

- ▲ **Palabras clave/** Bambú, diseño, construcción, durabilidad, manifestaciones patológicas, vida útil.
- ▲ **Keywords/** Bamboo, design, construction, durability, pathological manifestations, service life.
- ▲ **Recepción/** 07 de enero 2022
- ▲ **Aceptación/** 12 de mayo 2022

Decisiones de diseño y construcción que influyen en la durabilidad del bambú en edificaciones

Design and Construction Decisions Influencing the Durability of Bamboo in Buildings

Andrea Jaramillo-Benavides

Arquitecta, Pontificia Universidad Católica del Ecuador (PUCE), Ecuador.
Maestra y Doctora en Arquitectura y Urbanismo, Universidad Federal de Santa Catarina (UFSC), Brasil.
Profesora agregada, Universidad Regional Amazónica Ikiam (URAI), Tena, Ecuador.
andrea.jaramillo@ikiam.edu.ec

Lisiane Librelotto

Ingeniera Civil, Universidad Federal de Santa Maria (UFSC), Brasil.
Maestra y Doctora en Ingeniería de la Producción, Universidad Federal de Santa Catarina (UFSC), Brasil.
Profesora asociada, Universidad Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis, Brasil.
lisiane.librelotto@ufsc.br

Ângela do Valle

Ingeniera Civil, Pontificia Universidad Católica de Río Grande do Sul (PUC-RS), Brasil.
Maestra y Doctora en Ingeniería Civil, Universidad de São Paulo (USP), Brasil.
Profesora asociada, Universidad Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis, Brasil.
angela.valle@ufsc.br

RESUMEN/ El bambú es un material de construcción orgánico cuya durabilidad depende de las interacciones con el ambiente y del empleo de la técnica constructiva adecuada. Esta investigación exploratoria y predominantemente cualitativa buscó identificar las decisiones de diseño que afectan la durabilidad de los elementos de bambú, por medio del análisis de manifestaciones patológicas y los procesos de degradación en edificaciones de la región Sur de Brasil. El levantamiento de información se realizó por medio de entrevistas e inspección visual. Se analizaron las características de las edificaciones, el proceso de preparación del bambú, su aplicación y mantenimiento, los mecanismos de surgimiento de las manifestaciones patológicas, sus causas y origen probables. Se identificó que la mayoría de las anomalías fue ocasionada por la deficiencia de especificaciones de diseño, agravada por la falta de mano de obra especializada. Al finalizar, se apuntan sugerencias para la toma de decisiones de diseño y ejecución de edificaciones de bambú, con énfasis en la durabilidad. **ABSTRACT/** Bamboo is an organic construction material. Its durability depends on interactions with the environment and the use of proper construction techniques. This exploratory and predominantly qualitative research sought to identify the design decisions that affect the durability of bamboo elements, through the analysis of pathological manifestations and degradation processes in buildings in the southern region of Brazil. Information was collected through interviews and visual inspection. The characteristics of the buildings; the bamboo preparation process; its application and maintenance; the mechanisms of pathological occurrences; their probable causes and origins were discussed. It was identified that most of the anomalies were caused by the deficiency of design specifications, compounded by the lack of skilled labor. Finally, suggestions are made for decision making in the design and execution of bamboo buildings, with emphasis on durability.

INTRODUCCIÓN

El bambú es un recurso natural renovable y abundante que está presente en casi todos los continentes. Hasta la fecha, se han identificado más de 1600 especies de bambú, muchas de ellas reconocidas como aptas para la construcción por su flexibilidad y resistencia. En varios lugares del mundo este material ha sido utilizado hace milenios con fines diversos.

El bambú alcanza su madurez entre los tres y los seis años y puede ser aprovechado en la construcción; después de la cosecha no necesita ser replantado y continúa produciendo nuevos brotes. Esto, sumado a la facilidad de manejo y transformación -incluso con herramientas menores- lo convierte en una alternativa respecto de la madera. Cada vez hay más personas interesadas en investigar, diseñar y construir con bambú.

Sin embargo, su durabilidad es una de las principales interrogantes que influyen al momento de utilizarlo, o no, en una obra (Ballesté 2017).

La resistencia del bambú a la descomposición depende de varios factores, entre ellas la especie, las condiciones de cultivo, la madurez de los tallos o *culmos*, la preservación, las condiciones de uso, etc.; está estrechamente relacionada con sus características físico-

químicas y depende de una aplicación correcta, es decir, de las decisiones tomadas durante las etapas de diseño y construcción. En este contexto, presentamos una investigación de doctorado de carácter exploratorio cuyo objetivo fue analizar las manifestaciones patológicas, los procesos de degradación y las decisiones de diseño que influyen en la durabilidad de los elementos constructivos de bambú en edificaciones de la región Sur de Brasil.

MARCO TEÓRICO

Durabilidad, vida útil y problemas patológicos en edificaciones

Según la norma brasileña de desempeño NBR 15575 (2013), la durabilidad es una exigencia de los usuarios relacionada con la sostenibilidad. Se trata de la capacidad de una edificación o de sus partes de cumplir sus funciones a lo largo del tiempo, en condiciones específicas de uso y mantenimiento; mientras, la vida útil es su cuantificación, en medida de tiempo. John y Sato (2006) afirman que “la durabilidad no es una propiedad inherente a un material o componente”, sino el resultado de la interacción de dicho material con las condiciones ambientales, y depende de la influencia de factores externos. En ese sentido, son los proyectistas quienes determinan la vida útil de cada edificación en la fase de diseño; ésta depende de la vida útil de sus componentes, considerando el mantenimiento, los costos, el grado de importancia dentro del sistema constructivo, los factores de degradación y la complejidad de sus interacciones (Consoli, 2006).

Las normas ISO 15686 (2001) y NBR 15575 (2013) definen la degradación como el proceso mediante el cual una acción sobre un ítem causa deterioro en al menos una de sus propiedades, disminuyendo su rendimiento. Durante la vida útil de una edificación, los materiales y los elementos constructivos interactúan con varios agentes, ocasionando fenómenos físicos, químicos, biológicos, entre otros, que pueden ocasionar problemas patológicos, manifestados como anomalías.

Agentes que intervienen en la durabilidad del bambú en edificaciones

El bambú es un material orgánico y uno de los motivos que limita su uso en la construcción es su vulnerabilidad a la degradación ocasionada por varios agentes: los culmos sin tratamiento expuestos a la intemperie tienen una vida útil aproximada de un año; en caso de estar bajo cubierta, pueden resistir hasta siete años.

La norma ISO 15686 (2001) clasifica los agentes de degradación en cinco grupos: mecánicos, electromagnéticos, térmicos, químicos y biológicos. Broto (2006) indica que estos agentes de degradación son la causa directa de anomalías en edificaciones. Adicionalmente, presenta las causas indirectas relacionadas con errores humanos: de diseño, de selección de material, de ejecución o mantenimiento (figura 1).

Conocer la naturaleza del material es fundamental para un diseño adecuado. Cruz (2011) y Brito (2014) resaltan que la mala gestión en las prácticas constructivas, el diseño o la ejecución de obras por personas no especializadas y la falta de mano de obra calificada, aumentan el riesgo de deterioro de los materiales.

En América del Sur, los siguientes países cuentan con normas de construcción con bambú: Colombia, NSR 10 (2010); Perú, E 100 Bambú (2012); Ecuador, NEC -SE -Guadua (2016); y Brasil, NBR 16828 (2020). Estos documentos contienen recomendaciones sobre medidas preventivas para el uso adecuado del bambú en edificaciones, abordando el tratamiento, el transporte, el secado y aspectos generales sobre diseño, construcción y mantenimiento.

Bambú como material de construcción

La calidad del bambú como material de construcción depende de varios factores que intervienen desde el momento en que este es plantado hasta el fin de la vida útil de la edificación (figura 2).

Una vez plantado, es necesario observar que los rodales no sean invadidos por plagas. Al alcanzar la madurez, los culmos se deben cortar de manera tal de no dañar el resto de la planta; luego siguen la preservación y el secado.

Ghavami (2008) destacó la estrecha relación entre el contenido de humedad y de almidón de los culmos con los ataques de insectos, explicando que aquellos con humedad

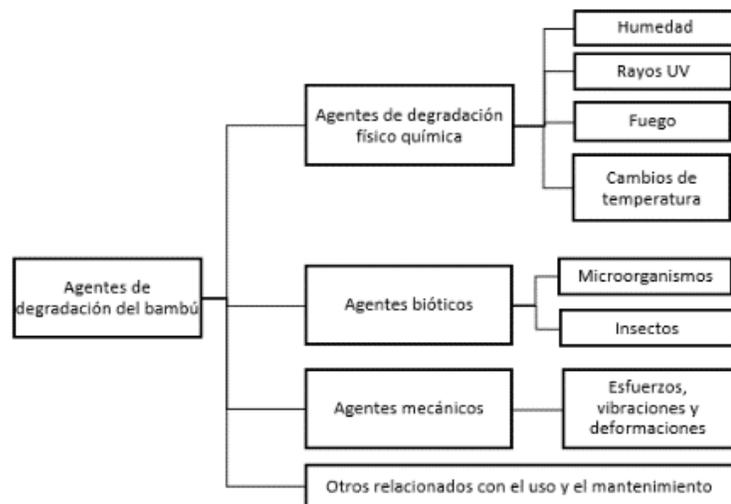


Figura 1. Agentes de degradación del bambú (fuente: Elaboración propia con base en ISO 15686 (2001) y Broto (2006)).

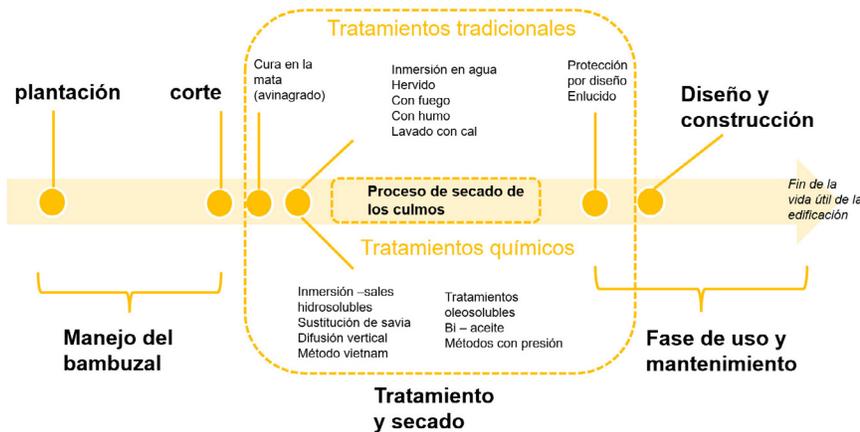


Figura 2. Proceso del bambú como material de construcción (fuente: Elaboración propia, 2018).

inferior a 15% tienen menos probabilidad de presentar hongos.

Para la preservación se utilizan, por un lado, métodos ancestrales provenientes del conocimiento tradicional, lo que incluye la aplicación de productos naturales y procedimientos económicos y relativamente sencillos de ejecutar (Morán 2002; Kaur *et al.* 2016). Por otro lado, también se usan tratamientos químicos, adaptados de aquellos que se aplican a la madera. En el caso de los culmos de bambú, el reto es impregnar el preservante en el tejido leñoso de sus paredes, proceso que se facilita usando solventes oleosolubles o hidrosolubles.

Influencia del diseño en la vida útil del bambú en edificaciones

Helene (1993), López *et al.* (2004) y Assis Vieira (2016) exponen que las manifestaciones patológicas puede tener su origen durante las fases de diseño, construcción o uso de una edificación. El origen es la etapa del proceso donde se inició el fenómeno que desencadenó el problema patológico, mientras que las causas son los fenómenos que influyen en la aparición de anomalías (Helene 1993). Los problemas patológicos pueden intensificarse con el paso del tiempo, ocasionando nuevas manifestaciones.

Las decisiones y las medidas que se toman durante el diseño, la construcción y el uso de una edificación estimulan, atenúan o inhiben la aparición de anomalías. Por eso es necesario conocer las propiedades de los materiales de construcción y seguir las recomendaciones de las normas a lo largo de toda la vida útil.

Aunque las recomendaciones generales sobre el bambú estructural son comunes entre las normas sudamericanas, la Norma Técnica E-100 (2012) menciona que los elementos de bambú expuestos a la intemperie deben recibir mantenimiento cada seis meses; aquellos ubicados en áreas exteriores cubiertas cada un año; y los que se encuentran en interiores, cada dos años. En el caso de Brasil, la NBR 16828 (2020) aborda el tema de la durabilidad

en dos aspectos: origen o calidad del bambú y factores de diseño.

MATERIALES Y MÉTODOS

Esta investigación exploratoria con enfoque predominantemente cualitativo fue realizada por medio de estudios de caso. La cuantificación solo se utilizó para analizar las manifestaciones patológicas y visibilizar el número de piezas de bambú afectadas en cada edificación.

Fase preliminar

Además de la revisión bibliográfica, en esta fase se definieron los criterios de selección de los estudios de caso:

- Ubicación en la región Sur de Brasil - Estados de Paraná, Santa Catarina y Río Grande do Sul.
- Acceso a información de proyecto y construcción - planos, fotos, entrevistas, etc.
- Disponibilidad de usuarios para permitir las inspecciones y participar de entrevistas.
- Año de construcción hasta 2016.
- Estar en uso, desde su construcción hasta el momento de la inspección.
- Elementos de bambú visibles y accesibles - para realizar inspecciones no destructivas.

De entre 20 edificaciones identificadas en la región, siete cumplieron los requisitos y fueron seleccionadas para los estudios de caso (figura 3).

Después de una búsqueda sistemática y el análisis de procedimientos de inspección de maderas que podrían adaptarse para culmos de bambú (Jaramillo *et al.* 2019),



Figura 3. Estudios de caso (fuente: Elaboración propia, 2019).

algunos métodos se probaron en laboratorio o se realizaron inspecciones previas para verificar su aplicabilidad en la investigación, considerando la viabilidad logística, el alcance y el enfoque. Como resultado, se escogió el método de inspección visual. La inspección visual aplicada en esta investigación fue producto de la sistematización y la adaptación de los procedimientos y las orientaciones indicados por las normas brasileñas NBR 7190 (1997), NBR 5674 (1999), por Brito (2014) y Ballesté (2017), para identificar manifestaciones patológicas en elementos de bambú.

Colecta y tratamiento de datos

Se contactó a los proyectistas o constructores y, con un cuestionario, se recogieron datos sobre generalidades de la obra, proyecto y construcción (planos, fotografías, etc.), características del bambú, fase de uso y mantenimiento. En las visitas exploratorias se verificaron los permisos y las condiciones apropiadas para las inspecciones y se informó a los usuarios sobre los procedimientos que serían ejecutados, y su duración. Considerando que solamente se obtuvieron planos de uno de

los casos, fue necesario hacer el levantamiento de plantas y fachadas del resto. Los planos de las edificaciones sirvieron como mapas para el registro de las manifestaciones patológicas durante las inspecciones. Los procedimientos de inspección se realizaron con base en una ficha guía que listaba los pasos a seguir, los materiales y las herramientas necesarios (tabla 1). Durante las inspecciones se analizaron todas las piezas de bambú y se hizo un registro individual –escrito y fotográfico– de las manifestaciones patológicas correspondientes. Por último, se realizaron entrevistas semiestructuradas a proyectistas y usuarios para levantar la información restante sobre el proyecto, resolver las dudas que surgieron en las inspecciones y conocer sobre el uso/ mantenimiento de las edificaciones.

Diagnóstico de la condición del bambú

Los datos levantados sobre los elementos de bambú se analizaron según tres categorías: a) Caracterización de la edificación –ubicación, año de construcción, información del proyectista o constructor, tipo y preservación de bambú, clima del lugar, detalles constructivos.

b) Uso y mantenimiento del bambú – procedimientos recomendados por el proyectista o el constructor, y ejecutados por los usuarios.

c) Manifestaciones patológicas identificadas y diagnóstico – fueron clasificadas según su apariencia en cuatro grupos para el análisis: rajaduras/astillas; manchas/cambios de coloración; perforaciones y colapsos.

Determinación de causas y origen probable de las manifestaciones patológicas

Lo observado se describió en los estudios de caso desde una visión general de los tipos de manifestaciones patológicas registradas en el bambú en cada contexto y luego, enfatizando lo observado según las siguientes categorías: a) el tratamiento de preservación utilizado; b) la especie de bambú; y c) las condiciones climáticas del entorno.

Se determinaron las causas y el origen probable de las manifestaciones patológicas con base en el diagnóstico de las manifestaciones patológicas observadas en cada caso, se hizo una síntesis gráfica que muestra la fase en que se originaron (diseño, construcción o uso). Se cuantificaron las veces en que se originó cada manifestación en cada fase para poder identificar si estaban relacionadas con las decisiones de diseño o construcción. Finalmente, se plantea una serie de sugerencias para diseñadores y constructores que pueden auxiliarlos en la toma de decisiones con el objetivo de aumentar la durabilidad del bambú en las edificaciones.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Dadas las condiciones específicas de cada estudio de caso, en esta sección no se plantean comparaciones entre edificaciones; más bien, el foco está puesto en la descripción de los fenómenos observados en el bambú y se muestran las observaciones en las diferentes categorías de análisis dentro de los contextos específicos.

Aspectos generales de las edificaciones

Las edificaciones de bambú son pequeñas, fueron construidas recientemente –la más

DATOS LEVANTADOS	PASOS DE INSPECCIÓN / TEMAS
Aspectos generales	<ul style="list-style-type: none"> • Información de la edificación (entorno, puntos críticos, conexiones, apoyos, apariencia general del bambú). • Levantamiento – plantas, fachadas. • Mapas / bocetos con la ubicación de los elementos de bambú para el registro de anomalías. • Fotografías.
Manifestaciones patológicas	<ul style="list-style-type: none"> • Observación minuciosa - elementos de bambú. • Identificación y registro (en los mapas) de manifestaciones patológicas. • Descripción de anomalías. • Fotografías - anotar número de foto de cada pieza en los mapas.
Otros	<ul style="list-style-type: none"> • Registro de otras observaciones importantes sobre reformas y mantenimiento. • Anotaciones relacionadas con el uso de la edificación y dudas para resolver en entrevistas.

Tabla 1. Temas de la ficha guía (fuente: Elaboración propia, 2019).

antigua en 2009- y no hay una tipología definida; todas están en espacios abiertos y cuentan con ventilación natural. Los profesionales que las diseñaron o construyeron tienen amplia experiencia en la aplicación de bambú. La construcción de cuatro edificaciones se basó en maquetas o modelos digitales en 3D; dos, en el proyecto arquitectónico completo y la última, únicamente en las instrucciones del proyectista en obra.

Sobre la durabilidad del bambú, se identificaron dos posturas: la primera intenta prolongar la vida útil por medio de preservantes naturales y químicos, protección por diseño, aplicación de barnices, etc.; mientras que la segunda -observada solo en el estudio de caso 5- considera la durabilidad natural en el diseño y prevé el reemplazo de piezas a lo largo de su vida útil. En este caso, se trataba de una construcción rural agropecuaria donde la

materia prima estaba disponible y los usuarios estaban dispuestos a realizar inspecciones y reemplazos periódicos.

Manifestaciones patológicas en los estudios de caso

Todas las edificaciones presentaron algún tipo de manifestación patológica (gráfico1). Según lo identificado, las manifestaciones patológicas más numerosas fueron las rajaduras y astillas, así como las manchas o cambios de coloración.

Manifestaciones patológicas y especies de bambú

Se identificaron las especies usadas en cada caso y su procedencia. (tabla 2). Se usaron ocho especies de bambú en las edificaciones; la más utilizada fue *P. pubescens*, seguida de *P. aurea*. Entre las especies observadas, la única endémica de la región Sur de Brasil es *G. chacoensis*; *G. angustifolia* es un bambú americano, pero de otras regiones, mientras que el resto de las especies de la tabla procede de Asia. Benton (2015) destacó que 45 especies de bambú tienen importancia económica; entre ellas, tres nativas del continente americano: *G. angustifolia*, *G. amplexifolia* y *G. chacoensis* (Ruiz-Sánchez 2018). La interrogante que surge es ¿por qué los proyectistas no usan con más frecuencia *G. chacoensis* en construcciones de la región?

En todas las especies de bambú se identificaron manifestaciones patológicas. En los bambúes de mayor diámetro *D. asper*, *P. pubescens* y *G. angustifolia*, se identificaron perforaciones ovaladas, atribuidas por sus características al insecto *C. annularis*.

Manifestaciones patológicas y preservación del bambú

Excepto en el caso número 5, en todos se preservó el bambú con métodos tradicionales o químicos para protegerlo del ataque de insectos xilófagos o microorganismos (tabla 3). Los casos 1 y 2, construidos en 2009 y 2010 respectivamente, presentaron pocos elementos de bambú con perforaciones ocasionadas por xilófagos. En los casos 3, 5

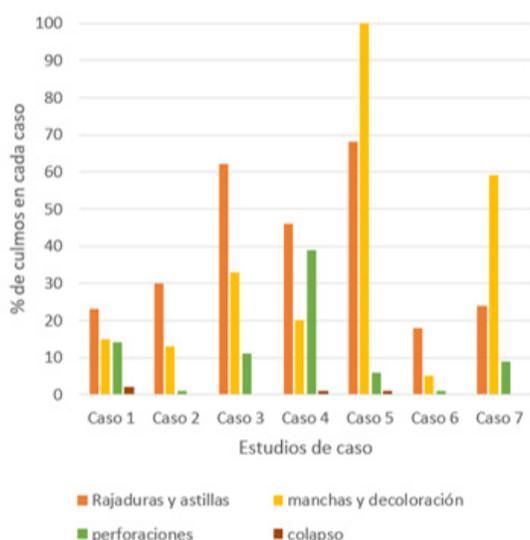


Gráfico 1. Porcentaje de culmos de bambú con cada tipo de manifestación patológica en los estudios de caso (fuente: Elaboración propia, 2019).

Especie de bambú	Estudio de caso							Total de casos que usaron la especie
	1	2	3	4	5	6	7	
1 <i>Dendrocalamus asper</i>	X			X	X			3
2 <i>Guadua angustifolia</i>	X	X						2
3 <i>Phyllostachys pubescens</i>	X	X		X	X		X	5
4 <i>Phyllostachys aurea</i>	X	X			X	X		4
5 <i>Phyllostachys nigra var. henonis</i>			X					1
6 <i>Guadua chacoensis</i>					X			1
7 <i>Bambusa tuldooides</i>					X			1
8 <i>Bambusa vulgaris</i>					X			1
Lugar de procedencia (Estado)	São Paulo / Paraná		Rio Grande do Sul	Rio Grande do Sul / São Paulo	Paraná	Minas Gerais	Paraná	-

Tabla 2. Especies de bambú utilizadas en los estudios de caso y su procedencia (fuente: Elaboración propia, 2019).

	Uso de bambú maduro	Tratamiento preservante	Tipo de tratamiento	Secado
Caso 1	Sí	Sí	CCA, aplicado por autoclave	Sí
Caso 2	Sí	Sí	CCA, aplicado por autoclave	Sí
Caso 3	Sí	Sí	Por fuego	No**
Caso 4	Sí*	Sí	Hervido en agua (<i>Phyllostachys</i>). Inyección de octaborato de sodio (<i>Dendrocalamus</i>).	Sí
Caso 5	Sí	No	-	Sí
Caso 6	Sí	Sí	Por fuego	No**
Caso 7	Sí	Sí	Inmersión en agua y después aplicación de fuego	No**

* El constructor adquirió el bambú de dos proveedores, se asumió que el bambú estaba maduro. En los otros casos los constructores participaron de la cosecha de los culmos.
** Cuando los culmos de bambú son tratados por fuego no se requiere el proceso de secado.

Tabla 3. Proceso de preservación del bambú en los estudios de caso (fuente: Elaboración propia, 2019).

y 6 no se observaron perforaciones ovaladas. En los casos 3 y 6 se preservó únicamente con fuego. En el caso 5, donde no se aplicaron tratamientos preservantes, todos los culmos presentaron manchas de hongos y señales de humedad. En el caso 4 se presentó el mayor número de perforaciones ocasionadas por xilófagos, principalmente en los culmos de *P. pubescens* que no fueron tratados por el constructor sino por el proveedor. Todos los casos, con excepción del sexto, presentaron perforaciones de xilófagos. Es necesario mencionar que ese caso fue construido en 2016 y había pasado por mantenimiento seis meses antes de la fecha de inspección.

Manifestaciones patológicas y clima

La temperatura media en los lugares donde se ubican los estudios de caso varía entre 12°C y 24°C a lo largo del año y la humedad relativa media oscila entre 72% y 89%. Se observó que el estudio de caso que corresponde al lugar con mayores variaciones de temperatura mostró más rajaduras en el bambú. En los sitios con mayor humedad relativa se identificó la aparición habitual de manchas negras o verdes en la superficie de los culmos. Estos casos requieren mantenimiento más frecuente, consistente en aplicar una capa de barniz con filtro ultravioleta que impermeabiliza el bambú; este procedimiento ha resultado efectivo para evitar la decoloración de los culmos expuestos al sol.

Origen de las manifestaciones patológicas

El origen de las manifestaciones patológicas puede darse en más de una etapa; por ejemplo, una conexión mal ejecutada podría haberse

originado en la construcción, pero si no había especificaciones previas en el proyecto, el origen sería también en la fase de diseño. La tabla 4 sintetiza las manifestaciones patológicas identificadas en los estudios de caso, indicando su origen probable. Las rajaduras y astillas se originan principalmente en las fases de diseño (arquitectónico y estructural) y en la construcción, si consideramos que los proyectistas deben especificar las características de los culmos que se utilizan (especie, madurez, tratamiento, secado); la técnica constructiva; el grado de exposición a las condiciones ambientales (protección por diseño) y el pre dimensionamiento estructural.

Las manchas por microorganismos y cambios de coloración por rayos UV se originan en las fases de diseño, uso y mantenimiento;

Manifestación patológica	Estudios de caso							Total
	1	2	3	4	5	6	7	
Rajaduras y astillas	R. en los entrenudos de los culmos rellenos con mortero							5
	R. en la parte central de los culmos							4
	R. por penetración de cuerpo externo							7
	R. por variaciones de temperatura							2
	R. por aplastamiento							2
	R. en los extremos de los culmos							1
	Astillas en los extremos de los culmos							2
	R. por apoyo incorrecto							2
Manchas y cambios de color	R. en la parte central inferior de las vigas							2
	Manchas por el tratamiento							2
	Barniz deteriorado							4
	Manchas de tinta							1
	Hongos verdes y blancos							7
Perforaciones	Hongos negros							7
	Decoloración del culmo							3
	Durante la fase de uso							2
	Por ataque de <i>Dinoderus minutus</i>							5
	Por ataque de <i>Clorophorus annularis</i>							4
Perforaciones	Durante la construcción y reformas							5
	Por ratones							1
Colapso del culmo								4

LEYENDA – Origen de la manifestación

- Proyecto
- Proyecto; construcción
- Construcción (o ejecución)
- Proyecto; uso y mantenimiento
- Uso y mantenimiento
- Construcción; uso y mantenimiento
- Origen no determinado

Tabla 4. Origen de las manifestaciones patológicas identificadas en los estudios de caso (fuente: Elaboración propia, 2019).



Gráfico 2. Número de manifestaciones patológicas según su origen (fuente: Elaboración propia, 2019).

considerando que los proyectistas –además de las características del bambú y su aplicación en la edificación– son responsables de puntualizar qué tipo de mantenimiento requieren los componentes de bambú y su periodicidad.

Las perforaciones ocasionadas por insectos xilófagos están relacionadas con el tipo de preservación seleccionada por el proyectista y con la inspección del bambú durante la fase de uso. Se identificaron también perforaciones producto de errores de ejecución de las conexiones durante la fase de construcción y aquellas realizadas por los usuarios durante la fase de uso para colgar algún objeto.

El gráfico 2, elaborado en base a la tabla 4, muestra la cuantificación del número de manifestaciones patológicas según su origen. La mayoría se originó en la fase de construcción, por errores de ejecución o por el tipo de preservación utilizado. Otro grupo surgió en dos etapas combinadas: construcción / uso y mantenimiento; la causa identificada fue la intervención en las edificaciones sin asesoría técnica.

Las manifestaciones patológicas originadas exclusivamente en la fase de uso y mantenimiento fueron las manchas de pintura o preservantes, la aplicación inadecuada de barniz y perforaciones realizadas por los usuarios. También se observaron varias anomalías originadas en dos etapas combinadas: diseño / uso y mantenimiento, considerando que en la fase de diseño no

se previno la forma de dar mantenimiento a los elementos de bambú.

Existe una relación entre la etapa de diseño y el origen de gran parte de las manifestaciones patológicas: mientras más detallado esté un proyecto, menos decisiones deberán tomarse durante la obra. Esto reduce las posibilidades de que ocurran errores que desencadenen manifestaciones patológicas en las fases de construcción o uso.

El usuario o propietario tiene la responsabilidad de realizar el mantenimiento de los componentes de bambú y observar cualquier señal de anomalías, así como buscar asistencia técnica para las inspecciones, el diagnóstico y las posteriores intervenciones que corrijan el problema.

Sugerencias de prevención

Aunque los proyectistas conocen cómo aplicar el bambú en la construcción, en la práctica algunas manifestaciones patológicas pudieron aumentar su gravedad a causa de decisiones de diseño o construcción. La tabla 5 sintetiza algunas observaciones y recomendaciones que los proyectistas pueden considerar para evitar la aparición de manifestaciones patológicas en las etapas de diseño o construcción.

Además, se identificaron los siguientes temas emergentes:

a) la posibilidad de utilizar varias especies con diferentes diámetros para conseguir propuestas estéticas diversas;

b) la necesidad de formar mano de obra especializada para garantizar la calidad de ejecución y reducir las probabilidades de aparición de anomalías originadas en la fase de obra;

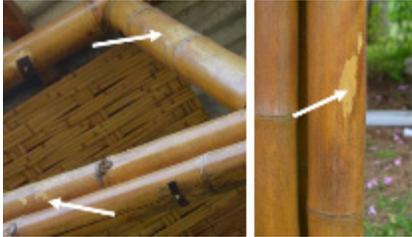
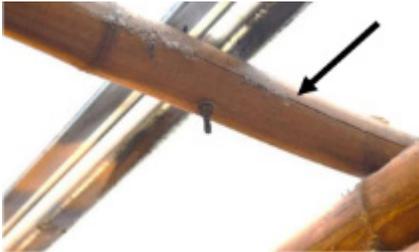
c) la necesidad de prever la fase de uso y mantenimiento en el proyecto.

En ningún caso el proyectista entregó a los propietarios un manual de uso y mantenimiento. Para las edificaciones de bambú, esta información es fundamental porque los usuarios no están familiarizados con el material y es necesario transmitirles información sobre la manera de realizar los mantenimientos para prolongar su vida útil. En la tabla 6 se presentan algunas sugerencias que los proyectistas podrían dar a los usuarios en el manual para prevenir, atenuar o resolver las manifestaciones patológicas observadas en los estudios de caso cuyo origen fue la fase de uso y mantenimiento.

MANIFESTACIÓN PATOLÓGICA	IMAGEN	OBSERVACIONES / SUGERENCIAS
Rajaduras en los entrenudos rellenos de mortero		<p>El bambú y el mortero tienen diferentes comportamientos físicos / mecánicos, ocasionando rajaduras en el culmo.</p> <p>Para atenuar las rajaduras, se puede: a) utilizar abrazaderas en los entrenudos, b) reducir al mínimo el número de entrenudos rellenos de mortero; hacer un estudio estructural detallado de las conexiones; o reemplazar por otros materiales como madera, acero, etc.</p>
Rajaduras por penetración de conector metálico		<p>Para evitarlas, se sugiere iniciar las perforaciones lentamente con brocas de menor diámetro e ir las agrandando, o tratar de perforar el culmo siempre desde afuera hacia adentro.</p>
Rajaduras por variaciones de temperatura		<p>Observadas principalmente en los culmos expuestos a la intemperie (humedad y luz solar).</p> <p>Se recomienda protección por diseño o con productos impermeabilizantes y con filtros UV y mantenimiento.</p>
Rajaduras en los extremos de los culmos en conexiones		<p>Diseñar uniones menos rígidas que consigan absorber momentos flectores.</p>
Astillas causadas por el corte		<p>Cortar los culmos de bambú siempre desde afuera hacia adentro, es decir, girándolos durante el corte.</p>

<p>Manchas por preservación</p>		<p>Anomalia principalmente estética. Pueden preverse, atenuarse o evitarse por parte de los proyectistas, quienes conocen los efectos visibles que tienen los tratamientos como el CCA o la aplicación de capas asfálticas en los culmos.</p>
<p>Manchas causadas por microorganismos (como hongos y líquenes)</p>		<p>Se recomienda protección por diseño: evitar el contacto directo del bambú con el suelo (cimientos impermeabilizados y elevados); protección de las estructuras con aleros o enlucidos; o evitar la exposición frontal a la dirección del viento dominante.</p>
<p>Decoloración del culmo</p>		<p>Evitar la exposición de los culmos a los rayos solares o usar barnices con filtro UV, y dar mantenimiento adecuado.</p>
<p>Perforaciones por elementos artificiales</p>		<p>Considerando que su origen es la fase de construcción por errores de ejecución, se sugiere desarrollar los detalles constructivos durante el diseño y la fiscalización de obra durante la construcción. Asegurar que todas las perforaciones queden selladas al concluir la obra.</p>
<p>Aplastamiento</p>		<p>Realizar un adecuado diseño estructural, especificando detalles constructivos para garantizar una distribución de cargas adecuada y orientar la correcta ejecución de las conexiones. Fiscalización en obra.</p>

Tabla 5. Recomendaciones a los proyectistas para evitar la aparición de manifestaciones patológicas en las etapas de diseño o construcción (fuente: Elaboración propia, 2019).

MANIFESTACIÓN PATOLÓGICA	IMAGEN	OBSERVACIONES / SUGERENCIAS
Perforaciones ocasionadas por clavos u otros elementos		No usar clavos en elementos (principalmente estructurales) de bambú; mostrar alternativas.
Barniz deteriorado		Aplicar el barniz con la periodicidad adecuada. Especificar el tipo de barniz.
Manchas causadas por microorganismos (como hongos y líquenes)		Observar que los culmos no estén en contacto con la humedad. Realizar inspecciones de elementos de bambú; la periodicidad depende del grado de exposición a la intemperie.
Perforaciones causadas por insectos xilófagos		Realizar la observación periódica de los elementos de bambú, identificar los afectados y llamar a un profesional para determinar el alcance del daño y aplicar las medidas correctivas.
Aplastamiento de culmos		Cualquier ampliación o cambio de uso de un espacio (que pueda sobrecargar la estructura) debe consultarse previamente con profesionales para recibir orientaciones que no afecten la integridad estructural de la edificación o pongan en riesgo a los usuarios.

<p>Manchas de tinta o preservantes</p>		<p>Problema principalmente estético. Se recomienda limpiar la superficie de los culmos.</p>
<p>Decoloración de los culmos</p>		<p>Se da en el bambú expuesto a rayos solares. Usar barnices con filtro UV y dar mantenimiento con la periodicidad adecuada.</p>

Tabla 6. Recomendaciones a los proyectistas para evitar la aparición de manifestaciones patológicas en las fases de uso y mantenimiento (fuente: Elaboración propia, 2019).

Después de identificar los problemas más frecuentes en edificaciones de bambú, basándose en la Norma brasileña NBR 14037 (2011), se propuso una estructura básica de manual de uso y mantenimiento de una edificación con estructura de bambú (Jaramillo 2019), compuesta por las siguientes secciones: a) presentación; b) garantías y asistencia técnica; c) memoria descriptiva; d) proveedores; e) operación, uso y limpieza; f) mantenimiento; g) información complementaria.

CONCLUSIONES

Por medio del análisis de las manifestaciones patológicas fue posible comprender los procesos de degradación del bambú en edificaciones de la región Sur de Brasil e identificar las decisiones de diseño relacionadas.

- Las manifestaciones patológicas pueden originarse en varias etapas del proyecto.

- En la práctica, se aborda el proyecto de edificaciones con bambú de forma fragmentada, desestimando la importancia de las fases de diseño y mantenimiento.
- La informalidad del proceso de diseño y construcción de edificaciones con bambú tienen consecuencias directas en errores de ejecución. Un tema emergente fue la falta de divulgación académica sobre el uso del material en la construcción y de mano de obra especializada.
- Aunque se observó que gran número de problemas patológicos se origina en la fase de construcción, se destaca la influencia de la fase de diseño: mientras más detallado esté un proyecto, menos decisiones deberán tomarse durante la obra.
- Se destacó la necesidad de que el proyecto arquitectónico también incluya un manual con especificaciones sobre el uso y el mantenimiento del bambú en las edificaciones;

este debe ser entregado a los dueños de la edificación junto con el resto de documentos.

RECOMENDACIONES

- Se perfiló una metodología replicable de inspección de estado de conservación del bambú en edificaciones. Como complemento, se pueden investigar métodos de inspección que permitan medir el grado de comprometimiento de las piezas afectadas con anomalías y el nivel de riesgo que implicaría para los usuarios.
- En la sección de resultados y discusión se presentaron algunas observaciones e interrogantes que pueden ahondarse en investigaciones futuras con más estudios de caso y con enfoque cuantitativo.
- Aunque hay disponibilidad natural de varias especies de bambú en la región, hace falta incentivar la investigación y el uso de especies nativas.

- No se encontraron proveedores que entreguen culmos tratados y con garantía a los constructores. Se trata de un tema adicional que debe abordarse en nuevos estudios.
- En algunos casos de rajaduras, no se pudieron definir las causas y el origen porque estaban relacionadas con la parte mecánica de la estructura, fuera del alcance de esta investigación. Se recomienda abordar este tema en futuras investigaciones. ▲●●

AGRADECIMIENTOS

A la *Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior* - CAPES de Brasil

y a la Secretaría de Educación Superior, Ciencia y Tecnología (SENESCYT) de Ecuador, por las becas de estudio que financiaron la investigación.

A la *Associação Catarinense do Bambu* (BambuSC) y a los profesionales entrevistados, por su colaboración.

BIBLIOGRAFÍA

- Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. 2010. *NSR-10. Reglamento colombiano de construcción sismo resistente*. Bogotá: AIS.
- Assis Vieira, M. 2016. "Patologias construtivas: conceito, origens e método de tratamento." *Revista Especialize*, 1: 1-15.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. 1997. *NBR 7190. Projeto de estruturas de madeira*. Rio de Janeiro: ABNT.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. 1999. *NBR 5674. Manutenção de edificações- Procedimento*. Rio de Janeiro: ABNT.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. 2011. *NBR 14037. Diretrizes para elaboração de manuais de uso, operação e manutenção de edificações - Requisitos para elaboração e apresentação dos conteúdos*. Rio de Janeiro: ABNT.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. 2013. *NBR 15575. Edificações habitacionais - Desempenho*. Rio de Janeiro: ABNT.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. 2020. *NBR 16828. Estruturas de bambu*. Rio de Janeiro: ABNT.
- Ballesté, J. 2017. Desempenho construtivo de estruturas de cobertura com colmos de bambu. Disertación de maestría. Universidad de São Paulo. <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/16/16132/tde-21122017-103248/pt-br.php>
- Benton, A. 2015. *Priority species of bamboo*. En *Bamboo: the plant and its uses*, editado por Walter Liese y Michael Kohn, 31-42. Hamburgo: Springer.
- Brito, L. 2014. Patología em estruturas de madeira: metodologia de inspeção e técnicas de reabilitação. Tesis doctoral. Universidad de São Paulo - San Carlos. <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18134/tde-18122014-090958/pt-br.php>
- Broto, C. 2006. *Enciclopedia Broto de Patología de la Construcción*. Barcelona: Structure.
- Consoli, O. J. 2006. Análise da durabilidade dos componentes das fachadas de edificios, sob a ótica do projeto arquitetônico. Disertación de maestría. Universidad Federal de Santa Catarina. <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/88380>
- Cruz, H. 2011. "Inspeção, avaliação e conservação de estruturas de madeira." Ieras Jornadas de Materiais na Construção en la Universidad de Porto, 6 de abril.
- Ghavami, K. 2008. "Bamboo: Low cost and energy saving construction materials." International conference on modern bamboo structures. Changsha.
- Helene, P. 1993. Contribuição ao Estudo da Corrosão em Armaduras de Concreto Armado. Tesis doctoral. Universidad de São Paulo. <https://repositorio.usp.br/item/000738379>
- Instituto Ecuatoriano de Normalización. 2016. *NEC-SE-GUADUA: Estructuras de Guadua*. Quito: INEN.
- International Organization for Standardization. 2001. *ISO 15686 -2: Buildings and constructed assets - Service life planning. Part 2: service life prediction procedures*. Ginebra: ISO.
- Jaramillo, A., Ferenhof, H., do Valle, Â., y Librelotto, L. 2019. "Ensaio potenciais para avaliação da durabilidade do bambu em edificações: busca sistemática." *Revista MIX Sustentável*, 5: 55-64. <http://dx.doi.org/10.29183/2447-3073.MIX2019.v5.n3.55-64>.
- Jaramillo, A. 2019. Manifestações patológicas e decisões projetuais que incidem na durabilidade do bambu em edificações no Sul do Brasil. Tesis doctoral. Universidad Federal de Santa Catarina. <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/204499>
- John, V.; Sato, N. 2006. "Durabilidade de componentes da construção". En *Coletânea Habitar: Construção e meio ambiente*, Editado por Sattler, Miguel; Pereira, Fernando. Porto Alegre: ANTAC.
- Kaur, P. J., Satya, S., Pant, K. K., and Naik, S. N. 2016. "Eco-friendly preservation of bamboo species: Traditional to modern techniques." *BioRes*. 11(4), 10604-10624. <https://bioresources.cnr.ncsu.edu/resources/eco-friendly-preservation-of-bamboo-species-traditional-to-modern-techniques/>
- Morán, J. 2002. *Traditional bamboo preservation methods in Latin America*. INBAR.
- Ministerio de Vivienda Construcción y Saneamiento. 2012. *NORMA TÉCNICA E.100: Bambú*. Lima: MVCS.
- López, F.; Rodríguez, V.; Santacruz, J.; Torreño, I.; Ubeda, P. 2004. *Manual de Patología de la Edificación*. Madrid: UPM.
- Ruiz-Sánchez, E. 2018. "Mexican Bamboos in the 21st Century: Diversity, Useful Species and Conservation." 11th World Bamboo Congress, octubre.