

**EL SISTEMA TENDINOSO Y LA EVOLUCIÓN DE SU TECNOLOGÍA
CONSTRUCTIVA: UNA REVISIÓN**
**THE TENDOM SYSTEM AND THE EVOLUTION OF ITS CONSTRUCTION
TECHNOLOGY: A REVIEW**

Pedro Pablo Magaña Herrera^a

Universidad del Valle, Colombia

(ppmh131@hotmail.com) (<https://orcid.org/0000-0002-8797-0856>)

Débora Libertad Ramírez Vargas

Universidad Internacional Iberoamericana, México

(debora.ramirez@unini.edu.mx) (<https://orcid.org/0000-0001-8709-457X>)

Información del manuscrito:

Recibido/Received: 07/04/24

Revisado/Reviewed: 17/06/24

Aceptado/Accepted: 03/08/24

RESUMEN

Palabras clave:

técnicas constructivas no convencionales, medio ambiente sostenible, muro tendinoso, mampostería no reforzada.

La presente investigación integra la relación existente entre tecnología constructiva y medio ambiente, para ser utilizada en la construcción de vivienda empleando el sistema de muros aligerados no estructurales. Con este sistema constructivo, se da a conocer esta nueva tecnología constructiva no tradicional, ya que integrar materiales de origen regional y de bajo impacto ecológico, con el objeto de alcanzar sostenibilidad constructiva a nivel ambiental, económico y social. Teóricamente, el principio filosófico de Cardellach, incorpora el término de sistemas tendinosos en las estructuras, como formas constructivas que tienen su origen en la arquitectura zoológica de los vertebrados, donde estas formas estructurales y constructivas están en un nivel superior de sensibilidad mecánica y de inspiración natural. En el 2002, Thomas integra diseño, tecnología y cultura, en una alternativa constructiva no convencional llamada muros tendinosos. La tipología de este sistema constructivo consiste en la fabricación in situ de paneles modulares rectangulares planos, reforzados en su interior con una malla de alambre de púas que hace las veces de tendones integrados, recubierta en sus dos caras por una mezcla de mortero, para conformar un marco estructural rígido, compuesto por alguno de las siguientes clases de materiales: madera aserrada, por bambú o guadua angustifolia (Colombia), por ángulo metálico o por estructura en hormigón; constituyendo de esta manera un elemento estructural monolítico que se comportará como un muro confinado, que le dará consistencia y acabado al muro.

ABSTRACT

Keywords:

non-conventional construction techniques, sustainable environment, sinewy wall, unreinforced masonry.

Abstract. This research proposal integrates the existing relationship between construction technology and the environment, to be used in the construction of housing using the system of non-structural light walls. With this construction system, it is intended to publicize this new non-traditional construction technology, by integrating materials of regional origin and low ecological impact, in order to achieve construction sustainability at an environmental, economic and social level.

^a Autor de correspondencia.

Theoretically, it is based on Cardellach's philosophical principle, by incorporating the term of tendinous systems in the structures, as constructive forms that have their origin in the zoological architecture of vertebrates, where these structural and constructive forms are at a higher level of mechanical sensitivity and naturally inspired. Subsequently, Thomas integrates design, technology and culture, in an unconventional construction alternative called sinewy walls. The typology of this construction system consists of the on-site manufacture of flat rectangular modular panels, reinforced inside with a barbed wire mesh that acts as integrated tendons, covered on both sides with a mixture of mortar, to form a rigid structural frame, composed of sawn wood, guadua, in metal angle or concrete structure, thus constituting a monolithic structural element that will behave like a confined wall, which will give consistency and finish to the wall.

Introducción

Esta investigación forma parte de un proyecto que desarrollará el diseño de un sistema constructivo de muros tendinosos aligerados no estructurales, con una matriz de tubos de cartón reciclados amigables con el medio ambiente, emulando la arquitectura zoológica de las abejas en sus colmenas, conformando en su conjunto una matriz. La investigación se encuentra enmarcada en el campo de la Ingeniería de los Materiales y las Técnicas Constructivas, y se aborda desde el punto de vista ambiental en el área del reciclado de materiales para la construcción. El modelo propuesto investigado consiste en un nuevo sistema constructivo, compuesto por muros livianos tendinosos para uso no estructural, ya que se hace necesaria la búsqueda de alternativas y principalmente de materias primas no tradicionales, con el objeto de plantear soluciones de carácter tecnológico que optimice el aprovechamiento de estos recursos disponibles, que redunde en el bienestar de la comunidad, desde el punto de vista económico, y el mejoramiento del medio ambiente.

Con la delimitación del tema de investigación a una temática específica y restringida dentro de la mampostería no estructural, la consecución de las fuentes de información y referencias bibliográficas también se hace menos frecuente y reducida, particularmente porque esta temática nace exclusivamente en el departamento del Valle del Cauca, Colombia, Municipio de Santiago de Cali, Corregimiento de Pance, Vereda La Viga, (Thomas, 2002); que por su versatilidad constructiva y geográfica se ha extendido al eje cafetero del país y lo han implementado algunas universidades del área andina. De acuerdo a las diversas investigaciones realizadas sobre esta temática en la región, se hace factible encontrar estos recursos de investigaciones, que serán las fuentes bibliográficas de consulta para dar respuesta y resolución al problema. Derivado de lo anterior, es necesario realizar un análisis no solo bibliográfico del tema, sino de análisis estructural en las propuestas y prototipos que se han presentado principalmente en América Latina, por ejemplo, el estudio realizado por Casas (2011) donde asegura que el Sistema constructivo de muros tendinosos se ha usado con éxito en la construcción de viviendas de uno y dos pisos y en edificaciones complementarias en las zonas rurales y periurbanas del suroccidente colombiano.

Método

Diseño de la investigación

Al existir una realidad objetiva comprobada, como son los muros de mampostería en piedra y ladrillo como método constructivo desde épocas milenarias, estos han ido transformándose con la invención de nuevos materiales y metodologías constructivas. En los tiempos modernos este auge de las nuevas tecnologías en el sector de la construcción está propiciando un problema ambiental de proporciones incalculables, al estar empleando grandes cantidades de materias primas compuestas por materiales naturales no renovables (Ramírez 2022). Para dar solución a esta problemática ambiental se están desarrollando nuevas alternativas constructivas que sean más amigables con el medio ambiente.

El desarrollo y modificación de las técnicas tradicionales de construcción necesitan de la evolución y adaptación ante las necesidades de las sociedades, sino que, están directamente relacionados con salvaguardar la integridad de sus habitantes y el derecho de vivienda digna, sin embargo, debemos considerar el incremento de los cambios

climáticos como lo son las inundaciones, incremento de temperaturas extremas, y sequías que se han presentado en los últimos 10 años (Management Solutions, 2020). Derivado de lo anterior, se hace necesario el diseño y propuestas de nuevas técnicas constructivas que cumplan con las exigencias estructurales que permitan reducir el alto déficit habitacional existente en Colombia (Perera, 2012). Además del cumplir con el reto de las exigencias estructurales, es necesario que estas propuestas reduzcan el tiempo de edificación de una obra y mantengan un óptimo rendimiento entre materiales, mano de obra y quipo con una planificación y ejecución adecuada de sus elementos constructivos. Finalmente se presenta una propuesta de sistema de muros aligerados que consiste en la fabricación in situ de paneles modulares rectangulares planos, reforzados en su interior con una malla de alambre de púas que hace las veces de tendones integrados, recubierta en sus dos caras por una mezcla de mortero, para conformar un marco estructural rígido, compuesto por alguno de las siguientes clases de materiales: madera aserrada, por bambú o guadua angustifolia (Colombia), por ángulo metálico o por estructura en hormigón; constituyendo de esta manera un elemento estructural monolítico que se comportará como un muro confinado, que le dará consistencia y acabado al muro.

Instrumentos

Para la definición de la evolución estructural, actualizaciones e innovaciones de los muros tendinosos, se realizó una búsqueda bibliográfica en los sistemas de información especializada conocidas, Google Académico y Scopus o Reserach Gate. La búsqueda incluyó palabras claves como estructuras tendinosas, ecología de los muros tendinosos, muros de mampostería no estructurales mediante sistemas tendinosos, etc. Seguidamente, la selección de los productos científicos a estudiar se realizó desde su origen hasta el año 2023, ya que esta investigación marcará la importancia de utilizar este tipo de sistemas estructurales, sus limitantes y variables, que necesitan de actualizaciones constantes para garantizar un funcionamiento óptimo sostenible. Se realizó una matriz utilizando el propósito de cada una de los productos académicos/científicos seleccionados, para empezar a trazar una línea de tiempo en la evolución de los sistemas tendinosos constructivos. Con la selección de la zona de estudio, se terminó de delimitar los productos científicos que marcaron los resultados y análisis de esta investigación. Derivado del tipo de sistema constructivo al que responden, el tipo de sociedad a servir y el sistema de infraestructura para el cuál se encuentra diseñado, se procedió a realizar una jerarquía de recomendaciones para qué los sistemas tendinosos en especial los muros no estructurales, sean una primera opción en diferentes construcciones ya sea para vivienda, comercio, instalaciones educativas, ya sean urbanas o rurales.

Resultados

La necesidad de un cambio de paradigma en lo referente a los métodos constructivos tradicionales, y al manejo de los materiales desde el punto de vista tecnológico para implementar y construir viviendas más económicas y eficientemente ambientales el sistema constructivo no tradicional de los muros tendinosos, no es una metodología nueva, pero ofrece una alternativa viable y sostenible mediante el análisis y recuento cronológico de la evolución técnica y constructiva del muro tendinoso.

Sistemas tendinosos

Cardellach en 1910 expresa que el hombre debe ser contemplativo de la naturaleza, que es su gran verdad de todo el mundo material que lo rodea; ayudado de su

imaginación argumenta y raciocina expresando sus fenómenos “en forma de conceptos geométricos y expresiones matemáticas analíticas, constituyendo como un espiritual engranaje de racionales deducciones que nos llevan velozmente al descubrimiento de verdades nuevas”, (1970, p. 1).

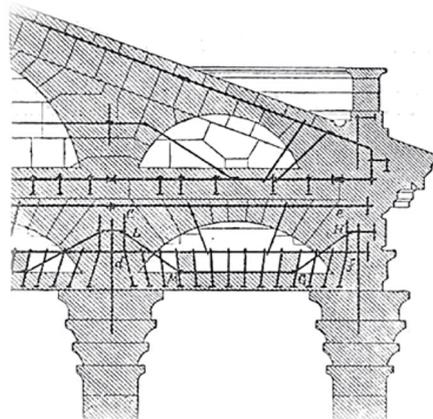
Todas las estructuras están sujetas a las leyes de las fuerzas externas de la naturaleza, llamándolo principio general mecánico, que se debe satisfacer simplificando la complejidad de los fenómenos naturales estableciendo hipótesis sencillas, para ser posible la estabilidad y la resistencia de la estructura, a esto lo llama el principio de la estructura. En la naturaleza se tiene un ejemplo, la arquitectura zoológica de los vertebrados conformada por el esqueleto animal. Concluyendo de esta manera que el ingeniero con ese espíritu innovador, debe descubrir nuevas formas de armazones resistentes para la actual construcción; el único origen de estas formas estructurales y constructivas está en un nivel superior de sensibilidad mecánica y de inspiración natural, los cuales son innatos en el hombre (arquitecto, ingeniero) y que han constituido una importante característica de su desarrollo, (Cardellach, 1970, p. 8-10). Sintetiza que las formas estructurales se deben clasificar o agrupar por armonía de textura, de mecánica y de construcción en dos grupos principales:

1. Formas bi resistentes, son aptas para soportar esfuerzos de compresión y esfuerzos de tensión, se utilizan sistemas constructivos de tendones de acero en forma de enrejado (esqueleto) y articuladas entre sí para absorber estos esfuerzos.
2. Formas uni resistentes, son aptas para soportar solamente esfuerzos de compresión o esfuerzos de tensión, se utilizan sistemas constructivos de dovelas compuestas por elementos flexibles, (Cardellach, 1970, p. 12-16).

Las configuraciones estructurales señalaron en un principio al tendón metálico su sitio apropiado en la mampostería y por circunstancias económicas facilitaron el desarrollo del sistema tendinoso, la mampostería pasa a un segundo plano siendo protectora del sistema enrejado al fijar el tendón tensado y transmitir su fuerza al hormigón, tal como se presenta en la Figura 1.

Figura 1

Refuerzos de hierro en piedra, Iglesia Santa Genoveva de París



Nota. Fuente: [http://www.wikiwand.com/es/Jacques-Germain Soufflot](http://www.wikiwand.com/es/Jacques-Germain_Soufflot)

Esta colocación estratégica del sistema tendinoso es una forma resolutoria del problema estructural, esta ramificación llega a alcanzar el aspecto de una red en la propia entraña de la estructura y en unión con ella, logra darle formas a la estructura, (Cardellach, 1970, p. 52-75). Cardellach concluye que

Tal es la finura y elegancia alcanzada por el sistema tendinoso en la resolución de un problema de resistencia estructural, obteniendo una estructura original y

económica, resistente y elástica, que sintetiza las ventajas de la construcción que son propias del hormigón armado..., aquí muere la racionalización mecánica de las estructuras romanas por consecuencia necesaria de la característica general del concreto, (1970, p. 83).

De acuerdo a Cardellach, dentro de los sistemas uniresistentes de transmisión de cargas clasifica el principio de apilamiento o sobreposición de materiales, como el principio de todo proceso constructivo, que es definido como “disposición rudimentaria que está inspirada en las que ofrecen las pilas naturales y sin ley aparente del material depositado por accidentes fortuitos”, (1970, p. 94). Estructuralmente define tres clases de tendones:

1. Tendones por ligamento, utilizados para unir puntos críticos en mampostería con el objeto de evitar deslizamientos parciales y mantener el monolitismo de la estructura.
2. Tendones aparentes, utilizados para ligar entre sí la totalidad de la superficie de contacto de los elementos, con el objeto de mejorar la resistencia mecánica de todos sus elementos.
3. Tendones adheridos, utilizados para ser colocados internamente en la estructura con el objeto de formar una sola estructura monolítica.

Torroja en 1957, expresa que el hormigón armado es una piedra orgánicamente constituida, dentro de cuya masa el complejo tendinoso de la armadura se distribuye óptimamente, se dosifica para prestar al hormigón la resistencia a la tracción que necesita en cada punto, el trabajo conjunto entre la masa del hormigón y las barras de acero va confinado a la adherencia, asegurando la transmisión de los esfuerzos de las armaduras al hormigón y viceversa, (Torroja, 2010, p. 67-68). El hormigón es un material diferente al acero de refuerzo, ya que es muy débil cuando trabaja a la tensión en comparación con su buen desempeño a la compresión, por esta razón en las estructuras se colocan entramados de varillas de refuerzo en las regiones donde se presenten esfuerzos de tensión, dando como resultado que la sección transversal de la estructura se va a comportar como una sección compuesta de dos materiales, el hormigón y el acero de refuerzo, (White, 1980, p. 52-54).

Sistema de muro tendinoso en Colombia.

Se presentan a continuación los resultados de la investigación realizada a nivel regional, donde se explica detalladamente los materiales constitutivos, la composición y estructura del muro tendinoso, al aplicar este sistema constructivo no tradicional en Colombia.

A) Thomas en la década de los 90's, presenta el Sistema Tendinoso como “una investigación que integra diseño, tecnología y cultura, que responde a la necesidad sentida de vivir en casa de material” (2002, p. 25), es una alternativa constructiva no convencional que parte de los saberes y técnicas arquitectónicas tradicionales campesinas, optimizando estos saberes y dando respuesta a la necesidad de estas comunidades de construir su propia vivienda en materiales de construcción más resistentes, seguros y duraderos en el tiempo, (2015, p. 170).

La tipología de este sistema constructivo consiste en la fabricación in situ de paneles modulares planos, reforzados en su interior con una malla de alambre de púas que hace las veces de tendones integrados, unida mediante grapas a elementos verticales y horizontales conformando un marco estructural rígido compuesto por madera aserrada o rolliza, guadua, ángulos metálicos de hierro u hormigón reforzado. El alma de los tabiques es un entramado en fibra natural biodegradable llamado costal, cuya base es la cabuya, mezcal o fique, que se entrelaza con el entramado de alambre de púas, con la

finalidad de servir de soporte para la aplicación de la mezcla de mortero, por capas sucesivas para suministrarle unión entre sus elementos y darle rigidez al entramado, constituyendo un elemento estructural monolítico que se comportará como un muro confinado, dándole terminado final al panel con unos espesores promedios de 4 a 5 centímetros, (Torres, 2013, p. 1), (Figura 2).

Figura 2

Componentes del sistema muro tendinoso



Nota. Fuente: Mora (2022, p. 47)

El sistema de muro tendinoso está constituido por la integración de dos elementos básicos, los elementos lineales (horizontales y verticales) que hacen las veces de marco y soporte estructural, y los elementos planos del panel o tabique modular, compuesto por el entramado o tendones de alambre de púas entrelazados con el alma de fique que tendrá adherido el mortero de pega. Thomas sostiene que “la apuesta investigativa consistió en estimular un enfoque integral de diseño ambiental, que recrease lo positivo de la tecnocultura existente” (2002, p. 28), donde impera un deslinde de tipo político que viene desde la conquista y posterior colonización, pues se impuso la arquitectura con materiales perdurables como el ladrillo, la cual llama tecnocultura colonial, sobre la tecnocultura local biodegradable de la madera (malocas y bahareque) la cual se excluyó siendo de tipo indígena, a esto él lo llama el gran olvido de la educación tecnológica. Desde esta perspectiva ideológica se materializa el sistema tendinoso, desarrollando técnicas constructivas y empleando estructuras de madera tradicional de la región, para que los pobladores fueran sus autoconstructores mediante las costumbres ancestrales de las mingas y convites (tradicción indígena de trabajo comunitario), otros factores importantes es que las construcciones resultantes sean confortables para sus habitantes, (Figura 3).

Figura 3
Construcción del sistema muro tendinoso



Nota. Fuente: <http://www.zuarq.co/>

Thomas lo define como “tecnología apropiada” al diseñar un sistema constructivo amigable con el medio ambiente, que responda a los determinantes socio culturales propios del lugar, desde el punto de vista estético, estructural y económico, (2002, p. 31).

B) Guerrero y Casas, analiza el aspecto sísmico, donde hace énfasis que la región pacífica se localiza en una zona de alta sismicidad, el comportamiento de las diferentes estructuras y su vulnerabilidad ante estos eventos y la seguridad que las construcciones puedan garantizar frente a los sismos, agrega que el sismo de Armenia en 1999 evidenció la alta vulnerabilidad sísmica de las edificaciones menores de uno y dos pisos que fueron construidas sin cumplir los requisitos de diseño sismorresistente, (2002, p. 51). Este sistema se puede clasificar como muros confinados de carga y su sistema estructural básico consiste en un aporticado de madera, guadua o acero, que al integrar el panel de muro tendinoso a esta estructura trabaja como un muro de carga, este sistema constructivo se ha empleado con éxito en viviendas de uno y dos pisos, (Guerrero y Casas, 2002, p. 52-53).

C) Velázquez realiza un análisis del sistema de muro tendinoso: debido a su versatilidad, rapidez en su construcción y economía, fue proyecto piloto de la Federación de Cafeteros de Colombia (Federecafé) empleando este sistema constructivo en el Departamento del Valle del Cauca (Colombia) y específicamente en los municipios del eje cafetero (Caicedonia, Sevilla, Restrepo, Trujillo, La Victoria, Bolívar) entre otros, donde existen grandes plantaciones de guadua o bambú, (Velázquez, 2010, p. 8-10).

Franco (2019), analizó diferentes técnicas constructivas tradicionales de Colombia, principalmente las que se basan en la utilización de bambú en la construcción de edificios de una o dos plantas, también estudió los posibles criterios bioclimáticos a tener en cuenta para garantizar una adaptación óptima al clima local, que derive en conseguir el confort de los usuarios sin necesidad de un elevado consumo energético. Este sistema poco a poco se fue masificando en otras regiones debido principalmente a su

facilidad constructiva, ya que no se necesita mano de obra calificada y se puede adelantar por métodos comunitarios de autoconstrucción, (Figura 4).

Figura 4

Construcción del sistema muro tendinoso



Este sistema constructivo no se encuentra avalado por el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente, (NSR-10), Título G sin embargo tuvo su primera prueba de fuego durante el sismo de Armenia en 1999 (magnitud sísmica en la Escala de Richter de 6,1) donde demostró un comportamiento óptimo por su ductilidad inherente que evita el colapso de los muros, algunas de las viviendas construidas por este sistema y que fueron afectadas por el sismo no presentaban mayores daños ni sus muros colapsaron, a diferencia del mal comportamiento de los sistemas tradicionales de construcción con ladrillo, (Velázquez, 2010, p. 8-10). Por su facilidad constructiva, rapidez de ejecución y su bajo costo, este sistema constructivo ha permitido dar respuesta a la necesidad de muchas personas con escasos niveles económicos, estas características han hecho que los muros tendinosos se hayan popularizado en estas zonas, reproduciendo y adaptando los métodos constructivos con nuevos materiales y diversas configuraciones geométricas, (Velázquez, 2010, p. 15-16). Desde el punto de vista estructural el muro tendinoso es de carácter heterogéneo, es un material compuesto, anisótropo y sus componentes presentan un comportamiento mecánico no lineal, sus características estructurales son las siguientes:

- Estructura de confinamiento, estos elementos trabajan con una doble función estructural al transmitir las cargas verticales a la cimentación, horizontalmente da confinamiento al marco del panel, además de ser el soporte físico de todos los demás elementos del sistema.
- Mortero de pega, a pesar de no tener una función específicamente estructural, su función principal es darle consistencia al muro ante cargas perpendiculares a su plano de colocación, también da adherencia al conjunto del muro tendinoso.

- Alambre de púas, su comportamiento es el de un cable tensor que absorbe cargas de tracción en la dirección horizontal del muro, también permite el agarre y sostenimiento del entramado natural de fique.
- Entramado en fibra natural de fique, es la superficie que permite la colocación y cohesión del mortero de pega ante cargas perpendiculares al plano del muro, (Velázquez, 2010, p. 21-22).

Adicionalmente, Velázquez diferencia los sistemas estructurales del muro tendinoso con sus diversos materiales constitutivos:

- Estructura con perfiles metálicos, las secciones de estos perfiles metálicos A-36 es pequeña (1 1/2" a 2" x 1/8"), su anclaje a la cimentación es totalmente empotrado (el ángulo o perfil queda embebido) o su fijación se puede realizar por el sistema de anclaje con pernos embebidos, la unión entre los elementos del entramado se realiza por medio de soldadura eléctrica, o sea que puede asumir movimientos de la estructura o entramado sin comprometer la estabilidad del muro, a estos perfiles se les debe soldar los ganchos galvanizados para fijar los tendones de alambre de púas, como las secciones de los perfiles son pequeñas no reduce el área arquitectónica de las viviendas.
- Estructura en madera, las secciones de este entramado en madera aserrada o rolliza pueden ser de 4" x 4" x 6 metros, su anclaje a la cimentación es totalmente empotrado (la columna queda embebida), la unión entre los elementos del entramado se realiza por medio de pernos, se requiere que a la madera se la haya hecho un proceso de inmunización.
- Estructura en guadua, las secciones de este entramado pueden ser de 10 centímetros a 15 centímetros de diámetro, su anclaje a la cimentación es totalmente empotrado (la columna queda embebida), la unión entre los elementos del entramado se realiza por medio de pernos, se requiere que a la guadua se la haya hecho un proceso de inmunización.

La geometría de los paneles del muro tendinoso es de forma rectangular, las columnas de la estructura de confinamiento se pueden dimensionar desde los 0,75 metros hasta un máximo de 1,2 metros, con una altura promedio de los 2,4 metros como máximo, la colocación de los alambres de púas puede ser entre los 20 y 30 centímetros, intercalando su distancia entre los parales, (Velázquez, 2010, p. 24-26). La funcionalidad del sistema de muro tendinoso lo analiza desde el punto de vista constructivo, como un conjunto en sí de la vivienda, destacando las siguientes funcionalidades:

- Cerramiento, su función básica es la de separar los diferentes ambientes de la vivienda, constituye una matriz sólida en su conjunto que es capaz de resistir impactos perpendiculares a su plano de acción y es relativamente liviana en comparación con los sistemas convencionales de construcción en mampostería de ladrillo.
- Resistencia, el muro tendinoso no es autoportante y su estructura vertical debe estar empotrada a la cimentación, la resistencia de todo el sistema de los muros tendinosos se encuentra supeditada al confinamiento dado en la estructuración del sistema constructivo, siendo apta para construcciones de uno y dos pisos.
- Aislamiento, no tiene ninguna clase de aislamiento acústico o térmico.
- Durabilidad, el muro tendinoso requiere de un adecuado mantenimiento cuando se presentan fisuras, descascaramientos en el mortero, grietas en las uniones de construcción, con el resane a tiempo se puede garantizar una buena durabilidad.

- Estanqueidad, el muro tendinoso por su naturaleza no es estanco debido a la porosidad del mortero de pega, para evitar este fenómeno se debe impermeabilizar el muro en su cara exterior para evitar filtraciones.
- Tiempo de construcción, una de las ventajas más importantes que tiene el sistema de muros tendinosos es su proceso constructivo de armado rápido.
- Versatilidad, este sistema constructivo es aplicable a viviendas de interés social (VIS), en viviendas campestres de estrato alto, por su adaptabilidad a toda clase de proyectos con diversos climas y topografías del terreno.
- Estética, las construcciones con muros tendinosos tienen mucha libertad desde el punto de vista arquitectónico, (Velázquez, 2010, p. 42-44).

D) Bedoya hace énfasis en el aspecto estético de la estructura, es muy necesario para la aceptación o rechazo de una técnica constructiva o material de construcción, (2011, p. 82). Enumera las características, propiedades y funciones de los materiales que intervienen en la construcción de un muro tendinoso, las cuales son los siguientes elementos:

- Alambre de púas, material base que actúa de refuerzo en el entramado tendinoso, su función estructural es la de absorber los esfuerzos de tensión en el panel del muro.
- Entramado en fibra natural de fique, este material es el alma del panel y está compuesto por sacos o empaques de fique, hace las veces de una malla que cubre toda la extensión del panel. Su función principal es la de dar adherencia al sistema tendinoso con el mortero que se le carga por capas sucesivas hasta obtener el espesor deseado del muro.
- Mortero de pega, este material es el encargado de darle solidez al panel del muro tendinoso y al mismo tiempo darle su acabado final, las actividades de la colocación de este mortero de pega es similar al repello, la primera actividad es la cargada del panel por medio de una mezcla de mortero rico en cemento y agua que se va lanzando sobre el entramado de fibra natural con la finalidad de obtener adherencia, posteriormente después del secado de esta capa se colocan las capas sucesivas que le darán el espesor necesario al muro tendinoso.
- Estructura de confinamiento, lo componen los elementos verticales (columnas) y horizontales (vigas) que le van a dar rigidez al sistema de los muros, los materiales puede ser madera, guadua, ángulos de hierro, hormigón armado, (Bedoya, 2011, p. 82-83).

E) Builes analiza el aspecto constructivo del muro tendinoso, donde la cimentación está constituida por una viga de sobrecimiento, sobre ella se construye un muro de mampostería perimetral de arranque en ladrillo con la finalidad de dar aislamiento al sistema estructural y al propio muro tendinoso, sobre este muro se construyen los paneles que componen la estructura resistente y están conformados por las columnas y vigas que le proporciona confinamiento al sistema, las columnas van empotradas en una solera tanto en su parte superior como inferior con el objeto de proporcionar rigidez al sistema, (Builes, 2011, p. 44-45).

F) Casas lo define como un sistema constructivo no convencional, que debe proporcionar seguridad, estabilidad y durabilidad en el tiempo, (2011, p. 27). Define los aspectos a evaluar de este sistema:

- Aspecto ambiental, este se compone de dos órdenes:
 1. Orden formal, es el entorno urbano o rural donde se implementará el sistema.

2. Orden funcional, que se encuentra compuesto por la geografía, el clima, la normatividad constructiva.
 - Aspecto tecnológico, este comprende el nivel de uso del sistema constructivo.
 - Aspecto socio-económico, relaciona la situación económica de la región, (Casas, 2011, p. 28-36).

G) En su investigación Giraldo - Raigoza y Sánchez, hace énfasis en la construcción de: Viviendas en la zona rural con la aplicación de bioarquitectura de muro tendinoso, basado en las características del entorno social, zonas de influencia con necesidad latente de un modelo de mejoramiento a nivel de vivienda y necesidad, se considera de manera urgente para satisfacer el déficit presentado. La conciencia ambiental, es otro de los factores a tratar en la ruralidad a partir de la incursión del nuevo modelo de vivienda rural planteado, (2016, p. 16). La guadua angustifolia es la materia prima mas importante en la construcción de una clase del muro tendinoso, es un recurso renovable y sostenible al ser fijadoras del dióxido de carbono (CO₂), cumpliendo con la sostenibilidad constructiva.

H) Mora realiza una investigación de carácter experimental en laboratorio, fabricando diversas clases de muros tendinosos sometidos a cargas laterales, las dimensiones de estos muros tendinosos tienen una altura de 2,20 metros, un ancho de 1,20 metros y un espesor variable entre 5 y 7 centímetros, enumerando los siguientes prototipos, (Mora, 2022, p. 47-49):

- Muro tendinoso tipo Thomas, el cual consiste en un pórtico de guadua, una matriz interna en costal de fique, alambre de púas y recubierto por ambas caras de mortero con cemento y arena.
- Muro tendinoso tipo Chacón, consistente en un pórtico en guadua, una matriz interna de malla metálica con vena, retículo interior reforzado con acero corrugado de 3/8" y recubierto por ambas caras de mortero con cemento y arena.
- Muro tendinoso tipo Morachá, el cual consiste en un pórtico de guadua, una matriz interna de esterilla de guadua, reforzada con acero corrugado de 3/8" y recubierto por ambas caras de mortero con cemento y arena.

Del ensayo a flexión con cargas laterales realizado a las muestras de muros tendinosos en laboratorio, se obtienen los siguientes resultados de la carga máxima de rotura, (Mora, 2022, p. 91):

- Muro tendinoso tipo Thomas, $\bar{X} = 6,12$ kN.
- Muro tendinoso tipo Chacón, $X = 7,00$ kN.
- Muro tendinoso tipo Morachá, $X = 6,55$ kN.

	CARGA MÁXIMA DE ROTURA		
	THOMAS	CHACÓN	MORACHÁ
Ensayo 1	6,75	8,2	6,9
Ensayo 2	5,99	6,15	6,64
Ensayo 3	5,4	7,55	6,47
Ensayo 4	6,33	6,08	6,2
X =	6,12	7,00	6,55
S =	0,5705	1,0506	0,2941
CV =	9,33	15,02	4,49

Al realizar un análisis estadístico de los valores del ensayo lateral a flexión de los muros tendinosos, la mayor media aritmética corresponde al ensayo de Chacón, el valor

de Thomas es menor en un 12,6% y el de Morachá en un 6,4%, respecto al mayor valor. El valor del coeficiente de variación (CV) del ensayo de Chacón tiene una variación alta (15,02%), seguida por el ensayo de Thomas (9,33%) y el menor coeficiente para el ensayo de Morachá. Se concluye el buen comportamiento de las diversas clases de muros tendinosos ante las cargas horizontales o laterales a la flexión.

I) García y Velásquez en su investigación de carácter experimental en laboratorio, proponen una nueva alternativa de muros tendinosos, al reemplazar el costal de fique y el alambre de púas por un enmallado de botellas PET (tereftalato de poliuretano) y raquis (tallo) de plátano, materiales residuales reciclados, generando una nueva forma de reutilización de estos productos para ser utilizados en la fabricación de muros tendinosos para la construcción, (2021, pp. 15-17). Al realizar los respectivos ensayos de laboratorio, se concluye que las fibras de raquis no presentan una buena adherencia con el mortero, adicionalmente, de acuerdo a los ensayos de compresión y flexión, las mallas PET no generan ni aportan resistencia al muro tendinoso. Como conclusión de la investigación realizada, no es viable la implementación de esta clase de materiales en la fabricación de los muros tendinosos, (García y Velásquez, 2021, p. 97).

Discusión y conclusiones

Los sistemas tendinosos se consideran formas constructivas que tienen su origen en la arquitectura zoológica de los vertebrados, como es la combinación de esqueleto, músculos y tendones (Cardellach, 1970), en relación con esta investigación realizada, este sistema constructivo demuestra ser de utilidad en elementos de carga y división, principalmente en la relación directa de los materiales que lo conforman y el fin para el cual serán diseñados. Lo que queda respaldado por Cardellach (1970), quien afirma que, el único origen de estas formas estructurales y constructivas está en un nivel superior de sensibilidad mecánica y de inspiración natural. Cardellach concluye, que el Ingeniero con ese espíritu innovador, debe descubrir nuevas formas de armazones resistentes para la actual construcción.

El sistema del muro tendinoso se viene aplicando en Colombia desde los años noventa, al ser respetuoso con el medio ambiente ha permitido dar una respuesta a la necesidad de viviendas para personas de bajos recursos económicos, pues no se necesita mano de obra calificada. El confinamiento que trasmite el sistema de muros tendinosos es de alta resistencia a las cargas gravitacionales y muy estable a los eventos sísmicos como quedó demostrado en el sismo de Armenia (Colombia) en el año de 1998 (Zuluaga, 2012, p. 14-15). Desde el punto de vista tecnológico, la adopción de los sistemas alternativos no convencionales de construcción, traen consigo la innovación o mejoramiento de estos sistemas, ya sea, mediante el empleo de materiales tradicionales regionales, la implementación de nuevos métodos constructivos, de organización y producción para la reducción de los costos de construcción, la utilización de materiales reciclados en algunos casos, todos estos aspectos enumerados son posibilidades que en un momento dado se pueden convertir en opciones reales y efectivas para el aprovechamiento de los recursos existentes, y de esta manera ayudar a las clases menos favorecidas a mejorar sus niveles de vida con la construcción de viviendas dignas, como las que se construyeron en el barrio La Independencia, Municipio de Restrepo, Valle del Cauca, Colombia, Figura 5.

Figura 5

Conjunto de viviendas construidas con el sistema muro tendinoso



Las ventajas que presenta este sistema de muro tendinoso son:

- Se pueden aplicar y mejorar las tradiciones constructivas ancestrales campesinas.
- Se utilizan los recursos de mano de obra y materiales de la misma región.
- A los paneles revestido de mortero se les puede dar un acabado rústico, o se puede estucar y pintar posteriormente.
- El sistema de paneles permite la colocación interna de toda clase de tuberías para instalaciones eléctricas, hidráulicas, gas.
- Los paneles por su espesor sirven como aislantes térmicos y acústicos en la vivienda.
- El sistema tendinoso es muy económico por lo que se pueden construir viviendas a bajo costo, se pueden construir viviendas tanto en la zona rural como en la zona urbana de una localidad.
- El comportamiento de este sistema de muros tendinosos ante las acciones sísmicas presentadas en la región fue muy positivo, sismo de Páez en 1995 con un valor en la escala de Richter de 6,5, y el de Armenia en 1998 con un valor en la escala de Richter de 6,4, calificados por su valor como fuertes. Las viviendas construidas con el sistema de muro tendinoso no sufrieron daños estructurales.
- El sistema de muros tendinosos ante los sismos no presenta volcamientos, como si lo presentaron las construcciones en bahareque y muros en ladrillo simple, este factor de respuesta sísmica es muy importante, cuando se trata de salvaguardar las vidas de sus ocupantes.
- Es un sistema constructivo que es amigable con el medio ambiente.
- Este sistema constructivo, se inscribe en el marco planteado por el Plan de Acción Regional para el desarrollo sostenible del Programa 21 de las Naciones Unidas, en lo referente a la recuperación de sistemas y materiales tradicionales, al utilizar sistemas no convencionales y alternativos.

Las pocas desventajas que presenta este sistema de muro tendinoso son:

- Se pueden presentar humedades directas en los muros localizados en las partes externas de la vivienda, producto de las aguas lluvias, las cuales se pueden prevenir al realizar un mantenimiento periódico con revestimientos de pinturas plásticas impermeables.
- Al construir en madera o guadua, estas deben encontrarse bien inmunizadas prevenir ataques de insectos xilófagos, con el objeto de garantizar su durabilidad en el tiempo y buen comportamiento estructural.
- Otro factor muy importante a tener en cuenta, son los errores de carácter constructivos que se puedan presentar en su ejecución, producto de la inexperiencia en la autoconstrucción.

Como tema de discusión investigativa y de carácter técnico, se dejan los siguientes aspectos:

- Tal es la importancia alcanzada por el sistema tendinoso en la resolución de un problema de resistencia estructural, que se obtiene una estructura original, económica, resistente y elástica.
- Thomas materializa el sistema tendinoso, desarrollando técnicas constructivas y empleando estructuras de madera tradicional de la región, implementando el sistema de autoconstrucción.
- Con este sistema constructivo de muro tendinoso, se da respuesta a las necesidades de vivienda de las clases menos favorecidas, su implementación se puede dar en cualquier lugar geográfico.
- Con esta nueva tecnología de sistema constructivo, se pretende dar cumplimiento a las exigencias ambientales, teniendo en cuenta desde esta perspectiva, la aplicación de nuevas tecnologías limpias en el campo de la construcción.
- Es una herramienta básica que debe garantizar la calidad de vida digna, dando respuesta a las necesidades primarias insatisfechas de las familias de bajos recursos económicos.
- Se puede implementar el sistema comunitario de autoconstrucción, debido a que no necesita elementos prefabricados.
- Por ser un sistema constructivo muy flexible, se pueden adaptar y modular fácilmente los espacios arquitectónicos de la vivienda.
- El sistema es adaptable a cualquier zona geográfica y topografía del terreno, lo mismo que es amigable con el medio ambiente.
- Por su versatilidad en la construcción, es posible utilizar varios materiales en la estructura de la vivienda, ya sea madera, guadua de la propia región.

De este proceso investigativo, se enumeran las siguientes conclusiones:

1. Se demostró la viabilidad del sistema constructivo para dar respuesta al problema del déficit de vivienda tanto en las zonas urbanas como rurales.
2. El sistema tendinoso da como resultado una construcción de calidad con materiales de la región.
3. Desde su principio filosófico aportó el concepto integrador de tecnologías apropiadas.
4. Desde el punto de vista profesional y académico, al trabajar con la comunidad se hace una aprehensión de los saberes constructivos ancestrales.
5. Académicamente, se supera el concepto de la arquitectura excluyente por la función evolutivamente creadora de la arquitectura incluyente.
6. Filosóficamente, es significativa la aceptación social de esta tecnología, que la comunidad la califica como apropiada para ser implementada por ellos.

7. Los proyectos constructivos de los muros tendinosos en urbanizaciones rurales o urbanas, deben satisfacer las necesidades físicas y básicas de carácter social de las comunidades, en concordancia con la construcción sostenible y manteniendo un equilibrio entre los ecosistemas existentes.

Referencias

- Bedoya Montoya, C. M. (2010). *Los muros tendinosos en la arquitectura y la construcción*. Libro cuatro de arquitectura (1ª Ed.). Facultad de Arquitectura, Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín.
- Bedoya Montoya, C. M. (2011). *Construcción Sostenible, para volver al camino*. Biblioteca Jurídica DIKĚ, Cátedra UNESCO de Sostenibilidad. https://issuu.com/iscucen/docs/construccion_sostenible_para_volver
- Builes Hoyos, T. & Giraldo Montoya, C. (2011). *Estado del arte de la guadua como material alternativo para la construcción sostenible*. [Trabajo de Grado, Universidad EAFIT]. <https://repository.eafit.edu.co/handle/10784/5451>
- Cardellach, F. (1970). *Filosofía de las estructuras*. Editores Técnicos Asociados, S. A.
- Casas Figueroa, L. H. (2011). *Sostenibilidad, Sistemas Constructivos, Muros Tendinosos*, Seminario Biocasa - CAMACOL, Hábitat y Desarrollo Sostenible, Santiago de Cali, Colombia.
- García, D. A. F. (2019). Análisis de una construcción con bambú y adobe. Propuesta para la construcción de una escuela en Quibdó (Chocó, Colombia). [Trabajo fin de Grado, Oficina de Medio Ambiente (OMA-UDC)]. https://ruc.udc.es/dspace/bitstream/handle/2183/25606/Premio_UDC_sustentabilidad_TFG_TFM_I_2018.pdf?sequence=8#page=53
- García León, D. F. & Velásquez Ramírez J. A. (2021). *Viabilidad de muros tendinosos a base de bandas PET y fibras de raquis de plátano*. [Trabajo de Grado, Universidad de La Salle]. https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_civil/959/
- Giraldo Marín, S., Raigoza, Valencia, A., C., & Sánchez Restrepo, A., (2016). *Estudio de factibilidad para construcción y comercialización de viviendas ecológicas de interés prioritario con uso de técnica muro tendinoso en zona rural de Risaralda*. [Trabajo de Grado, Universidad Tecnológica de Pereira]. <https://core.ac.uk/download/pdf/84108257.pdf>
- Guerrero, P. & Casas, F. L. (2002). Materiales y sistemas alternativos para la vivienda, Los muros tendinosos. *Revista CITCE, Territorio, construcción y espacio*, 4, 48 – 55.
- Hernández, N. J. (2013). *El lenguaje de la estructura: el muro descompuesto*. [Trabajo fin de Máster, Universidad Ramón Llull]. <https://www.recercat.cat/bitstream/handle/2072/256777/Hernandez-Navarro-MPIA.pdf?sequence=1>
- Management Solutions. (2020). *La gestión de riesgos asociados al cambio climático*. <https://www.managementsolutions.com/sites/default/files/publicaciones/esp/gestion-riesgos-cambio-climatico.pdf>
- Mora Chacón, W. F. (2022). *Determinación del desplazamiento lateral en muros tendinosos, ante cargas laterales, monotónicas y cíclicas*. [Trabajo final de Maestría, Universidad Nacional de Colombia]. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/83329>
- Ramírez, Q. D. C. (2022). *Técnicas de rehabilitación de muros de mampostería*. [Trabajo de Grado, Universidad Nacional Autónoma de México]. <https://www.resilienciasismica.unam.mx/docs/TesisDianaRamirez.pdf>

- Rivas, R. I. (2009). *Muros tendinosos*. <https://es.scribd.com/doc/214883597/3-Muros-Tendinosos-1>
- Soufflot, J. G. (2012). *Biografía*. <http://www.wikiwand.com/es/Jacques-Germain-Soufflot0>
- Thomas, M. A. & Supelano, P. (2002). Diseño y Tecnocultura, Alternativas Constructivas: el Caso del Sistema Tendinoso, *Revista Ingeniería y Competitividad, Facultad de Ingenierías, Universidad del Valle, Colombia*, 4 (1), 25-32.
- Thomas M. A., Supelano, P., & Vergara, C. (2015). Tendón + Tendido = Tendinoso, *Revista digital Constructivo*, 106, 170-178. http://constructivo.com/cn/suscriptor/pdfart/150410043301_ARTICULO104.pdf
- Torres, R., J., E. (2013). *Bioarquitectura: Muro tendinoso*. [Blog Ingeniería en arquitectura y diseño medioambiental]. <http://ingenieroenarquitecturamedioambiental.blogspot.com/2013/01/bioarquitectura-muro-tendinoso.html>
- Torroja Miret, E. (2010). *Razón y ser de los tipos estructurales* (7ª Ed.). Consejo Superior de Investigaciones Científicas.
- Velásquez Ramírez, J. A. & García León, D. F. (2021). *Viabilidad de muros tendinosos a base de bandas PET y fibras de raquis de plátano*. https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_civil/959
- Velásquez Rendon, A. (2010). *Transferencia tecnológica: el caso de los muros tendinosos*. [Trabajo de Máster, Universidad Politécnica de Catalunya]. <https://es.scribd.com/document/249974865/Velasquez-pdf>
- White, R., Gergely, P., & Sexsmith, R. (1980). *Introducción a los conceptos de análisis y diseño, Ingeniería estructural* (Vol. 1). Limusa S. A.
- Zuluaga, C. & Zuleta, A. (2016). Arquitectura sostenible, sistema tendinoso. *Revista digital Colconstrucción*, 14-15. https://issuu.com/colconstruccion/docs/colconstruccioned3-5_imprimir