

PÓRTICOS DE ENSAYO EN LABORATORIOS: UNIENDO LA TEORÍA Y LA PRÁCTICA MEDIANTE EL FORTALECIMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN Y LA ACADEMIA

GANTRIES FOR LABORATORY EXPERIMENTATION: BRIDGING THEORY AND PRACTICE THROUGH MATERIALS AND STRUCTURES RESEARCH ALONG WITH ACADEMIC ADVANCEMENT

Carlos N. A. Salinas-Rodríguez^{1,2}, Fabiana Viscarra Agreda^{1,2}, Andrés Vallejos Valladares¹

¹ Centro de Investigación en Ingeniería Civil y Ambiental (CIICA)

² Carrera de Ingeniería Civil

Universidad Privada Boliviana, Cochabamba – Bolivia

fabianaviscarra@upb.edu

(Recibido el 13 de julio 2023, aceptado para publicación el 31 de julio 2023)

RESUMEN

Los pórticos de ensayo de materiales se constituyen en una herramienta trascendental para la caracterización del comportamiento mecánico de elementos estructurales de variados materiales. La definición de relaciones fundamentales como la de esfuerzo-deformación, que permite diseñar estructuras de manera eficiente, adecuada y segura, deviene de extensas campañas experimentales. El uso de estos pórticos posibilita la investigación multidisciplinaria en las materias relacionadas con el estudio de materiales y también permite el estudio detallado de elementos estructurales fabricados con diferentes materiales, elementos de reuso que puedan provenir de procesos industriales como fibras naturales o residuos de vidrio. Los resultados obtenidos a partir de ensayos principalmente sobre vigas, permiten establecer la línea de investigación en materiales y elementos estructurales a partir del estudio de las relaciones esfuerzo-deformación para posibilitar la estimación de propiedades de elasticidad y de resistencia en materiales como acero, hormigón armado, muros, entre otros. El presente trabajo tiene el propósito de mostrar las facultades del empleo de pórticos de ensayos para disminuir la brecha entre la formación teórica y la aplicación práctica a nivel académico e investigativo dentro la ingeniería estructural y de materiales, a través de una revisión de la evolución y la utilidad de este tipo de elementos en la enseñanza. Con este fin, se desarrolla una revisión bibliográfica de trabajos desarrollados principalmente a nivel Latinoamericano en laboratorios que cuentan con pórticos de ensayos, se describe la evolución de estos elementos, las características principales de pórticos en el medio, las normativas asociadas al desarrollo de pruebas en estos equipos y finalmente se realiza un breve análisis de resultados experimentales y su relevancia en la academia y la investigación.

Palabras Clave: Ensayo de Materiales, Pórtico de Laboratorio, Hormigón Armado, Concreto, Materiales Alternativos.

ABSTRACT

The gantries for laboratory experimentation constitutes a transcendental tool for the characterization of the mechanical behavior of structural elements made of various materials. The definition of fundamental relationships, such as stress-strain, which allows to design structures efficiently, appropriately, and safely, arises from extensive experimental campaigns. Moreover, the use of gantries for testing the properties of different materials allows the implementation of research at different engineering courses related with the study of materials; also, it allows to study the behavior of different materials and innovative materials for structural use, such as those resulting from industrial processes like rice natural fiber or glass powder. The preliminary experimentation and the results obtained were conducted on wood elements, and they are part of a research line looking for a better understanding of elasticity properties in materials such as steel, reinforced concrete, masonry, among other. The present work aims to demonstrate the capabilities of using testing porticos to bridge the gap between theoretical knowledge and practical application at the academic and research levels within structural engineering. This is achieved through a review of the evolution and usefulness of these elements in education. With this purpose, a bibliographic review of works developed mainly at the Latin American level in laboratories equipped with gantries is conducted. The evolution of these elements is described, along with the main characteristics of different gantries. Standard practices associated with conducting tests on these devices are also presented, and finally, a brief analysis of experimental results and their relevance in academia and research is performed.

Keywords: Testing of Materials, Laboratory Gantries, Reinforced Concrete, Alternative Materials.

1. INTRODUCCIÓN

La mecánica de materiales tiene una larga historia de aplicación en los campos de ingeniería civil e ingeniería mecánica ya que permite analizar y resolver problemas de la realidad con base en la teoría clásica y el uso de tecnologías para mejorar la aproximación a mejores soluciones [1, 2]. Por otro lado, el proceso de planificación, diseño, construcción y seguimiento de las obras de ingeniería civil requiere el conocimiento de las propiedades físicas y mecánicas de los

materiales básicos que se usan para tales obras y que permita garantizar las condiciones de resistencia adecuadas para cada proyecto [3]. Las aplicaciones de ingeniería civil son diversas que incluyen áreas de impacto social directo y, por tanto, existe la necesidad de que las obras civiles como túneles, carreteras, edificios de vivienda, comerciales o industriales no se vean comprometidas en su funcionamiento durante la vida útil para la cual están diseñadas. En este sentido, el conocimiento de las propiedades de los materiales se vuelve una exigencia durante el proceso descrito anteriormente [4]. Si bien es posible que algunos materiales tengan propiedades conocidas a partir de sus procesos de fabricación industrial, existen materiales que, por su naturaleza, tienen propiedades variables de acuerdo con las características únicas de cada proyecto en las que estarán en servicio. Esto es muy evidente en contextos como el boliviano, ya que las incertidumbres generadas a lo largo de la cadena de construcción demandan mayores controles intermedios que permitan conocer las principales propiedades de los materiales.

Las pruebas estructurales son una parte importante del ensayo de materiales. Estas pruebas se utilizan para evaluar la resistencia y la rigidez, tanto de los materiales por separado, como de las estructuras. Los pórticos de ensayo se utilizan para aplicar cargas a las estructuras y medir la respuesta de las mismas. Las pruebas estructurales también se utilizan para evaluar la fatiga y la durabilidad de los materiales, permitiendo tener una mejor aproximación al funcionamiento real de los materiales una vez puestos en obra.

Al igual que las pruebas a escala de laboratorio, las pruebas de elementos de grandes dimensiones a escala real son una parte importante y de aplicación directa en el campo de ingeniería civil [5, 6]. Estas pruebas se utilizan para evaluar escenarios mucho más cercanos a la realidad, ya que se ha podido evidenciar que algunos modos de falla, como por ejemplo a cortante en vigas, el factor de tamaño llega a influir en la resistencia estimada [7]. Así, resulta natural el uso de los pórticos de ensayo para medir la respuesta de elementos estructurales a diferentes configuraciones y tipos de carga para tratar de generar modelos físicos en base a los resultados obtenidos, que permitan una descripción cercana a la realidad del comportamiento estructural de elementos diversos que conforman una estructura. De esta manera, se evidencia que los pórticos de ensayo de materiales son una herramienta esencial para generar modelos físicos más precisos que sirvan de herramienta para el diseño de estructuras de materiales diversos [8, 9, 10, 11, 11, 12, 13]. Más aún, los pórticos empleados en el ensayo de materiales son herramientas esenciales en la investigación y el desarrollo de nuevos materiales sometiéndolos a ensayos que permiten determinar sus propiedades físicas fundamentales y simular las condiciones reales de servicio para evaluar su comportamiento bajo diferentes condiciones de carga, por lo que se puede realizar ensayos con materiales nuevos y entender su potencial funcionamiento en la vida real [14, 15, 16]. En el campo académico, esta herramienta permite acercar la práctica a la teoría desarrollada en las asignaturas relacionadas con el diseño, construcción y control de calidad de estructuras en diferentes materiales, como madera, acero y hormigón armado, principalmente.

En el presente estudio se desarrolla la evolución de los pórticos de materiales, la incorporación del pórtico de materiales como forma de transversalizar la investigación en materias relacionadas con el análisis de materiales y estructuras. Por otro lado, se muestra la utilidad de estos equipos como herramienta de integración en la línea de estructuras, enfatizando el uso práctico de este equipo para posibilitar el análisis de las principales propiedades mecánicas de los materiales por parte de los estudiantes de las carreras de Ingeniería Civil y Arquitectura.

2. ESTADO DEL ARTE EN PÓRTICOS DE MATERIALES

La idea de conocer y caracterizar mecánicamente los materiales y elementos de construcción no es nueva, de hecho, se puede datar su origen en siglo XIX, cuando los investigadores e ingenieros se plantearon conocer las propiedades de los materiales. Los materiales de construcción como la madera, las piezas de ladrillo, el hormigón, fibras de cemento y el acero, entre otros, son ensayados por diferentes razones y en diferentes momentos del proceso diseño-construcción, y según el grado de destrucción de los materiales existen métodos destructivos, semidestructivos y no destructivos [17].

Los pórticos de ensayo de materiales pertenecen a la categoría de métodos destructivos que permiten ensayar elementos estructurales de diferentes dimensiones. En 1856, el ingeniero británico William Fairbairn construyó uno de los primeros pórticos de ensayos de materiales en su taller de Manchester. El pórtico estaba hecho de hierro fundido y se utilizó para realizar ensayos de tracción en barras de hierro y acero [18]. Por su parte, el ingeniero alemán Wilhelm Riehl, de manera contemporánea a Fairbairn, construyó uno de los primeros pórticos de ensayos de materiales de gran tamaño en Berlín.

Este pórtico estaba diseñado para realizar ensayos de flexión y compresión en vigas y columnas de hormigón armado. Con un modelo geométrico y estructural básico definido, que esencialmente no ha sufrido modificaciones, los pórticos se fueron convirtiendo en una herramienta de uso habitual en laboratorios de investigación y universidades de todo el mundo, pasando del análisis estático de elementos estructurales al análisis de cargas dinámicas. En la actualidad, si bien la estructura de los pórticos se mantiene invariable respecto de los primeros modelos, los pórticos de ensayos de materiales son herramientas altamente sofisticadas y precisas que se utilizan en laboratorios de investigación y universidades de todo

el mundo, principalmente por el desarrollo de los métodos de adquisición de datos que se han ido acoplado a los pórticos, permitiendo desarrollar nuevas formas de análisis de los resultados. Como resultado, actualmente se tiene una gama de ensayos más precisos y detallados sobre una variedad de materiales y estructuras más amplia. El elemento central del diseño de pórticos se mantiene invariable, debiendo éstos, estar diseñados para soportar cargas de alta intensidad y proporcionar una plataforma estable para la realización de pruebas deseadas.

Los pórticos de ensayo se pueden definir como una integración de un sistema de pórtico de acero, un sistema de aplicación de cargas que pueden ser controlados por los usuarios y un sistema de adquisición de datos de tipo discreto o continuo. [19]. De manera clásica, los pórticos de ensayo de materiales se pueden clasificar en dos tipos principales: los pórticos autoportantes, fabricados en perfiles de acero, que combinan una rigidez muy elevada y con apoyo directo sobre la superficie, Figura 1a), y los pórticos anclados a losas de carga, que debido a sus características son los de mayor uso para laboratorios de investigación del sector de la construcción, universidades, centros tecnológicos, entre otros, Figura 1b).



Figura 1: Tipos de pórtico de ensayo de materiales. a) Pórtico autoportante. b) Pórtico anclado [19].

En el caso de los pórticos autoportantes, los elementos del pórtico son perfiles de acero de muy alta rigidez, unidos por medio de soldaduras o mediante uniones atornilladas, con las columnas están conectadas por una placa superior y se cierran por abajo por medio de una placa o estructura de perfiles de acero o una estructura de perfiles de acero. Por el contrario, los pórticos anclados tienen sus pilares descansando directamente sobre zapatas que se anclan sobre una losa de carga construida dentro del suelo del laboratorio. En la superficie de la losa de ensayo se dispone de una retícula de puntos de anclaje que permiten hacer diversas combinaciones de pórticos y poder configurar ensayos sobre elementos de geometría compleja o de muy grandes dimensiones. En este caso, el anclado a la losa permite eliminar las mínimas perturbaciones que pueden ocurrir por vibraciones durante la ejecución de los ensayos. El factor determinante para definir el uso de un tipo específico de pórtico es la exigencia de cargas esperadas sobre los elementos a ensayar, asociado a la rigidez del marco, lo que permite ensayar especímenes con diferente grado de resistencia; además, del nivel de control requerido durante las pruebas. En el caso de pórticos anclados, el límite de carga aplicada está dado por el diseño estructural de los anclajes.

Debido a las necesidades de ensayo de materiales, se ha desarrollado un tercer tipo de pórtico, denominado semi-pórtico en ménsula que tiene la ventaja de ser una estructura abierta, facilitando el posicionamiento de los elementos estructurales dentro de la zona de ensayos, Figura 2. Al ser un equipo pequeño, en comparación con los anteriores, su diseño tiene limitaciones en cuanto a la carga máxima que se puede aplicar (hasta 300 kN) sin comprometer su integridad estructural. Sin embargo, la tendencia actual es a potenciar el uso de estos equipos por la versatilidad propia de su diseño, por lo que los nuevos diseños están orientados a incrementar la carga máxima, hasta llegar a valores comparables con los alcanzados en los otros tipos de pórticos.

Si se importan el tipo específico de pórtico, todos tienen el mismo propósito común de aplicación de cargas a las estructuras y medir la respuesta de las mismas, permitiendo evaluar la resistencia, la rigidez, la fatiga y la durabilidad de los materiales y las estructuras.

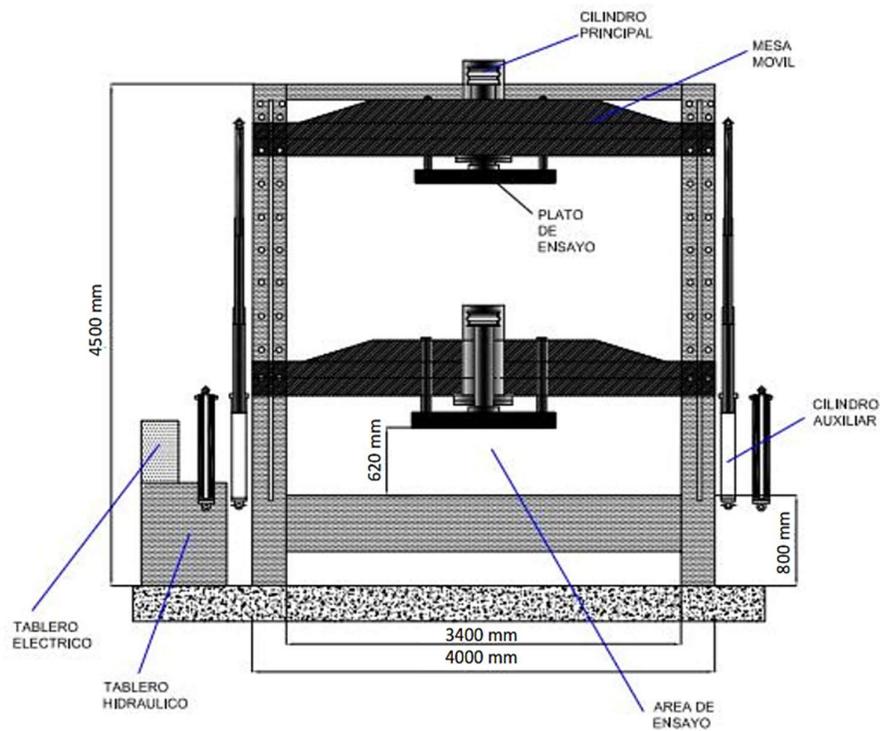
Respecto de los modos de adquisición de datos, los métodos han sufrido una rápida evolución, principalmente por la inclusión de servocontroladores y de galgas que permiten la toma de datos en modo continuo durante toda la duración del ensayo y con mayores presiones que los que tradicionalmente se aplican con relojes deformímetros analógicos. El controlador envía señales al convertidor, permitiendo la ejecución del movimiento deseado. Esto, a su vez, está conectado con un sistema de codificación (encoder) que modifica la señal y permite establecer con precisión la posición, la velocidad de aplicación de fuerzas o en algún caso, la magnitud del par de momento.



Figura 2: Pórtico tipo ménsula [19].

2.1 PÓRTICOS DE ENSAYO DE MATERIALES EN NUESTRO MEDIO

Si bien la práctica y uso de pórticos de ensayos de materiales tiene varios años, en nuestro medio no es práctica común en las universidades ni en los centros de investigación contar con equipamiento de esta naturaleza. Reportes de literatura muestran la fabricación de pórticos en Ecuador, Perú y algunos otros países del entorno latinoamericano [19, 21, 22]. confirma la utilidad de uso de estos equipos en la transversalización de la investigación en las universidades.



a)



b)

Figura 3: Pórtico de ensayo de materiales UPB. a) Esquema y dimensiones del pórtico de ensayo de materiales UPB. b) Pórtico construido y dispuesto en el Laboratorio de Ingeniería Civil.

En nuestro medio, la Universidad Privada Boliviana cuenta con un pórtico de ensayos de materiales (PEM-UPB) del tipo autoportante, construido con perfilera metálica con una masa de 1600 kg, es alimentado por corriente trifásica de 380 v, tiene una capacidad de fuerza máxima de 100 ton y una profundidad máxima de ensayo, debido a las características el pistón de presión, de 600 mm. Este equipo permite ensayar elementos tipo viga de hasta 3500 mm de longitud y tipo columna de hasta 2500 mm de altura de materiales variados, según el requerimiento solicitado. En condiciones normales, el equipo ejecuta presiones puntuales, debidas al contacto directo del pistón de presión con el elemento ensayado. El equipo está diseñado de forma modular, de forma tal que los requerimientos iniciales de construcción pueden ser ampliados con el montaje de equipos y dispositivos de adquisición de datos y otros que permitan ampliar la variedad de ensayos a realizar. El esquema de diseño del equipo se muestra en la Figura 3a), en la que se ve el potencial de acople de una placa o plato de ensayo que permitirá la distribución de carga de forma superficial sobre el elemento estructural. En la Figura 3b) se aprecia el pórtico construido y emplazado en el laboratorio de estructuras de la UPB.

El módulo de adquisición de datos del PEM-UPB cuenta con un Data logger que contiene una tarjeta de adquisición de datos y diferentes entradas para captar la señal de sensores e instrumentos con una frecuencia de muestreo de hasta 1 lectura por segundo, lo que permite tener la continuidad de datos durante toda la ejecución de ensayos. La celda de carga es de la marca Kyowa con una capacidad de hasta 500 kN. Adicionalmente, el sistema consta de un lector para celda de carga marca Kyowa con convertor analógico digital de 16 bits, un sensor de presión para convertir la presión de la bomba hidráulica en presión aplicada en los elementos a ensayar, con rango de 400 bares y precisión de 0.5% de la escala, un transductor de desplazamiento lineal variable LVTD con una resolución de lectura de un micrómetro, desplazamiento del sensor hasta 100 mm y salida digital. También cuenta con un Sensor Lineal Electrónico con resolución de lectura de 10 micrómetros, desplazamiento del sensor hasta 100 mm y salida digital y salida analógica y un Encoder lineal electrónico con resolución de 40 micrómetros, desplazamiento del sensor hasta 1000 mm y salida digital de pulsos. Entre los dispositivos de adquisición de datos también se cuenta con un sensor de Temperatura con rango de lectura de -55 °C a 125 °C, con salida digital y resolución de 0.1 °C.

El equipo de control de datos cuenta con cinco entradas para galgas extensométricas (strain gauges), de las que el Laboratorio de Estructuras cuenta con galgas de la marca Kyowa con longitudes de 2 mm, 5 mm y 10 mm, todas con una precisión $2.10 \pm 1.0\%$. el uso de estos dispositivos merece especial cuidado durante la instalación y operación, a fin de generar mediciones precisas y confiables.

La configuración del PEM-UPB y de los comandos permiten la aplicación automática de una carga a una velocidad establecida por el operario. La adquisición de la fuerza aplicada se puede hacer por lectura directa de los manómetros o por la lectura de los datos de la celda de carga conectada al centro de adquisición de datos. La aplicación de la carga sobre el elemento ensayado se realiza mediante un cilindro hidráulico, servocontrolado, lo que permite controlar la velocidad de aplicación de la carga, a través de una perilla de control en el banco de controles de la prensa.

Dentro del medio local, en la ciudad de Cochabamba, el Laboratorio de Resistencia de Materiales de la Universidad Mayor de San Simón cuenta con un Pórtico AUTOMAX Múltiple de doble bastidor con una capacidad de 200 kN (20 toneladas) como se muestra en la Figura 4, este cuenta con un sistema de control y medición totalmente digitalizado que permite realizar ensayos con alto nivel de precisión en la medición de deformaciones y presión aplicada.



Figura 4: Pórtico Automax Múltiple del Laboratorio de Resistencia de Materiales de la Universidad Mayor de San Simón.

Por otro lado, en el medio latinoamericano, recientemente se culminó la implementación de un laboratorio de estructuras en la Universidad de Lima, Perú. Estos cuentan con un pórtico de ensayo a escala real que emplea un actuador MTS de 1000 kN de capacidad en compresión (100 toneladas) y 640 kN en tracción (64 toneladas). Para la adquisición de datos experimentales emplean galgas extensiométricas, transductores de desplazamiento y transductores de medición de ancho de grietas. En la Figura 5a) se muestra la configuración del pórtico de ensayos montado, el cual llega a ser uno de los más modernos que se tiene en Sudamérica. En la Figura 5b) se aprecia el emplazamiento del pórtico de ensayos dentro del laboratorio de estructuras de la Universidad de Lima.

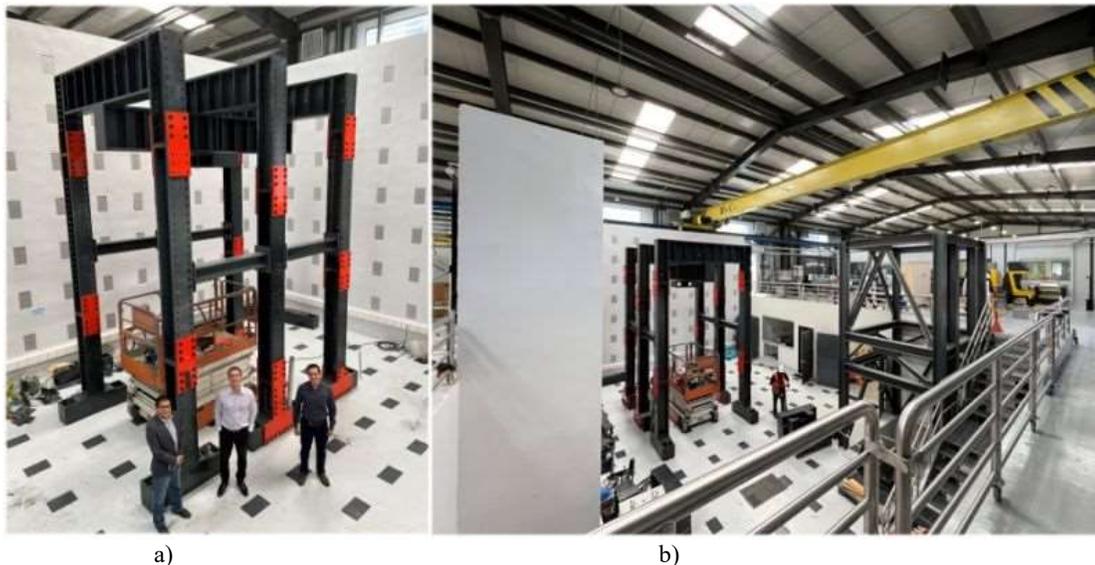


Figura 5: a) Pórtico de ensayos del laboratorio de estructuras en la Universidad de Lima, Perú. b) Pórtico y puente grúa.

El Laboratorio de Estructuras del Centro de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres (CISMID) de la Universidad Nacional de Ingeniería cuenta con un pórtico de acero con dimensiones aproximadas de 4050 mm de altura y 2500 mm de ancho, como se aprecia en el esquema de la Figura 6a); este pórtico cuenta con un sistema hidráulico de transmisión de carga vertical con capacidad de 50 ton que cuenta con una base nivelada, un sistema de medición con celda de carga y LDVT con precisión de 0.005 mm y un sistema de adquisición de datos compuesto por un Data logger

que cuenta con canales para recibir información de los transductores de carga y deformación. En la Figura 6 b) se despliega el pórtico en funcionamiento.

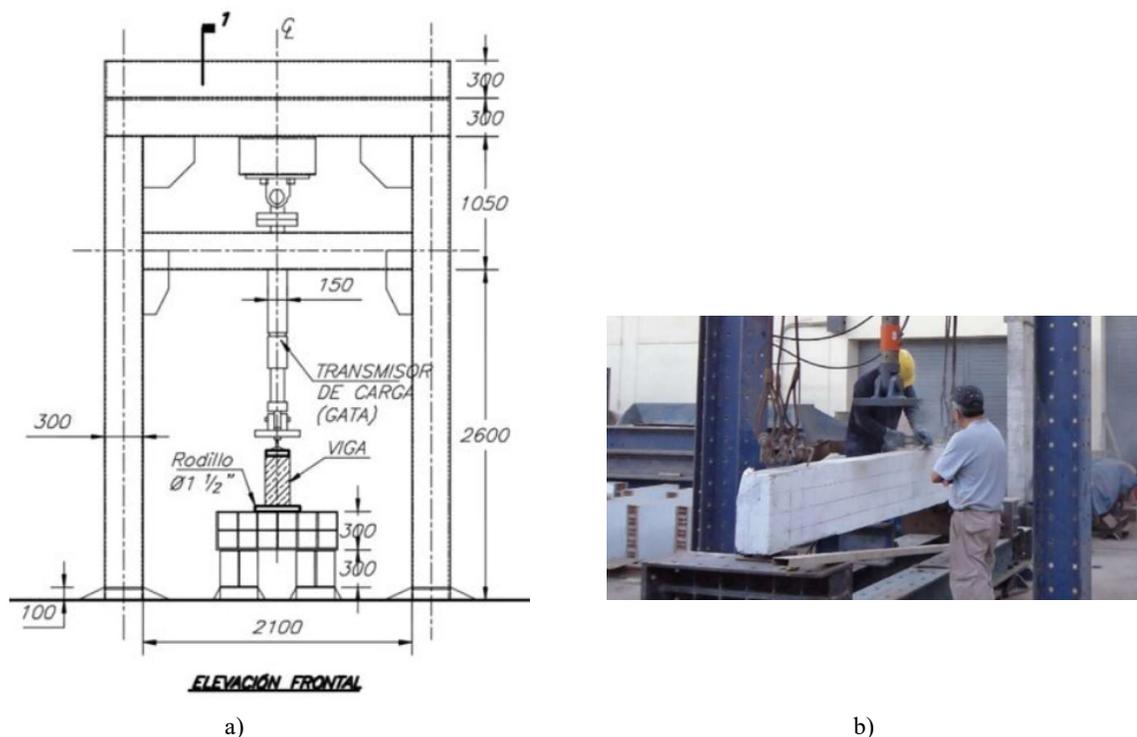


Figura 6: a) Esquema frontal pórtico del Laboratorio de Estructuras del Centro de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres (CISMID) de la Universidad Nacional de Ingeniería. b) Pórtico en empleo [21].

3. NORMATIVAS ASOCIADAS Y PRUEBAS DESARROLLADAS EN UN PÓRTICO DE ENSAYOS

La configuración de un pórtico de ensayos puede llegar a ser variada en diferentes laboratorios, esto debido a las diversas necesidades que se presentan en diferentes líneas de investigación que pueden ser muros de mamposterías, vigas, columnas, elementos prefabricados o postensados, etc. a diferentes escalas. El diseño por otro lado va de la mano de la normativa correspondiente al tipo de estructura que se proyecta, que en la mayoría de los casos es metálica.

Para el desarrollo de las pruebas en los pórticos de ensayos, se debe seguir diferentes procedimientos estándares para la determinación primeramente de las propiedades físicas o químicas esenciales de los materiales, acorde al objetivo de la investigación. Posteriormente la fabricación en algunos casos de los elementos a ser ensayados debe seguir el procedimiento estándar establecido en la norma empleada y en caso de tratarse de un ensayo planteado seguir cierto proceso de registro de datos acorde al método científico.

Dentro del campo de la ingeniería estructural, diferentes países y organizaciones han desarrollado normas específicas para estandarizar procedimientos y garantizar la repetitividad y precisión estas pruebas. Los ensayos de compresión y flexión en materiales son fundamentales para evaluar las propiedades mecánicas de los materiales empleados en la construcción. A continuación, se realiza una breve descripción general de las principales normativas empleadas en América del Sur.

3.1 NORMAS ASTM

Normas desarrolladas por la *American Society for Testing and Materials* que se centran en el establecimiento de procedimientos estandarizados precisos, para evaluar materiales estructurales; son ampliamente utilizadas en el mundo y son reconocidas por su rigor técnico y confiabilidad.

Para el ensayo de vigas de concreto, metal y hormigón armado sometidos a flexión, se aplica la norma ASTM E855 [23], que determina el módulo de elasticidad, la tensión de fluencia del elemento, a través de la aplicación de cargas estáticas ya sea para elementos en voladizo, dos puntos de apoyo y uno o dos puntos de carga. Por otro lado, la norma ASTM C78

[24] se emplea para la determinación de la resistencia a flexión del hormigón con una viga simplemente apoyada, haciendo referencia a prácticas estándares para la preparación de la viga de hormigón bajo condiciones controladas de humedad y temperatura (ASTM C31 [25], ASTM C192 [26]). La norma ASTM C293 [27] permite determinar la resistencia a flexión del concreto con una viga simplemente apoyada con una carga puntual aplicada en $L/2$.

Tal como establece Vallejos [16], si bien los estándares normativos de diseño como ACI-318, AASHTO-LRFD y el Eurocódigo, entre otros, establecen las teorías más importantes para la estimación de la resistencia de elementos compuestos sujetos a flexión y esfuerzos cortantes; los modelos físicos representan la mecánica de falla de los elementos de una forma práctica y lógica; de esta manera, estos modelos cada vez van ganando un mayor campo de estudio [16]. Más aún, actualmente se tiene evidencia sobre la importancia y necesidad de realizar pruebas en laboratorio con el fin de evaluar el uso de nuevos materiales o técnicas de refuerzo innovadoras que incrementen la resistencia de vigas sometidas a flexión o cortante, razón por la cual es importante la incorporación del uso de estas herramientas en los cursos de formación básica de ingeniería y arquitectura.

Respecto a las pruebas de compresión, La norma ASTM C39 [28] define el procedimiento estándar ampliamente empleado para la determinación de la resistencia a la compresión en cilindros de concreto, conformados tras un estudio riguroso de propiedades físicas de los componentes, la aplicación de un método de dosificación y finalmente sometidas a procesos de conformación y curado adecuados [25, 26] hasta que estos alcancen diferentes edades y tolerancias permitidas. En el caso de los elementos de acero, generalmente se aplica la norma ASTM E9 [29] que estipula el procedimiento adecuado para determinar la resistencia a la compresión a temperatura ambiente y bajo control de deformación axial. Por otro lado, la norma ASTM C469 [30] se aplica para estimar el módulo de elasticidad del concreto a través de la aplicación de una carga axial a una tasa de carga constante hasta llegar a rotura; en esta prueba es necesario contar con un sistema de adquisición de datos de deformación axial, como el que se tiene en la UPB, Figura 7. Este sistema en particular cuenta con tres encoders con resolución de lectura de 0.001 mm y longitud de recorrido de 120 mm, junto a una celda de carga de 500 kN de capacidad.



Figura 7: Encoders y celda de carga para determinación de módulo elástico, laboratorios UPB.

3.2 NORMATIVAS SUDAMERICANAS DE DISEÑO DE ELEMENTOS ESTRUCTURALES

Las normas de diseño estructural locales de los países de la región sudamericana centran la elaboración de sus códigos en los avances y actualizaciones presentadas por la ACI 318 para el diseño de estructuras de hormigón armado, AISC para estructuras de acero conformado en caliente y AISI para estructuras de acero conformado en frío. Brasil, como caso particular de la región, centra su normativa de fondo en los conceptos y teorías desarrolladas en el Eurocódigo.

La práctica común que se da para la elaboración de las normas de diseño locales es la adaptación de normas como la ACI, modificando los factores relativos a los materiales y prácticas constructivas regionales tratando de mantener los valores de fiabilidad con los cuales se diseñó la norma original.

Esta práctica es la más efectiva, debido a que las instituciones más consolidadas, actualizadas y que generan mayor número de investigaciones o propuestas de actualización a la normativa de diseño a nivel mundial, se encuentran en los Estados Unidos.

Como se ha mencionado, el Pórtico de Ensayo de Materiales es un equipo de alta versatilidad, no solo respecto de los materiales y elementos ensayados, sino también respecto de la configuración de las pruebas y su adaptación a las normativas más empleadas.

4. RESULTADOS

4.1 SOBRE LA INTEGRACIÓN DE ASIGNATURAS CON ENSAYOS DE MATERIALES

El Laboratorio de Estructuras de la Escuela de Materiales y Estructuras Especiales de la UPB, tiene definida la línea de investigación del uso materiales alternativos en elementos estructurales. Los pórticos se pueden utilizar transversalmente en varias asignaturas de las carreras de ingeniería civil y arquitectura, como en la mecánica de materiales, diseño de hormigón armado, diseño de fundaciones, puentes, estructuras metálicas y de madera, elementos prefabricados, entre otras. En estas asignaturas, los pórticos de ensayo se utilizan para aplicar cargas a las estructuras y medir la respuesta de las mismas, permitiendo evaluar la resistencia, la rigidez, la fatiga y la durabilidad de los materiales y las estructuras. Puede, por ejemplo, establecerse la relación entre el esfuerzo y la deformación para evaluar las propiedades de elementos estructurales en particular.

4.2 SOBRE LAS PRÁCTICAS EN MATERIAS DE INTEGRACIÓN

Durante el desarrollo de Mecánica de Materiales II y Hormigón Armado I de la carrera de Ingeniería Civil en la UPB se han ensayado 3 vigas de madera de diferentes características y 1 viga de hormigón armado con el fin de que los estudiantes verifiquen la obtención de las cargas máximas admisibles de los elementos y puedan verificar los parámetros más importantes de estas vigas. El ensayo de flexión en tres puntos es uno de los ensayos más comunes para medir la resistencia a la flexión en madera y concreto. En este ensayo, una viga se coloca horizontalmente en una prensa y se carga en el centro con una carga que aumenta gradualmente hasta el fallo del elemento. La carga y la deflexión se miden durante el ensayo para calcular la resistencia a la flexión de la viga. Este ensayo es útil para determinar la capacidad de una viga para soportar cargas de flexión, y para evaluar su calidad y durabilidad en aplicaciones estructurales. El procedimiento para realizar el ensayo de flexión en tres puntos de una es el siguiente:

- (1) Se emplea una viga con dimensiones y características adecuadas para el ensayo, según la normativa aplicable. La viga se prepara y se alinea correctamente sobre dos soportes fijos y paralelos. Los soportes del PEM-UPB son móviles y permiten acomodar el elemento, según las características específicas del espécimen ensayado.
- (2) Se coloca una carga en el punto medio de la viga, a una distancia específica de los soportes fijos. La carga se aplica de manera gradual y constante, y se registra la deflexión de la viga en varios puntos, utilizando un extensómetro u otro dispositivo de medición. En los ensayos realizados se usó la configuración de 2/3 de la longitud entre los soportes, para generar una mejor visualización de las deflexiones
- (3) La carga se mantiene durante un tiempo determinado para permitir que se establezca la deflexión de la viga, y se registran las mediciones.
- (4) Se retira la carga y se registran las mediciones de la deflexión final de la viga. Con estos datos, se puede calcular la resistencia a flexión de la viga, utilizando la ecuación que relaciona la carga aplicada, la deflexión de la viga y las dimensiones de la misma.

El procedimiento descrito es válido para replicar en diversos materiales, como maderas, metales, plásticos y materiales combinados como el hormigón armado, mismos que se pueden desarrollar, no solo dentro de las asignaturas correspondientes, sino también como proyectos de grado que permitan entender con mayor detalle la relación entre las cargas aplicadas, las propiedades de los materiales y la forma en que se deforman y fallan.

En el PEM-UPB se lograron ensayar una viga de madera y otra de hormigón armado. Las vigas tuvieron unas dimensiones de 100x10x10 cm (madera) y 165x15x27 cm (hormigón armado). Las 2/3 partes de la longitud del elemento están colocadas dentro de la distancia entre las vigas de apoyo y el pistón de carga está ubicado en la parte central de la viga, siendo esta la configuración base para todos los ensayos realizados, como se aprecia en la Figura 8.

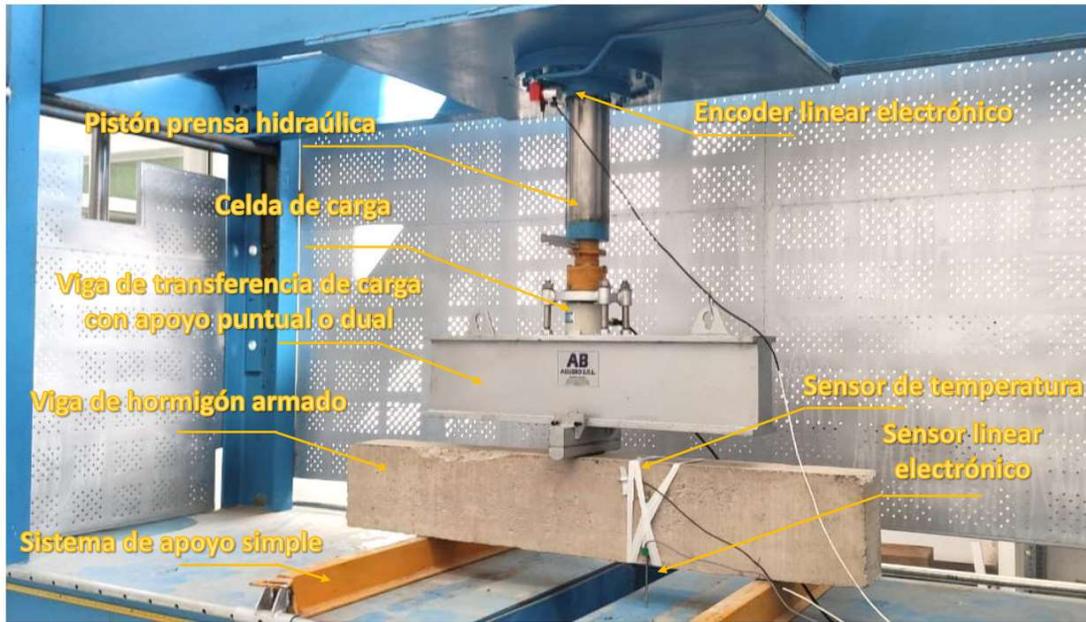


Figura 8: Configuración geométrica de un ensayo con 2/3 de longitud dentro de los apoyos en una viga de hormigón armado.

Una vez aplicada la carga, la viga sufre deformaciones progresivas que son medidas en la deflexión central de la viga, correspondiente al máximo valor alcanzado, Figura 10a. Una vez que se alcanza el valor máximo de carga, la viga alcanza la máxima deformación; que, en el caso de la viga de madera, en función del tipo de madera podrá verificarse como deformación elástica o con fractura definitiva. Una de las vigas ensayadas, de madera caracterizada como dura, se verificó la falla del elemento, sin retorno elástico, Figura 9a). Si bien no fue el propósito del ensayo, a partir de este resultado se puede establecer la utilidad estructural de los elementos, ya que en el caso de una falla el elemento dejaría de cumplir la función estructural de diseño. En otras palabras, el ensayo de las vigas permite evaluar los límites máximos de carga de las vigas y, de esta manera, permitir un diseño seguro, que sea eficiente estructural y económicamente, pues las dimensiones de las vigas tienen una relación directa con el costo de implementación. En la Figura 9b) se aprecia la viga de hormigón armado tras concluida la prueba.



Figura 9: a) Viga de madera sometida a ensayo con falla estructural. b) Viga de hormigón armado tras prueba de flexión.

Una vez procesados los datos, se ha podido establecer la relación esfuerzo-deformación, tal como se observa en la Figura 10. En la figura se observa dos series continuas de datos que se ocasionan por la necesidad de medición directa de la deflexión, produciéndose una descarga que luego es retomada, hasta niveles que están por debajo del valor máximo de carga, que corresponde a la máxima deflexión. Cabe recalcar que la toma de datos se realizó cada 5 segundos, razón que determina que la descarga aparezca con un efecto visual mayor del que en realidad tiene.

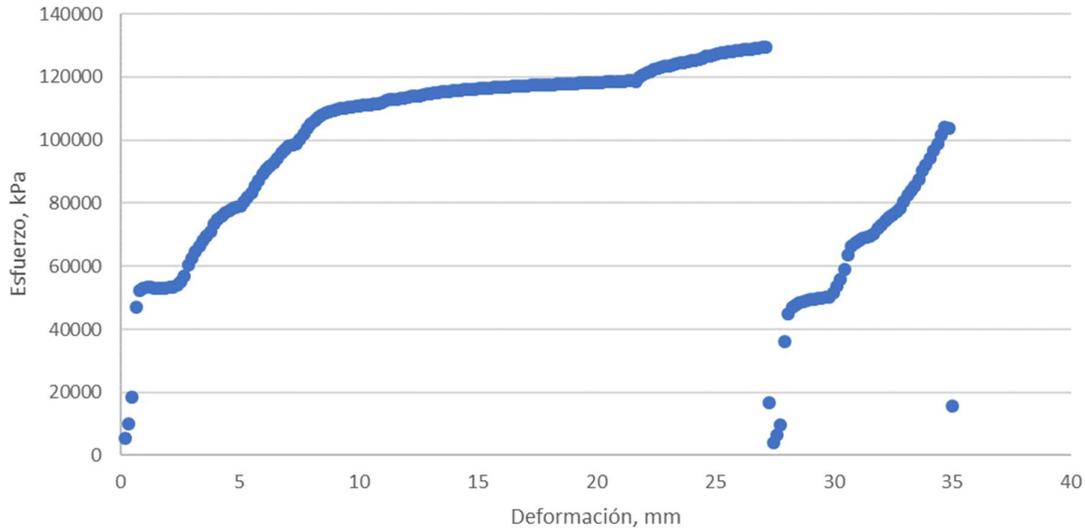


Figura 10: Relación esfuerzo-deformación para un listón de madera (100x10x15 cm).

A partir de los resultados obtenidos se pudo generar la gráfica de esfuerzo-deformación que se presenta en la anterior figura y también se pudo estimar el valor correspondiente al módulo de elasticidad por el método correspondiente a la prueba a flexión, obteniendo un valor de 13,4 GPa que corresponde a una madera semidura a dura [2, 31]. Por otro lado, la forma de falla es similar a aquella reportada en literatura [32, 33].

Para emplear el pórtico de ensayos para una prueba a flexión en vigas de hormigón armado se debe determinar primeramente el diseño de la sección de la viga y la cuantía del refuerzo a emplear para producir una falla a flexión como se requiere. El proceso de elaboración del hormigón, armado y colocado del refuerzo debe regirse a la normativa que corresponda o estándar indicado.

El procedimiento del ensayo es similar al que se detalló para el listón de madera. En este caso aparte de medir la deflexión puede ser de interés medir el ancho de fisuras para determinar los niveles de fluencia del acero de refuerzo, nivel de agrietamiento, propagación de fisuras, etc. acorde al estudio de interés que se lleve a cabo. La curva de carga - deformación máxima, que se da en el caso de una viga simplemente apoyada en la mitad de la luz, muestra un comportamiento similar al que presentado por [34], como se aprecia en la Figura 11.

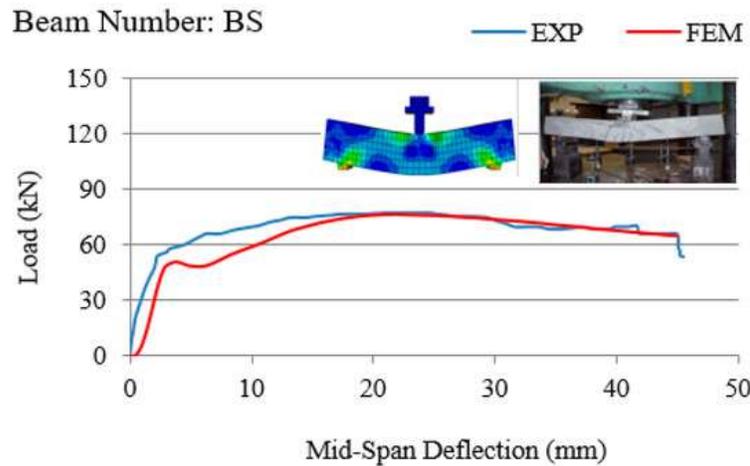


Figura 11: Relación carga-deformación central para una viga de hormigón armado (15 x 15 cm) [34].

El hormigón armado a diferencia de la madera puede llegar a ser más dúctil cuando la cuantía empleada permite el desarrollo de una falla a flexión. El desarrollo de estos experimentos permite determinar el aporte al agrietamiento y resistencia a flexión de diferentes materiales que se incorporan recientemente al hormigón como ser las fibras de diferentes materiales y formas.

5. CONCLUSIONES

Los pórticos de ensayo son una herramienta esencial para la formación de ingenieros civiles y arquitectos. Por otro lado, también permiten el avance de la tecnología y la innovación en la industria de materiales de construcción. La integración de los ensayos de materiales en el PEM-UPB con las materias relacionadas es efectiva y permite que los estudiantes desarrollen criterios de análisis de situaciones cercanas a la realidad, lo que beneficia en su formación profesional. De igual forma permite a los estudiantes captar el comportamiento de diferentes mecanismos de falla y la influencia de diversos materiales en el desarrollo de estas.

El PEM-UPB permite ensayar materiales de diferente naturaleza y si bien, solo se tiene experiencia limitada en el ensayo de vigas de madera, se han establecido las mejores condiciones de ensayo, según las condiciones propias del laboratorio. Los resultados obtenidos en las vigas de madera muestran congruencia con los valores teóricos reportados en la literatura para las propiedades reportadas, por lo que las perspectivas de uso a nivel académico y de investigación son positivas. El módulo de elasticidad encontrado de 13,4 GPa es correspondiente a aquellos reportados en la literatura especializada, por lo que el modo de ensayo empleado es el correcto y auspicioso para el ensayo de elementos de otros materiales.

La línea de investigación desarrollada en el Laboratorio de Estructuras de la Carrera de Ingeniería Civil es relevante para tener una mejor comprensión del comportamiento de los materiales tradicionalmente empleados en la construcción, pero también para incorporar nuevos materiales y metodologías que permitan mejorar las propiedades mecánicas de los elementos estructurales. De igual forma los resultados generados por los ensayos a escala real permitirán la generación de modelos físicos más precisos y reconocer la influencia de diferentes factores locales en el diseño de elementos estructurales.

REFERENCIAS

- [1] S. Wang, «Teaching Research of Material Mechanics Aimed at Stimulating Vocational College Students' Interest Based on Simulation Technology,» *Scientific and Social Research*, p. 7, 2022.
- [2] Z. Wang, X. Gu, S. Mohrmann, Z. Shen, Y. Huang y Y. Zhou, «Study on the four-point bending beam method to improve the testing accuracy for the elastic constants of wood,» *European Journal of Wood and Wood Products*, pp. 1-11, 2023.
- [3] J. M. Canet, «Resistencia de materiales y estructuras,» Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería, Barcelona, 2012.
- [4] M. Bado y J. Casas, «A Review of Recent Distributed Optical Fiber Sensors Applications for Civil Engineering Structural Health Monitoring,» *Sensors*, 2021.
- [5] H. Chowdhury, F. Alam y I. Mustary, «Development of an innovative technique for teaching and learning of laboratory experiments for engineering courses,» *Procedia*, pp. 806-811, 2019.
- [6] A. Lapuebla-Ferri, A. Jiménez-Mocholi, F. Giménez-Palomares y J. Monsoriu, «Uso de laboratorios virtuales en la enseñanza de asignaturas de grados de la rama industrial: antecedentes, estado actual y reflexiones,» *Técnica industrial*, pp. 40-47, 2018.
- [7] Bazant, Z. P.; Yu, Q.; Gerstle, W.; Hanson, J.; and Ju, J., 2007, "Justification of ACI 446 Code Provisions for Shear Design of Reinforced Concrete Beams," *ACI Structural Journal*, V. 104, No. 5, Sept.-Oct., pp. 601-610. doi: 10.14359/18862
- [8] F. M. D. More y S. S. S. Subramanian, «Experimental Investigation on the Axial Compressive Behaviour of Cold-Formed Steel-Concrete Composite Columns Infilled with Various Types of Fibre-Reinforced Concrete,» *Buildings*, vol. 13, n° 1, p. 151, 2023.
- [9] F. M. D. S. More y S. S. S. Subramanian, «Impact of fibres on the mechanical and durable behaviour of fibre-reinforced concrete,» *Buildings*, vol. 12, n° 9, 2022.
- [10] H. Jemii, A. Bahri, R. Taktak, N. Guermazi y F. Lebon, «Mechanical behavior and fracture characteristics of polymeric pipes under curved three point bending tests: Experimental and numerical approaches,» *Engineering Failure Analysis*, vol. 138, p. 106352, 2022.
- [11] J. Yang y L. Wang, «Experimental research on flexural behaviors of damaged PRC beams strengthened with NSM CFRP strips,» *Construction and Building Materials*, vol. 190, pp. 265-275, 2018.

- [12] A. Li, Z. Yang, S. Liu, Y. Liu y H. Liu, «Experimental study on flexural fatigue behavior of composite T-beams in ultra-high performance concrete reinforced and normal-strength concrete. *International Journal of Fatigue*, 167, 107330.,» *International Journal of Fatigue*, vol. 167, 2023.
- [13] W. Li, B. Chen, L. H. Han y D. Lam, «Experimental study on the performance of steel-concrete interfacial in circular concrete-filled double skin steel tube,» *Thin-walled structures*, 2020.
- [14] A. S. D. R. Gautham, «Behavior of steel-reinforced composite concrete columns under combined axial and lateral cyclic loading,» *Journal of Building Engineering*, vol. 39, 2021.
- [15] C. Pantelides, M. E. Gibbons y R. L. D., «Axial Load Behavior of Concrete Columns Confined with GFRP Spirals,» *Journal of Composites for Construction*, vol. 17, nº 3, pp. 305-313, 2013.
- [16] A. Vallejos Balladares, «Flexural-shear resistance of prestressed concrete members without shear reinforcement,» S/E, Delft, Países Bajos, 2022.
- [17] K. Schabowicz, «Non-Destructive Testing of Materials in Civil Engineering,» *Materials*, 2019.
- [18] W. Pole, *The life of Sir William Fairbairn*, Londres: Longmans, Green and Co., 1877.
- [19] M. R. León Ordoñez y R. D. Lema Guamán, «Análisis y diseño de pórtico de ensayo para Laboratorio de Ingeniería Civil,» D/E, Cuenca, Ecuador, 2019.
- [20] IBERTEST SAE, «Ibertest. Advanced Testing Solutions,» [En línea]. Available: <https://www.ibertest.es/en/products/frames-for-structural-tests-and-large-elements/>.
- [21] J. Bazan, «Estudio experimental y numérico del comportamiento de flexión de vigas de concreto armado reforzadas con bandas de FRP,» S/E, Lima, Perú, 2015.
- [22] L. Pérez Gacítua, «Diseño de un marco de carga para la Facultad de Ingeniería,» S/E, Concepción, Chile, 2017.
- [23] ASTM, «Standard Test Methods for Bend Testing of Metallic Flat Materials for Spring Applications Involving Static Loading,» American Society for Testing and Materials, 2022.
- [24] ASTM, «Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading),» American Society for Testing and Materials, 2022.
- [25] ASTM, «Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Field,» American Society for Testing and Materials, 2022.
- [26] ASTM, «Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory,» American Society for Testing and Materials, 2022.
- [27] ASTM, «Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam With Center-Point Loading),» American Society for Testing and Materials, 2022.
- [28] ASTM, «Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens,» American Society for Testing and Materials, 2021.
- [29] ASTM, «Standard Test Methods of Compression Testing of Metallic Materials at Room Temperature,» American Society for Testing and Materials, 2019.
- [30] ASTM, «Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression,» American Society for Testing and Materials, 2022.
- [31] M. Babiak, M. Gaff, A. Sikora y S. Hysek, «Modulus of elasticity in three- and four-point bending of wood,» *Composite Structures*, vol. 204, nº 15, pp. 454-465, 2018.
- [32] S. Francke, B. Franke y A. M. Harte, «Failure modes and reinforcement techniques for timber beams – State of the art,» *Construction and Building Materials*, vol. 97, pp. 2-13, 2015.
- [33] B. C. Bal, «Flexural properties, bonding performance and splitting strength of LVL reinforced with woven glass fiber,» *Construction and Building Materials*, vol. 51, nº 31, pp. 9-14, 2014.
- [34] Soleimani, S. M., & Sayyar Roudsari, S. (2019). Analytical Study of Reinforced Concrete Beams Tested under Quasi-Static and Impact Loadings. *Applied Sciences*, 9(14), 2838. MDPI AG. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.3390/app9142838>