

La importancia de estas estructuras radica en la conectividad y serviciabilidad que brindan a distintas comunidades, permitiendo el fácil acceso a distintos puntos de la región. Por lo tanto, una caída de estas estructuras conlleva resultados fatales, o bien genera aislamiento de comunidades, dejando a la población incapaz de recibir bienes fundamentales como el agua o asistencia médica.

Cabe señalar que los puentes de madera se ubican principalmente en caminos terciarios, en zonas rurales. Muchas veces cargan maquinarias agrícolas de gran envergadura, por ende, la condición estructural de un puente es fundamental para permitir el paso de maquinaria que incremente el desarrollo de localidades.

El Área de Puentes de la Dirección de Vialidad Región de La Araucanía carece de una metodología de inspección que defina una clasificación de deterioros en puentes de madera, lo que genera una preocupación latente en el personal activo del MOP. En efecto, no existe un programa establecido que sea capaz de inspeccionar todos los puentes de la región, además, la capacidad del departamento de puentes no es suficiente para cubrir todas las necesidades.

La única normativa que hace referencia a la inspección de puentes en Chile es el Manual de Carreteras en el punto 7.204.307 (Dirección de Vialidad, 2019), el cual establece una metodología sin parámetros de clasificación definidos, solo realiza una clasificación visual midiendo de las

escuadrías de las piezas del puente y describiendo brevemente las condiciones en las que se encuentra, lo que genera inspecciones de carácter subjetivo en función de quien realice la evaluación.

Por otra parte, en Chile existen varias normativas relativas a la madera, las cuales la definen y clasifican en grados estructurales en función de los defectos, definen la durabilidad natural según la especie de madera no tratada y los agentes de deterioro más comunes en este material. Sin embargo, todas las definiciones y clasificaciones actuales para la madera se realizan antes de ser utilizada estructuralmente. La Corporación Chilena de la Madera (CORMA) describe distintos tipos de deterioros en la madera, ya sea por efectos de humedad, agentes funji, condiciones climáticas u otros, sin establecer rangos fijos de deterioro. La normativa chilena N° 789 - Clasificación de maderas comerciales para su durabilidad natural parte 1, define la durabilidad de la madera por especie sin utilizar ningún preservante.

En cuanto al ámbito internacional, países como Nueva Zelanda, Australia o Estados Unidos han llevado a cabo variadas investigaciones acerca de puentes de madera. En Estados Unidos se da a conocer el FHWA Bridge Inspector's Reference Manual (Ryan *et al.*, 2012), el cual contiene información para la inspección de puentes de cualquiera materialidad. En tanto, el año 2014 se publica el texto "Advanced Timber Bridge Inspection" (Brashaw *et al.*, 2014), agregando parámetros de evaluación detallados, utilizando pruebas de deterioro medibles y enfocado solo a puentes de madera.

Dada la gran cantidad de puentes de madera existes en la región y sus implicancias directas con la calidad de vida para distintas localidades, se requiere conocer las condiciones estructurales de los puentes para determinar la seguridad de estos. No obstante, no se ha encontrado algún texto en el país que haga referencia a la inspección de puentes de madera en forma objetiva, sumado a la capacidad insuficiente del Área de Puentes para inspeccionar la totalidad de los puentes.

Por ende, determinar las condiciones de calidad estructural de un puente de madera es prácticamente un desafío constante para el Área de Puentes del MOP., existe la necesidad de estandarizar una inspección detallada de puentes de madera bajo un criterio imparcial que permita definir de forma concisa el nivel de riesgo de una estructura. Para esto se propone crear una

metodología que sistematice la inspección visual y la complemente con el uso de instrumentos para obtener mayor información de la condición estructural de la madera, simplificando la toma de decisiones del inspector.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo General

Desarrollar un instructivo de inspección para puentes de madera en la Región de La Araucanía que permita calificar su estado de deterioro estructural mediante procedimientos normalizados.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Establecer casos de estudio y parámetros de evaluación del estado de deterioro estructural de puentes de madera ubicados en la región de La Araucanía en función de la localización, fecha de construcción, dimensiones y tipo de carga.
- Calibrar los parámetros de evaluación del estado de deterioro de la madera utilizando los resultados obtenidos de ensayos y bibliografía técnica.
- Proponer al Departamento de Puentes del MOP un instructivo de inspección y calificación del estado de deterioro estructural de puentes de madera aplicable a la región de La Araucanía.

CAPÍTULO 2
ANTECEDENTES GENERALES

CAPÍTULO 2 ANTECEDENTES GENERALES

2.1 Marco general

La madera es un material orgánico, no homogéneo, compuesto de células, estas están conformadas fundamentalmente, por celulosa y lignina. Las células de la madera son huecas y en las coníferas tienen una longitud comprendida entre 3 a 5 mm y 0,03 a 0,045 mm de espesor. En las latifoliadas son bastante más cortas. Aun cuando la mayoría de las células se orientan verticalmente en el árbol, algunas de ellas se encuentran distribuidas horizontalmente en forma de radios en la sección transversal del árbol. Esta conformación celular es, en gran medida, la responsable de las diferentes respuestas estructurales dadas por la madera, según sea el sentido y características de la solicitación (anisotropía). (CORMA, 2003)

Una de las características a destacar en la madera es la durabilidad natural, la cual se define como la capacidad que posee la madera para resistir el ataque de los diferentes agentes biológicos de destrucción, una vez que se pone en servicio sin ningún tratamiento preservador (NCh 789).

De acuerdo a su durabilidad natural y vida útil y bajo condiciones favorables para el desarrollo de hongos de pudrición, insectos, horadadores marinos y otros, las maderas comerciales se clasifican en (NCh 789):

Tabla 2.1 Vida útil de la madera según la clasificación de durabilidad natural. Fuente: CORMA

Tipo de categoría	Tipo de Durabilidad	Vida útil de la madera
Categoría 1	Muy Durables	Superior a 20 años
Categoría 2	Durables	Superior a 15 años
Categoría 3	Moderadamente Durables	Superior a 10 años
Categoría 4	Poco Durables	Superior a 5 años
Categoría 5	No Durables	Inferior a 5 años

Posteriormente, basta relacionar la especie de árbol con la durabilidad natural que define la normativa NCh 789/1 oficializada en 1987, para establecer el rango de durabilidad de algunas maderas en Chile. En base a lo referido por la misma normativa anterior (NCh 789/1) es posible clasificar las siguientes especies como:

Tabla 2.2 Relación de la especie de árbol y la categoría de durabilidad. Fuente: CORMA

Categoría	Madera (Nombre Común)
Muy Durables	**Roble**, Ciprés de las Guaitecas, Alerce
Durables	Raulí, Lenga, Lingue
Moderadamente Durables	Canelo, **Coigüe**, Tineo, Ulmo
Poco Durables	Araucaria, Eucalipto, Laurel, Mañío Hembra y Macho.
No Durables	Álamo, Olivillo, Pino Radiata, Tepa.

Dentro de las restricciones del Manual de Carreteras, la lámina 4.203.001, establece la especie de madera a utilizar y los criterios estructurales mínimos. Restringiendo a maderas tipo Roble o Coigüe clase estructural F8 con una razón de resistencia RR=0,48 (Dirección de Vialidad, 2019).

La normativa Chilena N°1198 – Madera – Construcción en Madera- Cálculo, permite clasificar la madera por su clase estructural. Las especies Roble (nothofagus OBLIQUA) y Coigüe (nothofagus DOMBEYI) pertenecen al grupo E4 en el agrupamiento de especies. Además, la razón de resistencia 0,48 exigida se relaciona con un grado estructural N°3, por tanto, la clasificación estructural según **Figura 2.1** es F8, así el diseño de puentes de madera debe considerar un Módulo de Elasticidad de 6.900 MPa según esta misma norma.

Tabla 6 – Relación entre el agrupamiento de especies, el grado estructural y la clase estructural - Madera en estado verde

Clasificación visual		Agrupamiento de especies						
Grado estructural*)	Razón de resistencia*)	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7
		Clase estructural						
N° 1	0,75	F27	F22	F17	F14	F11	F8	F7
N° 2	0,60	F22	F17	F14	F11	F8	F7	F5
N° 3	0,48	F17	F14	F11	F8	F7	F5	F4
N° 4	0,38	F14	F11	F8	F7	F5	F4	F3
*) Definidos en NCh1207 y NCh1970.								

Figura 2.1 Tabla 6 de NCh 1198-2014, obtención de clase estructural, madera verde. Fuente: INN, 2014.

Según NCh 1970 parte 1 – Especies Latifoliadas – Clasificación visual para uso estructural, el grado estructural se asigna mediante el defecto de mayor incidencia sobre su resistencia. El método

de clasificación consiste en una inspección visual de los defectos que cada pieza presenta en todas sus superficies (caras, cantos y cabezas) en el momento de la clasificación, considerando solo aquellos defectos que inciden sobre su resistencia.

Para el grado estructural N° 3 no se acepta ningún nivel de pudrición o perforación en la pieza, en cuanto a las limitaciones de otros defectos, estos quedan definidos en la **Figura 2.2**

Defectos y especificaciones		Grado N°1	Grado N°2	Grado N°3	Grado N°4
Generales		Cada pieza debe estar correctamente aserrada de modo que superficies adyacentes sean ortogonales entre sí, cumplir con las tolerancias especificadas y tener los extremos despuntados con un corte normal al eje de la pieza.			
Perforación - Pudrición - Evidencia de madera de reacción		No se aceptan	No se aceptan	No se aceptan	No se aceptan
Corteza incluida	Se aceptan trozos individuales sólo en extremos de la pieza, siempre que su longitud, ℓ, cumpla con:	No se aceptan	$\ell \leq 75$ mm	$\ell \leq 150$ mm	$\ell \leq 200$ mm
	Se aceptan trozos individuales que no aparezcan en un extremo de la pieza y ubicados en una zona de 600 mm de largo medida desde dicho extremo, siempre que su longitud, ℓ, cumpla con:	No se aceptan	$\ell \leq 150$ mm	$\ell \leq 300$ mm	$\ell \leq 400$ mm
	Se aceptan trozos individuales que no aparezcan en un extremo de la pieza ni en una zona de 600 mm de largo a contar de dicho extremo y que además estén fuera de la mitad central del espesor, con tal que sus largos, ℓ, cumplan con:	$\ell \leq 300$ mm Separa-ción > 300 mm	$\ell \leq 600$ mm Separa-ción > 300 mm	No se limitan en estos grados	
	Se aceptan trozos individuales que no aparezcan en un extremo de la pieza ni en una zona de 600 mm de largo a contar de dicho extremo y que además estén en la mitad central del espesor, con tal que sus largos, ℓ, cumplan con:	$\ell \leq 150$ mm Separa-ción > 300 mm	$\ell \leq 300$ mm Separa-ción > 300 mm	$\ell \leq 600$ mm Separa-ción > 300 mm	$\ell \leq 800$ mm Separa-ción > 300 mm
Nudos	Se aceptan nudos sanos - circulares - ovalados - y en la arista, con tal que su dimensión, d, cumpla con	d ≤ 1/7 del ancho de la superficie donde el aparece	d ≤ 1/4 del ancho de la superficie donde el aparece	d ≤ 1/3 del ancho de la superficie donde el aparece	d ≤ 3/8 del ancho de la superficie donde el aparece

Defectos y especificaciones		Grado N°1	Grado N°2	Grado N°3	Grado N°4
Desviación de la fibra		Menor que 1 en 15	Menor que 1 en 10	Menor que 1 en 8	Menor que 1 en 6
Bolsillos (de goma, resina y/o crecimientos anormales)	Se aceptan si su longitud, ℓ, medida en la superficie de ancho a, en la cual aparecen cumple con:	$\ell \leq 3a$ y además $\ell \leq 300$ mm (tomar el menor de los dos valores)			
	Se aceptan si aparecen solo en una superficie de ancho a y el ancho, S, del defecto cumple simultáneamente con:	S ≤ a/4 y además S ≤ 12 mm	S ≤ a/3 y además S ≤ 20 mm	S ≤ a/2 y además S ≤ 25 mm	S ≤ a/2 y además S ≤ 30 mm
	Se aceptan si aparecen en una superficie de ancho a, se extienden a otra superficie y el ancho, S, del defecto cumple simultáneamente con:	S ≤ a/8 y además S ≤ 6 mm	S ≤ a/4 y además S ≤ 12 mm	S ≤ a/2 y además S ≤ 20 mm	S ≤ a/3 y además S ≤ 25 mm
Arista faltante	Se acepta si el área afectada, A, sola o acumulada, cumple con:	A ≤ e · a/10	A ≤ e · a/5	A ≤ e · a/4	A ≤ e · a/4
	Se acepta si, además, su dimensión, d, en el canto cumple con:	d ≤ e/3			
Acebolladura	Se acepta si su ancho, S, cumple con	S ≤ 3 mm			
	Se acepta si, además, la longitud acumulada ($\sum\ell$) cumple con:	$\sum\ell \leq L/10$	$\sum\ell \leq L/6$	$\sum\ell \leq L/4$	$\sum\ell \leq L/3$
	Se acepta si, además, su extensión cumple con:	No abarcar más de una de las superficies de la pieza			

Defectos y especificaciones			Grado N°1	Grado N°2	Grado N°3	Grado N°4
Grietas	Superficiales	Se aceptan en superficies de hasta 75 mm de ancho siempre que el ancho, S, del defecto cumpla con:	S ≤ 2 mm	No se limitan, se aceptan de cualquier ancho		
		Se aceptan en superficies mayores de 75 mm de ancho siempre que el ancho, S, del defecto cumpla con:	S ≤ 3 mm	No se limitan, se aceptan de cualquier ancho		
	Internas (controladas en las cabezas de las piezas)	Se aceptan si la proyección, S, del defecto sobre el canto de la pieza cumple con:	S ≤ e/4	S ≤ e/3	S ≤ e/2	S ≤ 2 · e/3
Rajaduras en los extremos de la pieza			No se aceptan	Se aceptan si: $\Sigma \ell \leq$ a y además $\Sigma \leq$ 100 mm	Se aceptan si: $\Sigma \ell \leq$ 1,5 a y además $\Sigma \ell \leq$ 150 mm	
	Acanaladura		Se acepta si su dimensión no excede de 1 mm por cada 50 mm de ancho de la pieza			
Alabeos	Arqueadura y encorvadura		Ver tablas 2 y 3 para determinar el valor admisible			
	Torcedura		Ver tablas 4 y 5 para determinar el valor admisible			

Figura 2.2 Tabla 1 de NCh 992 Madera - Defectos a considerar en la clasificación, terminología y métodos de medición.

Acebolladura: Separación del leño siguiendo la dirección de los anillos de crecimiento. Puede ser causado por los procesos de temperatura, como también, por esfuerzos excesivos

Agujeros: Abertura aproximadamente circular, generada principalmente por el desprendimiento de un nudo.

Nudo: Tejido leñoso dejado por el desarrollo de una rama, cuyo aspecto y propiedades son diferentes a los de la madera de las zonas circundantes.

Grieta: Separación de la fibra de la madera que, a diferencia de la fractura, no alcanza a afectar dos caras de una pieza aserrada o dos puntos opuestos de la superficie de una madera.

Rajadura: Separación de la fibra de la madera que se extiende en la dirección del eje de la pieza y afecta totalmente al diámetro o espesor de la misma.

Alabeo: Deformación que puede experimentar una pieza de madera en la dirección de su eje longitudinal o transversal o de ambos a la vez.

Bolsillo de corteza: Presencia de una masa de corteza total o parcialmente comprendida en el leño; se conoce también por **"Corteza incluida"**

Acanaladura: Alabeo de las caras en la dirección transversal.

Arqueadura: Alabeo de las caras en la dirección longitudinal.

Encorvadura: Alabeo de los cantos en la dirección longitudinal.

Torcedura: Alabeo helicoidal de la pieza en torno a su eje longitudinal.

Pudrición: Descomposición de la madera, producida por la acción de hongos xilófagos, acompañada de un proceso gradual de cambio de características físicas, químicas y mecánicas.

Avanzada: La madera presenta cambios evidentes en su apariencia, peso específico, composición, dureza y otras características mecánicas.

Castaña, seca: Aquella que se caracteriza por una coloración castaña de la madera como consecuencia de la descomposición de la celulosa. (pudrición cubica café).

Pudrición clara: Aquella que se caracteriza por la coloración clara de la madera como consecuencia de la descomposición preponderante de la lignina. (pudrición cubica blanca).

Pudrición incipiente: Etapa inicial de la descomposición en la cual la madera pierde parte sus propiedades mecánicas y puede sufrir cambios de color.

Bolsillo de resina: Presencia de una cavidad bien delimitada y que contiene resina y tanino; se conoce también por “Bolsa o Lacra”.

Arista Faltante: Falta de madera en una pieza; se conoce también por canto muerto.

La razón de resistencia se define como la hipotética razón entre la resistencia de un elemento estructural y la resistencia que ese elemento tendría si estuviese libre de toda característica reductora de su resistencia. Por ejemplo un grado estructural con “razón de resistencia” igual a 0,48 (RR=0,48) señala que en una pieza de madera que clasifica en dicho grado se espera una resistencia de a lo menos un 48% de la resistencia que esa pieza tendría si ella no tuviera defectos Karsulovic y González., 2009).

En una estructura de puente podemos distinguir cuatro partes bien definidas, superestructura, infraestructura, accesos y obras de defensa, dados estos distintos puntos, es importante diferenciar los elementos estructurales. (Dirección de Vialidad, 2019).

La infraestructura es aquella parte encargada de transmitir las cargas desde la superestructura hasta el terreno de fundación. Está constituida por los estribos que otorgan la contención de los extremos del puente, como también, por las cepas intermedias en el caso de que el puente posea más de un tramo. En la Figura 2.3 es posible visualizar el concepto de estribos y de cepas señalados como "infraestructura".

La superestructura, tiene la finalidad de dar continuidad al camino, uniendo la calzada y las bermas de ambos lados sobre un rio u otra vía. Esta parte del puente se encarga de soportar las cargas móviles, transmitiéndolas a la infraestructura a través de los sistemas de apoyo. Esta parte del puente está constituida por el tablero, vigas y los dispositivos especiales que cumplen diferentes funciones.

Accesos y defensas: corresponden al resto de las obras que son requeridas para una buena conexión del puente, tales como, terraplenes de acceso, estructura de pavimento, bases, bermas y losas de acceso, entre otras partes.

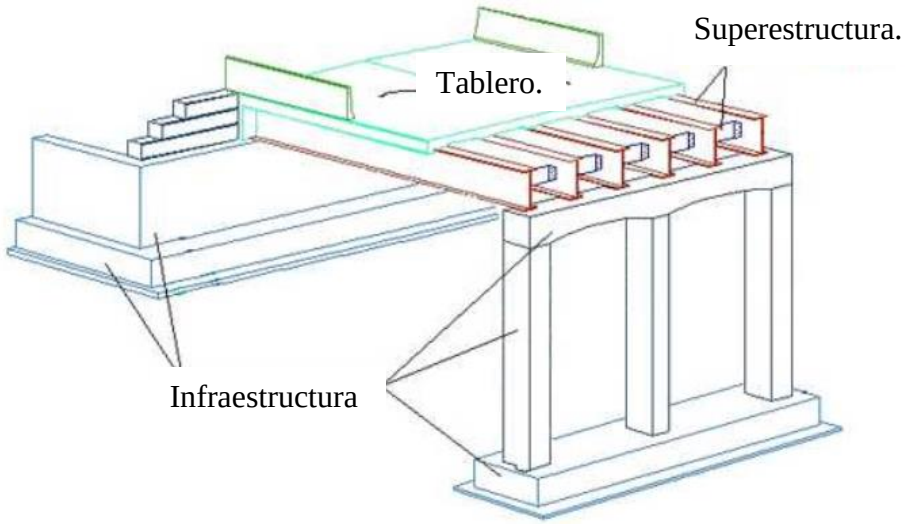

Figura 2.3 Diagrama de las partes de un puente.

El manual de carretera presenta laminas tipo, para el diseño de puentes de madera, inciso 4.603, considerando un camión tipo HS 20 -44 (1996), es decir, el diseño ingenieril de un puente de madera genérico está establecido y tiene las escuadrías determinadas, por lo tanto, la mayoría de los puentes construidos debiesen asemejarse a lo mencionado por dicho manual.

Las partes de un puente bajo este diseño pre establecido son las siguientes:

Sección transversal del tablero Figura 2.5

- Pasamanos 4x4”
- Pilar de baranda 4”x4”
- Cinta baranda 2”x 6”
- Tablones de pasillo 2” x 8”
- Tablones de Rodado 3” x 8”
- Guarda rueda 6” x 8”
- Travesaño 4” x 8”
- Tablones de resistencia 4” x 8”
- Vigas principales

Vista longitudinal Figura 2.4

- Basa de madera 7”
- Taco o montante de baranda
- Travesaño
- Resistencias
- Viga principal

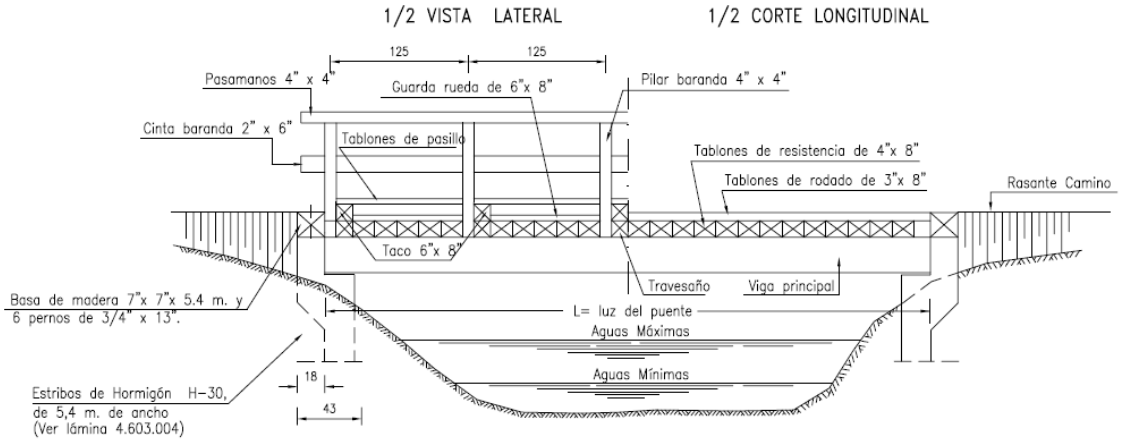

Figura 2.4 Vista Lateral y Longitudinal de puentes de madera. Fuente: Manual de Carreteras.

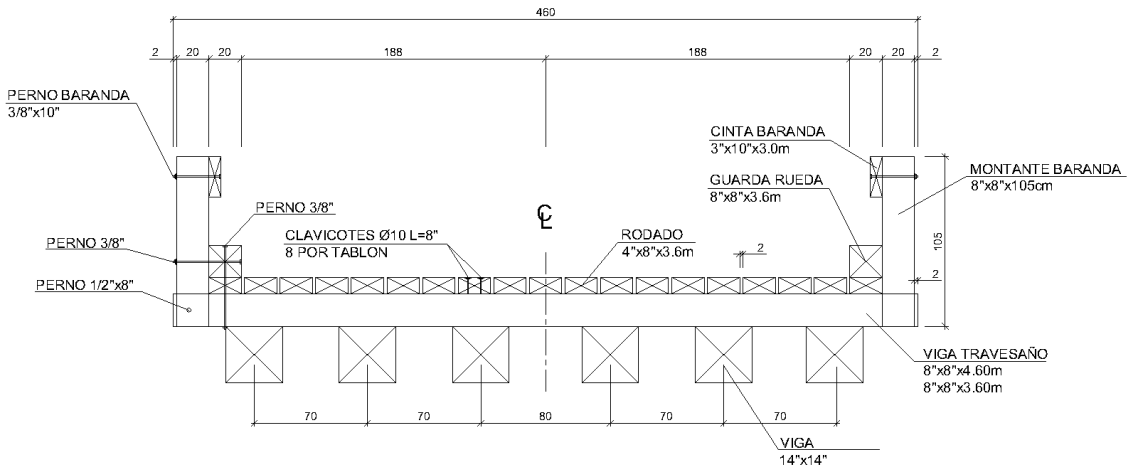

Figura 2.5 Lamina tipo corte transversal. Fuente: Manual de Carreteras.

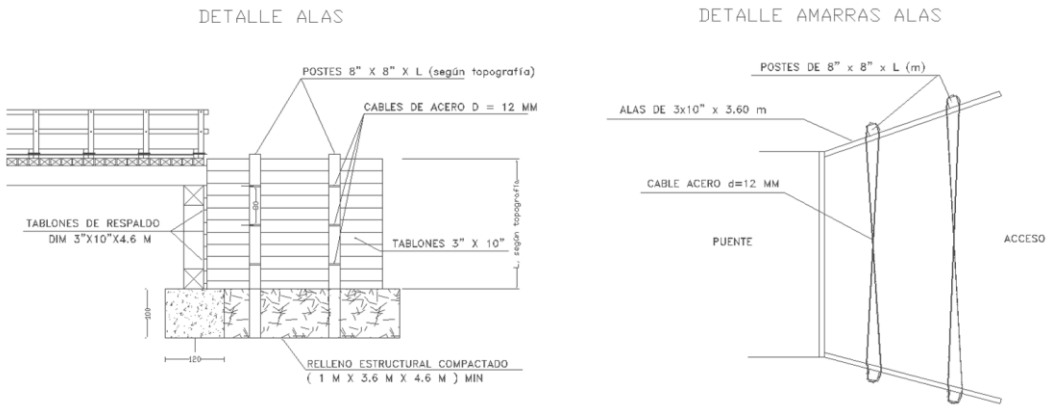

Figura 2.6 Detalles de alas en estribo de un puente de madera. Fuente: Manual de Carreteras.

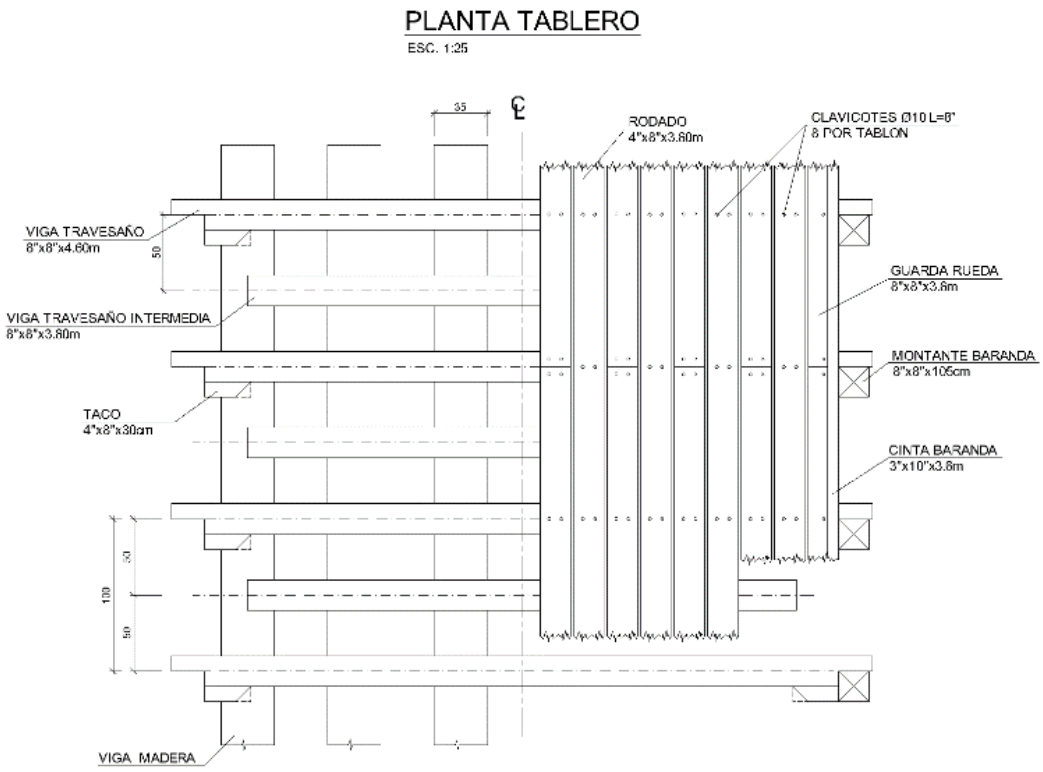

Figura 2.7 Planta de elementos en el tablero de un puente. Fuente: Manual de Carreteras

2.2 Desintegración de la madera.

Como es de esperarse, la capacidad estructural de la madera se ve afectada directamente por el nivel de deterioro que está presente, sobre todo, cuando existe una pérdida de sección de los elementos de madera.

La desintegración de la madera puede ser producida por diferentes causas y es importante conocer el agente principal causante de la destrucción para elegir el modo de protección más adecuado. (CORMA, 2003). En términos amplios, los procesos de deterioro pueden ser atribuidos a dos casusas primarias: agentes bióticos (vivos) o agentes físicos (no vivos). (Ritter, 1990).

2.2.1 Agentes biológicos.

Los agentes destructores biológicos necesitan, para iniciar su desarrollo en la madera, de ciertas condiciones primarias de subsistencia, que son:

- Una fuente de material alimenticio para obtener su nutrición.
- Una temperatura adecuada para su crecimiento.
- Una adecuada humedad para su desarrollo.
- Una fuente de oxígeno suficiente para la respiración.
- La presencia de una infección, en la forma de esporas, la que actuará como una semilla o germen del cual el hongo puede desarrollarse.

El crecimiento de estos hongos y su desarrollo, sólo podrá efectuarse si cada una de estas condiciones se cumplen. (CORMA, 2003).

Organismos vegetales.

Hongos Cromógenos: suelen alimentarse de los compuestos orgánicos fácilmente digeribles, almacenados en la madera; causan coloración que pueden clasificarse como defectos y ejercen escasa o nula influencia sobre las propiedades de la madera. (CORMA, 2003).

Hongos de pudrición: son capaces de desintegrar las paredes de la célula y, por lo tanto, cambian las características físicas y químicas de la madera. (CORMA, 2003).

Se reconocen dos tipos de pudrición: La pudrición cubica café o parda, la cual ataca la celulosa y partes de la hemicelulosa, modificando la lignina residual. (Ritter, 1990). Y la pudrición cubica blanca producida por hongos que atacan la lignina, dejando un residuo blanquecino. (CORMA, 2003).

Bacterias que descomponen la celulosa: Su acción se explica por la acción enzimática, puede decirse que las bacterias que disuelven la celulosa no desempeñan, en general, un papel importante en la destrucción de la madera. (CORMA, 2003).

Mohos: El moho es perjudicial por el aspecto que comunica al material infectado. El moho de la superficie puede cepillarse y quitarse de la madera y el hongo causante no parece afectar a la resistencia. (CORMA, 2003).

Insectos: El daño producido por los insectos es debido, en general, a sus larvas y orugas, que penetran en la madera para procurarse alimento y protección abriendo en ellas galerías de características especiales.

Los insectos lignívoros, que causan mayor daño en las maderas volteadas y a las puestas en obra, comprenden: Termitas, Coleópteros, Moluscos y Crustáceos (CORMA, 2003). Los huecos generados por los insectos atrapan la humedad e incrementan el rango de decaimiento de un elemento (Brashaw *et al.*, 2014).

Otro factor considerado como un factor vivo, es la acción del hombre. Su actuar tiene variada influencia sobre el comportamiento y las propiedades de la madera, puede debilitar completamente alguna pieza de madera, como también, puede generar daños de menor escala. Las acciones del ser humano se pueden generalizar en: desgaste mecánico, calor y frío artificialmente, agentes químicos incluyendo el agua, fuego. (CORMA, 2003).

La **Figura 2.8** muestra distintos tipos de agentes que degradan la madera, al mismo tiempo, se exhibe las consecuencias que estos agentes generan. Es posible identificar hongos (Fruit Body) relacionado con una zona de deterioro interno, zona en la cual es difícil determinar la extensión través de una inspección visual, ya que el deterioro se genera internamente.

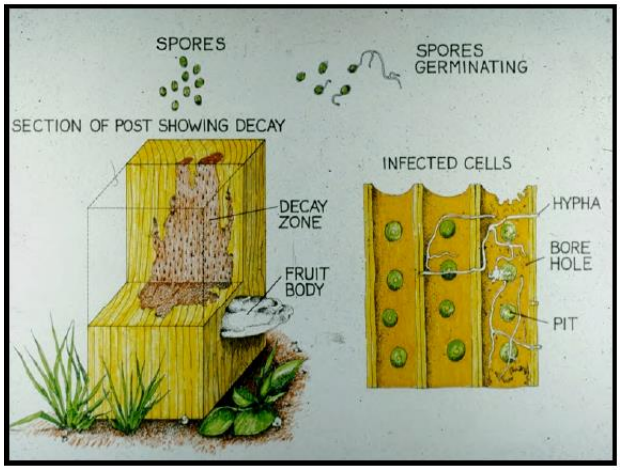

Figura 2.8 Ejemplos de tipo de deterioro en la madera. Fuente: Advanced Timber Bridge Inspection. (Brashaw et al., 2014).

2.2.2 Agentes físicos.

Degradación producto de la luz ultravioleta: la luz de sol degrada químicamente la lignina que se encuentra cercana a las caras de la madera. Las piezas dañadas son despreciablemente más débiles. (Ritter, 1990).

Corrosión: Comienza cuando la humedad en la madera reacciona con el metal de los pasadores (uniones de un puente) liberando iones férricos que deterioran las pareces celulares de la madera. La acidez de los iones causa la hidrolisis celular y reduce severamente la resistencia de la zona afectada. (Ritter, 1990).

Efectos ambientales: Los elementos de madera son susceptibles a secarse y erosionarse, esto a menudo resulta en fisuras superficiales y grietas profundas, grietas en forma de anillo, grietas en los extremos y fisuras a lo largo de los miembros. Grietas y fisuras pueden crear una entrada para la humedad en los elementos (Brashaw *et al.*, 2014).

La **Figura 2.9** muestra algunos deterioros producidos por agentes ambientales mencionados previamente. En la ilustración izquierda es posible ver grietas en forma de anillo, con la separación de los anillos de crecimiento, debilitando la pieza de madera. La ilustración del centro muestra pequeñas grietas de los extremos y la ilustración derecha exhibe una grieta severa y profunda. Si la dimensión de alguna grieta alcanza gran profundidad, es muy probable que permita la entrada de humedad en la madera, quedando en condiciones idóneas para el desarrollo de hongos y pudrición.

Figura 2.9 Ejemplos de deterioros por efectos ambientales. Fuente: Advanced Timber Bridge Inspection. (Brashaw et al., 2014).

El Manual de Carreteras, en su 7mo volumen menciona que la inspección de los puentes y estructuras tiene por finalidad establecer el estado de serviciabilidad y de estabilidad en que se encuentran en función del nivel de deterioro que presentan. Sin embargo, la inspección se realiza en forma visual y bajo el criterio de quien evalúa.

En rangos amplios, la bibliografía de distintos países apunta a un mismo procedimiento base de inspección. Se trata de métodos de inspección visual, física y métodos de inspección avanzada (Ryan *et al.*, 2012).

El método más simple para localizar deterioro externo es la **inspección visual**. Un inspector observa los elementos del puente en busca de señales de deterioro actual o potencial, anotando las áreas que necesitaran una mayor investigación. La inspección visual no debe ser el único método usado (Brashaw *et al.*, 2014).

La inspección de la madera en busca de grietas, divisiones, fracturas, aberturas, ataque de hongos, deflexiones, impactos y perdida de conectores es la primera actividad visual. (Ryan *et al.*, 2012). Luego de realizar una inspección visual, registrar todos los defectos que se pueden determinar a simple vista, se debe dar paso a una prueba física de los elementos del puente, en función de especificar y precisar los detalles encontrados con la inspección visual, asimismo, es posible que se registren nuevas zonas de deterioro en la madera.

2.3 Métodos de inspección física.

La examinación física de los miembros de madera puede realizarse con un martillo o algún instrumento con punta, una combinación muy certera es el martillo usado por geólogos. El martillo es usado para hacer sonar los elementos y detectar áreas huecas o deterioro interno. La punta del martillo es usada para determinar la condición de la superficie de la madera. (Ryan *et al.*, 2012).

Basado en la calidad del sonido o la condición de la superficie, un inspector puede identificar áreas que requieran futura investigación usando herramientas avanzadas (Brashaw *et al.*, 2014).

Probando con herramienta puntiaguda, como un cuchillo o un punzón, se localiza el deterioro cerca de la superficie de la madera como indicador de excesiva suavidad o falta de resistencia en la penetración y en la rotura del patrón de astillas. Una rotura de la cascara indica madera deteriorada. Una rotura astillada indica madera sólida. (Brashaw *et al.*, 2014).

Un Xilohigrómetro puede ser utilizado efectivamente para determinar el contenido de humedad de la madera. Típicamente, los contenidos de humedad en la madera de menos del 20% no permitirán que se produzca la descomposición en la madera. Sin embargo, a medida que la humedad aumenta por encima del 20%, aumenta el potencial de descomposición. (Brashaw *et al.*, 2014).

2.4 Métodos de inspección avanzada.

Cuando se quiere corroborar la extensión del deterioro interno, es necesario utilizar otros métodos de inspección que resulten más precisos en la medición. Para este caso existen distintas herramientas capaces de describir el estado de la madera, sobre todo, las condiciones internas en la cual se encuentra.

Mediciones de ultrasonido: Es un método efectivo para localizar y definir áreas de deterioro en los puentes de madera, está directamente relacionado con las propiedades físicas y mecánicas de la madera (Brashaw *et al.*, 2014). La técnica de ultrasonido utiliza un instrumento para medir la velocidad de la onda de sonido moviéndose en la madera (Ryan *et al.*, 2012).

La **Figura 2.10** (página 20) ilustra el funcionamiento de las mediciones de ultrasonido, se evidencia como la onda viaja a través de la madera sana, sin embargo, al encontrarse con espacios vacíos o deterioros, la velocidad de la onda disminuye, este resulta ser el principio básico de funcionamiento.

Técnicas de perforación y extracción: son los métodos más comunes para detectar deterioro interno en los elementos de madera. Ambas técnicas son usadas para detectar la presencia de vacíos y determinar el espesor residual cuando los espacios vacíos están presentes (Brashaw *et al.*, 2014)..

En general, el inspector perfora dentro del elemento en cuestión, notando las zonas donde la perforación es más fácil y observando los residuos de la perforación en busca de deterioro (Ritter, 1990).

En cuanto a la extracción, se realiza con un perforador incremental (a menudo utilizado para determinar la edad de un árbol) que también entrega información sobre la presencia de vacíos. El resultado es un tarugo de madera solida que puede ser cuidadosamente examinado por evidencia de deterioro (Brashaw *et al.*, 2014).

Resistencia con micro-Taladro: esta tecnología está siendo utilizada para identificar y cuantificar el deterioro, vacíos y galería de termitas en vigas de madera, columnas, postes y pilas (Brashaw *et al.*, 2014).

En la **Figura 2.11** (página 22) se muestra un claro ejemplo del uso del micro taladro, también conocido como Resistógrafo. En la imagen es posible apreciar cómo se perforó la madera y el resultado muestra la resistencia que esta opuso a ser perforada, dejando en claro las zonas y la profundidad (escala 1:1) donde se encontraron espacios vacíos dentro del elemento.

Para finalizar una buena metodología de inspección mediante las distintas técnicas mencionadas previamente, es necesario que toda la información recolectada sea traspasada a un formulario establecido. En una planilla debe registrar las características del puente, ya sea, las dimensiones, localización, tipo de piezas y la cantidad (vigas, pilares, entro otros) fecha de inspección, condiciones del puente y por sobre todo el daño registrado, con las mediciones y observaciones realizadas en terreno.

2.5 Herramientas

2.5.1 Herramientas básicas

Dentro de las herramientas básicas que se requieren en el trabajo de estudio, se solicita un martillo común, el cual se utiliza para golpear la madera y evaluar el sonido que presenta la madera en base a criterio y conocimientos, o bien, seleccionar piezas que levanten sospecha de deterioro. Además,

es necesario contar con cuaderno, lápiz, notebook, huincha de medir y cualquier herramienta que sea necesaria para registrar los datos obtenidos desde terreno y e.

2.5.2 Xilohigrómetro o un medidor del contenido de humedad para maderas.

Se requiere un medidor del contenido de humedad, conocido como Xilohigrómetro, con la finalidad de evaluar las distintas piezas de un puente y determinar cuál es la condición de humedad que presenta cada una de las partes. Con estos resultados es posible calcular la densidad de la madera presente en los puentes y relacionarlos con la velocidad de propagación de la onda (resultado del Medidor de Onda de Estrés), además, asociar cuales son las piezas con alto contenido de humedad sospechosas de deterioro.

2.5.3 Medidor de Onda de Estrés, Ultrasonido.

Este instrumento es utilizado para realizar diagnósticos no destructivos de taras y degradaciones de la madera. Su objetivo es medir el tiempo de propagación de las ondas de estrés en la madera, golpeando con un martillo en el transductor de inicio y la unidad muestra el tiempo de propagación hasta el transductor de termino.

Al medir la distancia entre los dos sensores, como se muestra en la Figura 3.2 (página 31), es posible calcular la velocidad de propagación de la onda, así, calibrar parámetros para un tipo determinado de madera y conocer la velocidad de propagación en maderas de buenas condiciones (muestra patrón). Luego, comparar la madera utilizada en distintas partes de una estructura y determinar las condiciones de deterioro en las que se encuentra la pieza ensayada. Un esquema de funcionamiento se muestra en la Figura 2.10.

En la presente investigación se utilizará este instrumento para determinar el MOE y la velocidad transversal de la onda en la madera, parámetros que posteriormente serán comparados con la madera sana para definir las condiciones de calidad estructural.

La *ecuación (2.1)* describe la relación entre la distancia entre los transductores del Ultrasonido y el tiempo de propagación de una onda en la madera.

$$V = d/t \qquad (\mathbf{2.1})$$

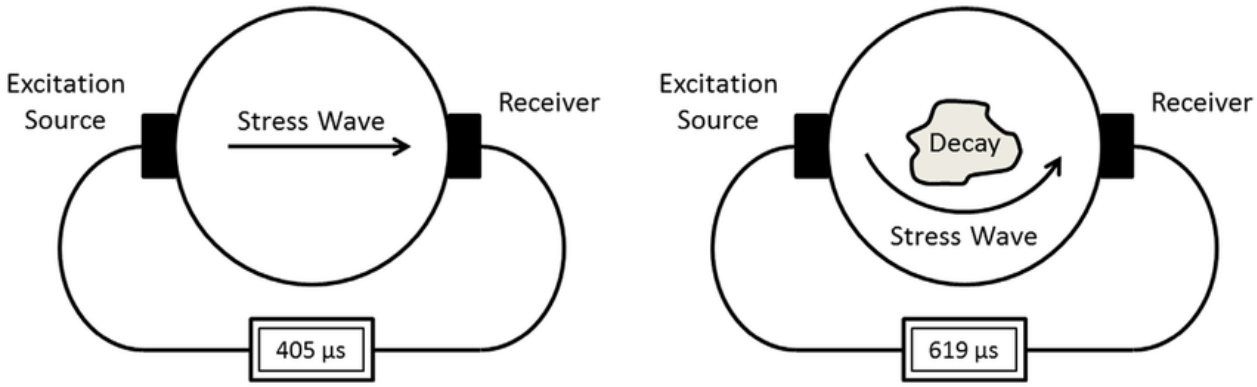

Figura 2.10 Esquema del funcionamiento de Ultrasonido. Fuente: www.researchgate.net

Existen dos ecuaciones que pueden ayudar a determinar la densidad en función de la humedad según NCh 176/2:

1. Cuando la humedad es menor que el punto de saturación de la fibra.

$$\rho_H = \rho_0 \left(\frac{100 + H}{100 + K * H} \right) \qquad (\mathbf{2.2})$$

2. Cuando la humedad es mayor que el punto de saturación de la fibra

$$\rho_H = \rho_b \left(\frac{100 + H}{100} \right) \qquad (\mathbf{2.3})$$

- Analizar la nomenclatura en la página 90.

La densidad básica es de 492 kg/m^3 para el Roble y 515 kg/m^3 para el Coigüe. En cambio, la densidad anhidra es de 634 kg/m^3 para el Roble y 464 kg/m^3 para el Coigüe (CORMA, 2003). Por

último, la densidad al 12%, es $\rho_{12\%} = 665\ kg/m^3$ para el Roble y $\rho_{12\%} = 488\ kg/m^3$ para el Coigüe.

Por otro lado, la investigación ha demostrado que existe un factor de corrección para la velocidad de propagación de la onda, ajustándola a un 12% de humedad con la intención de comparar todas las piezas al mismo nivel de humedad. También se modifica el módulo de elasticidad, ajustándolo al 12% de humedad.

El factor de corrección de la velocidad posee un coeficiente de determinación (R^2) mayor a 0.9, por lo tanto, se estima que provee una buena correlación entre la humedad y la velocidad ajustada. (Unterwieser y Schickhofer, 2010).

$$v_{12,H>PSF} = \frac{V_H}{0{,}902 - 0{,}0017 * (H - 28)} \qquad (\mathbf{2.4})$$

Finalmente, el fabricante del instrumento indica que se debe utilizar un factor de **0,9** para ajustar el módulo de elasticidad, transformándolo de Módulo de elasticidad dinámico a estático, calculando el Módulo de elasticidad estático como:

$$E = 0{,}9 * \rho_{12\%} * (v_{12,H>PSF})^2 \qquad (\mathbf{2.5})$$

2.5.4 Resistógrafo.

El Resistógrafo, **Figura 2.12**, es utilizado para realizar pruebas no destructivas en elementos de madera. Consiste en un "taladro" con una broca fina (3mm) y resistente, especialmente diseñada para el ensayo, el objetivo es medir la resistencia de la madera mientras se taladra a velocidad constante con el Resistógrafo.

La característica especial de este instrumento radica en registrar la resistencia que opone la madera a medida que una broca se introduce en el interior de la pieza estudiada, tomando en cuenta una escala propia que varía entre 0 cuando no existe resistencia hasta 4 cuando la resistencia es la más alta.

El Resistógrafo posee una configuración para dos escalas. La primera escala (1) se utiliza para maderas blandas (softwood) y la segunda escala (2) esta calibrada para maderas duras (Hardwood). En el caso del Roble y Coigüe, se debe utilizar la escala número 2.

Otro factor fundamental de este instrumento es que permite analizar las condiciones internas de la madera y permite graficar las dimensiones del deterioro interno que posee una pieza estructural. Al igual que el instrumento anterior, el Resistógrafo entrega resultados objetivos y confiables, por lo tanto, se puede estandarizar todos los ensayos que se realicen con este. Es posible comparar los ensayos que se realicen en distintas piezas y obtener conclusiones en base a estos.

En esta investigación se utiliza este instrumento para determinar las condiciones internas de la madera, como también, para formar una escala calibrada para la madera de roble (Nothofagus OBLIQUA) comparando la madera sana con la madera utilizada en puentes.

Finalmente, cabe señalar que los datos que son obtenidos con el Resistógrafo pueden ser comparados y a su vez complementados con el medidor de ultrasonido para madera, lo que permite obtener una información completa al final de cada análisis.

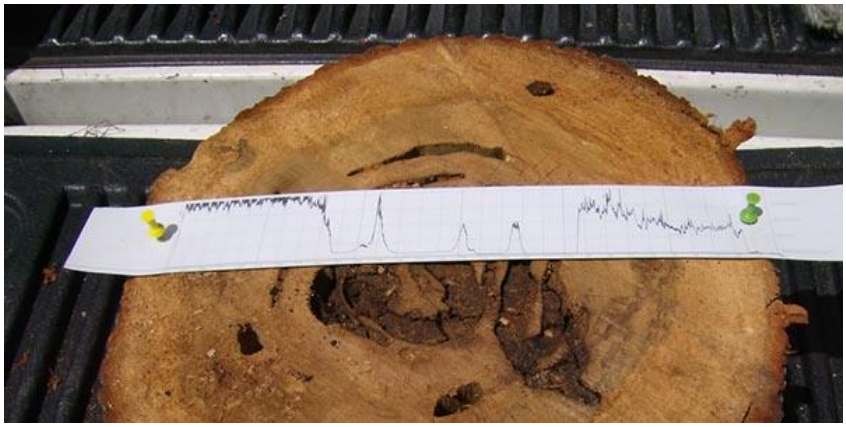

Figura 2.11 Resultados y comparación de una prueba con un Resistógrafo.
Fuente: www.researchgate.net

Figura 2.12 Resistógrafo en uso. www.imldistribution.wordpress.com

CAPÍTULO 3

DESCRIPCIÓN DE ACTIVIDADES REALIZADAS

CAPÍTULO 3 DESCRIPCIÓN DE ACTIVIDADES REALIZADAS.

3.1 Estudio de la bibliografía internacional.

La finalidad de este texto es crear y desarrollar un instructivo de inspección cuantitativo de la calidad estructural que pueda ser aplicado especialmente en puentes de madera de la Región de la Araucanía, puesto que en la actualidad las inspecciones tienen un carácter subjetivo, como se ha mencionado previamente.

En primer lugar, se indagó la bibliografía tanto nacional como internacional. Se comenzó por Manual de Carreteras, el cual no establece parámetros ni metodologías de inspección suficientemente delimitadas para conformar un criterio unánime en todos los inspectores de la región y el país.

La bibliografía extranjera se oconcentró en Estados Unidos, país donde cada estado posee un Departamento de Transporte y cada uno de estos posee un instructivo de inspección para puentes, por ende, la experiencia en la materia es mucho mayor a la experiencia que se pueda encontrar en Chile.

Cabe señalar que algunos instructivos de Estados Unidos han perfeccionado y profesionalizado las inspecciones, aplicando nuevas técnicas de inspección e incorporando nuevos instrumentos para ensayar la madera y determinar sus propiedades físicas y mecánicas.

Para definir que textos se estudiarían, se investigó en los distintos Departamentos de Transporte de Estados Unidos, buscando los instructivos más recientes. Comenzando con el texto “Advanced Timber Bridge Inspection”, enfocado a puentes de madera, tal como la presente investigación.

A continuación, se presenta una lista de los instructivos considerados dentro del estudio:

1. Advancer Timber Bridge Inspection
2. Washington State Bridge Inspection Manual

3. Bridge Inspection Manual of Texas Departament of Transportation
4. Bridge Inspection Program of Utah Departament of Transportation
5. Bridge Inspection Program of Iowa Departament of Transportation

En este punto se analiza la metodología de inspección utilizada en otros países, aumentando el conocimiento y analizando la experiencia extranjera en post de generar un instructivo que se adecúe a las necesidades de la región.

En conjunto con la experiencia vertida en los distintos instructivos mencionados, el estudiante estudió la normativa **AASHTO "The Manual For Bridge Inspection**" en su tercera edición del año 2018, siendo esta versión la más actualizada. Este texto es la principal guía para todos los Departamentos de Transporte de Estados Unidos, en él se establecen capítulos como:

1. Deterioros de la madera
2. Ensayos para la inspección de puentes de toda materialidad.
3. Programas y equipos requeridos para las inspecciones.
4. Niveles y metodologías de inspección.

En suma, a la normativa antes referida y como complemento de esta, se estudió un instructivo denominado **"Coding Guide"** en el cual se establecen rangos o escalas de clasificación visual aplicados a los elementos que conforman un puente, es decir, descompone las partes de un puente y categoriza su nivel de deterioro en distintos niveles a través de una descripción de cada uno de ellos.

En conjunto con "Coding Guide", se estudió el texto llamado "**Bridge Inspector's Reference Manual (BIRM)**", donde se establecen criterios de evaluación similares a los descritos por el instructivo anterior. Ambos textos complementan sus funciones y ratifican una metodología de inspección concisa.

3.2 Tareas designadas por el Área de Puentes de la Dirección de Vialidad.

Dentro del periodo de la práctica controlada el estudiante realizó trabajos propios de la oficina del Área de Puentes.

En primer lugar, debió comprender la metodología de trabajo de la oficina y las relaciones con las otras oficinas de la Dirección de Vialidad, por ende, existió un periodo para adaptarse al ritmo y forma de trabajo instaurado en el departamento. En este periodo, la misión fue colaborar en distintas tareas solicitadas, las que se resumen en la revisión y corrección de proyectos menores enfocado en conformar bases de proyectos de puentes definitivos para ser licitados a construcción.

La tarea anterior implicó corrección de cubicaciones cuando fue necesario, desarrollo de especificaciones técnicas en función de la planimetría y proyecto existente, crear descripción de proyectos y antecedentes generales, relacionarse con distintas entidades propias de la institución y otras actividades.

En segundo lugar, le correspondió asistir a distintas obras en terreno observando el desarrollo de estas, hizo un seguimiento de distintas faenas de construcción hasta la etapa final de la recepción definitiva, incluyendo reuniones de proyectos y participación ciudadana.

3.3 Selección de Puentes de Estudio.

Enfocado en el desarrollo del instructivo de inspección, se dio paso a conformar un grupo de puentes que represente distintas zonas geográficas de la región, dividiéndola en tres partes; comunas pertenecientes a la costa, comunas pertenecientes al valle y comunas pertenecientes a la cordillera. Con esto se buscó analizar posibles diferencias en el nivel de deterioro que dispongan los puentes dependiendo de la ubicación geográfica.

Otro criterio para separar los puentes corresponde a la fecha de construcción de ellos. Para obtener esta información, debió asistir a las oficinas provinciales de la Dirección de Vialidad, tanto Cautín como Malleco. En estas oficinas, se comunicó con el personal encargado de las reparaciones y

solicitó información de las construcciones de los puentes de madera para separarla por año y ubicación.

Se consideraron puentes de madera con fecha de construcción desde el año 2011 a la fecha, generando intervalos desde el año 2011 a 2013 para los puentes más viejos, luego desde el 2014 a 2016 para los puentes de mediana edad y finalmente aquellas estructuras encasilladas entre el año 2017 a 2019 serían consideradas nuevas. Los puentes fueron agrupados en este rango de años por la factibilidad para encontrar puentes para cada subcategoría (cordillera, costa, valle) y en acuerdo con lo señalado por el Área de Puentes de Vialidad.

Por otra parte, los puentes seleccionados tuvieron una longitud y ancho similar, además, la selección se ajustó a puentes con tipología de carga similar entre ellos, pudiendo existir casos que se escapen a las restricciones. De esta forma se equiparán las condiciones del estudio entre todos los puentes.

Así, procuró estudiar puentes con distinta data y distinta ubicación, esperando resultados de variados niveles de deterioro. Los puentes seleccionados para estudio se ven en la **Tabla 3.1**. La **Figura 3.1** facilita la comprensión de la ubicación de las estructuras seleccionadas para estudio.

Tabla 3.1 Puentes seleccionados por zona geográfica y año de construcción o reparación según fichas de Vialidad.

NOMBRES DE LOS PUENTES			
	2011-2013	**2014-2016**	**2017-2019**
CORDILLERA	MENETÚE	CHINAI	EL SECO
COSTA	TEMO 1	TEMO 2	AGUA LOS CHOROS
VALLE	CUMBLI	LAS GREDAS	DONGUIL

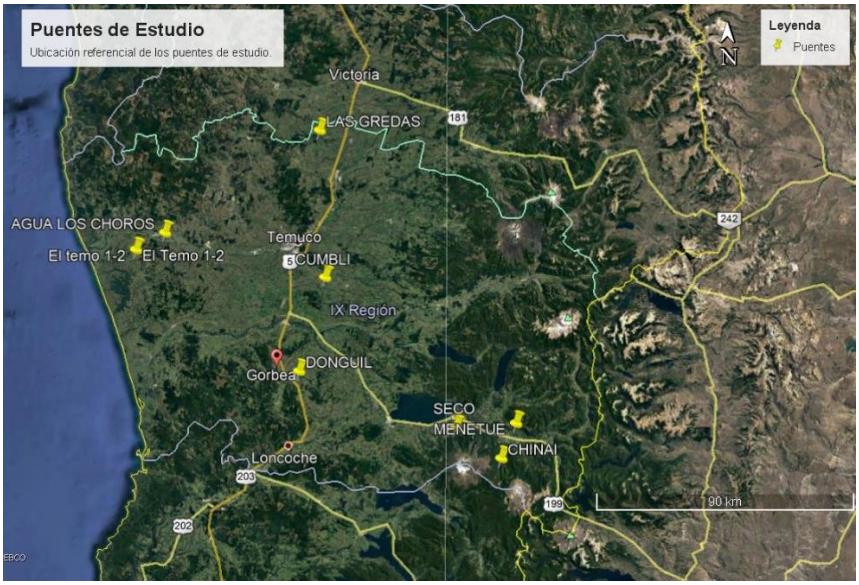

Figura 3.1 Referencia de la ubicación de puentes sometidos a estudio. Fuente: Google Earth.

3.4 Conformación de instructivo de inspección en primera versión.

Se estudió los textos referentes a la madera existentes en Chile. Normativas que definen conceptos, metodologías, capacidad estructural, como también, libros académicos creados principalmente por la CORMA o el Instituto Forestal (INFOR). En ellos investigó sobre el deterioro que sufre la madera, como se distinguen y como se proyectan estos en el tiempo. Asimismo, se indagó sobre los agentes que degradan la madera, bióticos o abióticos y que medios requieren para su desarrollo.

Al mismo tiempo, se investigó sobre las tipologías de puentes de madera en Chile, guiándose principalmente por el Manual de Carreteras, donde se definen las características para los puentes de madera, refiriéndose a escuadrías, partes del puente, especie y clasificación de madera requerida.

Se evaluó separar el análisis de los elementos de un puente en función de la utilidad y la responsabilidad, tanto local como global, que entrega cada uno en la estructura. De esta forma, asignar mayor relevancia de inspección y atención a los elementos más importantes.

En otro aspecto, los instrumentos (Ultrasonido y Resistógrafo) utilizados para realizar una inspección considerados dentro del instructivo provienen de Estados Unidos y Hungría. Encontrar

las empresas proveedoras y los países donde se comercializan los equipos requirió de una búsqueda para definir el mejor precio y calidad de los instrumentos, ya que la empresa que auspició la compra lo requirió.

A la espera que llegaran los instrumentos necesarios a Chile, la combinación de la bibliografía internacional y los conocimientos a nivel nacional dieron paso para formar una primera versión del instructivo de inspección aplicado a puentes de madera, solo con conocimiento y estudio teórico.

En general, la línea a seguir del instructivo corresponde a:

1. Partes de un puente de madera.
2. Definiciones de los tipos de deterioro de la madera.
3. Agentes que degradan la madera.
4. Herramientas e instrumentos necesarios para una inspección.
5. Niveles de inspección y una descripción de cada nivel.
6. Separación de las partes del puente.
7. Checklist de auscultación.

Recalcar que los niveles de inspección plasmados en el instructivo resultaron de un conjunto de conocimientos adquiridos en los distintos manuales internacionales, cobrando fuerte importancia la normativa AASHTO mencionada y el instructivo de Minnesota “Advanced Timber Bridge Inspection”.

3.5 Ensayos en Laboratorio sobre madera en buenas condiciones.

3.5.1 Medidor de onda de estrés (ultrasonido).

Una vez llegados los instrumentos a Chile, el estudiante se dirigió de inmediato a Yumbel en dirección a la planta de tratamiento e impregnación “**Mardones BPB**”, ya que esta empresa brinda el lugar y la materia prima necesaria para la investigación.

En este lugar se planificó aprender a utilizar los instrumentos adquiridos, leyendo las instrucciones y aplicándolos sobre madera para luego verificar los resultados que estos le entregaron.

Con la materia y los instrumentos dispuestos a utilizar, la metodología de trabajo consistió en:

1. Enumerar y medir cada pieza donde serían puestos los transductores del Ultrasonido. Luego, registrar los datos en un archivo Excel, según sea madera de Coigüe o Roble, de primera o rechazo según la normativa Aysen 001-1998.
2. Aplicar el medidor de onda de estrés (ultrasonido) y registrar los resultados en Excel bajo un orden establecido descrito a continuación.
    a. Medir con los transductores en el canto de forma longitudinal y fotografiar.
    b. Medir con los transductores en los extremos y en la mitad de forma transversal y fotografiar.
    c. Medir en la cara superficial con los transductores en 45° de forma longitudinal y fotografiar.
    d. Medir con los transductores cualquier desperfecto o deterioro en la madera y fotografiar.
3. Seleccionar la siguiente pieza a ensayar, completando un total de 43 piezas ensayadas, resumidas en la Tabla 3.2.
4. Tomar la humedad de todas las piezas ensayadas y enumeradas, registrando los datos en Excel.

Figura 3.2 Esquema de medición de Ultrasonido en 45°.

Tabla 3.2 Piezas de madera ensayadas en Yumbel según la especie y la clasificación.

Especie	Primera	Rechazo	Deteriorado
Roble	10	11	-
Coigüe	9	10	3

Con la distancia entre los transductores, el tiempo de la onda entre los transductores y la humedad de la madera, fue posible calcular distintos parámetros, tales como: la velocidad de propagación en la madera, la densidad de la madera y el módulo de elasticidad estático de la pieza ensayada. En la Tabla 3.3 se resume ilustrativamente y con una pequeña reseña la metodología explicada previamente.

Tabla 3.3 Imágenes de la metodología de ensayo aplicado en Yumbel.

A	B
Ensayo de la velocidad de onda longitudinal realizado en la cabeza.	Ensayo de la velocidad de onda transversal.
C	D
Ensayo de la velocidad de onda longitudinal en la cara superior.	Ensayo de la velocidad de onda transversal en una singularidad de una pieza.

3.5.2 Resistógrafo.

Como segunda parte de los ensayos realizados en Yumbel, se utilizó el Resistógrafo en algunas piezas seleccionadas que se consideraron de interés. El criterio consistió en realizar ensayos sobre madera completamente sana y que no presentara singularidades.

Luego, se consideró piezas que presentaran defectos, ya sea rajaduras, nudos, deterioro interno, entre otros, para visualizar los resultados del Resistógrafo generados en escala 1:1 como se muestra en la **Figura 3.3**, comparándolos sobre las piezas ensayadas. Posteriormente, seleccionar otras piezas con defectos que pudieran reconocerse visualmente. Así, se obtuvo resultados de piezas buenas y de piezas con defectos para luego ser comparados entre sí.

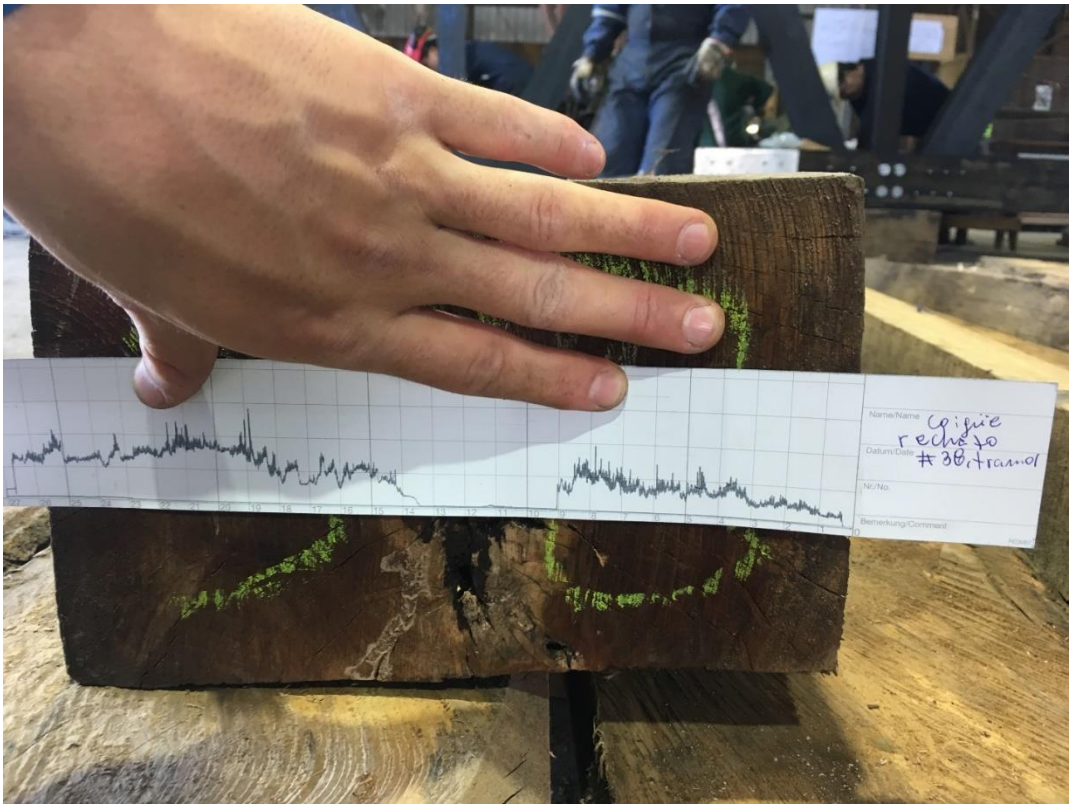

Figura 3.3 Carta de Resistógrafo en escala 1:1.

3.6 Capacitación y asistencia internacional.

Se comunicó con la fábrica que distribuye el Resistógrafo en Estados Unidos y con el fabricante del Medidor de Onda de Estrés en Hungría. Con ellos mejoró la técnica en el uso de los instrumentos, resolvió dudas sobre la escala que se puede generar con el Resistógrafo, verificó las fórmulas encontradas en la bibliografía para el caso del Ultrasonido, consultó la experiencia utilizando los instrumentos en inspección de puentes y su utilidad en inspecciones, entre otras dudas.

Además, obtuvo una capacitación mediante videollamada online para resolver cualquier eventualidad en el uso del Resistógrafo, aprovechando la experiencia del personal extranjero con estos instrumentos y generó una red de contactos con otras entidades que se han dedicado a la inspección en madera.

De igual forma, el estudiante logró contactarse con el Departamento de Transporte de Oregón para conversar sobre su experiencia en la inspección de puentes de madera, conociendo como ellos resolvieron una escala en ambos instrumentos y una combinación de estos, además, cuáles son los principales factores a considerar en una inspección.

Así, se generó una relación que permanece abierta con el Departamento de Transporte de Oregón para futuras consultas en pos de mejorar constantemente el instructivo de inspección destinado a la región.

3.7 Generar criterios para evaluar el deterioro.

Una vez resueltas las dudas técnicas de los instrumentos, se dio paso a conformar una escala visual que encasillara 4 niveles diferentes el deterioro estructural de madera.

Para esto, volvió a leer los 5 instructivos de inspección de Estados Unidos, como también, realizó una segunda lectura de AASHTO y Coding Guide. Toda esta información y el apoyo del personal del Área de Puentes de la Dirección de Vialidad generaron la primera escala visual de deterioro

que se aplicaría en puentes de madera de la región, quedando descrita en una primera ficha de inspección.

3.8 Evaluación e inspección de puentes seleccionados.

En esta etapa se dio paso a aplicar todos los conocimientos adquiridos en el desarrollo de la práctica y en la conformación de la primera versión del instructivo que se espera desarrollar con el actual trabajo.

Comenzó con estudiar los puentes que serían inspeccionados, esto se refiere a la búsqueda de las fichas de cada puente, analizando la descripción de ellos, para luego asistir a terreno. Empezó por los puentes de la costa, en particular el "Temo 1" y el "Temo 2" y finalmente el puente "Agua Los Choros", lugar en el cual utilizó los instrumentos por primera vez sobre casos reales y se obtuvo experiencia para ajustar la escala visual antes creada.

La segunda etapa de inspección consideró los puentes de la cordillera, comenzó por el puente "Chinai", luego evaluó el puente "Menetúe" y finalmente el puente "El Seco". La tercera jornada de inspección fue realizada sobre el puente "Donguil", a continuación, el puente "Cumbli", para terminar, inspeccionó el puente "Las Gredas".

La metodología aplicada en la inspección consistió en:

1. Estudiar ficha del puente antes de asistir a terreno.
2. En terreno, medir el puente completo: largo, ancho, galibo y escuadrías de sus elementos. Además, averiguar restricciones de carga en terreno, ubicación, camino correspondiente, entre otros factores, registrándolo en una planilla Excel propia de cada puente.
3. Fotografiar el puente, tanto aguas arriba, aguas abajo, entrada y salida, las vigas, desde la viga aguas arriba del puente y hasta la viga aguas abajo, tablero de rodado y cualquier singularidad del puente.
4. Seleccionar las piezas que requieren medición de ultrasonido y Resistógrafo mediante el estudio y auscultación del puente completo, luego, aplicar el Xilohigrómetro sobre las piezas seleccionadas.

5. Aplicar el medidor de onda de estrés sobre las piezas seleccionadas previamente.
6. Aplicar el Resistógrafo en los elementos más críticos o sospechosos a raíz del uso del instrumento anterior, prevaleciendo las vigas y pilas de los estribos.
7. Recorrer todo el puente y clasificar visualmente todas las piezas en base a las 4 categorías de condición estructural establecidos.

Cabe señalar que la gran mayoría de los ensayos se enfocó en los elementos categorizados como estructurales, es decir, la aplicación y uso de los instrumentos se realizó en las vigas, pilas y pilares principalmente, puesto que representan mayor importancia en la estabilidad de la estructura, por ende, los parámetros fueron calibrados con casos reales de elementos estructurales en uso.

Además de eso, al practicar las inspecciones en distintos puentes, se comprobó las diferentes complicaciones que se pueden presentar en terreno, difíciles de visualizar a través del estudio teórico, ya sea la accesibilidad a las distintas partes de un puente, los elementos de seguridad requeridos, la dificultad de realizar una inspección en puentes con un galibo de gran altura. Por ende, todo este conocimiento se aprovechó para mejorar el instructivo conformado y prever situaciones en terreno, así, agregar las herramientas que se consideran necesarias para inspeccionar.

3.9 Análisis de resultados

En el trabajo de gabinete se comparó los datos para encontrar diferencias entre la madera utilizada en puentes y la madera nueva de la planta (Yumbel).

Para el Resistógrafo generó dos escalas capaces de corroborar las condiciones de deterioro estructural de la madera. En cambio, para el Ultrasonido generó tres escalas que indiquen el nivel de deterioro en cada pieza del puente, aumentando la información para generar conclusiones de mayor certeza en cada inspección.

Al mismo tiempo, ajustó la escala visual en función de lo observado en terreno, apoyándose de los resultados entregados por los instrumentos y de la experiencia del personal del Área de Puentes.

3.9.1 Escala de Medidor de Ultrasonido.

Para generar una escala que pudiese determinar el nivel de daño presente en un elemento de madera, estudió la bibliografía específica para el medidor de onda de estrés, así, encontró la relación entre la velocidad y la densidad de la madera, como se muestra en la *ecuación (2.5) (página 21)*, confirmada por el fabricante del ultrasonido. Además, este mismo recomendó un factor de ajuste de 0.9, haciendo alusión a transformar el módulo de elasticidad dinámico en estático.

Cabe señalar que se ajustó la velocidad de propagación en la madera para relacionarla al 12% de contenido de humedad, como se señala con la *ecuación (2.4) (página 21).*

Al tener los resultados, se visualizaron los datos de las piezas buenas ensayadas en la planta (muestra patrón). Para comparar los valores consideró el promedio y la desviación estándar de todos los ensayos realizados en ese lugar, creando cuatro (4) grupos: Roble de primera, Roble de rechazo, Coigüe de primera y Coigüe de rechazo.

Se buscó encontrar una diferencia considerable entre los valores de la clasificación “primera” y “rechazo” para diferenciarlas a la hora de inspeccionar un puente. En caso de **no** encontrar diferencias, se unificarían estas categorías (primera y rechazo) y se asumiría un valor que represente ambas clasificaciones.

Además, dada la practicabilidad de los ensayos en terreno y la limitada accesibilidad a las cabezas de las vigas u otras piezas en los puentes, solo consideró los valores obtenidos para las mediciones hechas en las caras de las piezas de la muestra patrón (laboratorio de Yumbel), ver **Tabla 3.3** cuadrante C , considerando el ingreso de los transductores en aproximadamente 45° con respecto a la superficie.

Posteriormente, se visualizaron los datos obtenidos desde los puentes inspeccionados, generando categorías por el año de construcción (en base a la información entregada por Vialidad) o por el emplazamiento del puente. Al separar los datos, buscó diferencias evidentes entre las categorías creadas, ya sea por ubicación o por año de construcción.

Finalmente, comparó los resultados de la madera sana y de la madera en uso con la finalidad de calibrar los resultados y generar una escala con estos mismos. Para fijar los límites inferiores de la escala, se apoyó de las condiciones encontradas en los puentes más críticos en su estructura, en base a una inspección visual objetiva y a los resultados del Resistógrafo.

Se postuló generar 3 escalas distintas. En primer lugar, una escala con los ensayos realizados de forma longitudinal y paralelo a la fibra, considerando el módulo de elasticidad calculado en cada pieza.

En segundo lugar, generar dos escalas con los ensayos realizados de forma transversal y perpendicular a la fibra de la madera, tomando en cuenta solo la velocidad de onda transversal, **no** el módulo de elasticidad ya que no se requiere este parámetro en las secciones transversales de un elemento.

3.9.2 Escala para Resistógrafo.

Ensayó un total de 42 piezas de madera, considerando la muestra patrón y los puentes de estudio. Para generar una escala, digitalizó todos los resultados y aplicó un software (Digitilizer) capaz de transformar el gráfico resultante de un ensayo en puntos asociados a una función. Así, generar una tabla y ponderar los puntos del Resistógrafo, trabajando con 350 puntos por cada carta de Resistografía aproximadamente, como se puede apreciar con la **Figura 3.4** y **Figura 3.5**.

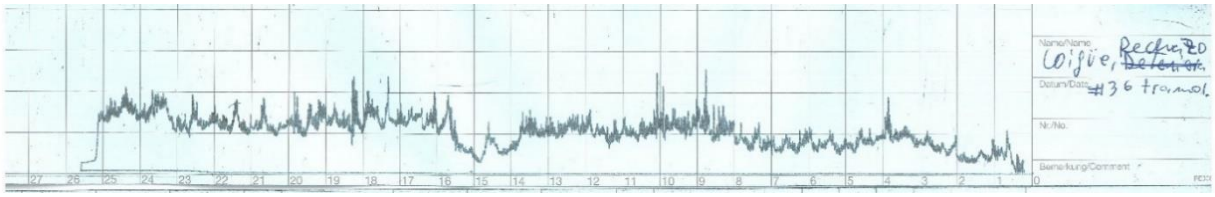

Figura 3.4 Carta de Resultados del Resistógrafo correspondiente a madera de Coigüe de Rechazo.

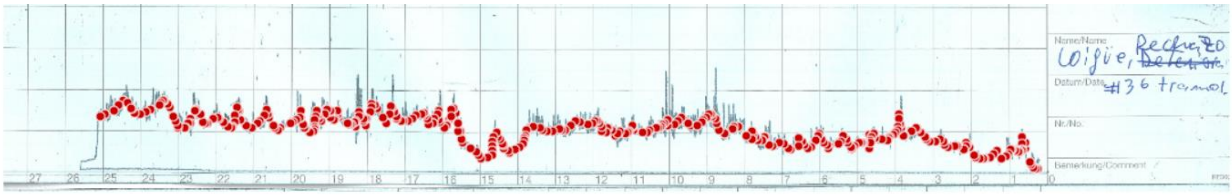

Figura 3.5 Digitalización y obtención de puntos representativos de la función, aprox. 350 puntos. Madera de Coigüe de Rechazo.

Se clasificaron los ensayos realizados sobre madera buena de primera calidad, rechazo, deteriorada y madera de los puentes inspeccionados, al igual como se hizo con el Ultrasonido.

Los resultados de cada categoría mencionada previamente fueron promediados. Cada ensayo del Resistógrafo generó una tabla de valores para cada pieza y estos valores fueron ponderados, así obtuvo un dato de resistencia propio para cada pieza evaluada.

Luego de este proceso, consideró promediar los valores de todas las piezas pertenecientes a una misma categoría, analizando la desviación estándar de cada promedio obtenido y gestar conclusiones de esto. De esta forma, se consiguió un valor de resistencia para el Roble de primera y de rechazo, asimismo el Coigüe de primera y rechazo y para los puentes estudiados.

Pudo comparar las distintas categorías creadas y analizar las diferencias entre ellas. Calibrando este instrumento según la madera ensayada y fijando los limites inferiores mínimos que se requieren para clasificar una pieza en buenas condiciones o deteriorada. En este proceso la precisión en la digitalización y el traspaso de los puntos del Resistógrafo a una tabla de Excel juega un rol fundamental para obtener valores confiables.

Por otra parte, se hizo hincapié en generar una segunda escala que sea capaz de contrastar la resistencia de cada pieza, evitando promedios poco representativos de los resultados. Para esto, se analizó visualmente los resultados entregados por el Resistógrafo, donde los espacios vacíos en el gráfico demuestran que la resistencia equivale a cero en algunos puntos al interior de un elemento.

3.10 Entrega del instructivo en el Área de Puentes.

Para finalizar el desarrollo de la practica controlada en el Área de puentes de la Dirección de Vialidad, se conformó un protocolo de inspección de deterioro estructural para puentes de madera, considerando los resultados obtenidos en la investigación realizada en el presente informe, plasmando las diferentes escalas generadas para cada instrumento, como también, las escalas visuales a aplicar en los distintos elementos de los puentes.

Además, se mencionó las herramientas requeridas para realizar una inspección, donde aplicarlas y como interpretar los resultados. Se indicaron las fórmulas utilizadas para ajustar la velocidad de propagación en la madera llevándola al 12% de contenido de humedad.

Por otra parte, se describe claramente la metodología y los pasos a seguir en una inspección, cual es la información que debe estudiar antes de asistir a terreno y cómo afrontar la auscultación. Todo esto se cierra con un checklist de auscultación que facilite la tarea de quien inspecciona y no olvide ningún paso.

Se dialogó con el personal del Área de Puentes de la Dirección de Vialidad, para corregir en primera instancia el instructivo creado, definiendo detalles, metodologías, procedimientos, resultados y criterios de deterioro de la madera.

Finalmente, se hizo entrega del texto creado al jefe del Área de Puentes de la Dirección de Vialidad, Región de La Araucanía, con la observación de seguir perfeccionando la investigación, aprovechando los lazos generados en Estados Unidos y otros países en post de actualizar el instructivo a medida que avanzan los conocimientos y la tecnología para la inspección de puentes.

Cabe señalar que el instructivo completo no es anexado en el presente informe, puesto que parte del instructivo contiene la misma información que el presente trabajo y se evita caer en la repetición de la información. Por lo tanto, el Anexo C, D y E muestran los resultados que conforma el instructivo creado para la oficina del Área de Puentes de la Dirección de Vialidad, Región de La Araucanía.

CAPÍTULO 4
RESULTADOS Y DISCUSIÓN

CAPÍTULO 4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

En primer lugar, se diferenciaron las partes de un puente de madera tipo, considerando las láminas del manual de carreteras y la experiencia del personal del Área de Puentes, formando 3 categorías; seguridad, serviciabilidad y estructural.

Esta segregación se genera a raíz de la importancia e influencia de cada elemento en la estabilidad del puente, ya que una grieta genera mayor riesgo en una viga que un tablón del rodado, por ende, no pueden clasificarse con el mismo criterio.

Dentro de los elementos de seguridad se consideró principalmente el conjunto de las barandas y guardarruedas. Para la serviciabilidad se seleccionó el tablero de rodado, las resistencias y travesaños y las piezas de carácter estructural corresponden a las vigas y piezas propias del estribo.

Con los ensayos practicados sobre las piezas de la muestra patrón (planta forestal de Yumbel), se obtuvo resultados para el medidor de onda de estrés (ultrasonido) y el Resistógrafo.

Para comenzar, se presentarán los resultados entregados por el medidor de onda de estrés sobre la muestra patrón y sobre los puentes estudiados, posteriormente se presentarán los resultados del Resistógrafo de las mismas piezas.

4.1 Medidor de Onda de estrés en la muestra Patrón.

4.1.1 Módulo de Elasticidad.

Los ensayos fueron practicados según un orden de operación establecido y en distintos lugares de las piezas de madera. La **Tabla 4.1** muestra los valores del módulo de elasticidad estático (MOE) alcanzados por todas las piezas ensayadas y separados por especie evaluada.

Tabla 4.1 Promedio de MOE estático en MPa según especie ensayada.

Promedio MOE (MPa)				
	Roble		**Coigüe**	
	Primera	Rechazo	Primera	Rechazo
Máximo	15.383	17.006	12.631	12.374
Mínimo	10.938	10.176	7.559	6.468
Promedio ($\overline{X}$)	**13.462**	**13.086**	**10.148**	**9.856**
D. Estándar (σ)	1.383	2.179	1.782	1.727
Coef. De Variación (C.V)	10%	17%	18%	18%
Diferencia P-R	3%		3%	

Al comparar los resultados entre Roble primera y rechazo, la calidad primera posee resultados más concentrados (baja variabilidad) con un coeficiente de variación de 10%. En cuanto al Coigüe, las dos calidades ensayadas presentan valores de Módulo de elasticidad similares, tanto en los máximos como en el promedio, además, el coeficiente de variación resulto ser el mismo para el promedio de ambas calidades (18%). Mencionar que la dispersión de estos resultados es similar a otros estudios realizados sobre madera con los mismos instrumentos (Soto, 2017).

Además, la diferencia entre los promedios de primera y rechazo calculados para ambas especies es de un 3%, prácticamente despreciable. Bajo este criterio, se considera la madera de primera y la madera de rechazo como un solo grupo de trabajo, solo separado por la especie de la madera.

Por lo tanto, considerando todas las restricciones anteriores, los valores que definen la madera sana y en condiciones ideales para ser usada se establecen como: **13.462** MPa para el Roble, siendo de la categoría primera calidad. Asimismo, la madera de Coigüe fija su Módulo de elasticidad en **10.148** MPa. La poca diferencia entre las clasificaciones induce a unificar la clasificación en un solo grupo.

4.1.2 Velocidad de propagación transversal (m/s).

Los valores resultantes desde las mediciones realizadas a través de la sección transversal de las piezas se presentan en la **Tabla 4.2,** donde se compara la velocidad de propagación a través de la sección.

Tabla 4.2 Promedio de velocidad de propagación en la sección transversal.

Promedio Velocidad Transversal (m/s)				
	Roble		Coigüe	
	Primera	Rechazo	Primera	Rechazo
Máximo	2.382	2.473	2.412	2.357
Mínimo	698	479	1.470	1.198
Promedio ($\overline{X}$)	**1.790**	**1.653**	**2.016**	**2.018**
D. Estándar (σ)	325	362	290	243
Coef. De Variación (C.V)	18%	22%	14%	12%
Diferencia P-R	8%		0%	

Al igual que el caso anterior, se puede evidenciar una diferencia entre las distintas calidades de la madera (primera y rechazo) en el caso del Roble, alcanzando una diferencia de un 8%. Además, la dispersión de los datos y el coeficiente de variación están dentro de límites aceptados en otras investigaciones realizadas sobre madera (Cartes *et al*., 2017) y (Soto, 2017).

Por lo tanto, se consolida en un grupo la madera de primera calidad y la madera de rechazo, considerando un promedio de velocidad de **1.790 m/s** para el Roble y una velocidad de **2.016 m/s** para el Coigüe, considerando el promedio de todas las piezas de calidad primera ensayadas.

4.2 Medidor de Onda de estrés en elementos principales de los puentes.

Por otro lado, la información obtenida desde los elementos principales de los puentes en uso (vigas) fue filtrada en función de parámetros como la fecha de construcción y la localización de estos. Los resultados se muestran en la Tabla 4.3 y Tabla 4.4; comparación entre la ubicación de los puentes, el año de estos y la velocidad transversal a la sección (m/s), y la segunda tabla hace referencia a la

ubicación de los puentes, el año de construcción y el módulo de elasticidad medido longitudinalmente en la pieza (MPa).

Tabla 4.3 Comparación de puentes por año fecha y velocidad de propagación transversal (m/s).

NOMBRES DE LOS PUENTES vs VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN (m/s).						
	2011-2013	2014-2016	2017-2019	**($\bar{X}$)**	**(σ)**	**C.V.**
CORDILLERA	**MENETÚE** 1.948,37	**CHINAI** 1.670,6	**EL SECO** 1.004,6	**1.329,2**	**426,0**	31%
VALLE	**CUMBLI** 1.191,43	**LAS GREDAS** 1.570,4	**DONGUIL** 1.172,6	**1.150,7**	**179,4**	17%
COSTA	**TEMO 1** 1.405,09	**TEMO 2** 1.415,0	AGUA LOS CHOROS 2.015,8	**1.258,1**	**14,4**	0%
($\bar{X}$)	**1.514,97**	**1.552,0**	**1.088,6**			
(σ)	**390,25**	**128,8**	**118,8**			
C.V.	26%	8%	11%			

Tabla 4.4 Comparación de puentes por año y ubicación vs el MOE (MPa).

NOMBRES DE LOS PUENTES vs MOE (MPa)						
	2011-2013	2014-2016	2017-2019	**($\bar{X}$)**	**(σ)**	**C.V.**
CORDILLERA	**MENETÚE** 11.618,1	**CHINAI** 14.234,4	**EL SECO** 9.040,7	**11.631,1**	**2.596,9**	22%
VALLE	**CUMBLI** 7.206,2	**LAS GREDAS** 13.530,4	**DONGUIL** 18.246,7	**12.994,4**	**5539,8**	43%
COSTA	**TEMO 1** 9.027,2	**TEMO 2** 12.544,9	AGUA LOS CHOROS 20.443,9	**10.786,0**	**2.487,4**	23%
($\bar{X}$)	**9.283,8**	**13.436,6**	**13.643,7**			
(σ)	**2.217,1**	**848,7**	**6.509,7**			
C.V.	24%	6%	48%			

El análisis de los datos se ha descartado el puente Agua Los Choros, puesto que la madera de esta estructura corresponde a la especie Eucaliptus, por lo tanto, queda totalmente segregado para comparar los resultados.

Asimismo, es necesario indicar que el Xilohigrómetro tuvo un alcance límite hasta 60% de humedad, una humedad más alta es indicada como “High”. Por lo tanto, se consideró un nivel de 65% cuando el resultado fuese “High”. Las piezas ensayadas estaban por sobre el 30% de humedad.

En la **Tabla 4.3** existe una distribución irregular de los resultados. Al comparar los resultados del Medidor de Onda de estrés por año, se verificó que no existe una tendencia clara. Se esperó que indicaran que la velocidad disminuye a medida que el puente se torna más viejo, pero los resultados no son capaces de comprobar este supuesto, dado que existe una fuerte influencia del puente El Seco sobre el segmento del año 2017 a 2019.

Sin embargo, al eliminar este puente (EL Seco) de los resultados tampoco existe congruencia, si bien el segmento 2017-2019 aumentó su velocidad de propagación cerca de un 10%, esta sigue siendo inferior a las velocidades de años anteriores.

El módulo de elasticidad ensayado y analizado posee un significado más convincente, como se ve en la Tabla 4.4. A medida que el puente es más antiguo el módulo de elasticidad, evaluado principalmente en vigas, disminuyó en razón del tiempo. En otras palabras, a medida que aumenta la edad del puente, el deterioro en él genera una disminución de sus propiedades mecánicas, afectando el módulo de elasticidad y disminuyendo sus prestaciones y serviciabilidad.

¿Por qué el módulo de elasticidad presenta datos contradictorios a las velocidades medidas transversalmente en las piezas, en las cuales se indica un promedio más bajo en el periodo 2017-2019?

La información del Módulo de Elasticidad posee algunas características. En primer lugar, existe una gran desviación estándar en el periodo 2017-2019, dado el gran nivel de deterioro que alcanza el puente “El Seco”. En segundo lugar, la propagación de la onda de forma longitudinal en la madera (cálculo Módulo de Elasticidad) tiene mucho mayor probabilidad de evitar un deterioro, esto genera que algunos defectos sean imperceptibles en los resultados entregados por el Medidor de Onda de Estrés.

Es por esto que es altamente recomendable realizar mediciones transversales con una separación menor a 1 metro entre cada medición a lo largo de todo un elemento, o bien, cuando se observen particularidades (deterioros) en las piezas, es decir, para resultados más convincentes y confiables se debe realizar la mayor cantidad de mediciones en la sección transversal. El Anexo B (página 93) muestra un ejemplo de ensayos realizados cada un metro en dos vigas diferentes.

En síntesis, no se encuentra una tendencia capaz de definir el comportamiento de los puentes a través del tiempo en función de los resultados obtenidos en esta investigación. Por lo tanto, se planteó analizar los puentes caso a caso o considerar una selección de puentes mayormente deteriorados, elegidos con ayuda de la experiencia del personal del Área de Puentes, el uso del Resistógrafo y analizando los datos de las tablas **Tabla 4.3** y **Tabla 4.4**.

Cabe señalar que la información brindada por las oficinas provinciales no es específica en su descripción, por ende, al modificar levemente un puente, se ingresa una nueva ficha al sistema de registro, indicando el año de reparación o mejoramiento realizado, lo que no quiere decir que se hayan cambiado todas las piezas del puente. Lo anterior quedó demostrado al asistir a terreno.

En suma, al inspeccionar el puente "El Seco" se evidenció un claro deterioro en sus elementos, tal como se muestra en **Figura 4.1**, con avanzada pudrición en sus piezas. Esta estructura tiene fecha de reparación o construcción (así se indica en las fichas) el año 2018, incoherente con la calidad de su estructura. Se infiere que ese fue el año de una reparación realizada al puente y no existe fecha exacta de construccion de este mismo. El Anexo A (página 91) puede demostrar otros deterioros encontrados en puentes estudiados.

Figura 4.1 Base de pila en evidentes condiciones de deterioro, Puente El Seco.

En la comparación por ubicación de los puentes, la velocidad de propagación transversal es más alta en puentes de la cordillera y más baja en puentes del valle, en cambio, el MOE es más alto en puentes del valle y más bajo en puentes de la costa. No sigue un patrón claro capaz de definir un comportamiento que se asocie con la ubicación de los puentes. Se esperó que los puentes de la cordillera tuviesen mayor deterioro cuantificable, por efecto de la humedad ambiental, pero esto no queda demostrado en los resultados.

4.3 Escala para Elementos Principales Aceptables, Dañados y Críticos.

4.3.1 Escala Módulo de Elasticidad, Velocidad Transversal y Resistógrafo.

La experiencia del personal del Área de Puentes, la comparación de todos los datos, las observaciones y auscultaciones aplicadas en terreno y la lectura de las cartas de Resistografía, ayudaron a conformar tres grupos de puentes: Puentes en mala calidad (**Tabla 4.5**), Puentes Sospechosos de deterioro (**Tabla 4.6**) y puentes de buena calidad (**Tabla 4.7**).

Se considera que toda la madera usada en los puentes es de Roble, otras especies de madera deberán ser calibradas. Además, los ensayos consideraron y evaluaron los elementos principales de los puentes, definidos como **elementos estructurales** en la clasificación de las piezas de un puente, esto se refiere a vigas, pilas y pilares principalmente.

En las tablas se muestra el promedio de cada una de las propiedades (MOE, Velocidad transversal y Resistógrafo) y el coeficiente de variación que presentan los resultados, ítem “Todos”. Asimismo, para cada tabla se han segregado los valores que se escapan de la media en cada propiedad, destacando en celeste los puentes que se utilizaron para calcular el promedio que represente las características del grupo, lo cual se muestra en el ítem “Selección” acompañado del Coeficiente de Variación (C.V.). Así se define con mayor precisión las propiedades de cada nivel de deterioro.

Tabla 4.5 Elementos clasificados como mala calidad y sus propiedades.

Puentes seleccionados MALA CALIDAD			
	MÓDULO DE ELASTICIDAD (MPa)	**VELOCIDAD TRANSVERSAL** (m/s)	**RESISTÓGRAFO**
TEMO 1	9027,2	1405,09	0,545
CUMBLI	7206,2	1191,43	0,711
EL SECO	9040,7	1004,6	0,585
DONGUIL	18246,7	1172,6	1,188
($\bar{X}$) Todos	10.880,2	1193,42	0,757
C.V	(46%)	(14%)	(39%)
($\bar{X}$) Selección	**8.424,7**	**1122,87**	**0,614**
C.V	**(13%)**	**(9%)**	**(14%)**

Tabla 4.6 Elementos clasificados como Sospechosos y sus propiedades.

Puentes seleccionados SOSPECHOSO DE CALIDAD			
	MÓDULO DE ELASTICIDAD	**VELOCIDAD TRANSVERSAL**	**RESISTÓGRAFO**
	(MPa)	**(m/s)**	
MENETÚE	11618,1	1948,37	0,589
TEMO 2	12544,9	1415,0	0,732
($\bar{X}$) Todos	12.081,5	1.681,7	0,661
C.V	(5%)	(22%)	(15%)
($\bar{X}$) Selección	**12.081,5**	**1.415,0**	**0,661**
C.V	**(5%)**	**(0%)**	**(15%)**

Tabla 4.7 Elementos considerados de Buena calidad y sus propiedades.

Puentes seleccionados BUENA CALIDAD			
	MÓDULO DE ELASTICIDAD (MPa)	**VELOCIDAD TRANSVERSAL** (m/s)	**RESISTÓGRAFO**
LAS GREDAS	13530,4	1570,4	0,745
CHINAI	14234,4	1670,6	0,905
($\bar{X}$) Todos	**13.882,4**	**1.620,5**	**0,825**
C.V	**(4%)**	**(4%)**	**(14%)**

Se verifica que el coeficiente de variación disminuyó cuando se realizó un filtro interno de los puentes, lo que quiere decir que el promedio es más representativo con los datos analizados (puentes seleccionados en el ítem "Selección"). Es más, se puede ver que el coeficiente de variación no supera el 15%, lo cual es menor en comparación con otras investigaciones de madera que han sido mencionadas. (Cartes et al., 2017) y (Soto, 2017).

Los datos indican que los elementos ensayados con el medidor de onda de estrés deberán ser clasificados como "Crítico" si el módulo de elasticidad al 12% de humedad sea **8.425 MPa** o inferior, o la velocidad transversal a la fibra al 12% de humedad sea **1.123 m/s** o inferior, o bien, el promedio de Resistografía es inferior a **0,614.**

De igual forma, los elementos ensayados con el medidor de onda de estrés serán "Dañado" si el módulo de elasticidad al 12% de humedad varía entre **8.425 MPa** a **13.462 MPa.** Por otro parte, la velocidad transversal a la fibra al 12% de humedad es debe variar entre **1.123 m/s** a **1.620 m/s.** Finalmente, el promedio de Resistografía varía entre **0,614** a **0,825.**

Además, para todas las zonas declaradas "Dañado" o "Crítico" o que sean sospechosas de deterioro interno se debe obtener mayor información a través del uso del Resistógrafo, con tal de determinar las condiciones reales en las cuales se encuentran los elementos, tanto en resistencia de la madera como en pérdida de sección interna.

Finalmente, los elementos ensayados con el medidor de onda de estrés estarán clasificados como "Aceptable" cuando el módulo de elasticidad al 12% de humedad sea **13.462 MPa** o superior (muestra patrón de Roble), o la velocidad transversal a la fibra al 12% de humedad sea **1.620 m/s** al o superior, o bien, el promedio de Resistografía es superior a **0,825.**

Cabe indicar que se utilizó un factor de corrección de velocidad para llevar las mediciones al 12% de humedad, lo que afecta el módulo de elasticidad. Las ecuaciones de modificación se explican en capítulos anteriores.

El resumen de las distintas categorías se presenta en la **Tabla 4.8**.

Tabla 4.8 Tabla resumen de los valores asociados a cada categoría.

Categoría	Módulo de elasticidad (MPa)	Velocidad transversal (m/s)	Resistógrafo
Crítico (D)	< 8.425	< 1.123	< 0,614
Dañado (C) (promedio)	8.425 < MOE < 13.462 12.081	1.123 < V <1.620 1.415	0,614 < R < 0,825 0,661
Aceptable (B)	> 13.462	> 1.620	> 0,825

4.4 Tercera escala de verificación en sentido transversal con el Medidor de Onda de Estrés.

El trabajo en terreno y el análisis de las divergencias encontradas en cada pieza sugieren que en un mismo elemento no debiese existir una diferencia de velocidades transversales mayor al 30% entre todas y cada una de las mediciones realizadas en cada pieza. Es ideal que las mediciones no tengan una separación mayor a 1 (m) entre cada una de ellas como se refleja en la **Figura 4.2** y **Figura 4.3**.

La **Figura 4.2** muestra un desperfecto en la pieza, luego, la **Tabla 4.9** corrobora la diferencia en las mediciones registradas en esta pieza. Asimismo, en la tabla se puede evidenciar que la variación de los resultados alcanza un 33%, por ende, la zona señalada en la imagen es altamente sospechosa de deterioro y es recomendable utilizar el Resistógrafo cuando se encuentren resultados similares con el medidor de onda de estrés.

Tabla 4.9 Mediciones de Ultrasonido aplicadas en una pieza con deterioro.

Pieza	Especie	Dimensiones	Lugar	Distancia	Medición			Promedio	Velocidad (m/s)
					1	2	3		
15	Roble	6X8	1	0,207	186	195	190	0,0002	2309
15	Roble	6X8	2	0,207	206	169	175	0,0002	1129
15	Roble	6X9	3	0,207	187	171	174	0,0002	1167
15	Roble	6X8	4	0,208	148	157	151	0,0002	1368
15	Roble	6X8	5	0,207	130	134	135	0,0001	1088
15	Roble	6X8	6	0,21	158	152	160	0,0002	1340
								$(\bar{X})$	1400
								(σ)	459
								C.V.	33%

Figura 4.2 Deterioro encontrado en una pieza y medido para comparar.

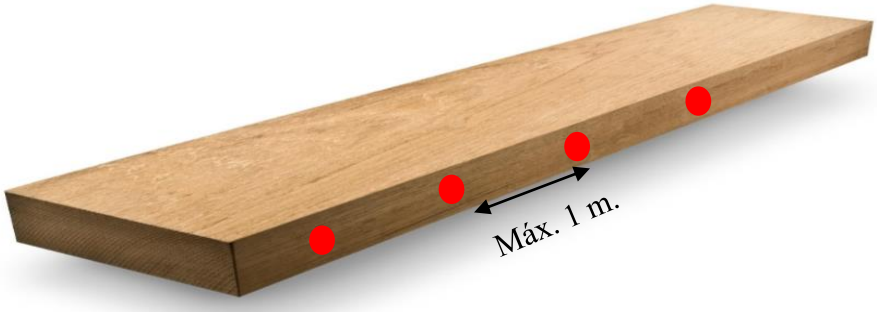

Figura 4.3 Puntos que indican donde debiese medir transversalmente, idealmente cada 50 cm.

En resumen, al evaluar los elementos de un puente se deberá comparar el módulo de elasticidad encontrado en una viga en sentido longitudinal y la velocidad de propagación encontrada en la sección transversal. Además, se generará una escala en terreno para comparar las mediciones transversales a lo largo de la pieza, esas mediciones no superaran una diferencia mayor al 30% entre todas y cada una de las mediciones al compararlas entre sí, generando un limite de dispersión para los ensayos en un mismo elemento. Si la diferencia es mayor al 30% se tratará de un ensayo poco confiable, indagar las condiciones internas con el Resistógrafo en el punto más crítico.

El Anexo B (página 93) presenta ensayos realizados a un metro de distancia entre ellos sobre distintas vigas, los resultados indican una alta variabilidad, sospechando deterioro de las vigas ensayadas y requiriendo el uso del Resistógrafo.

4.5 Resistógrafo en la muestra Patrón.

La investigación planeó obtener un valor ponderado de la resistencia para cada pieza ensayada con el Resistógrafo, segregando el Coigüe, el Roble y la madera utilizada en los puentes.

Los distintos resultados se muestran a continuación en Tabla 4.10 y Tabla 4.11. El principio de funcionamiento del Resistógrafo se relaciona directamente con las propiedades mecánicas de la madera. Este instrumento es ideal para verificar las condiciones internas de la madera en una escala 1:1, localizando con alta precisión la ubicación de un deterioro existente.

En las tablas se indica la resistencia calculada para cada muestra, el promedio de calidad primera y rechazo, la desviación estándar y el coeficiente de variación.

Tabla 4.10 Resultados de escala de Resistógrafo sobre Coigüe sano.

COIGÜE					$(\overline{X})$	(σ)	C.V.
Calidad	**Primera**						
Muestra	1	2			0,750	0,043	6%
Resistógrafo	0,719	0,780					
Calidad	**Rechazo**						
Muestra	1	2	3	4	1,098	0,139	13%
Resistógrafo	1,277	1,124	0,952	1,038			
Valor Muestra patrón					**0,982**	**0,210**	**21%**

Tabla 4.11 Resultados de escala de Resistógrafo sobre Roble sano.

	ROBLE							$(\overline{X})$	(σ)	C.V.
Calidad	**Primera**									
Muestra	1	2	3	4	5	6	7	0,829	0,237	29%
Resistógrafo	1,128	0,782	1,044	0,514	0,532	0,896	0,907			
Calidad	**Rechazo**									
Muestra	1	2	3	4	5			0,982	0,314	32%
Resistógrafo	1,305	0,806	0,734	0,722	1,342					
Valor Muestra patrón								**0,893**	**0,269**	**30%**

Con los datos es posible generar una escala que varía desde 0 cuando la madera no tiene resistencia hasta 4 cuando la madera alcanza la mayor resistencia.

La madera de rechazo tiene mayor resistencia según los ensayos practicados con el Resistógrafo, tanto para el Coigüe como para el Roble. Sin embargo, se ha determinado el valor promedio de todas las muestras en cada una de las especies, fijando el límite considerado para madera sana en base a la muestra patrón.

El valor promedio considerado para la madera sana ensayada en Yumbel sobre la muestra Patrón alcanza **0,982** en la escala de resistencia para el Coigüe. En cambio, para el Roble el valor de resistencia es de **0,893**. La desviación estándar es elevada, siendo un 30% del promedio. Tomando

en consideración el comportamiento de la madera y la anisotropía de esta, se acepta este coeficiente de variación de la muestra patrón. Sin embargo, para considerar que un elemento de un puente esta bueno se tomará el valor de **0.825** en base a los datos obtenidos desde los puentes de estudio.

4.6 Segunda escala para el Resistógrafo.

Existen casos especiales válidos de analizar, como el caso de la viga 4 del puente Donguil en el extremo de salida, a la cual se le practicaron 2 ensayos para verificar los resultados obtenidos, tal como se muestra en la Figura 4.4 y Figura 4.5.

En estas cartas se aprecian caídas de la curva al menos en cuatro puntos, lo que representa grietas o rajaduras en el elemento inspeccionado. Este tipo de deterioros es considerado más peligroso, sobre todo al tratarse de las vigas del puente. No obstante, la escala del Resistógrafo para la viga 4 del puente Donguil indica un valor de 1,557 promedio, como se ve en la **Tabla 4.12**, siendo casi el doble de la resistencia exigida para madera buena.

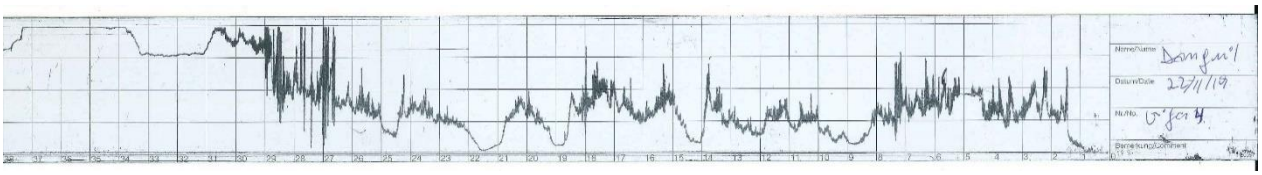

Figura 4.4 Primer Resistógrafo aplicado en la viga 4 de la salida del puente Donguil.

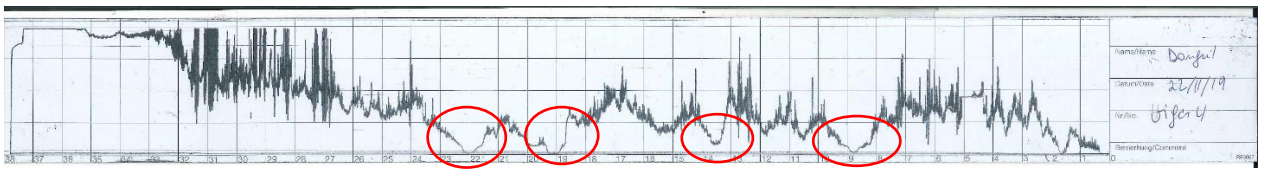

Figura 4.5 Segundo Resistógrafo aplicado en la viga 4 de la salida del puente Donguil.

Tabla 4.12 Resultados de escala de Resistógrafo sobre madera de puentes.

Puentes	Elemento	Resultado
CHINAI	VIGA 4	0,889
	VIGA 1	0,922
CUMBLI	VIGA 3	0,711
EL SECO	PILAR 4	0,154
	VIGA 1	0,919
	VIGA 3	0,624
	VIGA 4	0,642
EL TEMO 1	VIGA 1	0,545
EL TEMO 2	RESISTENCIA 2	0,415
	RESISTENCIA	0,423
	VIGA 3	1,167
	VIGA 4	0,921
MENETUE	GUARDARUEDA	0,774
	VIGA 6	0,403
DONGUIL	VIGA 2	1,640
	VIGA 1	0,845
	VIGA 4 (2)	**1,599**
	VIGA 4	**1,515**
	VIGA 6	0,344

Lo anterior indica que siempre debe analizar la carta resultante del Resistógrafo en busca de deterioro interno de la madera, aprovechando que la escala de resultados es 1:1 con respecto a la profundidad de penetración. Todo esto se reafirma con la **Figura 4.6** y la **Tabla 4.12** nuevamente.

La viga 1 del puente Donguil posee una resistencia de **0,845** en la escala del Resistógrafo (**Tabla 4.12**) clasificándose como madera en buenas condiciones. No obstante, la **Figura 4.6** contradice este promedio calculado. Es más, puede verificar que una parte de la madera posee una resistencia muy alta pero el resto de la sección transversal prácticamente no aporta estructuralmente, por ende, existe un valor de Resistógrafo poco representativo de la situación real.

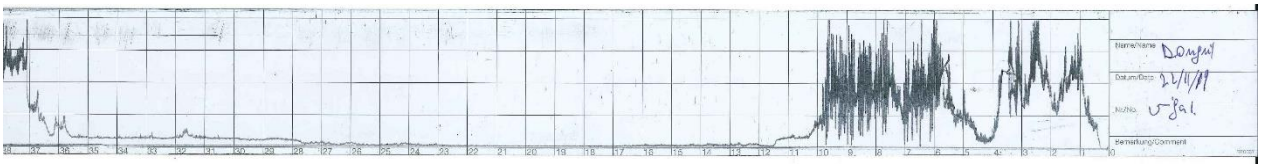

Figura 4.6 Resistógrafo 1 aplicado sobre la viga 1 de la salida del puente Donguil.

Se debe generar una segunda escala para el Resistógrafo, la cual compare la distancia acumulada de tramos sin resistencia (cercana o en 0 en el Resistógrafo) versus la dimensión total de la pieza evaluada. Se plantea que los resultados de cualquier elemento tendrán como daño máximo un 10% de la sección ensayada, es decir, la distancia acumulada de resistencia igual a cero será máximo 10% con respecto a la dimensión total de un elemento ensayado.

Una caída de un 10% representa que existe un 10% menos de sección capaz de resistir, siempre y cuando el ensayo haya sido realizado paralelo al eje fuerte. Cuando el ensayo haya sido realizado paralelo al eje débil, la reducción de la inercia será de un 27.1%.

Para obtener una reducción del 10% de la resistencia en el eje fuerte, se requiere de una disminución de 2.15% de la sección ensayada de forma paralela al eje débil. Considerar que los ejes fuerte y débil de las piezas son considerados tal y como son puestas las piezas en los puentes.

Esta escala limita la dispersión de los datos, siendo una escala de confiabilidad de los resultados. Siempre se deberá leer la carta de Resistografía para comprender el estado interno de la madera y verificar si los resultados del Resistógrafo son fidedignos.

4.7 Comparación de Resistógrafo y Medidor de Onda de Estrés.

El análisis conjunto de la información brindada por ambos instrumentos se puede resumir utilizando elementos de los puentes y piezas de la muestra patrón. La correlación encontrada entre el MOE (MPa) y el Resistógrafo es de 0.22 considerada débil y es preferible no relacionarlas directamente.

La correlación entre el MOE y la Velocidad transversal es de 0.27, también considerada débil. En cambio, la correlación entre la velocidad transversal y el Resistógrafo es 0.8, siendo una correlación significativa.

Los resultados de las piezas ensayadas en puentes se presentan en la Tabla 4.13.

Tabla 4.13 Comparación entre Ultrasonido y Resistógrafo.

Estructura	Elemento	Longitudinal (Mpa)	Transversal (m/s)	Resistografo
Temo 2	Resistencia	10.108	1050,2	0,415
Temo 1	Viga 1	10.983	1.311	0,545
Chinai	Viga 1	13.629	1530	0,889
Donguil	Viga 6	19.126	661	0,344
Roble	Primera	10.308	698	0,514

Los resultados indican que cuando el ultrasonido arroja valores sospechosos, el Resistógrafo puede corroborar la información. Un ejemplo de esto es la Viga 1 en el puente El Temo 1 donde la velocidad transversal es 1311 m/s, es decir, velocidad de propagación dentro de un rango de incertidumbre (velocidad menor a 1415 m/s).

El Resistógrafo confirma una resistencia de 0.545 en la propia escala que ha sido creada previamente. Además, al ver la **Figura 4.7** se encuentran como agravantes dos caídas de la resistencia en el final de la medición (de derecha a izquierda), lo que indica que es recomendable sustituir la pieza.

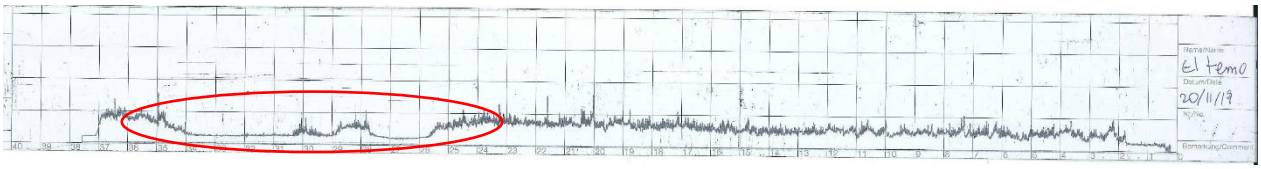

Figura 4.7 Carta de Resistografía de la Viga 1 de puente El Temo 1.

Otra pieza analizada es de roble de primera calidad que posee una velocidad transversal de 698 m/s, sumamente baja al tratarse de una pieza de primera calidad, se aplicó el Resistógrafo, obteniendo un promedio de 0,514 en la escala creada, confirmando las sospechas de baja resistencia, como se muestra en la **Figura 4.8**.

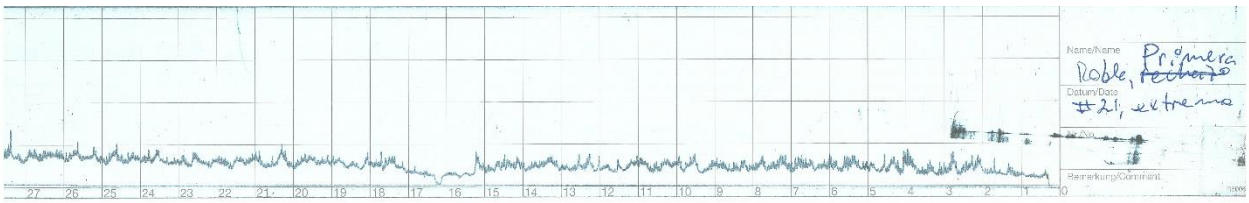

Figura 4.8 Carta de Resistografía obtenida de una pieza de primera calidad.

El resumen de resultados finales separados por tres categorías creadas, Aceptable, Dañado y Crítico, se presenta en la **Tabla 4.8** (página 49). Los puentes serán clasificados como Críticos cuando alguna de sus piezas estructurales (vigas) resulte con un valor inferior a los señalados en la **Tabla 4.8**. Considerar el uso de ambos instrumentos y sus escalas de confiabilidad creadas para mayor certeza, prevaleciendo el Resistógrafo.

En el caso de la clasificación Aceptable, los puentes deberán obtener todos sus resultados (Resistógrafo, MOE y velocidad transversal) superiores a los mencionados en la categoría "Aceptable" de la misma tabla, en caso contrario, serán Dañados y se recomendara una inspección futura.

4.8 Clasificación de los elementos de un puente y tipos de inspección.

4.8.1 Definición de 3 tipos de elementos en un puente.

En la conformación del instructivo de inspección de puentes de madera, se generó una clasificación de los elementos de un puente con ayuda de la bibliografía y con apoyo del personal del Área de puentes.

Se separaron los elementos de un puente en función de su responsabilidad e importancia en la estabilidad de la estructura, puesto que, la incidencia de deterioro en una viga es mayor a la incidencia en una cinta de baranda, tablón de rodado o cualquier otra pieza menor. Además, al separar los elementos del puente, se indica que instrumentos deben aplicarse para las diferentes categorías, optimizando el uso de recursos en una inspección.

Para apoyar la comprensión de esta separación estructural vuelva a verificar las **Figura 2.4**, **Figura 2.5**, **Figura 2.6** y Figura 2.7 (página 10 a 12) Los resultados se presentan en **Tabla 4.14**:

Tabla 4.14 Clasificación de los elementos de un puente y nivel de inspección necesario.

Categoría	Elementos del puente	Instrumentos y nivel de inspección.
Seguridad	Barandas Guarda ruedas.	Inspección visual Inspección física (prueba de sonido con martillo, medidor de profundidad de grietas). Xilohigrómetro.
Serviciabilidad	Tablones de rodado Tablones de pasillo Travesaños y Resistencias	Inspección visual Inspección física (prueba de sonido con martillo, medidor de profundidad de grietas). Xilohigrómetro.
Estructurales	Vigas Pilas o pilares Tablones de respaldo Sopandas	Inspección visual Inspección física (prueba de sonido con martillo, medidor de profundidad de grietas). Xilohigrómetro. Medidor de onda de ultrasonido. Resistógrafo

Asimismo, se crearon 4 categorías de inspección, diferenciadas por el nivel de detalle y la información que obtienen, el uso de recursos (instrumentos) que demandan y el tiempo que requiere cada una. Se define entonces: Inspección primaria, inspección rutinaria, inspección en profundidad e inspección especial, Anexo C (página 94).

La **Figura 4.9** es un diagrama de flujo que explica y resume el proceso de inspección que debe llevarse a cabo para completar la ficha de inspección en terreno presentada en el subcapítulo 4.9.

El proceso consta de Inspección Primería, siguiendo con Inspección Rutinaria, lo que conlleva una inspección visual y física, completando la Ficha F 2. Luego, se debe aplicar una Inspección en Profundidad en todos los elementos clasificados como C o D, utilizando los instrumentos especiales (Medidor de Onda de Estrés y Resistógrafo). Finalmente, con todas las inspecciones aplicadas, se procede a calificar los elementos del puente, a través del diagrama de flujo mostrado en **Figura 4.10**, utilizando tres indicadores (MOE, V. transversal, Resistógrafo), así, completando la Ficha F 3 C presente en la ficha de inspección mostrada en el subcapítulo 4.9.

Las **Figura 4.11**, **Figura 4.12** y **Figura 4.13** comprende un proceso resumido para la obtención de los indicadores 1, 2 y 3, módulo de elasticidad, velocidad transversal y Resistógrafo respectivamente. Los resultados de estos diagramas serán utilizados en la **Figura 4.10** para calificar los distintos elementos de un puente, terminando en una ficha resumen nomenclatura F 4.

Con la información plasmada en F 4 podrá clasificarse el puente en función de su nivel de deterioro estructural encontrado.**Figura 4.10** Diagrama de flujo para explicar el proceso de Calificación de los elementos, complementado con **Figura 4.11**, **Figura 4.12** y **Figura 4.13**.

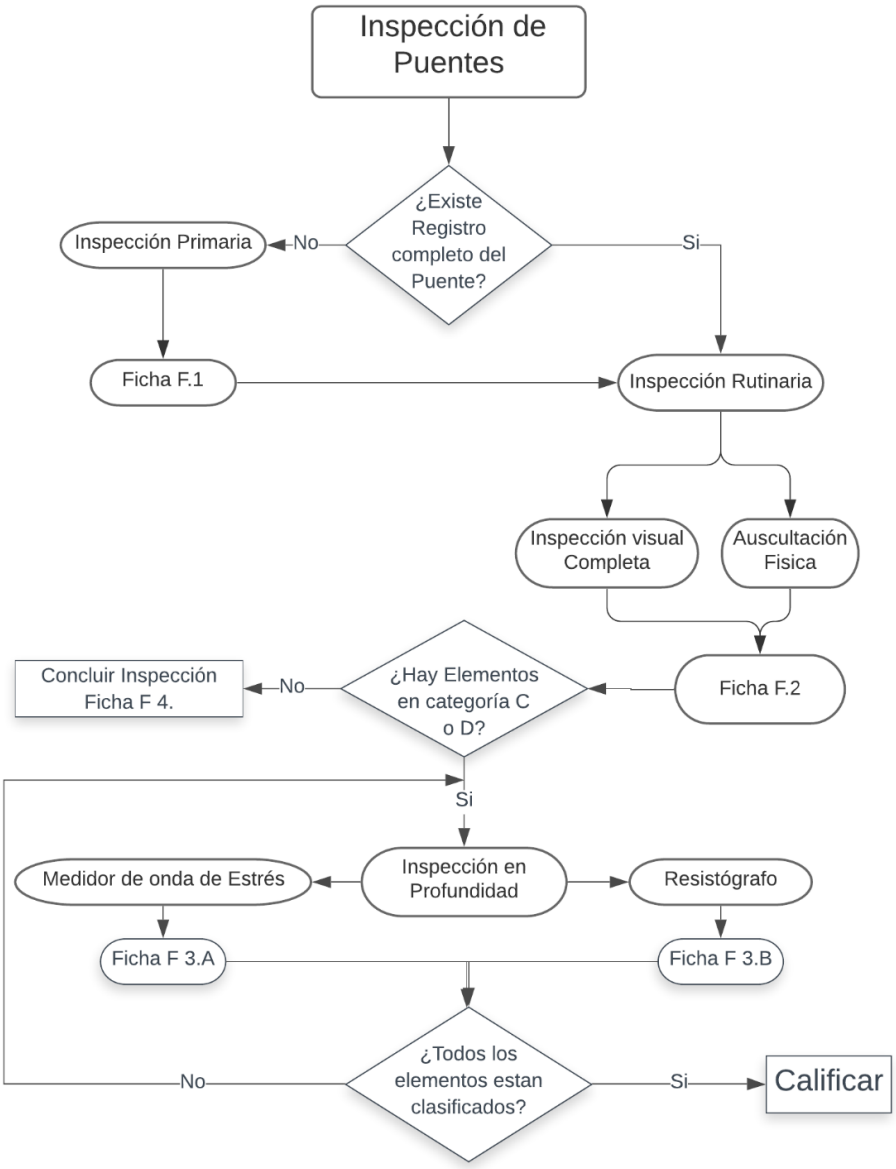

Figura 4.9 Diagrama de Flujo para proceder en una inspección de puentes.

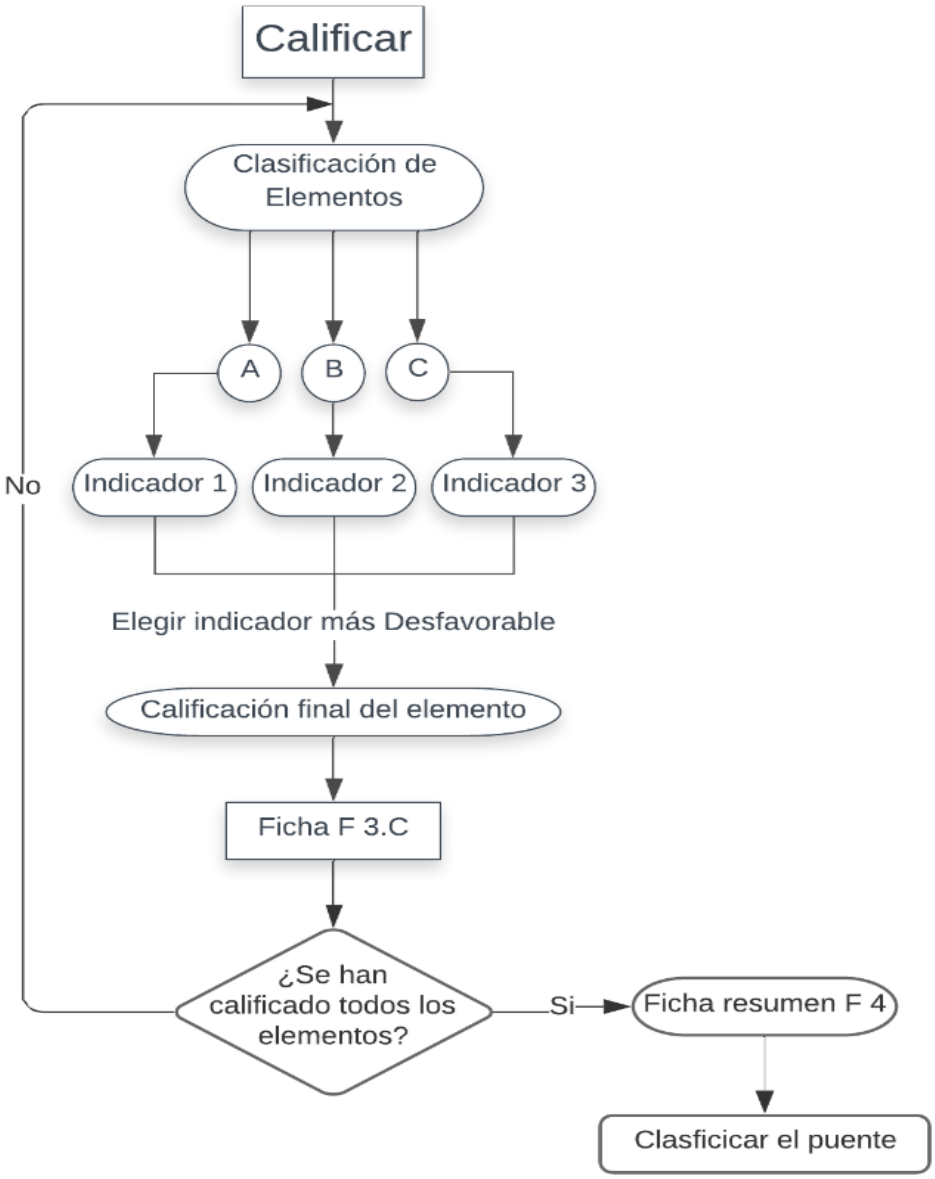

Figura 4.10 Diagrama de flujo para explicar el proceso de Calificación de los elementos, complementado con **Figura 4.11**, **Figura 4.12** y **Figura 4.13**.

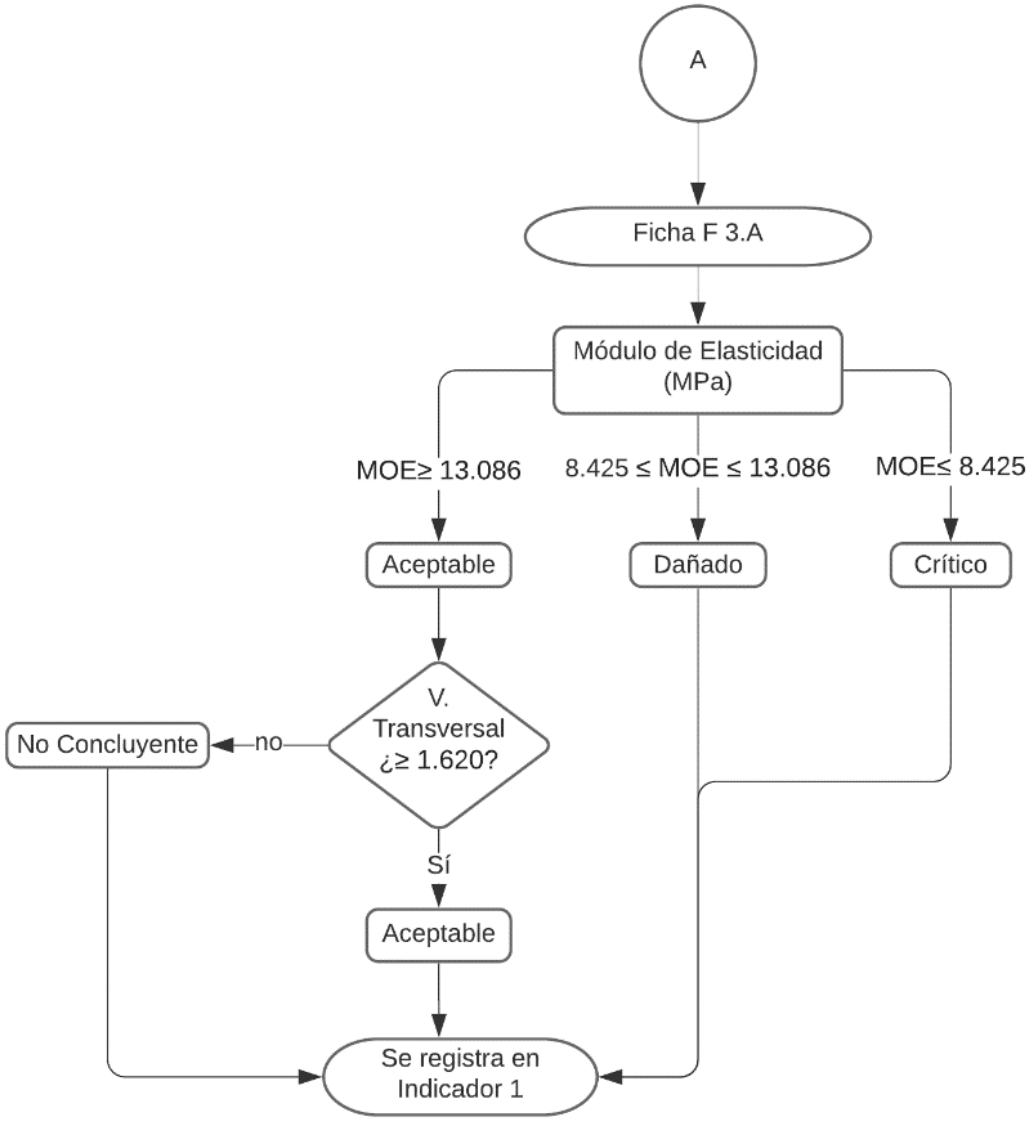

Figura 4.11 Diagrama de flujo para explicar la obtención del indicador 1

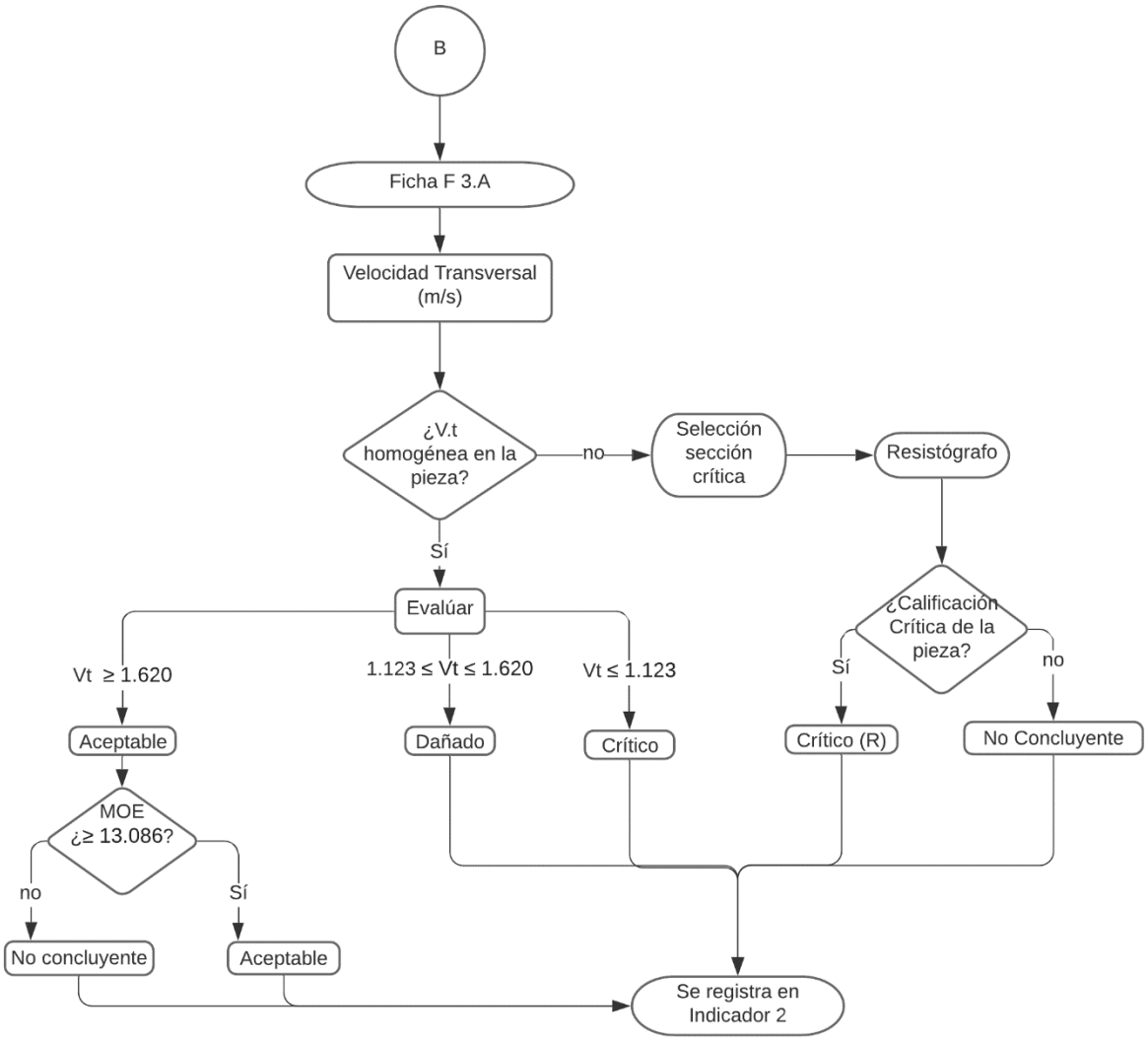

Figura 4.12 Diagrama de Flujo que explica el proceso de obtención del Indicador 2.

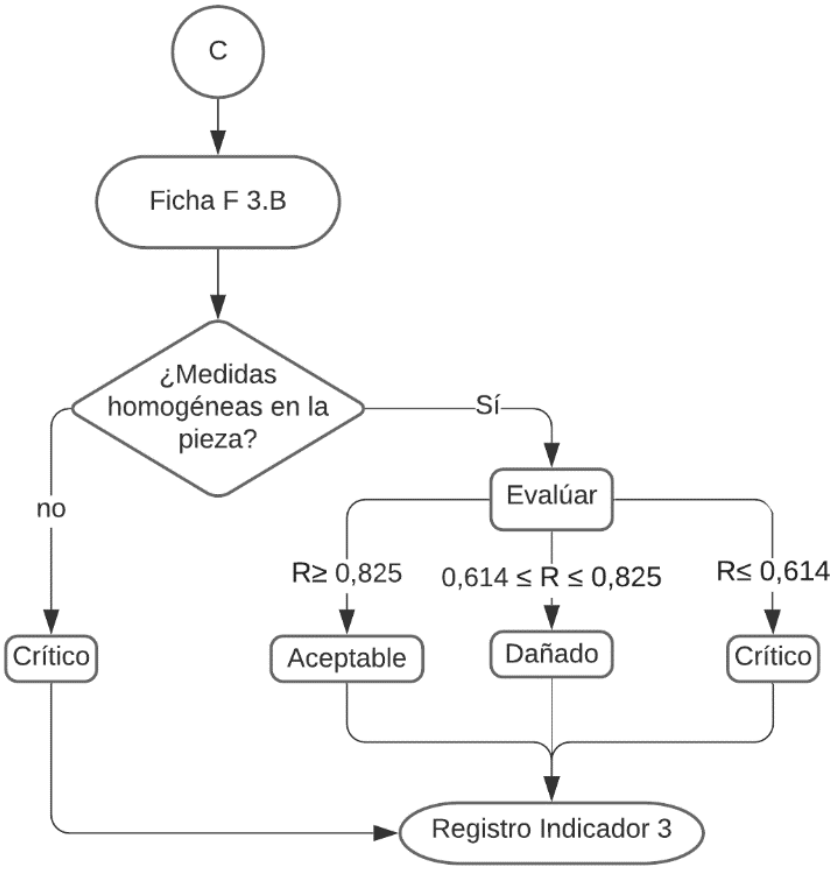

Figura 4.13 Diagrama de Flujo que explica el proceso para la obtención del Indicador 3.

4.9 Ficha de evaluación de las condiciones estructurales para puentes de madera.

4.9.1 Alcance

La ficha de evaluación de las condiciones estructurales conforma una serie de preguntas y análisis para determinar la condición estructural de los puentes en base a criterios establecidos en el instructivo creado. Su objetivo es fijar un criterio de inspección y determinar la estabilidad y seguridad de los puentes de madera de la Región de La Araucanía.

4.9.2 Inspección Primaria, F 1.

4.9.2.1 Ubicación del puente.

Nombre del puente _____. Fecha de inspección _____.
Región _____, Comuna _____, Provincia _____,
Rol Ruta (*) _____, Nombre Ruta _____, km. de ubicación _____.
Cauce que cruza _____, Coordenadas (UTM) _____.
(*) Su respuesta pueden ser: Sin Rol o la identificación del camino correspondiente.

4.9.2.2 Descripción de la Estructura.

Long. Total _____ (m). Ancho Calzada _____(m). Ancho Pasillo _____ (m).
Luz mayor _____(m). Gálibo _____ (m). Nro. De Cepas _____.
Nro. De Vigas _____. ¿Tiene defensas fluviales? (*) _____. ¿Tiene Esviaje? _____.
Preservante de madera (*) _____. Capacidad de la estructura (*) _____.
(*) Su respuesta pueden ser: Si, No, No registra o un número cuando corresponda.

4.9.2.3 Identificación de escuadrías.

Materialidad de las vigas _____, largo de las vigas _____ (m), dimensiones de las vigas _____ (plg). Materialidad estribos _____. Materialidad superficie de rodado _____.

Figura 4.14 Vista superior de un Puente y sus Elementos

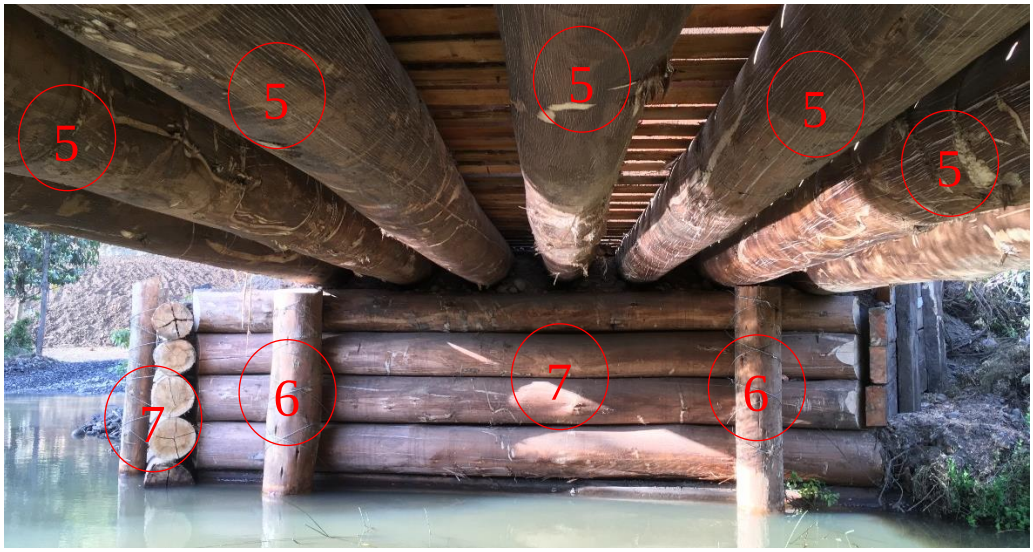

Figura 4.15 Vista Inferior de Puente y sus Elementos.

Tabla 4.15 Elementos de un puente guiándose por las imágenes.

Barandas (1)	Guardaruedas (2)	Tablones de Rodado (3)	Tablones de pasillo (Anexo)
Travesaños y Resistencias (4)	Pilas o Pilares (6)	Vigas (5) Sopandas (Anexos)	Tablones de Respaldo (7)

4.9.3 Inspección Rutinaria, Inspección Visual y Física, Ficha F 2.

Para rellenar la siguiente tabla deberá recorrer el puente observando los deterioros presentes en cada uno de los elementos del puente.

Las tablas de clasificación de deterioros (rubricas de deterioro) presentes en Anexo lo/a guiaran con el criterio de inspección.

Considerar el deterioro de mayor envergadura o importancia (sobre todo rajaduras, pudrición o perdida de sección, perdida de conectores, apolillado).

Debe indicar la cantidad de elementos que se encuentran en cada una de las clasificaciones estructurales, luego indicar el total inspeccionado.

Tabla 4.16 Ficha F 2. Resumen de cantidad de elementos en las distintas clasificaciones.

Elementos	Índice estructural				Total Inspeccionado	Calificación del conjunto elemento (**)
	Bueno (A)	Aceptable (B)	Dañado (C) (*)	Crítico (D) (*)		
Seguridad						
Barandas						
Guardaruedas						
Total (***)						
Serviciabilidad						
Tablones de Rodado						
Tablones de Pasillo						
Resistencias y Travesaños						
Total (***)						
Estructural						
Vigas						
Pilas o Pilares						
Tablones de Respaldo						
Sopandas						

(*) Todos los elementos estructurales clasificados como "Dañados (C)" o "Crítico (D)" deberán ser inspeccionados mediante el uso de instrumentos (Resistógrafo y Medidor de Onda de Estrés) en un nivel superior de inspección (Inspección en Profundidad). La clasificación resultante de la aplicación de los instrumentos en estos elementos reemplazará la clasificación visual anterior.

(**) Para elementos de seguridad y serviciabilidad, el conjunto elemento tomará la clasificación más representativa, puede ser la mayoría o un criterio de inspección conservador en post de la seguridad.
(***) Cuantificar la cantidad de elementos clasificados bajo una misma categoría (Bueno, Aceptable, Dañado, Crítico)

4.9.4 Inspección en profundidad, Ficha F 3-A, F 3-B y F 3-C.

Se debe aplicar sobre todos los elementos estructurales clasificados como "Dañados (C)" o "Crítico (D)". La Tabla 4.17 y Tabla 4.18 corresponden a pautas para recolectar información desde los ensayos del Medidor de Onda de estrés y Resistógrafo respectivamente.
Toda la información plasmada en estas tablas debe ser resumida en la Tabla 4.19.

Tabla 4.17 Ficha F 3-A Registro de mediciones realizadas con Medidor de Onda de Estrés

Caracterización			Mediciones			Resultados		
Identificación del Elemento	Especie	Punto de medición (m) (*)	Humedad (%)	Promedio de tiempo (µs)	Distancia (m)	Velocidad (m/s)	Velocidad H=12% (m/s)	MOE (MPa)
(*elemento inspeccionado)*								

(*) distancia desde la entrada del puente hasta el punto de medición en (m).

Tabla 4.18 Ficha F 3-B Registro de mediciones realizadas con el Resistógrafo.

Caracterización			Resultado
Elemento	Especie	Punto de medición *(*)*	Promedio Resistografía
(*elemento inspeccionado)*			

(*) distancia desde la entrada del puente hasta el punto de medición en (m).

Tabla 4.19 Ficha F 3-C. Resumen de Resultados obtenidos con el uso de instrumentos sobre distintos elementos sospechosos

	Indicador 1	**Indicador 2**	**Indicador 3**	
Identificación del elemento	**MOE (*)**	**V. transversal (*)(**)**	**Resistógrafo (*)**	**Clasificación final (***)**
(elemento especifico inspeccionado)				

(*) su resultado puede ser: Aceptable (B), Dañado (C), Crítico (D) o No Concluyente (N.C.).
(**) Si V. transversal es variable en la pieza, aplicar el Resistógrafo sobre el punto más crítico.
(***) Debe considerar la calificación más conservadora en post de la seguridad, predominando el Resistógrafo.

4.9.4.1 Tabla de elementos estructurales, Ficha F 4.

Recolección de datos para los elementos estructurales considerando la clasificación visual y los resultados entregados por los instrumentos según corresponda.

Tabla 4.20 Ficha F 4. Cuadro resumen de la información levantada desde los elementos estructurales.

Identificación del elemento	**Bueno (A) (*)**	**Aceptable (B) (*)**	**Dañado (C) (*)**	**Crítico (D) (*)**	**Total Inspeccionado**	**Calificación del conjunto elemento (**)**
Vigas						
Pilas o Pilares						
Tablones de Respaldo						
Sopandas						
Total						

(*) indicar la cantidad de elementos en dicha categoría. Entre paréntesis indicar que porcentaje representa del total inspeccionado.
(**) clasificar el conjunto elemento, ejemplo: el conjunto de vigas será clasificadas como C, guiarse por la Tabla 4.21.

Tabla 4.21 Resumen del criterio para clasificar un conjunto de elementos.

Identificación del elemento	Bueno (A)	Aceptable (B)	Dañado (C)	Crítico (D)
Vigas	≥80%	≥ 70%	≥60%	<60%
Pilas o Pilares	≥80%	≥ 70%	≥60%	<60%
Tablones de Respaldo	≥70%	≥60%	≥50%	<50%
Sopandas	≥70%	≥60%	≥50%	<50%

(*) Si más de un 80% de las vigas totales están buenas, se clasificarán como (A). Si más de un 60% de las vigas totales están buenas, se clasificarán como (C), si menos de un 60% de las vigas están buenas se clasificarán como (D). Sino considerar el más representativo Extrapolar con el resto de los elementos.

A continuación, se define el criterio para clasificar un puente. Debe sumar todos los elementos que se clasifiquen bajo una misma categoría (Bueno, Aceptable, Dañado o Crítico) y aplicar el criterio descrito a continuación:

Criterio	- Elementos en categoría C o D = 0	Puente sano. (A o B).
	- Elementos Estructurales en categoría C ≥ 1 - Elementos de Serviciabilidad o Seguridad C ≥ 2	Agendar reparación o inspección en periodo no superior a 12 meses. (C)
	- Elementos Estructurales en categoría D ≥ 1 - Elementos de Serviciabilidad o Seguridad D ≥ 2	Reparación de los elementos inmediatamente. Posible clausura del puente hasta reparación. (D).

En caso de encontrarse algún elemento estructural en nivel 4, el puente inmediatamente se clasificará como Crítico (D).

Indique con una X como clasificaría el puente.

Clasificación del puente.	A o B	C	D

Nota: *(señalar cualquier observación que considere pertinente).*

Anexar todas las fotografías de la inspección realizada en una hoja aparte.

Nivel de Inspección alcanzado _____.

Nombre Inspector _____ Firma _____

4.9.5 Anexo Ficha de Inspección, Clasificación y criterio visual de los elementos.

En la siguiente sección se describirán las partes de un puente, cual es la función, su ubicación dentro de la estructura, los niveles de inspección que le corresponden ser aplicados en función de su importancia dentro del puente y los niveles de deterioro categorizado.

4.9.5.1 Elementos de Seguridad.

Estos elementos están destinados a brindar la seguridad dentro del puente, lo que se refiere a mantener a todos los vehículos y transeúntes en el puente, evitando caídas por los extremos laterales o cualquier acción que resulte en el perjuicio para el usuario.

Tabla.4.22 Descripción de elementos de seguridad y técnicas de evaluación.

Técnicas de evaluación.	Inspección visual Inspección física (prueba de sonido con martillo, medidor de profundidad de grietas). Xilohigrómetro.
Barandas. Corresponden a barreras laterales a lo largo de todo el puente. Tienen la función de contener tanto a vehículos como personas dentro del puente. En algunas estructuras están ausentes. Se fijan con un tope/taco de madera a las resistencias y travesaños a través de pilares. Se componen de pasamanos, cinta de baranda, pilar de baranda y tope de madera.	

Guarda Ruedas. Es una pieza de madera, en general de 6”x 8”, ubicada en ambos costados del puente. La función de este elemento radica en ser una medida de contención para los vehículos, como también, separar los pasillos peatonales del tablero.	

Tabla 4.23 Rubrica e índices para una inspección visual de deterioro en elementos de seguridad.

Elementos / **Criterios**	**Barandas Guarda Ruedas.**			
	Índice Estructural			
Deterioros y defectos	**Bueno**	**Aceptable**	**Dañado**	**Crítico**
	A	**B**	**C**	**D**
Agujero/ Acebolladura	No existen agujeros o acebolladura en los elementos	Agujeros menores que no implican una pérdida de capacidad. Sonido integro.	Presencia de acebolladura o agujeros que generan pérdida de capacidad estructural. Hasta 50% de la sección	Elemento deteriorado, modificación de capacidad estructural, más de un 50% de la sección.
Fractura/ Grieta/Rajadura	Presencia de grietas menores. penetración menor al 20%.	Penetración entre 20-50% en la sección del elemento y no en zonas de tensión.	Penetración mayor al 50% en la sección del elemento o más del 35% en zonas de tensión Fracturas en la madera.	Penetración del miembro completo o más del 35% en zonas de tensión o presencia de rajadura.
Pudrición/Perdida de sección	No existe pudrición, perdida de sección.	Afecta a menos del 25% del elemento.	Afecta a más del 50% en zonas de bajo riesgo, alejadas de las conexiones.	Pudrición evidente de los elementos, zonas de riesgo, afloramiento de cuerpos frutales.
Carbonatación/ Apolillado	No existe	Afecta a menos del 30% del elemento.	Afecta a más del 30% en zonas de bajo riesgo, alejadas de las conexiones.	Presencia en más del 40% del elemento.
Perdida de conectores.	Existen todos los conectores.	Perdida de menos del 30% de los conectores.	Perdida mayor al 30% de los conectores.	Elemento sin soporte estructural.
Reparación	No existe reparación	Reparación en perfectas condiciones	Reparaciones deterioradas o se recomienda reparar	Requiere reparar de inmediato, o perdida de las reparaciones.
Choques o Impactos	Sin sospechas de impacto vehicular	Impacto superficial, estructura en buenas condiciones	Daño de la estructura, pérdida de capacidad o de sección.	Impacto que genera la pérdida del elemento completo

4.9.5.2 Elementos de Serviciabilidad.

Los elementos destinados a brindar serviciabilidad del puente tienen el objetivo de entregar un estándar de calidad de la superficie de rodado apto para ofrecer una grata experiencia del usuario. Lo anterior se refiere a que el usuario no sufra inconvenientes al atravesar el puente. Se componen de los tablones de rodado, tablones de pasillo, travesaños y resistencias.

Tabla 4.24 Descripción de elementos de serviciabilidad y técnicas de evaluación.

Técnicas de evaluación.	Inspección visual Inspección física (prueba de sonido con martillo, medidor de profundidad de grietas). Xilohigrómetro.
Tablones de rodado. Corresponden a tablones que delimitan el sitio por donde transitan las ruedas de los vehículos. Hacen el traspaso de cargas desde los vehículos a los travesaños y así estos distribuyen a las vigas. Se posicionan longitudinalmente en el puente.	
Tablones de pasillo. Estos tablones están dirigidos al tránsito de las personas. Se ubican longitudinalmente a los costados del puente y demarcan el transito segregado de los peatones.	

Travesaños y Resistencias. Estos elementos corresponden a "vigas" transversales que cruzan el puente de costado a costado, se ubican varios elementos contiguos para cubrir la longitud del puente. Logran distribuir las cargas de los vehículos en todas las vigas del puente.	

Tabla 4.25 Rubrica e índices para una inspección visual de deterioro en elementos de serviciabilidad.

Elementos / **Criterios**	**Tablones de rodado** **Tablones de pasillo** **Travesaños y Resistencias**			
	Índice Estructural			
Deterioros y defectos	**Bueno**	**Aceptable**	**Dañado**	**Crítico**
	A	**B**	**C**	**D**
Agujero/ Acebolladura	No existen agujeros o acebolladura en los elementos	Agujeros menores que no implican una pérdida de capacidad. Sonido integro.	Generan pérdida de capacidad estructural. Hasta 50% de la profundidad de la sección afectada	Elemento deteriorado, modificación de capacidad estructural, más de un 50% de la sección afectada
Fractura/ Grieta/Rajadura	Presencia de grietas menores. penetración menor al 20% de la cara afectada.	Penetración entre 20-50% en la sección del elemento, excepto en zonas de tensión.	Penetración mayor al 50% en la sección del elemento o más del 35% en zonas de tensión. Fracturas en la madera.	Penetración del miembro completo o más del 35% en zonas de tensión. Presencia de rajadura.
Pudrición/Perdida de sección.	No existe pudrición, perdida de sección.	Afecta a menos del 20% del elemento.	Afecta a menos del 35% en zonas de bajo riesgo,	Evidente en los elementos. Mayor al 35%. Presente en zonas de riesgo,

			alejadas de las conexiones.	afloramiento de cuerpos frutales
Carbonatación/ Apolillado	No existe	Afecta a menos del 30% del elemento.	Afecta a más del 30% en zonas de bajo riesgo, alejadas de las conexiones.	Presencia en más del 40% del elemento.
Perdida de conectores.	Existen todos los conectores.	Perdida de menos del 30% de los conectores.	Perdida mayor al 30% de los conectores.	Elemento sin soporte estructural.
Reparación	No existe reparación	Reparación en perfectas condiciones	Reparaciones deterioradas o se recomienda reparar	Requiere reparar de inmediato, existe perdida de las reparaciones anteriores.
Aplastamiento	No existe	El aplastamiento es imperceptible (menor a 10%) o no afecta la serviciabilidad.	Aplastamiento menor al 30% del espesor del elemento. Despreciable para el usuario.	Aplastamiento mayor al 30% del espesor afectado. Perceptible para el usuario.
Deformación, Alabeo, Arqueadura, Encorvadura, Acanaladura	No existe	No afecta la serviciabilidad del puente	Los elementos afectados disminuyen la serviciabilidad del puente.	Evidente a simple vista, distribución de las cargas irregular.

4.9.5.3 Elementos Estructurales.

Los elementos estructurales son aquellos encargados de mantener la capacidad de carga del puente, generando estabilidad de la estructura y permitiendo el paso de todos los vehículos para los cuales fue diseñado el puente. En general, son los elementos más importantes del puente, si estos elementos fallan, el puente puede colapsar. Dentro de esta categoría se encuentran las vigas, las pilas o pilares y los tablones de respaldo que conforman los estribos, cuando estos son de madera.

Tabla 4.26 Descripción de elementos Estructurales y técnicas de evaluación

Técnicas de evaluación.	Inspección visual Inspección física (prueba de sonido con martillo, medidor de profundidad de grietas). Xilohigrómetro. Medidor de onda de ultrasonido. Resistógrafo
Vigas. Corresponden a los elementos estructurales de mayor incidencia en el puente, por lo tanto, si fallan las vigas, fallará el puente. Se posicionan longitudinalmente en el puente y su función es soportar todas las cargas de la estructura y traspasarla a la infraestructura.	
Pilas o pilares. Forman parte de los estribos, ayudan con la contención de los terraplenes de accesos del puente, trabajan en conjunto con los tablones de respaldo. Si fallan los pilares, se pierde la estabilidad de los accesos, por tanto, existe el peligro de derrumbe de los estribos.	
Tablones de respaldo Al igual que los pilares, los tablones de rodado se encargan de otorgar la estabilidad y contención de los terraplenes, por lo tanto, si fallan estos elementos, existe peligro de derrumbe en los accesos del puente.	

Sopandas. Estos elementos se ubican entre las vigas y las cepas, cuando estas existen. Cumplen la función de reforzar el apoyo de las vigas, aportando mayor área en la conexión.	

Tabla 4.27 Rubrica e índices para una inspección visual de deterioro en elementos Estructurales.

Elementos / **Criterios**	**Vigas** **Pilas o pilares** **Tablones de respaldo** **Sopandas**			
	Índice Estructural			
Deterioros y defectos	**Bueno**	**Aceptable**	**Dañado**	**Crítico**
	A	**B**	**C**	**D**
Agujero/ Acebolladura	No existen agujeros o acebolladura en los elementos	Agujeros menores que no implican una pérdida de capacidad. Sonido integro.	Acebolladura o agujeros que generan pérdida de capacidad estructural. Hasta 30% de la sección afectada	Elemento deteriorado, más de un 30% de la sección afectada
Fractura/ Grieta/Rajadura	Presencia de grietas menores. Penetración menor al 15% de la cara afectada.	Penetración entre 15-50% en el elemento. Excepto en zonas de tensión.	Penetración mayor al 50% en el elemento o más del 20% en zonas de tensión. Fracturas en la madera.	Penetración de grietas en el elemento completo o más del 20% en zonas de tensión. Presencia de Rajadura.
Pudrición/Perdida de sección.	No existe pudrición ni pérdida de sección.	Menos del 15% de la sección transversal en zona de baja tensión. No existe en zonas de tensión.	Afecta a menos del 35% en zonas de bajo riesgo, menos de 25% zona de tracción.	Mayor al 35% en zonas de baja tensión. Zonas de tensión mayor a 25%. Afloramiento de cuerpos frutales

Carbonatación/ Apolillado	No existe	Afecta a menos del 25% del elemento.	Afecta a más del 25% en zonas de bajo riesgo, alejadas de las conexiones.	Presencia en más del 40% del elemento.
Perdida de conectores.	Existen todos los conectores.	Perdida de menos del 25% de los conectores.	Perdida mayor al 25% de los conectores.	Elemento sin soporte y estabilidad estructural.
Reparación	No existe reparación	Reparación en perfectas condiciones	Reparaciones deterioradas o se recomienda reparar	Requiere reparar de inmediato, existe perdida de las reparaciones.
Aplastamiento	No existe	El aplastamiento es imperceptible (menor a 10%).	Aplastamiento menor al 20% del espesor del elemento.	Aplastamiento mayor al 20% del espesor afectado.
Deformación, Alabeo, Arqueadura, Encorvadura, Acanaladura	No existe	No afecta la estabilidad del puente	Cambio notorio, distribución de cargas desigual.	Notorio a la vista, ha cambiado la configuración. Inclinaciones del puente, modificación de los niveles de la estructura.
Desalineado.	No existe	Menor al 20% al ancho de apoyo del elemento.	Menor al 35% al ancho de apoyo del elemento	Notorio a simple vista, vigas, pilas o tablones corridos. Mayor a 35% del ancho de apoyo del elemento.

Tabla 4.28 Rubrica de clasificación de elementos estructurales.

Categoría	Módulo de elasticidad (MPa)	Velocidad transversal (m/s)	Resistógrafo
Crítico (D)	< 8.425	< 1.123	< 0,614
Dañado (C) (promedio)	8.425 < MOE < 13.462 12.081	1.123 < V <1.620 1.415	0,614 < R < 0,825 0,661
Aceptable (B)	> 13.462	> 1.620	> 0,825

4.10 Ejemplo de ficha de inspección actual.

La Tabla 4.29 corresponde a un ejemplo real de una ficha de inspección propuesta por el Manual de Carreteras y utilizada actualmente dentro del Área de Puentes para ejecutar una inspección a una estructura sin diferenciar su materialidad ni identificar detalladamente los daños que se puedan encontrar.

Tabla 4.29 Actual ficha de inspección para el análisis de un puente, ejemplo extraído de la información de la oficina de trabajo.

NOMBRE DEL PUENTE	EL SECO
REGION	ARAUCANIA
PROVINCIA	CAUTIN
COMUNA	PUCON
EN KM	7,00
DE LA RUTA	CRUCE RUTA 199 CH - REFUGIO VOLCAN VILLARRICA
ROL RUTA	69D887
COORD. ESTE	760957,04
COORD. NORTE	5641115,73
ALTITUD	705,04
EN EL CAUCE	ESTERO SECO
LONG TOTAL	13,50
ANCHO TOTAL	4,30
ANCHO PASILLOS	NO TIENE
ANCHO DE CALZADA	4,00
NUMERO DE CEPAS	1
NUMERO TRAMO	2
NUMERO DE VIGAS	6
LUZ MAYOR	6,60
TIPO DE CARPETA	MADERA
GALIBO	3,50
TIENE ESVIAJE	NO

OBRA FLUVIAL	SI, ENROCADO AMBOS COSTADOS
ESPESOR DE LOSA	
CAPACIDAD DEL PUENTE	12 TN
GRADO DAÑO	SEVERO MEDIO
DESCRIPCION FUNDACIONES	POSEE DADOS CORRIDOS DE HORMIGON ARMADO EN CEPA Y ESTRIBOS
ALTERNATIVA EXISTENTE	NO POSEE
PLANOS EXISTENTES	
BREVE DIAGNOSTICO DE SU ESTADO	PUENTE EN CURVA Y CONTRACURVA, REGULAR ESTADO, POSEE UNA DE LAS BASES QUEBRADAS. VIGAS DE MADERA EN BUEN ESTADO. ESTRIBOS DE MADERA CON ENROCADO EN LADO SUR Y ALAS DE MADERA EN LADO NORTE.
FECHA	08 DE OCTUBRE DE 2007
NOMBRE Y CARGO	---------, GEOGRAFO

Al comparar ambas metodologías de inspección queda en claro la diferencia entre el protocolo utilizado actualmente y la metodología que se propone. Se destaca la cantidad de información recolectada y el criterio técnico que requiere el nuevo procedimiento de inspección propuesto, obteniendo resultados más convincentes y de carácter imparcial, por lo tanto, se apunta a conclusiones y decisiones más informadas, formando un criterio común para todo el personal del Área de Puentes, Dirección de Vialidad, Región de La Araucanía.

CAPÍTULO 5
CONCLUSIONES

CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES.

5.1 Aporte de la práctica controlada.

El aporte más significativo del desarrollo de la Práctica Controlada es proponer una ficha de inspección de puentes de madera con la cual asistir a terreno, optando por una evaluación técnica de la calidad de la madera en los puentes.

Se parametriza una inspección visual, creando una rubrica de inspección para las distintas clasificaciones de elementos, mejorando la metodología existente en la actualidad y estandarizando el criterio de inspección.

Más aún, se propone complementar la inspección visual por medio del uso de instrumentos especializados para madera (Ultrasonido y Resistógrafo), los cuales entregan información efectiva de las condiciones internas de la madera.

Con la metodología propuesta se optimizan los recursos para una inspección por dos razones fundamentales. En primer lugar, se concentra el tiempo y los medios sobre los elementos más importantes del puente (elementos estructurales). En segundo lugar, se definen distintos niveles de inspección, por ende, no siempre es necesario utilizar todas las herramientas e instrumentos.

Por estas razones, el procedimiento de inspección propuesto es más completo que la metodología de inspección existente, con un alcance de información más allá de una inspección visual, aplicando ensayos físicos y mecánicos sobre la madera que permiten determinar las condiciones reales de esta.

5.2 Experiencia con el uso de instrumentos.

Por otro lado, implementar ensayos con instrumentos especiales logra delimitar rangos de deterioro para definir las condiciones de un puente. Se calibraron los instrumentos para la madera de Roble (Nothofagus OBLIQUA) y se logró parametrizar los resultados en distintos niveles de daño. Las

correlaciones calculadas indican que se deben practicar todos los ensayos sobre la madera (MOE, Velocidad transversal y Resistógrafo) para poder generar conclusiones, predominando el uso Resistógrafo por sobre el Ultrasonido.

La experiencia obtenida con el uso del ultrasonido indica que el cálculo del módulo de elasticidad (ensayos de velocidad longitudinales) no siempre son certeros, ya que depende de la trayectoria de la onda.

Por ende, se recomienda siempre visualizar la tercera escala creada (escala de confiabilidad tomando ensayos transversales cada 1 (m)) con la intención de corroborar las condiciones internas de la madera, en caso de no existir homogeneidad en los resultados, aplicar el Resistógrafo en el punto más crítico.

De igual forma, se ha creado un criterio para definir la confiabilidad de los ensayos realizados con el Resistógrafo, se insta a leer la carta de Resistografía y verificar la homogeneidad de los resultados.

En síntesis, el Medidor de onda de estrés sirve como primera aproximación para conocer las condiciones internas de la madera, se recomienda aplicarlo sobre elementos estructurales que no presenten deterioro aparente, con el objetivo de advertir las condiciones de la madera.

En cambio, el Resistógrafo se ajusta claramente cuando existe un problema interior en la madera y permitirá detectar las dimensiones de este, por tanto, se recomienda utilizarlo en puntos más específicos, críticos y/o sospechosos de deterioro.

El uso de estos instrumentos requiere de un nivel de experiencia y conocimientos para aplicarlos en terreno, definiendo los puntos donde aplicaros con mayor certeza. Además, la experiencia en inspección facilitará el análisis y aplicación de criterio para definir las condiciones del puente inspeccionado.

Los parámetros han sido calibrados para madera de Roble (Nothofagus OBLIQUA), principalmente utilizada en puentes, la investigación y calibración de otras especies queda abierta para que otra entidad o persona la desarrolle utilizando los mismos instrumentos.

5.3 Análisis de los resultados de los ensayos.

Los ensayos practicados en la presente investigación han determinado propiedades mecánicas de la madera. Se destaca una alta variabilidad de los resultados de las distintas muestras, ya sea madera sana o madera de puentes en uso.

Parte de esta gran variación de las propiedades se atribuye a las características propias de la madera ya que sus propiedades dependen del crecimiento de la especie, edad, humedad, entre otros, siendo un material anisotrópico. Los coeficientes de variación calculados se asemejan a coeficientes de variación indicados en otras investigaciones utilizando los mismos instrumentos, por tanto, se asume que los resultados de la investigación están dentro de lo habitual en la madera.

Por otro lado, no se encontró una tendencia capaz de definir el comportamiento de un puente en función de su ubicación o edad de este mismo, por lo tanto, se insta a seguir investigando considerando una mayor cantidad de muestras (puentes) para analizar los casos con mayor precisión.

5.4 Experiencia en las inspecciones realizadas.

La experiencia de las inspecciones realizadas encontró un patrón de distribución de deterioros. Existe gran presencia de hongos y cuerpos frutales en las vigas (elementos estructurales) de distintos puentes.

Esto se genera por las condiciones ambientales a los cuales se ven sometidos los puentes, sobre todo el nivel de humedad alcanzado, además, como las vigas se ubican en la zona inferior, nunca reciben luz solar que permita secarlas. Por último, se encontraron perforaciones, hoyos, grietas y rajaduras de distintos niveles.

Por otro lado, los elementos de seguridad y serviciabilidad que están en la parte superior del puente, presentaron mayormente grietas producto del intercambio de humedad con el ambiente, sometidos a la lluvia y expuestos al sol, también, se encontró degradación por luz ultravioleta. Los cambios medio ambientales incitan a soltar los conectores (clavos) y de paso las piezas del puente, por ende, en reiteradas ocasiones faltan tablones de rodado, tablones de pasillos o las barandas y guardarruedas están sueltos.

La experiencia mostró distintas complicaciones de acceso a las partes de un puente, sobre todo el acceso a las vigas y pilares, por tanto, se recomienda contar con más herramientas, como escaleras y cuerdas de seguridad que permitan acercarse lo suficiente a los elementos inferiores.

5.5 Precauciones y recomendaciones en el uso del ultrasonido.

Distancia: A raíz del gran número de ensayos practicados, se pudo percatar que un error en la medición de la distancia entre los transductores puede distorsionar los resultados obtenidos, vale decir, el cálculo de velocidad de propagación y módulo de elasticidad es altamente sensible a la medición de la distancia entre los transductores. En síntesis, se debe medir con alta precisión la distancia entre los transductores para evitar errores que se traduzcan en falsos casos de madera sana.

Funcionamiento del Ultrasonido: La propagación de la onda en el sentido de la fibra es mucho más rápida que en el sentido paralelo a la fibra. Asimismo, el cambio de dirección es más rápido y sencillo en este sentido, lo que ayuda a esquivar algún deterioro que pudiese presentarse en una pieza. Es por esto que se crean tres escalas para el medidor de onda de estrés, con la finalidad de contrastar los resultados.

5.6 Precauciones y recomendaciones en el uso del Resistógrafo

Digitalización de los resultados: puesto que el proceso consta en escanear la carta de Resistografía y generar los puntos sobre la curva manualmente, por lo tanto, existe un amplio rango de error

humano. Es aquí donde se insta a que el trabajo se realice con precisión con tal de obtener los resultados más reales posibles.

Calibración de la broca: Se debe verificar que la velocidad y la escala de perforación estén bien ajustadas en el Resistógrafo, con tal de trabajar siempre bajo las mismas condiciones. Asimismo, la broca puede perder su calibración, lo que influye directamente en los resultados, por lo tanto, el personal que realice una inspección y utilice un Resistógrafo debe confirmar que esta se encuentra bien apretada y no genera resultados distorsionados.

Se recomienda que las oficinas provinciales precisen la información de las reparaciones, reconstrucciones o cambios de puentes, con tal obtener y manejar mayor conocimiento del estado de los distintos puentes en la región.

Por último, se insta y recomienda al personal del Área de Puentes de la Dirección de Vialidad, Región de La Araucanía, utilizar el instructivo propuesto con las consideraciones mencionadas, aplicando los instrumentos y criterios en futuras inspecciones para lograr resultados más certeros y confiables. Así, una metodología de inspección y calificación estandarizada permite tomar decisiones objetivas en la asignación de recursos para la mantención de los puentes de la región.

Bibliografía

American Association of State Highway and Transportation Officials. (2018). "*The Manual for Bridge Evaluation".* Washington DC. EE.UU.

ASTM (2006) "*Standard Practice for Establishing Clear Wood Strenght Values"* ASTM D 2555. Pensilvania, EE.UU.

ASTM (2019). "*Standard Practice for Establishing Structural Grades and Related Allowable Properties for Visually Graded Lumber".* ASTM D-245. Pensilvania. EE. UU.

Basterrechea, M. A. (2016). "*Comparación de las técnicas no destructivas de tomografía ultrasónica y resistencia a la perforación en la evaluación de discos de madera".* Trabajo para optar al título de Ingeniero Ambiental. Universidad Politécnica de Madrid, Madrid.

Brashaw, B., Wacker, J., & Ross, R. (2014). "*Advanced Timber Bridge Inspection".* Minnesota. EE.UU.

Cartes, S., González, M., Padilla, J. (2017). "*Actualizar tensiones basicas admisibles de madera aserrada de pino radiata para uso de elementos laminado".* Concepción.

Corporacion Chilena de la Madera. (2003). "*Centro de Transferencia Tecnólogica Pino Radiata."* Santiago, Chile.

Curling, S. F., Clausen, A. C., Winandy, J. E. (2002). "*Relationship between mechanical propierties, weight loss, and chemical composition of wood during incipient brown-rot decay"* Madison. EE.UU.

Dunster, A. J. (2000). *"A Manual for Users of the Resistograph Decay Detection Instrument".* Bowen Island. Canadá.

Dirección de Vialidad. (2019). "*VOLUMEN N°3 Instrucciones y criterios de diseño".* Santiago, Chile.

Dirección de Vialidad. (2019). "*VOLUMEN N°4 Plano de Obras Tipo".* Santiago, Chile.

Dirección de Vialidad de la región de Aysen. (1998). "*Especificación Tecnica para el Suministro de Madera Latifoliada Impregnada con Creosota Aysen - 001-1998".* Coyhaique.

Federal Highway Administration. (1995). "*Recording and Coding Guide for the Structure Inventory and Appraisal of the Nation's Bridges"*. Washington DC. EE.UU.

Freeby, G. A. (2018) "*Bridge Inspeciton Manual"* Texas. EE.UU.

INN. (1973). *"Madera - Terminología general"* NCh 173. Santiago, Chile.

INN. (1987). "*Clasificación de maderas comerciales para su durabilidad natural"* NCh 789/1. Santiago, Chile.

INN. (1988). "*Maderas - Parte 1: Especies latifoliadas - Clasificación visual para uso estructural - Especificaciones de los grados de calidad"* NCh 1970. Santiago, Chile.

INN. (1988). "*Madera - Parte 2: Determinación de la densidad".* NCh 176/2. Santiago, Chile.

INN. (2014). "*Construcciones en Madera– Cálculo"NCh 1198*. Santiago, Chile.

INN (2019). "*Madera preservada- Clasificación según riesgo de deterioro en servicio y muestreo"* NCh 819. Santiago, Chile.

Iowa Departament of Transportation (2014). "*Bridge Inspection Manual".* Iowa. EE.UU.

Johnstone, D. M., Ades, P. K., Moore, G. M., Smith, I. W. (2007) "*Predecting Wood Decay in Eucalypts Using an Expert System and the IML-Resistograph Drill".* Victoria. Australia.

Karsulovic, T., González, M. (2009). "*Diseño y Construcción en Madera".* Santiago, Chile.

Merlo, E. (2017). "*Aplicación de Técnicas No Destructivas en la valorización de la calidad de la madera".* Madrid. España.

Ritter, M. (1990). "*Timber Bridges Design, Construction, Inspection and Maintenance".* Washington D.C. EE:UU.

Rojas, E. P., Gallardo, R. V. (2004). "*Manual de insectos asociados a maderas de la zona sur de Chile".* Santiago, Chile.

Ross, R. . (2000). *"Stress Wave Timing Nondestructive Evaluation Tools for Inspecting Historic Structures".* Madison. EE.UU.

Ross, R. (2015). *"Nondestructive Evaluation of Wood".* Madison. EE.UU. .

Ryan, T., Mann, E., Chill, Z., & Ott, B. (2012). "*Bridge Inspector's Reference Manual".* Washington D.C. EE.UU.

Sandoz, J. L. (1995). "*Wood testing using Acousto-ultrasonic"* . Oregon, EE.UU.

Soto, D. (2017). "*Comparación de dos métodos de vibración acústicas no destructivos y su correlación con ensayos mecánicos para madera pino Ponderosa"* Trabajo para optar al titulo de Ingeniero Civil. Universidad Catolica de La Santisima Concepción. Concepción.

Steiger, R. (1995). "*Versuche an Fitchen-Kanthölzern: Biegemoment-Normalkraft-Interaktion".* Zürich, Alemania.

Unterwieser, H. Schickhofer, G. (2010). *"Influence of moisture content of wood on sound velocity and dynamic MOE of natural frequency - and ultrasonic runtime measurement.* Graz, Austria:

Vázquez, V. L., Hernández, C. G., Campos, P. R., Elgueta, M. P., Catalán, L. J., González, R. M. (2016). "*Tensiones admisibles de madera de pino radiata proveniente de la región del Bío-Bío".*Pp: 24-25. Concepción.

Wacker, J.P., Brashaw, B. K., Williamson, T.G., Jones, D. P., Smith, .M. S., Hosteng, T. K., Strahl, D. L.,Coombe, L. E. (2014). "*Service life assessmentof timber highway bridges in USA climate zones".* Quebec. Canadá.

Winandy, J. E., Clausen, C. A., Curling, S. F. (2001). "*Predecting the Effects of Decay on Wood Properties and Modeling Residual Service-Life".* Madison. EE.UU.

Washington State Departament of Transportation. (2019). "*Washington State Bridge Inspection Manual"*. Washington DC: EE.UU.

5.7 NOMENCLATURA

Símbolo	Descripción	Unidades.
H:	Contenido de humedad	(%)
K:	Coeficiente de contracción volumétrico para un cambio de 1% en el contenido de humedad. Roble: 0.57, Coigüe: 0.54.	
ρ_b :	Densidad básica, resultante de la división entre la masa de la probeta en estado anhidra y el volumen en estado verde en metros cúbicos	Kg/m^3
ρ_0:	Densidad Anhidra	Kg/m^3
V:	Velocidad de propagación.	m/s
d:	Distancia entre los transductores del Ultrasonido: Figura 3.2	m.
t:	Tiempo de propagación de la onda desde transductor entrada hasta transductor salida, resultado del Ultrasonido.	(s).
E:	Módulo de elasticidad ajustado al 12% de humedad.	MPa
ρ:	Densidad de la madera, $\rho_{12\%} = 665\ kg/m^3$ para el Roble y $\rho_{12\%} = 448\ kg/m^3$ para el Coigüe.	Kg/m^3
$v_{12,H>PSF}$:	Velocidad de propagación calculada con los resultados del Utlrasonido y ajustada al 12% de humedad.	m/s
MOE:	Módulo de Elasticidad Estático.	MPa
$\rho_{12\%}$:	Densidad calculada al 12% de humedad.	Kg/m^3
($\overline{X}$):	Promedio.	
(σ)	Desviación Estándar.	
C.V.	*Coeficiente de Variación.*	.

ANEXO A Deterioro encontrado en puentes.

A	B
Viga puente El Temo 1, precencia de grieta de gran extensión.	Viga puente El Seco, precencia de agujeros que hacen suponer una data diferente al año 2018.

Figura A.1 Vigas de los puentes El Temo 1 (A) y El Seco (B).

A	B
Vigas Puente Donguil, rajaduras, grietas comprobadas a simple vista.	Viga puente “Cumbli” en el punto de apoyo del estribo. Rajadura a la vista, alto contenido de humedad, transductor en posición para medir.

Figura A.2 Ejemplos de vigas que requieren cambio cuando se evalúa visualmente.

ANEXO B Mediciones cada un metro en vigas de un puente (Cumbli)

Tabla B.1 Mediciones realizadas cada un metro en dos vigas de un mismo puente, mostrando la diferencia en sus resultados, sospecha de deterioro confirmada con el Resistógrafo.

Nombre del puente	Elemento	Tipo de medición	Humedad (%)	Ponderado de Ultrasonido (µs)	Distancia (m)	Velocidad transversal ajustada (m/s)
Cumbli	**Viga 3**	Transversal	High	1489,0	0,37	**248,49**
Cumbli	**Viga 3**	Transversal	High	775,3	0,32	**412,73**
Cumbli	**Viga 3**	Transversal	High	434,0	0,34	**783,41**
Cumbli	**Viga 3**	Transversal	High	392,0	0,38	**969,39**
Cumbli	**Viga 3**	Transversal	High	379,3	0,38	**1001,76**
Cumbli	**Viga 3**	Transversal	High	436,3	0,32	**733,38**
Cumbli	**Viga 3**	Transversal	High	349,0	0,37	**1060,17**
Cumbli	**Viga 3**	Transversal	High	384,7	0,32	**831,89**
Cumbli	**Viga 3**	Transversal	High	391,3	0,37	**945,49**
Cumbli	**Viga 3**	Transversal	High	1356,0	0,36	**265,49**
Cumbli	**Viga 3**	Transversal	High	2167,0	0,38	**175,36**
Cumbli	**viga 2**	Transversal	29,6	277,7	0,38	**1368,55**
Cumbli	**viga 2**	Transversal	29,6	284,0	0,4	**1408,45**
Cumbli	**viga 2**	Transversal	29,6	277,7	0,38	**1368,55**
Cumbli	**viga 2**	Transversal	29,6	267,7	0,41	**1531,76**
Cumbli	**viga 2**	Transversal	29,6	274,7	0,38	**1383,50**
Cumbli	**viga 2**	Transversal	29,6	281,7	0,39	**1384,62**
Cumbli	**viga 2**	Transversal	29,6	284,7	0,39	**1370,02**
Cumbli	**viga 2**	Transversal	29,6	248,7	0,38	**1528,15**
Cumbli	**viga 2**	Transversal	29,6	243,7	0,37	**1518,47**
Cumbli	**viga 2**	Transversal	29,6	214,3	0,38	**1772,94**
Cumbli	**viga 2**	Transversal	29,6	379,0	0,37	**976,25**

ANEXO C Niveles de inspección.

C.1. Inspección Primaria.

Esta inspección busca identificar las características básicas del puente informándose antes de asistir a terreno, esto puede ser mediante acceso a una ficha informativa del puente. De no ser este el caso, es necesario crear una ficha y determinar las condiciones y características en terreno, describiendo el puente de forma detallada, clara y precisa, evitando subjetividad en el criterio.

Para esto se deberán realizar todas las mediciones que resulten pertinentes. Es ideal que una inspección primaria sea apoyada con material fotográfico, al menos 6 imágenes, tales como una fotografía inferior, una fotografía de costado y una fotografía de la superficie de rodado, fotografías de la entrada y salida del puente y una fotografía de plano general del puente y alrededores.

Una ficha de registro de un puente, debe considerar como mínimo:

Ubicación:

Rol de ruta	Nombre de la ruta	Plano ubicación.
Cauce que cruza	Coordenadas (UTM).	Comuna.
Región y provincia.	Kilómetro de ubicación.	Fecha

Estructura:

Longitud total	Ancho pasillos	Ancho calzada
Número de vigas	Luz mayor	Número de cepas
Galibo	Defensas fluviales	Tiene esviaje
Capacidad del puente	Protección de la madera	

Materialidad y escuadrías.

Piso	Vigas	Estribos
Cepas	Resistencias	

Además, agregar una descripción de cualquier característica anómala que el profesional considere necesaria registrar. Asimismo, agregar una descripción de la entrada y salida del puente, si posee barreras de contención, restricciones de ancho vehicular, se encuentra en una curva, defensas fluviales, entre otros. Por último, hacer una breve descripción general de la zona aledaña, con la finalidad de identificar el tipo de vehículos que transita, ya sea una zona agrícola, forestal, industrial, habitacional o cualquier otra.

Para finalizar, se debe recalcar que una inspección primaria se realizará cada vez que se ejecute un puente nuevo, cada vez que no se tenga la información básica de un puente o cada vez que se realicen reparaciones y trabajos en un puente, todo esto con la intención de actualizar o generar una ficha informativa y descriptiva de todos los puentes existentes, formando un registro actualizado.

C.2. Inspección Rutinaria.

Este Segundo nivel de inspección es de carácter estructural, está enfocado en realizar una inspección visual y física del puente para describir las condiciones estructurales de este, destacando todas aquellas piezas que están afectadas o dañadas de cualquier forma. Asimismo, se debe registrar aquellas piezas que poseen un deterioro menor pero que se proyectan con un desarrollo inminente del deterioro por efectos del uso, deterioro por agentes biológicos, por las condiciones climáticas y ambientales.

Al mismo tiempo, corroborar que exista una continuidad del preservante de la madera (en el caso que exista), es decir, que toda la madera este cubierta y protegida. Además, verificar que exista continuidad en las vigas, resistencias y la estructura en general.

Como resultado de una inspección rutinaria se debe indicar que piezas se encuentran en mal estado o son sospechosas de daño en función del criterio de inspección visual mencionado, o bien, requieren de un nivel de inspección más avanzada para identificar el nivel de desperfecto presente y categorizar el riesgo.

Para un proceso de inspección y evaluación eficiente se requiere el uso de fotografías de todas las zonas afectadas, registrando de forma clara y concisa cada parte dañada, facilitando la comprensión de una descripción del puente a cualquier persona, independiente del nivel de comprensión que maneje en el área de puentes o de inspecciones, apoyándose de los recursos visuales.

Dado que este nivel de inspección es de carácter visual, se debe recorrer la totalidad del puente, registrando en qué condiciones se encuentra la estructura y describiendo las características y condiciones de los elementos del puente. Para esto, se registrará deterioros, como grietas, perdidas de sección de los elementos, afloramientos de cuerpos frutales, rajaduras de la madera, entro otros factores que se han mencionado en otro capítulo.

Para acompañar la inspección visual se pueden realizar pruebas físicas en los elementos del puente. Para esto se debe aplicar una prueba de sonido, lo que consiste en golpear la madera con un elemento contundente, como un martillo. Si el sonido de la madera es íntegro, consistente y continuo en el elemento, se hablará de madera que presumiblemente se encuentra en buen estado. Por el contrario, ante un sonido ligero, ahuecado e incompleto en la madera, se deben levantar sospechas e indicar que la madera podría estar deteriorada, por tanto, se debe indagar con mayor certeza mediante otros instrumentos, dando paso a otro nivel de inspección.

Otra herramienta que puede verificar la calidad de la madera es una punta o un punzón, el cual se debe enterrar en la madera, con esto es posible medir la profundidad de una grieta, como también, verificar el estado superficial de las piezas de madera.

Primero, al enterrar un punzón y generar una fractura en la superficie de la madera se podrá verificar las condiciones de humedad y deterioro que ha estado sometida la madera. Si la fractura que se crea es lineal y continua en dirección de la fibra, se hablara de madera sana. Sin embargo, si la fractura no presenta continuidad a lo largo de la fibra ni apoyo a través de las células de la madera y simplemente se quiebra en el punto donde se enterró el punzón, se hablará de madera en estado deteriorado y con altos niveles de humedad. No obstante, es importante no confundir la madera blanda con la madera deteriorada.

Para contrastar los resultados de ensayos realizados con un martillo y un punzón, se debe utilizar un Xilohigrómetro que analice el contenido de humedad de las piezas del puente. Cuando la humedad de la madera es muy alta, se genera un ambiente propicio para el desarrollo de agentes destructores como hongos, los que atacan la madera y generan una pérdida de sección, esto a su vez, afecta de forma directa el módulo de elasticidad y la capacidad estructural de la madera.

Cabe destacar que se deben inspeccionar todas las piezas del puente en busca de deterioros, ya sea aplicando una inspección visual, como también, realizando ensayos sobre la madera, describiendo el estado estructural de cada elemento y derivando a otro nivel de inspección más avanzado cuando exista incertidumbre sobre el deterioro interno y externo de la madera.

C.3. Inspección en Profundidad.

Una inspección en profundidad se aplicará inmediatamente después de realizada la inspección de rutina, donde se han determinado cuales son las partes del puente que requieren de mayor información para generar un análisis completo.

Este nivel de inspección tiene como objetivo describir las condiciones de deterioro interno y externo de la madera para todos los elementos que clasifican dentro del ítem estructural (vigas principales, pilas, sopandas, pilares, entre otros mencionados) y que son considerados sospechosos de daño a raíz de una inspección previa. Este tipo de procedimientos se deben aplicar cuando no se tenga certeza sobre las condiciones físicas y estructurales de los elementos que conforman un puente, o bien, ante la incertidumbre del estado interno de las piezas, se debe aplicar una inspección en profundidad para obtener la información que aclare las condiciones de la estructura.

Se debe categorizar las condiciones de deterioro estructural de los elementos del puente, mediante una clasificación que se presenta en la Tabla C.1.

Para este nivel de inspección existen dos instrumentos fundamentales. Un medidor de velocidad de onda de estrés y un Resistógrafo. Ambos instrumentos están diseñados para indagar las condiciones internas de la madera.

El primero se basa en un proceso dinámico que está directamente relacionado con las características físicas y estructurales de la madera y donde las pruebas de sonido con un martillo no son efectivas ni eficientes.

Con este instrumento se puede medir la velocidad con la que viaja una onda inducida dentro de la madera. Si la velocidad de la onda es alta con respecto a la calibración realizada en el tipo de madera trabajada, se hablará de madera sana y en buenas condiciones. Por el contrario, si la velocidad de la onda es baja se tratará de madera que posee deterioro interno o espacios vacíos que afectan la capacidad estructural.

En cuanto al Resistógrafo, está directamente relacionado con la densidad de la madera. El funcionamiento se basa en el esfuerzo de torque que requiere una broca para atravesar la madera.

El propósito de este equipo es identificar áreas en los elementos de madera que tienen baja densidad, lo que puede involucrar deterioro o degradación de la madera. Con este instrumento es posible identificar con precisión la profundidad, la extensión y la localización del deterioro, ya que genera una escala 1:1 a medida que perfora la madera.

Con este instrumento, el inspector puede determinar zonas de condición mala, sospechosa o buena y debe registrarlo en la carta de inspección, indicando las condiciones en las cuales se encuentran las piezas a través de una completa descripción.

Se debe tener cuidado de no mal interpretar los resultados en maderas que sean de tipo suaves o de baja densidad. Dicho de otro modo, debe tomar en cuenta la madera que está perforando, dado que la resistencia de una madera dura puede ser mucho mayor en comparación con la madera suave o blanda, por tanto, se requerirá calibrar el Resistógrafo en función de la madera a la cual se le aplica el ensayo.

Finalmente, una inspección en profundidad debe ser capaz de describir las condiciones físicas y estructurales de los elementos a través de los ensayos aplicados, tomando registro con fotografías como también registro escrito de todas las piezas que se encuentran dañadas y la descripción del daño que alcanzan, apoyándose de los resultados entregados por los instrumentos utilizados.

Tabla C.1 Parámetros de clasificación para los elementos de un puente.

Categoría	Módulo de elasticidad (MPa)	Velocidad transversal (m/s)	Resistógrafo
Crítico (D)	< 8.425	< 1.123	< 0,614
Dañado (C) (promedio)	8.425 < MOE < 13.462 12.081	1.123 < V <1.620 1.415	0,614 < R < 0,825 0,661
Aceptable (B)	> 13.462	> 1.620	> 0,825

C.4. Inspección Especial.

Una inspección especial se programa cuando se tienen altas sospechas de deterioro en un puente producto de agentes externos o situaciones fortuitas o simplemente el deterioro de este es evidente. Es por esto que se deben tomar medidas especiales y precipitadas con la finalidad de indagar el nivel de daño y la seguridad del puente.

El carácter de una inspección especial es detectar daños en la estructura de un puente que esté sometido a variados agentes perjudiciales para el comportamiento y la seguridad de este, como condiciones climáticas adversas, presencia de fuego a los rededores del puente o en el mismo puente, choques en/o contra el puente, perdida del soporte estructural, crecidas de ríos que generen una socavación inminente en las fundaciones, sismos, sobrecarga o cualquier otro factor que sea importante en la serviciabilidad y estabilidad del puente.

Para este tipo de procedimientos es válido utilizar todos los instrumentos y herramientas que se han mencionado previamente, ya que debe determinar con alta precisión cual es la calidad estructural de los elementos del puente, como también, la estabilidad estructural y serviciabilidad general del puente.

Para este tipo de inspecciones se requiere de un personal con experiencia, el cual sea capaz de definir con claridad el daño presente en los elementos de madera, evitando errores por falta de conocimiento en la materia.

El procedimiento de auscultación debe tomar atención en:

- Identificar los miembros o componentes dañados.
- Evaluar el daño de los componentes.
- Utilizar técnicas visuales, físicas y avanzadas para realizar inspección.
- Obtener acceso a equipo especializado en caso de ser necesario.
- Generar un informe de seguridad y condiciones del puente.
- Recomendar las acciones necesarias para mejorar la situación del puente.

Para facilitar la comprensión de un informe se requiere adjuntar material ilustrativo completo, considerando cada una de las partes afectadas, como también, se debe registrar el puente en su totalidad. Además, se adjuntarán descripciones objetivas apoyándose en los resultados de los ensayos aplicados, indicando los elementos afectados y el grado de daño que estos alcanzan.

ANEXO D Anomalías de estructura.

D.1 Anomalías propias de la madera.

Acebolladura: Separación del leño siguiendo la dirección de los anillos de crecimiento. Puede ser causado por los procesos de temperatura, como también, por esfuerzos excesivos

Agujeros: Abertura aproximadamente circular, generada principalmente por el desprendimiento de un nudo.

Fractura: Ruptura de la fibra de la madera como resultado de un esfuerzo excesivo de compresión o de flexión.

Grieta: Separación de la fibra de la madera que, a diferencia de la fractura, no alcanza a afectar dos caras de una pieza aserrada o dos puntos opuestos de la superficie de una madera.

Rajadura: Separación de la fibra de la madera que se extiende en la dirección del eje de la pieza y afecta totalmente al diámetro o espesor de la misma.

Quemado: Carbonatación de la madera ocurrida durante su procesamiento y producida por fricción de herramientas, o acción de fuego.

Alabeo: Deformación que puede experimentar una pieza de madera en la dirección de su eje longitudinal o transversal o de ambos a la vez.

Acanaladura: Alabeo de las caras en la dirección transversal.

Arqueadura: Alabeo de las caras en la dirección longitudinal.

Encorvadura: Alabeo de los cantos en la dirección longitudinal.

Deformación: Variación de las condiciones iniciales de la madera, alterando la forma de un elemento o pieza.

D.2 Anomalías causadas por hongos e insectos.

Atabacado: Proceso final de pudrición castaña de la madera, que se caracteriza, en la etapa avanzada, por la desintegración del leño en un polvo de color parduzco.

Apolillado: Existencia de galerías que contienen un polvo fino producido principalmente por larvas e insectos, como también, crustáceos.

Mancha: Coloración anormal de la madera producida por hongos. Sin embargo, no altera la estructura leñosa.

Pudrición: Descomposición de la madera, producida por la acción de hongos xilófagos, acompañada de un proceso gradual de cambio de características físicas, químicas y mecánicas.

Avanzada: La madera presenta cambios evidentes en su apariencia, peso específico, composición, dureza y otras características mecánicas.

Castaña, seca: Aquella que se caracteriza por una coloración castaña de la madera como consecuencia de la descomposición de la celulosa. (pudrición cubica café).

Pudrición clara: Aquella que se caracteriza por la coloración clara de la madera como consecuencia de la descomposición preponderante de la lignina. (pudrición cubica blanca).

Pudrición incipiente: Etapa inicial de la descomposición en la cual la madera pierde parte sus propiedades mecánicas y puede sufrir cambios de color.

Taladro: Presencia de galerías, producidas por larvas o individuos adultos de ciertos insectos forestales. Se distingue taladro de orificio grande y de orificio pequeño.

Figura D.1 Pudrición Cubica Café.
Fuente: www.researchgate.net

Figura D.2 Pudrición Cubica blanca.
Fuente: bolg.simbolocalidad.com

Figura D.3 Daño de insectos en la madera.
Fuente: okdiario.com

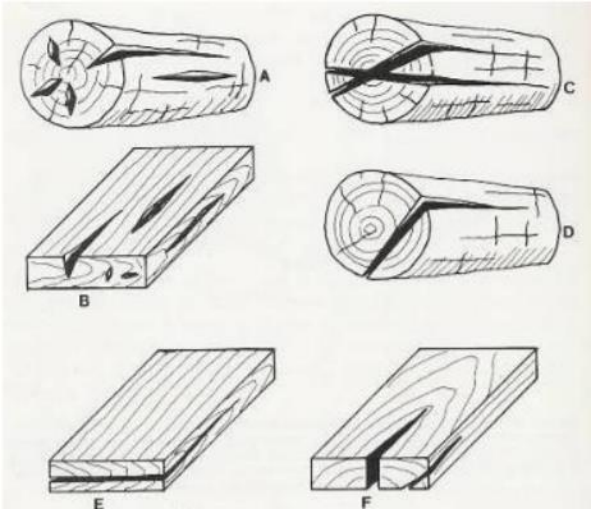

Figura D.4 Distintos tipos de grietas, rajaduras, fisuras.
Fuente: Manual de diseño, CORMA

Anteriormente se presentaron una serie de anomalías, sin embargo, no son las únicas anomalías y deterioros que existen en la madera. Por lo tanto, es fundamental que las inspecciones se realicen con especial atención, en busca de cualquier patología, agente o configuración y características anómalas en la madera.