

Implementation of an Experimental Model for Teaching Prestressed Concrete Structures

Orta, Luis

Tecnologico de Monterrey, Mexico, luis.orta@tec.mx

Abstract— This study describes the implementation of an experimental model in teaching prestressed concrete structure design, focusing on the Lab-Based Learning (LBL) methodology. The aim of the research was to develop a low-cost and easy-to-implement an experimental learning activity in unsophisticated civil engineering labs allowing students to observe the effect of prestressing cables on concrete beams. The activity involved the definition of a simple test with low-density polystyrene beams, where students compared a specimen without prestressing to one with reinforcement. Variables such as maximum strength, stiffness, and ductility of the beams were measured. The effectiveness of this methodology was assessed through surveys conducted with students before and after the experimental activity, recording improvements in the interest in the subject, identification of important variables, and technical understanding of the structural behaviour of prestressed beams. The results show a positive impact on student learning, with students reporting greater accuracy in the use of technical terminology and in their structural design abilities. The activity also demonstrated acceptance of the experimentation-based teaching model, although areas for improvement were identified regarding the precision of measurements and the time allocated for result analysis. This study highlights the usefulness of LBL as a didactic tool in the teaching of prestressed concrete systems, providing a foundation for future implementations and adaptations in structural engineering courses.

Keywords—Prestress concrete, Lab-based learning, educational innovation, higher education.

Implementación de un modelo experimental para la enseñanza de estructuras de concreto presforzado

Orta, Luis

Tecnologico de Monterrey, México, luis.orta@tec.mx

Resumen – Este estudio describe la implementación de un modelo experimental en la enseñanza del diseño de estructuras de concreto presforzado, centrado en la metodología de aprendizaje basado en laboratorio (Lab-Based Learning, LBL). El objetivo de la investigación fue desarrollar una práctica de bajo costo y fácil implementación en laboratorios básicos de ingeniería civil, que permitiera a los estudiantes observar el efecto de los cables de presfuerzo en vigas de concreto. La actividad consistió en la creación de una prueba de mesa con vigas de poliestireno de baja densidad, donde los estudiantes compararon un espécimen sin presfuerzo con otro refuerzo. Se midieron variables como la resistencia máxima, rigidez y ductilidad de las vigas. La efectividad de esta metodología fue evaluada mediante encuestas a estudiantes antes y después de la actividad experimental, registrando mejoras en el interés por el tema, la identificación de variables clave y la comprensión técnica del comportamiento estructural de las vigas presforzadas. Los resultados indicaron un impacto positivo en el aprendizaje de los estudiantes, quienes manifestaron una mayor precisión en el uso de terminología técnica y en su capacidad de diseño estructural. La práctica también evidenció la aceptación del modelo de enseñanza basado en experimentación, aunque se identificaron áreas de mejora relacionadas con la precisión de las mediciones y el tiempo asignado para el análisis de resultados. Este estudio destaca la utilidad de LBL como herramienta didáctica en la enseñanza de sistemas de concreto presforzado, proporcionando una base para futuras implementaciones y adaptaciones en cursos de ingeniería estructural.

Palabras clave– Concreto presforzado, aprendizaje con laboratorio, innovación educativa, educación universitaria.

INTRODUCCIÓN

El uso de experimentos de laboratorio es reconocido como un medio efectivo para el proceso de aprendizaje de los estudiantes en las áreas de ingeniería y ciencias [1]. La enseñanza a través de este método es considerada esencial. Desde muchos años atrás se han identificado los logros importantes que se adquieren a través de este método; estos son: habilidades (manipular objetos, herramientas, equipo), establecer hipótesis (se mejora o se reduce el desempeño), habilidades cognitivas (mayor entendimiento de los conceptos) y las actitudes (trabajo en equipo, coordinación con otros, cumplimiento y seguimiento de las medidas de seguridad) [1]. De igual forma, esta metodología aumenta el interés de los estudiantes por validar u observar pruebas reales donde se muestren los conceptos teóricos. Incluso, se ha investigado el uso de actividades de laboratorio con

estudiantes de bajo rendimiento para provocar un desarrollo cognitivo más elevado [1].

Esta metodología ha evolucionado hasta reconocer una técnica didáctica basada en la experimentación (Lab-Based Learning), LBL [2], similar a otras técnicas como PBL (Problem-Based Learning) y POL (Project-Oriented Learning). Los estudiantes obtienen un beneficio adicional si se involucran desde la fabricación del prototipo. Para después, inducirlos a identificar las variables a medir, establecer hipótesis de lo que se espera observar y el tipo de equipo de medición que se requiere. De igual forma, se sugiere que los estudiantes realicen una investigación [2] de experimentos similares y sus resultados. Esta metodología también se ha diseminado con el acrónimo de IBL (Inquiry-Based Learning) - aprendizaje basado en la indagación [3]. El método se define como actividades donde los estudiantes desarrollan ideas científicas basado en la evidencia observada de la experimentación. La aplicación de esta metodología se sugiere para la conceptualización general del conocimiento. Se espera que se utilice para transmitir el concepto de forma genérica y despertar el interés y la curiosidad en los estudiantes [3]. De igual forma se conoce que el aprendizaje LBL produce un mejor desempeño de los estudiantes.

El diseño y ejecución de las actividades para implementar la metodología LBL en cursos presenta varios retos. Algunos de ellos incluyen la definición de las preguntas científicas a responder, el establecimiento de las hipótesis, los materiales y procedimientos del experimento, y el análisis de los datos para establecer conclusiones [4]. El aspecto de los materiales y procedimientos del experimento recae en el docente. Así como el análisis de los datos que se obtienen cuando se mide el aprovechamiento de los estudiantes a través del uso de esta metodología.

En particular, realizar pruebas de laboratorio para sistemas de construcción presforzada presenta retos adicionales. Por un lado, realizar una prueba con una viga a escala real implica que la institución educativa cuente con equipo sofisticado y de alto costo para la fabricación y prueba. Además, debe contar con personal técnico de laboratorio especializado en la instrumentación de vigas de concreto presforzado. Algunos equipos incluyen, galgas extensométricas, celdas de carga, actuadores de alta capacidad y medidores de desplazamiento. Otra alternativa es una visita guiada a una planta de fabricación de elementos de concreto presforzado. Sin embargo, esta opción deja fuera la interacción de los alumnos e implica logística de viaje y gasto

en viáticos. Debido a esto, se requiere el diseño de una prueba alterna que implique acción por parte de los estudiantes, de bajo costo y de fácil implementación en un laboratorio de ingeniería civil básico.

OBJETIVO

Utilizar una prueba de laboratorio alterna para explicar y demostrar el efecto de los cables de presfuerzo en vigas de concreto. Para lograr este objetivo se diseñó una prueba factible de mesa para entender el concepto general del sistema de construcción. Se identificaron los materiales a utilizar, los métodos de presfuerzo, las condiciones de apoyo del sistema, las cargas a aplicar y las mediciones de desplazamientos. La práctica que se ha diseñado es factible de elaborar y ejecutar en un laboratorio con equipo sencillo y los estudiantes desarrollan el concepto general de un sistema de construcción a base de elementos de concreto presforzado.

ALCANCE

El presente trabajo se enfoca en un curso de diseño de estructuras de concreto presforzado, dirigido a estudiantes de pregrado cursando una concentración en su plan de estudios. El sistema de construcción a base de elementos presforzados constituye uno de los sistemas modernos para puentes vehiculares y peatonales. El Reto (proyecto) del curso consiste en el diseño de un puente peatonal para comunicar un edificio de oficinas con punto de acceso.

METODOLOGÍA

La prueba consiste en una viga simplemente apoyada con carga al centro del claro, como se muestra en la Fig. 1. La longitud de la viga es 100 cm y su sección transversal es rectangular de ancho 5 cm por 10 cm de peralte. La viga se fabrica de una placa de poliestireno de baja densidad, ver Fig. 1a. Se fabrican dos especímenes para fines de comparación. El espécimen E1 se utiliza como testigo de referencia, donde no se incluye un cable de presfuerzo. Este es el espécimen de control. El espécimen E2 se refuerza con un cable de presfuerzo a través de un hilo de material sintético. El presfuerzo se aplica a la misma excentricidad a lo largo de la viga y se ancla a dos placas en los extremos, ver Fig. 1b.

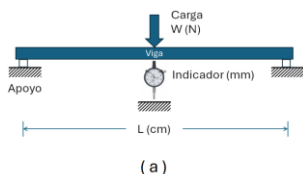


Figura 1 Prototipo

La viga de presfuerzo se ranura en la parte inferior utilizando un cortador comercial de unicel como se muestra en la Fig. 2. El tamaño de la ranura es de aproximadamente 1 mm de espesor, 1 cm de profundidad y 1 m de longitud (a todo lo largo del espécimen). Esta profundidad de 1 cm genera una excentricidad de 4 cm en la fuerza del cable. El sistema de anclaje en los extremos consistió en una placa de 5 cm x 10 cm x 7 mm de espesor, fabricada de un material comercial conocido como *Mampara Foam Board blanco* en México; esencialmente es una espuma con un acabado plástico en ambas caras. Se utilizó una navaja retráctil (*cutter*) para hacer una perforación alineada con la ranura. El cable consistió en un hilo de nylon de 2 m de longitud. Se generó un cincho haciendo un nudo en los extremos del cable. Se introdujo un pequeño palo de madera (aproximadamente de 1 cm de longitud y 7 mm de diámetro) en un extremo y se pasó el cincho por la placa y la perforación. Usando otro palo de madera similar se pasó en el otro extremo del cincho y se sujetó a la placa del extremo. Esto generó una contra flecha (deflexión inicial) de aproximadamente 2 cm al centro del claro.

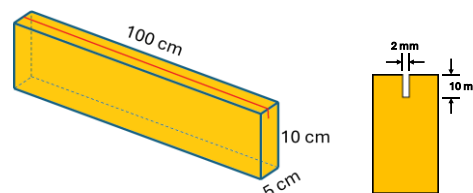


Figura 2 Ranura longitudinal para instalar el cable

El grupo de alumnos se organizó en equipos de tres integrantes. Cada equipo fabricó los dos especímenes. Cada espécimen se apoyó en sus extremos utilizando bloques de mampostería. La carga consistió en placas metálicas de peso conocido. Se contó con placas de 250 g, 500 g y 1 kg. Se midió el desplazamiento utilizando una cinta métrica y realizando los registros de carga y desplazamiento de forma manual. Uno de los inconvenientes que se tuvo es para incrementar la carga a más de 2 kg. Al principio se incrementó la carga en múltiplos de 250 g (se removían dos placas de 150 g y se colocaba una de 500 g) y después se descargó el espécimen para recargarse con incrementos de 1 kg hasta la lectura previa y continuar cargando con incrementos de 250 g hasta la falla. Las pruebas de carga requirieron un máximo de 8 kg y los desplazamientos máximos fueron de 16 cm.

Cada espécimen se sujeta a una carga incremental al centro de claro y se registra su magnitud y el desplazamiento que ocurre en la viga en el mismo punto. Se realizan observaciones y se describe el comportamiento conforme

avanza la práctica. Los resultados numéricos se registran en una base de datos para después ser mostrados en gráficas.

Se estudiaron tres variables de respuesta: la máxima resistencia del sistema, la rigidez o flexibilidad de cada espécimen durante la fase elástica y la ductilidad de la viga cuando se acerca el punto de falla estructural. Los alumnos realizan los cálculos correspondientes utilizando los conceptos vistos en cursos previos de mecánica de materiales.

Durante la prueba del espécimen de control (E1) se observó una respuesta lineal con cargas entre 1 kg y 2 kg. Para cargas entre 2 kg y 5 kg, el espécimen presforzado mostró un comportamiento muy cercano a lineal-elástico. Esta observación clarificó el efecto del presfuerzo en elementos de concreto a través de incrementar el rango de la respuesta elástica. Para el caso de concreto presforzado, esto se debe a que la generación de grietas por flexión está restringida por la fuerza de compresión del cable.

La carga de falla del espécimen presforzado (E2) fue aproximadamente un 68% más grande que la carga de falla del espécimen de control (E1). Esta observación clarificó el concepto del incremento de la resistencia a flexión. En el caso de vigas de concreto, este incremento se puede asociar a un mayor esfuerzo de fluencia (típicamente 1600 MPa) del acero de refuerzo que consiste en los cables.

De igual forma el desplazamiento último a la falla fue aproximadamente un 60% mayor en el espécimen E2. Este desplazamiento de falla para el caso del espécimen E2 incluye la contra flecha inicial de aproximadamente 2 cm. Esto permitió observar como las vigas de concreto presforzado admiten una carga inicial para llegar al cero desplazamiento al centro del claro. Este desplazamiento en la práctica profesional se consume por el peso propio de la viga y una porción de la sobrecarga muerta; dejando así una mayor disponibilidad de desplazamiento permitido para la carga viva.

Para los fines de esta investigación se realizaron tres encuestas anónimas a los estudiantes. La población consistió en 14 alumnos de campus Puebla que estudian el cuarto año del programa de ingeniería civil del Tecnológico de Monterrey (Tec). Los estudiantes cursan la concentración de Eficiencia y Digitalización de la Construcción, clave CV3002C. Las encuestas incluyeron de 8 a 10 preguntas, de las cuales únicamente 5 se utilizaron para medir el impacto de la implementación y se repitieron en las tres encuestas. Las preguntas consistieron en evaluar tanto aspectos técnicos como de sentimiento. La Tabla I muestra las preguntas que se incluyeron en las encuestas.

TABLA I PREGUNTAS DE LAS ENCUESTAS

Símbolo	Pregunta
INT	Interés en conocer el tema
COM	Descripción del comportamiento estructural
VAR	Identificar las variables importantes
DIS	Diseñar la configuración más efectiva del presfuerzo
OPN	Opinión de la actividad

La primera encuesta fue de diagnóstico. Se aplicó antes de comenzar las clases del módulo y además se solicitó (y se vigiló) que no consultaran fuentes de información en la red o utilizando inteligencia artificial. La segunda encuesta se aplicó

después de exponer los conceptos teóricos en una sesión de clase. Se utilizaron apoyos visuales como presentaciones de *PowerPoint* y fotografías de obras de construcción existentes. La última y tercera encuesta se aplicó después de la práctica de laboratorio. Cabe mencionar que los estudiantes prefabricaron los prototipos a través de un documento que lista los materiales y procedimientos básicos de elaboración.

RESULTADOS

Los estudiantes mostraron gran interés y entusiasmo desde la primera sesión cuando sabían que se realizaría una práctica de laboratorio. Esto se observó en la participación del 100% de los estudiantes en contestar la encuesta de diagnóstico. La segunda y tercera encuesta fueron respondidas por el 64% de los participantes. Esto se debió a que los estudiantes no asistieron en las sesiones donde se aplicaron estas encuestas. Aun así, se considera que la población que contestó todas las encuestas es significativa para poder establecer algunas conclusiones de los resultados obtenidos.

El parámetro de interés por conocer el tema, $y_1 = INT$, se evaluó numéricamente con la siguiente expresión:

$$y_1 = 100 * (\sum x_i) / (n * w) \quad (1)$$

donde x_i representa la calificación numérica que cada estudiante seleccionó en el rango de $0 \leq x_i \leq 5$, n es la cantidad total de respuestas y $w = 5$ es el puntaje máximo posible de cada respuesta. Esta expresión permite evaluar las respuestas en una escala de 0 a 100 puntos posibles. Este parámetro resultó con una magnitud de 94 puntos para la encuesta de diagnóstico. Esto indica un alto interés en aprender y conocer del tema teórico. Además, se obtuvo un incremento del 1% y 4% para los casos de antes y después de la práctica de laboratorio con respecto a la encuesta de diagnóstico. Este incremento sugiere que los estudiantes no cambiaron significativamente su interés y que una vez conociendo que existe una prueba de laboratorio su interés es alto y no cambia. Un incremento en esta variable nos permite concluir que esta metodología promueve el interés por los conceptos teóricos en los estudiantes.

El parámetro del comportamiento se midió a través de una nube de palabras y un análisis subjetivo de éstas. La Fig. 3 muestra los resultados para las tres encuestas. La Fig. 3a corresponde a la encuesta de diagnóstico, donde se puede observar que los alumnos simplemente identifican las palabras “viga” y “tensión”. La Fig. 3b muestra un cambio positivo porque aparecen las palabras “compresión” y “concreto”. Finalmente, la Fig. 3c muestra un cambio significativo. Las palabras cable, concreto, resistencia, tensión y compresión son parte fundamental del comportamiento de estos sistemas de construcción. Las palabras “esfuerzo” se repite con mayor frecuencia y aparece la palabra “deflexión”. Estos son los efectos principales del presfuerzo; esfuerzos internos y deflexiones o desplazamientos. Durante las sesiones posteriores a la práctica de laboratorio, las sesiones de clase presentaron discusiones e inquietudes de mayor relevancia para diseñar este tipo de estructuras.

El parámetro de identificar variables se evaluó numéricamente a través de un contador sumativo de la cantidad de variables correctas mencionadas por los estudiantes. En este caso, al igual que y_1 , también se normalizó a una escala de 0 a 100 puntos posibles. Este parámetro presentó una magnitud de 29 puntos en la encuesta diagnóstica e indica que los estudiantes tenían poco conocimiento previo del tema en términos de ingeniería. Después de la explicación teórica, el parámetro se duplicó a 58 puntos. Por lo tanto, la explicación del docente es efectiva y puede alcanzar impacto significativo. Finalmente, después de la práctica de laboratorio, el parámetro alcanzó 62 puntos. Logrando así un incremento adicional del 7% con respecto a la explicación teórica. Es posible que este incremento se pueda considerar marginal y se deba a que la práctica de laboratorio no utilizó concreto como material de prueba sino poliestireno como un sustituto potencial. Esto sugiere que, para incrementar este parámetro, las pruebas reales con concreto siguen siendo requeridas.

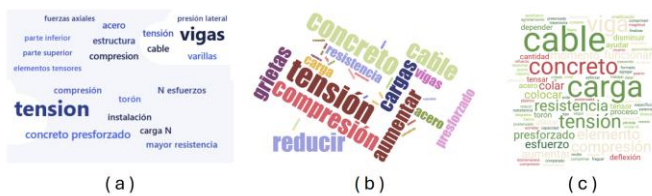


Figura 3 Descripción del comportamiento estructural

El parámetro correspondiente a la configuración más efectiva de los cables de presfuerzo, DIS , tiene un gran impacto en las competencias de egreso de los estudiantes. Este parámetro identifica la competencia de diseño por seguridad estructural; una característica fundamental en un ingeniero civil que certifica la resistencia, rigidez y ductilidad de la infraestructura que se construye. En este parámetro, los estudiantes seleccionaban la opción más eficiente para soportar las cargas de la viga que se muestra en el lado izquierdo de la Fig. 4. Las posibles se muestran en el lado derecho de la figura.

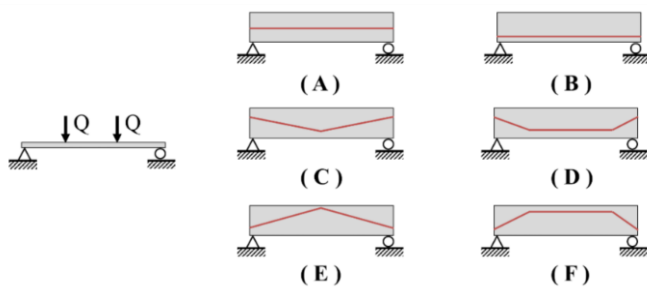


Figura 4 Evaluación de competencia disciplinar

Las opciones fueron evaluadas con la rúbrica que se muestra en la Tabla II. La respuesta correcta es la opción D, obteniendo la mayor cantidad de marcas posibles. Las opciones A, B y C son correctas; sin embargo, no son la

opción más eficiente. Las opciones E y F son incorrectas debido a que la posición del cable está invertida.

TABLA II CALIFICACIÓN NUMÉRICA DE LAS RESPUESTAS DIS

Opción	Calificación	Comentarios
A	1	Sin excentricidad
B	2	Excentricidad constante
C	3	Excentricidad con un punto
D	4	Excentricidad con dos puntos
E	0	Excentricidad inversa
F	0	Excentricidad inversa

De esta forma, el parámetro de diseño, $y_2 = DIS$, se evaluó numéricamente con (1), pero ahora $0 \leq x_i \leq 4$ representa la cantidad de marcas que cada estudiante obtiene (dependiendo de su respuesta), n es la cantidad total de respuestas y $w = 4$ es el puntaje máximo posible de cada respuesta. Esta expresión permite evaluar las respuestas en una escala de 0 a 100 puntos posibles.

La magnitud de este parámetro resultó de 45 puntos para la encuesta de diagnóstico; reflejando el desconocimiento previo de los estudiantes. Esta magnitud se incrementa un 49%, pasando de 45 a 67 puntos después de la explicación teórica en el salón de clases. Cabe mencionar, que la explicación no incluyó ningún ejercicio numérico o escenarios similares al de la pregunta. Después de la práctica de laboratorio, la evaluación de este parámetro se incrementó de 67 a 78 puntos; es decir, un 16% adicional. Este incremento es significativo y refuerza la hipótesis del mejoramiento del desempeño y el entendimiento de los conceptos teóricos. También se puede señalar que no es hasta la práctica de laboratorio que se obtiene un puntaje mayor a 70; siendo este el puntaje mínimo para acreditar un curso en el Tec.

La gráfica que se muestra en la Fig. 5 presenta de forma resumida el impacto de la implementación de esta actividad. Las variables INT , DIS y VAR se muestran para las tres encuestas. La encuesta de diagnóstico se identifica como CD101W, la posterior a la explicación teórica del docente como CD202W y la posterior a la implementación de esta actividad como CD303W. El eje vertical representa la magnitud de y en una escala de 0 a 100 puntos posibles. Se puede observar que en todos los casos la implementación incrementa el puntaje de estos parámetros. Esto indica que se tiene un impacto positivo para los tres parámetros y significativo para la competencia disciplinar. El parámetro es una competencia de área definida en el modelo educativo Tec21 [5]. Esto representa una competencia que todos los estudiantes de ingeniería deben desarrollar y demostrar, independientemente de su área de especialización. Esto sugiere que el alcance de este trabajo se puede aplicar a otras áreas de la ingeniería y no únicamente en ingeniería civil.

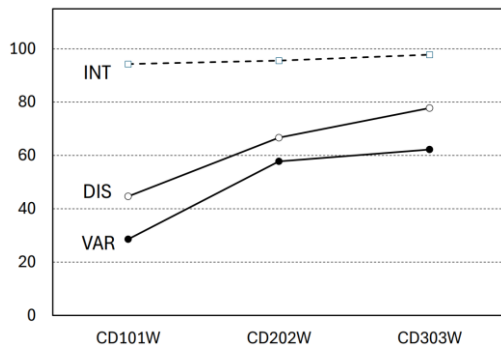


Figura 5 Impacto de la implementación

El último parámetro corresponde a la opinión general de los alumnos de la actividad. Este parámetro obtuvo una magnitud de 100 puntos. Esto refleja la gran aceptación de los estudiantes de la técnica de enseñanza basada en la experimentación. De forma adicional se preguntó a los estudiantes los aspectos que más les agradó, los de mayor confusión y aquellos que tienen mejoría para las próximas versiones. La Fig. 6 muestra la nube de palabras de cada una de las respuestas. Se puede observar que la práctica, observar la falla y entender el presfuerzo sobresalen e indican una aceptación positiva de la práctica de laboratorio. Los estudiantes encontraron confuso cómo se aplicaría la carga y los extremos muertos y activos (propios del sistema constructivo). Esto indica que el diseño de la práctica es innovador, pues este tipo de inquietudes representan los obstáculos que se tuvieron que vencer durante el diseño del experimento. Finalmente, se observa que las áreas de oportunidad están en la medición con precisión o exactitud e incrementar el tiempo disponible para la discusión de las observaciones y resultados de la práctica.

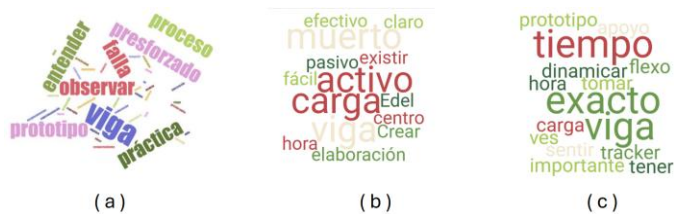


Figura 6 Opinión de los estudiantes

EVIDENCIA DE LOS ESTUDIANTES

Como parte de las actividades de evaluación, se solicitó que cada equipo de estudiantes elaborara un reporte técnico detallado sobre la prueba experimental realizada. Este reporte debía incluir una descripción completa de los materiales utilizados, los procedimientos seguidos en la elaboración del prototipo, el tipo de carga aplicada, así como las variables estructurales que se registraron durante la prueba. Esta actividad tuvo como objetivo fortalecer las competencias de análisis estructural en un contexto práctico, promoviendo la integración entre el conocimiento teórico y la experiencia de laboratorio.

Los reportes entregados por los estudiantes mostraron un nivel general de calidad aceptable, cumpliendo con los criterios mínimos establecidos en la rúbrica de evaluación. No obstante, se identificaron varios trabajos con una calidad sobresaliente, tanto en redacción técnica como en el rigor del análisis estructural presentado. La Fig. 7 ilustra un ejemplo de estos trabajos. En la Fig. 7a se presenta la gráfica de la respuesta estructural obtenida a partir de los datos experimentales de uno de los equipos, mientras que en la Fig. 7b se muestra una fotografía capturada durante el desarrollo de la prueba, en la que se observa a los estudiantes participando activamente en la actividad experimental; reforzando el carácter formativo y participativo de la experiencia de aprendizaje.

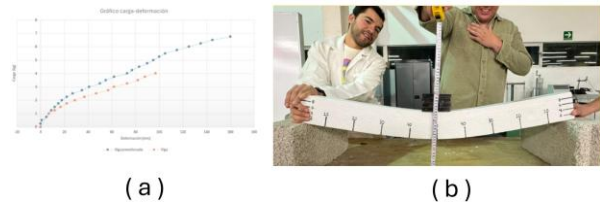


Figura 7 Evidencia de los estudiantes

CONCLUSIÓN

En este trabajo se desarrolló e implementó una prueba experimental para demostrar los principios básicos de la respuesta estructural de vigas de concreto presfuerzo y superar los obstáculos que se tienen con pruebas que requieren mucho más tiempo, mayor instrumentación y cantidad de recursos financieros. La metodología corresponde a la enseñanza basada en la experimentación, LBL (*Lab-Based Learning*) por sus siglas en inglés. La conclusión general es que el método es efectivo para cursos de ingeniería civil en el área del diseño estructural. La aceptación de los estudiantes y la mejora de su aprovechamiento se observó en cinco variables medidas antes de iniciar el curso, después de una explicación teórica por parte del docente y después de la experimentación.

El interés de los estudiantes por conocer más del tema es alto una vez que tienen conocimiento de la práctica de laboratorio. Después de la práctica el interés se mantiene en niveles altos y se incrementa de forma marginal. El comportamiento de la estructura se describe de forma más precisa y con un vocabulario más técnico después de la práctica de laboratorio. En este aspecto, la instrucción del docente tiene poco impacto. No ocurre igual cuando los estudiantes identifican las variables físicas de gran importancia en el tema. La explicación del profesor fue clave para que los alumnos identificaran dichas variables. Sin embargo, no se incrementó mucho después de la práctica de laboratorio. Esto indica que las pruebas con concreto real siguen siendo importantes en la formación de los ingenieros civiles.

Los resultados obtenidos muestran un impacto positivo significativo en el desarrollo de la competencia disciplinar relacionada con el diseño estructural. En particular, se

evidenció un incremento del 17 % en el nivel de comprensión por parte de los estudiantes, en comparación con la explicación teórica tradicional impartida por el docente. Este aumento en el entendimiento refuerza la eficacia de la práctica experimental como estrategia de enseñanza, al traducir conceptos abstractos en experiencias tangibles que favorecen el aprendizaje significativo.

Asimismo, la percepción de los estudiantes respecto a la actividad fue notablemente favorable. La mayoría expresó que la práctica contribuyó de manera sobresaliente a consolidar sus conocimientos sobre el comportamiento estructural del concreto presforzado. Con base en estos hallazgos, se recomienda la incorporación de esta práctica en cursos donde se aborde el diseño y análisis de elementos estructurales de concreto presforzado, ya que permite vincular la teoría con la realidad física de este tipo de estructuras, potenciando la formación técnica de los futuros ingenieros civiles.

TRABAJO FUTURO

En la encuesta de la actividad se mencionaron dos aspectos de mejora: el primero corresponde a la medición de las variables físicas y el segundo corresponde a incrementar el tiempo dedicado a la práctica - esto con el fin de incluir una mayor discusión de las observaciones y resultados obtenidos. Se considera que la próxima implementación incluya un micrómetro de carátula para registrar los desplazamientos de forma más precisa y un dinamómetro para registrar la carga inicial del cable.

Otro de los aspectos a incluir en una versión futura es el cálculo de la resistencia del poliestireno y la estimación de la fuerza de presfuerzo.

De la prueba del espécimen de control se puede estimar la resistencia a la ruptura del poliestireno de baja densidad. La ecuación (2) determina la resistencia f , esto es:

$$f = 1.5 Q_m L / (bh^2) \quad (2)$$

donde Q_m es la máxima carga a la falla, L es la longitud del espécimen (1 m), b es el ancho (5 cm) y h es el peralte (10 cm) de la sección transversal. Usando estos datos, el resultado de la resistencia se estima como $f = (0.3 \text{ cm}^{-2}) Q_m$.

De igual forma, se puede estimar la rigidez relativa a la flexión EI . La magnitud se calcula utilizando la siguiente expresión

$$EI = QL^3 / (48\Delta) \quad (3)$$

donde Q es la carga y Δ es la lectura para rangos de carga en la zona elástica. Esta rigidez relativa se puede asociar a la contra flecha para conocer la fuerza de presfuerzo utilizando (4)

$$P = QLD_0 / (6e\Delta) \quad (4)$$

donde D_0 es la contra flecha inicial (aproximadamente 2 cm) y e es la excentricidad de aproximadamente 4 cm. De tal forma que la carga de presfuerzo se puede estimar como $P = (8.33 \text{ cm}) \cdot (Q/\Delta)$. El cociente Q/Δ también puede estimarse a través

de una regresión lineal de los primeros puntos carga-desplazamiento en la zona elástica inicial. Con estos datos (P , e , Q) se puede construir la gráfica carga-desplazamiento para la zona elástica inicial; o bien, determinar la distribución de esfuerzos teóricos en cualquier sección transversal de la viga y poder comprobar el esfuerzo de ruptura del poliestireno de baja densidad.

AGRADECIMIENTOS

Aprovecho esta oportunidad para agradecer a los estudiantes que participaron de forma activa y desinteresada en este estudio. Al Tecnológico de Monterrey por la oportunidad de llevar a cabo esta investigación en la concentración del programa de ingeniería civil y el apoyo financiero del Fondo de Apoyo a Publicaciones (FAP) del Tec de Monterrey.

REFERENCIAS

- [1] Blosser, P. (2024). *The Role of Laboratory in Science Teaching* [Online]. National Association for Research in Science Teaching. Available: <https://narst.org/research-matters/laboratory-in-science-teaching>.
- [2] Queen's University. (2024). *Lab-Based Learning* [Online]. Centre for Teaching and Learning. Available: <https://www.queensu.ca/ctl/resources/instructors/instructional-strategies/lab-based-learning>.
- [3] J. Kranz, A. Baur, and A. Moller, "Learners' Challenges in Understanding and Performing Experiments: a systematic review of the literature," *Studies in Science Education*, vol. 59, no. 2, pp. 321-367, Nov 2022.
- [4] P. Sauer, "Art of Designing Teaching Laboratory Experiments: The case of water management," *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, vol. 122, pp. 204-209, March 2014.
- [5] Tecnológico de Monterrey, "Modelo Educativo Tec21," Tec de Monterrey, México, 2018.